





UNIVERSITÀ  
degli STUDI  
di CATANIA

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura - DICAR  
Corso di dottorato in VALUTAZIONE E MITIGAZIONE DEI RISCHI URBANI E TERRITORIALI  
ciclo XXXII

**The particlizing of matter  
between ORDER & CHAOS**  
*analisi e sperimentazione*

Grazia Maria Nicolosi

Maggio 2020

supervisore\_prof. Sebastiano D'Urso

gruppo tesi\_prof. Sebastiano D'Urso  
prof. Massimo Cuomo  
prof. Bruno Messina

Tesi di Dottorato di ricerca in Valutazione e Mitigazione dei rischi urbani e territoriali  
Settore Scientifico Disciplinare prevalente\_ Composizione Architettonica e Urbana ICAR/14  
The particlizing of matter between ORDER & CHAOS\_ analisi e sperimentazione  
© Grazia Maria Nicolosi - Maggio 2020  
nicolosigrazia@unict.it

Keywords: particellizzazione, spatial layering, forma informale, architettura rizomatica, architettura parametrica, sistemi aggregati

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura  
Università degli Studi di Catania  
Corso di Dottorato di ricerca in Valutazione e Mitigazione dei rischi urbani e territoriali - XXXII ciclo  
Coordinatore del dottorato: prof. Massimo Cuomo

La presente tesi di carattere scientifico divulgativo si avvale del diritto di citazione, per testi e immagini, ai sensi dell'art. 70 della Legge sul Diritto d'Autore e dell'art. 10 della Convenzione di Berna, in accordo agli artt. 9 e 21 della Costituzione Italiana e nello spirito del fair use anglosassone.

## **Ringraziamenti**

Desidero ringraziare tutti coloro che hanno contribuito, in maniera differente, alla stesura della presente tesi.

Innanzitutto, il mio relatore, il prof. Sebastiano D'Urso, per la rigorosa attenzione al mio percorso di ricerca durante questi anni, per avermi guidato e sostenuto oltreché per avermi ancora una volta trasmesso passione e conoscenza per una disciplina così entusiasmante come l'architettura.

Ringrazio anche i miei correlatori, il prof. Massimo Cuomo e il prof. Bruno Messina, per aver contribuito tramite consigli e suggerimenti a tracciare e arricchire la presente tesi di ricerca.

Rivolgo un ringraziamento particolare anche ai ricercatori e colleghi del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura di Catania e dell'Istituto di Computational Design di Stoccarda per l'apporto e le idee condivise. Il prof. Rosario Grasso e la ricercatrice Marisa Spena per la contaminazione tra i nostri saperi.

Vorrei infine ringraziare la mia famiglia, tutta, e i miei amici che hanno sempre creduto fortemente in me.



## **Abstract**

In the current contemporary scenario, new ways of thinking about the process of conceiving an architecture suggest the possibility of integrating it through new design tools. The major objective of this study is to investigate whether it is possible to design architectural systems consisting of aggregate elementary components that merge aesthetics, statics, sustainable materials and technologies according to the language of the emerging forms of contemporary architecture. Language contemporaneity for which - according to the common definition among those who dealt with Computational Design in recent years - more than the final form of architecture, the morphological structure and the action of form creating, inspired by the processes found in nature and which relies on the programming of generative algorithms, not necessarily computerized but whose programming through a machine becomes favoured. The aim of this study is to clarify several aspects of the parallelism between the morphological form's principles naturally occurring and the equivalent in architecture, the potential of matter when it becomes part of the process of abstraction in architecture and the used simulation methods. Furthermore, these themes inevitably led to further considerations that concern the existence of a reflection about order and chaos in architecture equivalent to the idea present in natural sciences. It is discussed if the computational method could be understood as a mere tool at the service of the architecture or if it is the unique protagonist in the creative and generative process of form. Initially, the investigation is carried out on the underlying theoretical apparatus and therefore on the study of the spatial paradigms of the 'particlizing' of matter, namely the reduction

of it into elementary components and of the 'spatial layering'. Hence the definition of order and chaos in nature and architecture. Following, the investigation into these issues in the design and in the testing of a specific spatial system that combines aesthetics, statics and those technologies aimed at protecting the environment. This prompted the investigation into a sustainable design and production process pursuing the aim of recyclable once this architectural system was disaggregated. So, one of the main objectives concerns the investigation, definition and testing of a specific emerging architectural system, consisting of the aggregation of elementary aimed at protecting the environment and resources with particular attention to the reduction of risks induced by climate change and CO<sub>2</sub> emissions. The interest in this topic was born from two orders of reason. The first one relates to the debate on contemporary architecture and the forms linked to the new parametric design tools in which this spatiality seems to occur, through the 'particlizing' of the 'material' and its simplification into elementary components. The second one concerns the process. In fact, this research theme introduces and allows to investigate at the same time the underlying theoretical apparatus which finds its conceptual roots both in the processes of generative morphogenesis and in the processes of computational technological production. That which was invisible of matter is now made visible and penetrable. Three figures of the Japanese tradition: *Ma*, *Oku* and *Miegakure*. The term 'particlizing' was coined for the first time by the Japanese architect Kengo Kuma and translated into the specific action of making the material abstract and to simplify it in elementary components, creating a type of spatiality that looks to the horizon, that grows in a rhizomatic way and that pursues a contemporary language. It is a specific condition of the material is indicated for which, the elements of which it is constituted - modular parts in large or small scale - although remaining distinct, appear cleverly aggregated to form a unit and define the substance of the material. The aggregation of these elements gives rise to emerging,



amorphous forms, the expression of a solid bond between particles, material and structure. 'Architecture of matter' is the investigation of its most intimate dimension, so that the character of solidity that would emerge perceiving it from the outside, is betrayed and fragmented inside. The balance between voids and volumes allows the eye that scrutinizes these aggregate systems to penetrate within their thickness and at the same time to resist it. The gaze stops at the border when it encounters the solidity of the material. It crosses it when it encounters the voids. Between volumes and voids, there are intermediate spaces, suspended spaces "in-between", fragmented spaces, multiple edges. No hierarchy between these spaces. And, the kaleidoscope of particles that makes up the thickness of the border is controlled by the size of the individual parts, by the proportion between the elements. The thesis is composed of three themed chapters: underlying theoretical apparatus; state of the art; conception, experimentation and verification. Through this research project, an emerging self-supporting aggregate construction system was defined, simulated and tested. It was created by the pouring of elementary components into different form-work subsequently removed which, like the behaviour of fluid when poured, it reaches a condition of stability once the reorganization has taken place. Different types of particles have been investigated and compared through the simulation and the experimentation. Therefore, the geometry of the single particle was defined, the method of aggregation between them and the shape of the 'container' to determine the global design. The solidity of the limit is disintegrated between chaos and order, between form and non-form. Furthermore, since the design approach with which this theme was addressed is that of computational shape creation, the reflection that derived from it concerned the comparison between the computational process within the digital and physical field of matter, understood here as an abstract aggregation of elementary components introducing the consequent theme of the relationship between artifice and nature in architecture.



## **Indice**

### **INTRODUZIONE**

- 13 L'oggetto di indagine \_il contesto, la terminologia
- 15 Lo scopo e gli obiettivi della ricerca
- 17 La metodologia
- 20 Il contributo alla ricerca
- 24 La struttura della tesi

### **APPARATO TEORICO**

#### **Particellizzazione della materia & Spatial Layering**

- 29 All'origine del termine 'particellizzazione'
- 39 Introduzione al tema dello Spatial Layering
- 39 Significato del tema dello Spatial Layering nel panorama dell'architettura tradizionale giapponese \_i concetti di *Ma*, *Oku* e *Miegakure*
- 47 Significato del tema dello Spatial Layering nel panorama dell'architettura contemporanea giapponese \_Kengo Kuma, Sōsuke Fujimoto, SANAA

#### **Ordine & Caos in natura e in architettura**

- 53 Estetica dell'ordine ed estetica del disordine in natura
- 74 Estetica dell'ordine ed estetica del disordine in architettura \_la forma, la figura, l'immagine
- 76 Forma & non forma
- 84 Forma informe
- 96 Morfogenesi computazionale e forme emergenti

#### **Lo scenario contemporaneo**

- 119 Computazione vs Computerizzazione

## CASO STUDIO\_I SISTEMI AGGREGATI\_analisi, ideazione, sperimentazione & verifica

### **Rischi urbani & territoriali**

139 I sistemi aggregati e la sostenibilità ambientale

### **Lo stato dell'arte**

147 I sistemi aggregati

149 Sistemi aggregati in natura\_classificazione e metodo di aggregazione

163 Sistemi aggregati in architettura\_classificazione e metodo di aggregazione

### **Il modello fisico della forma**

191 La matematica sottesa

### **Definizione della singola componente\_microscala**

#### **Morfogenesi & Simulazione**

197 L'approccio al problema. L'architettura, dialettica tra anti-natura e natura.

203 Metodo di ricerca, ideazione e sperimentazione

205 Simulazione della geometria della singola componente e dello stato dell'arte  
tramite l'impiego di software parametrici

219 La morfogenesi\_definizione della geometria della singola componente

228 Scelta del materiale e dello strumento per la prototipazione

229 La prototipazione rapida mediante stampante 3D

233 I test empirici

253 Risultati e conclusioni agli esperimenti\_il modello definitivo

### **Definizione del sistema aggregato\_macroscala**

#### **Morfogenesi & Simulazione**

268 La morfogenesi del sistema aggregato

274 Il software e il processo di progettazione parametrica

275 Verifica mediante la definizione e la simulazione di un padiglione temporaneo

## **CONCLUSIONI**

287 Riflessioni finali & Scenari futuri

## **APPENDICI**

293 Intervista a Hugh Dutton

297 Intervista a Henriette Bier e Maria Vogiatzaki

303 European Researcher's Night

**305 Riferimenti bibliografici**



## **Introduzione**

### **L'oggetto di indagine\_il contesto, la terminologia**

Nell'attuale scenario contemporaneo, nuovi modi di pensare il processo di ideazione di una opera d'architettura suggeriscono la possibilità di integrarlo tramite nuovi strumenti di progettazione. All'interno del presente progetto di ricerca ci si è chiesto se è possibile progettare sistemi costruttivi costituiti dall'aggregazione di componenti elementari che coniughino estetica, statica, materiali e tecnologie sostenibili coerentemente con il linguaggio delle forme emergenti dell'architettura contemporanea. Linguaggio della contemporaneità per cui - secondo la definizione comune tra chi si è occupato negli ultimi anni di Computational Design - si fa riferimento più che alla forma finale dell'architettura, alla struttura morfologica e al processo di creazione logica della forma, che è ispirata ai processi generativi presenti in natura e che si affida alla programmazione di algoritmi, non necessariamente computerizzata, ma la cui programmazione attraverso un elaboratore di calcolo diviene favorita. Attraverso tale progetto di ricerca volto alla valutazione e mitigazione dei rischi urbani e territoriali, ossia tramite l'indagine, l'ideazione e la sperimentazione di un sistema costruttivo emergente è stato indagato il parallelismo tra i principi morfologici generatori delle forme presenti in natura e i corrispettivi in architettura, le potenzialità della materia, intesa come aggregazione di particelle, nel momento in cui entra a far parte del processo di astrazione endemico all'architettura e i metodi di ideazione e simulazione computazionale da impiegare.

Inoltre, il contesto entro cui ci si è spinti ha inevitabilmente indotto ulteriori considerazioni che hanno riguardato la sussistenza di una sottesa idea di ordine e di caos in architettura equivalente all'idea presente nelle scienze naturali. Sono state studiate le implicazioni per la progettazione, per lo spazio, per la forma, per la tettonica e per il metodo computazionale, con cui sono stati affrontati il progetto e la sperimentazione. Ci si è chiesto inoltre se l'elaboratore di calcolo possa essere inteso come un mero strumento a servizio del progettista o se sia protagonista nel processo ideativo e generativo della forma in architettura. Inizialmente è stata condotta una indagine sull'apparato teorico sotteso e quindi sullo studio dei paradigmi spaziali della 'particellizzazione' della materia, ossia della riduzione di essa in componenti elementari e del paradigma spaziale dello 'spatial layering', contestualizzando tali temi tra Occidente e Oriente, tra tradizione e innovazione. Quindi la definizione di ordine e caos in natura e in architettura, ricercando l'esistenza di una differenziazione o complementarità di tali termini. Il termine inglese 'particlizing', tradotto qui con la parola 'particellizzazione', è stato coniato per la prima volta dall'architetto giapponese Kengo Kuma e tradotto nell'azione specifica di rendere astratto il materiale, inteso come sostanza e non come finitura, e di semplificarlo in componenti elementari, creando un tipo di spazialità che guardi all'orizzonte, che cresca in maniera rizomatica e che persegua il linguaggio della contemporaneità. 'Architettura della materia' è l'indagine della dimensione più intima della stessa, per cui la caratteristica di solidità che emergerebbe percependola dall'esterno, è tradita e frammentata all'interno come se su di essa fosse stata eseguita una radiografia ai raggi x. L'aggregazione di tali componenti restituisce forme emergenti, amorfe, espressione di un legame solido tra particelle, materia e struttura. L'equilibrio, la danza tra i vuoti e i pieni, permette all'oc-



## Introduzione

chio che scruta tali sistemi aggregati di addentrarsi all'interno del loro spessore e al contempo di resistere, di fermarsi. Lo sguardo si arresta al confine quando incontra la solidità della materia, lo oltrepassa quando incontra i vuoti. All'interno si ritrovano spazi intermedi, spazi sospesi «tra», spazi frammentati, bordi multipli. Nessuna gerarchia tra tali spazi. E, il caleidoscopio di particelle di cui è composto lo spessore del confine è controllato dalla dimensione delle singole parti, dalla proporzione fra gli elementi. Perseguendo tale punto di vista, il materiale, inteso come sistema aggregato, è partecipe della definizione dell'intero sistema costruttivo ed è in tale definizione che emerge l'approccio computazionale generativo della forma. Mediante il presente progetto di ricerca è stato indagato, definito e sperimentato un sistema costruttivo aggregato autoportante, realizzato mediante il versamento di componenti elementari all'interno di casseforme successivamente rimosse per raggiungere una condizione di stabilità una volta avvenuto il riordino tra le componenti. Tramite la simulazione e la sperimentazione sono state indagate e confrontate diverse famiglie di componenti elementari. Quindi, è stata definita la geometria della singola particella, il metodo di aggregazione tra di esse e la forma del 'contenitore' per determinare la forma globale del sistema.

### **Lo scopo e gli obiettivi della ricerca**

L'obiettivo primario della presente ricerca ha riguardato l'indagine, la definizione e la sperimentazione di un sistema architettonico costituito dall'aggregazione di componenti elementari, a micro- e macro-scala, volto alla tutela dell'ambiente e delle risorse con particolare attenzione alla riduzione dei rischi indotti dai cambiamenti climatici e dalle emissioni di CO<sub>2</sub>. Ne è derivato l'intento del raggiungimento di un processo progettuale e produttivo sostenibile

perseguendo anche il fine della riciclabilità una volta che tale sistema architettonico fosse dismesso. L'interesse verso questo tema è nato da due ordini di ragione. Il primo è relativo al dibattito sull'architettura contemporanea e sulle forme legate ai nuovi strumenti di progettazione parametrici in cui tale spazialità sembra ricorrere, attraverso la 'particellizzazione' del materiale e la sua semplificazione in componenti elementari. Il secondo riguarda il processo realizzativo sostenibile. Tale tema di ricerca difatti introduce e permette di indagare al contempo l'apparato teorico sotteso che trova le proprie radici concettuali sia nei processi di morfogenetica generativa che nei processi di produzione tecnologica computazionale. Ciò che della materia era invisibile è adesso reso visibile e penetrabile. Sottendono tale figurazione, tre principi della tradizione architettonica giapponese. I termini *Ma*, *Oku* e *Miegakure*. La solidità del limite è disintegrata tra caos e ordine, tra forma e non forma. Inoltre, poiché l'approccio progettuale con cui è stato affrontato tale tema è quello della creazione logica della forma, la riflessione che ne è derivata ha riguardato il confronto tra il processo computazionale all'interno del campo del digitale e quello all'interno del campo fisico della materia, intesa qui come aggregazione astratta di componenti elementari e non di singoli atomi, introducendo il conseguente tema del rapporto tra artificio e natura in architettura. La sfida affrontata ha riguardato la definizione di forme emergenti perseguendo una logica parametrica e computazionale sia nella forma e nella struttura che nelle relazioni tra le capacità intrinseche del materiale e le forze che agiscono sul sistema. Come afferma Branko Kolarevic, «i processi generativi digitali stanno aprendo nuovi territori per l'esplorazione concettuale, formale e tettonica, articolando una morfologia architettonica focalizzata sulle proprietà emergenti e adattive della forma»<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Kolarevic, B. (2003), *Architecture in the Digital and Manufacturing*, Londra: Spoon

### La metodologia

Durante lo sviluppo del presente progetto di ricerca, sono stati applicati diversi metodi di indagine, verifica e sperimentazione affinché si potesse ottenere quella che è nota come la verifica del processo mediante la 'triangolazione dei dati'. Inoltre, avendo indagato e definito un sistema costruttivo architettonico emergente, tale progetto di ricerca si colloca altresì all'interno della metodologia nota come 'research by design'. Tale metodologia consiste nella definizione di manufatti e strumenti tecnologici innovativi, nella promozione di teorie nuove e/o esistenti in scenari contemporanei<sup>2</sup> con l'obiettivo dell'incremento della conoscenza di sistemi costruttivi emergenti oltreché di offrire un contributo fattivo alla loro evoluzione. Come suggerisce Reeves<sup>3</sup> sono tre i principi su cui essa si basa:

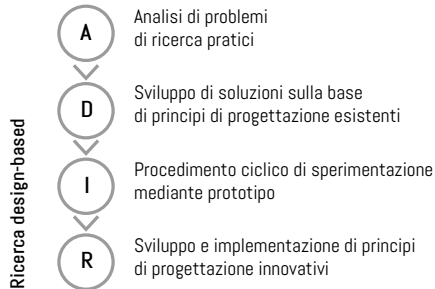
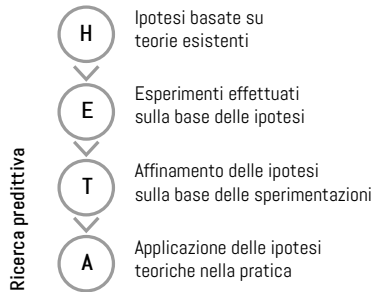
- affrontare problemi complessi perseguendo un approccio multidisciplinare. All'interno di tale progetto di ricerca questo ha comportato ambiti del sapere differenti legati soprattutto al mondo biologico, naturale, alla fisica della materia e alla bioinformatica
- integrare principi di progettazione noti e ipotetici con progressi tecnologici per rendere soluzioni plausibili a problemi complessi
- condurre una indagine rigorosa e riflessiva per testare e perfezionare ambienti di apprendimento innovativi nonché per definire nuovi principi di progettazione

Tale metodologia comporta che non vi sia un approccio predittivo e

Press, p. 13.

<sup>2</sup> Kennedy-Clark, S. (2013), *Research by Design: Design-Based Research and the Higher Degree Research student*, in «Journal of Learning Design» 2013, vol. 6, n. 2, pp. 26-32.

<sup>3</sup> Reeves, T.C. (2006), *Design-based research from a technology perspective*, in J. V. D. Akker, K. Gravemeijer, S. McKenney & N. Nieveen (Eds.), *Educational Design-based Research*, New York: Routledge, p. 58.



che il processo ciclico e iterativo caratteristico di tale metodologia sia essenziale per il perfezionamento dell'indagine, ideazione e sperimentazione. Ovvero la ricerca avanza perché mediante simulazione e prototipazione rapida vi è una implementazione iterativa di dati che ne consentono lo sviluppo. Le fasi: definizione-simulazione-prototipazione rapida-verifica-raccolta dati-riflessione-definizione. A seguire, in maniera iterativa, l'analisi dei risultati, le conclusioni e quindi l'ottimizzazione del processo e la definizioni delle soluzioni. Come suggeriscono Wang e Hannafin,

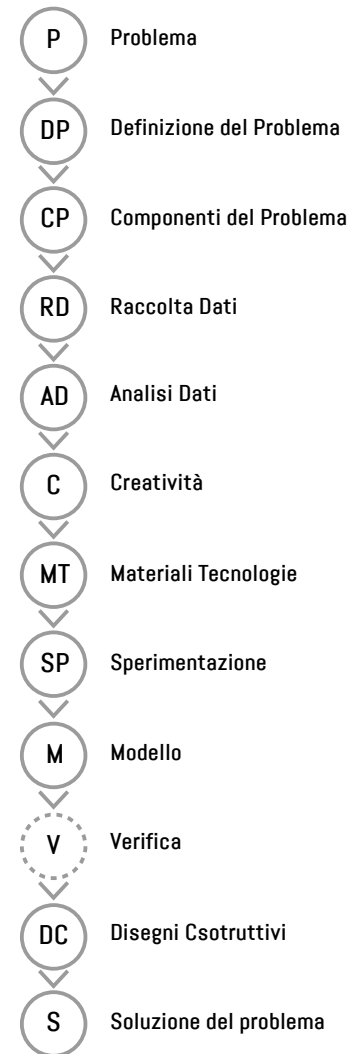
«In uno studio di ricerca basato sul design, i dati vengono analizzati immediatamente, in modo continuo e retrospettivo e quella parte di questo ciclo di raccolta dei dati comprende fasi, come una revisione esauriente della letteratura unita all'attuazione sistematica e mirata dei metodi di ricerca. Questo processo iterativo porta allo sviluppo di principi di progettazione, che vengono poi riflessi e valutati attraverso l'affinamento del problema, delle soluzioni e dei metodi»<sup>4</sup>.

Perseguendo la metodologia 'research by design', effettuata preliminarmente l'indagine sull'apparato teorico, sullo stato dell'arte e sul contesto, le fasi della simulazione e della prototipazione sono state essenziali per l'iterazione della progettazione sia durante la definizione del singolo componente, della conformazione globale del sistema aggregato, della risposta a problematiche di volta in volta affrontate che sui materiali impiegati. Ogni iterazione ha presentato diverse micro-fasi autonome e la 'triangolazione' di dati emersi all'interno di queste micro-fasi ha permesso di comprendere e af-

<sup>4</sup> Kennedy-Clark, S. (2013), *Op. cit.*, p. 29.

## Introduzione

frontare la sperimentazione. Ovvero, effettuata l'indagine sullo stato dell'arte e definito l'apparato teorico attraverso la ricerca bibliografica e l'indagine sulla letteratura esistente, un primo momento ha riguardato la definizione e il controllo delle forme tramite il disegno, inteso come strumento di conoscenza e di critica; il secondo la realizzazione di un modello fisico sperimentale su cui eseguire dei test di indagine e verifica e quindi la simulazione mediante software. I primi due incoraggiano un approccio intuitivo alla progettazione, il secondo favorisce la possibilità di simulare in maniera rapida possibili soluzioni. Tali metodi sono stati applicati sia per la definizione della singola particella che del sistema aggregato globale. A seguire, la fase di valutazione dei risultati ha permesso di verificare se si è dato risposta al problema, se è stato raggiunto l'obiettivo della ricerca e ha offerto la possibilità di definire aspetti innovati e possibili scenari di ricerca. È stato applicato un processo metodologico ciclico, non lineare, considerando il fatto che le fasi della progettazione, intesa qui come definizione della singola componente e del sistema aggregato, della simulazione mediante software e della prototipazione rapida richiedono un costante feedback per rispondere alle diverse esigenze, vincoli e presupposti posti alla base degli obiettivi della ricerca. Tale approccio coincide con quello suggerito da Bruno Munari che in *Da cosa nasce cosa. Appunti per una metodologia*<sup>5</sup> suggerisce di passare ciclicamente, dopo la definizione del problema e della raccolta e analisi dei dati, dalla fase creativa a quella di sperimentazione *n* volte affinché, risolto il problema iniziale, possa essere definito il campione risolutivo, il modello, ed effettuarne la verifica. Il designer Bruce Mau, fondatore dell'*Institute without Boundaries*, afferma che «finché il risultato guida il processo andremo sempre e solo dove



<sup>5</sup> Munari, B. (1992), *Da cosa nasce cosa. Appunti per una metodologia*, Roma-Bari: Laterza.

siamo già stati. Se, invece, il processo guida il risultato, potremmo non sapere dove stiamo andando ma sapremo di essere nella direzione giusta»<sup>6</sup>. Ciò non significa che il progettista debba lasciare l'atto della progettazione al procedimento computazionale. Ma che la forma, vedremo nei capitoli a seguire, non è il fine ultimo della progettazione, e che l'elaboratore di calcolo diviene strumento della e per la progettazione. Tale l'approccio coincide con quello suggerito da architetti che affrontano la progettazione computazionale intendendo i procedimenti algoritmici iterativi strumenti necessari alla sperimentazione e all'indagine di ciò che non è reso direttamente visibile. Nella fase iniziale della ricerca, è stato affrontato il fondamento teorico alla base di tale concettualizzazione, che ha offerto spunti di riflessione sul rapporto tra arte, architettura, tecnica e scienza. Successivamente, è stato indagato lo stato dell'arte e l'esito pratico-teorico a cui tale tema rimanda in ambito sperimentale, indirizzando la riflessione sugli strumenti di progettazione computazionale e parametrica. La metodologia impiegata ha riguardato quindi diverse fasi.

### **Il contributo alla ricerca**

Trattandosi di un progetto di ricerca dall'attitudine sperimentale di indagine su forme e tecnologie emergenti dell'architettura contemporanea e sulla metodologia progettuale, l'apporto alla ricerca perseguendo la logica della metodologia 'research by design', è rintracciabile nell'indagine sull'apparato teorico, nella definizione e sperimentazione della geometria della singola componente, nelle fasi del processo realizzativo e nella definizione e sperimentazione del global design dell'intero sistema aggregato.

<sup>6</sup> Mau, B. (1998), *An incomplete Manifesto for Growth*, in <https://pages.wustl.edu/DC175/incomplete-manifesto-growth>.

Si tratta difatti, di un sistema architettonico che trova i propri fondamenti teorici nel rapporto tra artificio e natura, tra ordine e caos, tra forma e informe. Il contributo alla ricerca è riscontrabile sia nella definizione della geometria della singola componente che nel momento della verifica del sistema aggregato pensato per un luogo, un contesto storico e culturale definito. L'apporto del presente progetto di ricerca all'interno della sperimentazione sul sistema aggregato ha riguardato quindi:

### **a. L'apparato teorico**

Dalla ricerca bibliografica e dallo studio sulla letteratura esistente, altresì di autori appartenenti ad ambiti disciplinari differenti tramite tale progetto di ricerca è stato dato un contributo e suggerito spunti di riflessione relativamente alla definizione di termini apparentemente dialettici, ossimorici, divenuti adesso complementari: forma informe, caos deterministico, computazione computerizzata, astrazione naturale. Tale indagine offre una chiave di lettura per cui categorie apparentemente dialettiche divengono parti di una unità che le rende dipendenti l'una dall'altra.

### **b. Classificazione dei sistemi aggregati in architettura**

Che in natura vi sia caos è innegabile [vedi gli eventi imprevedibili, i terremoti, le turbolenze nei fluidi] come anche che siano presenti configurazioni ordinate e riconoscibili [vedi le forme geometriche dell'arco, dell'esagono, delle spirali]. Tramite tale progetto di ricerca si è cercato di classificare i sistemi aggregati in architettura perseguendo la medesima chiave di lettura. Ovvero, aggregazione di componenti di cui è stato possibile individuarne una matrice ordinata, e aggregazione di componenti la cui composizione si colloca ai margini tra ordine e caos, tra forma e informe.

**c. La definizione della forma della singola componente**

Dall'indagine sullo stato dell'arte è emerso che gli studi sui sistemi aggregati finora condotti hanno fondato la sperimentazione principalmente sulla ricerca della geometria della componente che rispondesse meglio alla stabilità dell'intero sistema aggregato non ponendosi come obiettivo primario la permeabilità ottenuta. Tramite la presente ricerca, tramite l'ideazione della forma della singola particella, si è voluto invece raggiungere, oltre la stabilità del sistema aggregato, una spazialità permeabile, che smaterializzasse la materia, i confini. La ricerca è stata condotta perseguendo l'obiettivo del raggiungimento di equilibrio tra stabilità - ottenuta unicamente per forma e incastro - ed estetica, in termini di spazialità, porosità, grado di densità, trasparenza e permeabilità. Tale scelta, quindi, è divenuta una scelta di spazio e di luce intrecciando forma, materia e struttura.

**d. Il processo realizzativo**

Relativamente al processo realizzativo, l'apporto del presente progetto di ricerca ha riguardato l'ideazione della geometria della singola componente a partire da parti bidimensionali che successivamente incastrate ne restituissero la tridimensionalità. L'obiettivo ricercato è stato quello di estendere il processo produttivo relativo alla realizzazione di tali componenti a differenti metodi di produzione e a diversi materiali. L'indagine è stata condotta pensando al processo di stampa 3D, tuttavia una siffatta geometria permette di essere realizzata altresì mediante taglio laser, fresa a controllo numerico e, oltre che in acido polilattico [PLA], in legno e metallo.

**e. Il metodo computazionale**

Un ulteriore apporto ha riguardato il metodo. Indagare in maniera simultanea il materiale e il processo ideativo perseguendo, per



entrambi gli ambiti, un approccio computazionale rappresenta un campo di indagine emergente nell'attuale scenario dell'architettura contemporanea. Tale obiettivo è stato raggiunto, una volta definita la geometria della singola componente e del sistema aggregato, dal confronto tra il processo di progettazione computazionale durante la fase di simulazione mediante software e quello di verifica durante la fase di prototipazione rapida.

### **f. Il sistema aggregato come strumento di indagine tra ordine e caos**

Ponendosi come obiettivo la restituzione di una spazialità permeabile e rizomatica, in accordo all'attuale tematica della parametrizzazione del progetto in architettura e della rivoluzione informatica in atto, il sistema aggregato sperimentato si colloca, per il processo di conformazione morfologica, ai margini della teoria del caos e delle forme emergenti ed amorfe dell'architettura contemporanea. Per tale ragione, il contributo della presente ricerca riguarda difatti l'indagine, l'ideazione e la sperimentazione di un sistema complesso, dinamico, non lineare e sensibile alle condizioni iniziali, connubio tra principi morfologici generatori delle forme presenti in natura e i corrispettivi in architettura.

### **g. Verifica tramite l'ideazione di un padiglione temporaneo**

Il progetto di ricerca è stato guidato dalla volontà di creare un modello ripetibile e scalabile in funzione delle caratteristiche a contorno dell'ambiente per cui è pensato, della scala di misura in cui è realizzato e dell'impiego a cui è destinato. L'apporto rispetto agli esiti formali indagati durante lo stato dell'arte - ovvero padiglioni emancipati da un contesto ma unicamente espediente per la sperimentazione - ha riguardato la fase di verifica tramite l'ideazione di un padiglione temporaneo pensato per un contesto urbano definito e che ha dovu-

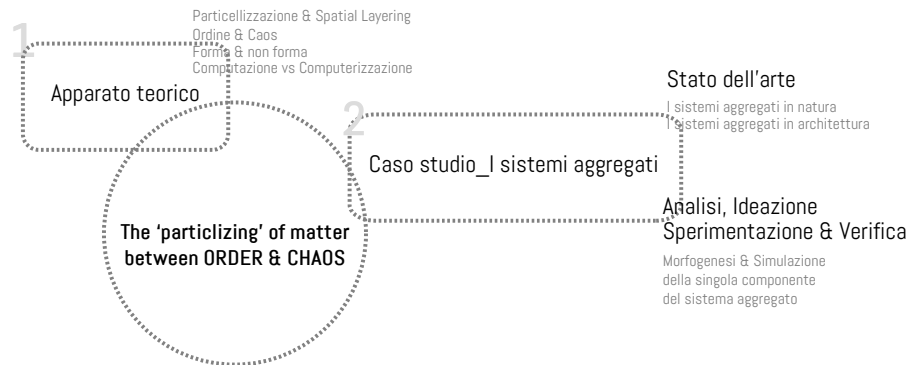
to confrontarsi con una preesistenza dal valore storico e culturale riconosciuto.

### **La struttura della tesi**

Considerando che l'obiettivo della ricerca è la restituzione di una spazialità stratificata e rizomatica in accordo all'attuale tematica della parametrizzazione del progetto in architettura e della rivoluzione informatica in atto, la prima parte della tesi ha riguardato l'apparato teorico e quindi l'indagine sulla spazialità generata dalla particellizzazione della materia e sul paradigma dello spatial layering. Strettamente legato ai suddetti temi sono stati indagati quelli di ordine e di caos, di forma e di non forma, ed è stato strutturato un confronto tra i termini computazionale e computerizzazione relativamente allo scenario contemporaneo. La seconda parte della tesi ha riguardato invece l'analisi, l'ideazione, la sperimentazione e la verifica di un sistema architettonico trasposizione della spazialità ricercata. Ovvero, è stato dimostrato che il sistema aggregato è un sistema complesso, dinamico, non lineare, sensibile alle condizioni iniziali, che si colloca ai margini della teoria del caos e delle forme emergenti ed amorfe dell'architettura contemporanea e che permette di raggiungere una spazialità per cui la materia è discretizzata e resa permeabile. Inoltre, ponendosi il fine della mitigazione dei rischi indotti dai cambiamenti climatici e dalle emissioni di CO<sub>2</sub>, è stato pensato il raggiungimento di un processo progettuale e produttivo sostenibile perseguendo il fine della riciclabilità in ogni fase della ideazione e sperimentazione. È stata indagata quindi la relazione tra i rischi urbani e territoriali indotti dai cambiamenti climatici e dalle emissioni di CO<sub>2</sub> e l'analisi della sostenibilità ambientale obiettivo della progettazione e sperimentazione del sistema aggregato indagato. Quindi, è stata eseguita una indagine sullo stato dell'arte dei

## Introduzione

sistemi aggregati effettuandone una classificazione e sul metodo di aggregazione sia in natura che in architettura. Nel capitolo successivo è stato affrontato il modello fisico della forma che ha guidato la progettazione. Ovvero, una indagine sulla matematica sottesa. Quindi si è passati alle sfide morfologiche e, più specificamente, all'approccio al problema intendendo l'architettura come dialettica tra artificio e natura. Tale momento della ricerca è stato affrontato simulando lo stato dell'arte, definendo la morfogenesi della singola componente, scegliendo il materiale impiegato, eseguendo la prototipazione e i test empirici. Analogo processo, ma a macro-scala è stato impiegato per definire la morfogenesi del sistema aggregato. Durante questa fase della ricerca è stato affrontato anche il tema della verifica mediante l'ideazione e la simulazione di un padiglione temporaneo. Infine, la parte finale è stata dedicata ai risultati, alle riflessioni, alle conclusioni e ai possibili scenari di ricerca.





L'APPARATO TEORICO



## Particellizzazione della materia & Spatial Layering

### All'origine del termine 'particellizzazione'

Il termine 'frammentare' e la parola 'frammento' in architettura, benché abbiano lo stesso tema, ovvero la stessa radice, assumono significati sottilmente differenti in riferimento all'origine del frammento come materiale e al significato che esso può assumere se posto in relazione all'intero, all'unità. Nel dizionario Treccani della lingua italiana, con il termine 'frammento', dal latino *fragmentum*, derivazione di 'frangere', «rompere» si intende «ciascuno dei pezzi in cui si è rotto un oggetto o, più genericamente, piccola parte staccatasi o tolta da un oggetto»<sup>1</sup>. Tale definizione implica pertanto la presenza di un oggetto, una unità da cui è poi derivato l'elemento frammento. Con la parola 'frammentare' si intende invece, l'atto del «ridurre in frammenti, suddividere in tante piccole parti, togliendo unità e continuità»<sup>2</sup>. Un vocabolo affine, la parola 'frattale', un termine introdotto nel 1975 dal matematico francese Benoit Mandelbrot (1924-2010) che deriva dal latino *fractus*, participio passato di frangere e assume il significato di «spezzare». 'Particella', diminutivo di *pars partis* «parte» è la «piccola parte, frazione assai minuta, quantità minima di qualche cosa, sinonimo di frammento». Nel linguaggio dell'architettura moderna, il termine frammento è definito come parte per il tutto da Franco Purini, Manfredo Tafuri, Carlo Scarpa e Francesco Venezia. È inteso come parte dell'opera di architettura da architetti contemporanei come Peter Eisenman. Scrive Franco Purini in riferi-

<sup>1</sup> Dizionario della lingua italiana, Enciclopedia Treccani, online.

<sup>2</sup> *Ibidem*.

mento alla definizione del frammento nello scenario contemporaneo e sulla 'frattalità matematica',

«Il frammento pone la questione della relazione tra la parte e l'intero e dell'intero col tutto. La parte non è infatti un frammento, o non lo è completamente fino a che non contiene virtualmente l'intero. Ma anche l'inclusione ideale dell'intero in una parte non basterebbe a fare di questa un frammento se la parte stessa non recasse il segno sacralizzante di una violenza. Per un verso esso può essere testimonianza di una integrità perduta, che pone il problema della sua ricostituzione o della sua accettazione, per provenire mai terminata, nel qual caso può esprimere il desiderio che l'edificio sia lasciato in una condizione di non finito. La singola inquadratura che si intercetta attraversando la città è senz'altro frammentaria, ma non si possono considerare propriamente come frammenti nel senso dell'esito di sezionamenti prodotti da una consapevole volontà analitica. La stessa cosa si può dire per i materiali parziali e interrotti che si adoperano in quella modalità del comporre che è ispirata alla trasposizione nell'architettura delle tecniche del montaggio cinematografico. [...] Il frammento, non ha molto a che vedere con gli oggetti che provengono dal mondo della frattalità matematica»<sup>3</sup>.

E ancora, chiamandole architetture frammentate o pseudo-frammenti, afferma,

«Al frastuono che si accompagna alle due ultime pseudo

<sup>3</sup> Purini, F. (2006), *Il frammento come realtà operante* in «Firenze Architettura», n. 1, pp. 2-9.



forme di frammento si oppone il silenzio che contraddistingue il frammento in quanto segno di una integrità corporea perduta o che è ancora da conquistare. In una accelerazione eraclitea il frammento intercetta nell'istante l'eternità. Il frammento interiorizza sempre una temporalità. Per questo il frammento è ciò che è colmo di una interezza potenziale che aspira alla totalità come trascendimento di sé»<sup>4</sup>.

È chiara la posizione di Purini sul frammento, del tutto simile a quella di Aldo Rossi<sup>5</sup> o Manfredo Tafuri. Nel Palazzo di Lorenzo e nel Giardino segreto in Gibellina, Francesco Venezia opera attraverso la valorizzazione del frammento che diviene palinsesto, momento di stratificazione storica. Essere elemento distaccato di una opera di architettura non significa essere frammento, a meno che in esso non è percepibile l'interezza dell'opera da cui è derivato. Ed è chiara la posizione su quell'architettura che frammenta la materia. Purini definisce le componenti di tale architettura pseudo-frammenti perché privi di significante. All'interno del presente progetto di ricerca, ci si chiede pertanto se è possibile definire il frammento come particella, autonoma, priva di un significante se non quello di componente che partecipa a una spazialità rizomatica, priva di limiti, di bordi, carica di una identità propria. Per il fisico Fritjof Capra,

<sup>4</sup> *Ibidem*.

<sup>5</sup> «Frammento nella lingua italiana significa un piccolo pezzo staccato per frattura da un corpo qualunque. E con ciò esso esprime una speranza, ancora una speranza, e come tale non conviene con rottame, che esprime una moltitudine o un aggregato di cose rotte. In questa dizione, rottame potrebbe essere il corpo della città futura se le cose non dovessero cambiare e sempre più fosse accettato il disordine e poco meditata la previsione del futuro. [...] Per questo credo anche nella città futura come quella dove si ricompongono i frammenti di qualcosa di rotto dall'origine». Rossi, A. (1987), *Frammenti*, in Ferlenga, A. (a cura di), *Architetture 1959-1987*, Milano: Electa, p. 7.

«Nella teoria dei quanti non si termina mai con "cose", ma sempre con interconnessioni. [...] Quando penetriamo dentro la materia, la natura non ci mostra alcun isolato mattone da costruzione, ma piuttosto una complicata ragnatela di relazioni esistenti tra le varie parti di un unificato intero»<sup>6</sup>.

E, tra gli architetti contemporanei giapponesi che giungono al tema del frammento e dell'informe non distaccandosi dalla dimensione della natura, dal rapporto con essa e in cui ritroviamo espressamente lo sviluppo di tale spazialità figurano Kengo Kuma, Sosuke Fujimoto e i fondatori dello studio SANAA. Il tema è affrontato da tali architetti intendendo il frammento nell'accezione di elemento autonomo, dotato di una identità propria pur non appartenere a un intero, a una unità. Tale accezione è distante da quella della scuola italiana perché ne è differente la cultura. Nelle opere di Kengo Kuma la profondità dello spazio è generata dagli 'strati' che generano un *Ma*, uno spazio vuoto e un *Oku*. Il frammento coincide con gli elementi che compongono il materiale, la loro dimensione è il modulo. Kuma persegue la poetica dell'anti-oggetto, anteposta alla ricerca di forma fine a sé stessa, smaterializzazione della sostanza. L'astrazione è resa dalla 'scomposizione' del materiale in componenti elementari. Non astrazione della forma ma astrazione del materiale. Scrive Kuma,

«il mio ultimo scopo è quello di cancellare l'architettura perché credo che un edificio debba essere una cosa sola con il luogo che lo ospita»<sup>7</sup>.

Voler 'frammentare' la materia deriva dalla logica di voler 'cancellare

<sup>6</sup> Capra, F. (2005), *La rete della Vita*, Bergamo: BUR.

<sup>7</sup> Kuma, K. (2008), *Anti-Object*, Londra: Architectural Association.

l'architettura'. In Kuma la frammentazione della materia, la riduzione a particelle elementari, diviene l'espedito per confrontarsi, dialogare con la natura, per rendere l'architettura anti-oggetto, anti-forma, anti-volume. Il rapporto tra natura e architettura è alimentato permettendo alla luce, al vento, al suono di penetrare all'interno della materia-sostanza. Essenziale, si è detto, diviene il progetto della dimensione delle singole particelle e della misura della relazione tra le parti. La trasparenza che è qui ricercata non è generata dalla continuità tra spazio interno ed esterno, come è solito fare nell'architettura tradizionale giapponese, da cui le architetture delle avanguardie occidentali traggono ispirazione. La ricerca dell'orizzonte, la profondità è esplorata tramite la dissolvenza dei bordi, dei confini, la frammentazione della materia. Il materiale afferma Kuma, "non è una finitura"<sup>8</sup>. Se con il termine 'materiale' si intendesse esclusivamente la finitura, pratica denominata da Kuma 'method called concrete' e da cui prende le distanze, sarebbe bene abbandonare la parola materiale e sostituirla con la parola sostanza, intendendo con tale termine la materia di cui è fatto il materiale. Kuma progetta la dimensione di ogni singola particella e della loro reciproca distanza, ponendola in relazione alla dimensione dell'intera struttura. La forma coincide con l'anti-massa, è la dissoluzione dell'oggetto, grazie cui far emergere la qualità tattile del materiale. Non il *Modular* di corbusieriana memoria, di un uomo antropocentrico ma frammenti reiterabili appartenenti alla qualità del materiale, rievocazione della tecnica del *kiwar*<sup>9</sup> e della ripetizione del modulo del *tatami*, impiegati per dimensionare lo spazio interno delle dimore giapponesi tradizionali.

<sup>8</sup> Kuma, K. (2007), *Materiali, strutture, dettagli*, Basilea: Birkhauser.

<sup>9</sup> Tecnica mediante cui era dimensionata ogni parte dell'edificio in legno. Spesso coincidente con la dimensione in sezione delle travi di legno, a partire da questa erano dimensionati pilastri e la loro reciproca distanza.

In seguito al sisma che ha colpito l'11 marzo del 2011, la regione del Tohoku in Giappone il Kuma Lab di Tokyo, ha condotto la ricerca verso lo studio della tecnica costruttiva del *kiwari*, tramandata per anni dai carpentieri di *Kesen* che riesce a risolvere esigenze strutturali per architetture localizzate in luoghi a rischio di terremoti e Tsunami. *Kiwari* - il cui significato letterale è *taglio del legno* - è il modulo, l'unità di misura, da cui far dipendere il dimensionamento, il taglio e il montaggio dei blocchi di legno delle parti strutturali delle abitazioni. Il rapporto non è fisso, dipende dal tipo di edificio. Ogni parte è così posta in relazione alle altre. L'astrazione della materia è un processo per cui la pietra, la paglia, il fango, il legno, sono resi astratti attraverso la discretizzazione del materiale, pur mantenendone la propria natura. Perseguendo l'idea di voler frammentare l'architettura<sup>10</sup> Kuma afferma: «lo penso che nel progetto, non è la proporzione dell'edificio in orizzontale o in verticale che importa, il problema da risolvere è il controllo di ogni particella»<sup>11</sup>. La solidità materica, la continuità architettonica che appare all'esterno, è tradita e frammentata all'interno, come una radiografia. Afferma il teorico dell'arte György Kepes in *Language of vision*,

«La fotografia ai raggi x ha aperto un nuovo aspetto del mondo visibile: oggetti sino ad ora nascosti all'occhio umano possono essere penetrati e resi visibili. Qui la trasparenza ha un nuovo significato, perché la profondità dell'oggetto è valutata anche in base alla sua densità ottica»<sup>12</sup>.

Perseguendo tale chiave di lettura si deduce che nell'Adobe Museum

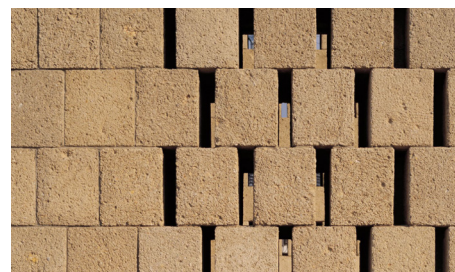
<sup>10</sup> Kuma, K (2000), *Particles on Horizontal plane* in «Japan architect» n. 38, 2000.

<sup>11</sup> Kepes, G. (1969), *Language of vision*, Chicago: Paul Theobald and company, p. 80.

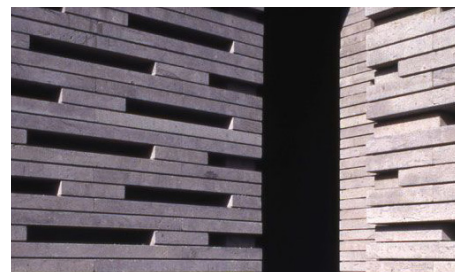
<sup>12</sup> *Ivi*, p. 84.

## Particellizzazione della materia & Spatial Layering

for Wooden Buddha il fango è contemporaneamente materia, sostanza, finitura e struttura, priva di una stratificazione gerarchica tra le componenti. La tecnica qui impiegata è quella dell'*Hanchiku* mediante cui astrae il materiale e crea dei blocchi di fango. Nello Stone Museum del 2000 nella città di Nasu la particellizzazione della materia avviene mediante l'impiego di sottili feritoie in pietra. Per tale progetto, la sfida consisteva nell'azione di smaterializzare un materiale estremamente solido. Il senso di pesantezza, solidità e gravità della pietra è tradito dalla leggerezza delle piccole lamelle in cui la materia è frammentata distribuendo un alternarsi di fessure, di spazi vuoti e di parti piene. La permeabilità è raggiunta. Il senso di smaterializzazione dalla luce che penetra tra le lamelle. Ogni parte, ogni dimensione, ogni forma e distanza tra le particelle è pensata. Eppure, quello che Kuma chiama "particlized condition" è un concetto più ampio. Non è solo spazialità e va oltre un semplice linguaggio dell'architettura. È una filosofia. Non ci sono gerarchie. Sostanza, informazione, tecnologia tradizionale, tecnologia strutturale possiedono lo stesso valore. Nel progetto per il Museum of Hiroshige Ando, 1998-2000, come anche nella Great (Bamboo) Wall del 2002, vedremo nel capitolo successivo, è stato essenziale definire la misura di ogni componente. Particelle troppo grandi o infinitamente piccole farebbero percepire il materiale ancora come una massa. Ma l'obiettivo della frammentazione è dissolverla. Il sistema di misura diviene per Kuma la maniera mediante cui controllare il caleidoscopio di particelle. Prima la dimensione delle lamelle, poi la distanza fra di esse e quindi la superficie ricreata. Essenziale, la realizzazione di diversi modelli per la gestione dei rapporti tra le varie parti affinché le pareti non siano percepite come muri solidi, per gestire la luce che oltrepassa la materia. Ancora una volta la materia intesa come sostanza. Sostanza, struttura, luce.



^Kuma, K. *Adobe Museum for Wooden Buddha* del 2001, Yamaguchi, Giappone



^Kuma, K. *Stone Museum* del 2000, Nasu, Giappone



^Kuma, K. *Museum of Hiroshige Ando* del 1998-2000, Bato, Giappone

«Immagina leggere particelle che fluttuano sopra la terra. [...] La cosa più vicina a una tale condizione è l'arcobaleno. L'arcobaleno non è un oggetto concreto e questo è ciò che lo rende attraente. Una certa relazione che si stabilisce tra le particelle di vapore acqueo, il sole e l'osservatore (il soggetto) produce il fenomeno che chiamiamo arcobaleno [...] dobbiamo rompere gli oggetti chiamati architettura in particelle sempre più piccole. In tal modo, emergerà un fenomeno come l'arcobaleno [...] Le particelle devono perciò essere piccole, liberamente disperse e molto reattive»<sup>13</sup>.

In *Between Particles: 2013 China Exhibition*, Kuma rievoca la condizione dell'arcobaleno, delle nuvole e di una architettura in dissolvenza, cambiando le condizioni della luce. È dal modo con cui la luce attraversa la materia che rievoca la condizione di impermanenza. In riferimento alla volontà di cancellare l'architettura, di dissolverla, di considerare una architettura anti-oggetto, Kuma opera una critica nei confronti dell'architettura moderna occidentale e del rapporto tra soggettivismo e oggettivismo. Difatti, la scienza e la filosofia dell'uomo occidentale hanno mostrato in molte occasioni una scissione tra dualismi quali corpo e anima, oggetto e soggetto. Descartes ci ha abituati alle dualità imperanti, portando l'uomo occidentale alla razionalizzazione di ogni accadimento. Dall'Illuminismo e dal Positivismo il metodo scientifico si fa carico di fondatezza nel processo di oggettivazione della realtà tale che il xx secolo è definito da Husserl in *Die Krisis der europäischen Wissenschaften und die transzendentale Phanomenologie* l'epoca della "razionalità oggettiva". Il modernismo tramite l'astrazione dell'architettura ha rivendica-

<sup>13</sup> Kuma, K. (2000), *Dissolution of objects and evasion of the city*, in «The Japan Architect», 2000, n. 38, p. 58.

## Particellizzazione della materia & Spatial Layering

to la supponenza del pensiero umano rispetto al caos della natura. Per Kuma, ad eccezion fatta per l'architetto tedesco Bruno Taut<sup>14</sup> che afferma sia riuscito a superare il dualismo oggetto-soggetto, gli architetti moderni occidentali hanno inteso l'opera di architettura come un oggetto, affrancato dal contesto, dal luogo, dalla natura e dalle relazioni con essa. La casa diviene per il movimento moderno un prodotto dell'industrializzazione, *macchina per abitare*. Le Corbusier eleva i propri edifici sui pilotis, Taut in Hyuga Residence nel 1936 crea un anti-oggetto.

Nelle opere di Sosuke Fujimoto e del gruppo SANAA la frammentazione assume una dimensione, in scala, maggiore. Divengono volumi che frammentano lo spazio, come nel caso dei Tokyo apartment del 2012 di Fujimoto o del Museo di arte contemporanea del XXI secolo del 2004 del gruppo SANAA. Ciò che li accomuna è la ricerca del rapporto tra l'uomo e la natura, della continuità spaziale tra interno ed esterno, della tensione verso l'orizzonte.

Poste tali considerazioni, ritornando all'origine etimologica dei termini particella e frammento si comprende adesso che le ragioni dell'azione di frammentare la materia sono differenti rispetto all'idea di frammento della scuola italiana che definisce tale termine se solo parte di un intero, di una unità. Immobilità, solidità, unità, razionalizzazione è ciò che guida l'uomo occidentale. Mutamento, transitorietà, fugacità, impermanenza è ciò che ha guidato l'uomo orientale del XVII secolo. La differente definizione del frammento ricalca ancora una volta la diversità tra le due culture. Kisho Kurakawa in *Each One a Hero: The Philosophy of Symbiosis*, suggerisce che la contrapposizione tra la maniera di intendere il rapporto con la natura dell'uomo

<sup>14</sup> Per Kuma è stato essenziale la conoscenza delle opere di Bruno Taut in Giappone e di quanto l'architetto e urbanista tedesco aveva scoperto e scritto sul Giappone tradizionale.



^Fujimoto, S. \_Tokyo apartment del 2012, Tokyo, Giappone

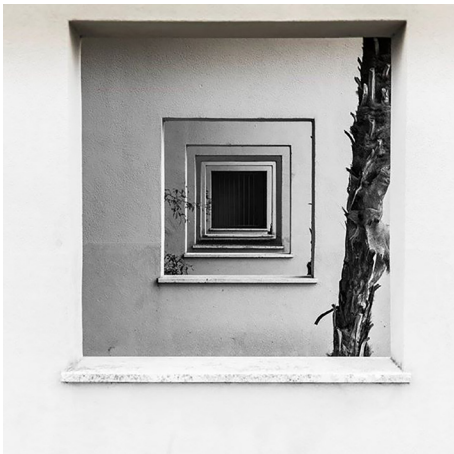


^SANAA \_Museo di arte contemporanea del XXI secolo del 2004, Kanazawa, Giappone

occidentale e di quello orientale è rintracciabile nella differenza tra i termini "confronto" e "continuità". Scrive, difatti:



^ Franco Purini e Laura Thermes, *Sistema delle piazze*, 1982-1990; Gibellina, Trapani



^ Franco Purini e Laura Thermes, *Sistema delle piazze*, 1982-1990; Gibellina, Trapani

«L'architettura occidentale è emersa da una filosofia di confronto con la natura e l'impulso di conquistarla. In questo senso il muro di pietra che diventa brusco dentro dall'esterno, è estremamente significativo. Il concetto giapponese dello spazio si estende per abbracciare la natura e per raggiungere l'unità e l'armonia con essa. Un'altra ragione per cui il muro completo non si è sviluppato in Giappone era una questione di materiali; il legno, piuttosto che la pietra, è diventato il materiale da costruzione primario. Ma più significativamente, ci fu sempre uno sforzo consapevole fatto per consentire all'interno e all'esterno di penetrare in interazione. Gli spazi sotto la grondaia, la veranda, i corridoi, i divisori di lattice e altri dettagli di costruzione sono tutti esempi di tali zone di intermediazione. Il mio sforzo per riscoprire la straordinaria varietà di significati in questi spazi intermedi è stato ispirato dalla ricca tradizione architettonica del Giappone»<sup>15</sup>.

Infine, guardando al panorama occidentale contemporaneo tale azione di frammentare, di guardare attraverso la materia è affine all'idea di porosità indagata dall'architetto americano Steven Holl.

«La porosità può diventare una nuova tipologia dell'essere. La sua potenzialità di coscienza indica un'apertura nella quale è compreso l'orizzonte. Il nostro auspicio è sviluppare la possibilità di riunire una serie di elementi aggregandoli

<sup>15</sup> Kisho, K. (1997), *Each One a Hero: The Philosophy of Symbiosis*, Tokyo: Kodansha Amer Inc, p. 63.



in modo nuovo dove l' "orizzonte" è aperto e si fonde sia con l'esterno che con l'interno»<sup>16</sup>.

### **Introduzione al tema dello 'Spatial Layering'**

Avendo adesso presente cosa si intende per smaterializzazione della solidità materica, dell'azione di particellizzazione di questa e delle ragioni per cui il termine 'frammento' per la scuola italiana è differente rispetto all'accezione per la cultura orientale, nel presente capitolo verranno indagate le origini di tale paradigma spaziale in architetti contemporanei giapponesi che seppur condividendo le trasformazioni messe in atto dalla società contemporanea, in maniera più o meno consapevole, nelle proprie opere trasferiscono i caratteri della tradizione.

### **Significato del tema dello Spatial Layering nel panorama dell'architettura tradizionale giapponese\_i concetti di *Ma, Oku e Miegakure***

Analogamente a quanto Kuma realizza nelle proprie opere, l'azione di 'frammentare' la materia diviene la maniera per giungere alla dimensione più intima, astratta e profonda dello spazio. Anche in siffatte architetture, la capacità dello sguardo di andare oltre il limite crea la tensione, il desiderio di continuare l'attraversamento. La spazialità così creata è quella della stratificazione bidimensionale di piani, non gerarchica, rizomatica. Una delle qualità che la contraddistingue è il ricercato equilibrio tra vuoti e pieni. Tale caratteristica permette allo sguardo di avanzare e al contempo, di essere ostacolato dalla presenza di elementi pieni, percependo così un senso di trasparenza, fenomenica e non reale. Tale resistenza all'avanzamento è restituita dallo spessore di un confine o dalla densità della materia. Alla base

<sup>16</sup> Holl, S. (2000), *Parallax*, Milano: Postmedia, 2004, p. 125.



^Pittura Sumi-e



^Pittura Sumi-e

di tale concezione è possibile individuare essenzialmente tre termini della tradizione nipponica, *Ma*, *Oku* e *Miegakure*.

Il termine *Ma*, il cui ideogramma è quello della luna sotto il segno della porta, 間, contrapposto all'*Horror vacui* dell'arte barbarica di età medievale rappresenta uno dei concetti costitutivi della filosofia del Buddhismo Zen a cui la cultura architettonica giapponese tradizionale si ispira. Secondo una accezione positiva assume il significato di 'pausa' nello spazio e nel tempo. Rappresentando una dottrina, una filosofia, una pratica, una espressione artistica. La vacuità è il fine della meditazione. Il teatro *No*, la poesia *haiku*, la calligrafia, la pittura *sumi-e*, sono estrema trasposizione di *meditazione* come pratica del vuoto e di vuoto come forma costitutiva dell'essere. Per comprendere cosa si intende con l'ideogramma *Ma* è d'aiuto il celebre passo taoista dell'undicesimo capitolo del *Daodejing*, il *Libro della via e della virtù* scritto tra il IV e III secolo a.C.:

[Il termine *Ma*]

«Si ha un bel riunire trenta raggi in un mozzo, l'utilità della vettura dipende da ciò che non c'è.

Si ha un bel lavorare l'argilla per fare vasellame, l'utilità del vasellame dipende da ciò che non c'è.

Si ha un bell'aprire porte e finestre per fare una casa, l'utilità della casa dipende da ciò che non c'è»<sup>17</sup>.

Quando il *Ma*<sup>18</sup> diventa spazio fisico, quello che per gli occidentali è il

<sup>17</sup> *Daodejing*, il *Libro della via e della virtù* IV-III secolo a.C., XI capitolo.

<sup>18</sup> «In giapponese, quando i concetti di tempo [jikan] e di spazio [kukan] furono scritti per la prima volta, fu utilizzato l'ideogramma cinese *Ma* - interstizio - per entrambi. Ho deciso di cercare tracce di questo spazio. Originariamente significava 'spazio tra le cose' che esistono le une accanto all'altro; in un contesto temporale, ha significato pausa in fenomeni che si verificano uno dopo l'altro, o 'differenza' immanente nelle cose. Solo dopo, tale termine è stato utilizzato per indicare 'il vuoto', un uso

## Particellizzazione della materia & Spatial Layering

vuoto tridimensionale, per gli orientali è definito *ku-kan*. Il concetto che più si avvicina al significato di *ku-kan* è quello contemporaneo di spazio *in-between* con la differenza che se per gli occidentali è carico di una concettualizzazione, di un processo di idealizzazione nella mente, è il completamento gestaltico della forma, è associato ai luoghi della memoria, è governato dalla logica, lo spazio del *Ma* per la cultura giapponese, non possedendo una connotazione fisica, non è dipendente dalla forma dell'oggetto, è uno spazio dell'esperienza, dei sensi, tutti, uno spazio mutevole, fluido tra parti dialettiche. Nell'architettura giapponese il concetto di vuoto, di *Ma*, è trasposto nello spazio della dimora, del giardino, della stanza per la cerimonia del tè, della strada, del villaggio, della città.

[Il termine *Oku*] Con il termine *Oku* [奥] si intende invece lo 'spazio interno', lo spazio di 'profondità percepita'. È anch'esso trasposizione della pratica buddhista in arte e in architettura. Ovvero immaginando di percorrere una serie di piani, rappresenta la dimensione più intima dello spazio, quella da svelare. Anche tale termine è trasposizione della spazialità ricercata mediante la particellizzazione della materia. Di fronte al versante di una montagna, se l'uomo occidentale ne guarderebbe la cima, l'uomo orientale ne ricercerebbe il nucleo. *Oku*, è rappresentativo di tale ricerca. In Occidente la ragione della maestosa verticalità delle chiese gotiche unita al sapiente utilizzo delle vetrate è guidata dalla ricerca del divino tramite un processo di ascesa verso il cielo. In Giappone, lo spazio è pensato per prediligere l'orizzontalità, il celato e l'occulto. Non è presente un centro ma un dentro. Per raggiungere tale spazio celato, è necessario intraprendere un percorso. Sia fisico che tramite lo sguardo. Tale spazio non è immediatamente mostrato,

dei giorni d'oggi che è poco spiegabile» in Isozaki, A. (2006), *Japan-ness in Architecture*, MIT Press, Cambridge, 2006 e Isozaki, A. (1979) *Ma: Japanese Time-Space* in «Japan Architect», n. 292, 1979.



^Pittura *Sumi-e*



^Simbolo del *Ma*



^Immagini della città di Kyoto



^Immagini della città di Kyoto

è suggerito, è da svelare. Fumihiko Maki, architetto del movimento metabolista e premio Pritzker nel 1993, perseguendo una accezione fisica e spirituale del termine *Oku* nel testo *Japanese City Spaces and the Concept of Oku*, definisce il termine *Oku* in relazione all'idea di *Oku-yuki*, profondità, e di *Oku-sai*, interiorità. Scrive,

«L'espressione *Oku* fa parte del nostro vissuto spaziale quotidiano: indica una nozione di posizione nello spazio - un senso di luogo - che solo i giapponesi possiedono. L'*Oku* rappresenta il centro invisibile delle cose e la stratificazione degli spazi. È interessante notare che la parola *Oku*, se impiegata con riferimento a questioni spaziali, implica sempre il concetto di *Okuyuki*, profondità, che indica una distanza relativa o una impressione di distanza in uno spazio dato. Rispetto ad altri popoli, i giapponesi sono vissuti in comunità di densità relativamente alta sin dall'antichità e perciò hanno sviluppato un senso dello spazio finito e intimo. Si può pensare che nello spirito dei giapponesi sia esistita da tempi remoti una delicata sensibilità per la disposizione di differenze relative di distanza entro spazi limitati»<sup>19</sup>.

Volendo schematizzare il modello di villaggio rurale tradizionale giapponese, ai piedi della montagna vi sarebbe il simbolo di uno *Shrine*, all'interno della montagna un santuario celato. Uno spazio spirituale nascosto. Roland Barthes aggiunge una ulteriore considerazione al concetto di *Oku*.

«Conformemente al movimento stesso della metafisica

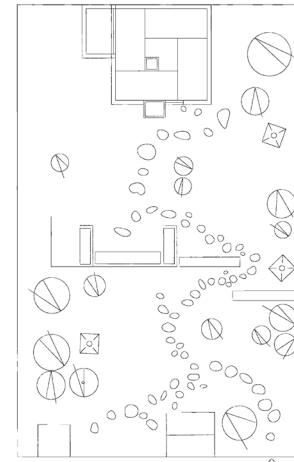
<sup>19</sup> Fumihiko, M. (1979), *Japanese City Spaces and the Concept of Oku*, in «The Japan Architect» n. 5, 1979.

## Particellizzazione della materia & Spatial Layering

occidentale, per la quale ogni centro è sede della verità, il centro delle nostre città è sempre pieno. [...] Andare in centro vuol dire incontrare la verità sociale, partecipare alla pienezza superba della realtà – mentre Tokyo – possiede sì un centro, ma questo centro è vuoto»<sup>20</sup>.

Volendo trasporre l'idea di *Oku* alla dimensione dell'essere umano, esso corrisponde alla dimensione interiore. Indica lo spazio del viaggio. Il poeta giapponese vissuto nel periodo Edo, Basho Matsuo, conosciuto per essere l'autore degli *haiku* più noti, viveva la poesia esattamente come avrebbe vissuto un maestro buddhista il senso del viaggio spirituale. Il fine era arrivare alla verità nascosta della natura dell'essere. Il testo più conosciuto è un diario poetico che scrisse nel 1694, *Oku no Hosomichi*, tradotto in *Lo stretto sentiero verso il profondo Nord* in occasione del viaggio condotto attraverso il Giappone del periodo Edo. La tradizione giapponese trova la sua origine e affermazione nella cerimonia del tè e nella filosofia sottesa, ripresa a sua volta dalla cultura cinese. Lo scrittore giapponese Kurokawa nel suo testo scrive di 'filosofia del grigio', *Rikyu Grey*, Tanizaki ne *Il libro d'ombra*, di gradazioni di buio o di ombra. Entrambi descrivono le diverse qualità del buio di cui si serve tale spazialità per 'annullare' la tridimensionalità dello spazio. Ancora una volta la ricerca di profondità restituita dalla sequenza di spazi bidimensionali. Dall'esigenza di scrutare, di indagare con lo sguardo. Descrivendo la città di Kyoto, Kisho Kurokawa afferma,

«Nel grigio del crepuscolo, le qualità spaziali della città di Kyoto, la comunità tradizionale del Giappone, sono al loro meglio. Le tegole del tetto e le pareti in gesso si dissolvono



^Giardino giapponese da attraversare

<sup>20</sup> Barthes, R. (1970), *L'impero dei segni*, Torino: Einaudi, p. 39.

in tonalità di grigio; sembrano perdere tutta la prospettiva e la tridimensionalità. Questo drammatico effetto, in cui un mondo tridimensionale si sposta in un mondo aereo bidimensionale, è impossibile da sperimentare in qualsiasi città dell'Europa occidentale. La disposizione spaziale delle città occidentali e del principio di prospettiva nel periodo rinascimentale portarono le sfumature tridimensionali alle città e all'architettura. Le torri, i monumenti e le piazze pubbliche costituiscono punti fisici di prospettiva, che sono diventati elementi importanti degli spazi urbani dell'Europa occidentale, lo spazio è sperimentato da un punto di vista unico e questi punti di riferimento sono diventati indispensabili per cogliere tale spazio». È una qualità, prodotta dalla riduzione della tridimensionalità al mondo bidimensionale»<sup>21</sup>.

Il grigio *Rikyu* fu un colore diffuso durante il periodo Edo tra il 1600-1868. Indica una coscienza estetica legata alla sobrietà e trae origine dal nome dell'ultimo grande maestro per la cerimonia del tè, Sen no Rikyu. Se le città occidentali sono state erette per essere illuminate dal sole, il Partenone sull'acropoli di Atene ne è un ammirevole esempio, le città giapponesi sono pensate per essere avvolte dall'ombra. Per tale ragione Kurokawa descrive "le qualità spaziali della città di Kyoto" che avvolta nel crepuscolo, tra le "sfumature di grigio" perde di tridimensionalità.

«Alla base della coscienza estetica giapponese, sia nella pittura, nella musica, nel dramma, nell'architettura e nelle città, vi è la spazialità bidimensionale o frontalità. È una

<sup>21</sup> Kurokawa, K. (1997), *Op. cit.*

qualità di non-sensualità senza tempo, prodotta dalla riduzione della tridimensionalità al mondo bidimensionale; è il continuum in cui coesistono elementi contraddittori e la qualità che scioglie le demarcazioni tra dimensioni disparate e annulla l'ambiguità. Rikyu grigio condivide tutto ed è un mezzo di tutti questi concetti. Nell'architettura giapponese, inclusa l'architettura della stanza del tè, gli elementi spaziali tradizionali come i soffitti, le alcove e le pareti, sono ognuno autonomo, cioè sono dei piani indipendenti di un mondo bidimensionale. Gli elementi eterogenei negano reciprocamente qualsiasi rapporto tridimensionale diretto. Esistono molti esempi, come ad esempio dove le finestre in due pareti opposte all'altro vengono collocate con totale disattenzione alla conformità di dimensioni, altezza o altre misurazioni. Questa è una tecnica che incoraggia il senso della bidimensionalità. In ogni caso, il grigio Rikyu è anche un mezzo in cui spazio di significato singolo tridimensionale, cubico, scultoreo e sostanziale viene reso in uno spazio piano, unidimensionale, non sensuale»<sup>22</sup>.

Sen no Rikyu, si occupò, tra l'altro, della realizzazione del giardino del tempio Nanshu-ji a Sakai, vicino Osaka. Dal sito in cui è sorto il tempio la vista era verso il mare. Rikyu fece piantare delle siepi che ne impedissero la diretta osservazione. Poi, collocando una bacinella d'acqua, in basso, ricavata dalla roccia, invita il visitatore a lavare le mani. Ma è proprio in quell'attimo, grazie a quel gesto, in quel momento in cui alza lo sguardo e pone l'attenzione tra le siepi che egli, il visitatore, inaspettatamente scorge il mare. La piccolezza del suo

<sup>22</sup> *Ibidem*.

essere accovacciato si confronta con la grandezza dell'infinità<sup>23</sup>.

Qui, un po' d'acqua.  
Laggiù tra gli alberi  
il mare!<sup>24</sup>

Infine, con il termine *Miegakure* si intende l'azione di intravedere qualcosa che è nascosto. [Il termine *Miegakure*]

«Questo termine indica una composizione spaziale in cui non è possibile vedere tutte le parti contemporaneamente. I giapponesi hanno usato questa tecnica con grande abilità, in particolare nell'architettura dei templi, non tanto per creare sorpresa quanto per consentire alla mente la possibilità di ricostruire una immagine mentale dell'intero edificio e di rivelare la bellezza del cambiamento»<sup>25</sup>.

I concetti di *Ma*, *Oku* e *Miegakure* si ritrovano nella città, nella dimora, nella *Sukiya*, tra le rocce irregolari del giardino giapponese. Vi è *Miegakure* nell'osservare tutti gli elementi, vi è *Oku*, nel volgere lo sguardo verso l'orizzonte, vi è la profondità dell'ombra, vi è la stratificazione di ogni piano. Sono tali i concetti all'interno della spazialità ricercata nel momento in cui la materia si infrange.

<sup>23</sup> Sen no Rikyu giustifica la scelta di porre le siepi, tramite i versi del poeta Sogi. Cfr. Calvino, I. (1994), *Romanzi e racconti 2*, Milano: Mondadori, pp. 184-185.

<sup>24</sup> *Ibidem*.

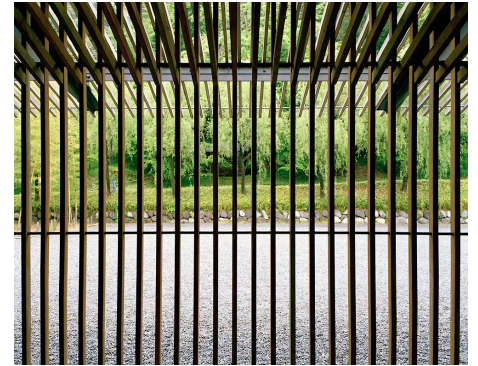
<sup>25</sup> Monnai, Teruyuki A. (1994), *Glossary of Spatial Concepts* in «Casabella» nn. 608-609, 1994.



**Significato del tema dello Spatial Layering nel panorama dell'architettura contemporanea giapponese\_Kengo Kuma, Sosuke Fujimoto, SANAA**

I concetti di *Ma*, *Oku*, *Rikyu grey* e *Miegakure*, seppur in maniera più o meno riconosciuta, sono rintracciabili nelle opere di architetti giapponesi contemporanei quali Kengo Kuma, Sosuke Fujimoto e i fondatori del gruppo SANAA. Nelle opere di Kuma la profondità è data dagli 'strati' che generano un *Ma* e un *Oku*. Nelle opere di Sosuke Fujimoto tale frammentazione è ricercata nel rapporto tra l'uomo e la natura, tra spazio interno ed esterno. Per SANAA, nel processo di ridurre la struttura in esili componenti.

[Kengo Kuma] In controtendenza agli architetti dell'high-tech, Kuma riprende i materiali della millenaria tradizione giapponese e li rilegge in chiave contemporanea. All'interno del Kuma-Lab di Tokyo sperimenta tecniche innovative per la definizione della struttura. Incastri, sovrapposizioni di materiali che per quanto tradizionalmente associati all'idea di 'gravità', nelle proprie architetture assumono la figurazione dell'immaterialità. La più nota delle stratificazioni strutturali modulari che Kuma compone con il legno è quella del caratteristico gioco a incastri in legno di cipresso denominato *chidori*, ma analogamente pietra, paglia, acciaio, terra sono sapientemente combinati, in una logica di *Ma*, *Oku* e *Miegakure*. La casa del tè di Oribe composta da elementi di plastica, il museo Adobe per la statua lignea del Buddha, la casa di bambù o la sede della Komatsu Seiten a Nomi in fibra di carbonio, sono esemplificative della ricerca di relazione tra materialità e immaterialità, tra forma e struttura, tra interno ed esterno, tra uomo e natura. Il Museum of Ando Hiroshige in Bato rappresenta una delle opere di Kuma in cui i principi della tradizione sono sapientemente reinterpretati. Il materiale da frammentare, da ridurre in componenti, è il legno di abete *yamizo*, sebbene anche la carta *washi* e



^Kuma, K. \_Museum of Hiroshige Ando del 1998-2000, Bato, Giappone



^Kuma, K. \_Great Bamboo Wall del 2002-2004, Pechino, Cina



^Hiroshige, *Sudden Evening Shower on the Great Bridge near Atake*



^Van Gogh, *Ponte sotto la pioggia*

la pietra di *ashino* - la stessa adoperata per lo Stone Museum - siano stati impiegati. Il legno è così ridotto in lamelle per smaterializzare i contorni della forma, per raggiungere la stessa spazialità assimilata dai maestri di stampe *ukiyo-e*<sup>26</sup>. Hiroshige Ando è il maestro giapponese di *ukiyo-e*, noto con l'epiteto di maestro della 'pioggia e della neve', vissuto nel periodo Edo, tra il 1797 e il 1858, colui a cui Kuma si è ispirato per la progettazione del museo. Trasformata la spazialità tridimensionale in bidimensionale mediante la successione di piani, tramite la riduzione della materia in lamelle Kuma omaggia Hiroshige restituendo il medesimo tratto che il maestro di *ukiyo-e* eseguì col disegno della pioggia in *Sudden Evening Shower on the Great Bridge near Atake*. Hiroshige tramite l'incisione di sottili linee sapientemente tracciate restituisce profondità alla raffigurazione. La stessa costruzione spaziale che in pittura aveva influenzato le avanguardie pittoriche occidentali del Novecento, tale da, in taluni casi, si vedano le tre *d'après japonaises* di Van Gogh, divenire dei riferimenti. Kuma, riconoscendone la genialità del gesto di Hiroshige Ando, scrive,

«Ha messo nero su bianco cose quali la luce e il vento, la neve e la pioggia. Rappresenta la pioggia facendo delle righe verticali. [...] È un compito arduo rappresentare la natura fornendo un'unica visualizzazione di fenomeni variabili.

<sup>26</sup> Le stampe *ukiyo-e*, tradotte in '*stampe del mondo fluttuante*' sono similmente delle xilografie la cui tecnica di incisione era già nota in Oriente nel 770 d.C. per riprodurre e diffondere i testi della dottrina buddhista. Sviluppate durante il XVII secolo nelle odierne Tokyo, Kyoto e Osaka a partire dalle opere monocromatiche di Moronobu e quelle policromatiche *nishiki-e* di Harunobu, tramite le stampe *ukiyo-e* furono raffigurate sia la natura, il paesaggio che gli stessi piaceri e attaccamenti fuggevoli scongiurati dalla dottrina buddhista. Quattro i più noti artisti di *ukiyo-e* visuti durante il periodo Edo: Kitagawa Utamaro (1753-1806); Hokusai (1760-1849); Utagawa Hiroshige (1797-1858) e Utagawa Kunisada (1786-1865).

## Particellizzazione della materia & Spatial Layering

Hiroshige è riuscito ad esprimere con successo la mutevolezza in qualcosa di materiale, scegliendo elementi naturali con chiare caratteristiche, combinandone i colori»<sup>27</sup>.

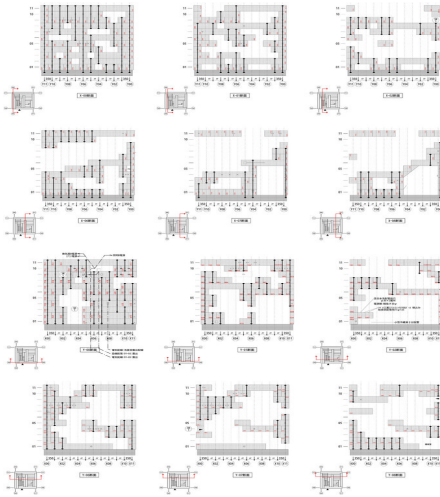
Ovvero, Hiroshige rappresenta la mutevolezza della natura, la concezione di disvelamento, di dissolvenza, la stessa che Kuma ripropone nelle proprie opere.

«Hiroshige ha compreso l'esistenza delle particelle che costituiscono il mondo naturale e nelle sue opere ha mostrato l'essenza della natura attraverso il layering realizzato con questi elementi. Egli ebbe un'enorme influenza sul movimento Impressionista in Europa e sull'architettura di Frank Lloyd Wright. [...] Nel Museo Hiroshige ho creato in pratica tutti gli elementi architettonici, dal tetto e le pareti alle partizioni e gli arredi, con lamelle di legno di cedro proveniente dalla montagna alle spalle del museo. Il mio obiettivo era di fondere l'edificio con l'ambiente circostante attraverso l'uso di stecche di legno come particelle, cancellando in tal modo l'architettura»<sup>28</sup>.

Anche la carta *washi* partecipa nell'opera di tale dissolvenza. È impiegata per imbibirsi della luce che penetra nella sala principale del museo. A differenza della carta occidentale che bianca, riflette la luce, l'intreccio delle fibre della carta *washi*, la cromia, permette che questa la assorba, la intrappoli. Ancora una volta la carta, come altri elementi dell'architettura, è partecipe del disegno delle gradazioni di buio, di ombra, di grigi.

<sup>27</sup> Tratto da un'intervista a Kengo Kuma nel gennaio 2000 pubblicata in «Abitare la Terra», n. 2, 2002, p. 39.

<sup>28</sup> Botond, B. (2005), *Kengo Kuma: Selected Works*, New York: Princeton Architectural Press, p. 17.



^ Fujimoto, S. *Final Wooden House* del 2006, Kukamoto, Giappone



^ Fujimoto, S. *Final Wooden House* del 2006, Kukamoto, Giappone

Per comprendere la differenza tra le due culture, orientale e occidentale, anche nel diverso impiego della materia carta, Jun'ichiro Tanizaki, in *Libro d'ombra*, scrive,

«Se la carta occidentale sembra respingere la luce, quella cinese, o giapponese, la beve lentamente»<sup>29</sup>.

Per la Great Bamboo Wall Kuma progetta una doppia pelle di vetro e bambù. La stanza per la cerimonia del tè è posta centralmente. In questo progetto ad essere ridotto in frammenti e poi essere oggetto di un processo di astrazione non è il legno ma il bambù. L'esito è il medesimo. Permeabilità, profondità, spazi celati, spazi in ombra, spazi stratificati.

«Mi piace scoprire ciò che si trova "tra". Non solo [tra] natura e architettura, ma anche [tra] dentro e fuori. Per ogni tipo di definizione è possibile scoprire uno spazio intermedio. E se i due termini sono opposti, allora lo spazio tra loro è più rilevante».<sup>30</sup>

Tali sono le parole con cui l'architetto Sosuke Fujimoto descrive la spazialità ricercata nelle proprie opere. Dall'architettura tradizionale giapponese ne riprende anch'egli la percezione della profondità generata dalla reiterazioni di parti strutturali, la continuità tra interno ed esterno, la ricerca di trasparenza e profondità, di *Ma, Oku* e *Miegakure*. Il tema di ricerca è definito dallo stesso architetto giapponese *Primitive Future House*, includendo in esso l'indagine della dualità tra artificio e natura, della metafora del nido e della grotta, del rapporto tra foresta e città. Fujimoto, reinterpreta sia in termini di esi-

[Sosuke Fujimoto]

<sup>29</sup> Tanizaki, J. (1933), *In'ei raisan*, trad. it. Mariotti, G. (a cura di) (1982), *Libro d'ombra*, Milano: Bompiani, p. 23.

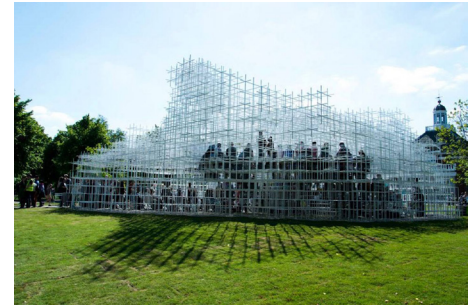
<sup>30</sup> Fujimoto, S. (2008), *Primitive Future*, Tokyo: Inax.

## Particellizzazione della materia & Spatial Layering

ti estetici che di fondamenti concettuali i concetti della tradizione giapponese. È nella Final Wooden house, in Kumamoto completata nel 2006 che, seguendo la logica delle *Primitive Future Houses*, Fujimoto sperimentò la progettazione di uno spazio-grotta, privato, essenziale. Qui a essere astratta è anche la funzione, non prestabilita, restituita dall'essenzialità dell'ambiente. In tale azione di astrazione ricorda l'idea dello spazio dell'architettura tradizionale giapponese modulato dal *tatami* e quello essenziale della *Sukiya*, la stanza per le cerimonie del tè. Al pari dell'azione di astrazione del materiale e di scomposizione dello stesso, la Final Wooden house, è concepita affinché dall'esterno possa essere percepita come solida e porosa, all'interno, le travi di legno di cedro di cui è composta si frammentano. Crea ambiguità, contrapposizione tra positivo e negativo, tra solidità della massa e 'particellizzazione' della materia.

Quando nel 2013 Fujimoto fu invitato alla progettazione del temporaneo Serpentine Gallery Pavilion presso l'*Hyde Park* di Londra, propose un'idea di architettura in dissolvenza servendosi di elementi tubolari in acciaio bianco organizzati secondo una struttura reticolare. La reiterazione di tali elementi invogliava lo sguardo a scrutare l'orizzonte e ricreava una spazialità rizomatica riducendo a zero il grado di separazione tra il padiglione e il paesaggio del parco in cui era immerso. Permeabilità dello sguardo, trasparenza, *Oku* e *Miegakure*. Si accedeva al padiglione da due soli ingressi.

Gli architetti giapponesi Kazuyo Sejima e Ryue Nishizawa, fondatori dello studio SANAA nel 1995, hanno spesso negato di trarre ispirazione direttamente dall'architettura tradizionale giapponese, sebbene non ne abbiano escluso una inconsapevole influenza culturale. Tra i caratteri ricorrenti del loro modo di intendere l'architettura oltre all'astrazione della funzione e alla chiarezza del gesto, l'idea di *Ma*, *Oku* e *Miegakure* sono ritrovabili nella riduzione dello scheletro strut-



^Fujimoto, S. *Serpentine Gallery Pavilion* del 2006; Hyde Park, Londra

[SANAA]



^SANAA.\_Koga Park Cafè del 1998; Koga, Giappone



^SANAA.\_Moriyama House del 1998; Tokyo, Giappone

turale di parecchie loro opere in elementi puntuali verticali sottili, fittamente reiterati. Tali elementi rievocano la metafora della foresta, l'uso del colore bianco, l'astrazione dello spazio. Per annullare la tridimensionalità dello spazio non lavorano con le ombre ma con l'isotropia dello spazio, con la trasparenza, la permeabilità, la continuità spaziale tra interno ed esterno, con la luce. Il concetto di *Oku* è invece rievocato mediante la tecnica del raggruppamento e della stratificazione. Procedendo attraverso il Koga Park Cafè pensato per la città di Koga, Ibaraki, un progetto del 1998, il visitatore è immerso all'interno di uno spazio astratto evocatore di un bosco. Coerentemente con la logica delle ricerche condotte dallo studio SANAA, la nutrita reiterazione dei sottili sostegni verticali, un centinaio di piedritti tubolari, estremamente sottili e la riduzione estrema dello spessore della copertura rettangolare, rendono tale opera in estrema eufonia con la natura del parco in cui la caffetteria è immersa. All'interno del Park Cafè si percepisce la continuità tra lo spazio all'interno e quello all'esterno. Nel Rolex Learning center, un progetto del 2010 presso l'*Ecole Polytechnique Fédérale* di Losanna, l'idea di *Oku* è resa manifesta, unitamente all'impiego delle esili colonne verticali, dalla presenza, all'interno, di un nucleo da scoprire. La copertura, sempre estremamente sottile, diviene sinuosa. Estremamente bianco, lo spazio è ancora una volta isotropo. Le dicotomie qui interessate sono quelle di rigore-flessibilità, solidità-trasparenza. È sovente ritrovare nei progetti dello studio SANAA tre spazi: un nucleo centrale; uno spazio intermedio e uno esterno. Nella Moriyama House del 1998 dieci scatole bianche prefabbricate con l'anima in acciaio di dimensioni differenti sono dislocate come fossero dei frammenti su di un lotto rettangolare nel quartiere di Ota in Tokyo. Non vi è una gerarchia di fronti, non vi sono ingressi principali. La dislocazione dei volumi rimanda alle dicotomie pieno-vuoto, privato-pubblico, intimo-urbano.

## **Ordine & Caos in natura e in architettura**

Tenendo presente che l'obiettivo della ricerca è la restituzione di spazialità stratificate e rizomatiche in termini di 'particellizzazione' del materiale in accordo all'attuale tematica della parametrizzazione del processo in architettura e della rivoluzione informatica in atto e avendo affrontato nel capitolo precedente la maniera mediante cui poter raggiungere tale spazialità, strettamente legati ai suddetti temi vi sono quelli di ordine e caos, di forma e non forma.

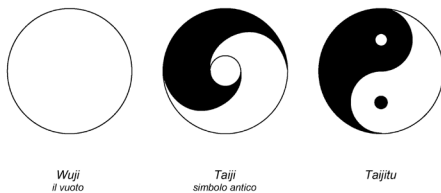
### **Estetica dell'ordine ed estetica del disordine in natura**

Gli studi sull'arte e sulla percezione visiva condotti dallo psicologo e storico dell'arte Rudolf Arneheim<sup>1</sup> provano che la mente umana possiede la tendenza di porre ordine nel disordine affinché si possa comprendere e ricostruire razionalmente, anche se priva di parti, una certa condizione ordinata, una certa immagine, una certa struttura. Ovvero, la mente umana percependo tramite i sensi, rielabora razionalmente le informazioni ottenute e se capace di collocarle all'interno di una struttura ordinata, le comprende. Sia visibilmente, ricostruendo simmetrie, parti mancanti, equilibri. Sia quando tale condizione appartiene alla dimensione dell'invisibile. Volgendo lo sguardo verso le costellazioni o tramite il sentire spirituale, l'essere umano fin dagli albori, ha cercato difatti di interrogarsi sulla propria condizione umana tentando di mettere un ordine cosmico nel caos primordiale. Le piramidi della piana di Giza, le "montagne artificiali" secondo Christian Norberg-Schulz, orientate rispetto alle tre stelle

<sup>1</sup> Arneheim, R. (1974), *Entropia e arte*, Torino: Einaudi.

che compongono la cintura di Orione ne rappresentano un illustre esempio. In natura, le categorie estetiche di ordine e caos, ammettendo che ne esista una differenziazione, sono spesso presenti. Intendendo qui per categorie estetiche non quelle assoggettate alla "Scienza del Bello e delle arti liberali"<sup>2</sup>, ma alla nozione di estetica nell'originale significato aristotelico di *sensazione* (αἰσθησις) e *percezione* (αἰσθάνομαι). Ovvero, di percezione tramite i sensi. Inoltre, se si pensa ai dualismi in termini di complementarità, si offre una chiave di lettura per cui categorie apparentemente dialetticamente opposte sono parti di una unità che le rende dipendenti l'una dall'altra. Secondo la filosofia orientale tale concetto è esprimibile graficamente mediante il simbolo taoista del *taijitu*. In esso, poiché valevole per ogni forma dialettica, ordine a caos, pieno e vuoto, forma e non-forma, si esprime l'idea del mutamento tra le dualità e si esprime soprattutto la loro reciproca dipendenza. Perché nel *taijitu*, se lo sfondo scuro rappresenta per esempio l'ordine e quello chiaro il disordine è pur vero che in entrambi è contenuto il germe dell'opposto. È come oscillare tra perfezione e imperfezione. Tra determinismo e relativismo. Che in natura vi sia caos è innegabile [vedi gli eventi imprevedibili, i terremoti, le turbolenze dei fluidi] come anche che siano presenti configurazioni ordinate e riconoscibili [vedi le forme geometriche dell'arco, dell'esagono, delle spirali]. Cosa è quindi ordine e cosa non lo è. Secondo la definizione espressa nel Treccani,

[Cosa è ordine e  
cosa non lo è]



«Dato un insieme qualsiasi è possibile organizzare i suoi elementi secondo una certa regola (o relazione) che definisce un ordine degli elementi nell'insieme»<sup>3</sup>.

È quindi possibile estendere tale enunciazione, ed è quella a cui si

<sup>1</sup> Simbolo del *Taijitu*

<sup>2</sup> Baumgarten, A.G. (1992) *Estetica*, Milano: Vita e pensiero.

<sup>3</sup> Dizionario della lingua italiana, Enciclopedia Treccani, online.



farà riferimento all'interno della presente ricerca, definendo il modello ordinato quel sistema per cui esiste una legge matematica, più o meno esplicita, tramite cui gli elementi che compongono tale sistema sono disposti. Sempre secondo l'enciclopedia Treccani, con il termine 'configurazione' [dal lat. tardo *configurationis*] si intende invece la «conformazione di un oggetto, risultante dalla sua struttura e dalla disposizione delle parti»<sup>4</sup>.

Intendendo l'architettura come il risultato di un processo di astrazione di forme e materiali presenti in natura, ci si chiede a questo punto quali siano gli elementi che possiedono un principio ordinatore, di che tipo di ordine si tratta, ossia quale tipo di relazione esiste tra le parti e se tale principio ordinatore possiede un carattere a-prioristico. Per rispondere a tali interrogativi è necessario immaginare il senso di ricerca dell'uomo primitivo quando nel rapportarsi con la realtà fisica iniziò a intuire la misura dello spazio e del tempo, ovvero quando cercò di dare un ordine alla realtà che lo circondava, quando iniziò a operare una azione di astrazione. Difatti, in età classica, grazie prima a Talete e Pitagora e a Euclide e Archimede poi, ciò che era stato intuito e immaginato iniziò ad avere un fondamento. Intrecciandosi con il pensiero filosofico la matematica, i numeri e la geometria divennero gli strumenti per osservare e descrivere la realtà fisica, il mondo della natura e per comprenderne in parte l'ordine sotteso. In particolare, con l'introduzione della geometria euclidea<sup>5</sup>, il concetto di ordine iniziò ad assumere un significato specifico, ponendolo in relazione a quello di armonia, ossia di rapporto tra le parti il cui fine fosse la ricerca di bellezza; a quello di simmetria e a quello di forma geometrica riconoscibile. Già nelle forme artistiche della

<sup>4</sup> *Ibidem*.

<sup>5</sup> Euclide di Alessandria, matematico greco vissuto tra il IV e il III secolo a.C. e discepolo di Platone.

civiltà cretese e minoica, come in quella egizia è possibile ritrovare proporzioni e forme geometriche ordinate primitive. Tuttavia, è nel periodo classico greco - dal v al iv secolo a.C. - congiuntamente al concetto di ordine che è stato introdotto quello di canone, di simmetria intesa come proporzione tra le parti, di modulo. Esemplicativi il *Doriforo* di Policleto il Vecchio, realizzato tra il 450 e il 445 a.C. e il *Discobolo* di Mirone del v secolo a.C. L'archetipo del tempio greco, caratterizzato da moduli e proporzioni tra basamento, colonna e capitello non è altro che l'astrazione delle forme dell'albero e dell'elemento ligneo. È il *De Architettura libri decem* del I sec. a.C. il trattato in latino in cui Marco Vitruvio Pollione introduce per la prima volta il concetto di ordine architettonico. Relazione tra matematica, geometria, natura, architettura. Galileo Galilei (1564-1642) affermava che la natura fosse scritta in lingua matematica tramite le figure geometriche, Isaac Newton (1642-1726) che fosse lo strumento mediante cui cogliere le regolarità e Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) che

«Un'intelligenza che, per un istante dato, conoscesse tutte le forze da cui la natura è animata e la situazione rispettiva degli esseri che la compongono, se fosse abbastanza vasta da sottoporre questi dati ad analisi abbraccerebbe nella stessa formula i moti dei corpi più grandi dell'universo e quelli dell'atomo più leggero: per essa non ci sarebbe nulla d'incerto e il futuro come il passato sarebbe presente ai suoi occhi. Lo spirito umano offre, nella perfezione che ha saputo dare all'astronomia, solo un barlume di tale intelligenza»<sup>6</sup>.

Per tale ragione, quando arte figurativa, arte plastica e architetture

<sup>6</sup> Laplace, P.-S. (1814), *Saggio filosofico sulle probabilità*, trad. it. Peluffo, P. (a cura di), Roma: Theoria, 1987.

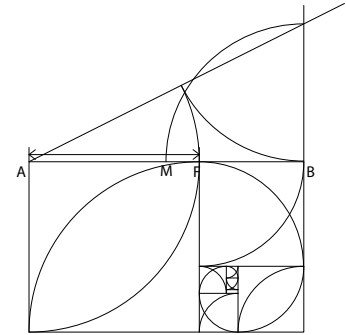
## Ordine & Caos in natura e in architettura

ra divennero il tramite mediante cui l'uomo potesse esprimere sé stesso in rapporto alla realtà fisica, quando si volle riprodurre la natura, canoni, moduli e proporzioni matematiche divennero la maniera per proporzionare, rappresentare e astrarre le sue forme in architettura. Tra i rapporti numerici ricorrenti che pongono in relazione natura, matematica e geometria e che maggiormente affasciano studiosi e ricercatori della disciplina troviamo il numero aureo *phi* ( $\phi$ ), le leggi armoniche della musica, la serie di Fibonacci e la spirale logaritmica. Il numero aureo  $\phi$  fu formulato per la prima volta in età classica, da Euclide. È un numero irrazionale la cui rappresentazione geometrica coincide con la sezione aurea e quindi con la spirale aurea. Euclide per rappresentare geometricamente il numero  $\phi$  scrive nel secondo volume di *Elementi*,

«Si può dire che una linea retta sia stata divisa secondo la proporzione strema e media quando l'intera linea sta alla parte maggiore così come la maggiore sta alla minore»<sup>7</sup>.

Ovvero la sezione aurea di un qualsiasi segmento esiste se è definita la media proporzionale tra l'intero segmento e la parte minore. Tale rapporto è pari a circa 1,618 ed è il valore di  $\phi$ . Dalla ripetizione del rettangolo aureo per costruzione si ricava la geometria della spirale aurea il cui esempio più illustre presente in natura è rappresentato dal *Nautilus pompilius*. Il pentagono è una delle figure geometriche la cui costruzione avviene a partire dalla sezione aurea. Il dodecaedro è il corrispondente solido costituito da dodici facce pentagonali. In natura, i cristalli di pirite presentano tale forma. E cosa dire della forma esagonale aggregata presente in natura. Scriveva il premio Nobel per la letteratura Maurice Polydore-Marie-Bernard Maeterlinck

<sup>7</sup> Euclide, *Elementi*, Il volume, 300 a.C.



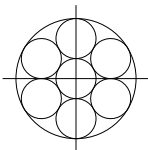
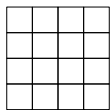
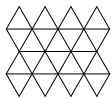
^Costruzione del rettangolo aureo e della spirale aurea



^Nautilus pompilius\_ la spirale aurea in natura



^Alveoli\_ la forma geometrica dell'esagono in natura



^Tassellature

(1862-1949) nel 1911, appassionato di apicoltura:

«Come è noto le api costruiscono quattro tipi di cellette. Prima di tutto le celle reali, eccezionali, che assomigliano alle ghiande della quercia; poi le grandi celle destinate ad allevare i maschi [...] e le cellette che fanno da culla alle operaie e da deposito ordinario. [...] Infine, per raccordare con ordine le grandi e le piccole celle, ne costruiscono una certa quantità di transizione. Se si tralascia l'irregolarità di queste ultime, le celle del secondo e del terzo tipo presentano dimensioni calcolate con tale precisione, che quando si stava stabilendo il sistema metrico decimale, e si cercava in natura una misura fissa come punto di partenza e incontestabile prototipo, Reaumur propose l'alveolo delle api. Ognuno di tali alveoli è costituito da un esagono posato su una base piramidale, ed ogni favo è formato da due facce intessute di tali tubi esagonali, fronteggiantesi sulle basi secondo un disegno tale per cui ciascuna delle terne di rombi o losanghe costituenti la base piramidale della cella del lato rovescio del favo venga a fornire la base, sempre piramidale, di tre celle del lato opposto. È cosa risaputa dai geometri – dice il dottor Reid – che vi sono soltanto tre tipi di figure che consentono di suddividere una superficie in piccole parti equivalenti, di forma regolare, ugual grandezza, senza interstizi. Si tratta del triangolo equilatero, del quadrato e dell'esagono regolare per il quale, per quel che riguarda la costruzione delle celle, batte le altre due figure quanto a comodità e resistenza. Ed ecco che le api adottano proprio la forma esagonale, come se ne comprendessero i vantaggi. [...] Quando si fa il confronto tra i

loro nidi e le città matematizzate delle nostre api, è come se si osservasse una borgata di capanne primitive di fronte a una di quelle implacabilmente regolari città che sono il frutto, magari sgraziato ma coerente, del genio dell'uomo, che più aspramente di una volta è in lotta col tempo, lo spazio e la materia»<sup>8</sup>.

Le celle di dimensioni simili tali da contenere miele o piccole larve sono forme esagonali aggregate in maniera rizomatica. Api e vespe nella costruzione procedono in maniera opposta, relativamente alla forma complessiva dell'alveolare. In verticale le prime, in orizzontale le seconde. All'opposto, la profondità delle celle, in orizzontale le prime, in verticale le seconde. Sorprendentemente, volendo aggregare delle monete, quindi dei cerchi in due dimensioni, il numero di parti in contatto sarà sei. Ogni cerchio avrà attorno sei cerchi e unendo i punti di contatto questi formeranno un esagono. Ossia si disporranno secondo il nido d'ape. E questa, secondo i matematici Axel Thue nel 1910 e László Fejes Tóth nel 1940, rappresenta la configurazione più densa possibile per figure geometriche convesse. E ancora, il selciato del gigante sulla costa Nord-est dell'Irlanda del Nord e la Torre del Diavolo negli USA o gli affioramenti basaltici nelle coste di Acitrezza, nel catanese, sono formazioni naturali di origine vulcanica costituite da colonne di basalto che grazie alle condizioni di raffreddamento hanno assunto incredibilmente una configurazione geometrica esagonale.

La successione o serie di Fibonacci, dal matematico pisano Leonardo Fibonacci (1175-1235), pubblicata nel testo *Liber Abaci* del 1202, è tale per cui ciascun numero intero è la somma dei due precedenti,

<sup>8</sup> Maeterlinck, M. P.-M.-B. (1901), *La vita delle api*, trad. it Buzzi, M. (a cura di), Roma: Newton Compton Editori, 1991, pp. 158-159.

eccetto per i primi due che sono  $F_0 = 0$  e  $F_1 = 1$

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2} \text{ (per ogni } n > 1)$$

La serie di Fibonacci è posta in relazione al numero aureo dividendo un qualsiasi numero intero della serie con il proprio precedente. Dalla fillotassi [dal greco *phýllon*, foglia e *táxis*, ordine], ovvero dallo studio delle ricorrenze matematiche e geometriche in botanica, è stato scoperto che la crescita delle foglie di molte specie vegetali segue le stesse proporzioni numeriche della serie di Fibonacci. Proporzionalità che è possibile riscontrare anche nella geometria dei capolini della margherita, nelle scaglie dell'ananas, nella geometria delle spirali brattee delle pigne. La spirale logaritmica, conosciuta anche come *spirale proporzionale*, fu studiata da René Descartes e fu denominata "Spira mirabilis" dal matematico svizzero Jakob Bernoulli (1654-1705). È quella per cui ogni raggio vettore che la genera secondo una progressione geometrica sarà maggiore di quello precedente. Possiede la caratteristica di non raggiungere mai il polo perché il centro è un punto asintotico e di non cambiare forma quando se ne aumentano le dimensioni. Tale proprietà è detta di autosimilarità.

Artisti e architetti a partire dall'epoca classica quindi, riconoscendo in tali rapporti numerici una qualità armonica [*eurytmia*] iniziarono a riproporla per definire la composizione delle proprie opere. Il Partenone eretto sull'acropoli di Atene nel V secolo a.C. in origine a opera di Ictino e Callicrate è esempio sublime della ripetizione del rettangolo aureo in pianta e in altezza, come anche la pianta del Tempio della Concordia ad Agrigento. Il numero aureo è difatti rappresentato dalla lettera greca *phi* in onore dello scultore del Partenone, Fidia. Omaggio reso dal matematico americano Mark Barr nel XX secolo quando ne diede una definizione. Anche durante il periodo



^Basalto esagonale, Torre del diavolo, USA



^Basalto esagonale, County Antrim, Irlanda del Nord

## Ordine & Caos in natura e in architettura

che caratterizzò l'architettura moderna si ricercò un modulo che potesse proporzionalmente esser ripetuto per raggiungere una armonia nelle proporzioni della composizione. Quello definito da Le Corbusier, per esempio, manifestazione dell'interesse dell'architetto svizzero verso la musica e le proporzioni armoniche, si basa su misure antropomorfe il cui punto di partenza è la posizione dell'ombelico del corpo umano. Scrive difatti nel testo *Le Modulor*:

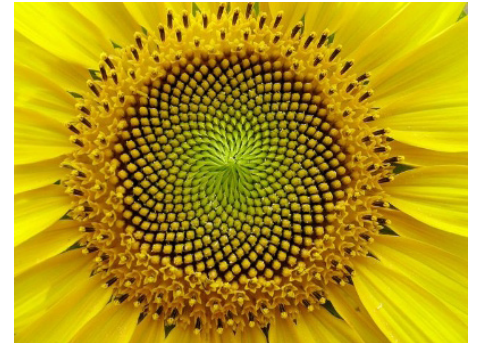
«Il *Modulor* è uno strumento di misura nato dalla statura umana e dalla matematica. Un uomo con il braccio alzato fornisce nei punti determinanti dell'occupazione dello spazio, il piede, il plesso solare, la testa, l'estremità delle dita, essendo il braccio alzato, tre intervalli che generano una serie di sezioni auree dette di Fibonacci. D'altra parte, la matematica offre la variazione più semplice e nello stesso tempo più significativa di un valore: il semplice, il doppio, le due sezioni auree»<sup>9</sup>.

Galileo Galilei, padre del metodo sperimentale su cui si basava la scienza moderna, affermava ne *Il Saggiatore*:

«Questo grandissimo libro della natura, che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi (io dico l'Universo), non si può intendere se prima non si impara a intender la lingua e conoscer i caratteri ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica e i caratteri son triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto»<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> Le Corbusier (1961), *Le Modulor*, Londra: Faber & Faber.

<sup>10</sup> Galilei, G. (1624), *Il Saggiatore*, cap. VI, in Flora, F. (a cura di), *Opere*, Napoli: Ric-



^Il girasole\_la spirale logaritmica in natura



^Le scaglie della pigna\_la spirale logaritmica in natura

Eppure, benché sia innegabile che taluni processi che avvengono in natura siano governati da leggi matematiche, alcuni di questi sembrano non seguire una regola, la natura appare discontinua, caotica, disordinata, imprevedibile.

[Cosa è caos]

In Fisica si inizia a parlare del concetto di caos quando Rudolph Clausius nel 1865 formula il II principio della termodinamica, definendo la funzione di stato *Entropia* e quando in contrapposizione al determinismo della fisica classica elaborata a partire dal XVII secolo, i principi di causa ed effetto furono messi in discussione da termini quali irreversibilità e relativismo. L'enunciato del II principio della termodinamica di Kelvin-Planck in termini di energia recita che:

«È impossibile realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia la conversione in lavoro del calore fornito da una sorgente a temperatura uniforme - e che - non è possibile costruire una macchina termica il cui unico risultato sia il trasferimento di calore da una fonte di calore a temperatura inferiore a una fonte di calore a temperatura superiore»<sup>11</sup>.

L'enunciato del II principio della termodinamica formulato da Clausius recita invece che:

«È impossibile realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia il passaggio di calore da un corpo ad una data temperatura ad un altro a temperatura maggiore»<sup>12</sup>.

Ovvero, il calore non può spontaneamente fluire da un corpo più freddo a uno più caldo. Quando Clausius introduce la definizione di En-

ciardi, 1953.

<sup>11</sup> Mazzei P. e Vanoli, R. (1989), *Fondamenti di termodinamica*, Note dalle lezioni di Fisica tecnica, Napoli: Liguori editore, cap. 2.

<sup>12</sup> *Ibidem*.



tropia [è  $n + \text{trópé}$ , ossia trasformazione intrinseca di un sistema] la formulazione matematica del II principio diviene  $dS \geq 0$ , ovvero l'entropia di un sistema isolato termicamente non può diminuire.

L'enunciato del II principio perseguendo la chiave di lettura della dicotomia ordine-caos implica che l'universo, se inteso come sistema termicamente isolato, tende naturalmente a un grado di disordine maggiore. Ovvero, se è vero che per il I principio della termodinamica durante una trasformazione l'energia complessiva di un sistema isolato [ideale] è costante, per il II principio, l'entropia, la misura del disordine, per il sistema universo è destinata a crescere.

Tali enunciazioni permettono di riaffermare l'idea che, ordine e caos rappresentano dualità complementari perché se è vero che la forma di un sistema ordinato deriva dalla sua organizzazione, a questo sistema appartiene sempre anche un certo grado di disordine. Tale grado di disordine si ritrova nel sistema, nella degradazione a cui questo inevitabilmente tende<sup>13</sup>.

E ancora, vi è una definizione di caos strettamente connessa a quella di ordine, la cui teoria è stata introdotta a partire dagli studi del matematico James Yorke in *Period Three implies Chaos*. Egli scrive:

«Il modo in cui i fenomeni o i processi evolvono o cambiano nel tempo è spesso descritto da equazioni differenziali. Una delle situazioni matematiche più semplici si verifica quando il fenomeno può essere descritto da un singolo numero [e questo] numero  $x_{n+1}$  all'inizio dello  $n + 1$  anno (o periodo di tempo) può essere scritto  $x_{n+1} = F(x_n)$ , dove  $F$  mappa un intervallo  $J$  su se stesso. Questi modelli

<sup>13</sup> Villani, G. (2008), *Complesso e organizzato. Sistemi strutturati in fisica, chimica, biologia ed oltre*, Milano: FrancoAngeli, p. 17.

sono estremamente semplificati, ma anche questa equazione apparentemente semplice [...] può avere un comportamento dinamico sorprendentemente complicato. Ci avviciniamo a queste equazioni con il punto di vista che talvolta le irregolarità e le oscillazioni caotiche di fenomeni complicati possono essere comprese in termini di modello semplice, anche se quel modello non è sufficientemente sofisticato per consentire previsioni numeriche accurate. Lorenz ha preso questo punto di vista nello studio del comportamento turbolento in un'affascinante serie di articoli. In questo articolo analizziamo una situazione in cui la sequenza  $\{F(x_n)\}$  non è periodica e potrebbe essere definita "caotica"»<sup>14</sup>.

[Caos deterministico] Come è suggerito da Achille Cristallini<sup>15</sup> il termine caos è qui impiegato per la prima volta, siamo nel 1975, per descrivere quei sistemi dinamici deterministici, descrivibili secondo un modello matematico per cui ogni stato dipende da quello strettamente precedente, che presentano caratteri di a-periodicità e di estrema sensibilità alle condizioni iniziali. Caos deterministico, ovvero definizione ossimorica che introduce nella nozione di caos il concetto di un ordine sotteso. Lo studio e il confronto di sistemi apparentemente imprevedibili, a-periodici e altamente sensibili alle condizioni iniziali ha mostrato la ripetitività di un comportamento simile a larga scala e quindi di un caos che piuttosto che aleatorio si dimostrava essere deterministico. Un qualunque sistema dinamico è descritto da equazioni differenziali e la sua evoluzione temporale per stati successivi

<sup>14</sup> Li, T.Y. e Yorke, J.A. (1975), *Period Three Implies Chaos* in «American Mathematical Monthly» n. 82, 1975, pp. 985-992.

<sup>15</sup> Cristallini, A. (2015), *Il Caos deterministico*, AIF – XV Scuola di storia della Fisica Messina, 23-27 febbraio 2015.

è definita da una orbita o traiettoria evolutiva. La definizione di tale orbita dipende dalla semplicità del sistema, ovvero dalla linearità, dal numero di variabili interessate e dalle leggi che governano il sistema. Nel 1960 il meteorologo Edward Lorenz osservando l'evoluzione della circolazione atmosferica realizzò un modello matematico semplificato, costituito inizialmente da dodici equazioni differenziali divenute successivamente tre, che voleva riprodurre e descrivere la complessità delle previsioni meteorologiche. Affidandosi all'aiuto di un calcolatore, scoprì che queste non risultavano prevedibili e che tale imprevedibilità dipendesse altamente dalla forte sensibilità alle condizioni iniziali. E considerando che variazioni anche minime portavano a conseguenza estreme tale fenomeno fu denominato qualche anno dopo dallo stesso Lorenz, "effetto farfalla" in occasione del 139<sup>th</sup> *Meeting of the American Association for the Advancement of Science* del 1972.

«Predictability; does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas? Lest I appear frivolous in even posing the title question, let alone suggesting that it might have an affirmative answer, let me try to place it in proper perspective by offering two propositions. If a single flap of a butterfly's wings can be instrumental in generating a tornado, so also can all the previous and subsequent flaps of its wings, as can the flaps of the wings of millions of other butterflies, not to mention the activities of innumerable more powerful creatures, including our own species. If the flap of a butterfly's wings can be instrumental in generating a tornado, it can equally well be instrumental in preventing a tornado. More generally, I am proposing that over the years minuscule disturbances neither increase

nor decrease the frequency of occurrence of various weather events such as tornados. The most that they do is to modify the sequence in which these events occur. The question which really interests us is whether they can do even this - whether, for example, two particular weather situations differing by a little as the immediate influence of a single butterfly will generally after sufficient time evolve into two situations differing by as much as the presence of a tornado. In more technical language, is the behavior of the atmosphere unstable with respect to perturbations of small amplitude»<sup>16</sup>.

La scoperta più sorprendente di tali studi, pubblicata in *Deterministic Nonperiodic Flow*, fu legata al fatto che pur riconoscendo l'imprevedibilità della previsione meteorologica trattandosi di un sistema caotico, pur esso dipendendo sensibilmente dalle condizioni iniziali, le orbite del sistema che descrivevano le diverse previsioni erano del tutto simili. Ossia, descrivendo tali similarità geometricamente, il sistema presentava un attrattore, *l'attrattore di Lorenz*, la cui forma è simile a quella delle ali di una farfalla. Secondo la definizione del docente di matematica e fisica Achille Cristallini gli attrattori sono «gli insiemi invarianti di stati nello spazio delle fasi verso i quali un sistema dinamico evolve partendo da stati iniziali diversi, ovvero verso cui evolve anche quando il suo stato iniziale è sottoposto a piccole perturbazioni»<sup>17</sup>. Se difatti i sistemi non caotici presentano

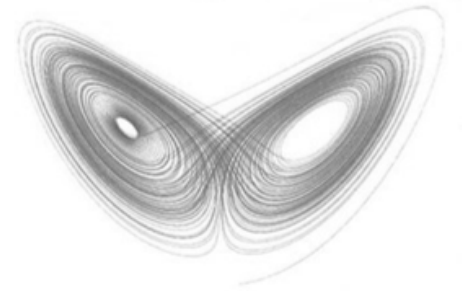
<sup>16</sup> Lorenz, E. N. (1972), *Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas?*, 139<sup>th</sup> Meeting of the American Association for the Advancement of Science, 1972 in Abraham, R. e Ueda, Y. *The Chaos Avant-garde: Memories of the Early Days of Chaos Theory*, in «World Scientific series on Non linear science», Series A, vol. 39, p. 91.

<sup>17</sup> Cristallini, A. (2015), *Op. cit.*, p. 8.

linee di flusso che confluiscono in punti o curve, le linee di flusso dei sistemi caotici si dirigono verso forme complesse dette attrattori.

Di fronte a tali scoperte per cui sistemi dinamici a-periodici e altamente sensibili alle condizioni iniziali presentano degli insiemi invarianti, la teoria del caos, di un caos deterministico, permette di ridefinire le categorie estetiche finora descritte di ordine e caos, presupponendo che ci sia ordine nel disordine e disordine nell'ordine. E lo sviluppo degli strumenti informatici e del calcolatore, sempre maggiormente evoluti, permette difatti la possibilità di elaborare e scoprire attrattori all'interno della teoria del caos sempre più velocemente. Nel celebre volume *Dio Gioca a dadi?*<sup>18</sup> il matematico Ian Stewart scrive di fenomeni fisici che pur muovendosi nel campo del determinismo non obbediscono alle leggi della fisica classica. Caddo così le certezze delle scienze della natura e della fisica e risulta impossibile prevedere i fenomeni governati dal caos non perché indeterministici ma per la loro estrema sensibilità alle condizioni iniziali. Benché la teoria del caos deterministico fu maturata a partire dagli anni Sessanta, un contributo anacronistico decisivo del successivo sviluppo si deve al matematico e fisico teorico francese Henri Poincaré che introducendo la teoria qualitativa delle equazioni differenziali anticipava la teoria del caos di mezzo secolo affermando in *Science et méthode* nel 1908:

«Una causa molto piccola, che ci sfugge, determina un effetto considerevole che non possiamo non vedere e allora diciamo che questo effetto è dovuto al caso. Se noi conoscessimo esattamente le leggi della natura e la situazione dell'Universo all'istante iniziale potremmo predire esattamente la situazione di questo stesso



^Attrattore di Lorenz

<sup>18</sup> Stewart, I. (1989), *Dio gioca a dadi?* Torino: Bollati Boringhieri, 2009.

Universo in un istante successivo. Ma, anche nel momento in cui le leggi naturali non avessero più segreti per noi, non potremmo conoscere la situazione iniziale che in modo approssimativo. [...] Può succedere che piccole differenze nelle condizioni iniziali ne generino di molto grandi nei fenomeni finali; un piccolo errore nelle prime produrrebbe un errore enorme negli ultimi. La predizione diviene impossibile e abbiamo un fenomeno casuale. [...] Perché i meteorologi incontrano tante difficoltà nel predire il tempo con qualche certezza? [...] Noi vediamo che le grandi perturbazioni si producono generalmente nelle regioni dove l'atmosfera è in equilibrio instabile. I meteorologi si rendono perfettamente conto che quest'equilibrio è instabile, che un ciclone nascerà da qualche parte; ma dove? Sono ben lontani dal poterlo dire; un decimo di grado in più o in meno in un punto qualsiasi e il ciclone esplode qui e non là, e devasta con la sua furia contrade che altrimenti avrebbe risparmiato»<sup>19</sup>.

Nata in seguito alla caduta delle certezze del xx secolo, tra le ragioni per cui negli ultimi anni la teoria del caos sia ampiamente studiata vi è anche quella per cui permette di decifrare ipotesi alla base di differenti discipline, scientifiche e umanistiche e fornisce gli strumenti di indagine sulla natura e sulla realtà fisica. Se Illuminismo e Positivismo avevano sostenuto la solidità del metodo scientifico, in seguito agli studi sulla dinamica dei sistemi gassosi di Boltzmann che introduce il concetto di irreversibilità, allo studio del microcosmo, alle scoperte sull'atomo, dei quanti, la meccanica newtoniana che aveva dominato il xix secolo risulta oggi insufficiente a descrivere la materia e la realtà fisica. Il modello atomico di Rutherford e quello

<sup>19</sup> Poincaré, H. (1908), *Science et méthode*, Parigi: Flammarion, p. 142.

successivo di Bohr, la teoria quantistica di Plank, l'elettromagnetismo di Maxwell sono teorie che contribuiscono alla definizione di un pensiero complesso, sistemico per cui la realtà diviene non sempre misurabile. L'interpretazione di Copenaghen sul dualismo onda-particella e il principio di indeterminazione formulato dal fisico Werner Karl Heisenberg, padre della fisica quantistica e premio Nobel per la fisica nel 1932, per cui non è possibile definire contemporaneamente la posizione e la velocità di un elettrone attorno al nucleo, manifestando il limite delle leggi del moto ai soli casi particolari, hanno dimostrato che la realtà conoscibile è solo una parte. Accogliendo tali premesse la teoria del caos si intreccia inevitabilmente con la teoria delle catastrofi del matematico e filosofo René Thom e con la teoria della complessità del filosofo e sociologo francese Edgar Morin.

«Molti fenomeni dell'esperienza comune, banali in sé stessi al punto che spesso non si presta loro alcuna attenzione, - per esempio, le crepe in un vecchio muro, la forma di una nuvola, il percorso di una foglia che cade oppure la schiuma su un boccale di birra - sono estremamente difficili da descrivere formalmente, ma non è possibile che una teoria matematica sviluppata per questi fenomeni senza pretese possa alla fine essere più utile alla scienza che non ai grandi acceleratori di particelle?»<sup>20</sup>.

Come ci suggerisce Alessandro Pluchino in *La firma della complessità*<sup>21</sup> in prossimità di cambiamenti improvvisi, di biforcazioni, ovvero

<sup>20</sup> Thom, R. (1972), *Stabilità strutturale e morfogenesi. Saggio di una teoria generale dei modelli*, Milano: Einaudi, 1980 Cfr. Cristallini A., *Il caos deterministico* in AIF -XV Scuola di storia della Fisica, Messina, 23-27 Febbraio 2015.

<sup>21</sup> Pluchino, A. (2015), *La firma della complessità. Una passeggiata al margine del caos*, Catania: Malcor' D.

in prossimità del punto critico di un sistema, ossia di quel punto in cui un sistema dinamico muta improvvisamente il proprio comportamento, il proprio stato, sebbene le variabili fino a quel momento variavano in maniera continua, il sistema osservato passa da uno stato di ordine a uno di caos o dal caos all'ordine. Per esempio, il passaggio dell'acqua dallo stato solido a quello liquido e poi a quello gassoso comporta due diversi punti critici che comportano il passaggio da un sistema ordinato quale è il reticolo cristallino del ghiaccio a uno con un grado di disordine maggiore. La teoria delle catastrofi si occupa dello studio dei punti critici. René Thom classificò le possibili catastrofi, i possibili punti critici, in sette: piega, cuspidi, farfalla, fungo, coda di rondine, piramide e portafoglio. Nella teoria delle catastrofi il passaggio di stato dell'acqua coincide con la cuspidi. Il filosofo e sociologo francese Edgar Morin, sostenitore del pensiero complesso, ritiene che la natura ha bisogno del caos per organizzarsi e che l'errore del pensiero formalizzante che ha dominato la scienza non è stato quello di essere un pensiero quantificatore ma risiede nel fatto che tutto ciò che non fosse misurabile e quantificabile non esistesse. Non considerando il fatto che la scienza è astrazione del reale<sup>22</sup>. Ilya Prigogine, Nobel per la chimica nel 1977 e autore di *Order out of Chaos*, si occupò della natura di sistemi che egli definisce complessi, ovvero di sistemi in grado di auto-organizzarsi<sup>23</sup> a partire dal disordine

<sup>22</sup> «Qual è l'errore del pensiero formalizzante e quantificatore che ha dominato le scienze? Non è certamente quello di essere un pensiero formalizzante e quantificatore, e non è nemmeno quello di mettere fra parentesi ciò che non è quantificabile e formalizzabile. Sta invece nel fatto che questo pensiero è arrivato a credere che ciò che non fosse quantificabile e formalizzabile non esistesse, o non fosse nient'altro che la schiuma del reale. Sogno delirante, e sappiamo che niente è più folle di un delirio della coerenza astratta» in Morin, E. (2005), *Le vie della complessità*, trad. it. Bocchi, G. e Ceruti, M. (a cura di), Milano: Mondadori p. 33.

<sup>23</sup> Self-organization è un processo dinamico e adattivo attraverso il quale il sistema raggiunge una struttura e la mantiene senza un controllo esterno.

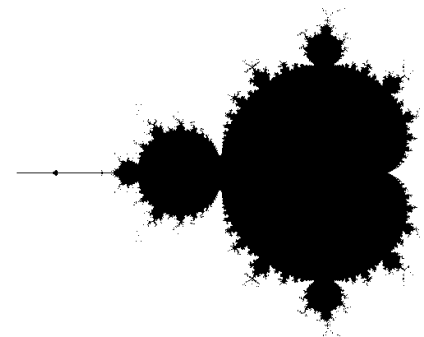


della materia secondo una struttura riconoscibile, ordinata, spontanea, per esempio le celle di Bénard che formano strutture esagonali.

«Il nostro universo fisico non ha più come simbolo il moto regolare e periodico dei pianeti, moto che è alla base della meccanica classica. È invece un universo di instabilità e fluttuazioni, che sono all'origine dell'incredibile ricchezza di forme e strutture che vediamo nel mondo intorno a noi. Abbiamo quindi bisogno di nuovi concetti e nuovi strumenti per descrivere una natura in cui evoluzione e pluralismo sono divenute le parole fondamentali»<sup>24</sup>.

Negli anni Sessanta a opera del ricercatore Benoit Mandelbrot, strettamente connessa alle leggi della teoria del caos, fu introdotto un tipo di geometria differente da quella a cui si era fatto riferimento fino a quel momento. Alla geometria euclidea tridimensionale si affianca un tipo di geometria utile a descrivere una realtà discreta, come quella presente in natura che si basa su dimensioni fratte scalabili. Traendo origine dagli elementi discreti di Georg Cantor, Karl Weierstrass e Augustin-Louis Cauchy, Benoit Mandelbrot<sup>25</sup> introduce nel 1977 la geometria frattale. Una serie di testi si sono susseguiti per la definizione di tale geometria. Tra tutti il paper *The physics of fractals* in cui Bak e Chen nel 1989 scrivono, «Fractals in nature originate from self-organized critical dynamical processes»<sup>26</sup>.

Se difatti la teoria del caos tenta di indagare i sistemi dinamici complessi, la geometria frattale è la rappresentazione nello spazio di



^ Frattale\_insieme di Mandelbrot

<sup>24</sup> Nicolis, G. e Prigogine, I. R. (1989), *La complessità*, Torino: Einaudi, p. XI.

<sup>25</sup> Mandelbrot, B. (1983) *The Fractal Geometry of Nature*, USA: W.H. Freeman & Company.

<sup>26</sup> Bak, P. e Chen, K. (1989), *The Physics of Fractals* in «Physica D: Nonlinear Phenomena», Volume 38, nn. 1-3, September 1989, pp. 5-12

tale teoria. Il frattale è un ente geometrico non intero, da qui la derivazione latina del termine *fractus*, ovvero spezzato, apparentemente caotico che possiede specifiche proprietà:

■ Possiede una dimensione frazionaria. Per comprendere tale concetto è necessario comprendere le osservazioni di Mandelbrot sulla lunghezza della costa della Britannia. Ovvero, Mandelbrot osservò che la dimensione della linea con cui poter descrivere la costa dipendeva dalla scala di osservazione. All'aumentare della scala, mostrando maggiori increspature, la lunghezza appariva sempre maggiore

■ Possiede una proprietà definita invarianza di scala o autosomiglianza. Ovvero, aumentando o diminuendo la scala di osservazione le forme geometriche di ciò che è osservato rimangono simili. La forma di una parte di una nuvola sarà auto-similare alla nuvola stessa come anche una parte del profilo di una montagna o i rami di un albero

■ Per riprodurre geometricamente i frattali è necessario iterare processi ripetitivi dove la soluzione precedente diviene l'input per il processo successivo

■ Il frattale possiede una geometria discretizzata

Il frattale possiede una duplice validità. Rappresenta sia uno strumento per descrivere la realtà fisica come anche per generare figure geometriche a partire dalla iterazione di processi matematici successivi. Un parametro caratteristico del frattale è la sua dimensione  $D$ . Tale parametro esprime la relazione tra la struttura frattale e un oggetto appartenente allo spazio euclideo di dimensione unitaria. Considerando il caso in cui il frattale è la sotto sequenza di un oggetto di dimensione unitaria  $D$  nello spazio euclideo. Ipotizzando di ridurre quindi di un fattore  $1/\epsilon$ , il numero di parti di cui sarà composto il frattale sarà valida la formula  $N = \epsilon^D$ .



^ Frattale \_costa bretone

La Dimensione  $D$ , secondo la definizione introdotta nel 1918 dal matematico Felix Hausdorff, del frattale è quindi definita come

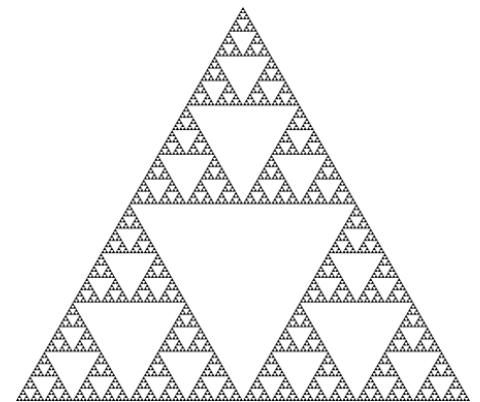
$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \frac{1}{\epsilon}}$$

Tramite le forme geometriche frattali che difatti rappresentano la formulazione matematica e geometria di una parte della teoria del caos, è possibile descrivere forme complesse della natura apparentemente caotiche: ramificazioni di alberi; rugosità della costa; la forma delle nuvole; il monte ricoperto di boschi. Esempi di frattali riprodotti matematicamente per iterazione di processi che generano forme geometriche auto-similari sono 'l'isola di Koch', la 'polvere di Cantor', il 'triangolo di Sierpinski'. La 'gerla di Sierpinski' compare spesso in natura. Sulla superficie della conchiglia *conus textile* per esempio. La 'polvere di Cantor' è un frattale costruito mediante l'iterazione infinita di passaggi successivi. Ha la caratteristica di aumentare il numero degli elementi dell'insieme, benché la somma della loro dimensione tende allo zero. Preso un segmento, diviso in tre parti si elide il segmento centrale. Ciò significa che per ogni iterazione  $i$  il numero di elementi aumenta ed è pari a  $N=2^i$  la lunghezza complessiva diminuisce invece di  $\epsilon = (1/3)^i$

$$D = -\frac{\log N}{\log \epsilon} = \frac{\log 2}{\log 3} = 0.630930\dots$$

Il fatto che  $D < 1$  significa che la lunghezza totale tende a zero. Viste tali proprietà i frattali per quanto appaiano come sistemi caotici mostrano un grado di regolarità sia nella forma che nel processo di creazione di tale forma.

Trattandosi di una ricerca, si è detto, che procede per iterazioni suc-

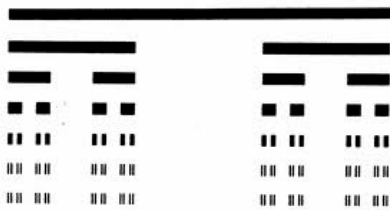


^ Frattale \_triangolo di Sierpinski

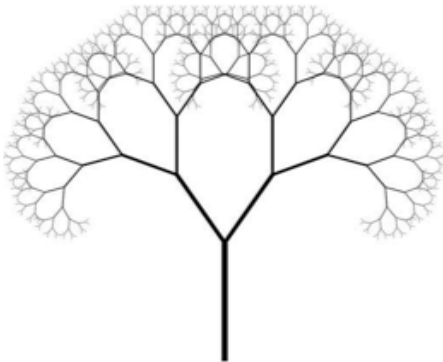
cessive, benché non siano stati introdotti fino a questo momento, è possibile anticipare qui che i sistemi aggregati, vedremo nei capitoli successivi, rappresentano una dimensione contemporanea di ordine e caos poiché ogni volta la spazialità non sarà mai uguale a sé stessa e non sarà quindi prevedibile. Eppure, la configurazione con cui si disporranno è espressione di una legge matematica. Ovvero, all'interno di tali capitoli si dimostrerà la tesi per cui, perseguendo tale apparato teorico, indagando tale spazialità, il sistema aggregato figura tra i sistemi complessi possedendo le caratteristiche di dinamicità, non linearità, di sensibilità alle condizioni iniziali. Ovvero, il sistema aggregato si colloca ai margini della teoria del caos e delle forme emergenti e amorfe dell'architettura contemporanea.

### **Estetica dell'ordine ed estetica del disordine in architettura\_la forma, la figura e l'immagine**

Strettamente connesso al tema dell'estetica dell'ordine e del disordine in architettura, vi è quello della forma. Ovvero, in architettura la forma è intesa limitatamente nell'accezione di configurazione riconoscibile, ordinata, delimitata, narrabile o col termine forma è possibile definire anche ciò che forma non è, ovvero l'oggetto informe, caotico? All'interno del presente capitolo si cercherà innanzitutto di indagare il significato di forma compiuta, incompiuta, frammentata e di non-forma e sulla base di tale indagine sarà costruita una distinzione dei termini forma, figura e immagine. Il tema sulla forma in architettura è argomento assai vasto e dibattuto e nel dibattito contemporaneo seguita a essere di manifesta attualità, espressione dell'estetica di una nuova e contemporanea soggettività e oggettività. Guardando all'opera rivoluzionaria iniziata dalle avanguardie del Novecento, contro l'idea di figura, si è partiti dal concetto di forma pura, la si è frammentata, per muoversi verso il suo opposto, l'in-



^ Frattale \_polvere di Cantor



^ Frattale \_insieme di Mandelbrot

forme<sup>27</sup>. Scopo di tale indagine è quello di verificare se la spazialità ricercata, oggetto della ricerca, è riconducibile a una forma nel linguaggio dell'architettura contemporanea e se questa si colloca tra ordine e caos, arrivando a sostenere che la ricerca della forma, il formale, è affrancato dalla definizione di formalismo della scuola di Beaux Arts, dai suoi principi formalistici, come anche dalla scuola dei Gestalt. Chiarita quindi la distinzione tra figura e forma, l'una manifestazione di unità e completezza, l'altra lontana dal visibilissimo della Gestalt, con il termine forma ci si riferirà alla definizione generale che accoglie termini ossimorici quali in-forme, de-forme, a-morfo. Ciò che sottende l'orientamento di suddetta ricerca è la complessità<sup>28</sup> del linguaggio in architettura per cui è restituito valore ai *frammenti*, all'informe, agli spazi stratificati. Gillo Dorfles scrive che «nel caso sia delle arti figurative che della musica e della poesia – è oggi conscientemente o istintivamente alla ricerca di una rottura d'equilibrio che la conduca a prediligere l'asimmetria, la dissonanza, la disarmonia»<sup>29</sup>.

<sup>27</sup> «Lavorare con materiali degradati, con rifiuti o con frammenti [...] fa parte integrante della tradizione dell'arte moderna: una magica operazione di ribaltamento dell'informe in qualità, realizza l'agognato riappaesamento dell'artista nel mondo delle cose». Tafuri, M. (1980), *La sfera e il labirinto*, Torino: Einaudi.

<sup>28</sup> Termine introdotto in Anderson P. W. (1972), *More is different*, per cui non è possibile desumere gli elementi caratterizzanti di un sistema a partire dai soli suoi elementi base.

<sup>29</sup> Dorfles, G. (1986), *Elogio della disarmonia. Arte e vita tra logico e mitico*, Milano: Garzanti, p. 104.

### Forma & non forma

Secondo lo storico dell'architettura Rudolf Wittkower,

«Il senso dell'ordine e della proporzione nelle arti fornisce uno sbocco cosciente ed intellettuale a un impulso subcosciente. [...] Il bisogno di simmetria, equilibrio e relazioni proporzionali è profondamente radicato nella natura umana»<sup>30</sup>.

E per Gottfried Semper,

«L'architettura è la prima delle arti, o arte cosmica al pari della musica, in grado di coinvolgere l'intero ambiente, materiale e spirituale. Ma l'arte, come l'architettura ha cessato da tempo di essere il veicolo della verità, del bello e del bene, ma ha preso coscienza di uno dei suoi aspetti negativi, ossia l'essere rivolta al progresso, al raggiungimento di una verità non assoluta, umana, relativa»<sup>31</sup>.

[Cosa è figura] In un ambito in cui l'atto creativo è manifestazione di una idea, di una intuizione, di un pensiero, - congiuntamente ad altro come materia, luce, dimensione in scala, armonia, articolazione - la forma diviene essa stessa il mezzo per comunicare tale atto verso un soggetto che ne diviene il destinatario. Se l'architettura fosse forma unicamente nel senso di immagine e nel senso di meccanica tra le componenti, si perderebbe il principio del divenire che invece viene riconosciuto a una opera d'arte, quello per cui la potenza della materia diventa atto nella forma, un atto sempre in mutamento. Da qui l'idea che la forma

<sup>30</sup> Wittkower, R. (1953), *Systems of Proportion*, in Architects' year book V. cfr. Proietti, T. *Dal tracciato al diagramma: La rappresentazione della trasformazione*, Napoli, 1-2 Dicembre 2011.

<sup>31</sup> Cuomo, A. (2015), *La fine senza fine dell'architettura*, Napoli: Deleyva, p. 22.

non coincide né con la sua immagine, la parte visibile dell'oggetto, né col suo segno. La forma si significa autonomamente. Definita già come «la riuscita di un processo di formazione»<sup>32</sup> ossia la manifestazione di una idea che assume una configurazione, è necessario che il concetto di forma venga posto in rapporto a concetti quali estetica, funzione<sup>33</sup>, tecnica<sup>34</sup>, materia<sup>35</sup>, semantica, memoria, sostenibilità e che dialoghi con termini quali figura, immagine<sup>36</sup> e contorno, con cui è sovente il suo significato venga impropriamente confuso.

Secondo la filosofia greca antica, il termine utilizzato per indicare la forma di un oggetto non era univoco. Per intenderne l'aspetto esteriore, si utilizzava la parola *èidos*, forma intellegibile, traslitterazione della parola greca εἶδος con cui Platone<sup>37</sup>, per esempio, nel dialogo

<sup>32</sup> Pareyson, L. (1954), *Estetica. Teoria della formatività*, Torino: Edizioni di Filosofia.

<sup>33</sup> «Form ever follows function» in Sullivan, L. (1947), *Kindergarten Chats and other writings*, New York: Courier Corporation.

<sup>34</sup> «Nell'architettura la forma plastica ha potuto evolversi grazie alle nuove tecniche e ai nuovi materiali che le danno aspetti differenti e innovatori. Dapprima vi furono le forme massicce rese necessarie dalle costruzioni in pietra e mattone; poi sorsero le volte, gli archi e le ogive, i vani immensi, le forme libere e inattese che il cemento ha reso possibili e che sollecitano sempre più verso temi moderni». Niemeyer, O. 1978, *La forma nell'architettura*, trad. it. Alfonso, G. (a cura di), Milano: Mondadori.

<sup>35</sup> «Noi non riconosciamo forma alcuna, bensì soltanto problemi costruttivi. La forma non è il fine del nostro lavoro, bensì il risultato. Non esiste alcuna forma in sé. L'effettiva pienezza della forma è condizionata e strettamente legata ai propri compiti: sì, è l'espressione più elementare della loro soluzione. La forma come fine è formalismo; e noi lo rifiutiamo. Altrettanto poco aspiriamo a uno stile. Anche la volontà di stile è formalista. Noi abbiamo altre preoccupazioni. Ci preme sostanzialmente di liberare la pratica del costruire dalla speculazione estetica, per riportare il costruire a ciò che deve essere esclusivamente». Mies Van der Rohe, 1923, in «Die Form».

<sup>36</sup> Ugo, V. (1996), *Forma-χα. Geometrie della materia costruita* in *Id. Architettura ad vocem...Verso un glossario dei termini di architettura*, Milano: Guerini Studio, p. 41.

<sup>37</sup> Per Platone la bellezza delle forme elementari sono «qualità (che) informano anche la pittura e le altre arti simili, la tessitura, il ricamo, l'architettura e la fabbricazione di ogni altra suppellettile, e inoltre la natura dei corpi e degli altri organismi; in

[Cosa è immagine] del *Timeo* intendeva ciò che rende intelleggibili le idee stesse, ossia manifestazione imperfetta dell'essenza ideale. Aristotele superando la distinzione tra un mondo costituito dalle idee e un mondo rappresentato dalle cose restituì al termine forma un carattere empirico e iniziò ad accostare al termine *èidos*, riconoscendone la definizione platonica, la parola *morphé* - *μορφή* - forma sensibile, strettamente connessa all'idea di materia<sup>38</sup>. Per Hegel e quindi per Sant'Agostino, la forma diviene manifestazione di uno spirito assoluto, l'infinito. Kant nella *Critica della ragion pura* definisce materia «ciò che corrisponde alla sensazione» e forma «ciò per cui il molteplice del fenomeno può essere ordinato». Tale definizione, tale idea di forma legata a un principio ordinatore, vedremo più avanti sarà quella ripresa poi in maniera singolare da Peter Eisenman. Successivamente, a partire da Husserl, *èidos*, diviene l'essenza pura che forma l'oggetto dell'intuizione. Con la Gestaltpsychologie di Kurt Koffka, Wolfgang Köhler e Max Wertheimer, il concetto di forma acquisisce un carattere scientifico, l'opera d'arte viene analizzata seguendo la lettura di una esperienza visiva. Tuttavia, è nel momento in cui alla forma dell'architettura è richiesto di dare un senso, una poeticità, frutto della componente creativa ed irrazionale, di essere ricerca di senso ne deriva il carattere di conflittualità ed enigmaticità. Ovvero, ci si chiede se sia la sintassi del linguaggio o la sua raffigurazione, la figura, a dare senso all'opera. La *gestalt* è la struttura figurativa, nel sinonimo di immagine. Parafrasando Charles S. Peirce, 1839-1914, filosofo semiotico, epistemologo e metafisico, la relazione tra segno e oggetto, può esser tradotta attraverso tre termini: simbolo, icona, tutto questo c'è decoro o bruttezza. La mancanza di decoro, di ritmo e di armonia è imparentata con la bassezza di linguaggio e di carattere, mentre le qualità opposte sono sorelle e imitazioni dell'opposto, cioè di un carattere saggio e onesto» in *Resp.* 401a.

<sup>38</sup> Aristotele, *Metafisica*, VII, 1035a.



indice. Simbolo quando vi è una convenzione che lega segno e oggetto, icona quando vi è una relazione di somiglianza tra i due, indice quando vi è una relazione di fatto. Rosalind Krauss, 1941, critica d'arte che opera un punto di rottura con gli stili, l'astrattismo modernista e le esperienze iconiche-simboliche precedenti, introduce la logica dell'indice<sup>39</sup>. Ci si chiede se anche in architettura si possa definire un indice dell'oggetto architettonico, ossia se si possa definire una architettura come 'messaggio senza codice'<sup>40</sup>. È un po' il modo in cui suggerisce di operare Robert Somol che distingue tra *shape*, esito di un processo arbitrario e aleatorio, dipendente dal fruitore, dallo *user* e *forma*, frutto di un pensiero, di un consapevole processo generativo, di un processo cosciente, ragionato, intellettuale. Somol sostiene che le opere realizzate dagli *shapers*, non hanno alcuna pretesa nei confronti del sociale, alcun significato ermeneutico, linguistico o scientifico, non hanno un codice. Muove, così, una forte critica verso quegli architetti - Koolhaas, Herzog de Meuron, Nouvel, Ito - definiti eccessivamente contenutistici, inseguitori di una *forma* eccessivamente concettuale. La forma, essendo pensata, costringe il fruitore a percorrere tutto il processo generativo che la ha generata, in senso geometrico, sociologico, storico, tecnologico e filosofico. Secondo la definizione restituita nel *Dizionario di estetica*, la forma è intesa

«In primo luogo come un principio ordinatore, ciò che confe-

<sup>39</sup> Krauss, R. (1977), *Notes on the Index: Seventies Art in America* in «October» nn. 3 e 4, primavera-autunno, 1977, p. 233.

<sup>40</sup> Scrive Barthes «la fotografia pur non essendo il reale ne è quantomeno l'analogo perfetto ... è un messaggio senza codice», in quanto rappresentazione di una realtà oggettiva, che pur essendo condizionata da un soggetto operante, non può subirne una trasformazione. Barthes, R. (1982), *L'ovvio e l'ottuso*, Bologna: Piccola Biblioteca Einaudi.

risce unità e coerenza a una molteplicità di elementi. [...] E riconoscere una forma significa in questo caso riconoscere una serie di invarianti, una struttura che si conserva nel divenire»<sup>41</sup>.

Tale definizione sottolinea dunque tre condizioni essenziali affinché si possa dare una definizione al termine forma in architettura: che si abbia un ordine tra le componenti; che vi sia un tutto e le sue parti; e non di minor rilievo che tale configurazione sia riconoscibile da un soggetto. Le Corbusier ricerca il "segreto della forma" osservando ogni elemento appartenente al mondo, ogni forma che trasmuta in quello che egli stesso chiama "oggetti a reazione poetica", ricreando un ricercato «equilibrio tra natura e geometria, tra misura e lirismo, tra ragione e sensualità»<sup>42</sup>. Nel caso della forma della copertura della cappella di Ronchamp, per esempio, trae ispirazione da un guscio di granchio. Conseguente opposto di tale definizione è il termine, *informe* «ciò che non ha una forma definita», sinonimo del termine *amòrfo*. Il tema dell'*informe* è quindi legato ai dispositivi di frammentazione e decomposizione dell'opera di architettura.

Precedentemente alle avanguardie del Novecento e al movimento razionalista, in architettura come anche in altre forme d'arte, in particolar modo quelle figurative, si operava secondo una azione di naturalizzazione dell'architettura: la forma, l'estetica, la materia, lo spazio, tutto era rappresentato in riferimento alla natura. Anche la prospettiva, quella albertiana era a servizio delle proporzioni naturali dello spazio. Non era strumento di creazione di uno spazio a servizio dell'architettura, ma di uno spazio il cui fine ultimo era la rappresentazione della natura. I pittori rinascimentali poterono così rappre-

<sup>41</sup> Cuniberto, F. (2007), *Forma* in Carchia, G. e D'angelo, P. (a cura di), *Dizionario di estetica*, Roma-Bari: Laterza, pp. 110-111.

<sup>42</sup> Pauly, D. (1987), *Il segreto della forma*, in «Casabella», nn. 531-532, p. 86.

## Ordine & Caos in natura e in architettura

sentare nei propri quadri quinte prospettiche. Solamente a partire dall'architetto padovano Andrea Palladio (1508-1580) la rappresentazione prospettica inizia ad assumere il significato di strumento utile alla rappresentazione dell'architettura in quanto spazio di architettura e non in quanto spazio della natura. Con i razionalisti, si ha la continua ricerca di astrazione nella forma, per distaccarsi da tale naturalizzazione. Quindi, in tale processo di affrancamento dalla natura e da ciò che è figurativo del reale

«mentre il concetto di figura ricomprende significati convenzionali e associativi, quello di forma li esclude; mentre il concetto di figura presuppone l'architettura come linguaggio composto da una serie limitata di elementi già esistenti nella loro specificità storica, quello di forma presuppone che le forme architettoniche possano essere ridotte ad un storico 'grado zero'»<sup>43</sup>.

Scrive Colquhoun,

«Per forma, intendo una configurazione che può essere, in alternativa, dotata di significato naturale oppure del tutto priva di significato; per figura, intendo una configurazione cui il significato è conferito dalla cultura, e ciò che tale significato sia ritenuto o meno avere, in definitiva, la propria base nella natura»<sup>44</sup>.

Interpretando il pensiero di Alan Colquhoun, il fatto che per il movimento moderno la forma esprima una funzione e che la funzione restituisca significato alla forma, presuppone che tale significato sia

<sup>43</sup> Colquhoun, A. (1989), *Architettura moderna e storia*, Bari: Laterzia, p. 125.

<sup>44</sup> Colquhoun, A. (1978), *The form and the figure*, in «Oppositions», n. 12, 1978, pp. 28-37.

il risultato di una espressione naturale e non di un atteggiamento figurale. Difatti, la rottura con l'architettura del passato da parte del movimento moderno si ha a partire dalla rottura e dal superamento della figura, intesa come sintesi, rappresentazione di una idea, evocatrice di una realtà. Per esempio, nella pittura rinascimentale una figura era la sintesi di un gesto umano riconoscibile, espressione a sua volta di un sentimento di gioia, paura, dolore. Trasponendo in architettura, il concetto di figura come sintesi di idee è riconoscibile a partire dagli ordini vitruviani, le metope i triglifi, i capitelli.

Come ci ricordano Caja, Landsberger e Malcovati<sup>45</sup>, in realtà, il termine figura all'origine possedeva un significato rassomigliante a quello di forma. Appare per la prima volta in Terenzio, che scrive di *nova figura oris* [singolare forma di viso], intendendo per figura una forma, con una plasticità. Con la grecizzazione del linguaggio latino dovuto all'introduzione dei testi platonici e aristotelici il significato del termine ha assunto diverse connotazioni ma ancora con Vitruvio il termine figura ha il significato di forma plastica. È stato con l'introduzione della figura retorica nel libro IX di Quintiliano che il termine ha assunto un significato del tutto astratto.

È quindi adesso chiaro che il termine forma è semanticamente distinto dal termine figura - ma, una volta fatta la dovuta distinzione, dalla radice del termine figura - la forma in architettura ne prende la connotazione figurale, non figurativa, intesa non come recupero di un passato, di segni, di retorica ma quale meta-linguaggio, architettura che parla di sé stessa, non contenitore ma contenuto essa stessa, non figura ma forma figurale. Il figurale non è immagine della forma ma il senso che l'architettura deve trarne da essa stessa.

Sebbene forma e figura siano termini alle volte interscambiabili

<sup>45</sup> Caja, M., Landsberger, M. e Malcovati, S. (2015), *Tipo, forma, figura* Milano: Libraccio.

## Ordine & Caos in natura e in architettura

quando della figura ne viene ampliato l'ambito semantico e quando della forma ne viene preso il carattere semasiologico, perseguendo tale punto di vista tali termini indicano due diversi modi di lettura e di creazione di una opera d'arte o di architettura, l'una - la forma - legata all'ambito semantico del pensiero 'configurativo', l'altra - la figura - a quello del pensiero 'figurativo'.

«Il fatto che una opera di architettura abbia una immagine - anzi una pluralità di immagini - non autorizza per nulla ad una sua riduzione ad immagine: e se ovviamente questa è un indispensabile passaggio obbligato nella rappresentazione progettuale o documentaria e può offrire autonome qualità grafiche ed estetiche, dal punto di vista dell'architettura il suo valore risiede in modo quasi esclusivo nella sua capacità di rinviare compiutamente a una 'forma'»<sup>46</sup>.

Al fine di restituire una definizione di forma dell'architettura indipendentemente dal contesto storico e sociale, rilevante è la teoria formale del filosofo francese Henri Focillon nel testo *Vita delle forme*

«La vita è forma, e la forma è il mondo della vita, l'opera non esiste che in quanto forma - per cui ogni opera - è un tentativo verso l'unico; si afferma come un tutto, come un assoluto; e, nello stesso tempo, fa parte di un sistema di relazioni complesse [...] è materia e spirito, è forma e contenuto e nasce da un incontro attivo tra la vocazione formale dell'uomo e la vocazione formale della materia - forma come - costruzione dello spazio e della materia»<sup>47</sup>.

<sup>46</sup> AA.VV. (2015), *Disegno & città: Cultura, Arte, Scienza, Informazione*, Roma: Gangemi, p. 765.

<sup>47</sup> Focillon, H. (1943), *Vita delle forme*, Torino: Einaudi, p. 15.

Focillon attraverso tale testo permette di distinguere immagine e forma, in quanto l'immagine è segno che mostra un significato, la forma invece «si significa»<sup>48</sup> essa stessa, rivendicandone la totale autonomia, è altro rispetto al mondo, il «contenuto fondamentale della forma è un contenuto *formale*... nulla, in certi casi, è meglio fondato del mostrare le forme sottomesse ad una logica interna -serie di rapporti sintattici- che le organizza»<sup>49</sup>.

### Forma informe

La morfologia della forma quale dottrina della forma può essere intesa come struttura, disposizione, configurazione, organizzazione e ordinamento<sup>50</sup>. Tra gli elementi che la definiscono, oltre alla sostanza della materia, vi è il contorno, inteso come bordo, limite, soglia tra la materia fisica e lo spazio vuoto. Tale contorno può tendere a zero, divenendo sottilissima pelle, come anche può divenire spesso extra large, abitabile o meno, modulatore della luce, nettamente definito o frammentato per individuare diversi gradi di connessione tra oggetto e non-oggetto, tra centralità e infinito, centro proprio e improprio dell'oggetto.

Secondo la ricerca condotta da Renè Thom matematico e filosofo francese, teorico della dottrina matematica della morfogenesi, ossia della già citata teoria delle catastrofi<sup>51</sup>, la mancanza di un contorno ben definito non determina la perdita di unità, non è il contorno che

<sup>48</sup> *Ibidem*.

<sup>49</sup> *Ibidem*.

<sup>50</sup> Whyte, L.L. (1962), *Atomism, Structure and Form. A Report on the Natural Philosophy of Form* in G. Kepes (a cura di), *Structure in Art and Science*, Massachusetts: The MIT Press, p. 20.

<sup>51</sup> Thom, R. (2006), *Morfologia del semiotico*, trad. it. Fabbri, P. (a cura di), Sesto San Giovanni: Meltemi.

garantisce la solidità dell'oggetto, grazie a un principio astratto<sup>52</sup> che egli fa coincidere con il *logos* eracliteo. In tal senso, analogamente all'ambiente biologico, anche il generarsi del senso è un principio morfogenetico, dinamico. Stimoli sensoriali che comportano trasformazioni determinanti per l'organismo sono definite da Thom *pregnanti*, quelle più immediate per le attività neurofisiologiche sono definite *salienti*. Generano nell'uomo segni, reazioni, parole, linguaggi che costruiscono la sfera dell'inconscio. Da questa distinzione ne deriva che unità e stabilità vengono percepite come *pregnanze*, poiché se ne riconosce immediatamente un logos, le *salienze* comportano invece uno sforzo maggiore essendo che tale *logos* non è univocamente determinato. Per Thom, tale unità rimarrà comunque leggibile poiché prodotta dal *logos della catastrofe*. Scrive che la forma benché frammentata in «domini parziali» governati da un conflitto reciproco dipenderà «dall'accordo più o meno perfetto di questa frammentazione percettiva con un momento ideale ottenuto sottomettendo lo spazio del quadro a una partizione astratta definita da una struttura di carattere algebrico, un logos catastrofista»<sup>53</sup>.

Heinrich Wölfflin, 1864-1945, storico dell'arte svizzero, fonda una linea di ricerca e un metodo d'indagine che sarà poi ripreso anche in altri ambiti disciplinari, e per tale ragione utile al ragionamento all'interno della presente ricerca. Tra le coppie di categorie, definite da egli stesso *concetti fondamentali*, che applica all'arte rinascimentale e barocca, e quindi da trasporre alla dimensione dello spazio, oltre a lineare-pittorico, superficie-profondità, molteplicità-unità, chiarezza assoluta-relativa, figura quello di forma chiusa-aperta,

<sup>52</sup> «Teoria del dinamismo universale [...] in cui ogni esistenza è l'espressione di un conflitto tra l'effetto erosivo e degradante della durata e un principio astratto di permanenza che garantisce la stabilità della cosa». Thom, R. (1983) *I contorni in pittura* in «Alfabeta» n. 44, gennaio 1983, p. 2.

<sup>53</sup> Thom, R. (1983), *I contorni in pittura* in «Alfabeta» n. 44, gennaio 1983, p. 2.

ossia di tettonico-atettonico. Attraverso la prima categoria intende la composizione degli elementi secondo un ordine geometrico, di simmetria per esempio, attraverso la seconda categoria, quella della forma aperta, è negata una struttura compositiva definita, costituita da una cornice, per apparire invece illimitata<sup>54</sup>.

“La nuova architettura è informe” è questa la dichiarazione che inaspettatamente, inattesa perché appare adesso anacronistica, Theo Van Doesburg proclama nel v punto dei principi fondamentali dell’architettura neoplastica del 1925. E analogamente sorprendente nel ix punto scrive di geometria e matematica non euclidea.

«La nuova architettura è aperta. Il tutto è costituito da un unico spazio, suddiviso in base alle esigenze funzionali. Questa suddivisione viene effettuata mediante piani di separazione (interni) o piani di protezione (esterni). I primi, che separano i vari spazi funzionali l’uno dall’altro, possono essere mobili [...] i piani di separazione (ex pareti interne) possono essere sostituiti da schermi o lastre mobili (in quale categoria possono essere incluse anche le porte). In una fase successiva del suo sviluppo il piano dovrà scomparire completamente. La composizione spaziale proiettata in due dimensioni, disposta in un piano, sarà sostituita da un accurato calcolo costruttivo, un calcolo che dovrà ridurre la potenza del cuscinetto ai punti di supporto più

<sup>54</sup> «Intendiamo riferirci a una configurazione che, con mezzi più o meno tettonici, riduce il quadro a un’immagine ben circoscritta, che in ogni sua parte si richiama a sé stessa, mentre, viceversa, lo stile della forma aperta tende in ogni parte a superare sé stesso e vuole apparire illimitato, quantunque una recondita delimitazione esista sempre e sia quella che gli dà un carattere di compiutezza in senso estetico». Wölfflin, H. (2012), *Concetti fondamentali della storia dell’arte*, Milano: Abscondita, pp. 139-144.



semplici, ma più resistenti. La matematica euclidea non ci sarà di alcun aiuto in questo compito, che sarà facilmente raggiungibile, tuttavia, con l'aiuto di calcoli non euclidei in quattro dimensioni»<sup>55</sup>.

La ricerca della forma, il formale, è differente rispetto al formalismo della scuola di Beaux Arts, dei suoi principi formalistici, come anche dalla scuola dei teorici della psicologia della Gestalt, nata nel 1911 ad opera del tedesco Max Wertheimer. Il presupposto di tale teoria è quello per cui sistemi percettivi innati e rappresentazioni del pensiero inducono a riconoscere una forma, benché mancante di alcune parti, come una unità compiuta. Grazie a quelle che sono state definite le leggi dell'organizzazione della forma - regole della buona forma, della prossimità, della somiglianza, della buona continuità, del destino, di figura-sfondo, del movimento indotto - la forma non è ciò che oggettivamente si vede ma ciò che si immagina come unità compiuta. Il punto di vista offerto dai teorici della Gestalt risulta interessante se non fosse che tale teoria è basata su una idea della forma intesa nel puro visibilissimo per cui vi è la coincidenza della forma con una immagine, con ciò che è percepito tramite la vista. Ma

<sup>55</sup> «The new architecture is open. The whole consists of a single space, which is subdivided according to functional requirements. This subdivision is effected by means of separating planes (interior) or sheltering planes (exterior). The former, which separate the various functional spaces from one another, may be mobile...,' the separating planes (former internal walls) may be replaced by moveable screens or slabs (under which category the doors may also be included). In a later stage of its development the plan will have to disappear completely. The spatial composition projected in two dimensions, set down in a plan, will be replaced by an accurate constructional calculation, a calculation that will have to reduce the bearing power to the simplest, but most resistant, points of support. Euclidean mathematics will not be of any service to us in this task, which will be easily achieved, however, with the aid of non-Euclidean calculations in four dimensions» in Van Doesburg, T. (2008), *Towards a plastic architecture* in «De Stijl» vol. VI, n. 6/7, pp. 78-83.

la morfologia, l'ordine della forma non è fine a sé stesso, il fine è lo spazio.

Ne *L'inconscio ottico* Rosalind Krauss, critica d'arte americana, contrappone al purovisibilismo dell'arte moderna, una visualità «carnale, non concettuale»<sup>56</sup>. Esplora l'informe e paradossalmente lo esamina attraverso un singolare punto di vista, ossia intende l'*informe* come il mezzo attraverso cui privilegiare il realismo. Ne *L'informe. Istruzioni per l'uso*, insieme a Yve-Alain Bois, attraverso una preventiva negazione sia della realtà che della forma stessa lo pone come strumento per opporsi alla concettualizzazione gerarchica dell'arte. Informe è

«qualcosa che è creato dalla forma stessa, secondo una logica che agisce logicamente contro sé stessa, dall'interno, per cui la forma produce una eterologia»<sup>57</sup>.

Come fosse somma di tante forme, l'informe è costituito da quattro elementi fondativi: orizzontalità; basso materialismo; pulsazione e entropia a cui corrispondono altrettante quattro esclusioni, quella del tattile, della materia, del tempo e dello spazio. Attraverso tali dispositivi, come inquadratura dal basso o la rotazione, dispositivi che determinano l'informe, non è possibile all'istante individuare ciò che la forma rappresenta, ma una volta avvenuto il ri-orientamento della visione il realismo appare ancora più chiarito. Tale ri-orientamento si basa sul fatto di voler consapevolmente abbandonare la verticalità della visione, quella che collega l'uomo al cielo, per privilegiare il senso di orizzontalità. Tale punto di vista presuppone quindi che l'informe

<sup>56</sup> Krauss, R. (2008), *L'inconscio ottico*, trad. it. Grazioli, E. (a cura di), Milano: Mondadori.

<sup>57</sup> Bois, Y.-A. e Krauss, R. (1996) *L'informe. Istruzioni per l'uso*, trad. it Grazioli, E. (a cura di), Milano: Mondadori, 2003.

generi una conformazione nuova, non fatta di segni ma di singolarità. Didi-Huberman, critico d'arte e filosofo francese, a differenza di Rosalind Krauss, pone l'informe in maniera dialettica alla forma, non la distrugge perché per egli l'oggetto continua a esistere come traccia. Anche egli oppone al «primato modernista della visione, il primato dell'orizzontalizzazione». Orizzontalità che è privilegiata anche nelle forme informi dell'architettura, senza categorizzazione, senza gerarchia, emergenti, non ricercando un ritorno all'unità.

Nel dizionario, il termine informe, di derivazione latina, è definito come un oggetto «senza forma definita: materia amorfa»<sup>58</sup>. Ossia ciò che non ha una struttura ordinata, stabile, riconoscibile e che, per tale ragione, è soggetta a trasformazioni. Una qualità quella delle forme informi per cui «nel loro mutarsi cessano di essere quello che erano e incominciano ad essere quello che non erano»<sup>59</sup>.

In un saggio del 1936 dedicato alle ballerine di Degas, *Degas Danse Dessin*, Paul Valéry scrive una interessante riflessione sull'informe osservando i pavimenti su cui danzano le ballerine.

«Pensavo talvolta all'informe. Ci sono cose, macchie, masse, contorni, volumi, che non hanno, in qualche modo, che un'esistenza di fatto: non sono che percepite da noi, ma non conosciute; non possiamo ridurle a una legge unica, dedurre il loro tutto dall'analisi di una delle loro parti, ricostruirle con operazioni logiche. Possiamo modificarle assai liberamente, non hanno altra proprietà che quella di occu-

<sup>58</sup> Ugo, V. (1996), *Forma. Geometrie della materia costruita* in *Id. Architettura ad vocem...Verso un glossario dei termini di architettura*, Milano: Guerini Studio, p. 41.

<sup>59</sup> «E posi mente ai corpi stessi, e studiati più addentro quel loro mutarsi per cui cessano di essere quello che erano ed incominciano ad essere quello che non erano, ed ebbi il sospetto che il passaggio di forma in forma avvenisse per qualcosa d'informe e non per il nulla assoluto» in Agostino, *Confessiones*, XII, 6,6.

pare una zona dello spazio [...] Dire che sono cose informi, significa, non che non hanno affatto forme, ma che le loro forme non trovano in noi nulla che permetta di rimpiazzarle con un atto di definizione o riconoscimento sicuro. E, effettivamente, le forme informi non lasciano altro ricordo se non quello di una possibilità. Non più che una serie di note non dia origine a una melodia, una pozzanghera, una roccia, una nube, un pezzo di litorale, non sono riducibili [analizzabili]. L'informe sfugge alla legge razionale e al riconoscimento chiaro e distinto per lasciare aperte le possibilità; davanti a una immagine che mostra l'informe l'occhio si trova spiazzato in quanto è abituato a una visione orientata. C'è una sorta di costruzione nella visione, dalla quale siamo esentati per assuefazione. Noi indoviniamo o prevediamo, in generale, più di quanto vediamo, e le impressioni dell'occhio sono per noi dei segni, e non delle *presenze singolari*, anteriori a tutti gli arrangiamenti, ai riassunti, a tutte le abbreviazioni, alle sostituzioni immediate che la prima educazione ci ha inculcato»<sup>60</sup>.

Nel *Dictionnaire Critique*, al numero 7 della rivista «Documents», diretta tra il 1929 e il 1930 da Georges Bataille antropologo e filosofo francese il termine *informe* è beffardamente definito:

«*Informe* non è soltanto un aggettivo ... ma un termine che serve a declassare, esigendo in generale che ogni cosa abbia la sua forma. Ciò che designa non ha diritti suoi in nessun senso e si fa schiacciare dappertutto come un ragno o un verme di terra. Bisognerebbe effettivamente, perché gli

<sup>60</sup> Valéry, P. (1938), *Du sol et de l'informe*, in *Degas Danse Dessin* in Id., *OEuvres*, II, éd. Hytier, Paris: Gallimard, 1960, p. 194.

uomini accademici fossero contenti, che l'universo prendesse forma. La filosofia intera non ha altro scopo; si tratta di dare una redingote a ciò che è, una redingote matematica. Per contro, affermare che l'universo non rassomiglia a niente e non è che *informe* equivale a dire che l'universo è qualcosa come un ragno o uno sputo»<sup>61</sup>.

Ci si chiede quindi ancora una volta se le forme informi, continuano ad avere una identità. Adeguata a questo punto è la definizione baumiana di liquidità sulla società odierna. La realtà è mutevole e sfuggibile, e rimane tale benché siano necessarie delle categorie concettuali definite per descriverla e raccontarla. Così costruire l'identità non può basarsi su condizioni instabili del reale. Per tale ragione, scrive Zygmunt Bauman (1925-2017) è necessario un progetto etico universale. Tale concetto, nella forma dell'architettura, è tradotto con la predominanza dell'instabilità sugli equilibri, della leggerezza sulla gravità, dell'andare attraverso le cose, sulla pienezza dell'oggetto.

Nel 1963, attraverso la stesura di un testo, *La base formale dell'architettura moderna*, pubblicato però, solo nel 2009, Peter Eisenman si poneva in una condizione di divergenza verso l'idea di forma di gestaltica provenienza e scriveva pertanto «la chiarezza della forma non è strumentale alla costituzione di un ordine visivo, ottico; l'ordine della forma si costituisce anzitutto dal movimento dell'esperienza che occupa la forma»<sup>62</sup>. Si trattava della sua tesi di dottorato.

La critica mossa da Eisenman si fonda sul fatto che il formalismo moderno trova la sua piena manifestazione nel 'saper vedere', nella relazione tra le cose, nella relazione tra oggetto e soggetto,

<sup>61</sup> Bataille, G. (1929), *Informe*, in «*Documents*» n. 7, 1929, p. 165.

<sup>62</sup> Eisenman, P. (1963), *Towards an Understanding of form in architecture*, in «*Architectural Design*», vol. 33, n. 10, 1963, pp. 457-458.

nell'estetica, nella rappresentazione. Benché si è ancora negli anni Sessanta, Eisenman credeva fortemente all'autonomia dell'architettura. Il formalismo moderno trovava spunto dalla filosofia kantiana, per cui la forma non nasce dalla fenomenologia - dall'esperienza - ma è legata al processo di rappresentazione, di intuizione degli oggetti della natura. Per Kant, l'idea di forma era il risultato di un processo di sintesi e il mezzo attraverso cui si realizza l'intuizione sensibile e il processo cognitivo. Teorici del formalismo del Novecento sono stati Greenberg in pittura e Rowe in architettura, ma Eisenman, benché apprezzi il lavoro sul formalismo visivo di Rowe e lo consideri un suo maestro, se ne distacca. Per egli l'ordine formale dell'architettura non è fine a sé stesso, lo scopo di tale ordine non è la costruzione eidetica della forma, ma il fine è lo spazio, il movimento dell'esperienza all'interno e/o attorno alla forma. Eisenman è più legato al concettualismo che al formalismo. L'architettura è dare forma a intenzione, funzione, struttura e tecnica. Alla forma si chiede di dare senso all'ambiente nella sua totalità. Essenziale è il processo per giungere a tale forma. Per Eisenman una forma generica è intesa come entità definibile e dotata di leggi intrinseche, universali, trascendentali e costituita da forze la cui tensione è distinguibile in lineare e centrica. Sono per esempio generiche le forme platoniche, le cui direttrici fanno capo o a una centralità, a un nucleo, a un centro finito o a una direzionalità illimitata il cui centro è posto all'infinito. Una forma specifica è invece una configurazione concreta di intenzione e funzione, detentrica di una natura relativa. La forma di base, quella generica, tuttavia, non fa ricorso a un ordine superiore, a valori o a una motivazione esterna, ma fa riferimento alle potenzialità della forma in sé, alla possibilità di configurare uno spazio. Non è formalismo, non è percezione, non è immagine, non è storicismo, non è

significato, non è funzionalismo, ma è concettualismo<sup>63</sup>. La forma diviene quindi il mezzo tramite cui comprendere il processo, non è il fine. Tale *modus operandi*, Eisenman lo ricava dai costruttivisti russi. Il diagramma per l'architetto statunitense è lo strumento. Il limite è quello per cui, in genere, quando si sviluppa una architettura si parte da una forma specifica, relativa. Questa è mutevole in base alla società, al tempo e allo spazio. Si comprende questo se si pensa alle cattedrali del medioevo, rimangono pur sempre luoghi di culto ma hanno caratteri diversi rispetto alle cattedrali contemporanee, o i templi buddisti, differenti da quelli greci o romani. Isolando la forma generica dal contesto, rimane, massa, volume, superficie e movimento<sup>64</sup>. Luce, equilibrio, proporzione e scala sono invece termini inerenti la forma specifica. Il volume è inteso come la condizione dinamica dello spazio, è condizione di tensione. La matrice che ordina il volume sarà un reticolo, che ne governerà la forma, sia essa generica o specifica. Un reticolo formato da piani verticali, in quanto un oggetto è soggetto a forze di gravità, e da piani orizzontali, che seguono un orizzonte. Per Eisenman, ad esempio, nella Farnsworth house di Mies van der Rohe, è predominante l'orizzontalità dei suoi piani, piuttosto che la verticalità dei piedritti verticali. «È il frammento di un reticolo infinito: una condizione simile è implicita nei dipinti di Mondrian»<sup>65</sup>. Tale reticolo è rilevante nelle architetture di Le Corbusier, nelle sue piante libere. Del resto, Le Corbusier, aveva

<sup>63</sup> «To understand the concept of form we must introduce the notion of movement and postulate that an experience of architecture is the sum of larger experiences, each of them apprehended visually (as well as through other senses), but accumulated over a much longer time span the required for the initial building up into a conceptual not a perceptual whole». Eisenman, P. (1963), *Op. cit.*, pp. 457-458.

<sup>64</sup> Zevi, B. (1948), *Saper vedere l'architettura*, Torino: Piccola biblioteca Einaudi.

<sup>65</sup> Eisenman, P. (2009), *La base formale dell'architettura moderna*, Bologna: Pendragon, p. 71.

studiato il 'reticolo' dell'Acropoli di Atene. I piani orizzontali sono resi dall'Acropoli stessa, i piani verticali dalle colonne del Partenone. Fa parte di tale reticolo anche il movimento, la tensione generata dalla prospettiva. Nel momento in cui lo spazio diviene tettonico<sup>66</sup>, ossia fatto di nodi, di discontinuità, archetipo della capanna, pensare a un reticolo diventa più semplice, ma quando è architettura in cui le forze sono trasmesse in maniera continua, l'architettura è massa, archetipo della caverna, si può ancora parlare di reticolo? Per Eisenman, sì. Il reticolo, è concettuale non è formale. Il concettuale deve possedere chiarezza. Il reticolo serve a mantenere i volumi, le masse, in uno stato di tensione. All'orizzontale e verticale si associa, alle volte, il piano frontale. Anche le forme della natura sono studiate attraverso questo reticolo, attraverso la appercezione<sup>67</sup>, la ripetizione di sequenze e la ricorrenza di rapporti matematici<sup>68</sup>. Eisenman non rinnega la vista, ma connaturata alla propria definizione, l'appercezione dell'opera deve avvenire sia a livello visivo che mentale. Difatti, analogamente a quanto avviene per la teoria delle Gestalt in cui si fa riferimento alle forme del quadrato e del cerchio per esempio, la comprensibilità dipende dalla presenza di configurazioni primarie, che Eisenman riconosce in forme lineari o centroidali. Ma a queste devono essere associati il movimento, l'intervallo, il tempo partecipi tutti, di tale comprensione<sup>69</sup>.

Eisenman dimostra che ogni forma architettonica specifica può es-

<sup>66</sup> Baeza, C. (2012), *L'idea costruita*, Siracusa: LetteraVentidue.

<sup>67</sup> Appercezione, è per Leibiniz la percezione della percezione, ossia una percezione mentale chiara e consapevole di sé.

<sup>68</sup> «La natura organizzata, fonte di forme appercettive...per mezzo della ripetizione costante di certe sequenze e della ricorrenza esatta di rapporti matematici». Santayana, G. (1921), *The sense of beauty*, New York: Createspace.

<sup>69</sup> «L'esigenza di chiarezza formale e di riferimenti inequivocabili a solidi archetipici diventa ancora più impellente» Eisenman, P. (2009), *Op. cit.*, p. 83.



## Ordine & Caos in natura e in architettura

sere posta in relazione con un antecedente generico, e che le proprietà di tale radice generica non possono essere considerate in modo soggettivo. La comprensibilità dell'antecedente generico è il prerequisito necessario per la chiarezza dell'intenzione e della funzione della forma specifica»<sup>70</sup>.

«Ogni desiderio e spinta espressivi trovano perciò in un linguaggio raggiunto, lo schema, la matrice (la forma?) per distendervi i loro andamenti - esigenze - essenziali; i residui espressivi - i minori rapporti - sono lasciati alla piena libertà di risoluzione contingente che non scalfisce l'ordine generale»<sup>71</sup>.

La forma specifica non deve rispondere a un giudizio legato all'essere buono o cattivo, né il gusto all'essere soggettivo, ma deve esprimere l'essenza dell'opera d'architettura in maniera oggettiva. Alla forma specifica si applica una sintassi, connessa alla condizione e al contesto dell'architettura. Se le forme specifiche dell'architettura derivano da quelle generiche, di linearità e concentricità, secondo un diagramma che è essenzialmente composto di assi orizzontali e verticali, le forme frammentate, soprattutto quelle della materia, sono specifiche e derivano dalle stesse forme generiche, prima citate ossia, frattali di quelle forme o costituiscono altre forme generali in sé, costituendo difatti delle forme emergenti?

<sup>70</sup> *Ibidem*.

<sup>71</sup> Moretti, L. (1950), *Ecclettismo e unità di linguaggio*, in «Spazio» n. 1, luglio, 1950, p. 6.

### **Morfogenesi computazionale e forme emergenti**

[Algoritmi &  
Forme parametriche]

Rispetto a quanto scritto finora, è possibile ritenere che i principi generatori della forma in architettura sono genesi e struttura, che non si ha forma senza struttura e senza una genesi e che tuttavia la definizione di forma appartiene anche all'informe. Secondo la definizione più comune tra coloro che progettano le forme dell'architettura guardando a una morfogenesi computazionale, le forme emergenti in architettura sono quelle che usando metodi e modelli matematici permettono di generare forme e strutture dinamiche seguendo un processo morfogenetico e sviluppato tramite un approccio computazionale, intendendo qui per computazionale, si ricorda, non la computerizzazione del processo ma la definizione di sequenze logiche di conformazione. Michael Weinstock in *The Architecture of Emergence - the Evolution of Form in Nature and Civilisation* riconosce che la proprietà dell'essere emergente rende un sistema maggiore della somma dei suoi componenti<sup>72</sup>. Definizione di emergente che segue le fila del pensiero dei sistemi complessi la cui origine è già riscontrabile nel pensiero di Aristotele il quale in *Metafisica* afferma che l'intero è più della somma delle sue parti. Tale surplus, che coincide con la presenza di qualcosa non prevedibile, inatteso, lo rende emergente. Scrive Weinstock,

«Humans and all other living beings emerge from and exist within the dynamic processes and phenomena of the natural world, and they have had and continue to have a

<sup>72</sup> «In the sciences the word refers to the production of form and their behavior, by system that have an irreducible complexity. In the simplest commonly used definition, emergence is applied to the properties of a system that cannot be deduced from its components. Properties 'emerge' that are more than the sum of the parts» in Weinstock, M. (2010), *The Architecture of Emergence - the Evolution of Form in Nature and Civilisation*, Londra: Wiley, p. 31.

profound effect upon it. All the forms of nature and all the forms of civilization have 'architecture', an arrangement of material in space and over time that determines their shape, size, behavior and duration, and how they come into being. Energy, information and material flow through all the forms of the world, and human forms and culture have co-evolved and developed within those flows»<sup>73</sup>.

Ovvero, Weinstock traspone i caratteri comuni a natura e forme dell'architettura alla società. Se tali forme emergenti che derivano da un processo evolutivistico e che sono più della loro forma, derivano poi da un sistema che si auto-sostiene, ossia che si riproduce dal proprio interno, secondo il pensiero di Maturana e Varela, ripreso successivamente da Patrik Schumacher, tale sistema prende il nome di auto-poietico. Ancora una volta, i processi generativi morfogenetici delle forme rappresentano una astrazione in architettura dei processi morfogenetici che avvengono in natura. Per tale ragione, studiosi, ricercatori e progettisti che traspongono in architettura processi biomorfici si rivolgono alla disciplina della bioinformatica e della biologia computazionale. Studiano i processi di conformazione, di organizzazione e autorganizzazione, i principi di funzionamento di chiusura o apertura, di dispiegamento che avvengono in natura, nel mondo delle piante, degli animali, degli esseri viventi. In biologia la computazione è applicata a tre ambiti: alla biologia generale che si occupa dell'analisi dei dati e delle simulazioni matematiche alla base dei sistemi biologici; alla bioinformatica che analizza, visualizza e gestisce sequenze biologiche; alla biologia evolutiva.

In riferimento ai sistemi aggregati indagati all'interno di tale ricerca risulta interessante il binomio *bits* e *atomi* suggerito dal ri-

<sup>73</sup> *Ivi*, p. 11.

cercatore Nicholas Negroponte<sup>74</sup>. Come gli *atomi* della materia compongono l'architettura, analogamente i *bits* compongono l'algoritmo, sono informazioni e modelli all'interno di una materia, di un ambiente digitale. E, a convalidare la tesi secondo cui la logica computazionale alla base dei processi morfogenetici non coincide con la computerizzazione dei fenomeni, lo studio effettuato dal biologo Thompson D'Arcy W., pubblicato in *On Growth and Form* del 1917, concerne la conoscenza delle leggi fisiche e della matematica alla base della relazione tra forma, struttura, morfologia e formazione. Il contributo decisivo di Thompson consiste nell'aver posto in relazione le forme fisiche al processo conformativo della struttura di una forma. Nelle note introduttive al testo è scritto difatti:

«Cellula e tessuto, conchiglia e osso, foglia e fiore, sono altrettante porzioni di materia, ed è in obbedienza alle leggi della fisica che le particelle che li compongono sono state assestate, modellate, conformate. [...] I loro problemi di forma sono prima di tutto dei problemi matematici; i loro problemi di accrescimento sono essenzialmente problemi fisici [...] il mio unico proposito è di mettere in rapporto con le definizioni matematiche e le leggi fisiche alcuni dei più semplici fenomeni esteriori dell'accrescimento organico, della struttura, della forma, considerando come ipotesi che il complesso dell'organismo sia un insieme meccanico e materiale. [...] Pertanto, la forma di ogni porzione di materia, sia essa viva o morta, e i cambiamenti di forma che appaiono nei suoi moti e nella sua crescita, possono sempre venir descritti come l'effetto dell'azione di una forza. In breve: la forma di un oggetto è un diagramma di

<sup>74</sup> Negroponte, N. (1995), *Essere digitali*, Milano: Sperling & Kupfer.

forze, almeno nel senso che da essa noi possiamo giudicare o dedurre quali forze agiscano o abbiano agito su di esso. [...] La conchiglia del Nautilus, le zanne dell'elefante, i denti del castoro, gli artigli del gatto, sono tutti esempi di belle curve spirali; ma tutte consistono di materiale segregato o depositato da cellule viventi; tutte si accrescono come un edificio»<sup>75</sup>.

Per Thompson la griglia cartesiana, ossia il metodo delle coordinate, è un dispositivo parametrico analitico e generativo per comparare due forme simili e verificare in che modo sia avvenuta la trasformazione. Difatti, gli algoritmi genetici introdotti da John Holland negli anni Sessanta sulla base degli studi di Thomson simulano la crescita e l'evoluzione della forma. In natura quando un sistema è vicino alla soglia del cambiamento rispetto alla propria forma originale, possono esistere più variabili che ne determinano la nuova geometria, l'essere emergente. Trasponendo tale teoria alle forme dell'architettura, si comprende adesso come ricercando forme emergenti è essenziale definirne il processo generativo e come diventa corretto sostituire alla parola forma, il termine morfologia. Alterazioni che riguardano piccole particelle come nel caso di granelli di sabbia o cristalli di neve possono generare metamorfosi a scala più ampia "dinamiche, lineari e complesse"<sup>76</sup>. Nella letteratura scientifica appaiono termini e fenomeni quali caos, frattali, sistemi dinamici, sistemi complessi, non lineari, auto-organizzazione, antitetici a nozioni di simmetria, staticità, linearità, ordine. Per tutte queste premesse, tali termini che si trovano spesso nei testi di geologia e geomorfologia sono entrati a far parte anche del vocabolario architettonico.

<sup>75</sup> Thompson, D.W., (1917), *Op. cit.*, pp. 11-15, p. 194.

<sup>76</sup> Philips, J.D. (2003), *Sources of nonlinear complexity in geomorphic systems in* «Progress in physical geography: Earth and Environment», vol. 27, pp. 1-23.

«Emergence is a concept that appears in the literature of many disciplines and is strongly correlated to evolutionary biology, artificial intelligence complexity theory, cybernetics and general systems theory. It is a word that is increasingly common in architectural discourse, where too often it is used to conjure complexity but without the attendant concepts and mathematical instruments of science. In the simplest commonly used definition, emergence is said to be the properties of a system that cannot be deduced from its components, something more than the sum of its parts. This description is perhaps true in a very general sense, but rather too vague to be useful for the purpose of design research in architecture. One can truthfully say, for example, that every higher-level physical property can be described as a consequence of lower-level properties. In the sciences, the term refers to the production of forms and behavior by natural systems that have an irreducible complexity and to the mathematical approach necessary to model such processes in computational environments. The task for architecture is to delineate a working concept of emergence and to outline the mathematics and processes that can make it useful to us as designers. This means we must search for the principles and dynamics of organization and interaction, for the mathematical laws that natural systems obey and that can be utilized by artificially constructed systems. We would start by asking: What is it that emerges, what does it emerge from, and how is emergence produced»<sup>77</sup>?

<sup>77</sup> Hensel, M. (2004), *Emergence: morphogenetic design strategies* in «Architectural Design» Londra: Wiley-Academy, p. 11.

Per esempio, la morfologia della superficie della terra emerge dall'interazione di una moltitudine di processi compresa l'erosione. È la forma della natura, dei suoi esseri animati e non. Il vento è in grado di catturare e trasportare piccole particelle dalla superficie del materiale creando l'azione dell'erosione. Il corallo è l'assemblaggio di una multipla ripetizione di semplici elementi che hanno locali variazioni nella forma. Sono il risultato della colonizzazione di migliaia di organismi che si adattano alle condizioni ambientali. Le forme naturali hanno la capacità di cambiare significativamente e generare nuove forme. Dune e neve ne sono un esempio, di variazione nel tempo e nello spazio, oltre che di forma. L'essere emergente è determinato da un equilibrio tra materia e forza, è trasferimento di energia.

Il modello darwiniano della selezione naturale ed evoluzione biologica teorizzato nel 1859 è di ispirazione per quella branca della biologia, la genetica, che studia i processi morfologici alla base delle trasmissioni dei caratteri ereditari tra gli esseri viventi. In maniera del tutto analoga, quando si studiano le forme emergenti dell'architettura contemporanea, ci si avvale di funzioni matematiche, gli algoritmi generativi, che simulano il processo evolutivo di una forma a partire da determinati dati di input, informazioni, per ottenere degli output, la forma. In una intervista nel 2018 pubblicata in «Palimpsesto. La arquitectura, ¡Tambien!»<sup>78</sup> l'ingegnere e architetto Cecil Balmond che si è occupato tra l'altro della progettazione insieme a Toyo Ito del *Serpentine Gallery temporary pavilion* del 2002 a Londra quando gli si chiese quale sia stato il rapporto tra architettura, struttura e nuovi materiali, pur riconoscendo il valore dell'invenzione del cemento armato per le forme dell'architettura moderna del xx secolo rispose che il nuovo materiale è il numero. Che i dati rappresentano una

<sup>78</sup> Intervista condotta da Alberto Peñín in «Palimpsesto. La arquitectura, ¡Tambien!», n. 18, 2018.

struttura organizzativa e sistemica tramite l'algoritmo. Che il numero, la matematica è il modo mediante cui dare ordine all'universo, di cui la geometria ne è il linguaggio. Secondo la definizione comune tra chi si è occupato negli ultimi anni di Computational Design, nel definire il processo di creazione logica della forma, vi è la ricerca e l'ideazione di un 'sistema di sistemi' in cui ogni elemento che costituisce il sistema possa interagire. La rivoluzione informatica in atto guarda ai fenomeni del reale e alla conoscenza della natura. La matematica con i suoi numeri spiega la composizione della musica e le proporzioni della forma. Certe forme contemporanee ricordano la morfologia dei coralli o degli anemoni, il sistema di funzionamento, quello del citoscheletro e del DNA. Se da un lato, si fa ricerca su pietra, legno e materiali naturali, dall'altro, si utilizzano polimeri e fibre di carbonio gestibili tutti attraverso una logica parametrica.

Ci si chiede quindi in che termini l'approccio computazionale in architettura è autonomo rispetto agli algoritmi e ai parametri generativi del processo morfologico. I procedimenti algoritmici<sup>79</sup>, di *scripting*, rappresentano di fatto un metodo per affrontare la complessità delle interconnessioni, delle relazioni non lineari tra le varie fasi della progettazione in architettura e a scala più ampia, della società odierna. Tuttavia, il calcolatore mediante cui sviluppare tali procedimenti ne rappresenta solo uno strumento. Si riconosce, all'interno della presente ricerca, all'architettura parametrica di aver posto l'attenzione, benché questo accadeva già<sup>80</sup>, al processo realizzativo piuttosto che alla forma dell'oggetto architettonico. Ovvero atteggiamento opposto a una deriva simile a quella della progettazione di una *forma per una forma*, una forma fine a sé stessa. Si osserva la struttura

<sup>79</sup> L'origine del termine algoritmo è araba. Dal matematico persiano dell'VIII secolo Al-Khawarizmi.

<sup>80</sup> Ci si riferisce qui alla ricerca della verità del costruire promossa dall'architetto



della natura al suo interno e si ridisegna, si riproduce, si ristrutturata. Uno strumento a servizio dell'architettura, non il viceversa. Ovvero sebbene il Computational Design è valido nella misura in cui diventa elemento conoscitivo della realtà e possibile *concept*, è ancora necessario abitare nel senso heideggeriano<sup>81</sup> del termine, l'opera di architettura. Il filosofo Massimo Cacciari scrive,

«non si sta evidenziando una contraddizione che attiene alla nostra stessa dimensione *fisica* più originaria? Intendo riferirmi alla *physis* nel senso più proprio. È concepibile uno spazio-senza-luogo laddove 'resiste' quel luogo assolutamente *primo* che è il nostro corpo? Se siamo luogo come facciamo a non ricercare luoghi? La 'filosofia' del territorio post-metropolitano sembra esigere la nostra metamorfosi in pure anime, o in pura *dynamis*, energia intellettuale. E, chissà, la nostra anima è davvero forse a-oikos, senza casa, come l'eros platonico, ma...il nostro corpo, la ragione del nostro corpo? E il nomade stesso non ha comunque a che fare con il luogo, il *nomòs*? Passa dall'uno all'altro, non si arresta in nessuno – ma conosce pur sempre luoghi. Abbiamo bisogno di luoghi dove abitare, ma questi non possono essere spazi chiusi che contraddicono il tempo del territorio in cui ci piaccia o meno viviamo»<sup>82</sup>.

Che sia grembo o tomba, lo spazio è reale, è abitato. In questo scenario la poeticità dell'architettura è ancora necessaria. Finché saremo

tedesco Mies Van Der Rohe.

<sup>81</sup> Per Heidegger «essere uomo significa: essere sulla terra come mortale; e cioè abitare». Cfr. Heidegger, M. (1954), *Costruire abitare pensare*, in Vattimo, G. (a cura di), *Saggi e discorsi*, Milano: Mursia, 2015, p. 96.

<sup>82</sup> Cacciari, M. (2004), *Nomadi in prigione*, in Bonomi, A. e Abruzzese, A. (a cura di),

in un corpo mortale, sia pure prolungato dalla protesi della tecnica, l'architettura verosimilmente dovrà essere non solo tecnica, ma *archè* rivolta all'origine, all'essere. Se si è assoggettati esclusivamente alla tecnica si corre il rischio di snaturare la dimensione senziente dell'uomo. La macchina non è senziente, l'algoritmo non è consapevole, non possiede una coscienza.

Non la pensano così architetti quali Marcos Novak quando scrivono che le forme generate dalla formulazione di algoritmi e matrici, non pensabili se non unicamente attraverso l'utilizzo del computer appartengono ad uno spazio non reale, allo spazio del virtuale, al *cyberspace*<sup>83</sup>, dove convivono una poetica nuova, delle leggi nuove, non gravitazionali, non prospettiche, una geometria non euclidea. Egli scrive di una architettura liquida che pulsa e respira e il cyberspace è la restituzione delle informazioni, degli input, dei sensori, delle simulazioni, dei metadati, programmati ed elaborati in output per lo spazio reale. La forma è data dal controllo di dati e informazioni divenuti sistemi binari. Il cyberspace per Novak è un "habitat per e dell'immaginazione". Il metodo progettuale per la definizione di tali forme prevede lo sviluppo di algoritmi e quindi azioni quali giustapposizione e mascheratura finalizzate alla realizzazione di variazioni infinite, affinché alla fine una nuova immagine sia generata. Scrive,

«L'architettura liquida è un'architettura che respira, pulsa, salta come una forma e atterra come un'altra. L'architettura liquida è un'architettura la cui forma dipende dall'interesse di chi guarda; è un'architettura che si apre per accogliermi e si chiude per difendermi; è

*La città infinta*, Milano: Mondadori, p. 55.

<sup>83</sup> Cyberspace è un termine che deriva dall'unione della parola 'cybernetic' [cibernetica] e della parola 'space' [spazio]. La cibernetica è quella scienza che studia la riproducibilità del comportamento dell'essere umano sulla macchina.

un'architettura senza porte e corridoi, dove la stanza successiva è sempre dove ho bisogno di essere e di cosa ho bisogno per essere. Il cyberspazio è una visualizzazione completamente spazializzata di tutte le informazioni nei sistemi globali di elaborazione delle informazioni, lungo i percorsi forniti dalle reti di comunicazione presenti e future, consentendo la piena compressione e interazione di più utenti, consentendo l'input e l'output da e verso l'intero sensore umano, consentendo simulazioni di reali e realtà virtuali, raccolta e controllo dei dati in remoto tramite telepresenza e totale integrazione e intercomunicazione con una gamma completa di prodotti e ambienti intelligenti nello spazio reale»<sup>84</sup>.

E ancora,

«La trans-architettura ha introdotto un nuovo dominio, estendendo lo spazio locale, remoto e virtuale come un nuovo continuum e le tecniche per progettare in questo nuovo continuum e una concezione algoritmica dell'architettura, modellandola direttamente dai dati tramite nuove tecniche come la prototipazione rapida, la costruzione robotizzata, l'abitazione interattiva, l'occupazione telepresente e il collegamento senza soluzione di continuità allo spazio virtuale, in cui si applica una struttura concettuale e poetica parallela. Mentre questa affermazione si applica allo scopo e alla tecnica di una nuova architettura, il contenuto di questa architettura deve essere l'espressione di una visione del mondo in linea con la scienza, l'epistemolo-

<sup>84</sup> Novak, M. (1991), *Liquid Architecture* in Benedikt, M. (a cura di), *Cyberspace: First Steps*, Cambridge: The MIT Press, p. 272.

gia e la cosmologia attuali e le questioni caratteristiche e specifiche del nostro tempo»<sup>85</sup>.

Tra le righe si legge la posizione di Novak per cui protagonista rimane comunque l'uomo, la sua immaginazione e il linguaggio poetico. Un essere umano che raccoglie informazioni, input, dal mondo reale e li trasferisce nello spazio virtuale, fatto di architettura liquida.

Volendo effettuare un parallelismo, se Le Corbusier era ispirato dalle forme dalla conchiglia, col Computational Design si prendono non le forme ma la morfologia della conchiglia, la struttura genetica. Per comprendere tale distinzione, nel contesto dei suoi studi in botanica Goethe definì morfologia lo studio della forma e operò una netta distinzione tra i termini forma e formazione, tra la parola *Gestalt*, la forma strutturata, che si riferisce a qualcosa già formato e il processo per costruire tale forma, definito col termine *Bildung*<sup>86</sup>. Scrive,

«Per indicare il complesso dell'esistenza di un essere reale, il tedesco si serve della parola *Gestalt*, forma; termine nel quale si astrae da ciò ch'è mobile, e si ritiene stabilito, concluso e fissato nei suoi caratteri, un tutto unico. Ora, se esaminiamo le forme esistenti, ma in particolar modo le organiche, ci accorgiamo che in esse non v'è mai nulla d'immobile, di fisso, di concluso, ma ogni cosa ondeggia in un continuo moto. Perciò il tedesco si serve opportunamente della parola *Bildung*, formazione, per indicare sia ciò che è già prodotto, sia ciò che sta producendosi. Ne segue

<sup>85</sup> Novak, M. (2001), *Liquid, Trans, Invisible: The Ascent and Speciation of the Digital in Architecture. A Story from Digital*, in Cachola Schmalk, P. *Digital/Real Blobmeister: First Built Projects*, Francfort: Birkhäuser Publications.

<sup>86</sup> Goethe, J. F. (1807), *Introduzione all'oggetto*, trad. it. Zecchi, S. (a cura di), *Meta-morfosi delle piante*, Milano: Guanda, 1983.

che, in una introduzione alla morfologia, non si dovrebbe parlare di forma e, se si usa questo termine, avere in mente soltanto una idea, un concetto, o qualcosa di fissato nell'esperienza solo per il momento. Il già formato viene subito ritrasformato; e noi, se vogliamo acquisire una percezione vivente della natura, dobbiamo mantenerci mobili e plastici seguendo l'esempio che essa stessa ci dà»<sup>87</sup>.

Attraverso strumenti quali parametri, algoritmi, design generativo e associativo, sembra che l'architettura si stia animando, interagisca, si adatti, diventi essa stessa organismo. È come se si assistesse a un nuovo paradigma, quello biologico. Con l'installazione *Hygro-scope. Meteorosensitive Morphology*, Achim Menges e Steffen Reichert, creano un sistema interattivo che sfrutta le caratteristiche igroscopiche del legno. È diverso il caso in cui tali strumenti sono a servizio della progettazione, diventano una parte della progettazione. Per esempio, l'architetto francese Francois Roche<sup>88</sup> coniugato al suo gruppo di ricerca New Territories, è impegnato attivamente sulla ricerca per l'architettura contemporanea in termini di forma, sostenibilità e tecnologie informatiche, evitando mere rappresentazioni morfologiche. Gli edifici di Roche assorbono, traspirano, sudano, respirano. Il *museo Dustyrelief di Bangkok* del 2002 è costituito da volumi avvolti da una rete elettrostatica. Tale sistema di materiali e forme è stato pensato e progettato per attirare il pulviscolo di CO<sub>2</sub>, altamente inquinante. Tale pulviscolo è poi sfruttato, divenendo filtro per la luce naturale all'interno. La forma nasce dalla complessità

<sup>87</sup> Goethe, J. F. (1807), *Ivi*, p. 43.

<sup>88</sup> «Gli edifici tendono a essere tendenzialmente esseri viventi. Trasformando il loro stato in un ibrido che combina l'essenza vegetale e quella materiale». Di Raimo, A. (2014), *Francois Roche Eresie macchiniche e architetture viventi di New-Territories.com*, Roma: EdilStampa.

delle condizioni esterne.

«Un pensiero progettuale in grado di costituire una architettura dal pulviscolo disperso nell'atmosfera urbana, deve certo moltissimo ad una ricerca articolata nella quale Francois Roche e N.T. sembrano ritenere l'informazione un nuovo linguaggio della scienza»<sup>89</sup>.

L'ingegnere Sergio Musumeci anticipa i temi dell'architettura parametrica computazionale comprendendo le potenzialità di una progettazione della ricerca di forma coadiuvata dall'uso del calcolatore. Il termine architettura parametrica si deve di certo all'architetto italiano Luigi Moretti che pur non impiegando un calcolatore, in maniera anacronistica, introduce il concetto di parametro in architettura affermando che,

«I parametri e le loro interrelazioni divengono il codice di un nuovo linguaggio architettonico [...] Alla determinazione dei parametri e delle loro relazioni, dovrebbero coadiuvarsi le tecniche e le strumentazioni del pensiero scientifico più attuali, in particolar modo la logica-matematica e soprattutto la ricerca operativa e computazionale, per la possibilità che danno di esprimere in serie cicliche auto-corrective le soluzioni probabili dei valori dei parametri e delle loro relazioni. [...] In questo modo nascerà ciò che chiamo "architettura parametrica". Il suo ineluttabile carattere geometrico, la sua rigorosa concatenazione di forme, l'assoluta libertà della fantasia che sorgerà in luoghi in cui le equazioni non possono non fissare le proprie radici,

<sup>89</sup> *Ivi*, p. 47.

gli daranno uno splendore cristallino»<sup>90</sup>.

Da allora il tema dell'approccio parametrico all'architettura ha subito una evoluzione tale per cui la progettazione della morfologia è il software il cui codice è iscritto nell'opera di architettura, l'hardware<sup>91</sup>.

Tali definizioni permettono di affrontare la questione dell'architettura parametrica digitale secondo due chiavi di lettura complementari. Quella del pensiero computazionale, affrancata quindi dall'impiego del calcolatore e quella invece che pone la progettazione in relazione esclusiva agli strumenti del digitale. All'interno di tale ricerca la modellazione parametrica è lo strumento per la definizione di morfologie, strutture, algoritmi e codici. Lo strumento per il controllo di relazioni e funzioni matematiche. L'algoritmo generativo rappresenta lo strumento conoscitivo della realtà mediante cui pensare una nuova maniera di fare architettura scongiurando il rischio di sperimentare la morfologia delle forme, delle leggi fisiche di creazione della forma e della materia, fine a sé stessa. Posizione questa differente rispetto alla definizione di Wassim Jabi che definisce il *Parametric Design* come

«un processo basato sul pensiero algoritmico che consente l'espressione di parametri e regole che, insieme, definiscono, codificano e chiariscono la relazione tra intento progettuale e risposta progettuale»<sup>92</sup>.

Il dibattito ancora non risolto sull'architettura parametrica riguarda proprio tale doppia chiave di lettura. Se vi sono coloro che ritengono

<sup>90</sup> Rostagni, C. (2008), *Luigi Moretti 1907-1973*, Electa.

<sup>91</sup> Zellner, P. (1999), *Hybrid Space: New Forms in Digital Architecture*, London: Thames & Hudson, p. 13.

<sup>92</sup> Jabi, W. (2013) *Parametric Design for Architecture*, Londra: Laurence King, p. 201.

il computazionale una condizione della progettazione indipendente dall'impiego del calcolatore, vi sono altri come Patrick Schumacher che hanno fatto del parametricismo digitale un nuovo stile. Schumacher nel 2008 discute presso il Dark side club, il proprio manifesto sul Parametricismo. All'interno di tale manifesto i punti che emergono sono relativi al fatto che esso debba riguardare la progettazione a tutte le scale e che debba essere il modo mediante cui adattare l'ambiente architettonico e urbano alla società contemporanea volta alla diversificazione e al dinamismo, alla complessità e al policentrismo. Per Schumacher il parametricismo come stile si colloca temporalmente dunque dopo il modernismo.

Tra coloro che ritengono il computazionale una condizione della progettazione indipendente dall'impiego del computer, appartiene Karl Chu per cui benché l'architettura sia «l'arte di mettere insieme due bit, bit programmati per auto-replicarsi, auto-organizzarsi e auto-sintetizzarsi in costellazioni sempre più nuove di relazioni e gruppi emergenti»<sup>93</sup> egli si rese conto che

«i software contemporanei potevano essere animati perché i motori geometrici utilizzati da questi pacchetti erano basati sul calcolo. È possibile spostare un oggetto e quindi interpolare un'intera raccolta di variabili in passaggi infinitamente più piccoli. I punti nello spazio erano fluidi a causa delle relazioni di calcolo delle variabili, e questo dava forma e forma ai modelli. Inizialmente, in Animate FORM, ho concentrato il mio pensiero sulla rivoluzione in movimento, e solo successivamente ho capito che la vera rivoluzione era nell'uso di un'invenzione di 300 anni fa: il calcolo»<sup>94</sup>.

<sup>93</sup> Chu, K. (2006), *Metaphysics of Genetic Architecture and Computation*, in «Architectural Design», vol. 76/4, nn. 38-45, 2006, p. 42.

<sup>94</sup> *Ibidem*.



Chu applica la matematica generativa, genetica, per la previsione dei fenomeni naturali. È come se vi fosse un universo computazionale che possa dare infinite forme, infinite materie in cui la metafisica è sostituita dall'autopoiesi in un concetto matematico. Il Demiurgo<sup>95</sup> è il codice genetico di un dispositivo informatico. E, Patrick Janssen associa il parametro all'algoritmo scrivendo che,

«An algorithm that generates models consisting of geometry and attributes (e.g. material definitions). This algorithm uses functions and variables, including both dependent and independent variables. Some of the independent variables can be given a more prominent status, as the interface to the parametric model – these are referred to as the parameters of the model»<sup>96</sup>.

Finché quindi l'approccio computazionale si serve dell'algoritmo, programmato dal progettista, per gestire parametri a priori, input diventa semplice comprendere il ruolo del progettista anche all'interno di un approccio all'architettura di tipo parametrico e computazionale.

La questione diviene più complessa quando si impiegano algoritmi stocastici per cui questi non sono definiti da formule matematiche e *scripting* univoci ma quando il processo algoritmico è reiterato sulla base di parametri casuali e non prevedibili. Così come afferma Kostas Terzidis, in questo ultimo caso l'algoritmo diviene «un costrutto teorico con profonde ripercussioni filosofiche, sociali, progettuali e artistiche»<sup>97</sup>. I trans-architetti o gli architetti del post-umano<sup>98</sup> per

<sup>95</sup> Platone scrive del Demiurgo per la prima volta nel *Timeo* del 360 a.C.

<sup>96</sup> Patrick Janssen, personal communication to the author, 9 July 2015.

<sup>97</sup> Terzidis, K. (2006), *Algorithmic Architecture*, Amsterdam-London: Architectural Press, p. xii.

<sup>98</sup> Marchesini, R. (2002), *Post-human. Verso nuovi modelli di esistenza*, Torino: Bollati Boringhieri, p. 174.

esempio sembrano indicare i presupposti per arrivare ad un astorico 'grado zero' dell'architettura, azzerandone quindi la figuratività. Ovvero, estremizzando il grado zero dell'evoluzione della forma dell'architettura si va oltre l'architettura stessa, riconosciuta ormai univocamente come trans-architettura. E come suggerisce Mario Carpo «il prodotto finale di un processo digitale non è mai un prodotto finito. È una manifestazione di un processo algoritmico che può generarne altre, in numero illimitato e tutti diversi, intenzionalmente o imprevedibilmente»<sup>99</sup>. Inoltre, indagando i progetti sperimentali che adottano un approccio computazionale è emerso che il processo sia di tipo BOTTOM-UP basato o sulla sola scelta di voxel, algoritmi e meta-algoritmi che generano la forma oppure sulla potenzialità del materiale, sul *form finding* e quindi sulla definizione delle forme, piuttosto che il tradizionale processo TOP-DOWN basato sull'idea di una spazialità da raggiungere e quindi, definita questa si scelgono i materiali dell'architettura.

È utile a questo punto introdurre nel processo di creazione della forma mediante algoritmi un termine, *simplicity*, unione della parola complexity e simplicity, - coniato da Sawako Kaijima e Michalatos Panagiotis - che permette di introdurre un'ulteriore riflessione sull'approccio al progetto di architettura in termini computazionali.

Simplexity «is a term in system science which describes the emergences of simplicity out of intricate and complex sets of rules. In the recent years there is an increasing trend in architecture to exploit the ability of algorithmic design to produce complex forms by implementing relatively simple and easy formulas. This often results in the addition of unnecessary layers of complexity to a project just for the

<sup>99</sup> Carpo, M. (2011), *The Alphabet and the Algorithm*, Cambridge, MA: MIT Press.

sake of production of seemingly more complex forms. This in turn can degenerate to computational decoration and after taking into account all the layers of information, the resulting algorithms seem little different than a complicated random number generator. In contrast, there is a whole class of algorithms that deal with simplification which are usually more complex and difficult to implement. This is partly the result of the fact that multiplication and proliferation can be easily implemented via iterative function calls and local simple operations over parts of a system»<sup>100</sup>.

Tale termine può essere inteso come la semplificazione della complessità per non creare 'decorazioni computazionali'.

Nella storia dell'architettura sono copiosi gli esempi per cui grazie all'iniziazione di un processo costruttivo si risolve la forma, si struttura la forma e si genera la forma. Per esempio, le catene della Sagrada Familia di Gaudi o gli esperimenti di Frei Otto che fece osservando la forma della pellicola delle bolle di sapone. La forma risponde alle forze distribuite, tuttavia si riconosce che rispetto a tale definizione di parametro, inteso avanguardisticamente come elemento da manipolare e da cui trarne la forma, l'evoluzione tecnologica è stata essenziale e di grande contributo. Con Grasshopper - sviluppato da Rober McNeel & Associates nel 2007 - modellatore algoritmo di Rhinoceros, basato su un il linguaggio di programmazione visuale (VPL), sono restituite per mezzo dei diagrammi, le relazioni tra parametri e funzioni matematiche, affinché il controllo della forma avvenga attraverso il parametro e non attraverso la geometria 3D dei coesistenti modellatori CAD. Tale controllo sul parametro all'interno

<sup>100</sup> Sakamoto, T., Ferre, A. e Kubo, M. (2008), *From control to design: parametric/algorithmic architecture*, Barcellona: Actar, p. 130.

del processo progettuale, unito all'utilizzo di materiali sperimentali permette di creare architetture auto-generative, tramite processi del tutto simili a quelli che avvengono per la vita biologica. In tale scenario il progetto definitivo è solo un momento iniziale destinato a divenire altro. Osservare i sistemi naturali biologici permette di ricercare morfologie e strutture nuove per l'architettura. Per siffatte architetture, cambia il ruolo dell'architetto in quanto progettista della forma iniziale. Se predisposta alla ricezione di stimoli, se realizzata attraverso strutture auto-generative e auto-organizzative, questa è poi soggetta al cambiamento.

L'approccio al metodo computazionale all'interno di tale progetto di ricerca si colloca nella posizione per cui è strumento conoscitivo della forma e del processo morfogenetico. Seguendo tale logica l'approccio computazionale diviene essenziale per arricchire le possibilità offerte al progettista, perché permette di lavorare con diversi materiali e di scoprire il sistema di funzionamento, formazione, conformazione, crescita, aggregazione, interazione con l'ambiente a micro- e macro-scala della forma. Permette di rendere manifesto ciò che è invisibile, di conoscere maggiormente la realtà. Di operare il processo di astrazione della natura per farla divenire architettura. Tramite strumenti quali scanner, microscopio, raggi x e quindi logica computazionale, ci si addentra nella composizione della materia, delle molecole, si studiano le forze di iterazione tra gli atomi. Tuttavia, l'intento rimane quello di scongiurare il rischio che l'architettura divenga gioco formale, dominio della tecnica, perdendo il significato del proprio linguaggio, della dimensione dell'uomo, della poeticità, dell'essere arte, del proprio eros.

A tal proposito, il racconto di una architettura classica, universalmente riconosciuta, come il Partenone, sull'acropoli di Atene. Le Corbusier lo descrive come 'oggetto a reazione poetica', la macchina

perfetta per creare emozioni. Riconosce il fatto che la poeticità del Partenone non è dovuta al significato spirituale di tempio di tutti gli dei. Il suo valore non è dato neanche dalla storia, considerando che è stato fedelmente in parte ricostruito e non costituisce rovina. Il suo valore è dato dalla materia, dalle forme, dalla luce che colpisce i volumi, dalle scanalature delle colonne, dalle proporzioni delle forme, è in questo che l'architettura diventa autonoma. Nel suo *Voyage d'Orient*, un diario di viaggio, una raccolta di immagini e riflessioni del 1911, Le Corbusier riconosce nel Partenone la raggiunta perfezione dispensatrice di poeticità e ordine matematico.

«Partenone. Ecco la macchina per creare emozioni: noi entriamo nella dimensione implacabile della meccanica. Non ci sono simboli attaccati a queste forme. Queste forme provocano sensazioni categoriche; non c'è più bisogno di una chiave per capire. Brutalità, intensità, infinita dolcezza e raffinatezza e forza»<sup>101</sup>.

Il Partenone «diviene un valore di riferimento assoluto: ogni opera di architettura deve confrontarsi con quel simbolo. È il Partenone, che lo ha portato ad 'aprire gli occhi'. Egli scopre là, sulla Acropoli, la perfezione dell'architettura greca, l'esattezza, la precisione, la chiarezza della sua esecuzione»<sup>102</sup>. Ci si chiede quindi dove risiede il senso logico e costruttivo del Partenone, il motivo della sua forma, dichiarata e poi realizzata. Ancora una volta astrazione della natura.

«Non esiste niente di equivalente nell'architettura di ogni luogo e di ogni tempo. È il momento più acuto di cui un uomo, agitato dai più nobili pensieri, li ha cristallizzati in una

<sup>101</sup> Jeanneret, C.-E., (1911), *Le voyage d'Orient*, Milano: Faenza, 1974.

<sup>102</sup> *Ibidem*.

plastica di luce e di ombra. La modanatura del Partenone è infallibile, implacabile. [...] Non si tratta di dogmi religiosi, di descrizione simbolica, di figurazioni naturali, ma di forme pure in rapporti precisi, esclusivamente. Da duemila anni, chi ha visto il Partenone vi ha riconosciuto il momento decisivo dell'architettura»<sup>103</sup>.

Per Günther Anders e Jürgen Habermas, essendo l'uomo ormai assoggettato dalla tecnica e non potendosi ormai affrancare dovrebbe creare una nuova soggettività in cui far convivere la sfera cognitiva-attiva e quella senziente-creativa-immaginativa. L'architettura rimane un fatto etico, nello

«offrirsi consuetudini, abiti, luoghi di abitare anche, che sanno della propria improprietà, che mantengono l'eventualità del vivere fuori da ogni sua sclerosi in definitive norme, o in prescritte de regolazioni, fuori dal voler agire in nome di un presunto precisato bene o quello di una totale assenza di valori, tenendosi nella valorizzazione della vita stessa, dei suoi dinamismi e ampliandone il moltiplicarsi delle differenze, l'architettura è propriamente etica in quanto, pur manifestando gli eventi che la dispongono, pur adeguandosi ad essi, non li 'compone' né intende comporli in termini esaustivi, in definizioni concluse, per diluire anzi ogni composizione nell'aspettativa del vivere»<sup>104</sup>.

E quindi, «Ma che cosa è la computazione, allora? In relazione alla progettazione, la computazione è la trasformazione di informazioni

<sup>103</sup> Jeanneret, C.-E., (1923), *Vers une architecture*, ed. it. Cerri, P. e Nicolin, P. (a cura di), Milano: Longanesi, 1973.

<sup>104</sup> Cuomo, A. (2015), *La fine senza fine dell'architettura*, Napoli: Deleyva, pp. 131-

## Ordine & Caos in natura e in architettura

e interazioni tra elementi che costituiscono un ambiente specifico, la parola chiave è interazione. Questa definizione estrae la computazione dall'ambito del virtuale. Con un maggiore interesse per la progettazione e il progettista, l'applicazione più generale della computazione è nel produrre risultati effettivi dalla trasformazione di proprietà interne ed esterne. La computazione fornisce una struttura per negoziare e influenzare l'interrelazione di questi insiemi di informazioni, con la capacità di generare ordine, forma e struttura complessi. [...] Se i processi computerizzati iniziano con il particolare e terminano con l'oggetto, i processi computazionali iniziano con proprietà elementari e regole generative per finire con informazioni da cui la forma deriva come un sistema dinamico»<sup>105</sup>.

132.

<sup>105</sup> Ahlquist, S. e Menges, A. (2012), *Introduction. Computational Design Thinking in Material Computation: Higher Integration* in «Architectural Design» Marzo/Aprile, n. 126, 2012, p. 13.





## Lo scenario contemporaneo Computazione vs Computerizzazione

L'introduzione della definizione di geometria non euclidea da parte dei matematici Nikkolaj Ivanovic Lobacevskij e Georg Friedrich Bernhard Riemann della prima metà dell'Ottocento costrinse l'uomo al ripensamento del significato di tempo e di spazio nell'accezione della geometria classica e, come ci informa Marco Novak, di materia, energia e informazione<sup>1</sup>. Analogamente, l'idea contemporanea secondo cui, in architettura, l'attenzione è rivolta più al processo piuttosto che alla forma trova la sua risoluzione nelle teorie sistemiche diffuse a partire dagli anni Cinquanta così come negli studi precursori del principio di indeterminazione di Heisenberg e della teoria della relatività di Einstein. La teoria generale dei sistemi di Ludwig Von Bertalanffy<sup>2</sup>, la teoria della complessità di Edgar Morin, la definizione di autopoiesi di Maturana e Varela, quella di cibernetica<sup>3</sup> del matematico statunitense Norbert Wiener informano di un modo diverso di relazionarsi dell'uomo alla natura. Teorie che trovano espressione in più campi di interesse, nell'economia, nella società e nella politica.

<sup>1</sup> Novak, M. (2007), *Babele 2000*, in [http://www.trax.it/marcos\\_novak.htm](http://www.trax.it/marcos_novak.htm)

<sup>2</sup> Bertalanffy, L. (1968), *General system Theory*, New York: Braziller.

<sup>3</sup> «I molti automi dell'epoca presente sono collegati al mondo esterno sia per quanto riguarda la ricezione di impressioni, che per la esecuzione di azioni. Essi contengono organi sensoriali, effettori e l'equivalente di un sistema nervoso per il trasferimento dell'informazione dagli uni agli altri. [...] Non è affatto miracoloso che possano essere trattati in un'unica teoria assieme con i meccanismi della fisiologia». Wiener, N. (1948), *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine*, Cambridge, MA: MIT, pp. 71-72.

Il testo scritto nel 1941 da Luis Jorge Borges sembra rappresentare l'espressione, in letteratura, di ciò che accade oggi nelle arti e in architettura travolte dalla frenesia del calcolo combinatorio, impegnando in maniera sistemica, oltre la progettazione architettonica, ambiti quali biologia, matematica, informatica, genetica. All'interno dello spazio infinito di una biblioteca, è disposta la raccolta di un numero illimitato di volumi redatti per mezzo della combinazione aleatoria di molteplici caratteri: lettere, punteggiature e spazi. Una sorta di distopia, al cui interno vi è «tutto ciò che è dato esprimere, in tutte le lingue»<sup>4</sup> senza una disposizione ordinata, alla luce di quanto finora scritto, diremo nel caos.

Afferrare l'ontologia dell'architettura, quella autonoma dalle contingenze e individuare un discriminante tra ciò che è definibile *architettura* e ciò che non lo è, pone delle difficoltà non indifferenti. È lo stesso che chiedersi - analogamente al testo di Borges in cui il lettore si domanda quale sia il volume che custodisca la verità del sapere - quale sia, tra le infinite combinazioni, magari definite oggi da meta-algoritmi, quella che rappresenti una forma d'arte, una opera di architettura o che non la rappresenti. Si potrebbe tentare, per esempio, tramite il confronto delle definizioni viste nel capitolo precedente, suggerite da Peter Eisenman in *La base formale dell'architettura moderna*<sup>5</sup> quando distingue le *forme dell'architettura in generiche*, intese come entità dotate di leggi intrinseche, universali e trascendentali e *specifiche* definite come configurazioni concrete di funzione e contingenze - la storicità, il *genius loci*, il materiale. Ed essendo l'obiettivo quello di ricercare i caratteri di una architettura definita come emergente, *della e nella* società dell'informazione

<sup>4</sup> Borges, J. L. (1941-1944), *Finzioni*, Torino: Einaudi, 1985, p. 83.

<sup>5</sup> Eisenman, P. (2009), *La base formale dell'architettura moderna*, Bologna: Pendragon.

è necessario indagare il rapporto tra arte e progresso. A Monaco, nel 1953, attraverso una serie di conferenze, riportate nel testo di Maurizio Guerri<sup>6</sup>, si affrontava il tema del rapporto tra arte e tecnica. Nello specifico, si poneva tra attualità e sistematicità, l'intervento di Werner Heisenberg, fisico e matematico tedesco, dal titolo *L'immagine della natura nella fisica contemporanea*, in cui si affermava che «è nella teoria dei *quanta* che hanno avuto luogo i cambiamenti più radicali riguardo al concetto di realtà»<sup>7</sup>. Il suo *principio di indeterminazione* si colloca difatti tra la scienza classica e la teoria della *complessità*<sup>8</sup> contemporanea. In tale sovvertimento si fa «un appello alla dimensione 'filosofica' delle scienze [...] la scienza, per procedere nel campo della 'realtà', è costretta a indietreggiare consapevolmente in quello prettamente 'filosofico' della possibilità. Questa situazione definisce il nuovo tipo di rapporto tra scienza e filosofia»<sup>9</sup> ma non solo. Scienza e tecnica hanno contribuito difatti a una conoscenza della natura sempre maggiore. Si è data piena fiducia alle leggi matematiche e a quelle della natura, a partire da Isaac Newton e Galileo Galilei. Tuttavia, paradossalmente, più la conoscenza sulla

<sup>6</sup> Guerri, M. (1958), *Le arti nell'età della tecnica*, Milano: Mimesis, 2001.

<sup>7</sup> Heisenberg, W. (1958), *Fisica e filosofia*, Milano: Il saggiatore, 2008, p. 41.

<sup>8</sup> Termine all'interno del testo *More is different*, P.W. Anderson, (1972) per cui non è possibile desumere gli elementi caratterizzanti di un sistema a partire dai soli suoi elementi base. Il premio Nobel Ilya Prigogine così introduce il concetto di complessità: «il nostro universo fisico non ha più come simboli il moto regolare e periodico dei pianeti, moto che è alla base stessa della meccanica classica. È invece un universo di instabilità e fluttuazioni, che sono all'origine dell'incredibile varietà e ricchezza di forme e strutture che vediamo nel mondo intorno a noi. Abbiamo quindi bisogno di nuovi concetti e nuovi strumenti per descrivere una natura in cui evoluzione e pluralismo sono divenute le parole fondamentali» in Nicolis, G. e Prigogine, I. (1991), *La complessità. Esplorazioni nei nuovi campi della scienza*, Torino: Einaudi, XI.

<sup>9</sup> Chiodi, P. (1956), *Il problema della tecnica in un incontro fra Heidegger e Heisenberg*, in «aut aut» vol. 31, pp. 97-98.

materia è divenuta maggiore, più la realtà oggettiva delle particelle elementari è divenuta sfuggente. Vi è la «trasparente chiarezza di una matematica che presenta non più il comportamento della particella elementare, bensì la nostra conoscenza di questo comportamento»<sup>10</sup>. E questo perché «la scienza della natura presuppone sempre l'uomo, e noi, per esprimersi con le parole di Niels Bohr, dobbiamo divenire coscienti del fatto che nello spettacolo della vita non siamo spettatori soltanto, ma anche, costantemente, attori»<sup>11</sup>.

Lo scenario, accogliendo tale ipotesi, è quello che prevede non il dominio della tecnica sull'uomo e dell'uomo sulla natura ma la ricerca della relazione con essa e quindi, della connessione tra architettura e natura. Uomo conoscitore, spettatore e attore, non solo spettatore di una natura da contemplare e/o dominare. Una ri-appropriazione della dimensione *naturale* per aumentarne la comprensione. Svelare ciò che è invisibile ai sensi avviene grazie alla rivoluzione tecnologica e informatica, alla scoperta della logica computazionale e al corrente intreccio, sempre più fondante, tra genetica, simulazione digitale dei processi evolutivi e architettura. Se si condivide tale tesi, il computazionale, diviene uno strumento a servizio della progettazione il cui linguaggio al pari della matematica e della logica non è succedente alla figura del progettista.

Il metodo computazionale, si è visto nel capitolo precedente, è definibile come la programmazione di algoritmi risolutivi di problemi fisici o funzioni matematiche, in tempi certi. Pertanto, avendo un modello fisico, si passa al modello matematico, al modello numerico e, se necessario, alla sua elaborazione tramite una macchina. È sovente associare al termine *computazione*, la parola *computerizza-*

<sup>10</sup> Heisenberg, W. (1958), *L'immagine della natura nella fisica contemporanea*, trad. it. Guerri, M. (a cura di), *Le arti nell'età della tecnica*, Milano: Mimesis, 2001, p. 33.

<sup>11</sup> *Ibidem*.

zione, eppure la logica computazionale, in senso lato, è precedente all'invenzione dell'elaboratore. Nel 1936, Alan Turing teorizza la nozione di calcolo universale, teoria pubblicata su *On computable number*<sup>12</sup>, immaginando una macchina di calcolo logico basata su una sequenza computazionale con lo scopo non dell'invenzione di un elaboratore di calcolo ma della definizione di algoritmi risolutivi. Comprensibilmente, analogamente a quanto avviene per la matematica e per le scienze in generale, l'utilizzo dell'elaboratore di calcolo permette di certo di eseguire calcoli computazionali complessi diminuendone, e quindi semplificandone, il processo e i tempi di esecuzione. Tuttavia, ci si chiede quali potrebbero essere le conseguenze della sopraffazione della tecnica sull'essere umano. Walter Benjamin aveva teorizzato il rischio della perdita di *aura* dell'opera d'arte già agli albori della rivoluzione culturale caratterizzante i primi decenni del Novecento. Rileggere e decodificare oggi il suo testo<sup>13</sup> diviene insolito perché la tecnica a cui fa riferimento Benjamin è quella del cinema e della fotografia, ossia di forme di espressione oggi largamente riconosciute. La prima edizione del testo risale al 1935 e tramite le parole del poeta Baudelaire, Benjamin profetizza la perdita di *aura*, la cui autenticità risiede nell'*hic et nunc* dell'originale, nell'unicità dell'opera, nella genialità. Ci si chiede cosa avrebbe scritto adesso, Benjamin, in una epoca in cui la tecnica non è solo il mezzo attraverso cui riprodurre l'opera d'arte ma è divenuto lo strumento per generarla. Le infinite copie di cui Benjamin scrive nel suo testo, con cui l'opera d'arte perde della sua essenza, della irripetibilità, sono divenute adesso, nell'epoca del computazionale, infinite soluzioni.

<sup>12</sup> Turing, A. (1936), *On computable number* in «Proceedings of the London Mathematical Society» Nov-Dic, 1936.

<sup>13</sup> Benjamin, W. (1935), *L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica*, trad. it. Baldi, M. (a cura di), Roma: Donzelli.

La copia rimane consapevolmente una copia, il prodotto è all'opposto ri-attualizzato ogni volta che è riprodotto in *qui e ora* differenti, ammettendo o meglio imponendo una diffusione in massa. Massimo Cacciari, nel saggio introduttivo al testo dell'edizione italiana del 2011, suggerisce che caratteristiche dell'*aura* sono oltre agli esclusivi *hic et nunc*, la distanza tra l'opera e il fruitore, la presenza di *sostanza* non sempre e immediatamente svelata. L'osservazione, il raccoglimento dell'osservatore per disvelare l'opera d'arte richiede tempo. Benjamin scriveva di distrazione delle masse. Se si accolgono queste premesse, è evidente come tale pensiero sia in opposizione alla condizione contemporanea dell'uomo in relazione alla tecnica, per cui ogni accadimento è spazialmente e temporalmente piccolo, ogni cosa è vicina e la durabilità è infinitamente breve. È cambiata la percezione dell'oggetto. Essa è divenuta istantanea. Umberto Galimberti sovverte la condizione dell'uomo soggetto e la condizione della tecnica, come strumento, presupposto quest'ultimo che egli fa coincidere con l'era pre-tecnologica in cui la tecnica era unicamente *mezzo* e non *fine*. La tecnica «non tende a uno scopo, non promuove un senso, non apre scenari di salvezza, non redime, non svela la verità: la tecnica *funziona*»<sup>14</sup>. A tutto quanto sia legato al tecnologico è richiesto di funzionare. Considerando questo criterio di leggibilità, strettamente legato alle teorie note come *cognitiviste*, risulta chiara allora la tesi secondo cui se si richiede all'uomo di svolgere delle attività per cui egli debba *funzionare*, un oggetto tecnologico funzionerebbe sicuramente meglio. E se si condivide tale ipotesi, pensare a un mondo fatto unicamente di macchine che funzionano risulterebbe abbastanza verosimile. Ma se alla macchina, si richiede di svolgere attività strettamente connesse alla dimensione umana, ammettendo anche errore e imprevisto, sogno e consapevolezza, ad

<sup>14</sup> Galimberti, U. (1999), *Psiche e Techne*, Milano: Feltrinelli, p. 33.

oggi, pensare a un mondo fatto unicamente di macchine risulta forse inverosimile. Resta chiedersi allora cosa sia la tecnica *fine* o *strumento* e cosa sia l'uomo, *fine* o *mezzo*. Galimberti suggerisce una risposta. Analogamente al denaro, la tecnica da *mezzo* è divenuto *fine* e l'uomo da *soggetto* è divenuto *funzionario* di un *mondo delle macchine*.

Al contrario, Paul Virilio nel 2002 propone un testo, *Discorso sull'orrore dell'arte*, in cui riconosce da parte della società contemporanea, una progressiva e precisa volontà di eliminazione delle tecniche dell'arte e dei mezzi di espressione del passato, a favore di una arte definita dallo stesso autore «arte del motore»<sup>15</sup>. Accogliendo questa tesi, tale teorizzazione è la trasposizione dello scontro per la sopravvivenza dell'uomo rispetto alla generale e disarmante fiducia nei confronti della tecnologia, delle macchine, dei dis-valori legati alla velocità e alla iper-tecnica. Perché la velocità? Se il tempo è denaro, allora la velocità è il potere di fare denaro. Si avanza verso una sorta di divinizzazione della tecno-scienza, presupponendo la sua necessità e inevitabilità. Ci si chiede allora quale possa essere l'antidoto alla sparizione dell'uomo contemporanea alla sparizione dell'arte. Se Galimberti considera suddetta perdita necessaria a favore di un *mondo per le macchine*, Virilio scorge, invece, una via d'uscita e fa coincidere questa con l'incidente<sup>16</sup>. Ogni volta che un nuovo prodotto tecnologico o una nuova tecnica è inventata, è inventato anche l'incidente corrispettivo. L'invenzione della nave è coincisa con il suo naufragio. L'incidente dell'arte è la sua rappresentazione. Per Virilio, l'incidente permette di rintracciare il valore. L'arte è la capacità di

<sup>15</sup> «L'arte è un delirio che non ha più niente a che vedere con l'espressione artistica. [...] Ciò significa che le cose non hanno più valore. Siamo di fronte alla dismisura del valore. Warhol non è più quotato. È 'delirato'». Baj, E. e Virilio, P. (2002), *Discorso sull'orrore dell'arte*, Milano: Elèuthera, p. 16.

<sup>16</sup> *Ivi*, p. 21.

vedere le cose in forme nuove e per vedere, per produrre - nel senso di *poiesis* e per goderne, è necessario riappropriarsi del tempo.

Si pone in una posizione intermedia tra *approvazione* e *negazione*, Martin Heidegger che non opera una critica *tout court* nei confronti della tecnica ma concentra il suo interesse verso il modo con cui l'uomo si rapporta ad essa. La tecnica in particolare è mezzo e attività dell'uomo tuttavia, scrive Heidegger, non bisogna esserne costretti, correndo il rischio che ne diventi causa di alienazione. L'essenza della causalità permette di far avvenire dalla *non presenza*, la *pre-senza*. L'azione del disvelamento della verità, *war-heit*, passa anche attraverso la tecnica, oltre che la creazione dell'opera d'arte. Anche Heidegger partecipa come relatore alla serie di conferenze, trascritta in *Le arti nell'età della tecnica*. Nel saggio dal titolo *La questione della tecnica* afferma,

«Tutti conoscono le due risposte che si danno alla nostra domanda - cos'è la tecnica. La prima dice: la tecnica è un mezzo in vista dei fini. L'altra dice: la tecnica è una attività dell'uomo. [...] Proporsi degli scopi e apprestare e usare i mezzi in vista di essi, infatti, è una attività dell'uomo»<sup>17</sup>.

*L'uomo artigiano*<sup>18</sup> di Richiard Sennet è un testo che - in contrapposizione alla divergenza tra *Homo Faber*, promotore del *perché* e *Homo Laborans*, fautore del *come* e dei sostenitori, Hannah Arendt una tra questi, che l'invenzione di determinati prodotti porta alla fine alla distruzione del mondo - rivaluta positivamente il lavoro dell'artigiano, dell'*Homo Laborans*, in quanto capace di imparare da ciò che realizza. Ma Heidegger ci pone di fronte al solito dubbio che riguarda l'*ente* e

<sup>17</sup> Heidegger, M. (1976), *La questione della tecnica*, in *Saggi e discorsi*, Milano: Mursia, p. 12.

<sup>18</sup> Sennett, R. (2008), *L'uomo artigiano*, Milano: Feltrinelli.



l'*essere*, ossia si chiede quale sia l'essenza della tecnica e se questa essenza sia vera. L'essenza della tecnica<sup>19</sup>, si è già scritto, conduce al disvelamento della verità perché ogni produzione è congiunta al disvelamento, del far avvenire e della causalità. Curiosamente *ars* in latino è l'equivalente di *techné* in greco. Ma non nel senso di *poiesis*, di produrre o di comporre. Essa è connessa pure alla provocazione<sup>20</sup>. Ad esempio, nella modernità, il carbone è estratto perché al carbone è associata la provocazione di fornire energia, così tramite la tecnica questa essenza del carbone è svelata. Il pericolo è che tale imposizione, *ge-stell*, origina un disvelamento non originario essendo governato dall'apparenza che tutto è generato grazie all'uomo<sup>21</sup>. Per Heidegger, la tecnica ha quindi una duplice valenza, contraddittoria per certi versi. Da una parte provoca l'uomo con il conseguente rischio di porlo di fronte alle apparenze e di allontanarlo dall'essenza della verità, dall'altra è custode di verità. Emanuele Severino, accogliendo il pensiero di Heidegger e ricercando il fondamento ontologico della verità, conferma che l'architettura in tal senso non può mentire, non nel momento in cui diventa forma, materia come trasposizione del

<sup>19</sup> «Anzitutto, bisogna che cogliamo nella tecnica ciò che ne costituisce l'essere, invece di restare affascinati semplicemente dalle cose tecniche. Fino a che pensiamo la tecnica come strumento, restiamo anche dominati dalla volontà di dominarla». Heidegger, M. (1976), *Op. cit.*, p. 63.

<sup>20</sup> «Che cos'è la tecnica moderna? Anch'essa è disvelamento. [...] Il disvelamento che governa la tecnica moderna, tuttavia, non si dispiega in un produrre nel senso della *poiesis*. Il disvelamento che vige nella tecnica moderna è una pro-vocazione la quale pretende dalla natura che essa fornisca energia che possa come tale essere estratta e accumulata». *Ibidem*.

<sup>21</sup> «Tuttavia, proprio quando è sotto questa minaccia l'uomo si veste orgogliosamente della figura di signore della terra. Così si viene diffondendo l'apparenza che tutto ciò che si incontra sussista solo in quanto è un prodotto dell'uomo. Questa apparenza fa maturare un'ultima ingannevole illusione. È l'illusione per la quale sembra che l'uomo, dovunque, non incontri più altri che sé stesso». *Ibidem*.

pensiero che l'ha pensata. Severino, in particolare, riconosce nel nichilismo, l'indomabilità della tecnica e la caduta del divenire. Quindi scrive non di dominio sulla tecnica ma di potenza, di potenzialità, della tecnica.

Siamo persuasi sempre maggiormente dal fatto che l'architettura tragga influenza da scienza e tecnica. Se si ripercorre la definizione di Gianni Vattimo, questa evidenza diviene inevitabile. Nel capitolo dedicato ad *Arte e tecnica* della sua *Introduzione all'estetica*, egli ricorda la differenziazione delle arti, a partire dalla cultura medievale, in *servili* e *liberali*. Le prime, comportano manipolazione della materia, creazione di prodotti e di oggetti; le seconde il puro *esercizio*. Conseguenza di ciò è che l'architettura, posta fra le arti liberali insieme all'artigianato ad oggi noto come design, sia intimamente legata alla tecnica. L'impiego della pietra sapientemente lavorata per i romani o la stretta connessione tra le tozze proporzioni delle cattedrali romaniche divenute poi espressione di verticalità nel periodo appena successivo, sono manifestazione di tale dipendenza, come l'invenzione o la scoperta dei materiali dell'architettura moderna. Fatte queste premesse, se con il termine *tecnica*, intendiamo quindi, lo *strumento* a servizio dell'architettura e non il *fine*, questa potrebbe essere classificata secondo due scopi: mezzo per superare le logiche top-down della progettazione e per favorire quelle bottom-up ispirate ai processi che avvengono in natura, privilegiando le relazioni tra le parti secondo una logica della complessità, del dinamismo, del divenire e promuovendo nuove opportunità per l'architettura; strumento che pone l'uomo esterno al processo di progettazione e affidando il processo progettuale unicamente alle macchine e al calcolo computazionale. Nel primo caso la tecnica è intesa come manifestazione delle potenzialità della materia. Nel secondo, quello che aliena l'uomo, sembra espressione del timore e della critica

mossa da Heidegger nei confronti della tecnica. L'uomo perseguendo una tecnologia che non è in grado di governare, perde il senso del reale e la possibilità del disvelamento della verità che potrebbe avvenire invece grazie alla creazione di una opera d'arte. Quando il progettista non è in grado di prevedere le forme generate<sup>22</sup> e lascia questo processo alla dimensione aleatoria dei meta-algoritmi, la logica computazionale è dominante rispetto al soggetto creatore. Mark Burry<sup>23</sup> è colui che, con Jordi Fauli, direttore dei lavori, si occupa dal 1991 dell'opera di completamento della Sagrada Familia, a Barcellona. Opera dell'architetto catalano Antoni Gaudì il cui progetto è del 1883. Burry, indaga l'esistenza di una logica computazionale dietro la geometria di alcune parti dell'architettura. Utilizzando software parametrici, tra cui CADD5TM, attraverso la generazione di forme digitali e la programmazione di uno *scripting*, un *codice genetico*, in grado di riprodurle, riesce a lavorare la pietra attraverso macchine a controllo numerico che ne velocizzano il processo. In particolare, si occupa delle colonne della navata centrale e di uno dei lucernari, di cui l'architetto catalano aveva lasciato un modello altamente detta-

<sup>22</sup> «Nonostante oggi siano molto diffusi gli slogan a favore della "morte dell'autore" e gli atteggiamenti avversi alla "visione romantica del genio", io credo che questa sia solo una moda e che le domande sullo stile personale ritorneranno al centro dell'attenzione. Questi artisti del futuro saranno soddisfatti con il loro ruolo di "allevatori e selezionatori di forme virtuali"? Non voglio dire che il processo sia banale in ogni suo aspetto. Dopo tutto, il modello CAD originale deve essere dotato di punti di mutazione nelle posizioni giuste (e questo comporta decisioni da parte del designer) e ci sarà bisogno di molta creatività per collegare elementi ornamentali e strutturali nel modo giusto. Ma questa è tutta un'altra cosa rispetto a un processo creativo nel quale qualcuno possa sviluppare uno stile unico». De Landa, M. (2002), *Deleuze and the Use of the Genetic Algorithm in Architecture*, in researchgate.net

<sup>23</sup> Burry, M. (2011), *Scripting Cultures: Architectural Design and Programming*, Londra: Wiley.

gliato in scala 1:10. Gaudì concepiva la navata come una foresta alla cui sommità doveva nascere una grande copertura di foglie, rami e fronde di alberi. Burry, nel suo testo<sup>24</sup>, dedica due capitoli alla logica dell'assenza del reale e alla presenza del virtuale. Ciò che emerge dallo studio di Burry è che le forme della Sagrada Familia, benché l'inizio della sua costruzione risale alla fine dell'Ottocento, ricordano le forme emergenti dell'architettura contemporanea, che i moderni *scripter* riproducono tramite l'ausilio dei software. Tale sincronia occorre, si suppone, perché, ciò che accomuna tali forme è l'ispirazione alle configurazioni della natura, la loro astrazione e l'elaborazione di complessi modelli matematici, ciò che le separa è il procedimento con cui tali geometrie sono state raggiunte. Gaudì attraverso mani e mente, Burry tramite un software. Ancora una volta sembra emergere l'idea che la computazione non coincida con la computerizzazione<sup>25</sup> e che la logica creativa di un genio è una forma di computazione con insita la consapevolezza di ciò che si sta progettando. Gaudì ha intuito una delle possibili configurazioni che nell'era del digitale sarebbero

<sup>24</sup> Burry, M. (2011), *Scripting Cultures: Architectural Design and Programming*, Londra: Wiley.

<sup>25</sup> «Computation is a term that differs from, but is often confused with, computerization. While computation is the procedure of calculating, i.e., determining something by mathematical or logical methods, computerization is the act of entering, processing, or storing information in a computer or a computer system. Computerization is about automation, mechanization, digitization, and conversion. Generally, it involves the digitization of entities or processes that are preconceived, predetermined, and well defined. In contrast, computation is about the exploration of indeterminate, vague, unclear, and often ill-defined processes; because of its exploratory nature, computation aims at emulating or extending the human intellect. It is about rationalization, reasoning, logic, algorithm, deduction, induction, extrapolation, exploration and estimation. In its manifold implications, it involves problem solving, mental structure, cognition, simulation, and rule-based intelligence, to name but a few». Terzidis, K. (2003), *Expressive form: a conceptual approach to computational design*, Londra: Spoon, pp. 66-67.

state offerte dal computazionale. Un elaboratore di calcolo avrebbe potuto avere la medesima intuizione?

Di visione contraria Kostas Terzidis, autore di *Algorithmic architecture*<sup>26</sup> e di *Expressive form*. Il tema dell'approccio computazionale al progetto è affrontato da Terzidis sia dal punto di vista filosofico che tecnologico. Per quei progettisti per cui il computer è solo uno strumento con cui produrre forme sofisticate e controllare meglio la realizzazione di tali forme non è importante investigarne il processo realizzativo. Per altri invece, come per Terzidis, è possibile associare il termine computerizzazione a quello di creatività. Il design per Terzidis non è una invenzione del progettista, la creazione di qualcosa di nuovo, ma il risultato di un processo da scoprire, riprendendo la filosofia dei presocratici, Empedocle e Parmenide, per cui «tutto è, nulla diviene». L'*archè* è il principio, da cui tutto ha origine e a cui tutto tornerà. Per Terzidis il computer non è una estensione della mente ma è convivente del processo di progettazione, individuando però una differenza tra questi e i primi anni di architettura assistita da computer, quella in cui pioniere era Negroponte, cofondatore del MediaLab al MIT di Boston. Terzidis suggerisce che se ciò che chiamiamo *intuizione* fosse considerato un processo, non apparterebbe alla dimensione del mistero e la maggior parte dei momenti di questo processo sarebbero spiegati. Se il miglior uso del computer è computerizzare una idea esterna al computer che è nella mente di chi progetta, il limite dello strumento coinciderà coi limiti del programma utilizzato. Se, invece, il progetto fosse legato a un processo computazionale, derivando dalla logica del sistema algoritmico, dello *scripting* e della programmazione, non possiederebbe limiti perché il progettista divenendo programmatore, li supererebbe. L'architettura algoritmica si serve di entrambe in maniera complementare,

<sup>26</sup> Terzidis, K. (2006), *Algorithmic architecture*, Londra: Elsevier.

passando dalla programmazione architettonica all'architettura programmata. L'architetto-programmatore progetta sia lo spazio che gli strumenti per pensarlo. Per sottolineare la differenza tra i termini computazione e computerizzazione, scrive,

«*Computation* è un termine diverso dal *computerization*, ma spesso è confuso con esso. Mentre la *computation* è la procedura di calcolo, ovvero determinare qualcosa con metodi matematici o logici, la *computerization* è l'atto di inserire, elaborare o archiviare informazioni in un computer o in un sistema informatico. La *computerization* riguarda automazione, meccanizzazione, digitalizzazione e conversione. In generale, comporta la digitalizzazione di entità o processi preconcepi, predeterminati e ben definiti. Al contrario, il calcolo riguarda l'esplorazione di processi indeterminati, vaghi, poco chiari e spesso mal definiti; a causa della sua natura esplorativa, il calcolo mira a emulare o estendere l'intelletto umano. Si tratta di razionalizzazione, ragionamento, logica, algoritmo, deduzione, induzione, estrapolazione, esplorazione e stima. Nelle sue molteplici implicazioni, implica la risoluzione dei problemi, la struttura mentale, la cognizione, la simulazione e l'intelligenza basata sulle regole, solo per citarne alcuni»<sup>27</sup>.

Come scritto precedentemente il termine computazione ingloba tutto ciò che nasce da un processo logico e matematico, il termine computerizzazione è il processo che si sviluppa dentro un computer. Il limite coincide coi limiti del programma utilizzato. Per Terzidis l'architettura algoritmica non è solo una serie di codici disposti in

<sup>27</sup> Terzidis, K. (2003), *Op. cit.*, pp. 66-67.

righe all'interno di un programma di *scripting*, ma ha delle basi teoriche con dei risvolti in campo filosofico, sociale e artistico. Essendo l'algoritmo una scoperta e non una invenzione al pari di matematica e geometria, il termine *computazione* ha una natura indipendente. Terzidis sostiene che esiste 1 probabilità su  $10^{7669}$  che l'Icarus di Matisse possa essere riprodotto dalla generazione di un algoritmo che combina colori, pixel e griglie. Ogni pennellata è ridotta a un pixel. Per Terzidis un grande risultato. Definisce l'algoritmo come la «procedura computazionale per affrontare un problema in un numero finito di passaggi»<sup>28</sup>. I meta-algoritmi, algoritmi generati da altri algoritmi. Così, un meta-algoritmo genetico possiede una componente aleatoria, stocastica. È astrazione di un processo fatto di termini finiti che può portare alle definizioni di soluzioni non finite, non confinate, ossia di infiniti *loop*<sup>29</sup>. Per Terzidis l'algoritmo pone in relazione sistemi apparentemente caotici e complessi. Ovvero, è la componente razionale di un processo, quello della progettazione, che altrimenti sarebbe irrazionale. *Algotecture* invece, è un termine appositamente coniato per esprimere l'impiego di algoritmi in architettura e per cui è più corretto scrivere di problem-addressing, problema da affrontare, piuttosto che di problem-solving, problema da risolvere. Seguendo tale approccio la progettazione diviene «il processo di inventare oggetti fisici secondo un nuovo ordine fisico, una nuova organizzazione e una nuova forma, in risposta a una funzione»<sup>30</sup>. Per Terzidis se il design fosse riconducibile a una attività sistemica, razionale e finita, un codice computazionale ne potrebbe contenere il processo.

Ci si chiede quindi, ancora, se è davvero così. Che tutto sia ridot-

<sup>28</sup> *Ibidem*.

<sup>29</sup> *Ibidem*.

<sup>30</sup> Alexander, C. (1967), *Notes on the synthesis of form*, Cambridge: Harvard University press.



^ Matisse\_Icarus, 1947.

to al calcolo computazionale computerizzato, anche la genialità di un artista, la follia di un visionario. Probabilmente l'algoritmo potrebbe anche produrre la combinazione del quadro di Matisse, ma ad oggi, non possiede la capacità di sceglierla. Matisse invece sì. Egli sapeva esattamente quali linee e colori avrebbero riprodotto la sua opera, benché gli erano sconosciute le altre  $10^{7669} - 1$  combinazioni. Tale approccio intuitivo, opposto all'algoarchitecture definita da Terzidis corrisponde all'approccio euristico.

La logica computazionale, si è visto, rappresenta un utile strumento di conoscenza della forma e del processo morfogenetico della natura e della materia, accrescendo le possibilità offerte a un progettista. Si scoprono materiali ignoti, si individuano innovativi sistemi di funzionamento, formazione, conformazione, crescita, aggregazione e interazione a micro- e macro-scala. Grazie alla tecnica, a strumenti quali, scanner 3D, microscopi ad alte prestazioni, fotografie ai raggi x è possibile comprendere e conoscere la conformazione della materia al proprio interno, la composizione delle molecole, è possibile studiare le forze di iterazione, i *quanta*. In biologia, per esempio, la computazione, è applicata all'analisi dei dati e delle simulazioni matematiche, alla gestione di sequenze biologiche, alla biologia evolutiva. Tuttavia, si è visto, deriva di tale entusiasmante progresso potrebbe essere la crescente alienazione dell'uomo all'interno del processo. Come ci ricorda Umberto Galimberti, Prometeo, prima dona la tecnica agli uomini, poi impedisce loro di vedere la propria sorte mortale, offrendogli *cieche speranze*.

Siamo persuasi dal fatto che il progresso sia inevitabile, la storia dell'evoluzione sembra confermarlo e che questo sia necessario. Tutto funziona ma questo funzionare è la parte più *inquietante*<sup>31</sup>. Ci

<sup>31</sup> «Tutto funziona. Ma proprio questo è l'elemento inquietante: che tutto funzioni e che il funzionare spinga sempre avanti verso un ulteriore funzionare, e che la tecnica



si chiede, necessario a cosa? Qual è il fine e quale la cieca fiducia nei confronti della tecnica? Quale il fine del baratto unilaterale tra le capacità umane e le capacità di una macchina?

A pensarci bene, se vi è un dispositivo in grado di ricordare al posto dell'uomo, l'uomo probabilmente perderà gradualmente la capacità di farlo, come anche di ragionare, ossia di svolgere tutte quelle attività per cui un sistema meccanico funzionerebbe meglio. E, risulta chiaro adesso, nel caso dell'uso generalizzato di algoritmi, che il rischio sia quello di perdere la capacità umana di immaginare, di progettare, di emozionare, di creare. Come se le forme computazionali siano una nuova forma di *fidanzata automatica*<sup>32</sup>. Non essere in grado di scegliere una strada piuttosto che un'altra. Tutto diviene possibile. L'uomo si dis-incarna, si perde nella rete.

In questo scenario, di generale nichilismo, è probabile che si teorizzi non il fine ma una fine per l'architettura. Per Allan Kaprow si dovrebbe, persino, cancellare la parola *arte* dal dizionario. Paul Virilio scrive di *estetica della sparizione*<sup>33</sup>. Per la cyber-architettura la tecnologia è il fine e lo spazio fisico dell'architettura è destinato a

strappi e sradichi sempre di più l'uomo dalla terra. Non so se Lei sia spaventato; in ogni caso io lo sono stato alla vista delle fotografie della terra scattate dalla luna. Non c'è bisogno della bomba atomica. Lo sradicamento dell'uomo è già in atto. Ormai abbiamo solo rapporti puramente tecnici». Heidegger, M. (1933-1966), *Scritti Politici*, in Fédier, F. (a cura di), Casale Monferrato: Piemme, 1998, pp. 263-296 e pp. 365-370.

<sup>32</sup> Maurizio Ferraris, filosofo che si occupa principalmente di estetica e di ontologia in *La fidanzata automatica*, tenta di definire l'arte come una esperienza comune e paragona l'arte a tale singolare fidanzata considerando entrambe oggetti – in particolare l'arte, oggetto fisico e sociale – che simulano di essere soggetti. Entrambe sebbene prive di una anima, provocano emozioni.

<sup>33</sup> «L' arte contemporanea è una arte accecata. Non solo ha perso il contatto con il reale, ma soprattutto ha smarrito la capacità di vedere. Il che naturalmente è molto più grave». Virilio, P. (1980), *Estetica della sparizione*, Milano: Feltrinelli, 2016.

ridursi a quello virtuale della rete fino a scomparire. Ancora una volta una cancellazione. Analogamente a quanto accade all'arte, per cui le nuove capacità tentano di eliminare le tecniche artistiche precedenti, come volessero eliminare la storicità, lo spazio virtuale sembra voler eliminare quello reale. Eppure, come si chiede Paul Virilio del *perché* vi sia la necessità di cancellare, bisognerebbe ridare valore al corpo. Non vi è Cristianesimo senza incarnazione<sup>34</sup>, non vi è arte senza corpo, tautologicamente, non vi è architettura senza uomo<sup>35</sup>.

«Ciò che è veramente inquietante non è che il mondo si trasformi in un dominio completo della tecnica. Più inquietante è che l'uomo non sia preparato a questo radicale mutamento. Ed ancora più inquietante è che non siamo capaci di raggiungere, attraverso un pensiero meditativo, un adeguato confronto con ciò che sta realmente emergendo nella nostra epoca»<sup>36</sup>.

<sup>34</sup> Baj, E. e Virilio, P. (2002), *Discorso sull'errore dell'arte*, Milano: Elèuthera, p. 26.

<sup>35</sup> «La pittura agisce su due dimensioni, anche se può suggerirne tre o quattro. La scultura agisce su tre dimensioni, ma l'uomo ne resta all'esterno, separato, guarda da fuori le tre dimensioni. L'architettura invece è come una scultura scavata nel cui interno l'uomo penetra e cammina». Zevi, B. (1948), *Saper vedere l'architettura*, Torino: Piccola biblioteca Einaudi, p. 21.

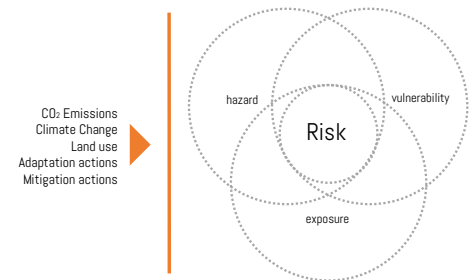
<sup>36</sup> Heidegger, M. (1959), *L'abbandono*, Genova: il melangolo, p. 36.

**CASO STUDIO\_I SISTEMI AGGREGATI**  
**analisi, ideazione, sperimentazione & verifica**



## Rischi urbani e territoriali I sistemi aggregati e la sostenibilità ambientale

Com'è noto, il rischio urbano o territoriale, di origine antropica o di origine naturale è spesso riconducibile a quello che in letteratura è definito il danno atteso, in termini di oggetti, edifici o spazi colpiti e di persone coinvolte. Per tale ragione, al fine di restituire una valutazione del rischio è necessario tenere conto delle sollecitazioni cui è sottoposto il territorio [hazard], della quantità e della tipologia degli elementi che potrebbero rimanere danneggiati in seguito al verificarsi dell'evento calamitoso [exposure] e infine della propensione al danno che possiede l'ambito territoriale oggetto di valutazione [vulnerability]. La vulnerabilità rappresenta una delle variabili attraverso cui è possibile intervenire per la conseguente mitigazione. È possibile definire invece la sostenibilità ambientale come «una condizione di equilibrio, resilienza e interconnessione che consente alla società umana di soddisfare i propri bisogni senza superare la capacità dei propri ecosistemi per continuare a rigenerare i servizi necessari a soddisfare tali bisogni»<sup>1</sup>. E l'International Council for Local Environmental Initiatives nel 1994 definisce lo sviluppo sostenibile quello che «offre servizi ambientali, sociali ed economici di base a tutti i membri di una comunità, senza minacciare l'operabilità dei sistemi naturale, edificato e sociale da cui dipende la fornitura di tali servizi»<sup>2</sup>. Studi recenti svolti dalla Direzione generale Azione per il clima (DG CLIMA) che guida le attività della Commissione Europea per con-



<sup>1</sup> Morelli, J. (2011) *Environmental Sustainability: A Definition for Environmental Professionals* in «Journal of Environmental Sustainability» Volume 1, Issue 1, 2011.

<sup>2</sup> Cfr. AA. VV. (2012) *Manuale ambiente 2012*, Assiago: Ipsoa, p. 9.

**Map ES.1 Key observed and projected climate change and impacts for the main biogeographical regions in Europe**

**Arctic region**

Temperature rise much larger than global average  
 Decrease in Arctic sea ice coverage  
 Decrease in Greenland ice sheet  
 Decrease in permafrost areas  
 Increasing risk of biodiversity loss  
 Some new opportunities for the exploitation of natural resources and for sea transportation  
 Risks to the livelihoods of indigenous peoples

**Atlantic region**

Increase in heavy precipitation events  
 Increase in river flow  
 Increasing risk of river and coastal flooding  
 Increasing damage risk from winter storms  
 Decrease in energy demand for heating  
 Increase in multiple climatic hazards

**Mountain regions**

Temperature rise larger than European average  
 Decrease in glacier extent and volume  
 Upward shift of plant and animal species  
 High risk of species extinctions  
 Increasing risk of forest pests  
 Increasing risk from rock falls and landslides  
 Changes in hydropower potential  
 Decrease in ski tourism

**Coastal zones and regional seas**

Sea level rise  
 Increase in sea surface temperatures  
 Increase in ocean acidity  
 Northward migration of marine species  
 Risks and some opportunities for fisheries  
 Changes in phytoplankton communities  
 Increasing number of marine dead zones  
 Increasing risk of water-borne diseases

**Boreal region**

Increase in heavy precipitation events  
 Decrease in snow, lake and river ice cover  
 Increase in precipitation and river flows  
 Increasing potential for forest growth and increasing risk of forest pests  
 Increasing damage risk from winter storms  
 Increase in crop yields  
 Decrease in energy demand for heating  
 Increase in hydropower potential  
 Increase in summer tourism

**Continental region**

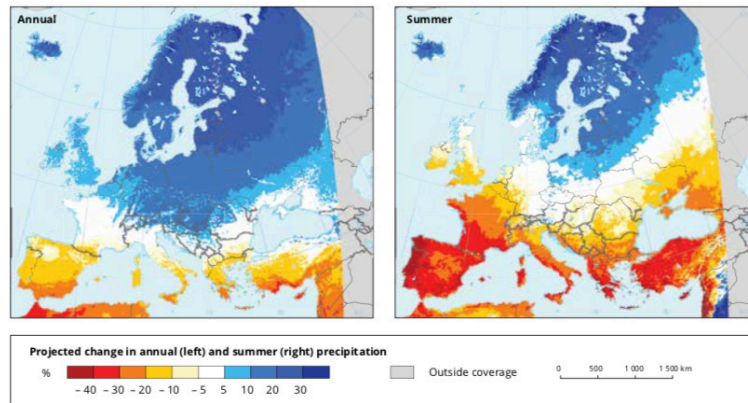
Increase in heat extremes  
 Decrease in summer precipitation  
 Increasing risk of river floods  
 Increasing risk of forest fires  
 Decrease in economic value of forests  
 Increase in energy demand for cooling

**Mediterranean region**

Large increase in heat extremes  
 Decrease in precipitation and river flow  
 Increasing risk of droughts  
 Increasing risk of biodiversity loss  
 Increasing risk of forest fires  
 Increased competition between different water users  
 Increasing water demand for agriculture  
 Decrease in crop yields  
 Increasing risks for livestock production  
 Increase in mortality from heat waves  
 Expansion of habitats for southern disease vectors  
 Decreasing potential for energy production  
 Increase in energy demand for cooling  
 Decrease in summer tourism and potential increase in other seasons  
 Increase in multiple climatic hazards  
 Most economic sectors negatively affected  
 High vulnerability to spillover effects of climate change from outside Europe



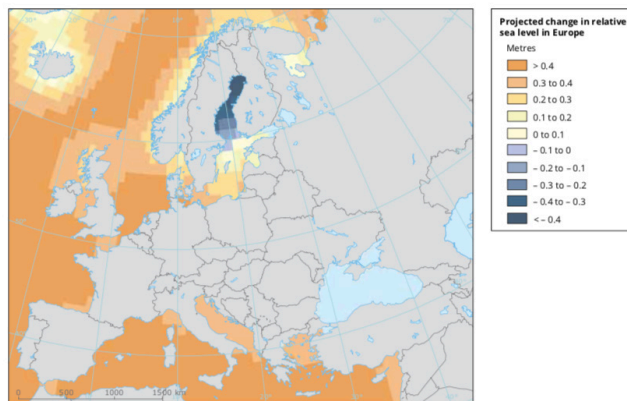
**Map 3.8 Projected change in annual and summer precipitation**



**Note:** This map shows projected changes in annual (left) and summer (right) precipitation (%) in the period 2071–2100 compared with the baseline period 1971–2000 for the forcing scenario RCP8.5. Model simulations are based on the multi-model ensemble average of many different RCM simulations from the EURO-CORDEX initiative.

**Source:** EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014).

**Map 4.5 Projected change in relative sea level in Europe**



**Note:** This map shows projected change in relative sea level in the period 2081–2100 compared with 1986–2005 for the medium-to-low emissions scenario RCP4.5 based on an ensemble of CMIP5 climate models. Projections consider gravitational fingerprinting and land movement due to glacial isostatic adjustment, but not land subsidence as a result of human activities. No projections are available for the Black Sea.

**Source:** Adapted from IPCC, 2013 (Figure TS.23 (b)). Data were supplied by Mark Carson (ZMAW, Germany).

trastare i cambiamenti climatici in ambito internazionale e dell'Unione Europea, dimostrano che negli ultimi quarant'anni le emissioni di anidride carbonica sono aumentate del 40% a causa del processo di industrializzazione. Inoltre, il 63% dell'aumento del riscaldamento globale è causato dall'attività umana. L'effetto più immediato di tale aumento, l'innalzamento dei mari, lo scioglimento dei ghiacciai, condizioni meteorologiche estreme rappresentano la causa dei rischi sul territorio quali eccessivo aumento delle precipitazioni, delle inondazione dei fiumi, dei fenomeni di siccità, la desertificazione per talune regioni e danni per i centri urbani e il territorio. Il 25 gennaio del 2017 è stato pubblicato il report della European Environment Agency (EEA) n. 1 /2017 su "Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016"<sup>3</sup> un documento a valenza quadriennale sulla relazione tra i cambiamenti climatici e l'impatto sulla società e gli ecosistemi europei e il relativo livello di vulnerabilità. L'obiettivo del documento riguardava la promozione di politiche volte alla riduzione dei gas a effetto serra prodotti dall'attività umana con la conseguente azione di mitigazione dei rischi sull'ambiente e sulla società. Se è vero che il riscaldamento globale è un processo inesorabile è però possibile rallentare il fenomeno per poter intervenire con politiche di adattamento. All'interno di tale report è stato stimato che le attività umane abbiano causato rispetto ai livelli preindustriali un riscaldamento globale - stimato nell'arco di 30 anni - pari a 1,0 °C e che questo, probabilmente, raggiungerà il valore di 1,5 °C tra il 2030 e il 2052<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> Cfr. "Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016" EEA report n. 1 /2017 disponibile su [www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)

<sup>4</sup> Si legge infatti, «A.3\_I rischi legati al clima per i sistemi naturali e umani sono maggiori per un riscaldamento globale di 1,5°C rispetto alla situazione attuale, ma inferiori rispetto a un riscaldamento di 2°C. Questi rischi dipendono dall'entità e dalla rapidità del riscaldamento, dalla localizzazione geografica, dai livelli di sviluppo e vulnerabilità, e dalle scelte e implementazioni delle opzioni di adattamento e mitiga-



## I sistemi aggregati e la sostenibilità ambientale

Ponendosi il fine della mitigazione dei rischi indotti dai cambiamenti climatici e dalle emissioni di CO<sub>2</sub>, è stato pensato il raggiungimento di un processo progettuale e produttivo sostenibile perseguendo il fine della riciclabilità e ri-utilizzabilità in ogni fase della progettazione e sperimentazione. Possedendo le caratteristiche di un fluido, ovvero avendo origine dall'incastro e attrito tra componenti elementari, un sistema aggregato è facilmente ri-configurabile. Il criterio di ri-configurabilità è stato perseguito nella definizione, sia della singola componente, essendo essa pensata di materiale riciclabile che dell'intero sistema aggregato, essendo pensato a servizio di una struttura, un padiglione, temporanea e riutilizzabile. Caratteristiche di riciclabilità, ri-utilizzabilità e ri-configurabilità che rappresentano un punto di forza se il fine della progettazione è la mitigazione dei rischi indotti dai cambiamenti climatici dovuti all'assodato aumento delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Studi recenti suggeriscono che l'assemblag-

zione. Sono già stati osservati impatti del riscaldamento globale sui sistemi naturali e umani. Molti ecosistemi terrestri e marini e alcuni dei servizi che essi forniscono sono già cambiati a causa del riscaldamento globale. I rischi futuri correlati al clima dipendono dalla rapidità, dall'entità del picco e dalla durata del riscaldamento. Nell'insieme, essi sono maggiori se il riscaldamento globale supera 1,5 °C prima di tornare a questo livello entro il 2100 rispetto al caso in cui il riscaldamento globale raggiunga gradualmente e si stabilizzi a 1,5 °C, specialmente se la temperatura di picco è alta (per esempio circa 2°C). Alcuni impatti possono essere molto duraturi o irreversibili, come la perdita di alcuni ecosistemi; B.2\_ Entro il 2100 l'innalzamento del livello del mare è inferiore di circa 0,1 metri nelle proiezioni con un riscaldamento globale di 1,5 °C rispetto a 2 °C. Il livello del mare continuerà a salire ben oltre il 2100 e l'entità e la velocità di questo aumento dipenderanno dagli andamenti futuri delle emissioni. Un aumento più lento del livello del mare permette maggiori opportunità di adattamento nei sistemi umani ed ecologici delle piccole isole, delle zone costiere alle quote più basse e dei delta fluviali».Cfr. Intergovernmental panel on climate change (ipcc) del 2018, versione italiana a cura di Società Italiana per le Scienze del Clima. La versione originale inglese è disponibile in formato elettronico sul sito Web dell'IPCC all'indirizzo <http://ipcc.ch/report/sr15/>.

gio di aggregati rappresenta un metodo sostenibile per l'architettura. Difatti, «la duplice natura delle particelle, composta da un materiale riciclato e comprendente anche una struttura più grande che può essere completamente riciclata, punta verso un ciclo di invenzione, produzione e generazione con echi di responsabilità ecologica e dipendenza petrolchimica. In questo modo, l'architettura aleatoria si colloca in modo prominente nel contesto più ampio di un ciclo di vita dei materiali che minimizza gli sprechi e ne sottolinea la riusabilità»<sup>5</sup>. La relazione tra la caratteristica di ri-utilizzabilità dei manufatti temporanei e l'attenzione alla sostenibilità ambientale ha guidato anche la progettazione dei padiglioni temporanei realizzati per Milano Expo 2015. All'interno delle *Guidelines for the reduction of the environmental impact of temporary building and structures in mega events* redatte in occasione della Convenzione tra il Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare e il politecnico di Milano il 24 marzo del 2014 per l'attuazione delle metodologie di calcolo dell'impronta di carbonio e di compensazione delle emissioni di CO<sub>2</sub> di Expo 2015 è stato introdotto il *Design for Deconstruction* o *Design for Disassembly* [DfD]. Ovvero, un documento guida per pensare fin dal momento della fase di ideazione alla demolizione o in questo caso al dis-assemblaggio degli elementi costruttivi del padiglione per ridurre lo scarto, il rifiuto e per ridurre l'uso delle risorse, comportando la conseguente riduzione dei tem-

<sup>5</sup> «The dual nature of the particles, composed of a recycled material and also comprising a larger structure that can be fully recycled, points towards a cycle of invention, production and generation with echoes in ecological responsibility and petrochemical dependency. In this way, aleatory architecture is placed prominently into the larger context of a materials life cycle that minimises waste and emphasises reusability» in Murphy, K., Roth, L., Peterman, D. e Jaeger, H. (2016), *Aleatory Construction Based on Jamming: Stability Through Self Confinement*. Architectural Design, Vol. 87 No. 4, London: Wiley Academy, pp. 74-81.

pi del processo industriale. In occasione della conferenza dal titolo "Deconstruction - closing the loop" del 1999 al Building Research Establishment (BRE)<sup>6</sup> sono state precisate talune definizioni utili al raggiungimento della progettazione *Design for Deconstruction*. Col termine *disassembly* si intendeva lo smontaggio dei componenti del padiglione senza danneggiarli; *demolition* è il termine con cui si indicava il processo di distruzione intenzionale; *deconstruction* è simile al termine *disassembly* con l'intento di riutilizzare i componenti una volta smontati; *refurbishment* indicava il miglioramento delle prestazioni del padiglione attraverso la sostituzione parziale o completa e/o l'aggiornamento di componenti e di servizi; *retrofit* era il cambio di uso o scopo dopo la costruzione per cui era stato progettato il padiglione; *adaptable building* indicava un padiglione polifunzionale che consentiva un facile cambio del proprio uso. Se si condividono tali definizioni, il sistema aggregato pensato può essere sottoposto a dis-assemblaggio e a decostruzione. Inoltre, all'interno delle linee guida erano stati definiti alcuni criteri di progettazione di un manufatto interamente riciclabile e riutilizzabile, sia nelle sue componenti che relativamente all'intero sistema costruttivo. Per tale ragione, tali definizioni e tali linee guida, hanno orientato la ricerca nella fase di ideazione e sperimentazione. Il sistema costruttivo aggregato può essere impiegato sia per realizzare nuove costruzioni che per il retrofit di quelle esistenti. Tale ultimo aspetto contribuisce anch'esso alla mitigazione del rischio promuovendo una riduzione dell'uso del suolo delle città. Si incoraggia difatti all'interno delle suddette guide<sup>7</sup> l'impiego di materiali riciclati [M1]; la riduzione del numero

<sup>6</sup> Hobbs, G. e Hurley, J. (2001), *Deconstruction and the reuse of construction materials*, BRE, Watford, UK.

<sup>7</sup> *Guidelines for the reduction of the environmental impact of temporary building and structures in mega events* in Convenzione tra il Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare ed il Politecnico di Milano il 24 marzo del 2014.

di diversi tipi di materiale [M2]; l'esclusione di materiali tossici e pericolosi [M1]; la riduzione al minimo del numero di diversi tipi di componenti [C7]; l'utilizzo di connessioni meccaniche piuttosto che chimiche [C9]; l'impiego di componenti modulari, ovvero usare componenti compatibili con altri sistemi sia dimensionalmente che funzionalmente [R12]; la standardizzazione delle parti per consentire nel contempo una varietà infinita dell'edificio nel suo insieme [B24]; l'impiego di un numero minimo di diversi tipi di componenti [B26]; l'impiego di materiali e componenti leggeri [B27]; la fornitura di pezzi di ricambio e deposito in loco [B29]. All'interno delle linee guida si promuove inoltre l'impiego della tecnologia costruttiva a secco, soddisfacendo ulteriormente i principi di sostenibilità nel processo costruttivo.

## Lo stato dell'arte I sistemi aggregati

«Democrito ritiene che la materia di ciò che è eterno consiste in piccole sostanze infinite di numero; e suppone che queste siano contenute in altro spazio, infinito per grandezza; e chiama lo spazio coi nomi di «vuoto» e di niente» e di «infinito», mentre dà a ciascuna delle sostanze il nome di «ente» e di «solido» e di «essere». Egli reputa che le sostanze siano così piccole da sfuggire ai nostri sensi; e che esse presentino ogni genere di figure [e forme] e differenze di grandezza. Da queste sostanze, dunque, in quanto egli le considera come elementi, fa derivare e combinarsi per aggregazione i volumi visibili e in generale percettibili. Esse lottano e si muovono nel vuoto, a causa della loro disequaglianza e delle altre differenze ricordate, e nel muoversi s'incontrano e si legano in un collegamento tale che le obbliga a venire in contatto reciproco e a restare contigue, ma non produce però con esse veramente una qualsiasi natura unica: perché è certamente un'assurdità il pensare che due o più possano mai divenire uno. Del fatto che le sostanze rimangano in contatto tra di loro per un certo tempo, egli dà la causa ai collegamenti e alle capacità di adesione degli atomi: alcuni di questi, infatti, sono irregolari, altri uncinati, altri concavi, altri convessi, altri differenti in innumerevoli altri modi; ed egli reputa dunque che gli atomi si tengano attaccati gli uni

agli altri e rimangano in contatto solo fino a quando, col sopraggiungere di qualche azione esterna, una necessità più forte non li scuota violentemente e li disperda in vane direzioni. Ed attribuisce il nascere ed il suo contrario, il disgregarsi, non soltanto agli animali, ma anche alle piante e ai mondi, insomma a tutti quanti gli oggetti sensibili. Se dunque il nascere è aggregazione di atomi e il dissolversi è disgregazione, anche per Democrito il divenire non è che modificazione di stato»<sup>1</sup>.

Aggregazione e disgregazione di niente e di essere, di vuoto e di solido si trasformano, divengono. In generale è possibile definire un sistema aggregato, come formato dalla combinazione di una serie di elementi distintamente separati in unità. Per progettare o definire dei sistemi aggregati è necessario così:

- individuare una unità di aggregazione singola
- definire il processo di aggregazione

È possibile distinguere i sistemi aggregati in quelli ordinatamente organizzati e in quelli liberi, stocastici. I sistemi aggregati liberi hanno la caratteristica peculiare di assumere il comportamento di un fluido pur avendo le caratteristiche di un materiale solido<sup>2</sup>. Ossia, interazioni su micro-scala generano una rigidità su macro-scala. Si potrebbe parlare di una transizione di fase del tutto simile alla transizione vetrosa che accade per i materiali polimerici ma a differenza di questa, la 'cristallizzazione' non è generata da un abbassamento di temperatura, ma dalle caratteristiche geometriche della particella.

<sup>1</sup> Simplicio in *Aristotelis De caelo*, 294, 33 in *I Presocratici*, cit. vol. 11 DK fr. 68 A 37

<sup>2</sup> Duran, J. (2000) *Sands, Powders, and Grains: An Introduction to the Physics of Granular Materials, Partially Ordered Systems*, New York: Springer, p. vi.

## I sistemi aggregati\_lo stato dell'arte

Non vi è gerarchia tra gli elementi che compongono tali sistemi acquisendo la capacità di crescere in maniera rizomatica. Tra i copiosi sistemi aggregati noti, quelli scelti all'interno del presente progetto di ricerca, sono tali per cui la forza principale caratterizzante queste strutture siano la gravità, da sempre tema di architettura, l'attrito e l'incastro. La motivazione nasce dalla volontà di dare inizio a un confronto tra i sistemi aggregati basato esclusivamente sulla morfologia, se strutturata o meno e non sul processo di aggregazione favorito da collanti o elementi di connessione. Ovvero, la modalità di aggregazione indagata, ideata e sperimentata è ridotta unicamente ai due anzidetti, attrito e incastro. La scelta di studiare tale sistema consiste nella volontà di creare una architettura 'porosa' a partire già dalla propria struttura. Geometria, spazio, materia e struttura si combinano.

### **Sistemi aggregati in natura\_classificazione e metodo di aggregazione**

Il mondo in cui l'essere umano vive, costituito dalla materia che osserva quotidianamente, il mondo macroscopico, sebbene le apparenze, non è immobile, non è massivo, non è immutevole. Come ricorda Michael Weinstock in *The Architecture of Emergence - the Evolution of Form in Nature and Civilisation*

«La topografia della superficie della terra emerge dall'interazione delle forze tettoniche che agiscono sulla terra dal basso e le forze di erosione e agenti atmosferici che agiscono su di essa dall'alto. Gli scambi di energia e materiale animano i processi morfologici all'interno di diversi regimi climatici, agendo su piccole particelle o granuli su scala molto piccola ma producendo forme



^ La duna\_ il sistema aggregato sabbia



^ La neve\_ il sistema aggregato cristall

grandi e comportamento complesso su scale dimensionali molto più grandi. Le forme della superficie si sviluppano fino a quando non si posizionano sulla soglia critica del cambiamento, in modo che piccoli cambiamenti nel flusso di energia e materiale possano iniziare un rapido cambiamento di forma. I processi geomorfologici generano feedback a scale temporali e dimensionali variabili che agiscono su altri sistemi»<sup>3</sup>.

Era il 1987 quando Per Bak, Chao Tang e Kurt Wiesenfeld in *Physical Review Letters* pubblicano un paper<sup>4</sup> in cui definiscono il concetto di criticità autorganizzata [SOC] dei sistemi dinamici non lineari. Secondo la definizione di Bak, Tang e Wiesenfeld si tratta di «grandi sistemi dinamici interattivi che evolvono naturalmente verso uno stato critico in cui un piccolo evento può condurre a una catastrofe»<sup>5</sup>.

Il sistema aggregato sabbia

Il punto critico di tali sistemi è un attrattore, raggiunto il quale tali sistemi si auto-organizzano. In natura esempi di sistemi aggregati sono le dune di sabbia soggette a vento, acqua e gravità, che migrano come fossero un fluido. E la neve, intesa come aggregazione di cristalli differenti. La sabbia è costituita da forme di grani concave e simili tra di loro, la neve da forme di cristalli convesse e altamente dissimili. Difatti, secondo la classificazione granulometrica, è definita sabbia l'aggregato i cui granuli abbiano dimensioni comprese tra 2 e 0,0625 mm. Possiedono caratteristiche comportamentali diverse dai solidi, dai liquidi e dai gas. Le teorie risalgono al 1779 quando Charles-Augustin de Coulomb formulò la legge sull'attrito per le par-

<sup>3</sup> Weinstock, M. (2010), *The Architecture of Emergence - the Evolution of Form in Nature and Civilisation*, Londra: Wiley, p. 69.

<sup>4</sup> Bak, P., Tang, C. e Wiesenfeld, K. (1987), *Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise* in «Physical Review Letters» n. 59 (4), pp. 381-384.

<sup>5</sup> *Ibidem*.

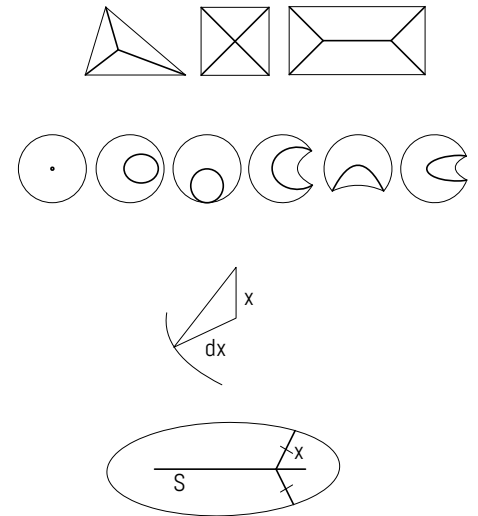


## I sistemi aggregati\_lo stato dell'arte

ticelle solide granulari. Il modello *Abelian sandpile* di criticità auto-organizzata per quanto sia un modello empirico esprime in maniera semplice il concetto di criticità auto-organizzata per descrivere il comportamento di tali sistemi. Versando dei granelli di sabbia da una sorgente verticale su una tavola dalla geometria definita, essi si sovrapporranno in modo da generare una forma complessiva conica e il sistema si troverà in uno stato di equilibrio statico grazie all'attrito tra ogni granello. Agendo solo la forza di gravità i granelli formeranno lo stato a riposo conico con una pendenza  $a$  - tangente dell'angolo a riposo  $\alpha$  - dipendente da fattori quali l'umidità del sistema aggregato o la dimensione dei granuli. Definita  $d(x)$  la distanza del punto  $x$  dal bordo della tavola, la funzione matematica che descriverà tale comportamento è:

$$u(x) = a \cdot d(x)$$

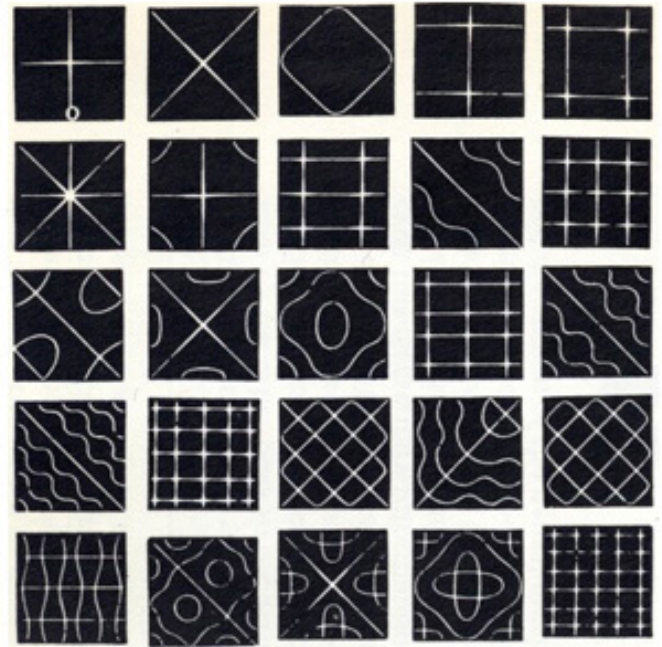
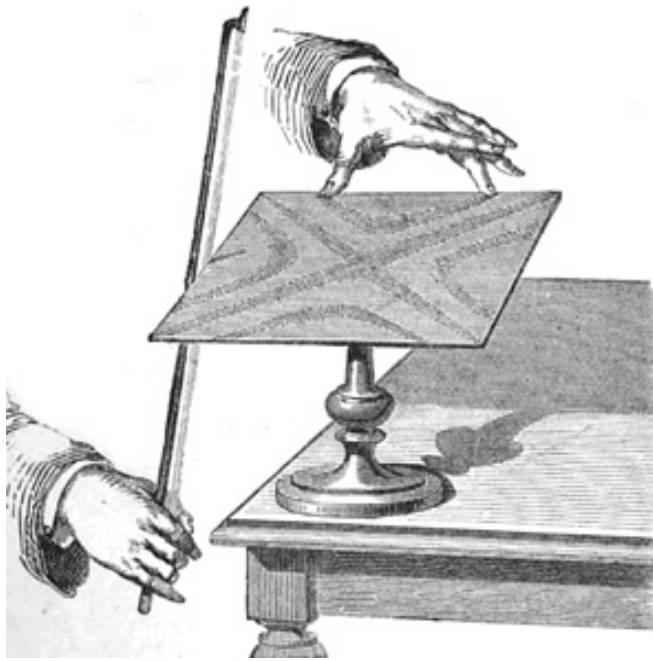
Definendo il crinale l'insieme dei punti equidistanti da più punti del bordo, la forma dei crinali dipenderà dalla geometria della tavola su cui la sabbia è versata. L'equilibrio di tale sistema aggregato sarà mantenuto fino a quando si svilupperà uno stato critico dipendente dall'angolo di resistenza al taglio noto anche come angolo di attrito interno, ossia dall'inclinazione laterale del cumulo di sabbia. Tale criticità comporterà che l'aggiunta di anche di uno solo dei granelli di sabbia causerà l'instabilità dell'intero sistema. Il granello di sabbia generatore della reazione a catena rappresenterà l'evento noto come 'cigno nero'. Volendo descrivere tale sistema mediante una legge di distribuzione, questa non corrisponderà a una gaussiana ma a una legge di elevamento a potenza, ovvero «la frequenza media di un evento di una certa ampiezza risulta inversamente proporzionale a



^ Forma dei crinali in funzione della geometria della tavola di base.



^Lastre di Chladni

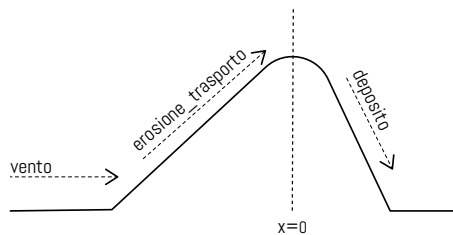


^Lastre di Chladni

una determinata potenza dell'ampiezza stessa»<sup>6</sup> che nel caso del cumulo di sabbia è tradotto nella formazione di tante piccole 'valanghe'. Difatti, il sistema aggregato della sabbia, ai margini del caos, è un sistema dinamico, non-lineare che sotto l'azione di talune forze scorre come fosse materia fluida. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes* del 1941 è il testo con cui Ralph Alger Bagnold, geologo e studioso del deserto, espone la propria ricerca sulla dinamica delle dune. Trasportato dal vento, ogni granello di sabbia si solleva e si deposita. Cadendo, urterà altri granelli che quindi rimbalzeranno con un angolo di incidenza costante. Nel momento in cui forma le dune, la sabbia svilupperà, al pari di un materiale fluido, la peculiare proprietà di scorrere benché si tratti di un sistema aggregato di particelle solide. Noto come sistema delle 'lastre di Chladni', dal fisico e musicista tedesco Ernst Chladni vissuto tra il 1756 e il 1827, che ne ha studiato il fenomeno, la formazione dei crinali di sabbia avviene anche sottoponendo il materiale granulare alla vibrazione prodotta da onde acustiche. Le lastre di Chladni sono dei piani sparsi di sabbia finissima sottoposti alle vibrazioni sonore, per esempio, di un arco di violino. Il fisico descrisse il comportamento della sabbia in funzione della frequenza del suono a cui è sottoposta la lastra. La sabbia difatti si disponeva dove le vibrazioni erano maggiori creando delle singolari figure geometriche simmetriche. Ovvero, una volta emesso il suono, si disponeva nelle zone di vibrazione nulle chiamate linee nodali.

Tra i sistemi aggregati presenti in natura, la neve e quindi il cristallo di cui è composta rappresenta un altro significativo modello della combinazione ordine-caos. Nascendo da una struttura esagonale simmetricamente radiale, il processo caotico che genera il cri-

Il sistema aggregato neve



^ Processo di movimentazione delle dune

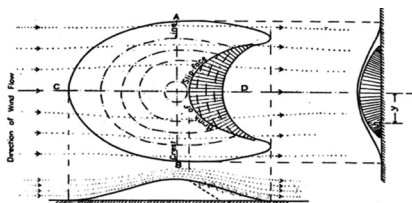
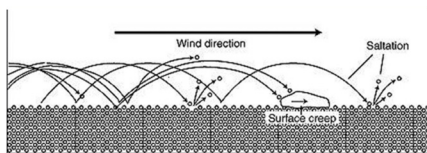


FIG. 73.—THE BARCHAN DUNE. APPROXIMATE WIND DISTRIBUTION, AND POSITION OF THE SLIP-FACE

^ Immagini da Bagnold R.A., (1954), *The physics of blown sand and desert dunes*, Londra: Methuen

<sup>6</sup> Finzi Vita, S.F. (2010) *Pile di sabbia e dune del deserto: materia granulare e matematica*, in *Matematica e cultura 2010*, Milano: Springer, p. 157.

stallo di neve determina una tale diversità di combinazioni che non ne esistono in natura uguali l'uno all'altro. Si ricorda quanto scritto precedentemente sulla simmetria esagonale dei favi delle api. Ovvero, generati sempre a partire da una piastra o da un prisma dalla forma esagonale i cui angoli interni misurano ognuno  $120^\circ$ , da un sistema quindi simmetrico e ordinato, al variare delle condizioni di temperatura umidità e pressione inizia un processo caotico, non prevedibile che porta alla formazione di cristalli nuovamente simmetrici. Ovvero, a partire da una forma regolare e simmetrica specifiche condizioni iniziali per cristallizzazione progressiva danno vita a una varietà infinita di conformazioni di cristalli di neve mai uguali gli uni agli altri. Osservandone la geometria emergono delle ulteriori costanti. Possiedono sei simmetrie di riflessione, tre riguardanti gli assi che uniscono i vertici opposti e tre riguardanti gli angoli tra gli assi e la linea che congiunge il vertice al punto medio dell'asse adiacente. Mentre la sabbia è l'aggregazione di forme di grani concave e simili tra di loro, la neve nasce dall'aggregazione di forme di cristalli convesse e altamente dissimili. Tra i primi che si occuparono di documentare e descrivere la geometria dei cristalli di neve figurano Johannes Keplero che nel 1611 scrive *Strena sue de nive sexangula*<sup>7</sup>, l'astronomo Gian Domenico Cassini, il fisico e naturalista Roberto Hooke il cui lavoro è pubblicato in *Micrographia* del 1665 e più recentemente Wilson Bentley e Humpreys che nel 1931 pubblicano il volume *Snow Crystals*. Scrive Keplero,

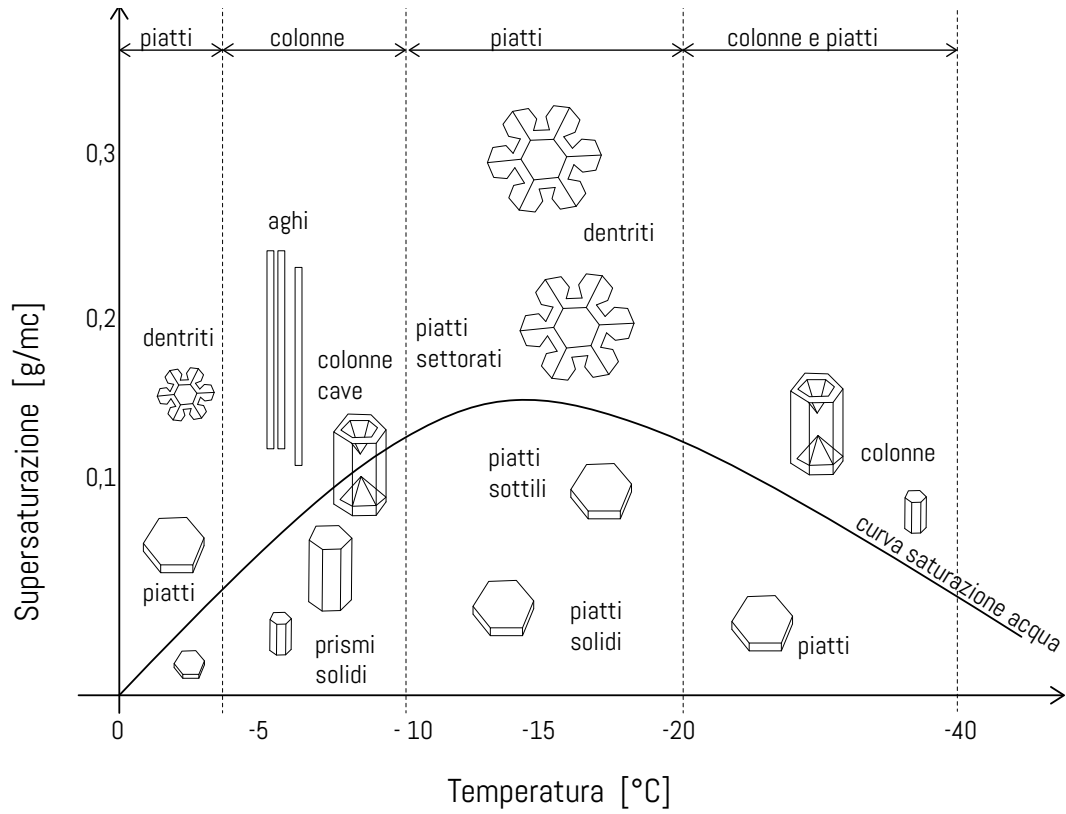
«Deve esistere una causa precisa per la quale ogni qual volta comincia a cadere la neve, le sue formazioni iniziali presentano invariabilmente la forma di una stellina a sei

<sup>7</sup> Kepler, J. (1611), *Strena seu de nive sexangula*, UK: Createspace Independent, 2014.



^ Cristallo di neve dalla forma dendrite su [www.caitolmezzo.it](http://www.caitolmezzo.it)

I sistemi aggregati\_lo stato dell'arte

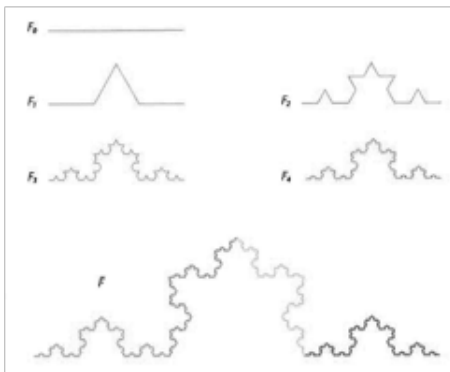


^ Classificazione dei cristalli di neve

punte. Se ciò accade per caso perché, infatti, perché non ne cadono anche a cinque, o a sette, punte? Perché sempre a sei, a patto che non si scompiglino e si aggrovino in masse per accumulazione irregolare, ma continuino a rimanere sparse e diffuse?»<sup>8</sup>.

Il cristallo di neve si sviluppa quando negli strati alti dell'atmosfera una piccolissima quantità di vapore acqueo in cui le particelle d'acqua hanno dimensioni di millesimi di millimetro congela attorno a un granello di particelle di pulviscolo, dando origine a un nucleo cristallino. Man mano che il cristallo scende attraverso gli strati dell'atmosfera incontrando altre molecole di acqua lungo il percorso, ne aumenterà il nucleo e in talune condizioni di temperatura e umidità inizierà ad allungarsi in prossimità dei vertici dell'esagono per formare le caratteristiche ramificazioni. In particolare, a valori di umidità inferiori corrisponderanno forme più semplici, a valori maggiori forme maggiormente strutturate e ramificate. La forma più semplice che si sviluppa a una temperatura di congelamento tra 0 e -3 °C con sovraturazione inferiore al 30% è la lamina esagonale. Superata questa soglia avviene la biforcazione, la catastrofe, il cigno nero e iniziano a svilupparsi le punte. Tale instabilità è nota con il nome di Mullins-Saenger. L'IACS acronimo di International Association of Cryospheric Sciences ha classificato il sistema aggregato della neve in funzione della forma e della dimensione dei cristalli di ghiaccio.

Volendo effettuare un parallelismo con il mondo dei frattali la già citata curva di Koch è tra i frattali quella che geometricamente meglio descrive in maniera astratta il cristallo di neve. Per generare la curva di Koch si procede dividendo un segmento di lunghezza  $l$  in tre segmenti uguali. Una volta creati i tre segmenti, si procede con l'eli-



^ Frattale\_isola di Koch

<sup>8</sup> *Ibidem.*

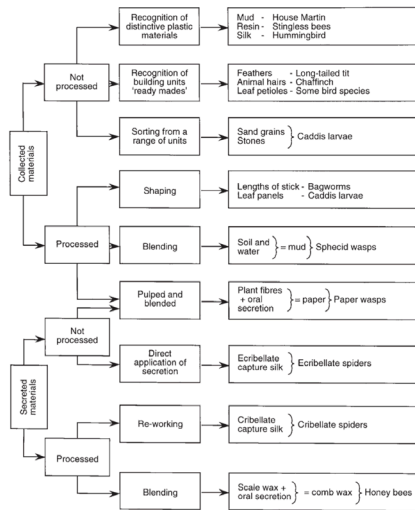


sione di quello centrale, sostituendolo con due segmenti uguali, lati di un triangolo equilatero. Ripetendo questi tre passaggi per ognuno dei segmenti ottenuti si ricava il frattale. Helge Von Koch scoprì tale iterazione nel 1904, ossia ben prima che Mandelbrot definisse il frattale come ente geometrico. Volendo definire la dimensione di tale frattale, applicando la precedente formula si ha un risultato opposto al caso della 'polvere di Cantor'.

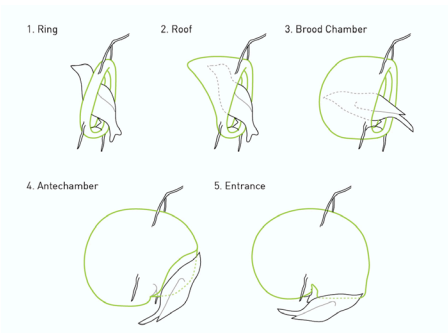
$$D = -\frac{\log N}{\log \epsilon} = \frac{\log 4}{\log 3} = 1.26186\dots$$

La dimensione di tale frattale è maggiore della dimensione euclidea unitaria. Ciò significa che la lunghezza complessiva tenderà sempre ad aumentare aumentando la scala di osservazione.

Neve e dune, rappresentano a livello macroscopico esempi di sistemi aggregati auto-organizzati composti dall'aggregazione di componenti elementari. Difatti, a livello microscopico, tutto ciò che compone la materia è aggregazione di particelle elementari, anche se invisibili all'occhio umano. Già a partire dal filosofo greco Democrito si conosceva la natura non continua della materia. Ipotizzando inizialmente fosse l'unità più piccola e indivisibile si scoprì a partire da Dalton, Rutherford e Bohr che l'atomo è formato da particelle ancora più piccole, gli elettroni e quindi i quanta di energia. Lo stato solido è quello in cui le particelle occupano una determinata posizione nello spazio, possiedono un reticolo, un sistema ordinato. Lo stato liquido è di parziale disordine. Il gas di un grado disordine maggiore. Vi sono poi stati della materia ai margini del caos. I solidi amorfi sono quelli per cui non è possibile rilevare per esempio la periodicità di un dato sistema. È possibile trovare molecole come il biossido di Silicio o il carbonio che aggregandosi assumono una configurazione



^Immagini da Hansel, M. (2005), *Animal architecture*, New-York: Oxford University press



^Immagini da Menges, A et al., (2016), *Robotic Softness*, in ACADIA 2016

ordinata o una disordinata determinando naturalmente le caratteristiche della materia che andranno a formare. Così il biossido di silicio diviene quarzo, solido cristallino, o vetro solido amorfo possedendo una struttura cristallina aleatoria, per cui a lungo raggio non è possibile rilevare la periodicità della disposizione degli atomi. Il carbonio presenta strutture cristalline diverse, forme di aggregazione che conferiscono alla materia proprietà differenti, definiti allotropi. Il carbonio amorfo, per esempio, ha le stesse caratteristiche di durezza del diamante, il suo corrispettivo ordinato, ma presenta una struttura estremamente disordinata.

Tra i sistemi presenti in natura da cui il presente progetto di ricerca ha trovato ispirazione per la definizione della forma complessiva del sistema e del modello aggregativo, figurano anche i nidi degli uccelli. La motivazione che spinge gli animali a costruire il proprio nido, è la sopravvivenza dei propri piccoli. Ciò che accomuna la maggior parte dei nidi è il processo realizzativo. Muovendosi tra caos e ordine, tali sistemi sono così fatti per ragioni specifiche. Per migliorare la stabilità dell'aggregato spesso costruito a secco, per determinare la forma dello spazio da fruire, per ottenere la minor quantità di energia da disperdere, come se gli uccelli fossero gli architetti della propria dimora. Lo strumento per la costruzione, il becco. La tecnica più diffusa è quella dell'intreccio e procedendo per strati successivi è una tecnica piuttosto ripetitiva. Secondo differenti studi<sup>9</sup> la capacità costruttiva di ogni specie di uccello è qualcosa di innato. Eppure, anche l'apprendimento diviene essenziale. Ne è la dimostrazione che l'evoluzione delle specie ha portato alla costruzione di nidi sempre più stabili e che coppie anziane di uccelli hanno capacità costruttive migliori rispetto ai giovani della stessa specie. Il processo realizzativo

<sup>9</sup> Gould, J-L. e Gould C. (2007), *Animal Architects*, New York: Basic Books, pp. 147-220.

I sistemi aggregati\_lo stato dell'arte



**Nido di Rondine**



**Nido di Tailorbird**



**Nido di Tordo fornaio**



**Nido di Corvo**



**Nido di Pettiroso**



**Nido di Cicogna**



**Nido di Gazza**



**Nido di Cannaiola**



**Nido di Colibrì**



**Nido di Cormorano**

prevede, una volta scelto il sito, la raccolta del materiale. Il principio costruttivo si basa sulla stratificazione a secco di elementi di dimensioni uniformi. Ovvero, gli uccelli costruiscono il proprio nido scegliendo principalmente di aggiungere ramoscelli per strati successivi. Come suggerito da James e Carol Gould<sup>10</sup>, solo il 5% delle specie di uccelli impiegano anche del fango nella costruzione del nido. Una volta scelti gli elementi in situ, i ramoscelli con cui costruire il nido, di dimensioni e forme simili con parecchie rugosità e parti pungenti, procedono alla realizzazione delle pareti su una piattaforma, facendo cadere il materiale dal becco. Posizionato il primo strato di ramoscelli, i singoli elementi sono spostati in modo da creare un miglior intreccio. La forza che agisce è unicamente l'attrito e l'incastro. Andando avanti con la costruzione, l'uccello si posiziona all'interno del nido per creare la cavità, ruotando all'interno per dimensionarne lo spazio. I ramoscelli alla base saranno più spessi, ramoscelli più fini sono scelti e posizionati per ultimo. Tra le specie più evolute e mature, la scelta dei rami, legata al luogo dove si è scelto di nidificare, avviene per dimensioni in lunghezza e spessore, uniformità e presenza di asperità. Sono diverse le tecniche impiegate per la costruzione del proprio nido. Alcune specie sfruttano cavità naturali a terra, altre costruiscono nidi aerei su alberi, tralici o manufatti architettonici come i campanili delle chiese.

<sup>10</sup> *Ibidem.*

### **Sistemi aggregati in architettura\_classificazione e metodo di aggregazione**

Nel campo delle costruzioni i sistemi granulari aggregati sono già largamente impiegati. Sono utilizzati come materiali termoisolanti; come stampo per il montaggio di parti; nella geo-ingegneria; per trasportare carichi, o per la realizzazione dei muri - si veda la *Domus winery* di Herzog e De Meuron. Nel campo della fisica del suono, essendo i sistemi granulari altamente porosi, divengono ottimi assorbitori acustici. Nel campo della statica delle costruzioni, sono in grado di dissipare onde d'urto, e in questo assumono le proprietà dei liquidi. Considerando il sistema aggregato al pari di un materiale fluido si interviene sulla forma complessiva tramite il versamento all'interno di una membrana esterna o interna che possa racchiudere le particelle di cui è costituito, come fosse la cassaforma per il getto di un calcestruzzo. L'intento è quello di garantire che non vi sia altro spazio per un riordino tra le particelle, ossia per il riarrangiamento, una volta che l'involucro esterno e/o interno sia stato eliminato. Come si è precedentemente scritto, all'interno di tale ricerca si è scelto di indagare esclusivamente i sistemi aggregati che lavorassero per attrito o per incastro quindi a contatto libero per prediligere, nel momento della sperimentazione, la morfologia dell'aggregazione e non la modalità di aggregazione. È stato strutturato un confronto tra i sistemi aggregati che possiedono una configurazione ordinata di cui è stato possibile quindi individuarne una matrice e quelli liberi, stocastici.

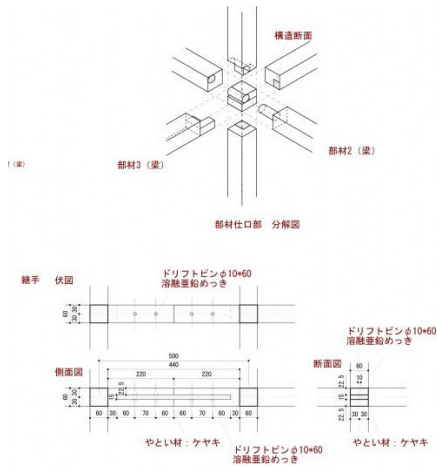
Esempi in architettura di sistemi aggregati strutturalmente ordinati, sono quelli definiti da Kengo Kuma quando 'particellizza' il materiale in componenti elementari. Ossia quando utilizza la già menzionata tecnica del *chidori* per creare un sistema aggregato costituito da bastoncini di legno sapientemente incastrati, attraverso giunti

dettagliati e ripetizioni modulari. Tra le ricerche sui materiali e sui sistemi costruttivi condotte dall'architetto giapponese vi è anche lo studio e la sperimentazione di sistemi costruttivi che portano a esiti formali e soluzioni strutturali differenti, pur pensati reinterprestando lo stesso elemento costruttivo o l'astrazione dello stesso materiale.

Nel *GC Prosth Museum Research Center* di Kasugai-shi, nello *Starbucks Coffee* di Fukuoka del 2008, nel *Yusuhara Wooden Bridge Museum* in Yusuhara del 2011 e nel *SunnyHills cake shop* di Tokyo del 2013 l'elemento ligneo è ingrandito o accorciato, allungato o ristretto e la trama deformata, pur mantenendo l'identica matrice. La tecnica del *chidori* è stata impiegata in maniera differente perchè rappresenta un sistema costruttivo aggregato, una struttura reticolare ordinata che permette di smaterializzare l'architettura, di reiterare lo spazio, in maniera differente. E ancora, la medesima permeabilità è analogamente ottenuta nel *Padiglione Giapponese* progettato in occasione della Biennale di Venezia del 1995, nel *Noh stage in the forest* in Miyagi del 1996 e nella *Forest/Floor house* in Karuizawa del 2003, con un evidente rimando alla *Farnsworth house* dell'architetto Mies van der Rohe.

I sistemi aggregati liberi, stocastici, sono quelli per cui invece non è possibile definirne una matrice. Volendo indicare i vantaggi dei sistemi aggregati liberi nella progettazione, questi riguardano:

- il carattere stabile caratterizzante un materiale solido
- la rapida ricostituzione di un fluido
- la possibilità di realizzazione di strutture facilmente riconfigurabili e smontabili. Motivo per cui si lavorano a secco, progettando la geometria e il sistema di aggregazione delle singole particelle
- la possibilità di realizzazione di strutture leggere e riciclabili



^ Chidori



^ Kuma, K., *GC Prosth Museum Research Center* del 2010, Kasugai-shi, Giappone

## I sistemi aggregati\_lo stato dell'arte

Tuttavia, il sistema aggregato, essendo un sistema complesso ai margini tra ordine e caos, pone la questione del rapporto tra forma e proprietà delle particelle nel momento in cui vi è la formazione dell'aggregato. Analizzando lo stato dell'arte, sono stati studiati sia sistemi in cui l'aggregazione era stata coadiuvata dall'impiego di materiali di confinamento e stringhe di diverso materiale, che sistemi aggregati in cui non vi era la presenza di elementi di rinforzo, tali per cui il solo incastro o attrito tra le particelle, di voluta geometria, potesse renderli resistenti alle sollecitazioni esterne.

Pertanto, è stata eseguita una classificazione tenendo conto delle caratteristiche e delle condizioni a contorno.

Classificazione del sistema aggregato in funzione della presenza del confinamento:

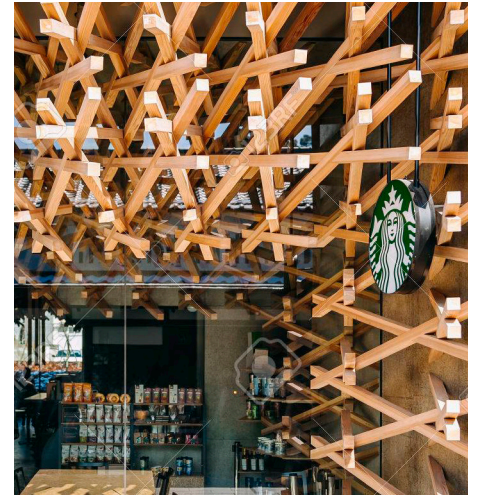
- con confinamento
- con stringhe interne per aumentarne la trazione
- senza confinamento

Classificazione del sistema aggregato in funzione dei materiali impiegati:

- aggregati naturali
- aggregati artificiali
- aggregati costituiti da materiali programmabili\_ i materiali programmabili sono quelli che riescono a cambiare le proprie proprietà fisiche elaborando informazioni esterne, sia ambientali che digitali

Classificazione della singola particella in funzione della geometria

- particella convessa\_ in generale un sistema convesso è tale



^ Kuma, K. *Starbucks Coffee* del 2008, Fukuoka, Giappone



^ Kuma, K. *Sunny Hills cake shop* del 2013, Tokyo, Giappone



^ Kuma, K. \_Yusuhara Wooden Bridge Museum del 2011, Yusuhara, Giappone



^ Kuma, K. \_Meditation house del 2018, Krün, Germania

per cui per ogni coppia di punti, il segmento che li congiunge è interamente contenuto nella forma stessa. Sono convesse quindi le sfere, i solidi platonici, i convessi poliedrici e i bastoncini. L'aggregazione con particelle convesse, soprattutto se dalla forma sferica, comporta un sistema molto fluido

■ particella non convessa\_ un sistema non convesso è tale per cui per ogni coppia di punti, il segmento che li congiunge non è interamente contenuto nella forma stessa. In questo caso, il sistema aggregato è poco fluido e l'angolo di riposo può arrivare fino a novanta gradi. Lavorano bene a compressione e poco a trazione

■ particella doppiamente non-convessa, è quella per cui si generano degli uncini e per tale ragione sono difficilmente smontabili. Lavorano bene a compressione e a trazione

Classificazione della singola particella in funzione dell'interazione con l'ambiente

■ particelle non attuatrici\_hanno delle proprietà intrinseche costanti e non variabili rispetto agli input che provengono l'ambiente

■ particelle attuatrici\_hanno proprietà tali per cui il materiale risponde a determinate caratteristiche del sistema come l'umidità o il calore

Inoltre, i parametri che hanno guidato l'indagine dello stato dell'arte sono stati la stabilità del sistema aggregato, intesa come la capacità di mantenere lo stato di aggregazione e la densità, ovvero il rapporto tra la parte solida e il volume dell'aggregato. Tali parametri si è visto, dipendono da fattori quali:

■ forma delle particelle



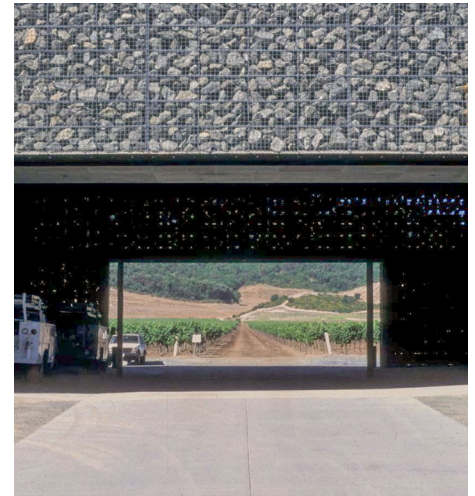
## I sistemi aggregati\_lo stato dell'arte

- deformabilità delle particelle
- forza di attrito interparticellare

Gli studi mostrano che si ha una buona ottimizzazione utilizzando forme convesse o materiali flessibili tali per cui possano divenire forme concave. La concavità, tuttavia, consente l'incastro e aumenta la densità, ma ne diminuisce la porosità.

Tra i sistemi aggregati liberi con confinamento vi sono quelli realizzati racchiudendo il materiale granulare all'interno di una membrana non porosa e creando, in taluni casi, il vuoto all'interno. Tale tecnica è applicata per raggiungere una grande pressione di confinamento, tale da bloccare il riarrangiamento del materiale. Il materiale dall'essere altamente malleabile diviene altamente rigido. Attraverso questa tecnica è stato progettato il ponte velocemente dispiegabile da **Ulrich Knaack** presso l'università di Delft. È un esempio in cui le proprietà dei sistemi granulari sono unite alle proprietà restituite dalla tecnica del sottovuoto. Sistemi aggregati con confinamento sono anche quelli ideati da **Herzog e De Meuron** per la realizzazione della cantina *Dominus* in Napa Valley, CA, nel 1998. Il materiale roccioso è versato all'interno di gabbioni in metallo, una configurazione disordinata è posta all'interno di una struttura antitetivamente ordinata.

Il processo di aggregazione della neve, si è detto, avviene per formazione di cristalli che partendo comunemente da una base esagonale, sotto determinate condizioni di temperatura, umidità e pressione, crescono seguendo la forma di bracci ramificati, secondo una crescita dendritica. L'artista giapponese Tokujin Yoshioka ha realizzato nel 2014, all'interno di una mostra dal titolo 'Crystallize' presso il museo di arte contemporanea di Tokyo, una sedia cristallizzata attraverso l'aggregazione di cristalli ghiaccio attorno a un sistema di 'ragnatele'. Quando invece si decide di impiegare i sistemi aggregati



^ Herzog e De Meuron, *Cantina Dominus* del 1998, Napa Valley, CA.



^ Tokujin Yoshioka, *Crystallize* del 2014, Tokyo.



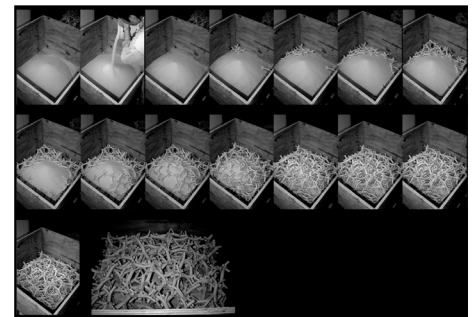
^ Lo stato dell'arte

senza il confinamento o senza stringhe che ne aumentino la trazione, è necessario intervenire sulla geometria della particella favorendo l'incastro o l'aggrovigliamento tra le particelle.

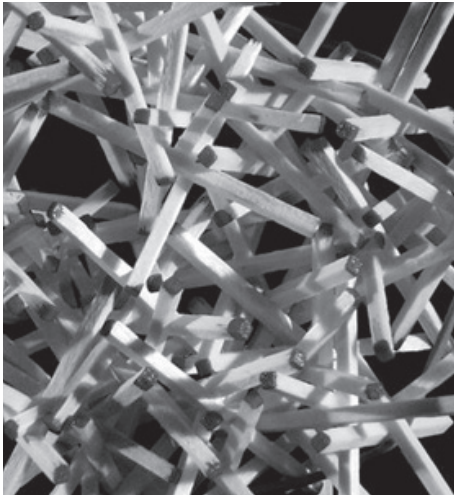
È il caso dell'esperimento condotto nel 1996, dallo studente **Kentaro Tsubaki**<sup>11</sup> per la propria tesi di laurea presso la Cranbrook Academy of Art. Egli studiò un sistema di particelle altamente non convesse realizzate in materiale ceramico, versate casualmente.

La geometria di base dell'unità è rappresentata dall'unione di due tetraedri, ramificati all'estremità. Tali ramificazioni permisero il migliore incastro, la parte longitudinale la possibilità di estendere la lunghezza della singola particella. Mille di tali unità sono state prodotte in un tempo pari a un mese circa. Il materiale è il gres, il processo produttivo l'estrusione. Ovvero, una matrice esagonale di circa 7,5 cm è stata estrusa e successivamente le estremità divise in tre ramificazioni. L'asciugatura è avvenuta per circa due ore e quindi la cottura in forno. Il sistema aggregato è stato così formato versando prima all'interno di una scatola di compensato della sabbia, poi i singoli elementi. Versate tutte le componenti, una volta assestato il sistema, è stata fatta drenare la sabbia e quindi, attivato l'incastro, il sistema aggregato ha assunto una forma a cupola. Per l'installazione al *Cranbrook Art Museum*, in Michigan tale sistema è stato impiegato per realizzare una copertura a cupola che rispondesse a qualità materiche, che fosse filtro, che divenisse trama, che creasse opposizioni tra luce e ombra. Alla base si è cercato una configurazione delle singole componenti più ordinata, in sommità maggiormente casuale. Della sabbia è stata impiegata alla base per aumentarne l'attrito.

<sup>11</sup> Tsubaki, K. (2012), *Tumbling Units: Tectonics of Indeterminate Extension in Border*, G.P. e Meredith, M. (2012), *Matter: Material Processes in Architectural Production*, Oxon: Routledge, pp. 187-204.



^Kentaro Tsubaki, *Tumbling unit*, 1996



^Eiichi Matsuda\_*Designd particles aggregations*, 2004



^Anne Hawkins e Cathlyn Newell\_*GPA studio*, 2004

Nel 2003-2004, **Achim Menges e Michael Hensel** durante la loro esperienza all'Architectural Association (AA) di Londra, iniziarono la loro ricerca coi sistemi aggregati liberi. Dapprima studiarono le lastre di Chladni e i relativi parametri variabili per diversi materiali e per diversi tipi di onde sonore. Menges e Hensel condussero gli esperimenti, sia mantenendo le stesse condizioni a contorno che cambiando il materiale granulare che viceversa mantenendo il materiale e cambiando i parametri esterni. Il parametro preso in considerazione fu la frequenza eccitante. Cambiando la frequenza cambiava la distribuzione. Sempre a Londra, in quegli anni sono di particolare rilievo le ricerche condotte presso l'Architectural Association da **Eiichi Matsuda**. Durante tali sperimentazioni, fu realizzato un sistema aggregato realizzato tramite un sistema di bastoncini in legno di diverse geometrie, diecimila elementi triassiali. Tali bastoncini sono stati versati manualmente all'interno di una scatola di vetro di dimensioni tali da poter essere oggetto della scansione.

Descrizione dell'esperimento e del metodo applicato:

Una volta ultimato il versamento è stata effettuata sul sistema aggregato una 'radiografia' con un flatbed scanner 3D per studiare i seguenti parametri:

- numero e geometria degli elementi
- velocità di versamento
- altezza e larghezza del versamento
- angolo di attrito
- contatto tra le particelle
- densità e numero delle stesse cadute, una volta rimossa la scatola

Così sono stati mappati attraverso diagramma la densità, la poro-

sità e la distribuzione delle particelle in funzione di velocità di versamento, di quantità di elementi versati, di altezza e larghezza del versamento e di grado di attrito. Successivamente è stato ripetuto l'esperimento, introducendo prima del versamento delle particelle, un paio di elementi pneumatici che fungessero da casseforme interne. Quindi, effettuato il versamento all'interno della scatola in vetro, rimossi gli elementi pneumatici, è stata analizzata tale nuova configurazione ripetendo le osservazioni precedentemente effettuate.

Nel 2004, **Anne Hawkins e Cathlyn Newell**, presso la Rice University, Houston, Texas si occuparono di GPA Studio. In questo caso è stata posta particolare attenzione alla geometria e alla velocità e al tempo di versamento. Le forme realizzate sono state quelle della colonna, dell'arco e della volta.

Nel 2014 presso l'università di Tokyo è stato realizzato da un gruppo di studenti del **DFL/Advanced Design Studies**, il padiglione STIK - Smart Tool Integrated Konstruktion. Si tratta di un padiglione realizzato con bastoncini di legno di cedro giapponese imbevuti, in parte, di colla. Sebbene non si tratti quindi di sistema propriamente a secco, è stato interessante aver studiato tale padiglione per il processo progettuale e costruttivo che lo ha generato e per il sistema di controllo del *global design*. Il momento iniziale ha riguardato l'individuazione del sito e la definizione parametrica della forma del padiglione. Si è scelto l'utilizzo di bastoncini di legno di cedro *waribashi*. L'attività di progettazione, gestione, realizzazione e controllo è stata divisa tra diversi gruppi di lavoro, che si occupavano nello specifico:

- della creazione di un dispositivo meccanico ideato appositamente con la funzione di versare, in maniera controllata, i bastoncini di legno nella posizione voluta e di insufflarli di colla



^Kengo Kuma\_ GC Prostho Museum Research center, 2010



^ICD\_Aggregates pavilion, 2015



^DFL\_STIK pavilion, 2014

- del controllo del *global design* attraverso l'utilizzo del software Rhinoceros, del plug-in Grasshopper e dello script Python. Trattandosi di geometria discreta, è stata controllata la struttura in termini digitali
- del controllo del *global design* in termini sperimentali, attraverso lo strumento FARO 3D scanner. Ossia è stata controllata la mappatura dei vari elementi di cui era costituito il padiglione in fase di progettazione e realizzazione
- del controllo del *global design* in termini sperimentali attraverso SCANNER KINECT di MICROSOFT
- della verifica attraverso prove di compressione e flessione in laboratorio

Gli studenti, in fase di progettazione, hanno deciso di dividere la forma del padiglione in singoli pannelli appositamente numerati, creando un sistema di gestione del progetto e di montaggio *in situ* più veloce. Questa scelta, se da un lato ha comportato la standardizzazione del processo e quindi la semplificazione in fase di progettazione, gestione, realizzazione e controllo, dall'altro ha implicato la risoluzione di diverse problematiche come per esempio, la progettazione della modalità di connessione tra i singoli pannelli. L'aver diviso la geometria del padiglione in pannelli singoli, ha facilitato lo studio del sistema costruttivo essendo questo discretizzato in parti. Si è potuto così studiare la geometria, la posizione e l'inclinazione di ogni pannello. Ogni informazione è stata verificata sia in ambiente digitale che sperimentale.

Descrizione dell'esperimento e del metodo applicato:

- definizione della forma del padiglione attraverso software Rhinoceros, del plug-in Grasshopper
- suddivisione della geometria della forma in pannelli, con con-



seguinte loro numerazione, indicazione e descrizione di geometria, inclinazione, dimensione e posizionamento

■ definizione di una area di scansione nello spazio reale, utile al posizionamento di pannelli generati 'virtualmente' all'interno di suddetto spazio di scansione

■ definizione, per ogni pannello, di un numero di Voxel sufficiente a definirne la geometria. Ogni Voxel è stato scelto di 50 mm di dimensione. Il Voxel è l'unità elementare dell'informazione di volume in tre dimensioni

■ creazione, attraverso Python script, del file di testo per individuare la posizione di ogni Voxel. Con il numero 0 si indicava l'assenza di Voxel, con il numero 1 la posizione nello spazio

■ calibrazione del proiettore SCANNER KINECT settando la posizione nello spazio reale di ogni angolo dell'area di scansione prima di procedere alla simulazione virtuale del pannello nella realtà

■ simulazione del pannello 'virtuale' nello spazio reale attraverso il proiettore SCANNER KINECT

■ simulazione dei Voxel all'interno del pannello e dell'area di scansione così da controllarne parametri quali altezza, larghezza, angolo di inclinazione del pannello. È stata effettuata sia una scansione verticale, che orizzontale. Tale scansione, come fosse la creazione di un ologramma poteva essere poi confrontata con l'oggetto reale

■ realizzazione dei pannelli-cassaforma grazie all'utilizzo del proiettore SCANNER KINECT. Il proiettore sulla base dei colori proiettati sul pannello era in grado di controllarne la giusta posizione, forma, inclinazione e dimensione

■ versamento dei bastoncini imbevuti precedentemente di colla attraverso l'ausilio del dispositivo meccanico appositamente

ideato

- posizionamento del pannello reale, all'interno dell'area di scansione per verificarne la corretta esecuzione, analogamente a quanto fatto per la fase di realizzazione
- prove di laboratorio su pannelli presi a campione
- realizzazione del padiglione attraverso l'unione in situ dei diversi pannelli

Durante la fase di realizzazione, certi che il sistema avrebbe resistito a compressione, meno a trazione, essendo il padiglione di pubblica utilità, si è deciso di inserire sette cavi di acciaio di forma anulare, incorporati al centro della struttura per garantirne la resistenza. Inoltre, questi cavi sono serviti da guida per il montaggio dei pannelli. La maggior parte delle prove è stata condotta in laboratorio con la realizzazione di un modello in scala 1:1 di parti del padiglione.

Nel 2015 **Gramazio Kohler** ricercatore presso l'ETH di Zurigo e il Self-Assembly Lab al Massachusetts Institute of Technology<sup>12</sup> effettua una serie di esperimenti sui materiali granulari liberi. L'idea è quella di unire al materiale granulare, costituito da aggregati naturali convessi, delle stringhe per fornire una maggiore resistenza a trazione. Sono stati condotti esperimenti sulle diverse stringhe e sui diversi materiali. Durante questi esperimenti, è stato studiato il comportamento di una serie di materiali granulari, all'interno di un sistema cilindro-pistone. Il cilindro di raggio di base 75 cm e altezza pari a 100 cm. Il pistone permetteva di applicare un peso pari a 100 Kg. In ognuno dei cilindri è stato versato materiale con grani di due dimensioni diverse. A ogni strato sono state applicate catene metalliche, viti, barre di ferro e miscele con lo scopo di contribuire all'ag-

<sup>12</sup> Aejmelaeus-Lindström, P., Willmann, J., Tibbits, S., Gramazio, F. e Kohler, M. (2016),

## I sistemi aggregati\_lo stato dell'arte

gregazione quando compresse. Successivamente, lo stampo è stato rimosso. Il risultato è stato quello di avere sulla colonna composta da piccoli grani un comportamento simile a un solido sotto carico assiale. Le strutture maggiormente resistenti erano quelle con una condizione a contorno migliore o con particelle più resistenti, come le rocce. Il rinforzo tessile è stato aggiunto sia nella sezione trasversale, alternandolo quindi ai grani, che esternamente in maniera circolare. Quando il versamento dei grani è stato controllato tramite dispositivo robotico, affinché potesse essere reiterato, sono stati impiegati tre metodi di fabbricazione:

■ il primo è stato denominato *Rock printing*\_ simile a un modello computazionale di stampa 3D, in cui ogni elemento, la posizione dei grani e quello della corda, è stato automaticamente controllato. Si procede strato per strato alla definizione del sistema cilindrico. Togliendo poi la cassaforma, sono stati scartati i pezzi non tenuti insieme dalla corda. Lo scopo di tale esperimento riguardava lo studio sul rinforzo tessile. Questo metodo è utile per la realizzazione di modelli circolari con raggio piccolo e ha il limite di dipendere dallo spazio di 'stampa'. Non è adatto a sezioni quadrate perché per funzionare le corde vanno mantenute in tensione

■ Il secondo metodo è denominato *Slip casting*\_ sono stati impiegati stampi in cui venivano gettate le pietre e le corde. Si procedeva anche qui per strati successivi. La differenza rispetto al precedente metodo riguardava lo stampo. Quello cilindrico è stato sostituito da uno conico. Anche questo metodo, poiché



^Gramazio & Kohler\_*Rock printing*, 2015



^Gramazio & Kohler\_*Rock printing*, 2015

*Jammed architectural structures: towards large-scale reversible construction in «Granular Matter» (2016) 18:28.*

simile a quello precedente non è risultato utile per sezioni quadrate.

■ Il terzo metodo ha riguardato la fabbricazione multi-robotica\_ tale metodo è stato definito per poter applicare i procedimenti precedenti a strutture più grandi. All'inizio sono state create colonne verticali, poi si è proseguito con la realizzazione di quelle inclinate. Queste sono quindi servite alla realizzazione di muri, pensati come l'aggregazione di differenti colonne inclinate, in modo che ogni getto fosse in parte su quello precedente e si procedesse così alla realizzazione del muro. Poi queste sono divenute strutture a colonna, inclinate e dalla sezione ellissoidale, col fine di aumentarne la stabilità e avanzare con maggiore sovrapposizione. Così è stato creato un muro di dimensione  $141,5 \times 34,5 \times 13,7$  cm, con un rapporto di snellezza locale di 1:4. Il materiale utilizzato era costituito da aggregati con granulometria 5-15 mm con spigoli vivi e elevata resistenza d'attrito e corda di poliestere di 3 mm di Bächli-Cord mescolata con fibre tessili riciclate. Lo spessore ottimale della corda è stato stimato pari alla dimensione media degli aggregati. Nel caso specifico è stata considerata pari a 10 mm. Corde più rigide incidono favorevolmente sulla resistenza dell'aggregato.

È del 2016 il progetto Z-Form nato dalla collaborazione tra un gruppo di fisici del JaegerLab dell'Università di Chicago - tra cui i dottorandi **Kieran Murphy e Leah Roth** e il professore **Heinrich Jaeger** e l'artista **Dan Peterman**. Dapprima è stata definita la geometria della particella e si è scelto di utilizzare una forma a Z, inizialmente planare. In seguito alle sperimentazioni condotte su questa geometria è emerso che è una delle poche forme che, una volta raggiunta

## I sistemi aggregati\_lo stato dell'arte

la stabilità, riesce a sopportare anche carichi esterni oltre al peso proprio. Le particelle sono state ricavate da assi di plastica riciclata PET, riscaldate in modo da essere poi attorcigliate e ricavarne una forma non piana. Le particelle sono state quindi versate in uno stampo cilindrico, pressate e così fino a completamento. Tolto lo stampo, il materiale 'fluidò' è divenuto 'solido', le particelle che si trovavano in uno stato disordinato hanno raggiunto una configurazione ordinata, analogamente a quanto accade durante la cristallizzazione di un qualsiasi materiale liquido. Inizialmente, per definire la geometria della particella più appropriata, sono stati condotti degli studi su colonne di particelle aggregate dalle forme diverse - Z, U, L - con elementi a sbalzo ortogonali e su queste sono state eseguite prove di compressione mono-assiale e flessione. È emerso che l'anisotropia generata ha creato una condizione di stabilità piuttosto che di instabilità. Prima di rimuovere il confinamento il cilindro in alcuni casi è stato sottoposto a vibrazione. Lo scopo è stato quello di studiare in ambiente di laboratorio la stabilità di tali colonne utilizzando come parametri la geometria, la materia, le proporzioni, la forza coesiva. Le potenzialità dell'utilizzo di tali geometrie sono legate alla capacità di creare colonne di aggregati con angolo di riposo pari a 90 gradi. Sono state realizzate particelle di lunghezza pari a 12 volte il diametro della sezione trasversale, con un braccio perpendicolare di lunghezza pari a 6 volte il diametro. Il diametro è stato scelto pari a 1,3 mm. Sono state stampate 2.000-3.000 particelle di ciascuna forma attraverso una resina dura, Objet VeroWhite, con modulo di Young pari a  $1260 \pm 120$  MPa e sono state tagliate attraverso laser su acrilico con modulo di Young pari a 3000 MPa. Sono state realizzate circa 30.000 particelle a forma di Z con una sezione trasversale quadrata di spessore variabile, da 1,6 a 64 mm. Anche se talune particelle caddero una volta che lo stampo era stato rimosso, queste erano di



^Kieran Murphy\_Z form, 2016



^Kieran Murphy\_Z form, 2016



^Matthias Helmreich\_*Hyrogates*, 2014-2015

un numero trascurabile rispetto alla quantità totale. Cambiando la geometria del confinamento cambia la forma della macrostruttura. Possono essere utilizzati come confinamento temporaneo fogli di plastica o di tessuto.

In riferimento ai sistemi aggregati attivi sono stati analizzati tre diversi casi studio:

■ Il caso studio **Matthias Helmreich**, in occasione della tesi discussa all'ITECH di Stoccarda durante l'anno accademico 2014-2015, ha ideato un sistema di particelle, denominate, *Hyrogates*, che sfrutta le capacità igroscopiche del legno. Bastoncini di legno laminato a doppio strato dalla forma non convessa, si trasformano nel tempo, incurvandosi per il contenuto di umidità. Questa proprietà viene sfruttata in fase di realizzazione perché ne aumenta il volume. In fase di versamento è un sistema fluido con elevata densità, in fase di trasformazione del legno per l'aumento di umidità, le particelle si aggrovigliano e il sistema aumenta il suo attrito e la sua solidità. Rendendo l'ambiente secco, il bastoncino torna alla sua condizione iniziale. Gli archi sono stati creati attraverso una cassaforma pneumatica che successivamente alla stabilizzazione dell'intero sistema è stata rimossa. L'attrito tra le particelle è la forza che entra in gioco. Sono state realizzate particelle costituite da un doppio strato di legno di faggio di spessore 4 mm. A questo è stata unita una impiallacciatura di legno di abete rosso dello spessore di 0,9 mm per aumentarne la resistenza. Ogni particella è così costituita da quattro superfici di un doppio strato, fissate nel punto medio. Aumentando l'umidità questi sono diventati strati arricciati dalla geometria convessa a doppio uncino. Sono stati condotti diversi esperimenti in laboratorio per controllare il grado di umidità e per valutare il volume durante l'attuazio-

ne delle particelle, ossia quando il doppio uncino ha assunto la forma arricciata convessa. Il materiale granulare è stato versato quando gli uncini non erano ancora formati, ossia nella forma non convessa. Con particelle di tale geometria sono state analizzate pareti dritte, colonne, archi e cupole. Le particelle sono state posizionate in modo controllato attraverso l'utilizzo di dispositivi robotici.

■ Il caso studio **Alexander Wolkow**, nel 2016, presso l'ICD di Stoccarda. Durante questo studio, sono state unite due tipologie di particelle, una parte igroscopicamente attiva e un'altra costituita da aggregati non attivi. Immettere materiali igroscopicamente attivi aumenta la trazione di sistemi che altrimenti resisterebbero alla solo compressione. È stato utilizzato legno di faggio di spessore 1,5 mm combinato con uno strato resistente di impiallacciatura d'acero. Sono state ricavate bacchette di dimensioni 20 x 0,5 x 0,5 cm da legno di scarto e per gli attuatori, strisce di legno doppio strato da 1 x 30 cm con un angolo di 30 gradi rispetto al bordo del foglio. È stata misurata una umidità ambientale relativa, non controllata in laboratorio. È stato condotto l'esperimento sia per un volume di 107 cm di lunghezza, 30 cm di profondità e 50 cm di altezza, che per una lastra a sezione quadrata di 107 x 107 x 5 cm. Durante tale sperimentazione, la posizione delle particelle non è stata controllata ma lo studio è stato condotto per la definizione di parametri relativi alle percentuali in volume, alla forma e al comportamento generale.

■ Il caso studio **Domaine de Boisbuchet** a Lessac nel 2016 presso l'ICD di Stoccarda. Si tratta dello sviluppo ulteriore del primo caso introducendo l'utilizzo di un robot costituito da un braccio avente nella parte terminale una pinza. Bastoncini in legno di faggio di spessore 2,5 mm ruotati di 90 e 45 gradi, uniti con impiallacciatura di acero di 0,6 mm e trattati in modo da ottenere una buona percentua-

le di umidità. Quattro fasce unite a un nucleo non attuato in legno. La laminazione è avvenuta in laboratorio, con parametri ambientali controllati, il confezionamento in situ. Così sono state misurate umidità e temperatura con igrometro e termometro.

Tra le ricerche sviluppate presso l'ICD sui sistemi aggregati vi sono quelle condotte da **Karola Dierichs** a partire dal 2010. Tali ricerche hanno portato alla realizzazione del padiglione *Aggregates* del 2015, in cui sono stati progettati aggregati non convessi e non attuati. Lo studio ha portato alla sperimentazione della lunghezza dei bracci delle particelle non convesse ed è stata studiata l'applicazione su colonne, archi e volte. Sono state prodotte 30.000 particelle a sezione variabile. Nello specifico, 25.000 particelle non convesse, a sei braccia di materiale PA2200 e 5.000 a quattro realizzate dall'iniezione di plastiche riciclate ABS e PC. È stato studiato il volume del sistema aggregato, il peso e la densità delle particelle. L'angolo a riposo raggiunto è di 90 gradi. È stato realizzato un muro di 8 mt di lunghezza, 1 mt di larghezza e 2 mt di altezza. Per l'arco, la campata massima raggiunta è stata pari a 3 mt. I materiali foto-elastici sono stati utilizzati per rilevare la distribuzione delle linee di tensione dei materiali granulari che altrimenti sarebbero risultati invisibili. Così sono stati condotti esperimenti su colonne verticali, archi e sbalzi.

All'interno dell'articolo *Packings of 3D stars: stability and structure*<sup>13</sup> apparso sulla rivista «Granular Matter» del 2016, Yuchen Zhao, Kevin Liu, Matthew Zheng, Jonathan Barés, Karola Dierichs, Achim Menges e Robert P. Behringer descrivono una serie di esperimenti su forme cilindriche con particelle non convesse sagomate come stelle, a bracci e sezioni differenti.

<sup>13</sup> Zhao, Y. *et al.* (2016), *Packings of 3D Stars: Stability and Structure*, in «Granular Matter», 18 (24), 2016, pp 1–8.



Le particelle non convesse a forma di stella, chiamate esapodi, sono state realizzate con due materiali diversi, in acrilico con coefficiente di attrito  $0,4 \pm 0,1$  e in nylon bianco PA2200 con coefficiente di attrito  $1,0 \pm 0,3$ . Ogni stella era costituita da sei elementi ortogonali a sezione rastremata quadrata da 2 mm a 1 mm. La dimensione complessiva era tra i 2 e i 10 cm.

Gli esapodi sono stati versati uno a uno, a velocità costante e una altezza di versamento pari a 40 cm dalla piastra di appoggio, su stampi cilindrici in PVC, a basso attrito, a sezione circolare, alti 30 cm e di diametro che andava dai 2,6 cm ai 20,2 cm. La base era costituita sia da lastre di vetro a basso coefficiente di attrito 0,5 sia ad alto coefficiente di attrito se ricoperte di schiuma.

Si è proceduto versando le particelle per strati di spessore stabilito e successivamente al versamento, ogni strato è stato vibrato con un motore posto a una altezza pari a 1,5 volte il diametro del cilindro corrispondente. La velocità del motore era di circa 1700 m/s. Poi lo stampo in PVC è stato rimosso. Per ogni tipologia di esperimento la procedura è stata ripetuta 10 volte per ottenere valori medi.

Il primo esperimento è stato condotto per misurare la stabilità di base della colonna. Ossia tolto il cilindro in PVC è stata misurata la quantità di elementi distaccati. La stabilità è stata verificata anche attraverso altre due tipologie di esperimento, ovvero aggiungendo in sommità un disco di massa sia fissa che variabile, tale da fare collassare il sistema. Avendo tracciato dei riferimenti in rosso, è stato possibile quantificare l'intensità del collasso. Si è osservato che il collasso totale e improvviso è avvenuto per il distacco di pochi esapodi. È stato calcolato il rapporto di compressione  $r$

$$r = \text{massa di particelle collassate/massa totale}$$

È stata stabilita una altezza critica il cui valore è tale per cui  $r=1/2$

Sono stati condotti 7 esperimenti:

N1, esapodo acrilico di 2 cm sulla base di vetro

N2, esapodo acrilico di 2 cm sulla base di vetro, vibrato

N3, esapodo acrilico di 2 cm sulla base di schiuma ruvida

N4, esapodo nylon di 10 cm sulla base di vetro

N6 esapodo nylon di 5 cm sulla base di vetro

N7 esapodo nylon di 2,5 cm sulla base di vetro

Tra i risultati osservati vi è quello per cui l'attrito alla base non influenzava la colonna in modo significativo, a differenza della vibrazione che invece ne aumentava sensibilmente la stabilità. Inoltre, è stato osservato anche che aumentando il coefficiente di attrito tra le particelle, aumentava anche l'altezza critica indipendentemente dal diametro del cilindro.

L'altezza critica è stata definita dalla formula:

$$h_c = K(\bar{\delta} - s_0) \beta$$

dove

$\bar{\delta}$  è il diametro del cilindro

$K$  quantifica la stabilità complessiva dell'imballaggio, è maggiore per sistemi vibranti e particelle ruvide

$\beta$  quantifica l'effetto del diametro del cilindro, è minore per sistemi vibranti

$s_0$  è il minimo diametro ammissibile del cilindro

Per comprendere la maggiore stabilità dei sistemi vibranti è stata introdotta la densità globale in funzione dell'altezza e del diametro,  $\rho$  ( $h, \delta$ ), ed è stata calcolata per l'esperimento N1 e N2, ossia esapodi acrilici di 2 cm su base di vetro, uno vibrato e l'altro no. È emerso che la densità varia al variare del diametro e diviene costante all'aumentare dell'altezza. In realtà ciò è dovuto al fatto che nei bordi vi è poca densità. Rimuovendo numericamente tale errore dalla formula, ossia la quantità  $\Delta r$ , emerse che la densità è costante con valore medio pari a  $\rho = 1,6 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$  per l'esperimento N1 e pari a  $\rho = 1,7 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$  per l'esperimento N2. Il fatto che la densità può essere considerata costante ha potuto far considerare il sistema isotropico e calcolare la distanza delle particelle nel caso vibrato e non, facendo emergere un differenziale di 3,70 mm in N1 e 3,57 mm in N2.

Ulteriori esperimenti sono stati condotti unendo le particelle esapode di 2 cm con delle sfere di diametro 0,95 cm - pari alla misura del braccio - mantenendo costante il numero di particelle del sistema, ossia 2.300. La percentuale di sfere era del 6%. È stato osservato pertanto che l'inserimento delle stesse diminuiva la stabilità dell'intero aggregato considerando che impediva un migliore incastro tra i bracci. Per l'esperimento N9 il sistema è stato inclinato. Tale condizione ne ha comportato l'immediato crollo. Sono stati condotti anche altri esperimenti ed è stata realizzata una tabella con gli angoli di collasso. Osservando i dati emerge che particelle con braccia più lunghe sono più stabili, in quanto aumenta la superficie di contatto. E che inoltre, aumentando il peso, la colonna non collassava per incapacità di sopportarne il peso, ma per bassa coesione tra le particelle quando questa raggiungeva un'altezza troppo grande.

Tra i risultati ottenuti si è osservato inoltre che tramite l'aggregazione di particelle non convesse esapode è stato possibile realizzare sistemi stabili per altezze tre volte maggiori rispetto al loro

diametro e che è stato possibile aumentare l'altezza critica e quindi la stabilità:

- aumentando il diametro della base, nel caso in cui tale diametro sia simile a quello della particella
- aumentando la dimensione delle particelle, se sono significativamente più piccole del diametro del cilindro, fino a una soglia limite per cui si ottiene l'effetto opposto
- aumentando l'attrito della base
- migliorando la geometria intrinseca
- migliorando il coefficiente di attrito tra le particelle. In tali esperimenti il passaggio da 0,4 a 1 è stato difatti significativo

La destabilizzazione era avvenuta invece in seguito:

- all'aggiunta delle sfere
- all'inclinazione della colonna

Tale parte della metodologia sarà ripercorsa per averne una restituzione sperimentale del sistema aggregato scelto.

Per concludere, indagando lo stato dell'arte relativo ai dispositivi spaziali studiati, ai sistemi aggregati e al processo di progettazione e realizzazione di tali dispositivi, sono emersi diversi aspetti:

- lavorare alla progettazione e realizzazione di un padiglione permette di percorrere la sperimentazione su dispositivi emergenti rispetto ai metodi tradizionali, come lo sono i sistemi aggregati e di considerare tale progettazione momento di partenza sperimentale per architetture più complesse
- tra i sistemi aggregati liberi, quelli più densi generano strutture più resistenti a compressione, ma l'obiettivo della ricerca

è creare una struttura spaziale che sia altresì permeabile allo sguardo

■ integrare i sistemi aggregati con dispositivi esterni come corde che ne garantiscano la trazione rende la gestione della statica dell'intero sistema più semplice. L'obiettivo della ricerca sarà l'individuazione di un sistema aggregato privo di tali elementi, intervenendo sulla geometria della particella per aumentarne l'attrito e l'incastro durante la fase di aggregazione.

■ l'uso di particelle convesse in sistemi aggregati, specialmente se la forma delle particelle è sferica, implica un sistema molto fluido. Al contrario, nel caso di utilizzo di particelle non convesse, il sistema aggregato diminuisce la propria capacità di scorrere e l'angolo a riposo potrebbe arrivare fino a 90 gradi. Inoltre, se è impiegata una particella dalla forma a uncino, è generato un sistema molto aggrovigliato di cui ne risulterebbe difficile la disgregazione

■ indagare i sistemi aggregati consente di realizzare strutture leggere, riconfigurabili, smontabili e realizzabili con materiali riciclabili

■ rimane essenziale per la progettazione di dispositivi spaziali, quali sono i sistemi aggregati, il design parametrico e il computational design, inteso come strumento della progettazione al pari della realizzazione di modelli in scala che ne permettano il controllo e la verifica statica

■ la suddivisione in moduli della geometria del padiglione, emersa dallo studio del padiglione STIK, ha permesso la semplificazione del sistema di progettazione, di controllo, gestione del progetto e di realizzazione del padiglione

■ integrare la progettazione con un dispositivo robotico permette di velocizzare i tempi e avere un controllo maggiore della di-

sposizione delle singole particelle

■ utilizzare sistemi adattivi permette di creare una relazione tra l'architettura e le condizioni ambientali

■ vista la difficoltà di definizione di un modello matematico su cui poi applicare i metodi di modellazione numerica, spesso la sperimentazione è stata condotta basandosi su metodi empirici e test fisici. Attraverso la tecnica del DIGITAL IMAGING o attraverso l'uso dello SCANNER 3D, per esempio è stato possibile valutare la distribuzione di densità e la geometria delle particelle e dell'intero aggregato

■ i sistemi aggregati liberi come le sabbie sono caratterizzati da particelle convesse, assumono un comportamento molto fluido, hanno un preciso angolo a riposo e una forma geometrica conica definita dalla geometria della base di appoggio. I sistemi aggregati liberi come la neve sono costituiti da particelle dissimili, asimmetriche, non assumono una forma conica e a seconda se più o meno compattate appaiono più o meno dense. I sistemi aggregati studiati presso l'ICD sono più simili al sistema naturale della sabbia. La caratteristica è l'aggregazione tramite un sistema di incastro che sfrutta la maggior frizione tra le particelle.





^Frei Otto\_ Multihalle Mannheim, 1975

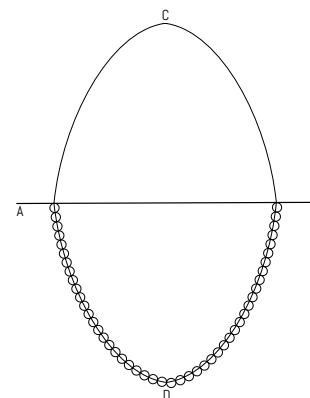


## Il modello fisico della forma La matematica sottesa

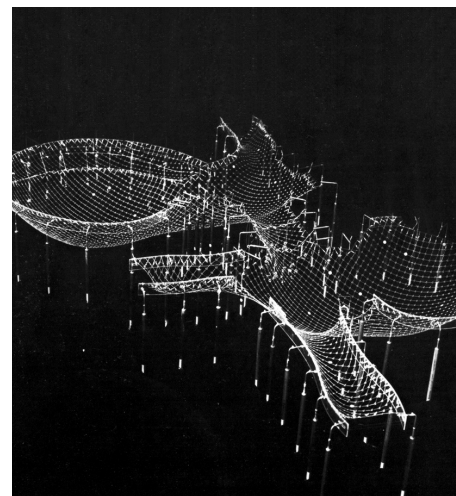
Il *Multihalle Mannheim*, in origine destinato a essere un padiglione temporaneo per l'esposizione orticola *Bundesgartenschau* che si tenne a Mannheim nel 1975, in Germania, progettato da Frei Otto, Carlfried Mutschler e Joachim Langner rappresenta a oggi una delle più estese strutture autoportanti realizzate mediante griglia lignea dalla forma a guscio [grid-shell] basata sul principio della catena sospesa. L'intera struttura si estende per 160 mt. di lunghezza massima e 115 mt. di larghezza massima; il punto più alto si trova a 20 mt. dal suolo, l'apertura più ampia è di 60 mt., la più lunga è di 85 mt. La griglia lignea, formata da elementi larghi 5,5 cm, ha un interasse di 50 cm. Quando Frei Otto pensò alla progettazione del padiglione, ponendosi come obiettivo la realizzazione di una grande copertura a servizio di uno spazio adatto a ospitare differenti eventi e quindi una spazialità che fosse affrancata da vincoli strutturali, realizzò un modello di studio basato sul principio delle catene sospese e invertite, analogo a quello realizzato dall'architetto catalano Antoni Gaudì (1852-1926) per le proprie opere nella città di Barcellona. Sia nella cappella della colonia Güell, nel parc Güell, nella casa Batlló e quindi nella Sagrada Família, la curva impiegata da Gaudì è la catenaria, una curva con l'equazione trascendente

$$y = a * \cos (x/a) = a/2 * (e^{x/a} + e^{-x/a})$$

Simile nella forma a una parabola ma non coincidente ottenuta empiricamente



^Catenaria e catenaria rovesciata



^Frei Otto\_Multihalle Mannheim, metodo delle catene funi sospese e invertite



^ Antoni Gaudì \_ Le catenarie per il progetto della Sagrada Família

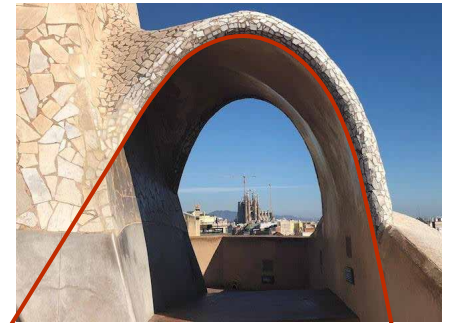
## Il modello fisico della forma \_la matematica sottesa

ricamente vincolando i due estremi di una fune omogenea, flessibile e non estensibile, affinché questa possa pendere spinta dall'azione del solo proprio peso. Gaudì realizzò il modello in scala mediante corde intrecciate a cui erano appesi sacchi di juta per simulare le forze agenti, i carichi sulle funi. Raggiunto l'equilibrio, la configurazione delle funi soggette alle sole forze di trazione, rappresentò la simulazione della struttura delle catene invertite. Ovvero, capovolgendo la configurazione geometrica delle catene, questa rappresentava la forma geometrica delle curve, che realizzate mediante conci di pietra per esempio, sarebbero state soggette alla sola forza di compressione. Analogamente, il modello sviluppato presso l'Istituto per le strutture leggere di Stoccarda, diretto dallo stesso Frei Otto dal 1964, era stato realizzato in scala mediante un sistema di funi e nodi sottoposti a diversi carichi. A differenza però del metodo di Gaudì, unicamente empirico, mediante una procedura fotogrammetrica i dati geometrici e le informazioni posizionali del modello furono impiegate e inserite nel modello di calcolo eseguito a computer per il controllo statico della struttura. Precedentemente agli studi di Antoni Gaudì e del gruppo di lavoro di Frei Otto, la forma della catenaria fu oggetto di indagine anche da parte di Galileo Galilei che nel trattato del 1638 *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e i movimenti locali*, simulando difatti un dialogo tra Salviati, il ricercatore innovatore, Simplicio, l'accademico, e Sagredo, il pragmatico, affermava:

«Fermisi ad alto due chiodi in un parete, equidistanti dall'orizzonte e tra di loro lontani il doppio della larghezza del rettangolo su 'l quale vogliamo notare la semiparabola, e da questi due chiodi penda una catenella sottile, e tanto lunga che la sua sacca si stenda quanta è la lunghezza del



^Antoni Gaudì\_Casa Milà



^Antoni Gaudì\_Parc Güell



^ Eero Saarinen\_Gateway Arch

prisma: questa catenella si piega in figura parabolica, sì che andando punteggiando sopra 'l muro la strada che vi fa essa catenella, avremo descritta un'intera parabola. [...] Ma più voglio dirvi, recandovi insieme meraviglia e diletto, che la corda così tesa, e poco o molto tirata, si piega in linee, le quali assai si avvicinano alle paraboliche: e la similitudine è tanta, che se voi segnerete in una superficie piana ed eretta all'orizzonte una linea parabolica, e tenendola inversa, cioè col vertice in giù e con la base parallela all'orizzonte, facendo pendere una catenella sostenuta nelle estremità della base della segnata parabola, vedrete, allentando più o meno la detta catenuzza, incurvarsi e adattarsi alla medesima parabola, e tale adattamento tanto più esser preciso, quanto la segnata parabola sarà men curva, cioè più distesa; sì che nelle parabole descritte con elevazioni sotto i gr. 45, la catenella cammina quasi ad unguem sopra la parabola»<sup>1</sup>.

Una delle prime applicazioni del principio della curva catenaria in architettura è attribuita a Robert Hooke quando in occasione della costruzione della cupola di St. Paul a Londra dopo l'incendio del 1666, ne propose il progetto. Lo stesso Hooke in *A description of Helioscopes and Some Other Instruments*, del 1676, pone un anagramma con scritto: «Ut continuum pendet flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum». Ovvero, «Come pende un filo flessibile, così, invertendolo resta fermo un corpo rigido».

Il confronto tra il modello di Gaudì e quello del gruppo di lavoro di Frei Otto permette di aggiungere ulteriori riflessioni al dibattito sul-

<sup>1</sup> Galilei, G. (1638), *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e i movimenti locali*, in Giusti, E. (a cura di) Torino: Giulio Einaudi, p. 54.

## Il modello fisico della forma\_la matematica sottesa

la differenza tra computazionale e computerizzazione teorizzata nel capitolo precedente, quello relativo allo scenario contemporaneo. Entrambi gli architetti, per definire la forma delle coperture e del padiglione si sono serviti di un processo logico, computazionale, basato su funzioni matematiche che hanno verificato mediante un procedimento empirico, il modello delle catenarie. Il gruppo di lavoro di Frei Otto ha simulato poi mediante un elaboratore di calcolo tale modello. Tali considerazioni per riaffermare qui la posizione sul metodo all'interno di tale tesi e sul ruolo del progettista per cui l'approccio computazionale non coincide con la computerizzazione del processo, non negando tuttavia che l'impiego di elaboratori di calcolo ne velocizzano e ottimizzano il processo.



## **Definizione della singola componente\_microscala Morfogenesi & Simulazione**

### **L'approccio al problema**

#### **L'architettura, dialettica tra anti-natura e natura**

Si è detto più volte che all'interno del presente progetto di ricerca l'opera di architettura è intesa come il risultato di un processo di astrazione di forme naturali, di processi morfogenetici, di materiali con il fine della creazione di spazio. Poiché sono stati posti in relazione sistemi provenienti da ambiti disciplinari differenti all'interno del presente capitolo si analizzerà l'approccio alla progettazione come dialettica tra due termini, natura e artificio. E sebbene, si potrebbe effettuare una categorizzazione di ciò che apparterebbe al primo termine e ciò che apparterebbe al secondo, quando si affronta il tema dell'artificio, emergono alcune considerazioni contrastanti. Per affrontare tale tematica, essenziale in un progetto in cui si sperimentano forme e processi formativi derivanti dal mondo naturale, rappresenta un testo di riferimento quello scritto da Gillo Dorfles, *Artificio e natura* nel 1968. Dorfles definendo il termine artificio scrive che acquisisce una valenza positiva «di inventiva, creativa, di 'trucco' per scoprire il nuovo, l'inedito, di mezzo per dominare e soppiantare una natura grezza e amorfa – una accezione negativa se per artificio si intende – la contraffazione del vero, di falsificazione non necessaria di elementi naturali, di sovvertimento del modo di essere e di esperire che ci è connaturato e consanguineo»<sup>1</sup>. Natura intesa qui non come paesaggio, non come valore ambienta-

<sup>1</sup> Dorfles, G. (1968), *Artificio e natura*, Torino: Einaudi, p. 244.

le, non come l'ecologia di Latour<sup>2</sup>. Intesa qui come termine opposto alla parola *artificio*, a ciò che è realizzato dalle mani e dal pensiero dell'uomo. Cosa è possibile individuare come 'architettura naturale'? Quella spontanea come il trullo pugliese, la capanna in adobe, l'architettura nomade dei popoli nelle steppe della Mongolia? È possibile individuare a partire dall'architettura moderna, a partire dalla quale progresso e tecnologia sono divenute protagoniste, esempi di architettura 'naturale'? Gillo Dorfles suggerisce che non è l'impiego di tecniche costruttive tradizionali o di materiali 'naturali' come argilla, pietra, legno che rendono siffatte architetture spontanee, naturali. Egli individua pochissimi geni dell'architettura moderna [Mies, Aalto, Tange, Rudolph] che hanno saputo individuare nel proprio modo di fare architettura la naturalità. Anche un prodotto artificiale creato dall'uomo o dalla macchina tramite l'uomo può divenire naturale. E se si considera che l'uomo in quanto essere naturale, progetta nel momento in cui realizza un'opera di architettura, un suo rifugio, al pari di quanto un volatile fa costruendo il proprio nido o al pari di quanto fanno le api quando realizzano un alveare, la questione della distinzione tra artificio e natura diviene più complessa. E di questo sia il mondo della produzione artificiale che la scienza non può non prendere atto quando si formulano teorie. L'uomo sente e percepisce in quanto soggetto naturale. Perché non vi è dubbio che i nidi di uccello o gli alveari della api siano 'oggetti naturali' benché siano appositamente costruiti? Cosa gli rende tale naturalità? Analogamente ai nidi di uccello, le opere di architettura sono appositamente costruite. Cosa li rende artificiali? Quali sono gli oggetti dell'uomo che non possiedono più naturalezza? Le plastiche? Gli inquinanti? Il digitale? Le macchine? L'azione dell'astrazione? Il fatto che è stata manipolata la natura tale da rendere un paesaggio artificioso? Ma l'uomo è

<sup>2</sup> Latour, B. (2008), *Disinventare la modernità*, Milano: Elèuthera.



## Definizione della singola componente\_microscala Morfogenesi & Simulazione

essere naturale e quindi lo dovrebbe essere anche la sua capacità di astrarre. Dove si colloca il limite? In quel limite forse risiede anche quello che separa l'arte dalla non arte. Scegliendo come criterio di leggibilità il fatto che in natura, l'essere non umano raramente agisce per il male del proprio ambiente ma che è guidato dalla propria natura a sopravvivere, riprodursi, ripararsi e cibarsi, analogamente il limite tra ciò che è naturale e ciò che non lo è, per l'essere umano, potrebbe ritrovarsi nel valore etico ed estetico verso il proprio ambiente e la propria natura di essere senziente. Paesaggi naturali come il deserto del Karakum generano lo stesso grado di fascinazione di un paesaggio antropico quale quello delle saline di Marsala, sebbene sia questa una creazione umana.

«All'inizio la natura è davanti a noi e tutti crediamo di sapere cosa sia. Diciamo che è il campo della realtà trascendenti spazio-temporali. [...] Che cosa, fenomenologicamente, si deve intendere per natura? Natura sono gli oggetti, le cose delle scienze naturali, le cose "fisicalistiche". Ma natura siamo anche noi soggetti, che possiamo diventare oggetti di studio della fisica e cioè cose fisicamente, e natura sono anche le associazioni umane, le opere d'arte e della cultura che non possono essere non incarnate in una realtà fisica. [...] Se la scienza non ammette altra realtà oltre quella delle cose fisicalistiche, se la scienza dimentica il *cogito*, l'uomo, e lo rende cosa fisicalistica, alienata, naturalistica (naturalistica, non cioè natura attiva) allora la scienza perde la propria fondazione che si trova nel cogito»<sup>3</sup>.

Difatti, Gillo Dorfles afferma che

<sup>3</sup> Paci, E. (1967), *Per un'interpretazione della natura materiale in Husserl*, in «Aut-Aut», n. 100, 1967, p. 49.

«l'artificio è anche natura, sia che s'intenda artificio come "fatto fittiziamente ad arte", come *facticius* (come, *feitico* [in portoghese=miracolo] = feticcio) (e risorge allora il problema della feticizzazione dell'arte e della vita), sia che lo si intenda (con Šklovskij) come *priëm*, come metodo, come mezzo artificiale, che può divenire necessario per la creazione dell'opera d'arte, a costo di deformare natura e realtà»<sup>4</sup>.

La tesi di Dorfles è quella per cui per quanto l'oggetto artificiale possa essere 'innaturale', questo potrebbe essere considerato naturale se riscattato dall'essere umano.

«In effetti: a un certo punto l'oggetto creato dall'uomo diventa analogo a quello che potremmo definire "oggetto creato dalla natura"; ossia elemento naturale sorto spontaneamente ma che assume all'occhio dello spettatore un carattere "oggettuale"»<sup>5</sup>.

L'ipotesi formulata all'interno della presente ricerca è quella per cui se si è partiti dalla natura per astrarla e farla divenire artefatto, è all'interno di tale artificiosità che ai margini del caos si ritrova invece, sorprendentemente, tale naturalità. Quindi non solo si scopre che l'artefatto dell'uomo in quanto soggetto naturale appartiene alla natura ma che anche quando si pensa di averla snaturalizzata, questa ritorna, nell'arte e in architettura.

Una ipotesi per la ricerca della naturalità dell'architettura è quella di ritrovare una struttura, un linguaggio comune a entrambi i mondi. Ovvero, gli oggetti artificiali naturali potrebbero essere

<sup>4</sup> Dorfles, G. (1968), *Artificio e natura*, Torino: Einaudi, p. 17.

<sup>5</sup> Dorfles, G. (1968), *Ivi*, p. 54.

## Definizione della singola componente\_microscala Morfogenesi & Simulazione

quelli che perseguono, consapevolmente o inconsapevolmente, un linguaggio-struttura rintracciabile anche in natura. Non è la tecnica o il materiale impiegato che ne garantisce la naturalità. Tale 'linguaggio-struttura' potrebbe coincidere con le proporzioni auree che si ritrovano nelle forme della natura o nelle composizioni della musica, ma non solo. Potrebbe ritrovarsi nella geometria frattale, nelle turbolenze, nel confine tra ordine e caos, nel seguire le leggi di creazione morfologica presenti in natura, nelle forze che agiscono in natura - vedi le opere di Pierluigi Nervi o Antoni Gaudì -, nelle percezioni dell'essere umano - vedi le atmosfere ricreate da Peter Zumthor. Nell'agire secondo natura per cui impermanenza, temporalità fugacità, asimmetria, imperfezione - vedi l'architettura giapponese tradizionale o le opere di Mies van der Rohe - rendono un'opera di architettura più 'naturale', promotrice del proprio tempo. Per cui ancora una volta la forma non è il fine, ma perseguire la naturalità ne potrebbe garantire il valore etico ed estetico. Nella conclusione al testo *Artificio e natura*, Gillo Dorfles afferma in maniera ottimistica che:

«Lottare, allora, contro l'artificio non deve equivalere ad abdicare di fronte alle ricerche tecnologiche, all'uso di nuovi materiali costruttivi ed artistici, né a rinunciare all'impiego dei mass media e degli altri mezzi di comunicazione meccanizzati; ma deve significare: divenir coscienti di tali usi e di tali mezzi; intenzionare la propria ricerca non perdendo di vista il telos estetico e sociologico verso cui si è rivolti; e soprattutto rendersi conto che solo attraverso una 'rettificazione', una 'naturalizzazione', dei prodotti umani e di quelli industriali (e comunque artificiali) sarà possibile restituire all'uomo il giusto rapporto con le cose dell'arte e con quelle della natura permettendogli di

raggiungere una condizione che non sia né eccessivamente oggettualizzata, reificata, cosificata, né eccessivamente 'naturalistica', irrazionale, istintiva. Dal contrasto dunque e dall'accordo tra valori razionali e irrazionali, fantastici e logici, mitopoietici e demistificanti, potrà forse dipendere la capacità creativa ed esperienziale dell'umanità futura»<sup>6</sup>.

E, se la natura, intesa come realtà fisica, è affrancata in parte dalla propria componente deterministica per cui a una causa corrisponde sempre un effetto prevedibile e per cui l'evoluzione temporale di un fenomeno è descrivibile tramite delle leggi note, l'idea di ordine, di simmetria, di realtà statica sembra lasciare spazio a nozioni contrapposte quali caos, asimmetria e imprevedibilità. Tale è l'idea opposta a quella espressa da Philp Galanter quando definisce l'arte generativa come

«qualsiasi pratica artistica in cui l'artista utilizza un sistema, come un insieme di regole del linguaggio naturale, un programma per computer, una macchina o altre invenzioni procedurali, che viene messo in moto con un certo grado di autonomia contribuendo o dando luogo a un'opera d'arte completata»<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> Dorfles, G. (1968), *Op. cit.*, p. 244.

<sup>7</sup> Galanter, P. (2003), *Cos'è l'arte generativa? Teoria della complessità come contesto per la teoria dell'arte*, in Atti del VI convegno internazionale: Generative Art 2003, Milano, 2003.

### **Metodo di ricerca, ideazione e sperimentazione**

Come anticipato nel capitolo dedicato all'introduzione, il metodo impiegato all'interno della presente ricerca si basa sull'approccio noto come *research by design*. I passaggi iterativi di ogni micro-fase consistono della ideazione-simulazione-prototipazione-verifica-raccolta dati-riflessione e di nuova progettazione implementata, perseguendo l'obiettivo della sperimentazione delle forme, dell'aspetto tecnologico, dell'approccio metodologico, nello specifico, computazionale e della ottimizzazione del processo. Ovvero, indagato lo stato dell'arte, sono state affrontate diverse fasi:

- simulazione dello stato dell'arte tramite l'impiego di software parametrici per comprendere le caratteristiche geometriche delle forme delle singole particelle, il sistema di aggregazione e per ricavarne vantaggi e svantaggi di ogni caso studio
- definizione della geometria della singola componente
- simulazione della geometria della singola componente tramite l'impiego di software parametrici
- scelta del materiale
- prototipazione rapida della singola componente
- test empirici

Inoltre, prima di procedere alla descrizione delle singole fasi, è doveroso precisare la definizione di taluni termini.

■ **stabilità del sistema aggregato**\_Definizione che rimarrà valevole sia per la fase di simulazione dello stato dell'arte, sia della fase di definizione della singola componente che dell'intero sistema aggregato. È noto che la stabilità dell'equilibrio di un corpo rigido è tale per cui anche se soggetto a un piccolo spostamento questo tende naturalmente a ritornarvi. Per stabilità del sistema aggregato

si intende invece qui la capacità dello stesso di aggregarsi e rimanere aggregato anche se soggetto a forze esterne. Ovvero, la stabilità di un sistema aggregato quando sottoposto ad azioni esterne o nel momento in cui vi è il riordino delle particelle è definita come il rapporto tra il numero di particelle disperse e quelle totali che compongono il sistema aggregato.

■ **geometria concava**\_figura (piana o solida) per cui un segmento che congiunge una coppia di punti della figura non appartiene per intero alla figura stessa.

■ **geometria convessa**\_figura (piana o solida) per cui ogni segmento congiungente due punti qualsiasi di essa sia per intero contenuto nella figura stessa.

### **Simulazione della geometria della singola componente e dello stato dell'arte tramite l'impiego di software parametrici**

Come suggerito da Sean Ahlquist e Achim Menges<sup>8</sup> il metodo computazionale è definibile come l'interazione di diverse caratteristiche, regole generative, proprietà elementari e sistemi di informazioni che determinano trasformazioni e strutture complesse dinamiche. La simulazione della geometria delle particelle indagate nella fase di studio dello stato dell'arte tramite l'impiego di software parametrici e i relativi plug-in ha permesso di verificare il comportamento di tali componenti e di trarre considerazioni utili alla ricerca. L'intento, quello di indagare quale di queste forme rispondesse meglio all'obiettivo della progettazione del sistema aggregato, equilibrio tra statica e grado di permeabilità. La simulazione è avvenuta mediante il software Rhinoceros e tramite i plug-in Grasshopper e FlexHopper. Grasshopper è un editor grafico di algoritmi, integrato a Rhinoceros, software di modellazione tridimensionale di tipo NURBS [Non-Uniform Rational B-Splines] che possiede una interfaccia grafica intuitiva rispetto ai linguaggi di scripting C++, JaVB script o Python. Si avvale di una

<sup>8</sup> «So what is computation, then? In relation to design, computation is the processing of information and interactions between elements which constitute a specific environment, the pivotal word being interactions. This definition pulls computation out of only the virtual realm. In a greater relevance to design and the designer, the most general application of computation is in producing outcomes realised from the processing of internal and external properties. Computation provides a framework for negotiating and influencing the interrelation of these datasets of information, with the capacity to generate complex order, form and structure. (...). Where computer-aided processes begin with the specific and end with the object, computational processes start with elemental properties and generative rules to end with information which derives form as a dynamic system». Ahlquist, S. e Menges, A. (2012), *Introduction. Computational Design Thinking in Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, in «Architectural Design» Marzo/aprile, 2012, n. 126, p. 13.

logica associativa, ovvero connettendo diversi componenti si crea un algoritmo e quindi il modello parametrico. Tale metodo di simulazione è stato impiegato affinché si potessero gestire numerosi dati di input e di output contemporaneamente e in maniera celere e affinché si potessero effettuare delle scelte nate dallo studio e dalla verifica della singola geometria in maniera immediata. È stata quindi avviata la programmazione algoritmica. Definite in maniera parametrica le forme delle singole particelle, secondo la configurazione unidimensionale - Y, C, Z - quella degli esapodi, dei solidi platonici e delle aste monodimensionali, queste sono state allineate a piani inclinati in maniera casuale e collocate in punti dello spazio dalle coordinate anch'esse casuali e di numero fissato. Ovvero sono state versate virtualmente a partire da un'altezza di versamento stabilita pari a 30 cm, in maniera virtuale, un numero di cento particelle per ognuna delle forme indagate, all'interno di una scatola anch'essa di dimensioni parametriche. Prima di avviare la simulazione è stato necessario convertire la forma geometrica delle singole particelle in un cluster di punti. È stato quindi definito il piano di collasso e sono stati definiti in maniera parametrica e casuale, le coordinate delle posizioni nello spazio a partire dai quali simulare la caduta delle particelle e la diversa inclinazione delle stesse rispetto a piani XY orientati a loro volta in maniera casuale.

La fase di simulazione della geometria della singola componente tramite software basati sulla logica computazionale, ossia quella che guarda alla morfologia, al processo di generazione della forma e non alla forma fine a sé stessa, è stata avviata mediante la programmazione su ambiente Grasshopper e Flexhopper. Come precedentemente scritto il metodo computazionale è definibile come l'interazione di diverse caratteristiche, regole generative, proprietà elementari e sistemi di informazioni che determinano trasformazioni e strutture



## Definizione della singola componente\_microscala Morfogenesi & Simulazione

complesse dinamiche. Così, la simulazione parametrica ha permesso di gestire parecchi dati riguardanti forme, dimensioni, forze interessate e di effettuare delle scelte che hanno portato allo studio e alla verifica di ogni geometria in maniera immediata. All'interno dell'interfaccia di Grasshopper poi, tramite il plug-in Flexhopper è stato simulato il versamento di ogni particella dalla geometria parametrica all'interno di una scatola virtuale per analizzarne il comportamento. Le variabili di riferimento per la programmazione parametrica hanno riguardato la geometria della singola componente. Tre i parametri variabili:

- la lunghezza di ogni singola asta
- lo spessore
- la dimensione e forma del nucleo della particella

Parametrizzato ogni componente per accelerare il processo di analisi è stato possibile avviare la simulazione. È stato quindi definito il piano di collisione, una scatola di dimensioni alla base 30x30 cm e altezza 30 cm aperta in sommità e sono stati definiti in maniera parametrica e random, le coordinate delle posizioni nello spazio delle singole particelle a partire dalle quali simulare la loro caduta. Secondo una logica random è stata definita anche la diversa inclinazione delle stesse rispetto a piani XY orientati, a loro volta, in maniera casuale. La simulazione tramite FlexHopper è stata condotta principalmente per indagare il grado di permeabilità del sistema aggregato. La stabilità del sistema, ovvero il numero di particella disperse in seguito al versamento di tale sistema, è stato verificato invece mediante test empirici. Poiché Flexhopper è un plug-in che lavora per punti e non per geometrie, la superficie di ogni geometria di ciascuna particella è stata pensata come una nube di punti che ne seguisse il profilo. Quindi successivamente è stato costruito il cluster tra

ciascuno dei punti. Dopo aver definito la forma, la dimensione e il volume di ogni singola particella, è stato definito il numero di particelle versate virtualmente all'interno della scatola. Sono state eseguite un numero di 5 simulazioni. Ogni simulazione è stata eseguita per un numero fisso di 100 particelle, per sei geometrie differenti con diverse caratteristiche dimensionali.

- Esperimento 1\_configurazione a1\_bar\_Vol. = 040 cm<sup>3</sup>
- Esperimento 1\_configurazione a2\_Y shape\_Vol. = 1,00 cm<sup>3</sup>
- Esperimento 1\_configurazione a3\_Z shape\_Vol. = 0,80 cm<sup>3</sup>
- Esperimento 1\_configurazione a4\_C shape\_Vol. = 0,80 cm<sup>3</sup>
- Esperimento 1\_configurazione a5\_Esapodi\_Vol. = 240 cm<sup>3</sup>
- Esperimento 1\_configurazione a6\_Esapodi e sfere\_Vol. = 5254 cm<sup>3</sup>
- Esperimento 1\_configurazione a7\_Solido platonico\_Vol. = 144,3 cm<sup>3</sup>

Gli INPUT dell'algorithm relativamente alla geometria della singola particella, ovvero le variabili di riferimento per la programmazione parametrica:

- n. di bracci di ciascuna particella
- lunghezza di ogni braccio di ciascuna particella
- lo spessore di ogni braccio di ciascuna particella
- la dimensione del nucleo

Gli INPUT dell'algorithm relativamente alla simulazione del versamento:

- il coefficiente di frizione statico e dinamico
- la propagazione
- lo smorzamento (damping)

## Definizione della singola componente\_microscala Morfogenesi & Simulazione

- la viscosità
- le forze applicate

Gli OUTPUT restituiti per ognuna della simulazioni:

- altezza di versamento raggiunto dall'aggregato
- volume occupato dall'aggregato
- volume della parte solida, ovvero la somma del volume di ogni particella
- volume dei vuoti
- l'angolo di riposo
- la percentuale di vuoti rispetto al volume totale\_parametro questo che ha permesso di valutarne la permeabilità

Si è detto che l'ideazione della geometria della singola particella è stata ispirata dai sistemi aggregati presenti in natura. Tuttavia, benché vi sia una analogia con le sabbie e i cristalli di neve, è stato osservato che i sistemi indagati per la simulazione dalla forma convessa presentavano un angolo a riposo pari a 90 gradi. Inoltre, è stato possibile considerare il sistema aggregato simulato come un fluido solo nella fase di versamento. Una volta avvenuto l'incastro, questo ha raggiunto le proprietà di un solido poroso. Avvenuta la simulazione, è stato possibile definire la geometria della singola particella. Perseguendo inoltre la metodologia della triangolazione dei dati, tale geometria è stata oggetto di verifica nella fase di prototipazione e in quella empirica mediante test. A parità di condizioni in termini di coefficiente di attrito e dimensioni della sezione trasversale, nel caso di sistemi aggregati stocastici, effettuata la normalizzazione del numero di particelle in base all'intero volume, si è osservato che:

- nel caso di aste con configurazione unidimensionale e tridimensionale, Y-C-Z, e con un numero di bracci variabili, aste più

lunghe hanno generato un valore della densità inferiore con la conseguenza che il sistema è risultato essere più poroso

■ le particelle con una lunghezza del braccio maggiore hanno generato un grado più elevato di porosità. Ciò non accade nel caso di utilizzo di particelle con una forma convessa. I solidi platonici hanno generato un sistema altamente denso e compatto ma instabile

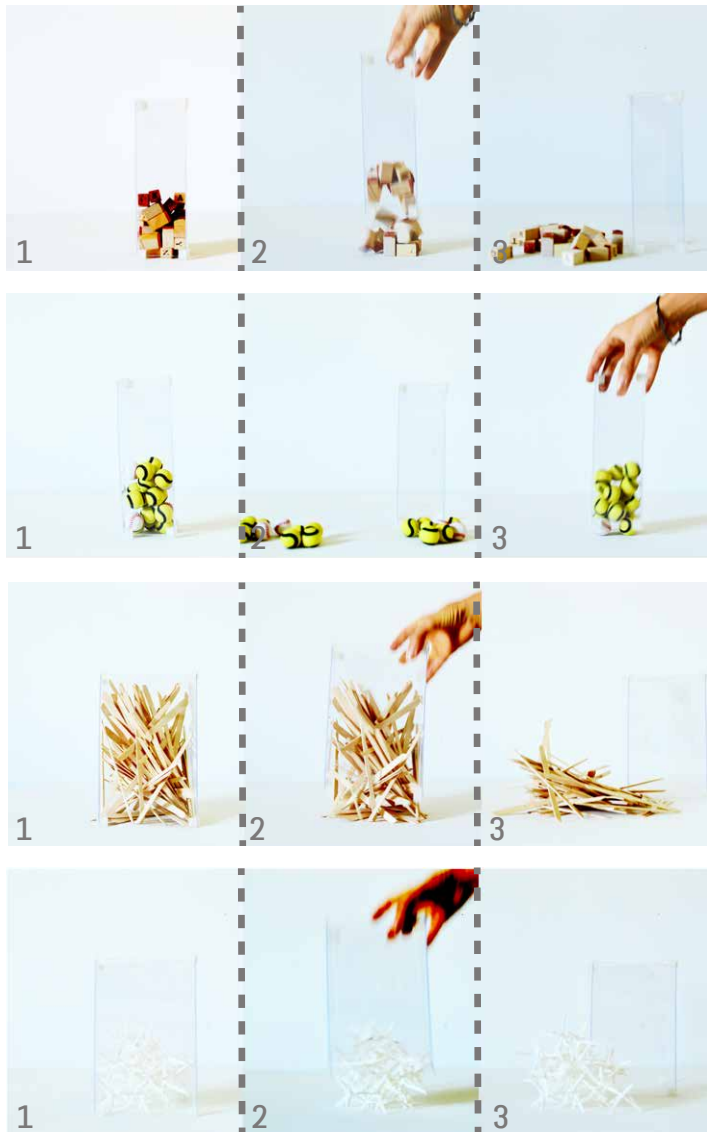
■ la minore configurazione di stabilità in termini di particelle disperse è stata raggiunta dall'aggregazione di solidi platonici

■ la maggiore configurazione di stabilità in termini di particelle disperse è stata raggiunta dall'aggregazione degli esapodi anche se il grado di densità rimaneva troppo elevato.

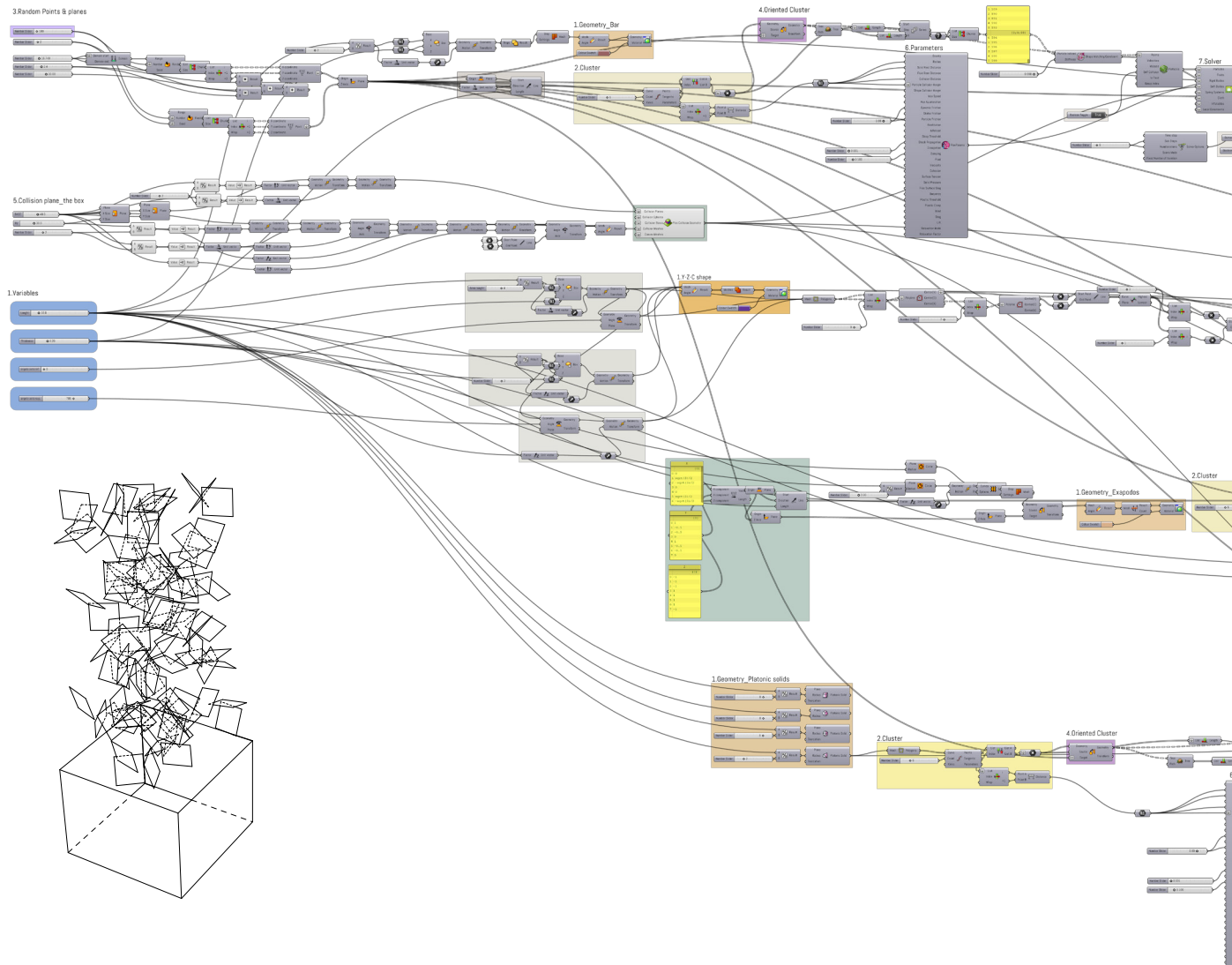
■ una maggiore permeabilità del sistema aggregato è stata raggiunta dalla combinazione di forme concave e convesse. Questo risultato è stato essenziale nella fase di ideazione della componente finale

Difatti nella definizione della geometria della singola particella si è poi scelto di creare una forma sintesi della forma convessa degli esapodi e della forma concava dei solidi platonici. Tale forma pur mantenendo un buon grado di stabilità del sistema aggregato permette di raggiungere una migliore condizione di permeabilità.

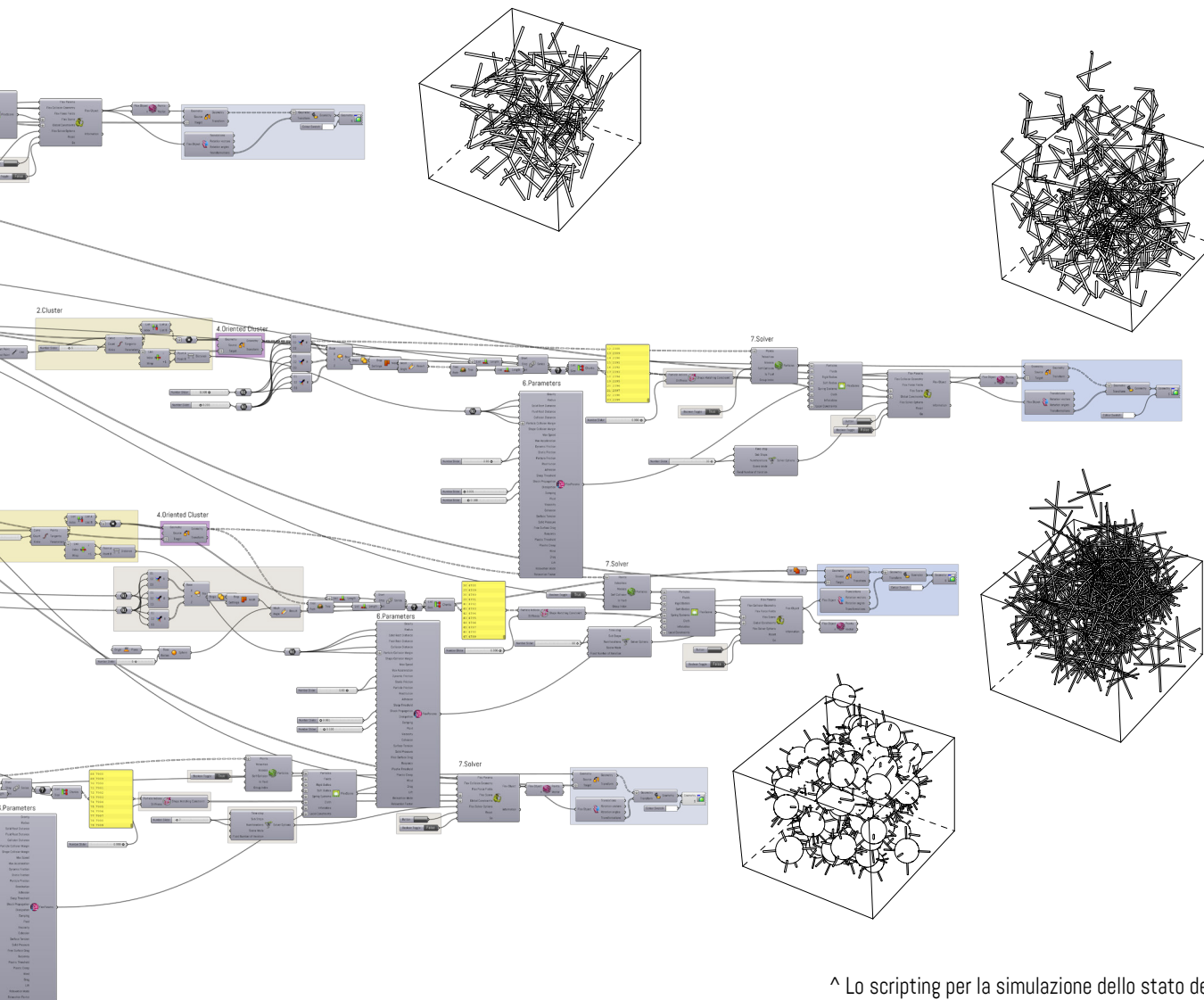
Definizione della singola componente\_microscala  
Morfogenesi & Simulazione



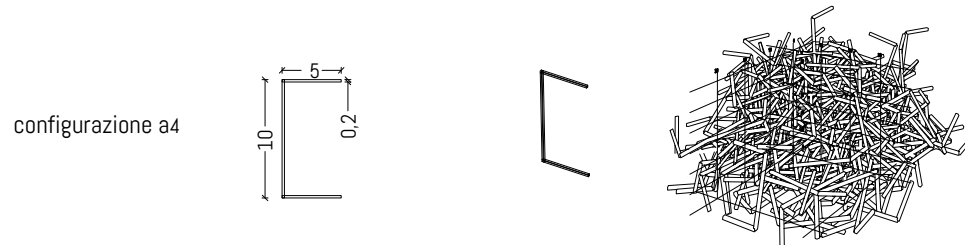
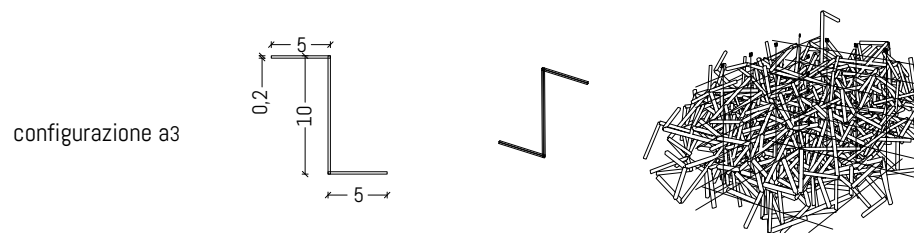
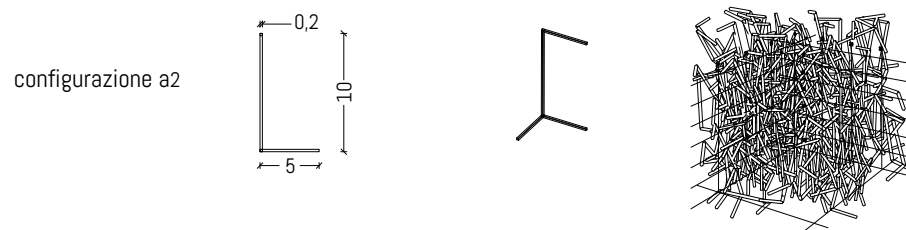
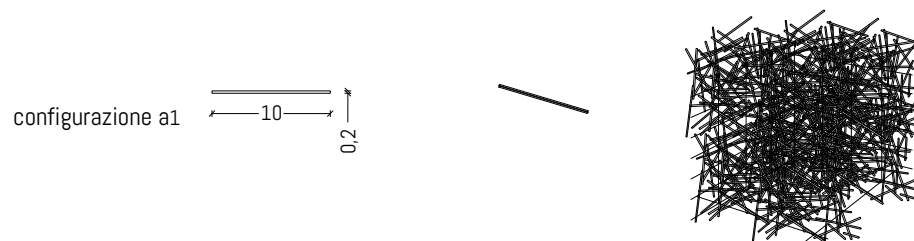
G. M. Nicolosi | The particlizing of matter between ORDER & CHAOS  
*analisi e sperimentazione*



## Definizione della singola componente \_microscala Morfogenesi & Simulazione



^ Lo scripting per la simulazione dello stato dell'arte in Grasshopper

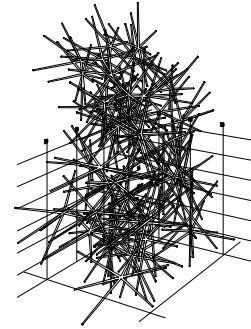
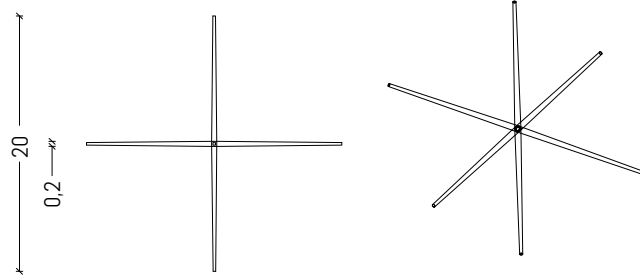




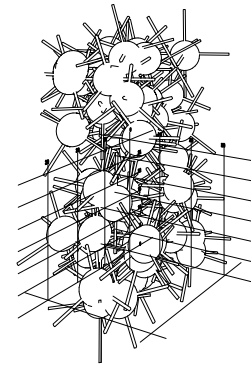
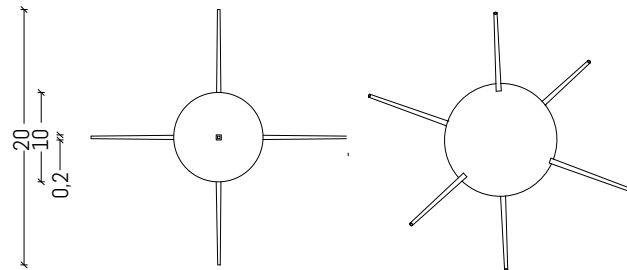
Definizione della singola componente\_microscala  
Morfogenesi & Simulazione



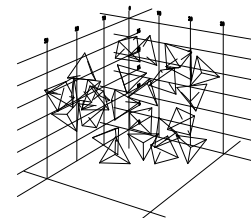
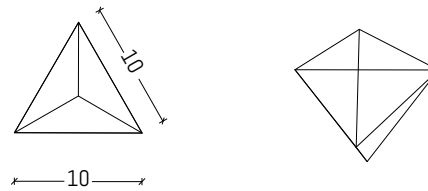
configurazione a5



configurazione a6



configurazione a7



Esperimento 1_configurazione a1	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	100	100	100	100	100
n. particelle disperse	9	8	7	9	8
Area alla base [cm <sup>2</sup> ]	900	900	900	900	900
Altezza raggiunta [cm]	16	17	16	18	16
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	14400,00	15300,00	14400,00	16200,00	14400,00
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	36,4	36,8	37,2	36,4	36,8
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	14363,60	15263,20	14362,80	16163,60	14363,20
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\rho$ [%]	99,75	99,76	99,74	99,78	99,74
Grado di stabilità $s$ [%]	91,00	92,00	93,00	91,00	92,00

Esperimento 1_configurazione a2	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	100	100	100	100	100
n. particelle disperse	7	6	7	5	7
Area alla base [cm <sup>2</sup> ]	900	900	900	900	900
Altezza raggiunta [cm]	22	21	22	20	22
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	19800,00	18900,00	19800,00	18000,00	19800,00
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	93	94	93	95	93
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	19707,00	18806,00	19707,00	17905,00	19707,00
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\rho$ [%]	99,53	99,50	99,53	99,47	99,53
Grado di stabilità $s$ [%]	93,00	94,00	93,00	95,00	93,00

Esperimento 1_configurazione a3	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	100	100	100	100	100
n. particelle disperse	5	6	7	5	6
Area alla base [cm <sup>2</sup> ]	900	900	900	900	900
Altezza raggiunta [cm]	32	30	31	30	30
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	28800,00	27000,00	27900,00	27000,00	27000,00
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	76	75,2	74,4	76	75,2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	28724,00	26924,80	27825,60	26924,00	26924,80
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\rho$ [%]	99,74	99,72	99,73	99,72	99,72
Grado di stabilità $s$ [%]	95,00	94,00	93,00	95,00	94,00

Definizione della singola componente\_microscala  
Morfogenesi & Simulazione

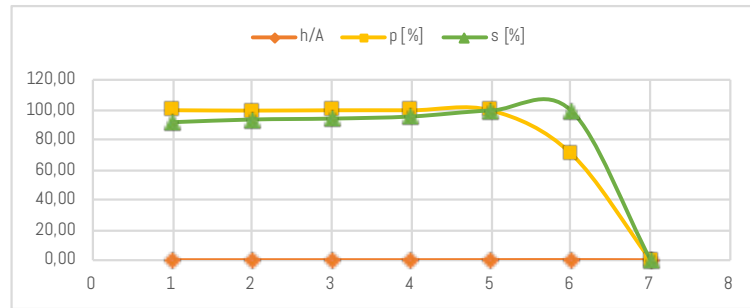
Esperimento 1_configurazione a4	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	100	100	100	100	100
n. particelle disperse	5	4	5	3	5
Area alla base [cm <sup>2</sup> ]	900	900	900	900	900
Altezza raggiunta [cm]	31	30	30	31	30
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	27900,00	27000,00	27000,00	27900,00	27000,00
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	76	76,8	76	77,6	76
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	27824,00	26923,20	26924,00	27822,40	26924,00
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $p$ [%]	99,73	99,72	99,72	99,72	99,72
Grado di stabilità $s$ [%]	95,00	96,00	95,00	97,00	95,00

Esperimento 1_configurazione a5	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	100	100	100	100	100
n. particelle disperse	0	0	1	0	1
Area alla base [cm <sup>2</sup> ]	900	900	900	900	900
Altezza raggiunta [cm]	70	70	70	70	70
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	63000,00	63000,00	63000,00	63000,00	63000,00
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	240	240	237,6	240	237,6
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	62760,00	62760,00	62762,40	62760,00	62762,40
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $p$ [%]	99,62	99,62	99,62	99,62	99,62
Grado di stabilità $s$ [%]	100,00	100,00	99,00	100,00	99,00

Esperimento 1_configurazione a6	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	50	50	50	50	50
n. particelle disperse	0	0	0	1	0
Area alla base [cm <sup>2</sup> ]	900	900	900	900	900
Altezza raggiunta [cm]	100	100	100	100	100
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	90000,00	90000,00	90000,00	90000,00	90000,00
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	26220	26220	26220	25695,6	26220
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	63780,00	63780,00	63780,00	64304,40	63780,00
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $p$ [%]	70,87	70,87	70,87	71,45	70,87
Grado di stabilità $s$ [%]	100,00	100,00	100,00	98,00	100,00

Esperimento 1_configurazione a7	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	100	100	100	100	100
n. particelle disperse	100	100	100	100	100
Area alla base [cm <sup>2</sup> ]	900	900	900	900	900
Altezza raggiunta [cm]	0	0	0	0	0
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	0	0	0	0	0
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $p$ [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Grado di stabilità $s$ [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Conf.	h/A	p [%]	s [%]
a1	0,02	99,75	91,80
a2	0,02	99,51	93,60
a3	0,03	99,73	94,20
a4	0,03	99,72	95,60
a5	0,08	99,62	99,60
a6	0,11	70,98	99,60
a7	0,00	0,00	0,00



### **La morfogenesi \_definizione della geometria della singola componente**

Come afferma l'architetto giapponese Watanabe noto per l'analogia tra la propria idea di intendere e fare architettura e il mondo naturale, «usare la teoria del caos e dei frattali non vuol dire creare forme simili agli attrattori di Lorenz, o ai contorni frastagliati. Non è la forma ma il processo che contribuisce al progetto»<sup>9</sup>.

Tale è stata la logica computazionale sottesa nella definizione della singola componente. Ispirata dai processi di generazione della forma presenti in natura, affinché potesse ricreare una spazialità ai margini dell'ordine e del caos, la singola particella diviene all'interno del sistema aggregato materia, sostanza e struttura. Riducendo la materia a particelle è annullata la gerarchia tra gli elementi. E l'aggregazione, la crescita avviene in maniera rizomatica, è volta verso l'orizzonte. Analogamente a quanto fatto da Kuma nel *Museum of Ando Hiroshige* in Bato anche la carta partecipa di tale dissolvenza. Si è detto, l'indagine sui paradigmi spaziali della 'particellizzazione' del materiale, ossia della riduzione di esso in componenti elementari e dello 'spatial layering' aveva come obiettivo la restituzione di tali tematiche tramite la definizione e la sperimentazione di uno specifico dispositivo spaziale, che potesse coniugare l'estetica, la statica e quelle tecnologie volte alla tutela dell'ambiente e delle risorse naturali. Lo scopo, quello di ideare un sistema architettonico e strutturale innovativo rispetto ai sistemi costruttivi tradizionali, seppur mantenendo i materiali della tradizione o se innovativi attento alle problematiche legate all'ambiente, che guardino a paradigmi spaziali nella e della contemporaneità. A essere frammentata, non è l'architettura ma la materia. Il frammento secondo la cultura sia tradizionale che contemporanea giapponese diviene attuale per la

<sup>9</sup> Girard, C. (2007), *Makoto Sei Watanabe*, Roma: Edilstampa.

realizzazione di una architettura 'particellizzata' e parametrizzata. Il frammento, la singola particella, non è qui inteso come parte di una unità. È lontano dalla definizione della critica tradizionale italiana che definisce coralmemente il frammento come parte per il tutto.

Nella definizione della morfologia della singola componente è stata indagata la morfogenesi delle particelle che compongono i sistemi naturali aggregati a secco, ovvero la sabbia e i cristalli di neve. Dall'articolo *Freestanding loadbearing structures with Z-shaped particles*<sup>10</sup> di Murphy et al. del Jeager LAB di Chicago è emerso che il comportamento del sistema aggregato non dipende dalla dimensione delle singole componenti rispetto al sistema particella-ambiente. Tale proprietà lo rende riproducibile in scala e pertanto osservabile empiricamente anche mediante modellino.

Inoltre, nella definizione della singola componente, seguendo la logica di semplificazione del processo realizzativo e volendo impiegare tecnologie differenti che prevedono l'impiego della stampante 3D e/o delle macchine a controllo numerico, si è pensato fin dall'inizio una componente formata da parti bi-dimensionali, ovvero avente uno spessore trascurabile rispetto alla dimensione delle altre grandezze e che una volta incastrate potessero ricreare una geometria tridimensionale. È stato mantenuto questo vincolo per due ordini di ragione che hanno guidato l'aspetto pionieristico di tale sistema costruttivo. Il primo che la singola particella potesse essere stampata mediante stampante 3D con estrusione di filamento termoplastico. L'altra ragione riguarda il fatto che essendo le singole particelle pensate come aggregazione di parti bidimensionali, queste possano essere oggetto anche di altri processi produttivi, come il taglio laser o la fresatura a controllo numerico e possano essere impiegati altri

<sup>10</sup> Murphy, K. A. et al. (2016), *Freestanding loadbearing structures with Z-shaped particles* in «Granular Matter» (2016) 18:26.

## Definizione della singola componente\_microscala Morfogenesi & Simulazione

materiali quali il legno, i polimeri e i metalli.

Altro aspetto che ha guidato la progettazione è stata la scelta di incastrare le parti delle singole componenti a secco, ovvero senza parti meccaniche o chimiche leganti. Ancora una volta per il raggiungimento della massima semplificazione del processo realizzativo ma non solo. Astrazione di strutture presenti in natura, la progettazione della singola componente vuole rimanere fedele ai processi morfologici che le hanno generate. Inoltre, dalla simulazione dello stato dell'arte è emerso che un buon equilibrio tra stabilità e permeabilità ricercata era stato raggiunto dalla combinazione di forme concave e convesse. Delle forme esapodali ne era stato allargato il nucleo, per garantire stabilità e minore densità una volta avvenuta l'aggregazione. Così, ponendosi tali obiettivi e perseguendo la logica della progettazione parametrica, nel definire le caratteristiche morfologiche e le proprietà della singola particella sono stati individuati dei parametri che potessero rispondere all'esigenza di coniugare statica e spazialità ricercata, quella che prevede il processo di astrazione della particellizzazione della 'materia' e la sua permeabilità. Inizialmente sono state ideate e sperimentate forme concave e convesse, bi- e tri-dimensionali. Quindi volendo che il sistema lavorasse esclusivamente per attrito e per incastro, sono stati definiti dei parametri sulla cui definizione è stata effettuata l'ideazione della singola componente:

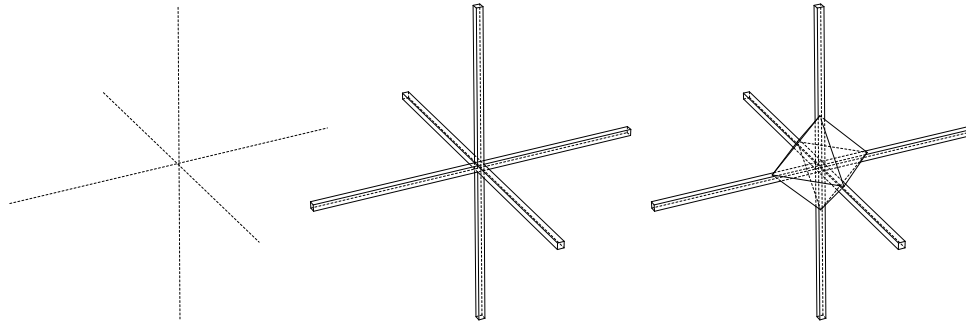
- la densità del sistema aggregato ottenuto
- l'angolo a riposo del sistema aggregato ottenuto
- il coefficiente d'attrito dell'aggregato
- le trame superficiali
- la cassaforma del sistema aggregato\_se cilindrica o parallelepipedica

- il versamento e la distribuzione delle particelle
- la modalità di realizzazione del sistema aggregato, se manuale o mediante l'utilizzo di sistemi robotici
- la modalità di presa del sistema aggregato, se con confinamento o meno

Inoltre, vista la difficoltà di definizione di un modello matematico su cui poi applicare i metodi di modellazione numerica, la sperimentazione è stata condotta su modelli computazionali per studiare le dinamiche granulari, metodi empirici e test fisici.



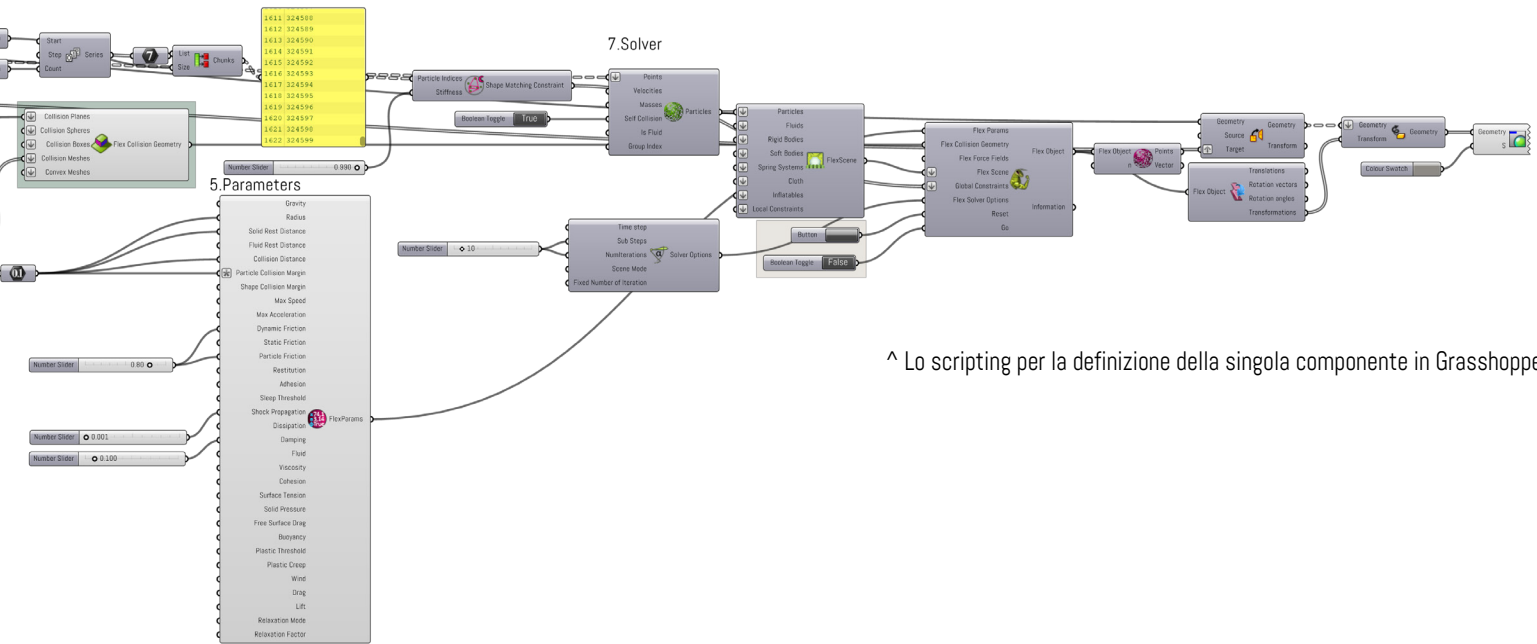
Definizione della singola componente\_microscala  
Morfogenesi & Simulazione



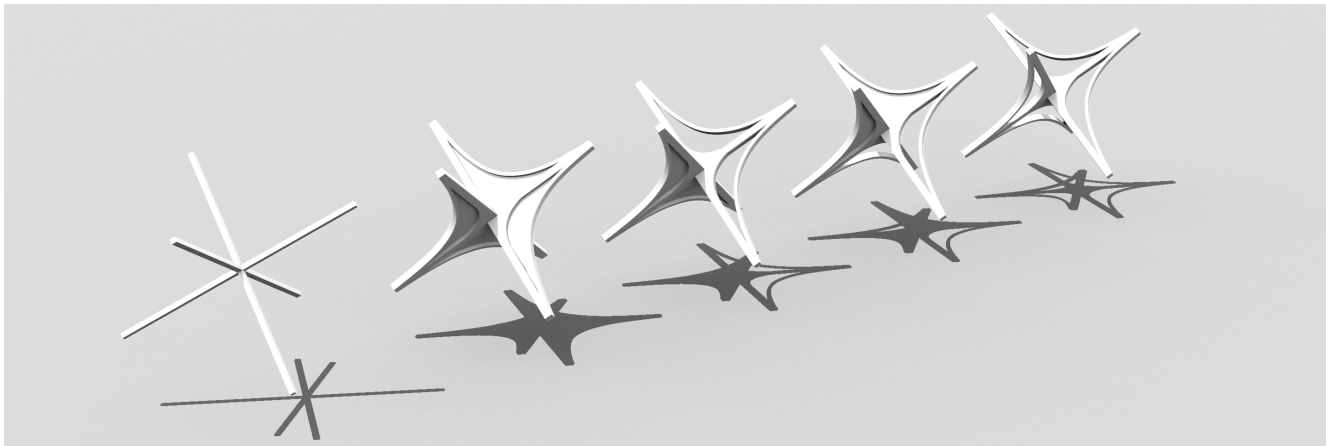
^ Il processo di definizione della geometria della singola componente



## Definizione della singola componente\_microscala Morfogenesi & Simulazione

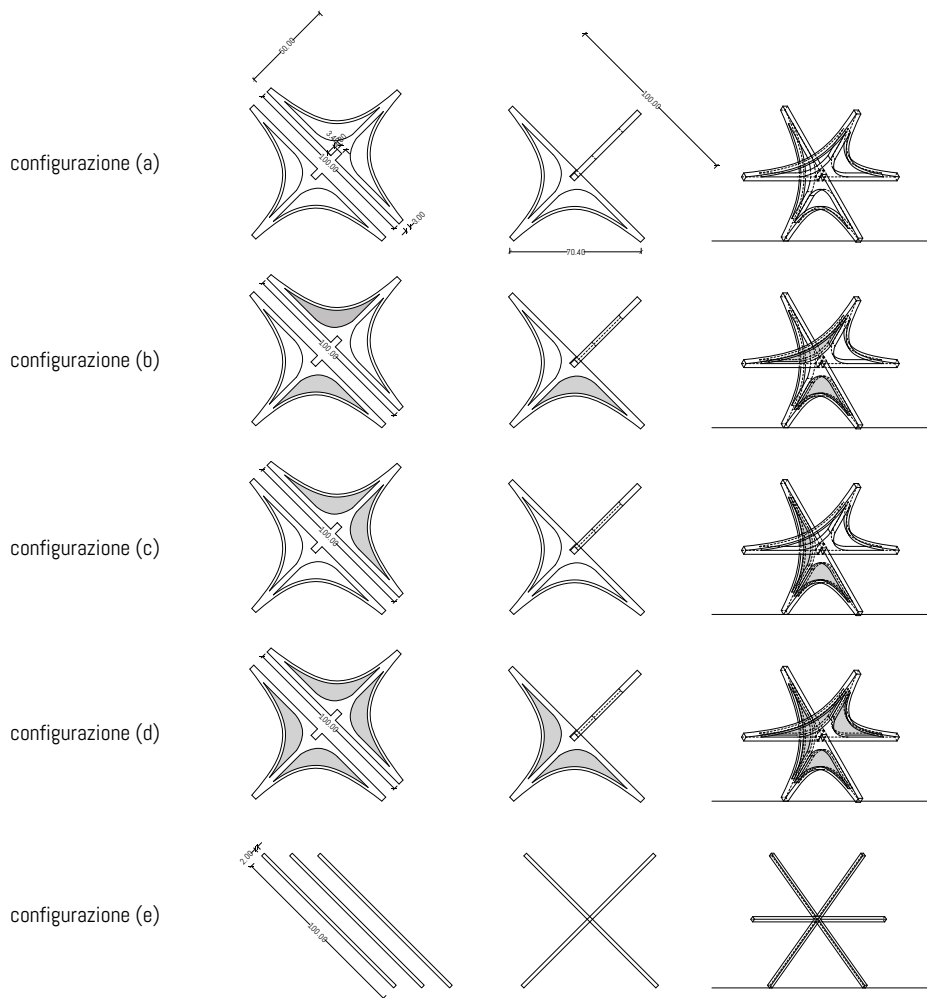


^ Lo scripting per la definizione della singola componente in Grasshopper



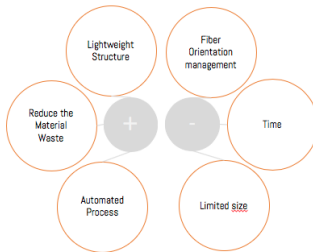
^ Le diverse configurazioni

Definizione della singola componente\_microscala  
Morfogenesi & Simulazione





Pros/Cons\_3D Printing



### Scelta del materiale e dello strumento per la prototipazione

La scelta del materiale impiegato durante il processo di prototipazione rapida, ovvero di produzione additiva [Additive Manufacturing] per estrusione di materiale fuso [FDM], è stata guidata dal confronto delle caratteristiche meccaniche, fisiche e chimiche tra i materiali polimerici maggiormente impiegati per il processo produttivo additivo. Il materiale polimerico allo stato solido presenta una struttura amorfa o semi-cristallina. Nel primo caso, in cui la disposizione degli atomi è caotica, la temperatura di riferimento è quella di transizione vetrosa  $T_g$ , nel secondo caso si fa riferimento alla temperatura di fusione  $T_m$ . Ovvero, il materiale polimerico amorfo per essere lavorato deve essere portato a una temperatura superiore alla temperatura di transizione vetrosa e inferiore alla temperatura di fusione e deve essere mantenuto, una volta raffreddato, a una temperatura inferiore alla temperatura di degradazione  $T_d$ . Il fatto che il polimero amorfo possa essere estruso alla temperatura di transizione vetrosa e non a quella di fusione garantisce che le stesse proprietà meccaniche possano essere mantenute anche una volta raffreddato e quindi indurito.

Per Temperatura di fusione  $T_m$  si intende quella per cui il polimero semi-cristallino passa da uno stato solido a uno viscoso-elastico.

Per Temperatura di degradazione  $T_d$  si intende quella per cui avviene la decomposizione termica. La maggior parte dei polimeri presentano temperature di degrado superiori a quelle atmosferiche, ovvero superiori ai 60 °C.

Tra i materiali termoplastici impiegati per la realizzazione delle componenti dei padiglioni indagati durante lo stato dell'arte oltre all'Acido Polilattico [PLA], vi ritroviamo l'Acrylonitrile butadiene styrene [ABS], il Policarbonato [PC] e il Polyethylene terephthalate glicolizzato [PETG]. In via preliminare, è stata eseguita una valutazione multi-criterio sulla scelta del materiale impiegato. I criteri di

## Definizione della singola componente\_microscala Morfogenesi & Simulazione

La valutazione sono stati determinati sulla base di specifici principi di sostenibilità e qualità estetiche. La valutazione si basa sul processo analitico di gerarchia [AHP]. I vantaggi della produzione additiva mediante l'impiego della stampante 3D per estrusione di materiale fuso:

- Flessibilità
- Precisione
- Costi
- Impatto ambientale

Gli svantaggi della produzione additiva mediante l'impiego della stampante 3D per estrusione di materiale fuso:

- Tempi di produzione
- Anisotropia del materiale

Dalle indagini effettuate, si è scelto quindi l'impiego di un materiale polimerico di origine vegetale, il PLA. Tale scelta garantisce la riciclabilità e biodegradabilità della singola componente.

### La prototipazione rapida mediante stampante 3D

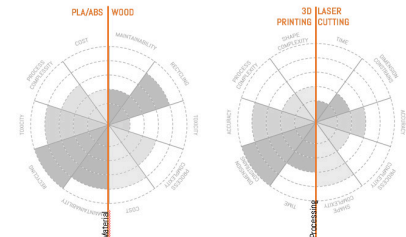
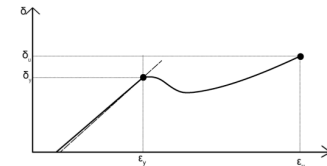
Per la produzione delle singole componenti si è scelto il processo di prototipazione rapida. Tale processo, che consiste nella realizzazione del prototipo in tempi brevi a partire dalla definizione tridimensionale matematica della singola particella ha richiesto le seguenti fasi:

- Disegno della componente in Rhinoceros [estensione .3dm]
- Conversione del file .3dm in file stereolitografia [estensione .stl]
- Conversione in G-Code [estensione .gh]
- Trasferimento dei dati in macchina [estensione .gh]

PLA\_Acrylic poly(lactic acid)\_thermoplastic polymer generated by the polymerization of lactic acid derived from corn destrose. It has the characteristic to:

be biodegradable and renewable  
be permeable to light

	PLA	ABS
Compressive Strength [MPa]	93.76	48.05
Flexural Strength [MPa]	85	59.01
Tensile Strength [MPa]	52	38.14



- Settaggio dei parametri della macchina [stampante 3D]
- Processo di estrusione di materiale fuso
- Post-produzione e operazioni di pulitura del pezzo

Disegnato il pezzo da prototipare, il file .3dm è stato convertito in file stereolitografia [estensione Standard Triangulation Language] per cui la geometria solida proveniente dal file Rhinoceros è divenuta superficie sommatoria di triangoli. Tale file è stato quindi aperto con software slicer open-source CURA di Ultimaker per convertire, una volta settati i parametri voluti, il modello 3D in codice dati estensione G-code. Tramite il software CURA, si è scelto di avviare il processo di stampa definendo:

- Il diametro del filamento pari a 1,75 mm
- L'altezza del layer pari a 0,15 mm
- La densità pari a 100%
- La velocità di stampa pari a 50 mm/s
- La temperatura di stampa pari a 220 °C
- La temperatura del piano riscaldato pari a 50 °C

Il modello della stampante 3D impiegata è Anet8 con dimensioni del piatto di stampa pari a 220x220 mm e altezza massima di stampa pari a 240 mm. La tolleranza ammissibile nella macchina scelta è pari a  $\pm 0,01$  mm. Tale valore di tolleranza è ammissibile in riferimento alla geometria di ciascuna particella. Durante la fase di stampaggio, essendo ciascun elemento di spessore massimo 10 mm, non ci si è preoccupati di possibili deformazioni del materiale eventualmente presenti durante il processo di raffreddamento. Avviata la stampante, il processo di estrusione per deposito di filamento consisteva nella movimentazione della testina di estrusione per strati successivi di spessore scelto lungo le direzioni principali. Prima lungo il piano



## Definizione della singola componente\_microscala Morfogenesi & Simulazione

XY, poi, finito il primo strato, spostata lungo l'asse Z è stata avviata l'estrusione dello strato successivo su quello precedente. Il piatto di stampa è rimasto fermo. Mantenendo le medesime caratteristiche geometriche, per stampare particelle del tipo A, di dimensioni complessive 15 x 15 cm sono stati impiegati 147 minuti di tempo, 640 metri di filamento in PLA, corrispondente a 19 grammi; per stampare particelle del tipo B, di dimensioni complessive 10 x 10 cm sono stati impiegati 45 minuti di tempo, 1,67 metri di filamento in PLA, corrispondente a 5 grammi. Sono state stampate un numero di particelle pari a 200 di tipo B.

Mechanical properties	Injection moulded tensile specimen	Printed tensile specimen <sup>a</sup>	Printed tensile specimen <sup>b</sup>	Units	Test method
Tensile strength at break	52	50	39	MPa	ISO 527
Tensile elongation at break	5	9	4	%	ISO 527
Tensile modulus	1320	1230	1120	MPa	ISO 527

<sup>a</sup> Stretch-direction is parallel to the layers.

<sup>b</sup> Stretch-direction is perpendicular to the layers.

### PRINTING TEMPERATURE

<b>PLA</b> 120-190°	<b>PETG</b> 210-230°	<b>HIPS</b> 210-240°	<b>PET-C</b> 210-240°	<b>TPU</b> 200-250°	<b>ABS</b> 220-260°	<b>NYLON</b> 230-260°	<b>POM</b> 240-270°	<b>PC</b> 270-300°
------------------------	-------------------------	-------------------------	--------------------------	------------------------	------------------------	--------------------------	------------------------	-----------------------

### PRINTING SPEED

<b>POM</b> 20 mm/s	<b>TPU</b> 30 mm/s <sub>~</sub>	<b>NYLON</b> 30/50 mm/s <sub>~</sub>	<b>PC</b> 30/60 mm/s <sub>~</sub>	<b>PET-C</b> 80 mm/s <sub>~</sub>	<b>PETG</b> 40/60 mm/s <sub>~</sub>	<b>HIPS</b> 40/60 mm/s <sub>~</sub>	<b>ABS</b> 30/60 mm/s <sub>~</sub>	<b>PLA</b> 40/120 mm/s <sub>~</sub>
-----------------------	------------------------------------	---	--------------------------------------	--------------------------------------	--	--	---------------------------------------	--

### PROCESSING TEMPERATURE

<b>POM</b> 100-130°	<b>PC</b> 100-130°	<b>NYLON</b> 70-90°	<b>TPU</b> 40-60°	<b>ABS</b> 80-100°	<b>PET-C</b> 50-70°	<b>PETG</b> 50-70°	<b>HIPS</b> 70-90°	<b>PLA</b> 0-50°
------------------------	-----------------------	------------------------	----------------------	-----------------------	------------------------	-----------------------	-----------------------	---------------------

### I test empirici

Jules-Henri Poincaré (1856-1912) matematico e fisico teorico francese, in *Scienza e metodo*, un testo del 1908 afferma che la creatività è

«la capacità di unire gli elementi preesistenti in combinazioni nuove, che siano utili, e sottolinea che il criterio empirico, intuitivo per decidere dell'utilità della combinazione nuova, appena individuata, è la sua bellezza»<sup>11</sup>.

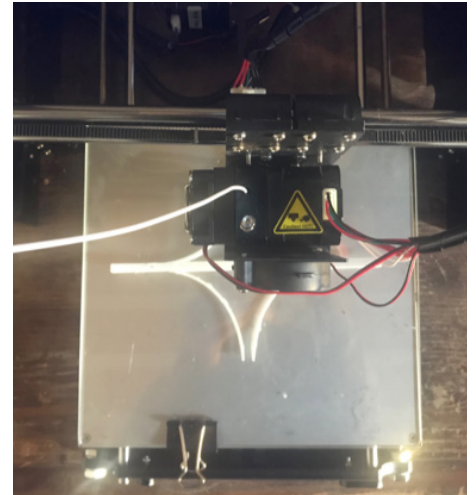
Tale citazione per ricordare l'approccio metodologico di tale progetto di ricerca, anticipato nell'introduzione. Un metodo di ideazione, simulazione, prototipazione e verifica empirica su:

- porosità/densità del sistema aggregato
- angolo di riposo del sistema aggregato
- trame superficiali del sistema aggregato
- stabilità del sistema aggregato

In riferimento alla metodologia impiegata è stato eseguito un protocollo del tutto simile a quello impiegato presso l'ICD - Institute for Computational Design - di Stoccarda come descritto in *Packings of 3D stars: stability and structure* apparso sulla rivista *Granular Matter* del 2016 18:24, in cui Yuchen Zhao, Kevin Liu, Matthew Zheng, Jonathan Barés, Karola Dierichs, Achim Menges e Robert P. Behringer descrivono una serie di esperimenti su forme cilindriche con particelle non convesse sagomate come stelle, a bracci e sezioni differenti.

Secondo la logica del metodo sperimentale ogni procedura è stata eseguita per un numero di volte pari a 5 - per ciascuna particella e per ogni condizione a contorno - per ottenere valori medi.

<sup>11</sup> Poincaré, J.-H. (1908), *Scienza e metodo*, Torino: Einaudi.



Layer height [mm]	0.15
Shell thickness [mm]	1.6
Bottom/top fill[mm]	1.6
Fill Density [%]	100
Print speed [mm/s]	30
Printing Temperature [°C]	200
Bed Temperature [°C]	50
Diameter of Filament [mm]	1.75
Flow of filament	100



^ configurazione (a)



^ configurazione (b)



^ configurazione (c)

Le particelle, sintesi di forma concava e convessa, sono state realizzate in PLA con coefficiente di attrito statico ( $\mu_s$ ) pari a  $0,73 \pm 0,1$ . Ogni particella è costituita dall'unione di due parti di spessore 3 mm e lunghezza dei bracci 50 mm e 100 mm. La dimensione complessiva dei bracci della singola particella è quindi 100 mm.

Ogni esperimento è stato eseguito versando manualmente in maniera random o guidata un numero di particelle pari a 39, eccetto per l'esperimento di tipo A, all'interno di un cilindro in Cloruro di polivinile [PVC] con coefficiente di attrito pari a 0,6 e di dimensioni differenti del tipo di esperimento. Per ciascun esperimento, una volta versate le particelle, è stata eseguita la vibrazione manuale del sistema aggregato e successivamente è stato rimosso il cilindro in PVC.

L'obiettivo di tali test è stato quello di valutare il grado di porosità e di stabilità del sistema aggregato.

Per individuare il grado di stabilità - si ricorda non qui inteso come la capacità di resistere a forze e sollecitazioni esterne ma come la capacità di assumere la condizione aggregata - è stato definito il parametro  $s$

$$s = (\text{numero di particelle disperse}) / (\text{numero di particelle versate})$$

Per individuare il grado di permeabilità è stato definito il parametro  $p$

$$p = (\text{volume dei vuoti}) / (\text{volume totale dell'aggregato})$$

Attraverso tali indicatori è stato parametrizzato il rapporto tra particelle disperse e numero di particelle versate in funzione dell'altezza raggiunta dal sistema aggregato e del grado di permeabilità raggiunta.

Definizione della singola componente\_microscala  
Morfogenesi & Simulazione

Cinque il numero di configurazioni delle particelle in PLA indagate:

- [configurazione (a)]\_trasparente\_volume particella = 4,30 cm<sup>2</sup>
- [configurazione (b)]\_metà trasparente\_volume particella = 4,80 cm<sup>2</sup>
- [configurazione (c)]\_metà trasparente\_volume particella = 4,80 cm<sup>2</sup>
- [configurazione (d)]\_non trasparente\_volume particella = 7,50 cm<sup>2</sup>
- la configurazione (e) riguarda esapodi in legno di spessore 2 mm\_volume particella = 2,00 cm<sup>2</sup>



^ configurazione (d)



^ configurazione (e)



**Esperimento n. 1**\_Il primo esperimento è stato condotto per stabilire il rapporto tra base e altezza dell'aggregato in funzione di stabilità  $s$  e grado di permeabilità  $p$ . Ossia l'obiettivo di tale esperimento è stato quello di definire le dimensioni minime del diametro della base del cilindro affinché, dopo averlo rimosso, fosse stimato il numero di particelle cadute e il grado di permeabilità. Alla base una tavola in tela di cotone con coefficiente di attrito statico ( $\mu_s$ ) pari a 0,73. Il versamento è stato effettuato in maniera manuale ma controllato, con altezza di versamento pari a 10 cm da ogni strato, all'interno di cilindri a sezione circolare di diametro di dimensioni rispettive 10 cm [tipo A] - 15 cm [tipo B] - 20 cm [tipo C] e altezza costante pari a 42 cm.

**Tipo A**\_Sono stati condotti n. 5 ripetizioni versando le particelle all'interno di un cilindro di dimensioni del diametro pari a 10 cm e altezza pari a 42 cm

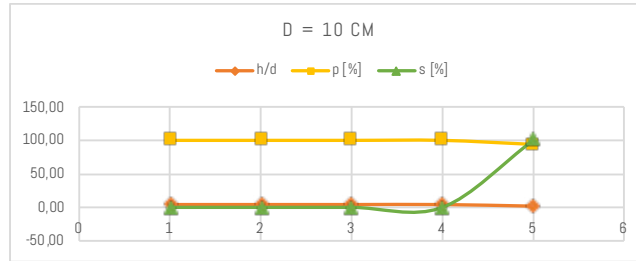
- A1, n. 20 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- A2, n. 20 particelle per metà trasparenti [configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- A3, n. 20 particelle per metà trasparenti [configurazione (c)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- A4, n. 20 particelle non trasparenti [configurazione (d)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- A5, n. 17 esapodi in legno spessore 2 mm su base in tela di cotone

**Tipo B**\_Sono stati condotti n. 5 ripetizioni versando le particelle all'interno di un cilindro di dimensioni del diametro pari a 15 cm e altezza pari a 42 cm

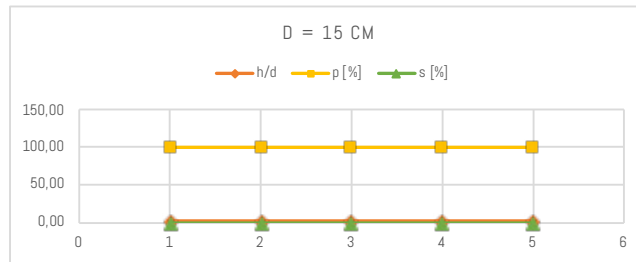
- B1, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone

Definizione della singola componente\_microscala  
Morfogenesi & Simulazione

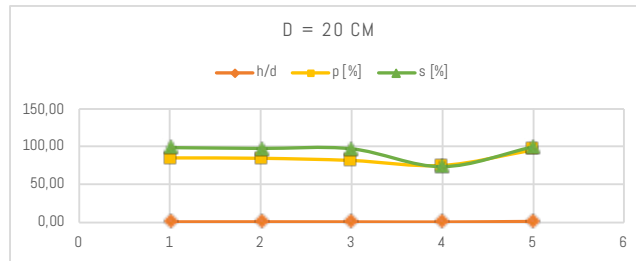
	h/d	p [%]	s [%]
a	4,20	100,00	0,00
b	4,20	100,00	0,00
c	4,20	100,00	0,00
d	4,20	100,00	0,00
e	1,80	93,99	100,00



	h/d	p [%]	s [%]
a	2,80	100,00	0,00
b	2,80	100,00	0,00
c	2,80	100,00	0,00
d	2,80	100,00	0,00
e	2,80	100,00	0,00



	h/d	p [%]	s [%]
a	0,91	85,40	98,97
b	0,97	84,91	97,95
c	0,87	82,01	97,44
d	0,72	75,47	73,85
e	1,50	95,86	100,00



- B2, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- B3, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (c)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- B4, n. 39 particelle non trasparenti [configurazione (d)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- B5, n. 30 esapodi in legno spessore 2 mm su base in tela di cotone

**Tipo C** \_Sono stati condotti n. 5 ripetizioni versando le particelle all'interno di un cilindro di dimensioni del diametro pari a 20 cm e altezza pari a 42 cm

- C1, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- C2, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- C3, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (c)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- C4, n. 39 particelle non trasparenti [configurazione (d)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- C5, n. 39 esapodi in legno spessore 2 mm su base in tela di cotone

### **Risultati e conclusioni relative all'esperimento n.1 [A-B-C]**

Nel caso degli esperimenti A e B, il sistema è instabile qualsiasi sia la geometria della singola particella. A partire dal diametro alla base pari a 20 cm il sistema è maggiormente stabile. La condizione C4 ha un grado di permeabilità minore ma è anche più instabile.



^ L'impiego di bracci robotici ne facilita il processo



**Esperimento n. 2**\_Stabilito che la dimensione minima del diametro della base circolare del cilindro per garantire stabilità fosse pari a 20 cm, il secondo esperimento è stato condotto per stabilire il migliore coefficiente di attrito della base. Ossia l'obiettivo di tale esperimento è stato quello di definire il coefficiente di attrito statico ( $\mu_s$ ) del materiale alla base affinché, dopo aver eliminato il cilindro che conteneva le particelle, fosse stimato il numero di particelle cadute, quindi la stabilità del sistema aggregato e il grado di permeabilità. Il versamento è stato effettuato in maniera manuale ma controllato con altezza di versamento pari a 10 cm da ogni strato all'interno di cilindri a sezione circolare di diametro di dimensioni 20 cm e altezza 42 cm.

Sono stati condotti n. 5 ripetizioni con coefficiente di attrito statico ( $\mu_s$ ) della base pari a 0,73 [tipo D] - 0,80 [tipo E] - 0,40 [tipo F]

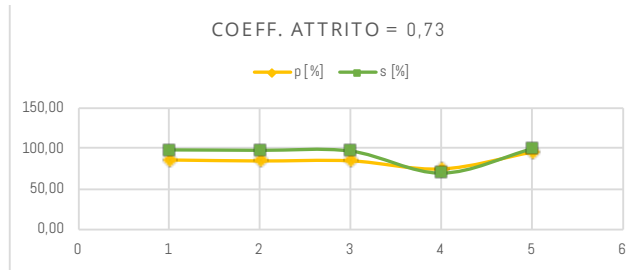
**Tipo D**\_ Sono stati condotti n. 5 ripetizioni con coefficiente di attrito statico ( $\mu_s$ ) della base pari a 0,73

- D1, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- D2, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- D3, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (c)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- D4, n. 39 particelle non trasparenti [configurazione (d)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- D5, n. 39 esapodi in legno spessore 2 mm su base in tela di cotone

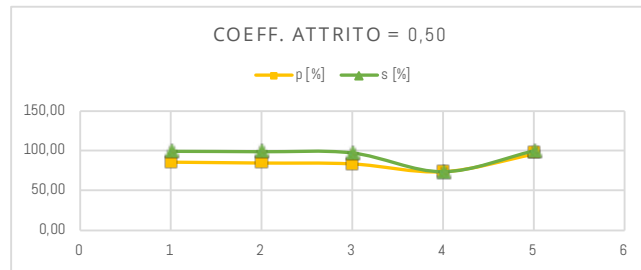
**Tipo E**\_ Sono stati condotti n. 5 ripetizioni con coefficiente di attrito statico ( $\mu_s$ ) della base pari a 0,80

- E1, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore

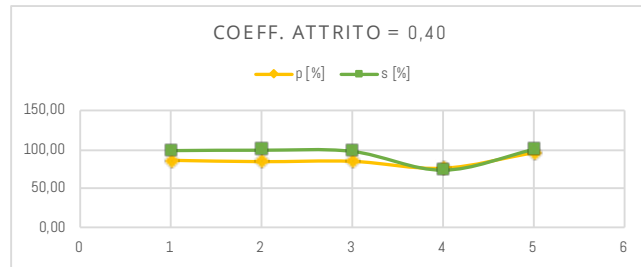
	$\mu_s$	p [%]	s [%]
a	0,73	86,00	98,46
b	0,73	84,78	97,95
c	0,73	84,93	96,92
d	0,73	74,90	69,74
e	0,73	95,76	100,00



	$\mu_s$	p [%]	s [%]
a	0,50	85,87	99,49
b	0,50	84,77	98,97
c	0,50	83,65	97,44
d	0,50	73,79	73,85
e	0,50	95,86	100,00



	$\mu_s$	p [%]	s [%]
a	0,40	86,00	98,46
b	0,40	84,29	98,97
c	0,40	84,70	97,44
d	0,40	75,85	73,33
e	0,40	95,86	100,00



## Definizione della singola componente\_microscala Morfogenesi & Simulazione

re 3 mm su base in plexiglas

■ E2, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in plexiglas

■ E3, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (c)] in PLA di spessore 3 mm su base in plexiglas

■ E4, n. 39 particelle non trasparenti [configurazione (d)] in PLA di spessore 3 mm su base in plexiglas

■ E5, n. 39 esapodi in legno spessore 2 mm su base in plexiglas

**Tipo F** Sono stati condotti n. 5 ripetizioni con coefficiente di attrito statico ( $\mu_s$ ) della base pari a 0,40

■ F1, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in legno

■ F2, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in legno

■ F3, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (c)] in PLA di spessore 3 mm su base in legno

■ F4, n. 39 particelle non trasparenti [configurazione (d)] in PLA di spessore 3 mm su base in legno

■ F5, n. 39 esapodi in legno spessore 2 mm su base in legno

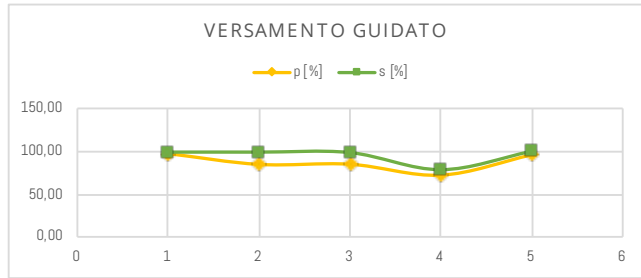
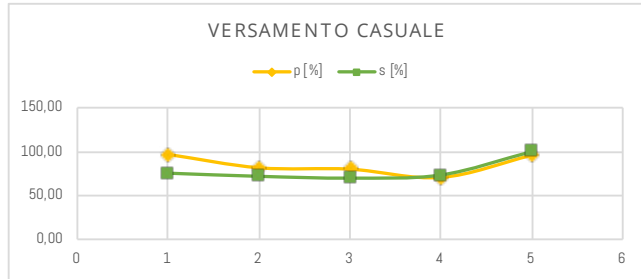
## Risultati e conclusioni all'esperimento n. 2

Tra i risultati osservati, analizzando grado di permeabilità e di stabilità, emerge che l'attrito alla base non influenza la colonna in modo significativo.



	versamento	p [%]	s [%]
a	casuale	96,74	75,38
b	casuale	81,51	71,79
c	casuale	79,96	69,74
d	casuale	70,52	73,33
e	casuale	95,86	100,00

	versamento	p [%]	s [%]
a	guidato	97,22	98,97
b	guidato	84,62	98,97
c	guidato	84,85	98,46
d	guidato	72,08	78,46
e	guidato	95,86	100,00



**Esperimento n. 3** Stabilita la dimensione minima del diametro della base pari a 20 cm, l'esperimento n. 3 ha riguardato la verifica della stabilità del sistema aggregato se sottoposto a versamento manuale casuale [tipo G] o guidato [tipo H]

**Tipo G** Sono stati condotti n. 5 ripetizioni con versamento manuale casuale

- G1, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- G2, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- G3, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (c)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- G4, n. 39 particelle non trasparenti [configurazione (d)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- G5, n. 39 esapodi in legno spessore 2 mm su base in tela di cotone

**Tipo H** Sono stati condotti n. 5 ripetizioni con versamento manuale guidato

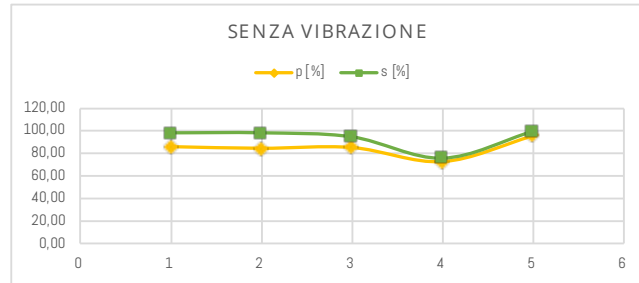
- H1, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- H2, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- H3, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (c)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- H4, n. 39 particelle non trasparenti [configurazione (d)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- H5, n. 39 esapodi in legno spessore 2 mm su base in tela di cotone

### Risultati e conclusioni all'esperimento n. 3

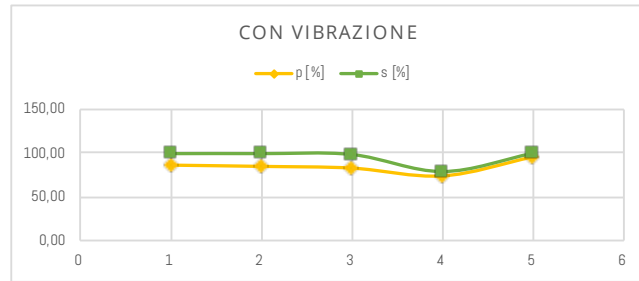
Il versamento manuale e guidato rende il sistema aggregato maggiormente stabile e non incide sul grado di permeabilità.



	vibrazione	p [%]	s [%]
<b>a</b>	no	86,16	98,46
<b>b</b>	no	84,70	98,46
<b>c</b>	no	85,40	94,87
<b>d</b>	no	72,84	75,90
<b>e</b>	no	95,86	100,00



	vibrazione	p [%]	s [%]
<b>a</b>	si	86,31	99,49
<b>b</b>	si	84,87	99,49
<b>c</b>	si	82,91	98,46
<b>d</b>	si	74,00	78,97
<b>e</b>	si	95,86	100,00



**Esperimento n. 4**\_Stabilita la dimensione minima del diametro della base pari a 20 cm, il fatto che il versamento avvenisse in maniera manuale e guidata, l'esperimento n. 4 ha riguardato la verifica della stabilità del sistema aggregato se non sottoposto a vibrazione [tipo I] o a vibrazione manuale [tipo L].

**Tipo I**\_Sono stati condotti n. 5 ripetizioni senza vibrazione

- I1, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- I2, n. 39 particelle per metà trasparenti[configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- I3, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (c)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- I4, n. 39 particelle non trasparenti [configurazione (d)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- I5, n. 39 esapodi in legno spessore 2 mm su base in tela di cotone

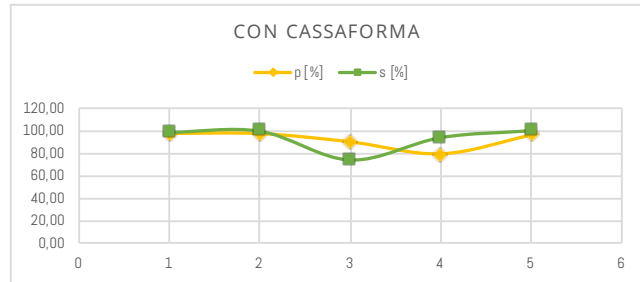
**Tipo L**\_Sono stati condotti n. 5 ripetizioni con vibrazione manuale

- L1, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- L2, n. 39 particelle per metà trasparenti[configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- L3, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (c)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- L4, n. 39 particelle non trasparenti [configurazione (d)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- L5, n. 39 esapodi in legno spessore 2 mm su base in tela di cotone

#### **Risultati e conclusioni all'esperimento n. 4**

La vibrazione manuale aumenta sensibilmente la stabilità del sistema.

	cassaforma	p [%]	s [%]
a	si	97,59	98,46
b	si	97,39	99,49
c	si	90,05	73,85
d	si	79,35	93,85
e	si	96,12	100,00





**Esperimento n. 5**\_ Stabilita la dimensione minima del diametro della base pari a 20 cm, il fatto che il versamento avvenisse in maniera manuale e guidata e che il sistema venisse sottoposto a vibrazione manuale l'esperimento n. 5 [tipo M] ha riguardato la verifica della stabilità del sistema aggregato se all'interno dello stesso venisse inserito uno pneumatico, ossia una cassaforma interna, successivamente rimossa. Affinché l'effetto della presenza della cassaforma interna fosse significativo, si è deciso di inserire un numero di palloncini pari a 3 e di diametro superiore alla metà dei bracci. Ovvero, la cassaforma interna è costituita da n. 3 palloncini, di diametro pari a 6 cm e di volume ognuno circa 113,10 cm<sup>3</sup>.

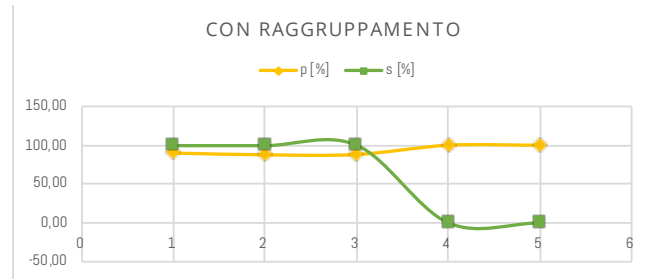
**Tipo M**\_ Sono stati condotti n. 5 ripetizioni inserendo una cassaforma interna pneumatica successivamente rimossa

- M1, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- M2, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- M3, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (c)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- M4, n. 39 particelle non trasparenti [configurazione (d)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- M5, n. 39 esapodi in legno spessore 2 mm su base in tela di cotone

### **Risultati e conclusioni all'esperimento n. 5**

La presenza della cassaforma interna delle dimensioni scelte rende il sistema più permeabile e non incide in maniera significativa sul grado di stabilità.

	raggrupp.	p [%]	s [%]
<b>a</b>	sì	89,94	99,49
<b>b</b>	sì	87,65	99,49
<b>c</b>	sì	88,08	100,00
<b>d</b>	sì	100,00	0,00
<b>e</b>	sì	100,00	0,00



**Esperimento n. 6**\_Stabilita la dimensione minima del diametro della base pari a 20 cm, il fatto che il versamento avvenisse in maniera manuale e guidata e che il sistema venisse sottoposto a vibrazione manuale l'esperimento n. 6 [tipo N] ha riguardato la verifica della stabilità del sistema aggregato se prima di versare le particelle queste venissero preventivamente aggregate in gruppi di tre e quindi successivamente tali raggruppamenti fossero versati all'interno del cilindro.

**Tipo N**\_Sono stati condotti n. 5 ripetizioni raggruppando preventivamente le componenti

- N1, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- N2, n. 39 particelle per metà trasparenti[configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- N3, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (c)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- N4, n. 39 particelle non trasparenti [configurazione (d)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- N5, n. 39 esapodi in legno spessore 2 mm su base in tela di cotone

### **Risultati e conclusioni all'esperimento n. 6**

Il raggruppamento non è possibile nel caso N4 ed N5. N1 N2 e N3 hanno raggiunto un grado di stabilità pari al 100%, ovvero nessuna delle particelle è stata dispersa. Il grado di permeabilità maggiore si è ottenuto in N1.

**Esperimento n. 7\_** Stabilita la dimensione minima del diametro della base pari a 20 cm, il fatto che il versamento avvenisse in maniera manuale e guidata e che il sistema venisse sottoposto a vibrazione manuale l'esperimento n. 7 ha riguardato la verifica della stabilità del sistema aggregato sia nel caso di aggregazione esclusivamente per incastro [tipo 0] che nel caso di aggiunta di fil di ferro di spessore 1 mm, posato per ogni strato [tipo P] se sottoposto a forza orizzontale con l'obiettivo di verificare se ne aumentasse la stabilità. A tal proposito è stata realizzata una tavola vibrante, mobile lungo una direzione, di dimensioni 70 x 100 cm in modo da poter versare su di essa contemporaneamente sistemi aggregati di particelle trasparenti [configurazione (a)] e per metà trasparenti [configurazione (b)]. A tale tavola è stata poi applicata una forza orizzontale perpendicolare alla dimensione maggiore. Tramite accelerometro solidale alla tavola vibrante è stata misurata l'accelerazione che ne ha creato l'instabilità, ovvero quella che ha disaggregato il sistema. Poiché per questo esperimento il rapporto tra base e altezza è stato determinante, si è scelto di versare un totale di 39 particelle raggruppate in gruppi di tre all'interno di una cassaforma cilindrica di diametro alla base pari a 23 cm, quindi maggiore rispetto ai 20 cm degli esperimenti precedenti. Questo ha permesso di posizionare manualmente ma in maniera guidata i singoli raggruppamenti e sottoporre a una vibrazione maggiore il sistema aggregato. Inoltre, sulla base dei dati raccolti dai precedenti esperimenti [A-B-C-D-E-F-G-H-I-L-M-N] poiché l'aggregato composto da particelle non trasparenti in PLA di spessore 3 mm e quello composto dagli esapodi in legno di spessore 2 mm risultavano maggiormente instabili, si è scelto di escluderli da tale esperimento.

**Tipo 0\_** Sono stati condotti n. 5 ripetizioni sottoponendo le compo-

## Definizione della singola componente\_microscala Morfogenesi & Simulazione

nenti a solo incastro

- 01, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- 02, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone

**Tipo P\_** Sono stati condotti n. 5 ripetizioni sottoponendo le componenti a incastro con aggiunta di fil di ferro

- P1, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone
- P2, n. 39 particelle per metà trasparenti [configurazione (b)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone

### **Risultati e conclusioni all'esperimento n. 7**

Nel caso di aggregazione esclusivamente per incastro [tipo 0], la disgregazione del sistema è avvenuta per accelerazione media pari a  $2,26 \text{ m/s}^2$ , ovvero di un rapporto  $a/a_g=0,230$ , nel caso di sistema totalmente trasparente e di accelerazione media pari a  $2,14 \text{ m/s}^2$ , ovvero di un rapporto  $a/a_g=0,218$ , nel caso di sistema parzialmente trasparente.

Nel caso di aggregazione per incastro con aggiunta di fil di ferro di spessore 1 mm [tipo P], la disgregazione del sistema è avvenuta per accelerazione media pari a  $3,32 \text{ m/s}^2$ , ovvero di un rapporto  $a/a_g=0,34$ , nel caso di sistema totalmente trasparente e di accelerazione media pari a  $3,04 \text{ m/s}^2$ , ovvero di un rapporto  $a/a_g=0,31$ , nel caso di sistema parzialmente trasparente.

**Esperimento n. 8\_** Infine, stabilita la dimensione minima del diametro della base pari a 20 cm, il fatto che il versamento avvenisse in maniera manuale e guidata, che il sistema venisse sottoposto a vibrazione manuale e che le particelle fossero raggruppate in gruppi composti da tre elementi, l'esperimento n. 8 [tipo Q] ha riguardato la verifica della stabilità del sistema aggregato quando sottoposto a carico assiale. Formato il sistema aggregato, eliminata la cassa-forma esterna, è stata posta una tavola di MDF in sommità e su di questa collocato un peso di volta in volta variabile. Oltre alla stabilità del sistema tramite questo esperimento è stato misurato l'abbassamento complessivo del sistema aggregato.

**Tipo Q\_** Sono stati condotti n. 5 ripetizioni sottoponendo il sistema aggregato a un carico di peso pari a 2 - 4 - 6 - 8 - 10 Kg.

■ Q1, n. 39 particelle trasparenti [configurazione (a)] in PLA di spessore 3 mm su base in tela di cotone

### **Risultati e conclusioni all'esperimento n. 8**

L'abbassamento del sistema aggregato è stato di volta in volta dell'ordine di 1-2 cm. Inoltre, è stato osservato che il collasso del sistema aggregato è avvenuto appena il sistema è stato sottoposto a un carico pari a 10 Kg.

### **Risultati e conclusioni agli esperimenti\_il modello definitivo**

Dagli esperimenti condotti è emerso che la stabilità del sistema aggregato è favorita:

- aumentando il diametro della base, nel caso in cui tale diametro sia simile a quello della particella
- aumentando la dimensione delle particelle, se sono significativamente più piccole del diametro del cilindro, fino a una soglia limite per cui si ottiene l'effetto opposto di instabilità
- aumentando l'attrito della base, ossia il primo strato di particelle è stabilizzato
- facendo vibrare il sistema diminuisce la distanza tra le particelle
- migliorando la geometria intrinseca
- migliorando il coefficiente di attrito tra le particelle, in questi esperimenti è passato da 0,4 a 1 ed è stato significativo

L'obiettivo che ha guidato l'intero iter di definizione della geometria della singola componente che si è detto ha proceduto per iterazioni successive è stato quello di raggiungere un equilibrio tra stabilità del sistema aggregato e maggior grado di permeabilità. Tale da non avere la percezione della solidità del materiale ma garantendone anche la stabilità.

Gli obiettivi raggiunti sono stati:

- forma concava e convessa per allargare il nucleo e aumentare la permeabilità
- geometria tridimensionale ottenuta dall'incastro di parti bidimensionali
- geometria per favorire l'aggregazione a secco
- stabilità
- trasparenza
- facilità nel processo produttivo





Definizione della singola componente\_microscala  
Morfogenesi & Simulazione

### Esperimento n. 1\_A-B-C

Exp. C1 - [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	1	0	1	0
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	16	20	18	18	19
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1006,31	1256,64	1130,97	1130,97	1193,80
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	167,7	163,4	167,7	163,4	167,7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	837,61	1093,24	963,27	967,57	1026,10
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\beta$ [%]	83,32	87,00	85,17	85,55	85,95
Grado di stabilità s [%]	100,00	97,44	100,00	97,44	100,00

Exp. C2 - [configurazione (b)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	1	1	1	1	0
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	18	20	20	18	21
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1130,97	1256,64	1256,64	1130,97	1319,47
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	182,4	182,4	182,4	182,4	187,2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	948,57	1074,24	1074,24	948,57	1132,27
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\beta$ [%]	83,87	85,49	85,49	83,87	85,81
Grado di stabilità s [%]	97,44	97,44	97,44	97,44	100,00

Exp. C3 - [configurazione (c)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	1	0	1	2	1
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	20	10	20	17	20
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1256,64	628,32	1256,64	1068,14	1256,64
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	182,4	187,2	182,4	177,6	182,4
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1074,24	441,12	1074,24	890,54	1074,24
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\beta$ [%]	85,49	70,21	85,49	83,37	85,49
Grado di stabilità s [%]	97,44	100,00	97,44	94,87	97,44

Exp. C4 - [configurazione (d)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	11	11	10	9	10
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	17	13	15	11	16
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1068,14	816,81	942,48	691,15	1005,31
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	210	210	217,5	225	217,5
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	858,14	606,81	724,98	466,15	787,81
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\beta$ [%]	80,34	74,29	76,82	87,45	78,36
Grado di stabilità s [%]	71,79	71,79	74,86	76,92	74,36

Exp. C5 - [configurazione (e)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	30	30	30	30	30
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1884,95	1884,95	1884,95	1884,95	1884,95
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	78	78	78	78	78
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1806,95	1806,95	1806,95	1806,95	1806,95
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\beta$ [%]	95,86	95,86	95,86	95,86	95,86
Grado di stabilità s [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Exp. D1 - [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	1	1	1	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	20	19	18	18	19
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1256.64	1193.80	1130.97	1130.97	1193.80
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	167.7	163.4	163.4	163.4	167.7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1088.94	1030.40	967.57	967.57	1026.10
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilit� [ % ]	86.65	86.31	85.55	85.55	85.95
Grado di stabilit� s [ % ]	100.00	97.44	97.44	97.44	100.00

Exp. D2 - [configurazione (b)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	1	1	1	1	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	19	19	20	18	20
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1193.80	1193.80	1256.64	1130.97	1256.64
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	182.4	182.4	182.4	182.4	182.2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1011.40	1011.40	1074.24	948.57	1069.44
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilit� [ % ]	84.72	84.72	85.49	83.87	85.10
Grado di stabilit� s [ % ]	97.44	97.44	97.44	97.44	100.00

Exp. D3 - [configurazione (c)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	2	1	0	1	2
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	19	20	18	19	20
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1193.80	1256.64	1130.97	1193.80	1256.64
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	177.6	182.4	187.2	182.4	177.6
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1016.20	1074.24	943.77	1011.40	1079.04
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilit� [ % ]	85.12	85.49	83.45	84.72	85.87
Grado di stabilit� s [ % ]	94.87	97.44	100.00	97.44	94.87

Exp. D4 - [configurazione (d)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	11	13	12	12	11
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	15	11	13	11	16
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	942.48	691.15	816.81	691.15	1005.31
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	210	195	202.5	202.5	210
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	732.48	496.15	614.31	488.65	795.31
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilit� [ % ]	77.72	71.79	75.21	70.70	79.11
Grado di stabilit� s [ % ]	71.79	86.67	69.23	69.23	71.79

Exp. D5 - [configurazione (e)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	40	40	40	40	40
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	30	30	30	30	30
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1884.95	1884.95	1884.95	1884.95	1884.95
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	80	80	80	80	80
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1804.95	1804.95	1804.95	1804.95	1804.95
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilit� [ % ]	95.76	95.76	95.76	95.76	95.76
Grado di stabilit� s [ % ]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Exp. E1 - [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	1	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	19	19	18	19	19
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1193.80	1193.80	1130.97	1193.80	1193.80
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	167.7	167.7	163.4	163.4	167.7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1026.10	1026.10	963.27	1030.40	1026.10
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilit� [ % ]	85.95	85.95	85.17	86.31	85.95
Grado di stabilit� s [ % ]	100.00	100.00	100.00	97.44	100.00

Exp. E2 - [configurazione (b)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	1	1	0	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	20	19	20	18	20
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1256.64	1193.80	1256.64	1130.97	1256.64
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	187.2	182.4	182.4	187.2	187.2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1069.44	1011.40	1074.24	943.77	1069.44
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilit� [ % ]	85.10	84.72	85.49	83.45	85.10
Grado di stabilit� s [ % ]	100.00	97.44	97.44	100.00	100.00

Exp. E3 - [configurazione (c)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	1	2	1	0	1
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	18	19	17	17	18
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1130.97	1193.80	1068.14	1068.14	1130.97
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	182.4	177.6	182.4	187.2	182.4
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	948.57	1016.20	885.74	880.94	948.57
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilit� [ % ]	83.87	85.12	82.92	82.47	83.87
Grado di stabilit� s [ % ]	97.44	94.87	97.44	100.00	97.44

Exp. E4 - [configurazione (d)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	11	10	11	9	10
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	17	11	13	11	16
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1068.14	691.15	816.81	691.15	1005.31
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	210	217.5	210	225	217.5
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	858.14	473.65	606.81	466.15	787.81
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilit� [ % ]	80.34	88.53	74.29	67.45	78.36
Grado di stabilit� s [ % ]	71.79	74.36	71.79	76.92	74.36

Exp. E5 - [configurazione (e)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	30	30	30	30	30
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1884.95	1884.95	1884.95	1884.95	1884.95
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	78	78	78	78	78
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1806.95	1806.95	1806.95	1806.95	1806.95
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilit� [ % ]	95.86	95.86	95.86	95.86	95.86
Grado di stabilit� s [ % ]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Definizione della singola componente\_microscala  
Morfogenesi & Simulazione

## Esperimento n. 2\_D-E-F

<b>Esp. F1 - [configurazione (a)]</b>	<b>Ripetizione n. 1</b>	<b>Ripetizione n. 2</b>	<b>Ripetizione n. 3</b>	<b>Ripetizione n. 4</b>	<b>Ripetizione n. 5</b>
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	1	1	0	1	0
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	18	19	20	19	18
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1130,97	1193,80	1256,64	1193,80	1130,97
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	163,4	163,4	167,7	163,4	167,7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	967,57	1030,40	1088,94	1030,40	963,27
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\beta$ [%]	85,55	86,31	86,65	86,31	85,17
Grado di stabilità s [%]	97,44	97,44	100,00	97,44	100,00

<b>Esp. F2 - [configurazione (b)]</b>	<b>Ripetizione n. 1</b>	<b>Ripetizione n. 2</b>	<b>Ripetizione n. 3</b>	<b>Ripetizione n. 4</b>	<b>Ripetizione n. 5</b>
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	1	1	0	0	0
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	19	19	18	18	20
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1193,80	1193,80	1130,97	1130,97	1256,64
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	182,4	182,4	187,2	187,2	187,2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1011,40	1011,40	943,77	943,77	1069,44
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\beta$ [%]	84,72	84,72	83,45	83,45	85,10
Grado di stabilità s [%]	97,44	97,44	100,00	100,00	100,00

<b>Esp. F3 - [configurazione (c)]</b>	<b>Ripetizione n. 1</b>	<b>Ripetizione n. 2</b>	<b>Ripetizione n. 3</b>	<b>Ripetizione n. 4</b>	<b>Ripetizione n. 5</b>
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	1	2	0	1	1
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	19	19	18	19	20
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1193,80	1193,80	1130,97	1193,80	1256,64
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	182,4	177,6	187,2	182,4	182,4
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1011,40	1016,20	943,77	1011,40	1074,24
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\beta$ [%]	84,72	85,12	83,45	84,72	85,49
Grado di stabilità s [%]	97,44	94,87	100,00	97,44	97,44

<b>Esp. F4 - [configurazione (d)]</b>	<b>Ripetizione n. 1</b>	<b>Ripetizione n. 2</b>	<b>Ripetizione n. 3</b>	<b>Ripetizione n. 4</b>	<b>Ripetizione n. 5</b>
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	11	11	10	11	9
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	15	12	17	12	18
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	942,48	753,98	1068,14	753,98	1005,31
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	210	210	217,5	210	225
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	732,48	543,98	850,64	543,98	780,31
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\beta$ [%]	77,72	72,15	79,64	72,15	77,62
Grado di stabilità s [%]	71,79	71,79	74,36	71,79	76,92

<b>Esp. F5 - [configurazione (e)]</b>	<b>Ripetizione n. 1</b>	<b>Ripetizione n. 2</b>	<b>Ripetizione n. 3</b>	<b>Ripetizione n. 4</b>	<b>Ripetizione n. 5</b>
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	30	30	30	30	30
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1884,95	1884,95	1884,95	1884,95	1884,95
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	78	78	78	78	78
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1806,95	1806,95	1806,95	1806,95	1806,95
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\beta$ [%]	95,86	95,86	95,86	95,86	95,86
Grado di stabilità s [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

## Esperimento n. 3\_G-H

Esp. G1 - [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	10	9	11	10	8
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	13	12	13	11	13
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	4084.07	3769.91	4084.07	3455.75	4084.07
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	124.7	129	120.4	124.7	133.3
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	3959.37	3640.91	3963.67	3331.05	3950.77
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	96.95	96.58	97.05	96.39	96.74
Grado di stabilità s [%]	74.36	76.92	71.79	74.36	79.49

Esp. G2 - [configurazione (b)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	11	12	11	10	11
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	12	12	11	11	12
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	753.98	753.98	691.15	691.15	753.98
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	134.4	129.6	134.4	139.2	134.4
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	619.58	624.38	556.75	551.95	619.58
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	82.17	82.81	80.55	79.86	82.17
Grado di stabilità s [%]	71.79	69.23	71.79	74.36	71.79

Esp. G3 - [configurazione (c)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	12	12	13	11	11
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	11	10	11	10	10
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	691.15	628.32	691.15	628.32	628.32
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	129.6	129.6	124.8	134.4	134.4
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	561.55	498.72	566.35	493.92	493.92
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	81.25	79.37	81.94	78.61	78.61
Grado di stabilità s [%]	69.23	69.23	66.67	71.79	71.79

Esp. G4 - [configurazione (d)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	11	11	10	11	9
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	12	12	11	11	12
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	753.98	753.98	691.15	691.15	753.98
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	210	210	217.5	210	225
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	543.98	543.98	473.65	481.15	528.98
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	72.15	72.15	68.53	69.62	70.16
Grado di stabilità s [%]	71.79	71.79	74.36	71.79	76.92

Esp. G5 - [configurazione (e)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	30	30	30	30	30
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1884.95	1884.95	1884.95	1884.95	1884.95
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	78	78	78	78	78
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1806.95	1806.95	1806.95	1806.95	1806.95
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	95.86	95.86	95.86	95.86	95.86
Grado di stabilità s [%]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Esp. H1 - [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	1	0	1	0	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	19	19	18	20	19
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	5969.02	5969.02	5654.86	6283.18	5969.02
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	163.4	167.7	163.4	167.7	167.7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	5805.62	5801.32	5491.46	6115.48	5801.32
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	97.26	97.19	97.11	97.33	97.19
Grado di stabilità s [%]	97.44	100.00	97.44	100.00	100.00

Esp. H2 - [configurazione (b)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	1	1	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	19	20	19	18	20
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1193.80	1256.64	1193.80	1130.97	1256.64
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	187.2	187.2	182.4	182.4	187.2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1006.60	1069.44	1011.40	948.57	1069.44
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	84.32	85.10	84.72	83.87	85.10
Grado di stabilità s [%]	100.00	100.00	97.44	97.44	100.00

Esp. H3 - [configurazione (c)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	1	1	0	1	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	20	20	18	19	20
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1256.64	1256.64	1130.97	1193.80	1256.64
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	182.4	182.4	187.2	182.4	187.2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1074.24	1074.24	943.77	1011.40	1069.44
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	85.49	85.49	83.45	84.72	85.10
Grado di stabilità s [%]	97.44	97.44	100.00	97.44	100.00

Esp. H4 - [configurazione (d)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	9	9	8	9	7
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	16	14	11	11	15
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1005.31	879.65	691.15	691.15	942.48
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	225	225	232.5	225	240
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	780.31	654.65	458.65	466.15	702.48
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	77.62	74.42	66.36	67.45	74.54
Grado di stabilità s [%]	76.92	76.92	79.49	76.92	82.05

Esp. H5 - [configurazione (e)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	30	30	30	30	30
Volume tot dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1884.95	1884.95	1884.95	1884.95	1884.95
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	78	78	78	78	78
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1806.95	1806.95	1806.95	1806.95	1806.95
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	95.86	95.86	95.86	95.86	95.86
Grado di stabilità s [%]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

## Definizione della singola componente\_microscala Morfogenesi & Simulazione

Exp. I1 - [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	1	1	1	0	0
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	19	19	18	20	19
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1193,80	1193,80	1130,97	1256,64	1193,80
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	163,4	163,4	163,4	167,7	167,7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1030,40	1030,40	967,57	1088,94	1026,10
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	86,31	86,31	85,55	86,65	85,95
Grado di stabilità s [%]	97,44	97,44	97,44	100,00	100,00

Exp. I2 - [configurazione (b)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	1	1	1	0
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	19	20	19	18	20
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1193,80	1256,64	1193,80	1130,97	1256,64
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	187,2	182,4	182,4	182,4	187,2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1006,60	1074,24	1011,40	948,57	1069,44
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	84,32	85,49	84,72	83,87	85,10
Grado di stabilità s [%]	100,00	97,44	97,44	97,44	100,00

Exp. I3 - [configurazione (c)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	2	3	2	1	2
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	20	20	19	18	20
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1256,64	1256,64	1193,80	1130,97	1256,64
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	177,6	172,8	177,6	182,4	177,6
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1079,04	1083,84	1016,20	948,57	1079,04
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	85,87	86,25	85,12	83,87	85,87
Grado di stabilità s [%]	94,87	92,31	94,87	97,44	94,87

Exp. I4 - [configurazione (d)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	9	11	9	7	11
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	16	14	11	11	15
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1005,31	879,65	691,15	691,15	942,48
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	225	210	225	240	210
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	780,31	669,65	466,15	451,15	732,48
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	77,62	76,13	67,45	65,28	77,72
Grado di stabilità s [%]	76,92	71,79	76,92	82,05	71,79

Exp. I5 - [configurazione (e)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	30	30	30	30	30
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1884,95	1884,95	1884,95	1884,95	1884,95
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	78	78	78	78	78
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1806,95	1806,95	1806,95	1806,95	1806,95
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	95,86	95,86	95,86	95,86	95,86
Grado di stabilità s [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

## Esperimento n. 4\_I-L

Exp. L1 - [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	1	0	0
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	20	19	19	20	19
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1256,64	1193,80	1193,80	1256,64	1193,80
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	167,7	167,7	163,4	167,7	167,7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1088,94	1026,10	1030,40	1088,94	1026,10
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	86,65	85,95	86,31	86,65	85,95
Grado di stabilità s [%]	100,00	100,00	97,44	100,00	100,00

Exp. L2 - [configurazione (b)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	1	0
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	19	20	20	19	20
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1193,80	1256,64	1256,64	1193,80	1256,64
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	187,2	187,2	187,2	182,4	187,2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1006,60	1069,44	1069,44	1011,40	1069,44
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	84,32	85,10	85,10	84,72	85,10
Grado di stabilità s [%]	100,00	100,00	100,00	97,44	100,00

Exp. L3 - [configurazione (c)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	1	0	1	1	0
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	17	18	18	17	16
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1068,14	1130,97	1130,97	1068,14	1005,31
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	182,4	187,2	182,4	182,4	187,2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	885,74	943,77	948,57	885,74	818,11
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	82,92	83,45	83,87	82,92	81,38
Grado di stabilità s [%]	97,44	100,00	97,44	97,44	100,00

Exp. L4 - [configurazione (d)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	9	8	8	9	7
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	15	15	13	13	15
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	942,48	942,48	816,81	816,81	942,48
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	225	232,5	232,5	225	240
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	717,48	709,98	584,31	591,81	702,48
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	76,13	75,33	71,54	72,45	74,54
Grado di stabilità s [%]	76,92	79,49	79,49	76,92	82,05

Exp. L5 - [configurazione (e)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diametro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	30	30	30	30	30
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1884,95	1884,95	1884,95	1884,95	1884,95
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	78	78	78	78	78
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1806,95	1806,95	1806,95	1806,95	1806,95
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	95,86	95,86	95,86	95,86	95,86
Grado di stabilità s [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

## Esperimento n. 5\_M

Exp. M1 - [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	1	0	1	1	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	22	21	23	22	21
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	6911,50	6597,34	7225,66	6911,50	6597,34
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	163,4	167,7	163,4	163,4	167,7
Volume della cassaforma interna [cm <sup>3</sup> ]	339,3	339,3	339,3	339,3	339,3
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	6748,10	6429,64	7062,26	6748,10	6429,64
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	97,64	97,46	97,74	97,64	97,46
Grado di stabilità s [%]	97,44	100,00	97,44	97,44	100,00

Exp. M2 - [configurazione (b)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	1	0	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	21	23	24	22	24
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	6597,34	7225,66	7539,82	6911,50	7539,82
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	187,2	187,2	182,4	187,2	187,2
Volume della cassaforma interna [cm <sup>3</sup> ]	339,3	339,3	339,3	339,3	339,3
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	6410,14	7038,46	7357,42	6724,30	7352,62
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	97,16	97,41	97,58	97,29	97,52
Grado di stabilità s [%]	100,00	100,00	97,44	100,00	100,00

Exp. M3 - [configurazione (c)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	10	9	10	11	11
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	22	21	21	23	24
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1382,30	1319,47	1319,47	1445,13	1507,96
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	139,2	144	139,2	134,4	134,4
Volume della cassaforma interna [cm <sup>3</sup> ]	339,3	339,3	339,3	339,3	339,3
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1243,10	1175,47	1180,27	1310,73	1373,56
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	89,93	89,09	89,45	90,70	91,09
Grado di stabilità s [%]	74,36	76,92	74,36	71,79	71,79

Exp. M4 - [configurazione (d)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	5	3	1	0	3
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	21	22	20	21	22
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1319,47	1382,30	1256,64	1319,47	1382,30
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	255	270	285	282,5	270
Volume della cassaforma interna [cm <sup>3</sup> ]	339,3	339,3	339,3	339,3	339,3
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1064,47	1112,30	971,64	1026,97	1112,30
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	80,67	80,47	77,32	77,83	80,47
Grado di stabilità s [%]	87,18	92,31	97,44	100,00	92,31

Exp. M5 - [configurazione (e)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	32	32	32	32	32
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	2010,62	2010,62	2010,62	2010,62	2010,62
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	78	78	78	78	78
Volume della cassaforma interna [cm <sup>3</sup> ]	339,3	339,3	339,3	339,3	339,3
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1932,62	1932,62	1932,62	1932,62	1932,62
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	96,12	96,12	96,12	96,12	96,12
Grado di stabilità s [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

## Esperimento n. 6\_N

Exp. N1 - [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	1	0	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	27	26	26	27	26
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1696,46	1633,63	1633,63	1696,46	1633,63
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	167,7	167,7	163,4	167,7	167,7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1528,76	1465,93	1470,23	1528,76	1465,93
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	90,11	88,73	90,00	90,11	89,73
Grado di stabilità s [%]	100,00	100,00	97,44	100,00	100,00

Exp. N2 - [configurazione (b)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	1	0	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	24	24	24	24	24
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1507,96	1507,96	1507,96	1507,96	1507,96
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	187,2	187,2	182,4	187,2	187,2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1320,76	1320,76	1325,56	1320,76	1320,76
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	87,59	87,59	87,90	87,59	87,59
Grado di stabilità s [%]	100,00	100,00	97,44	100,00	100,00

Exp. N3 - [configurazione (c)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	25	25	25	25	25
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1570,80	1570,80	1570,80	1570,80	1570,80
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	187,2	187,2	187,2	187,2	187,2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1383,60	1383,60	1383,60	1383,60	1383,60
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	88,08	88,08	88,08	88,08	88,08
Grado di stabilità s [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Exp. N4 - [configurazione (d)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	39	39	39	39	39
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	15	17	16	17	16
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	942,48	1068,14	1005,31	1068,14	1005,31
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	0	0	0	0	0
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	942,477	1068,1406	1005,3088	1068,1406	1005,3088
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Grado di stabilità s [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Exp. N5 - [configurazione (e)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	39	39	39	39	39
Diámetro base [cm]	20	20	20	20	20
Altezza raggiunta [cm]	20	19	19	20	19
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1256,64	1193,80	1193,80	1256,64	1193,80
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	0	0	0	0	0
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1256,64	1193,80	1193,80	1256,64	1193,80
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Grado di stabilità s [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

## Definizione della singola componente\_microscala Morfogenesi & Simulazione

<b>Esp. 01 - [configurazione (a)]</b>	<b>Ripetizione n. 1</b>	<b>Ripetizione n. 2</b>	<b>Ripetizione n. 3</b>	<b>Ripetizione n. 4</b>	<b>Ripetizione n. 5</b>
n. particelle versate	39	39	39	39	39
Accelerazione massima [m/s <sup>2</sup> ]	2,1	2,6	2,2	2,3	2,1
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diametro base [cm]	23	23	23	23	23
Altezza raggiunta iniziale [cm]	20	20	20	20	20
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	8309,51	8309,51	8309,51	8309,51	8309,51
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	167,7	167,7	167,7	167,7	167,7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	8141,81	8141,81	8141,81	8141,81	8141,81
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	95,38	94,97	95,14	95,38	95,31
Grado di stabilità s [%]	74,36	76,92	74,36	74,36	71,79

<b>Esp. 02 - [configurazione (b)]</b>	<b>Ripetizione n. 1</b>	<b>Ripetizione n. 2</b>	<b>Ripetizione n. 3</b>	<b>Ripetizione n. 4</b>	<b>Ripetizione n. 5</b>
n. particelle versate	39	39	39	39	39
Accelerazione massima [m/s <sup>2</sup> ]	2,2	2,3	2,1	2,0	2,1
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diametro base [cm]	23	23	23	23	23
Altezza raggiunta iniziale [cm]	19	19	19	19	19
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	7894,03	7894,03	7894,03	7894,03	7894,03
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	187,2	187,2	187,2	187,2	187,2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	7706,83	7706,83	7706,83	7706,83	7706,83
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	95,38	94,97	95,14	95,38	95,31
Grado di stabilità s [%]	74,36	76,92	74,36	74,36	71,79

## Esperimento n. 7\_0-P

<b>Esp. P1- [configurazione (a)]</b>	<b>Ripetizione n. 1</b>	<b>Ripetizione n. 2</b>	<b>Ripetizione n. 3</b>	<b>Ripetizione n. 4</b>	<b>Ripetizione n. 5</b>
n. particelle versate	39	39	39	39	39
Accelerazione massima [m/s <sup>2</sup> ]	3,2	3,4	3,3	3,5	3,2
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diametro base [cm]	23	23	23	23	23
Altezza raggiunta iniziale [cm]	22	22	22	22	22
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1589,64	1589,64	1589,64	1589,64	1589,64
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	167,7	167,7	167,7	167,7	167,7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1421,94	1421,94	1421,94	1421,94	1421,94
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	95,38	94,97	95,14	95,38	95,31
Grado di stabilità s [%]	74,36	76,92	74,36	74,36	71,79

<b>Esp. P2- [configurazione (b)]</b>	<b>Ripetizione n. 1</b>	<b>Ripetizione n. 2</b>	<b>Ripetizione n. 3</b>	<b>Ripetizione n. 4</b>	<b>Ripetizione n. 5</b>
n. particelle versate	39	39	39	39	39
Accelerazione massima [m/s <sup>2</sup> ]	3,0	2,9	3,1	3,2	3,0
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diametro base [cm]	23	23	23	23	23
Altezza raggiunta iniziale [cm]	21	21	21	21	21
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1517,39	1517,39	1517,39	1517,39	1517,39
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	187,2	187,2	187,2	187,2	187,2
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1330,19	1330,19	1330,19	1330,19	1330,19
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità [%]	95,38	94,97	95,14	95,38	95,31
Grado di stabilità s [%]	74,36	76,92	74,36	74,36	71,79

## Esperimento n. 8\_Q

Esp. Q1- [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diametro base [cm]	23	23	23	23	23
Altezza raggiunta iniziale [cm]	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1264,49	1264,49	1264,49	1264,49	1264,49
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	167,7	167,7	167,7	167,7	167,7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1096,79	1096,79	1096,79	1096,79	1096,79
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\rho$ [%]	95,38	94,97	95,14	95,38	95,31
Grado di stabilità $s$ [%]	74,36	76,92	74,36	74,36	71,79
Peso verticale [Kg]	2	2	2	2	2
Abbassamento [cm]	1,5	1,5	1,3	1,4	1,2

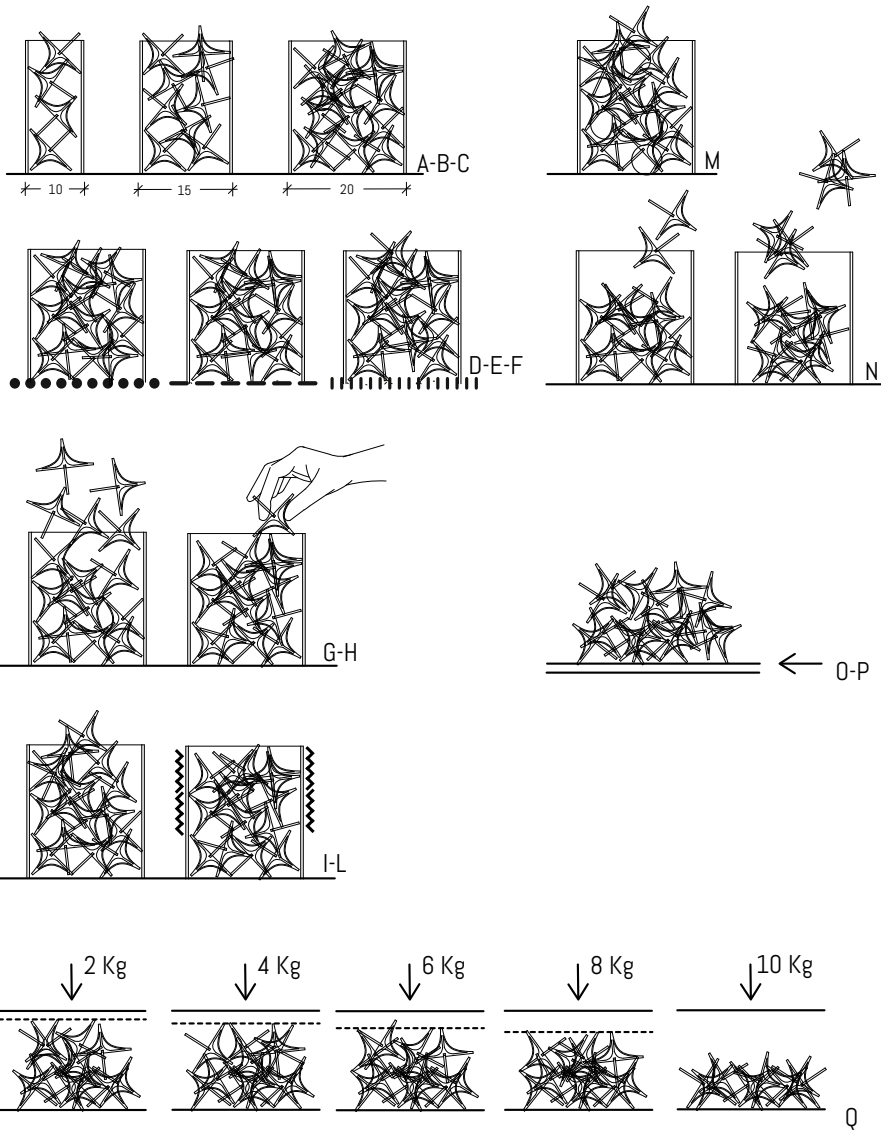
Esp. Q2- [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diametro base [cm]	23	23	23	23	23
Altezza raggiunta iniziale [cm]	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1264,49	1264,49	1264,49	1264,49	1264,49
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	167,7	167,7	167,7	167,7	167,7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1096,79	1096,79	1096,79	1096,79	1096,79
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\rho$ [%]	95,38	94,97	95,14	95,38	95,31
Grado di stabilità $s$ [%]	74,36	76,92	74,36	74,36	71,79
Peso verticale [Kg]	4	4	4	4	4
Abbassamento [cm]	4	3,7	4	4,1	4

Esp. Q3- [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diametro base [cm]	23	23	23	23	23
Altezza raggiunta iniziale [cm]	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1264,49	1264,49	1264,49	1264,49	1264,49
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	167,7	167,7	167,7	167,7	167,7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1096,79	1096,79	1096,79	1096,79	1096,79
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\rho$ [%]	95,38	94,97	95,14	95,38	95,31
Grado di stabilità $s$ [%]	74,36	76,92	74,36	74,36	71,79
Peso verticale [Kg]	6	6	6	6	6
Abbassamento [cm]	4	4	4,2	4,1	4

Esp. Q4- [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diametro base [cm]	23	23	23	23	23
Altezza raggiunta iniziale [cm]	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1264,49	1264,49	1264,49	1264,49	1264,49
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	167,7	167,7	167,7	167,7	167,7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1096,79	1096,79	1096,79	1096,79	1096,79
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\rho$ [%]	95,38	94,97	95,14	95,38	95,31
Grado di stabilità $s$ [%]	74,36	76,92	74,36	74,36	71,79
Peso verticale [Kg]	8	8	8	8	8
Abbassamento [cm]	5,5	5,5	5,3	5,5	5,6

Esp. Q5- [configurazione (a)]	Ripetizione n. 1	Ripetizione n. 2	Ripetizione n. 3	Ripetizione n. 4	Ripetizione n. 5
n. particelle versate	39	39	39	39	39
n. particelle disperse	0	0	0	0	0
Diametro base [cm]	23	23	23	23	23
Altezza raggiunta iniziale [cm]	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
Volume totale dell'aggregato [cm <sup>3</sup> ]	1264,49	1264,49	1264,49	1264,49	1264,49
Volume della parte solida [cm <sup>3</sup> ]	167,7	167,7	167,7	167,7	167,7
Volume della parte vuota [cm <sup>3</sup> ]	1096,79	1096,79	1096,79	1096,79	1096,79
Angolo di attrito	90	90	90	90	90
Grado di permeabilità $\rho$ [%]	95,38	94,97	95,14	95,38	95,31
Grado di stabilità $s$ [%]	74,36	76,92	74,36	74,36	71,79
Peso verticale [Kg]	10	10	10	10	10
Abbassamento [cm]	-	-	-	-	-







## **Definizione del sistema aggregato \_macroscala Morfogenesi & Simulazione**

Secondo l'architettura tradizionale giapponese la *Sukiya* è la sala dove praticare la cerimonia del tè, sobria e priva di distrazioni, è estremamente essenziale. Le parole di Kakuzo Okakura in *Lo zen e la cerimonia del tè* la colgono perfettamente. Egli scrive, *Sukiya* è "Dimora della Fantasia" per il carattere effimero, non è destinata ai posteri; è "Dimora del Vuoto" per la sobrietà degli elementi di cui è costituita e per l'aspirazione al mutamento; è "Dimora dell'Asimmetrico" per il carattere di imperfezione che possiede; è "Dimora della Pace" giacché perfino un samurai è obbligato a lasciare la sua spada al di fuori<sup>1</sup>. Tramite l'ideazione del padiglione, occasione per verificare e sperimentare il sistema aggregato, si persegue il medesimo intento. Un'architettura essenziale che dona profondità, che persegue la spazialità bidimensionale, che restituisce *Ma, Oku e Miegakure*. Coerentemente alla spazialità ricercata, quella che guarda all'orizzonte e a una profondità dello spazio restituita dal susseguirsi di spazi bidimensionali, il sistema aggregato qui pensato è trasposizione, al pari della sala per la cerimonia del tè, della nozione di imperfezione, non-permanenza, effimero, temporalità, a-simmetria, incompletezza. Nella *Sukiya* ciò è tradotto nelle pareti, scorrevoli,

<sup>1</sup> «É Dimora della Fantasia in quanto struttura effimera costruita per ospitare un impulso poetico. É Dimora del Vuoto in quanto priva di ornamenti, a eccezione di quel che vi può essere collocato per appagare un'esigenza estetica contingente. É Dimora dell'Asimmetrico in quanto consacrata al culto dell'Imperfetto; si lascia volutamente qualcosa di incompiuto affinché sia l'immaginazione a completarlo». Okakura K. (1906), *Lo zen e la cerimonia del tè*, Milano: Feltrinelli, 2017, p. 43.

in legno e carta, essenziali; nella giustapposizione e ripetizione di elementi modulari la cui ripetitività è interrotta poi da imperfezioni puntuali come quella restituita dalla presenza del *takobashira* il cui legno è lasciato grezzo. Nel sistema aggregato, sia esso a servizio di un padiglione, che come elemento di copertura, dall'essenzialità della struttura, dall'impermanenza, dalla frammentazione e dall'asimmetria delle parti che lo compongono. Volendo effettuare un confronto tra Oriente e Occidente, se quella occidentale è un'architettura guidata dal *logos* di Socrate, dall'ontologia di Platone e dall'*arché*, principio originario, di Aristotele che congiuntamente a Illuminismo e Positivismo portano l'uomo occidentale alla razionalizzazione di ogni accadimento in termini di epistemologia, ontologia e metafisica, quella orientale è una architettura di ordine invisibile, di spazi celati, di ricerca di armonia con la natura, di esperienza, di vuoti e di pieni, di effimero, transitorietà, mutevolezza. Nel luogo non si ricerca la concettualizzazione, l'idealizzazione di una immagine futura o di un ricordo del passato. Lo spazio è vissuto per quello che è adesso, è reale, non deriva da alcuna proiezione della mente. Ogni cosa è mutevole, fugace, transitoria, incompiuta. Paradossalmente tramite l'esaltazione dell'*hic et nunc* si celebra l'eternità. L'aggettivo effimero non ha qui la valenza contemporanea meglio espressa da Gillo Dorfles quando scrive che il creatore (l'artista), guidato dalla "coscienza dell'effimero", concepisce «delle strutture che mai avrebbe realizzato»<sup>2</sup>. Il significato di effimero nella definizione dell'estetica giapponese e quindi della presente ricerca, è assimilabile più all'idea di fugacità che a quella di "leggerezza". Quella occidentale di pietra, quella orientale di legno e carta. L'una è architettura di luce, l'altra di ombra. Nella progettazione del padiglione è stata ripresa la nozio-

<sup>2</sup> Dorfles, G. (1988) *L'effimero nell'architettura*, in «L'Arca» n. 18, luglio-agosto 1988, p. 6.

ne giapponese di *Miegakure* ovvero di "intravedere qualcosa che è nascosto" come «la luna dietro le nuvole, una immagine che incarna l'effimero e l'ambiguo»<sup>3</sup>, di tensione verso la natura, di continuità tra interno ed esterno. L'obiettivo tramite la definizione del sistema aggregato è ancora una volta la ricerca di forma e non forma, di ordine e caos. Inoltre, in riferimento al raggiungimento di un maggiore livello di sostenibilità ambientale è stato definito il *Life cycle* del sistema aggregato. Difatti, coerentemente con quanto scritto in riferimento ai criteri indicati all'interno delle *Guidelines for the reduction of the environmental impact of temporary building and structures in mega events* scritte, si ricorda, in occasione della convenzione tra il Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare ed il Politecnico di Milano il 24 marzo del 2014 per Expo Milano 2015, la progettazione è stata guidata col fine di rendere il sistema aggregato interamente riciclabile e riutilizzabile, sia relativamente alle sue componenti che all'intero sistema costruttivo. Oltre all'impiego del PLA, riciclabile e biodegradabile [criterio M1-M2-M3], è stato scelto un unico componente [criterio C7] e si è scelto l'incastro [criterio C9] come metodo di aggregazione. Il sistema è aperto, ovvero costituito da parti intercambiabili e modulari [criterio R11-R12-R15]. Ovvero, la struttura è riciclabile, facilmente montabile, smontabile e quindi riutilizzabile. Adattabile e interagibile. La sostenibilità è stata rintracciata lungo il processo realizzativo. Nel materiale, riciclabile, nella geometria della particella, riutilizzabile, nella struttura complessiva, smontabile e riutilizzabile, nella destinazione d'uso. Inoltre, analogamente a quanto fatto per la singola componente, le fasi di ideazione e sperimentazione del sistema aggregato sono state condotte procedendo per più momenti. Inizialmente, la fase di defi-



<sup>3</sup> Brendon, L. (2005) *Veiled Sustainability: The Screen in the Work of Fumihiko Maki* in «Places», n. 17, vol. 4, 2005.

nizione della morfologia generata dall'indagine sullo stato dell'arte e dell'apparato teorico sotteso. La forma è quella della conchiglia e del guscio perché più rispondente al sistema di incastro reciproco tra le componenti. Quindi è stata effettuata la simulazione della morfologia tramite software, la realizzazione di parte del modello e quindi la verifica della stabilità, intesa come capacità di resistere al riordino, mediante test empirici. L'obiettivo perseguito è stato quello di definire un sistema aggregato che avesse la qualità spaziale di essere permeabile, che divenisse trama, che creasse contrasti tra luce e ombra, tra stabilità e instabilità, tra ordine e caos.

### **La morfogenesi del sistema aggregato**

Tra gli elementi che hanno guidato la morfogenesi della forma del padiglione, l'idea di creare una spazialità frammentata, che crescesse in maniera rizomatica, che prediligesse l'orizzontalità dello sguardo, che invitasse a scrutarne lo spessore, che dialogasse con l'esterno. Al pari delle opere di architettura indagate, l'intento della progettazione è stato quello di annullare la tridimensionalità dello spazio mediante trasparenza, permeabilità, continuità spaziale tra interno ed esterno, luce e ombra. Ne *L'informe. Istruzioni per l'uso*, si ricorda la definizione suggerita da Rosalind Krauss, l'informe è costituito da quattro elementi fondativi: orizzontalità; basso materialismo; pulsazione ed entropia a cui corrispondono altrettante quattro esclusioni, quella del tattile, della materia, del tempo e dello spazio. Elemento essenziale per la progettazione del padiglione, il controllo della luce che lo attraversa. Difatti, è la qualità della luce che determina la qualità e la struttura dello spazio tra le particelle. A seconda se la luce sia riflessa o assorbita ne cambia le qualità ottiche del materiale. Per tale ragione la scelta di inserire le due tipologie di particelle. L'una è trasparente alla luce, l'altra la intrappola, la assorbe median-

## Definizione del sistema aggregato\_macroscala Morfogenesi & Simulazione

te l'imbibizione della carta. Tale scelta, che è una scelta di luce, è legata al rapporto con il modo di intendere l'architettura e con il luogo geografico in cui si trova. Controllare come la luce oltrepassa la materia, intesa qui come sostanza, come aggregazione di particelle, diviene essenziale per costruire la morfologia e i dettagli. La luce è prima filtrata dal sistema aggregato, poi riflessa e assorbita da ogni singola particella. I materiali accuratamente frammentati afferma Kuma divengono transitori come gli arcobaleni, si disperdono come le nuvole, si dissolvono come la nebbia. Tale immagine è evocativa del ruolo della luce. Senza la luce che attraversa la materia dell'arcobaleno, delle nuvole e della nebbia, senza la luce che attraversa le particelle di acqua, la dissolvenza, la transitorietà, la dissoluzione non sarebbero evidenti. La luce partecipa al pari della materia alla creazione della spazialità, dell'atmosfera ricercata, intima, filtrata, spirituale. Per l'architetto americano di origini ebraiche Louis Kahn

«Tutta la materia è luce. È la luce che, quando termina di essere luce, diventa materia»<sup>4</sup>.

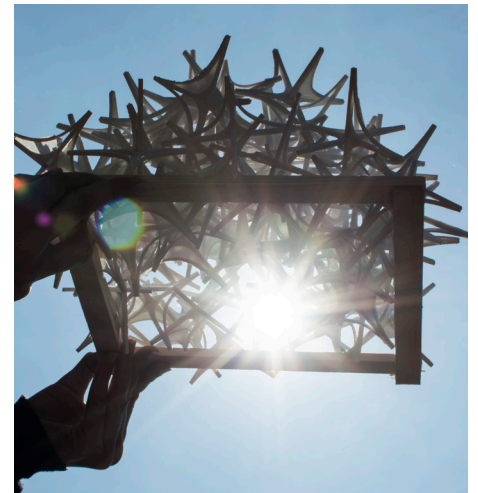
Volendo ricreare una determinata luce, allora creo una forma, la struttura, il materiale. «La struttura è creatrice di luce»<sup>5</sup>. La luce crea lo spazio per contrasto, vuoto-pieno, chiaro-scuro, luce-ombra a tal punto che per Siegfried Giedion

«Se si elimina la luce il contenuto emotivo dello spazio scompare e diventa impossibile coglierlo»<sup>6</sup>.

<sup>4</sup> Discorso tenuto al Politecnico di Milano nel gennaio 1967 da Louis I. Kahn, dal titolo *Statement on Architecture*, in «Zodiac», vol. 17, 1967, pp. 55-57.

<sup>5</sup> *Ibidem*.

<sup>6</sup> Giedion, S. (1941), *Spazio, tempo e architettura*, Milano: hoepli, 1954.



La luce non è solo spazio, produce sensazioni, emozioni, atmosfere<sup>7</sup>. Kahn afferma che

«Lo spazio è luce e così crea una completa sovrapposizione e uguaglianza tra queste due entità: non esiste spazio senza la luce e quindi è quest'ultima che rivela il primo: una luce "sbagliata" non rivela in modo corretto lo spazio, lo deforma e se è in grado di deformarlo significa che non esiste la dovuta identità»<sup>8</sup>.

L'ideazione della forma del padiglione è nata dal continuo feedback tra l'ideazione, la simulazione e il prototipo. Si è detto, una metodologia ciclica per rispondere a tutte le esigenze, vincoli e obiettivi. La geometria della forma-informe del padiglione nasce difatti da una logica computazionale che diviene emergente nel momento realizzativo, quando è eliminata la cassaforma che contiene il 'fluido' materia. Per tale ragione, ogni fase della sperimentazione, la lettura di ogni dato, è essenziale per la definizione della struttura finale. Gli obiettivi da raggiungere sono multipli. Definire una spazialità che si collocasse ai margini tra ordine e caos, al pari dei sistemi aggregati presenti in natura. Definire un sistema aggregato che potesse crescere in maniera rizomatica, senza definire una gerarchia tra le parti. Una spazialità stratificata che permettesse di scrutare il sistema costruttivo, gli aggregati per restituire profondità. La forma-non forma del padiglione analogamente a un fluido - ricordando che il sistema aggregato ha le caratteristiche di un fluido quando versato e possiede quelle di un solido una volta stabilizzato mediante l'incastro - è strettamente dipendente dalla geometria del contenitore in

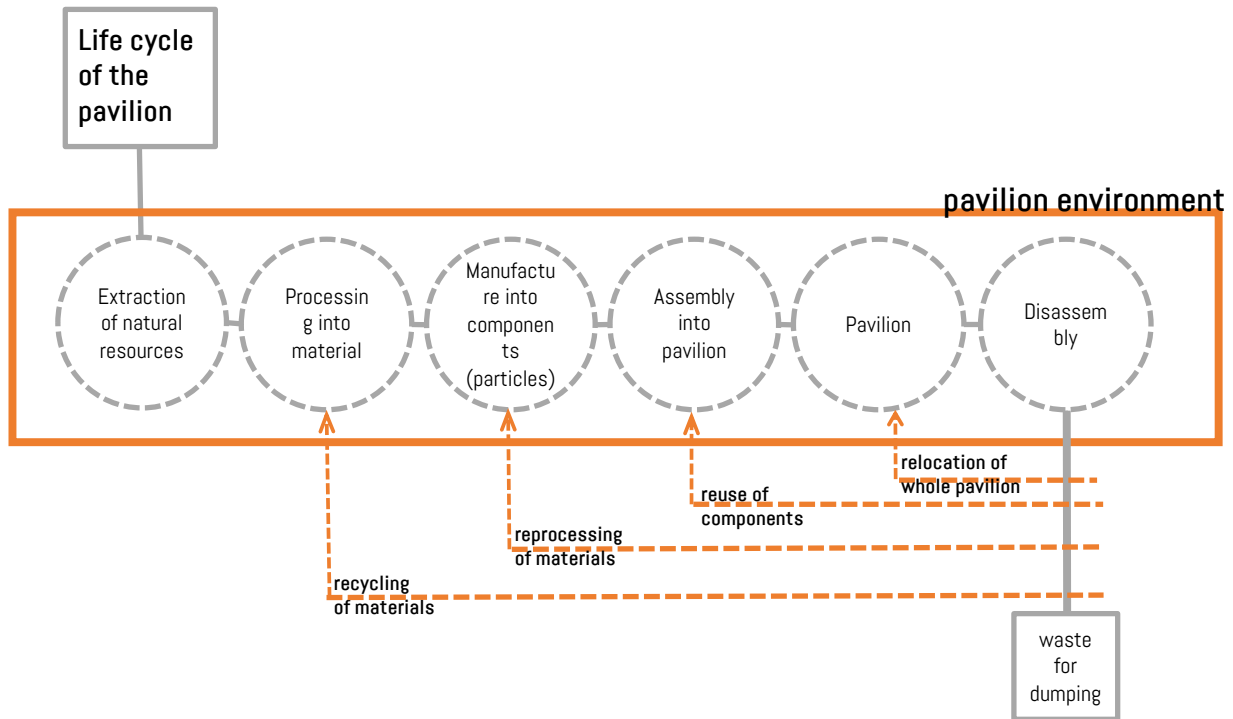
<sup>7</sup> Il riferimento qui è a Peter Zumthor

<sup>8</sup> Discorso tenuto al Politecnico di Milano nel gennaio 1967 da Louis I. Kahn, dal titolo *Statement on Architecture*, in «Zodiac», vol. 17, 1967, pp. 55-57.

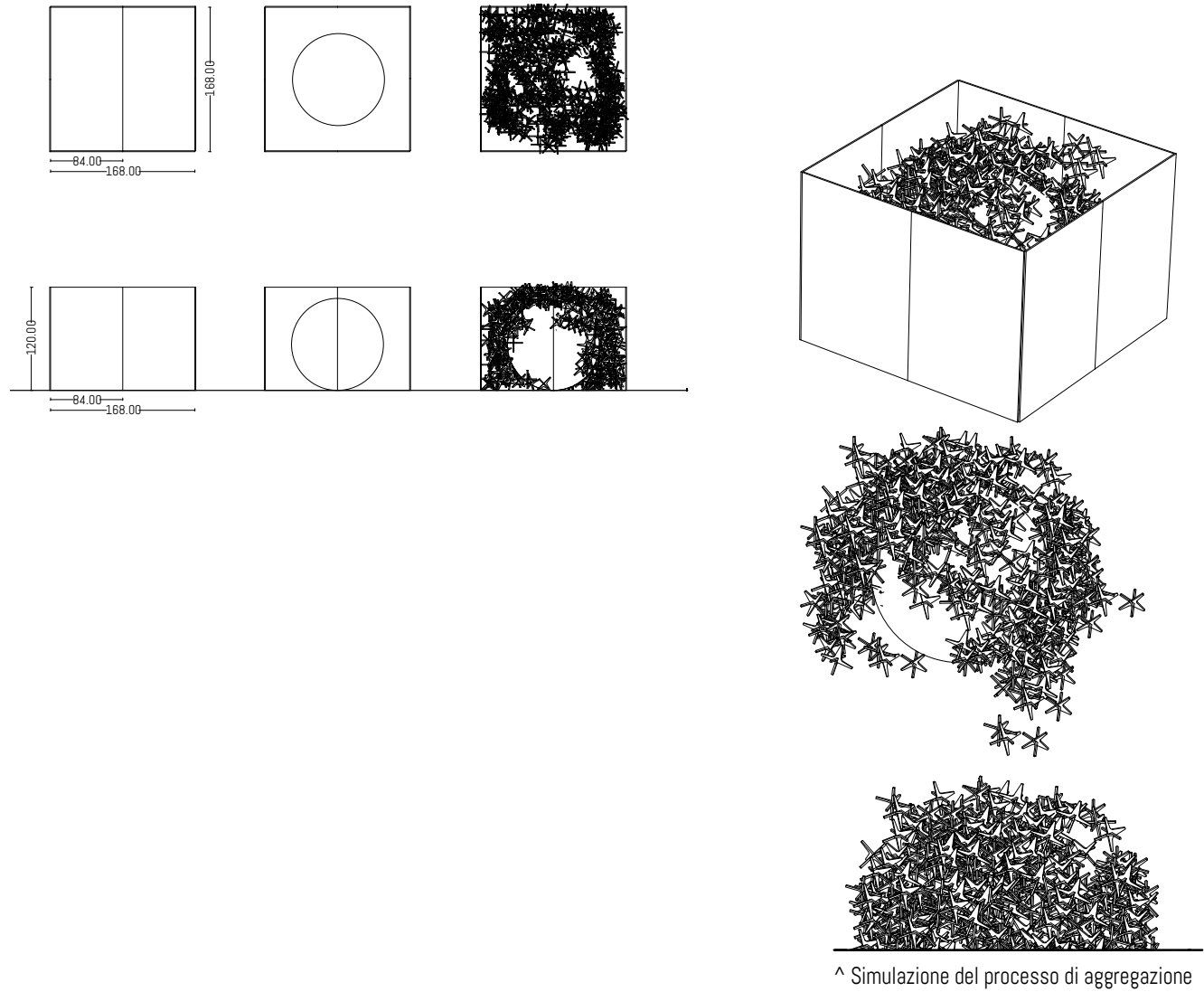


## Definizione del sistema aggregato\_macroscala Morfogenesi & Simulazione

cui è 'versato', quindi dalla forma della cassaforma esterna e interna. Avendo compreso dallo studio dello stato dell'arte, dall'ideazione della singola componente, dalla simulazione, dalla prototipazione e dai vari test sulla stabilità, in particolar modo quelli relativi alla cassaforma interna pneumatica, che il sistema aggregato a incastro possiede una buona capacità di resistenza per forma e per gravità grazie alle spinte reciproche tra le componenti è stato essenziale stabilire un modello preciso di simulazione della struttura interna a doppia curvatura. Quella esterna invece è stata pensata dialetticamente, volumetrica, solida. Al pari del principio dell'arco che prevede la reciproca forza di compressione esercitata tra un concio e l'altro, il principio della catenaria è favorito dall'attrito e dall'incastro tra le particelle. La qualità spaziale ricercata nell'ideazione del sistema aggregato, una volta versate le singole particelle è quella di essere filtro, di smarginare i confini, di contrapporre dialetticamente opposti quali luce e ombra, forma e informe. Di evocare impermanenza, trasparenza, permeabilità, profondità. Dalla forza di attrito inter-particellare che caratterizza localmente ciascuna particella dipende la stabilità dell'intero sistema aggregato. La manipolazione degli elementi è stata simulata in funzione della qualità e quantità di luce che si voleva filtrare.



Definizione del sistema aggregato\_macroscala  
Morfogenesi & Simulazione



^ Simulazione del processo di aggregazione

### **I software e il processo di progettazione parametrica**

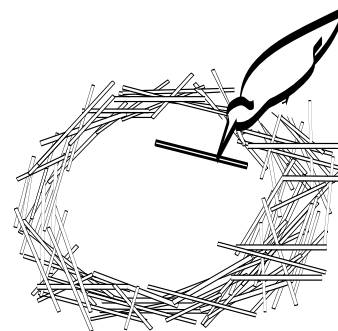
Il disegno delle catenarie generatrici della superficie che funge da cassaforma interna è stato reso parametrico tramite il software Rhinoceros, il plug-in Grasshopper e Kangaroo in funzione delle curve catenarie. Il modello di progettazione computazionale ha riguardato le caratteristiche comportamentali del sistema aggregato inteso come materiale e quindi sono state definite le variabili parametriche da cui fare dipendere le caratteristiche qualitative estetiche e strutturali dell'intero sistema. La capacità di carico è stata ottimizzata dalla forma geometrica delle singole componenti e dal metodo di aggregazione. Una volta che la struttura della cassaforma in pura trazione o compressione è stata sviluppata, ovvero ne è stata ottimizzata la forma, questa è stata trasformata in Mesh ed è stata esportata per essere rappresentata mediante software di modellazione 3D.

### Verifica mediante la definizione e la simulazione di un padiglione temporaneo

Nella città di Catania, nelle vicinanze di quelli che sono i resti dell'anfiteatro romano, nell'omonima via Sant'Euplio è possibile ritrovare i ruderi di una chiesa, o tempio, dedicata al co-patrono della città Sant' Euplio (martirizzato il 12 agosto 304) e a Sant'Antonio Abate. Si legge nella Guida di Giuseppe Rasà Napoli quella che doveva essere la configurazione dell'antica chiesa prima della sua quasi totale distruzione :

«Sorge nella strada S. Euplio (eretta nel 1548) col prospetto di pietra calcareo esposto ad occidente con una porta e più in su due acroterii laterali sui quali poggiano: a sud una mitra posta sur un libro chiuso, con un baculo ed un bastone a cui è attaccato un campanello (sono le insegne di S. Antonio Abate), e a nord un libro spiegato (insegna di S. Euplio protomartire catanese). Passata la porta segue una breve scalinata marmorea per la quale scendesi nella chiesa ad unica nave, in principio della quale sta rizzato a destra un monumento funebre con due altorilievi in gesso dei defunti»<sup>9</sup>.

Attualmente, ciò che ne rimane, due soli muri laterali e lo spazio adiacente, è sacrario dedicato ai martiri cristiani e ai caduti in guerra. Distrutta per la maggior parte a causa dei bombardamenti della II guerra mondiale nel 1943, ciò che rimane dell'antica chiesa riguarda una doppia stratificazione. Le mura perimetrali della precedente basilica paleocristiana, su cui si poggiano i resti della più recente chiesa del 1548, ovvero tracce di affreschi e semicolonne con capitello



<sup>9</sup> Rasà Napoli, G. (1984), *Guida e breve illustrazione delle Chiese di Catania e sobborghi*, Catania: Tringale, p. 281-283.

corinzio. Sulla parete di fondo, dove una volta vi era il presbiterio, i calchi dei dodici apostoli del 1887. Al disotto dei ruderi, una cripta ipogea di epoca romana scavata nella roccia lavica a cui si accede mediante ripida scala situata sullo spazio antistante. Sul fondo della cripta affreschi parietali. La chiesa appare nelle stampe Cinque e Secentesche di Hogenbergh e Braun<sup>10</sup> e sulla pianta topografica della città di Catania di Sebastiano Ittar del 1833.

Tale è il contesto che si è scelto per la verifica e simulazione del sistema aggregato. Un padiglione temporaneo che rievoca una spazialità mistica e che permetta di rivivere un luogo della città di Catania raramente abitato. Il tema con cui ci si è confrontati è stato quello della memoria e dell'esperienza spaziale restituita dal sistema aggregato. Il volume esterno del padiglione, definito dalla forma della cassaforma esterna, un parallelepipedo che ricalca le dimensioni della navata della vecchia chiesa. La spazialità interna mediante spazi porosi, da attraversare la cui geometria, perseguendo la logica computazionale è definita secondo il principio delle catenarie a trazione e di quelle inverse a compressione. Effettuato il rilievo metrico e fotografico e restituito in CAD, la morfogenesi del padiglione è stata definita tramite Grasshopper e il plug-in Kangaroo, la forma dalle funzioni catenarie a trazione e inverse a compressione. Così definiti i punti di vincolo, in modo da enfatizzare i ruderi della vecchia chiesa, tramite algoritmo sono state definite le curve catenarie. Trasformata la Mesh in griglia, questa è stata esportata per essere rappresentata nel software di modellazione 3D. Tra i dati di input:

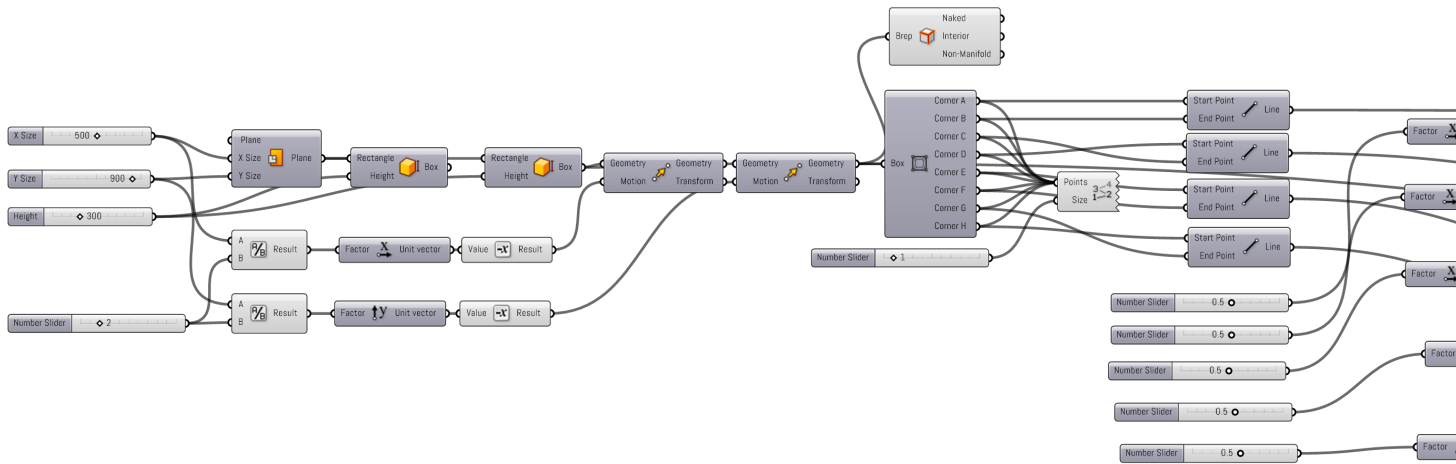
- geometria dei vincoli
- lunghezza della funi

<sup>10</sup> Hogenbergh, F. e Braün, G. *Civitates orbis terrarum*, Colonia Agrippinae 1575, V, tav. 69.

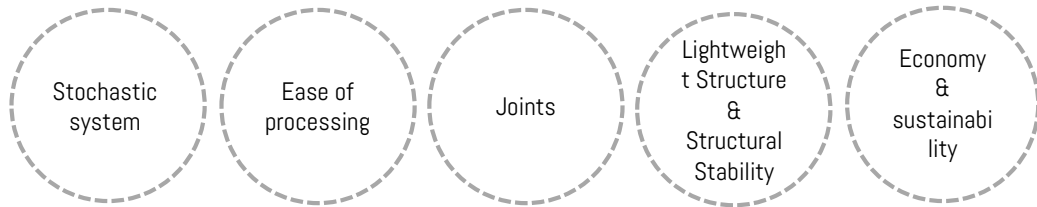
## Definizione del sistema aggregato\_macroscala Morfogenesi & Simulazione

### ■ carichi applicati

Definita la geometria della cassaforma interna ed esterna mediante il plug-in Flexhopper è stata effettuata la simulazione del versamento delle particelle per verificare l'equilibrio tra grado di stabilità e grado di permeabilità del sistema aggregato. È stato importante in questa fase verificare che la grandezza della singola particella fosse adeguata alla dimensione dell'intero padiglione. Come suggerito da Kuma, è essenziale che la componente non sia né troppo piccola, né troppo grande perché ne precluderebbe la percezione della frammentarietà.

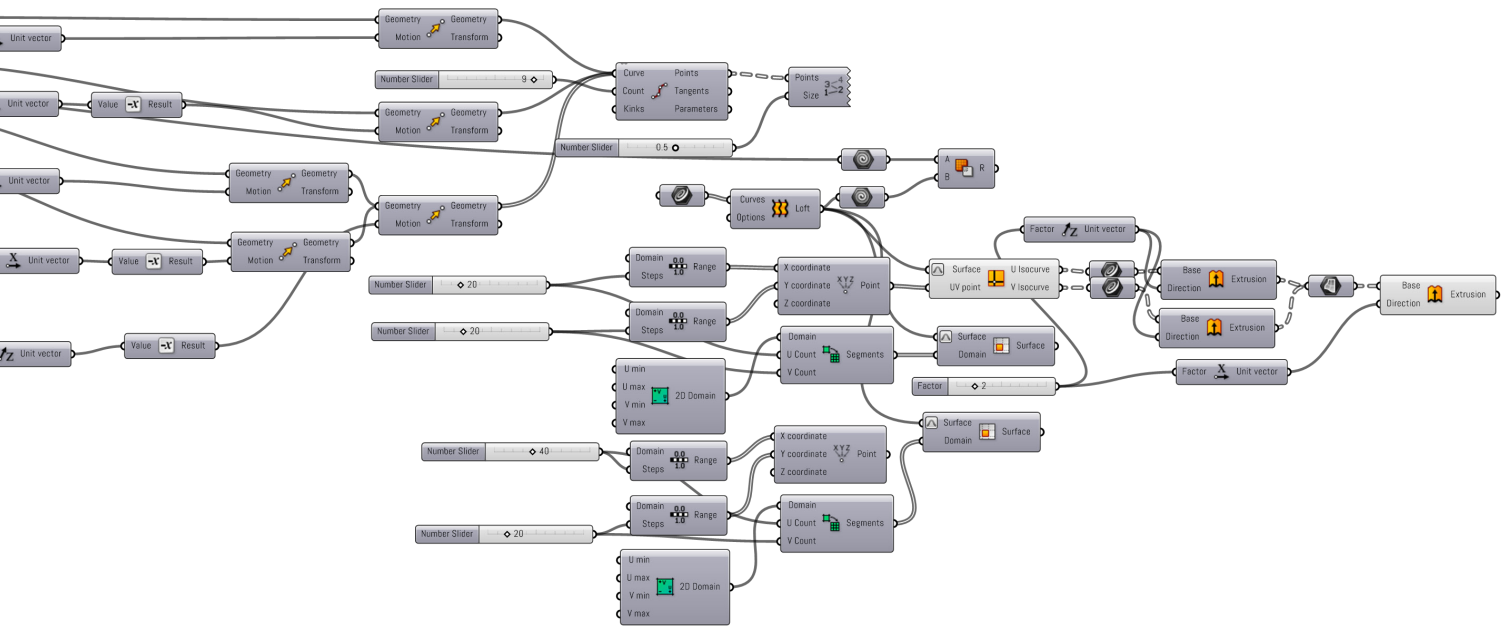


**Goals & Strategies**





# Definizione del sistema aggregato\_macroscala Morfogenesi & Simulazione



^ Scripting del global design in Grasshopper



1



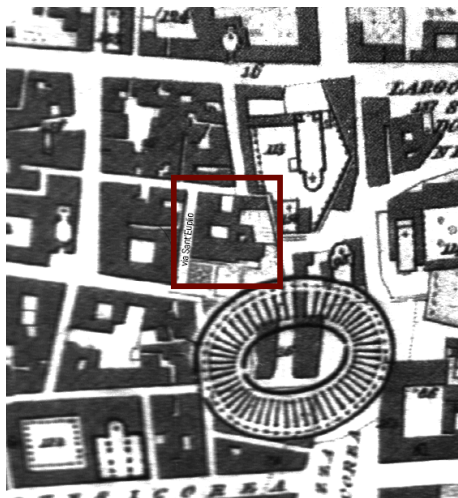
2



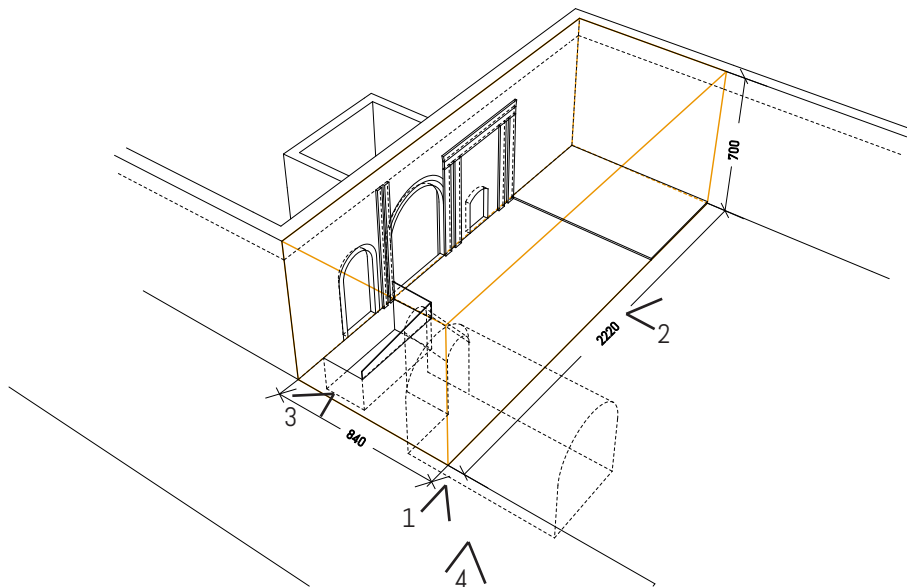
3



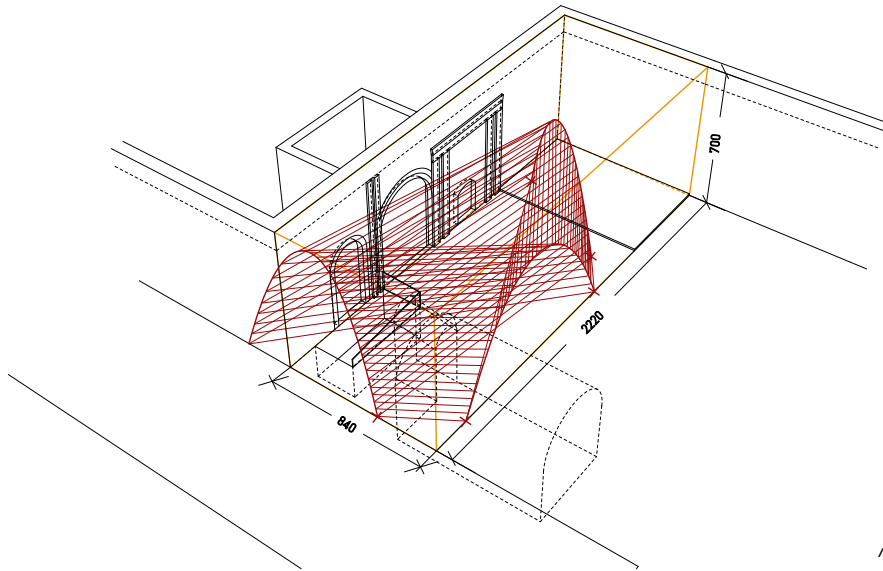
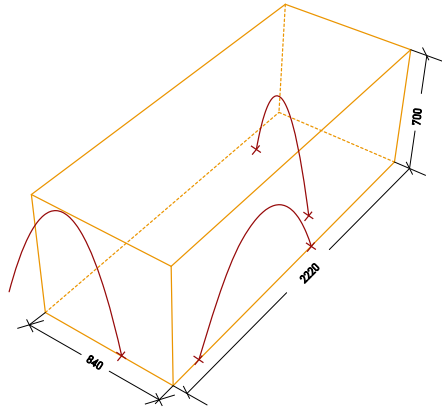
4



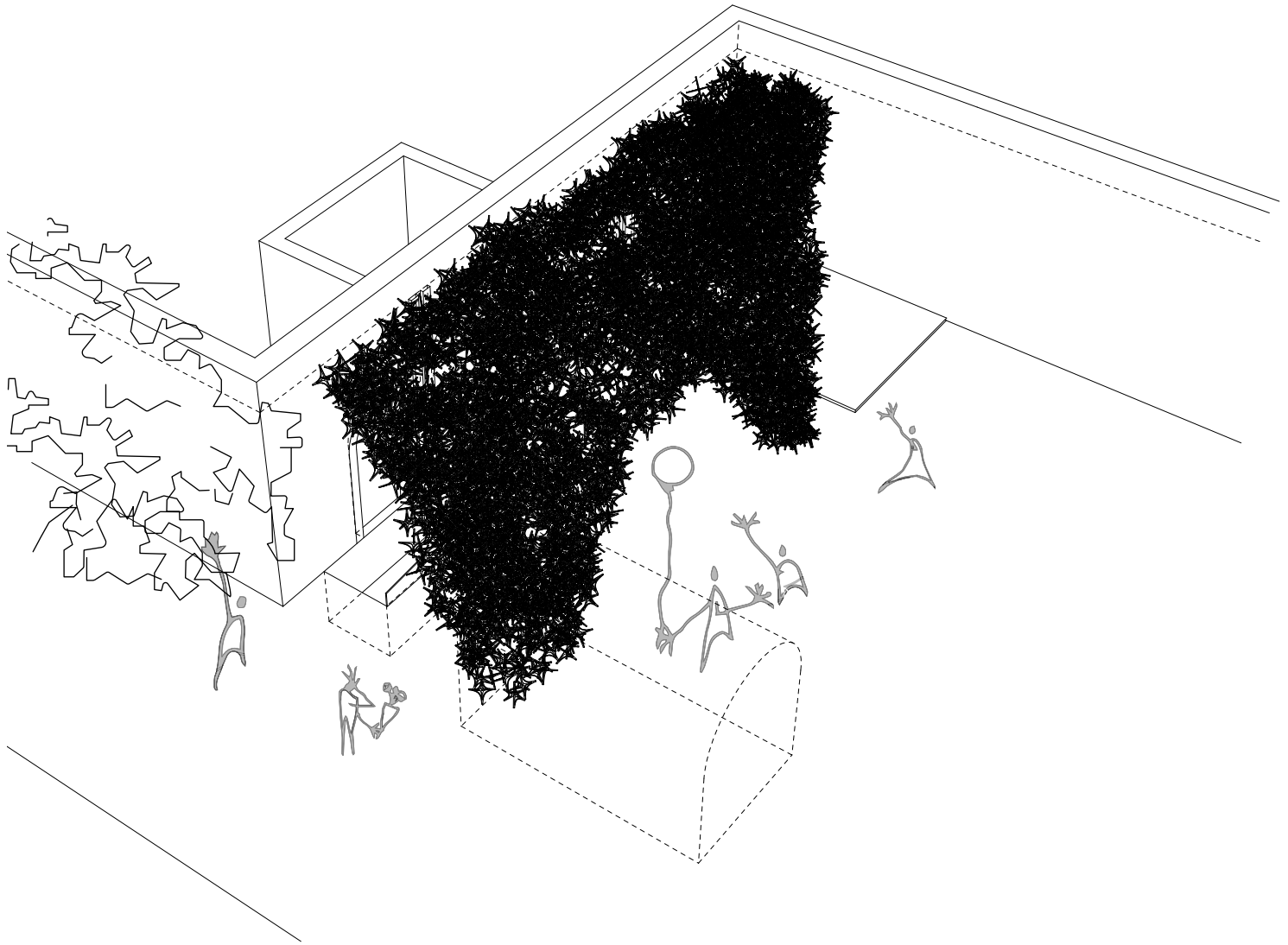
^ Cartografia di Sebastiano Ittar\_1833



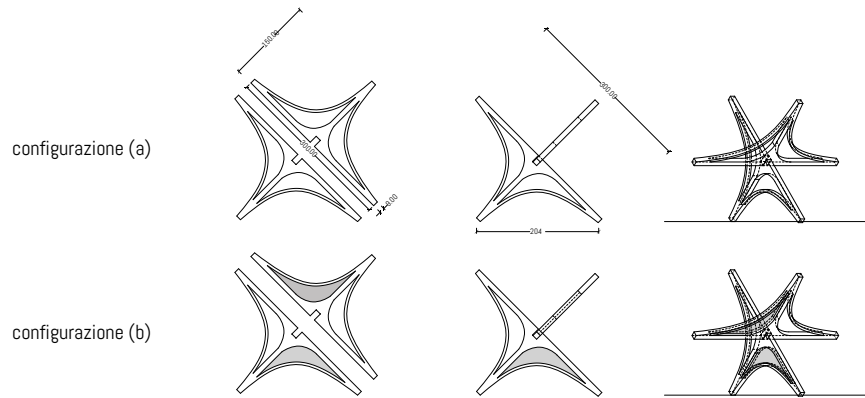
Definizione del sistema aggregato\_macroscala  
Morfogenesi & Simulazione

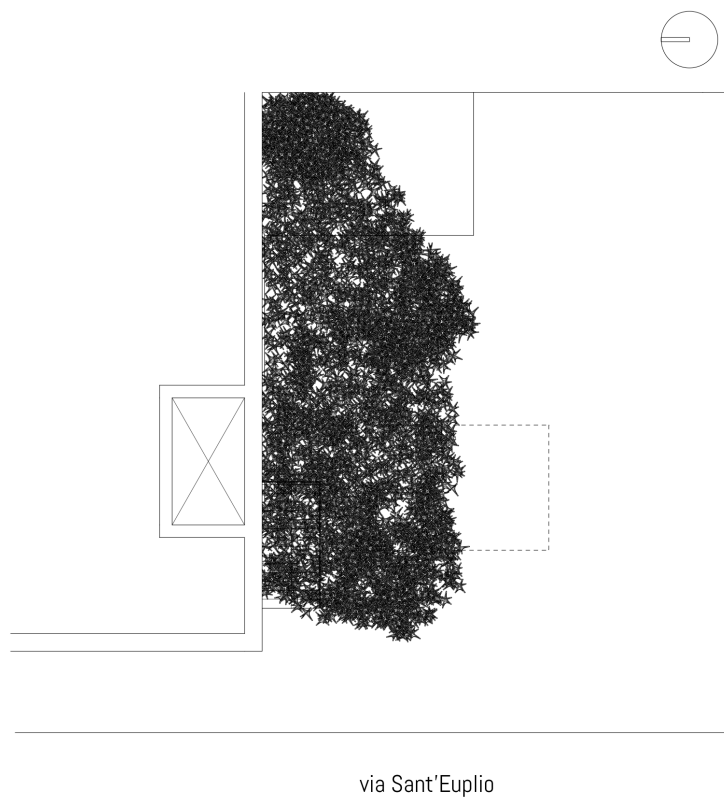


^ Il sistema delle catenarie inverse



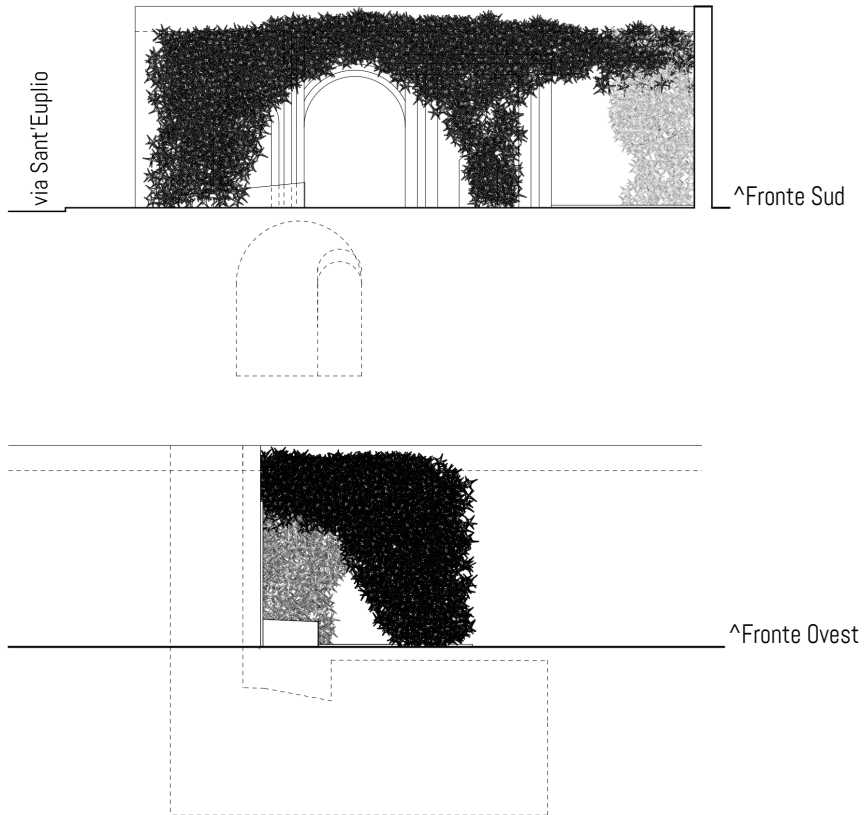
Definizione del sistema aggregato\_macroscala  
Morfogenesi & Simulazione





0 1 5 10

Definizione del sistema aggregato\_macroscala  
Morfogenesi & Simulazione







## CONCLUSIONI

### Riflessioni finali & Scenari futuri

Si è scritto, nell'attuale scenario contemporaneo, nuovi modi di pensare il processo di ideazione di una opera d'architettura suggeriscono la possibilità di integrarlo tramite nuovi strumenti di progettazione. All'interno del presente progetto di ricerca è stata indagata, ideata e sperimentata una spazialità stratificata e rizomatica che perseguisse una logica di *Ma*, *Oku* e *Miegakure* e che smaterializzasse i confini, i bordi. Ovvero, è stato indagato un sistema costruttivo costituito dall'aggregazione di componenti elementari che coniughino estetica, statica, materiali e tecnologie sostenibili coerentemente con il linguaggio delle forme emergenti dell'architettura contemporanea. Il sistema aggregato figura tra i sistemi complessi emergenti possedendo le caratteristiche di dinamicità, non linearità, di sensibilità alle condizioni iniziali e che in accordo all'attuale tematica della parametrizzazione del progetto in architettura e della rivoluzione informatica in atto. Strettamente legato ai suddetti temi vi sono quelli di ordine e caos, di forma e informe. L'obiettivo della spazialità ricercata, permeabile, fenomenicamente trasparente, è stato verificato tramite l'ideazione e la sperimentazione di una configurazione morfologia che stesse ai confini tra ordine e caos e che ha dato origine a forme emergenti, amorfe, espressione di un legame solido tra particelle, materiale e struttura. 'Architettura della materia' è l'indagine della dimensione più intima della stessa, per cui la caratteristica di solidità che emerge percependola dall'esterno, è tradita e frammentata all'interno. L'equilibrio, la danza tra i vuoti e i pieni,

permette all'occhio che scruta tali sistemi aggregati di addentrarsi all'interno del loro spessore e al contempo di resistere, di fermarsi. Lo sguardo si arresta al confine quando incontra la solidità della materia, lo oltrepassa quando incontra i vuoti. All'interno si ritrovano spazi intermedi, spazi sospesi «tra», spazi frammentati, bordi multipli. Nessuna gerarchia tra tali spazi. E, il caleidoscopio di particelle di cui è composto lo spessore del confine è stato controllato dalla dimensione delle singole parti, dalla proporzione fra gli elementi. Ciò che della materia era invisibile è adesso reso visibile e penetrabile. Inoltre, si è cercato di abbracciare la tesi secondo cui la logica computazionale, non sia unica protagonista del processo ideativo e che tuttavia rappresenta un utile strumento di conoscenza della forma e del processo morfogenetico della natura e della materia, accrescendo le possibilità offerte a un progettista perché si impiegano materiali differenti, si individuano innovativi sistemi di funzionamento, formazione, conformazione, crescita, aggregazione e interazione a micro- e macro-scala. Il parallelismo tra i principi morfologici generatori delle forme presenti in natura e i corrispettivi in architettura è stato fondamentale per avvalorare l'ipotesi che l'idea di ordine e di caos in architettura è equivalente a quella delle scienze naturali e per indagare le potenzialità della materia, intesa come sistema aggregato, nel momento in cui entra a far parte del processo di astrazione tautologico all'architettura e dei metodi di progettazione e simulazione computazionale. L'indagine sull'apparato teorico sotteso e quindi sullo studio dei paradigmi spaziali della 'particellizzazione' della materia, ossia della riduzione di essa in componenti elementari e del paradigma spaziale dello 'spatial layering' ha implicato l'ideazione e la verifica della forma della singola componente per ottenere un grado di stabilità e di permeabilità dell'intero sistema aggregato ottimale al raggiungimento della spazialità ricercata. L'obiettivo

dell'ideazione di un sistema costruttivo a tutela dell'ambiente e delle risorse con particolare attenzione ai rischi indotti dai cambiamenti climatici e dalle emissioni di CO<sub>2</sub>, ha indotto l'indagine di un processo progettuale e produttivo sostenibile perseguendo il fine della riciclabilità una volta che tale sistema costruttivo fosse dismesso.

La morfologia del sistema aggregato, in natura, si basa sull'unione di parti modulari ripetibili costituiti da elementi discreti. Tale particolare condizione, non continua, comporta che il sistema, al pari di un fluido, e consiste in questo il fascino del sistema aggregato, possa disgregarsi se soggetto a forze esterne che ne vincano la coesione. L'aggregazione, l'auto-organizzazione, delle singole componenti ne costituisce quindi al contempo un punto di forza e di debolezza. Si tratta, difatti, di una fragile stabilità che tuttavia genera forme emergenti. Una parte della ricerca è stata dedicata alla risposta del sistema aggregato se sottoposto all'azione di forze orizzontali. Tale indagine è stata condotta per mostrare che la caratteristica di fluidità del sistema aggregato costituisce un punto di forza poiché tale condizione rende il sistema in grado di assorbire energia che forze esterne potrebbero trasmettere alla struttura del sistema aggregato, e quindi di dissipare tale energia. Scrive Wright in riferimento all'opera di architettura, «e perché non l'estrema leggerezza unita alla tenacia e alla flessibilità invece del grande peso necessario alla massima rigidità possibile? Perché non, quindi, un edificio fatto quando le due mani si uniscono insieme con i palmi verso l'interno, le dita che si incastrano e cedono al movimento, ma resilienti per tornare alla posizione originale quando cessano le distorsioni? Una flessione: riflessi e riflessi in ogni direzione. Perché combattere il terremoto? Perché non simpatizzare con esso e sconfiggerlo?»<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> «And why not extreme lightness combined with tenuity and flexibility instead of the great weight necessary to the greatest possible rigidity? Why not, then, a bu-

L'indagine è stata inoltre condotta su sistemi aggregati le cui componenti lavorassero unicamente per forma, attrito e incastro. Tuttavia, per aumentare la capacità del sistema di rimanere aggregato è possibile integrare la struttura mediante componenti esterni quali corde, tiranti e cavi, ovvero casseforme a perdere che ne aumentino la stabilità. Infine, per concludere il presente progetto di ricerca e volgere lo sguardo al futuro, c'è chi sostiene che il caos che percepiamo oggi è solo una fase transitoria e che «la ricerca dei sistemi proporzionali nelle arti continuerà fino a quando l'attività artistica resterà un compito dell'uomo»<sup>2</sup>.

ilding made as the two hands thrust together palms inward, fingers interlocking and yielding to movement but resilient to return to original position when distortion ceased? A flexure flexing and reflexing in any direction. Why fights the quake? Why not sympathize with it and outwit it?» In Wright, F. Lloyd, (1943) *Frank Lloyd Wright: An Autobiography*, USA: Pomegranate, p. 214.

<sup>2</sup> Wittkower, R. (1953), *Systems of Proportion*, in Architects' year book V.

**APPENDICI**



Interview #1  
Dialogs on architecture

**Interviewer: Grazia Maria Nicolosi [GMN]** <sup>[1]</sup>

**Interviewees: Hugh Dutton [HD]** <sup>[2]</sup>,

<sup>[1]</sup> Department of Civil Engineering and Architecture\_University of Catania

<sup>[2]</sup> Hugh Dutton Associates's founder

**GMN:** In according to my topic research, the 'particizing' of matter (Kuma 2007) and its simplification to elementary components is a complex act and a singular condition that comes from the arrangement of a series of distinct and separated elements into units. Do you think this corresponds to a change of paradigms in architecture?

**HD:** I didn't have a clear idea of what the particizing of matter is, so I looked at the internet and found this little text which is very beautiful and tells us a little about Kuma's intention:

*"Just as countless birds in flight form a flock, the large whole of a structure is made up of the coming together of small fragments, and this is my ideal. The pliability of a flock of birds changing shape moment by moment is incredibly appealing to me as an architect looking toward an architecture that is supple and democratic."*

**GMN:** In the design of architectural form by means of programming with algorithms what role does nature and natural processes play?

**HD:** Designing using algorithms is a challenge in that it is an abstract intellectualization of the process of creation, whereas we

do need to respond to nature. We feel the grandeur or intimacy of spaces. Around us, sensing the light, the warmth of light or the refreshing breeze around us. The challenge is indeed the human response to nature and how the programming takes that into account.

**GMN:** In your opinion, what is the future of Human-Computer interaction?

**HD:** The computers will get more powerful and more aware. We have seen recently Google's achievement with the Quantum computer showing us that the next frontier is not far away. This will allow humans a more refined and accurate simulation of natural and complex processes.

I find a simple story that helped me to become aware of how computing power is a simulation of natural forces in design. Engineers used to do static calculations with very clear action and reaction quantification. Say calculating a beam's capacity to support a force. In a tensile structure, the supporting member is a cable it will deflect, and would not be able to resist the force. However, if we use nonlinear calculations simulated the geometrical change of the cable as it deflects, where the computer did the same calculation over and over again until it converges, taking account of the deflected shape. The computer capacity to manage a mass of information in the simulation of a complex time related process provides the designer with a more refined tool for predicting the structural behavior of his design.

**GMN:** When you design, you always keep in mind the forces and the element of nature [wind, sun, water, land]. Could you explain to me how?

**HD:** It is interesting for me to think about the parallel experience of our design for the Climate Ribbon in Miami, where we simulated the natural parameters of wind, sun and rain to a shape we mounded in three dimensions. Yes, our programming simulated the natural



processes. We found data on the internet on the climate such as wind direction speed and frequencies. We simulated the solar exposure taking in to account the latitude of the site and consequential vectors of sunlight at different times of the seasons and day. We used programs that checked the rainfall flow and quantities. We used the computer to analyze the roof surface for the aerodynamic behavior, which we then had verified in a physical wind tunnel laboratory. The sun shading blades were built by finding the optimal angles of the shading surfaces as a function of the built context surrounding the 'Ribbon'.

But we did find that the initial purely functional parametric forms that were produced required visual refinement, because the aesthetic parameter is just as important as the functional feelings of breeze, shading and collecting rain. The challenge. Was indeed to find a symbiosis between the functional and visual.

**GMN:** If technology develops faster than the human ability to understand it, how will this impact architectural design?

**HD:** Staying aware. And not let the computer. The future depends on the human remaining conscious, responsible and aware of the computer design process. The computer must remain a tool and not replace the intuitive grasp the designer has on the process.

**GMN:** In your opinion, what is the role of technology and algorithms in the process of creating form. Are just they tools, or they are changing also the mind of human and in particular of architect?

**HD:** Computers and computational processes must remain tools. Design is a human creative act. The irrational and subjective feelings and sentiments we have cannot be replaced with purely objective processes. We cannot substitute the creative act with the computer doing the job. The creativity and individuality of each individual must remain in control of the process. The act of programming must

remain creative and subjective human act.

This coincides with making the invisible visible. Do you think this corresponds to a change of paradigm in architecture?

I suppose yes, in the way that as we are able to understand and simulate nature in a more precise way, it is like being able to have a closer look at her. To understand her better. A more magnified view of processes that were hitherto less visible. But we must remain conscious of the big picture.

Interview #2: Paradigm shift in architecture  
Dialogs on architecture

**Interviewer: Grazia Maria Nicolosi** <sup>[1]</sup>

**Interviewees: Henriette Bier** <sup>[2]</sup>, **Maria Vogiatzaki** <sup>[3]</sup>

<sup>[1]</sup> Department of Civil Engineering and Architecture\_University of Catania

<sup>[2]</sup> Faculty of Architecture and the Built Environment\_ Delft University of Technology

<sup>[3]</sup> School of Architecture of Aristotle\_University of Thessaloniki

The dialog is led by Grazia Maria Nicolosi (GMN) with Henriette Bier<sup>1</sup> (HB) and Maria Vogiatzaki<sup>2</sup> (MV).

**GMN:** The 'particlizing' of matter (Kuma, 2007) and its simplification to elementary components is a complex act and a singular condition that comes from the arrangement of a series of distinct and separated elements into units. This coincides with making the invisible visible. Do you think this corresponds to a change of paradigms in architecture?

**HB:** Architecture has always worked with arrangements of distinct elements into structures as for instance stones that are stacked into walls, etc. Only the scale at which these elements are addressed

<sup>1</sup> Most of the statements made here are elaborated views of the book "Robotic Building", volume #1 of Springer book series Adaptive Environments, 2018.

<sup>2</sup> Most of the statements made here are elaborated views of the book "Architectural Materialisms: Nonhuman Creativity", Edinburgh University Press, 2018.

has changed. Hence, architecting materials and material systems in particular for additive manufacturing may represent a paradigm shift, however, architecting cyber-physical systems seems to be encompassing what the paradigm shift in architecture is about.

**MV:** Materiality can, nowadays, be thought of at a micro-scale such as dust that can 'powder' and granulate geometries producing random otherness thereafter. Algorithms are like managing and manipulating matter in its dust existence. Dust geometries are a cognitive construct; they are abstractions, therefore could potentially bring about a new kind of architecture. The big data idea and its relationship with materiality allows to consider thousands of particles at the same time and moment, what ordinary limited and small data sets could not achieve. Particles not only change under observation, but also under the way they interact with other entities.

**GMN:** In 2014, in Barcelona, you took part in a conference titled 'What's Matter'. Could you explain what you mean by materiality and materialism in the age of computation?

**HB:** At the time, the discussion on materiality and materialism has been put forward by Maria Vogiatzaki, whom I asked to join this interview. My own take on materiality is that in architecture the range is vast, from the perceived materiality of images, 3D models and other virtual representations to the materiality of physical prototypes, building components and buildings, where the full range of their virtual and physical aspects needs to be considered. Buildings are not anymore physical systems only but cyber-physical.

Fig. 1: Sensor-actuators networks integrated into the reconfigurable physical-environments © Robotic Building, TU Delft

**MV:** To date issues of Ethics, Aesthetics and Politics have either been flattened, naturalised or ignored in favour of matter's self-organised capacities or worse they are still mobilised, understood and

applied within a given anthropocentric framework of judgments and evaluations. After a long period of fierce experimentation with matter, the discussion, which was what was unfolded at the Barcelona conference, has been recently focusing onto what matters; to the radical realisation that materiality's dynamism suggests a post-human framework within which architecture as a creative act could possibly prototype spatiotemporal constructs that suggest alternative conceptions of ethics, aesthetics and politics.

**GMN:** In the design of architectural form by means of programming with algorithms what role does nature and natural processes play?

**HB:** In my work with researchers and students at TU Delft, we implement multi-agent simulations for programmatic distribution as well as embed distributed sensor-actuators into the built environment. These operate as multi-agent systems and consist of autonomous entities which act towards achieving goals together by observing through sensors and acting through actuators. Their behaviour may be similar to a swarm of fish or flock of birds (Reynolds, 1987) that exhibits a bottom-up coordinated behaviour in absence of top-down control.

**MV:** Materiality has been reconsidered extensively with the appearance of computational models that allow material to be encoded and with hardware that allows even for real time and simultaneous manipulation and malleability of matter. The shift that this perception has altered radically, is that in computational times the creation of any form is understood as yet another natural and systemic process which, through the computation power of the search and retrieve, can be modelled and tested. Any artefact and, consequently, any architectural creation are now conceived as material entities, generated as parts of a broader natural, social and cultural eco-system.

**GMN:** In your opinion, what is the future of Human-Computer interaction?

**HB:** Human-Computer Interaction and Human-Robot Collaboration are most relevant developments that affect architecture and society at large. I expect that the physically built environment and building processes are increasingly imbued with ICTs and robotics. Architecture and building construction are at the very beginning of identifying the interaction between human and non-human agents participating in all phases from design to production and operation of physically built environments.

**MV:** Experimentation on the project of architecture is about speculations and about the ways in which qualities can be embedded in this experimentation but also about the ways in which new qualities of crafting can be discovered by humans working with machines. It is about the exploitation of the granularity (dustism) that large data sets can provide. The future and the huge potential are for human and non-human symbiotic and synergetic creativity that would yield new and unthought of scenario, such as new material systems that can potentially self-organise and create flows of heterogeneous spatiotemporalities and variations, etc.

**GMN:** If technology develops faster than the human ability to understand it<sup>3</sup>, how will this impact architectural design?

**HB:** The development of technology has a huge impact on architecture. My plea with schools of architecture is to not let technology surpass the understanding of its impact and introduce students as early as possible to most advanced technologies to keep up the pace. It is obvious that architectural design, production, and opera-

<sup>3</sup> The hypothetical technological singularity (Cadwalladr, 2014) is achieved when technological development becomes uncontrollable resulting in yet unimaginable changes in society.

tion rely increasingly on new technologies and our responsibility is to identify ways to employ this technology in a manner that potentially increases our cultural and material contribution to society, and the approach addresses societal challenges such as overpopulation, material depletion, climate change, etc.

**MV:** Contemporary contemplation is focusing on reconnecting sensing and making and therefore thinking with a material base that is primarily imperceptible and outside the strict limits of human's sensorium domain. In such a post-human realisation, architectural design emerges as a result of the co-creativity/co-creation process between human and non-human agents.

**GMN:** On several occasions, you (HB) have argued that man remains the protagonist in the process of creating form and that technology and algorithms are tools. What do you mean?

**HB:** Non-human agents such as algorithms and robots are from my point of view tools and/or instruments designed by human agents to implement certain tasks. The human and non-human agents (computational or robotic) are working together and the production of value is not allocated to the one or the other but emerges in the interaction between the two.

**MV:** Algorithms are tools indeed, but very powerful tools that can offer inconceivable ideas, that humans would be unable to create without them. The point is not to harness technology in a competitive human-centred context. The algorithmic governance via computational platforms can augment the human's infinite virtual perfectibility. Hence, the mission of architecture is to contribute to this perfectibility both of the creating subject, the architect, and the appropriating subject, the user.

**GMN:** During a research investigation, we undertake systematic work to advance knowledge and amongst others we experiment and

speculate. What are in your opinion significant phases that should be addressed during drawing up or reviewing research in architecture?

**HB:** The architectural research that I am implementing with my researchers and students, is applied research aiming at solving practical problems. It generally employs empirical methodologies and conceptual frameworks that work with hypotheses. The hypothesis that seems to me most relevant for today's research is based on the assumption that building processes and buildings are increasingly imbued with ICTs and robotics and the question for the future is not if but how these technologies impact architecture.

**MV:** In particular, research on AI could acquire an added value in the exploration of unprecedented fabrication techniques and unimaginable scales of construction. By pulverising, we aim to revise our concepts, in other words to re-cut the world and to allow for the constitution of new events, new materials, new construction methods, new scales. Machines provide us with a new sensibility.



### European Researcher's Night

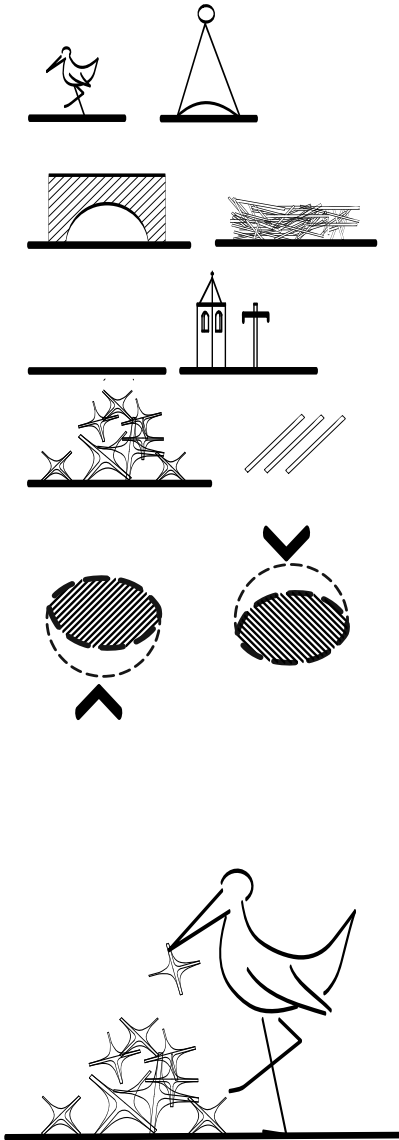
In occasione della *Notte dei ricercatori* del 2019 tramite l'installazione dal titolo *La costruzione dicotomica del nido tra architettura e biologia, processo e forma* a opera dei ricercatori proponenti Sebastiano D'Urso, Rosario Grasso, Grazia Maria Nicolosi, Marisa Spena, Manuel Andrea Zafarana del Dipartimento Ingegneria Civile e Architettura e del Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali è stato mostrato il parallelismo tra i costruttori del nido, gli uccelli, e i costruttori dell'architettura, l'uomo. Ovvero è stata proposta una installazione sintesi della contaminazione che raccoglie architettura e zoologia, processo e forma. La proposta di progetto per l'evento *European Researcher's Night* nasceva dall'incontro di due ricerche in ambiti disciplinari complementari: l'architettura e la zoologia. Il nido, che come concetto e metafora riunisce tutti gli esseri viventi - umani e animali - si consegna come conoscenza e pratica di un costruire rispettoso dell'ambiente e della vita. La mutua contaminazione di queste discipline oltre ad arricchire il bagaglio di conoscenze ha permesso di affrontare la ricerca da punti di vista inediti. Difatti, uno dei risultati e momento intermedio dello studio dei sistemi aggregati all'interno del presente progetto di ricerca è stato trasposto nella costruzione di un nido - realizzato da parte dei cittadini interessati con l'aiuto e il coordinamento dei ricercatori proponenti - mediante particelle esapodali in legno.



^Immagini della *European Researcher's Night* del 2019 a Catania

architettura | rifugio | nido

- chi è l'architetto? l'essere umano | la cicogna
- cosa costruisce? un rifugio per sé stesso | un rifugio per i piccoli
- il contesto? Uno spazio che diviene luogo | il campanile - il traliccio - la piattaforma
- le componenti? particelle da aggregare a secco | ramoscelli da aggregare a secco
- la forma? spazio rifugio\_concavità down | spazio rifugio\_concavità up
- il processo costruttivo? in loop di stratificazione e compattazione | in loop di stratificazione e compattazione
- le forze? attrito, incastro, forza di gravità | attrito, incastro, forza di gravità
- le sollecitazioni? le spinte esterne | le spinte esterne



## Riferimenti bibliografici

### Sulla spazialità

Adorno, Th. W. (1979), *Parva Aesthetica*, Masiero, R. (a cura di) Milano: Feltrinelli.

Adorno, Th. W. (2009), *Teoria Estetica*, Torino: Piccola biblioteca Einaudi.

Alabisio, A. (2001), *Storia del Giappone*, Roma: Newton & Compton.

Alexander, C. (1964), *Notes on a Synthesis of Form*, Cambridge: Harvard Univesrity press.

Alini, L. (2005), *Kengo Kuma. Progetti e opere 1994 – 2004*, Milano: Electa.

Alini, L. (2007), *Kengo Kuma Exhibition*, Catania: Letteraventidue.

Alini, L. (2007), *Kengo Kuma. Liticità contemporanee. Da Stone Museum a Stone Pavilion*, Melfi: Libria.

Alini, L. (2012), *Cupole per abitare*, Tricase: Libellula.

Andersen, P. e Salomon, D. (2010), *Architecture of Patterns*, New York: W. W. Norton & Co.

Argan, C.G. (1990), *Michelangelo architetto*, Milano: Mondadori.

Arís, C.M. (2002), *Silenzi eloquenti*, Milano: Christian Marinotti.

Aristotele, (2008), *L'anima*, trad. it. Movia, G. (a cura di) Milano: Bompiani.

Asch, M. G. (2004), *La psicologia della Gestalt nella cultura tedesca dal 1890 al 1967*, Milano: Franco Angeli.

Ashihara, Y. (1981), *Exterior Design in Architecture*, New York-Londra: Van Nostrand Reinhold.

Ashihara, Y. (1989), *The Hidden Order*, Tokyo: Kodansha International.

Augè, M. (2004), *Rovine e macerie. Il senso del tempo*, Torino: Bollati Boringhieri.

Bognar, B. (2005), *Kengo, Kuma: Selected Works*, New York: Princeton Architectural Press.

Bognar, B. (2009), *Material Immaterial: The New Work of Kengo Kuma*, New York: Princeton Architectural Press.

Boudonnant, L. e Kharumi, H. (2003), *Traces of the Brush*, San Francisco: Chronicle Books.

Calza, G.C. (2004), *Visioni del mondo fluttuante* in G.C. Calza, *Ukiyoe*, Milano: Electa.

Cannata, M. (2007), *The Influence of Japanese Art and Architecture in the Work of Carlo Scarpa*, e-book.

Carter, R. (2001), *Encounter with Enlightenment: A Study of Japanese Ethics*, New York: SUNY Press.

Cutler, T.W. (1980), *A Grammar of Japanese Ornament and Design, Dover Pictorial Archive*, Londra: B.T. Batsford.

Fayuma, N.S. (2004), *L'arte dell'effimero: nozione della temporalità nell'opera d'arte* in AA.VV. 2004, *Ritratti d'oriente*, Roma: Istituto giapponese di

## Riferimenti bibliografici

cultura.

Focillon, H. (1972), *Vita delle forme. Elogio della mano*, Torino: Einaudi.

Focillon, H. (2014), *La stampa giapponese e la pittura in Occidente nella seconda metà dell'Ottocento*, in *Il genio giapponese*, Milano: Medusa.

Focillon, H. (2014), *Giappone errante*, in *Il genio giapponese*, Milano: Medusa.

Focillon, H. (2014), *Saggio sul genio giapponese* in *Il genio giapponese*, Milano: Medusa.

Foucault, H. (2001), *Spazi altri*, Milano: Mimesis.

Framton, K. (2008), *Storia dell'architettura moderna*, Bologna: Zanichelli, II edizione.

Fucello, F. (1962), *Spazio e Architettura in Giappone*, Faenza: Cadmo.

Fuller, R.B. e Marks, R. (1973), *The Dymaxion World of Buckminster Fuller*, New York: Anchor Books.

Galimberti, U. (1999), *Psiche e Techne. L'uomo nell'età della tecnica*, Milano: Feltrinelli.

Garcia, M. (2009), *The Patterns of Architecture: Architectural Design*, Londra: Wiley.

Giedion, S. (1984), *Spazio, Tempo e Architettura*, Milano: Hoepli.

Gregotti, V. (1994), *Le scarpe di Van Gogh. Modificazioni nell'architettura*, Torino: Einaudi.

Greve, A. (2011), *Sanctuaries of the City: Lessons from Tokyo (Re-Materialising Cultural Geography)*, Londra: Ashgate.

Gulinello, F. (2010), *Figurazioni dell'involucro architettonico*, Firenze: Alinea.

Hanlon, D. (2009), *Compositions in Architecture*, New York: John Wiley & Sons.

Heidegger, M. (1976), *Costruire, abitare, pensare*, in Vattimo, G. (a cura di), *Saggi e discorsi*, Milano: Mursia.

Heidegger, M. (1992), *Seminari*, in Volpi, F. (a cura di), Milano: Adelphi.

Heidegger, M. (2000), *L'arte e lo spazio*, Genova: Il Melangolo.

Henle M. (1971), *Documenti sulla psicologia della forma*, Milano: Bompiani.

Husserl, E. (2002), *Idee per una fenomenologia pura e per una filosofia fenomenologica. libro II* traduzione italiana di Enrico Filippini, Torino: Einaudi.

Husserl, E. (2009), *La Cosa e lo Spazio*, ed. it. Costa, V. (a cura di), Catanzaro: Rubettino.

Inoue, M. (1985), *Japanese Architecture*, New York: Weatherhill.

Isozaki, A. (2004), *The Diagonal Strategy: Katsura as Envisioned by 'Enshu's taste'* in Ponciroli Virginia, *Katsura Imperial Villa*, Milano: Electa Architecture.

Isozaki, A. (2006), *Japan-ness in Architecture*, Cambridge: MIT Press.

Isozaki, A. Ando, T. e Fujimori, T. (2007), *The Contemporary Tea House, Japan's Top Architects Redefine a Tradition*, Tokyo: Kodansha International.

Itoh, T. (1963), *The roots of Japanese architecture*, Tokyo: Bijutsu Supphan sha.

Itoh, T. (1973), *Space and illusion*, in «Japanese Garden», Tokyo-New York: Weatherhill.

## Riferimenti bibliografici

Itoh, T., Tanaka, I. e Sesoko, T. (1993), *Wabi Sabi Suki, The essence of Japanese beauty*, Hiroshima: Mazda Motor Corporation.

Janak, P. (1979), *From Modern Architecture Towards Architecture*, in *Architecture and the Applied Arts*, North Pomfret VT: David & Charles Inc.

Jauregui, G.V. (2009), *Controversial origins of tensegrity. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*.

Jencks, C. (1980), *Late Modern Architecture*, Londra: Academy Editions.

Karatani, K. (1995), *Architecture as Metaphor: Language, Number, Money*, USA: MIT Press, Cambridge.

Keane, M.P. e Ohashi, H. (1997), *Japanese Garden Design*, Tokyo: Tuttle.

Kepes, G. (1969), *Language of vision*, Chicago: Paul Theobald and company.

Komiyama, M. (1987), *Elementi di storia dell'arte e dell'estetica giapponese*, Milano: Rnpizudo.

Kotob, B. (1991), *Spatial Layering: An Effect of Cubist Concepts on 20th Century Architecture*, Boston: MIT.

Kuki, S. (1992), *La struttura dell'IKI*, Milano: Adelphi.

Kuma, K. (2006), *A return to Materials*, in Alini, L., *Kengo Kuma: works and projects*, Milano: Electa.

Kuma, K. (2007), *Materiali, strutture, dettagli*, Basilea: Birkhauser.

Kuma, K. (2008), *Anti-Object*, Londra: Architectural Association.

Kuma, K. (2009), Interview by Yukio Futagawa in *Kengo Kuma recent project*, Tokyo: GA.

Kuma, K. (2010), *Kyokai: A Japanese Technique for Articulating Space*, Tokyo: Tankosha.

Kuma, K. (2010), *Studies in Organic*, Tokyo: Toto.

Kuma, K. (2017), *Layering*, Canada: Metropolitan Fine Printers.

Kurokawa, K. (1983), *Architettura e design*, Milano: Electa.

Kurokawa, K. (1988), *Rediscovering Japanese space*, New York-Tokyo: John Weatherhill.

Kurokawa, K. (1997), *Each One a Hero: The Philosophy of Symbiosis*, Tokyo: Kodansha Amer Inc.

Maraini, F. (1960), *Ore giapponesi*, Bari: Corbaccio.

Nakagawa, T. (2005), *The Japanese House. In Space, Memory, and Language*, International Tokyo: House of Japan.

Nicolosi G. M. (2019), *Contaminazioni dal mondo fluttuante. A proposito di avanguardie*, Catania: Malcor'D.

Nute, K. (2000), *F.L. Wright and Japan: The Role of Traditional Japanese Art and Architecture in the Work of Frank Lloyd Wright*, Londra: Routledge.

Nute, K. (2004), *Place, time and being in Japanese architecture*, Londra: Routledge.

Obayashi, T. (1981), *Ise e Izuma*, Milano: Mondadori.

Okazaki, K. (2003), *Passage Architecture and Letter*, in *Isozaki, Arata, Kanji and Architecture*, Tokyo: INAX Shuppan.

Okuno, T. (1987), *Structure of 'Ma'*, Tokyo: Shueisha.



## Riferimenti bibliografici

- Pierconti, M. J. K. (2007), *Carlo Scarpa e il Giappone*, Milano: Electa.
- Platone, (1971), Alcibiade primo, in *Opere complete*, Bari: Laterza.
- Schultz, A.C. (2010), *Carlo Scarpa: Layers*, Stoccarda- Londra: Axel Menges.
- Schumacher, P. (2009), *Parametric Design*, in Mark Garcia (ed.) *The Patterns of Architecture: Architectural Design*, Londra: Wiley.
- Sica, G. (2012), *Il vuoto e la bellezza, da Van Gogh a Rilke: come l'occidente incontrò il Giappone*, Napoli: Guida.
- Slawson, D. (1987), *Secret Teaching in the Art of Japanese Gardens*, Tokyo: Kodansha International.
- Tafuri, M. (1964), *L'architettura moderna in Giappone*, Rocca San Casciano: Cappelli.
- Tafuri, M. (1980), *La sfera e il labirinto. Avanguardie e architettura da Piranesi agli anni '70*, Torino: Einaudi.
- Takashi, M. (1999), *Katachi*, New York: Chronicle Books.
- Tange, K. (1960), *Tradition and Creation in Japanese architecture* in *Walter Gropius, Kenzo Tange, Yasuhiro Ishimoto and Herbert Bayer, Katsura. Tradition and Creation in Japanese Architecture*, New Haven.
- Tanizaki, J. (1982), *Il libro d'ombra*, Milano: Bompiani.
- Wei-hsun Fu, C. (1995), *Japan in Traditional and Postmodern Perspectives*, New York: Suny Press.
- Wilson, P. (1989), *Western Objects, Eastern Fields*, Londra: AA Publishing.
- Wright, F.-L. (1950), *The Japanese Print Party*, Taliesin: tape transcript.

Wright, FL. (1968), *An Autobiography*, in Cary James, *The Imperial Hotel*, Tokyo: Charles E. Tuttle Company.

Yanagi, S. (1990), *The Unknown Craftsman*, Tokyo: Kodansha.

### Sui sistemi aggregati

Angelova, D., Dierichs, K. e Menges, A. (2015), *Graded Light in Aggregate Structures – Modelling the Daylight in Designed Granular Systems Using On-line Controlled Robotic Processes*, in Martens, B., Wurzer, G., Grasl, T. Lorenz, W., Schaffranek, R. (eds.), *Real Time – Proceedings of the 33rd eCAADe Conference – Volume 2*, Vienna University of Technology, Vienna, Austria, 16-18 September 2015.

Baverel, O. e Saidani, M. (1998), *The Multi-Reciprocal Grid System*, International Conference on Lightweight Structures in Civil Engineering, Varsavia: Jan B. Obrebski.

Culshaw, B. (1996), *Smart structures and materials*, Boston: Artech.

Di Raimo, A. (2014), *Francois Roche Eresie macchiniche e architetture viventi di New-Territories.com*, Roma: EdilStampa.

Dierichs, K. e Menges, A. (2017), *Granular Construction: Designed Particles for Macro-Scale Architectural Structures* in «Architectural Design», Vol. 87.

Dierichs, K. e Menges, A. (2010), *Material Computation in Architectural Aggregate Systems, in Formation, Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design In Architecture (ACADIA)*, New York City (USA), 21-24 October 2010.

Dierichs, K. e Menges, A. (2010), *Natural Aggregation Processes as Models for Architectural Material Systems*, in *Proceedings of the Design and Nature Conference 2010*, Pisa, Italy, Southampton: WIT Press.

## Riferimenti bibliografici

Dierichs, K. e Menges, A. (2012), *Material und Machine Computation als Grundlage Experimenteller Ästhetik in der Aggregat Architektur*, Kongress-Akten des VIII. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Ästhetik.

Dierichs, K., Angelova, D. e Menges, A. (2015), *Modelling Aggregate Behaviour*, in Ramsgaard Thomsen, M., Tamke, M., Gengnagel, C., Faircloth, B., Scheurer, F. (2015) *Modelling Behaviour – Proceedings of the Design Modelling Symposium Copenhagen 2015*, Copenhagen, Denmark.

Dierichs, K., Fleissner, F. e Menges, A. (2011), *Interrelation of experiment and simulation in the development of Aggregate Architectures*, Digital Proceedings of the International Symposium on Algorithmic Design for Architecture and Urban Design (ALGODE) in Tokyo (Japan) 14-16 March 2011.

Dierichs, K. e Menges, A. (2012), *Aggregate Architectures, Observing and Designing with Changeable Material Systems in Architecture*, in Costa, X., Thorne, M. (eds), *Change, Architecture, Education, Practices – Proceedings of the International ACSA Conference, Barcelona, Spain, 20-22 June 2012*.

Dierichs, K. e Menges, A. (2012), *Aggregate Structures: Material and Machine Computation of Designed Granular Substances*, in «Architectural Design» Vol. 82, N. 2, London: Wiley Academy.

Dierichs, K. e Menges, A. (2012), *Functionally Graded Aggregate Structures: Digital Additive Manufacturing with Designed Granulates*, in Cabrinha, M., Johnson, J., Steinfeld, K. (Eds.), *Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, San Francisco.

Dierichs, K. e Menges, A. (2012), *Material and Machine Computation of Designed Granular Matter: Rigid-Body Dynamics Simulations as a Design Tool for Robotically-Poured Aggregate Structures Consisting of Polygonal Con-*

*cave Particles*, in Achten, H., Pavlicek, J., Hulin, J., Matejdan, D. (eds.), Digital Physicality – Proceedings of the 30th eCAADe Conference, Czech Technical University in Prague, Faculty of Architecture (Czech Republic) 12-14 September 2012.

Dierichs, K. e Menges, A. (2013), *Aggregate Architecture: Simulation Models for Synthetic Non-convex Granulates*, in: Beesley, P., Khan, O., Stacey, M. (Eds.), Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) – Adaptive Architecture, Waterloo/Buffalo/Nottingham.5).

Dierichs, K. e Menges, A. (2015), *Granular Morphologies – Programming Material Behaviour with Designed Aggregates*, in «Architectural Design» Vol. 85 N. 5, London: Wiley.

Dierichs, K. e Menges, A. (2015), *Non-convex Designed Aggregates as Architectural Material Systems*, in Proceedings of the Particle Simulations Conference 2015, Erlangen.

Dierichs, K. e Menges, A. (2015), *Simulation of Aggregate Structures in Architecture: Distinct-Element Modeling of Synthetic Non-Convex Granulates*, in Block, P., Knippers, J., Mitra, N., Wang, W. (eds.), Advances in Architectural Geometry.

Dierichs, K. e Menges, A. (2016), *Towards an Aggregate Architecture: Designed Granular Systems as Programmable Matter in Architecture*, in «Granular Matter» n. 18 (25).

Dierichs, K., Schwinn, T. e Menges, A. (2012), *Robotic Pouring of Aggregate Structures – Responsive Motion Planning Strategies for Online Robot Control of Granular Pouring Processes with Synthetic Macro-Scale Particles*, in Brell-Cokcan, S., Braumann, J. (Eds.), *Robotic Fabrication in Architecture*,

## Riferimenti bibliografici

*Art and Design*, Proceedings of the Robots in Architecture Conference 2012, TU Vienna.

Dierichs, K., Wood, D., Correa, D. e Menges, A. (2017), *Smart Granular Materials: Prototypes for Hygroscopically Actuated Shape-Changing Particles*, in ACADIA – Disciplines & Disruption [Proceedings of the ACADIA Conference 2017], Cambridge, MA.

Diller, E. e Scofidio, R. (2002), *Blur: The making of nothing*, New York: Harry N. Abrams Inc.

Fagerstrom, G. (2009), *Dynamic Relaxation of Tensegrity Structures*, in *Between Man and Machine*. Proceedings of the 14Th International Asia: CAADRIA

Goulthorpe, M., Burry, M. e Dunlop, G. (2001), *Aegis hyposurface: The bordering of university and practice*, Proceedings of ACADIA.

Hensel, M. e Menges, A. (2008), *Aggregates*, in «Architectural Design» Vol.78 n. 2.

Hensel, M. e Menges, A. (2008), *Material system: Aggregate*, in «ArchPlus» n. 188.

Ingber, E. D. (1998), *The Architecture of Life, A university set of building rules seems to guide the design of organic structures – from simple carbon compounds to complex cells and tissues*, Scientific American.

Kawaguchi, K. e Ohya, S. (2009), *Monitoring of full-scale tensegrity skeletons under temperature change. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, Valencia.

Liapi, K. A. (2004), *A Computer Based System for the Design and Fabrication of Tensegrity Structures* In *Fabrication: Examining the Digital Practice of*

Architecture: Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, Toronto.

Liu, Y. (2002), *Defining digital architecture*, FEIDAD award. Berlin: Birkhauser.

Makishima, 2001, S. *Pattern Dynamics: A Theory of Self-Organization*, Japan: Kodansha Scientific.

Marchesini, R. (2002), *Post-human. Verso nuovi modelli di esistenza*, Torino: Bollati Boringhieri.

Motro, R. 2003, *Tensegrity: Structural Systems for the Future*, Londra: HPS.

Negroponete, N. (1975), *Soft Architecture Machines*, Cambridge: MIT Press.

Novak, M. (1991), *Liquid Architecture* in Benedikt, M. (a cura di), *Cyberspace: First Steps*, Cambridge: The MIT Press.

Novak, M. (2007), *Babele 2000*, in [http://www.trax.it/marcos\\_novak.htm](http://www.trax.it/marcos_novak.htm).

Otto, F. (1984), *Diatoms I: Shells in Nature and Technics* West Germany: Institut für Leichte Flachentragwerke.

Severino, E. (2003), *Tecnica e architettura*, Milano: Cortina Raffaello.

Pearce, P. (1978), *Structure in Nature Is a Strategy for Design*, Massachusetts: MIT Press.

Pizzigoni, A. and Ruscica, G. 2015, *Recupero di edifici esistenti mediante sistemi tensegrali responsivi*, XXV Congresso C.T.A., Salerno.

Popovic Larsen, O. (2008), *Reciprocal Frame Architecture*, Oxford: Architectural Press.

## Riferimenti bibliografici

Rusenova, G., Dierichs, K., Baharlou E. e Menges, A. (2016), *Feedback- and Data-driven Design for Aggregate Architectures: Analyses of Data Collections for Physical and Numerical Prototypes of Designed Granular Materials*, in Posthuman Frontiers: Data, Designers, and Cognitive Machines, Proceedings of the 36th Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), Ann Arbor.

Stengers, I. e Prigogine, I. (1991), *La complessità. Esplorazioni nei nuovi campi della scienza*, Torino: Einaudi.

Topic, N., Pöschel, T., Dierichs, K. e Menges, A. (2015), *Packings of Complex Shaped Particles in Cylinders*, in Proceedings of the Particle Simulations Conference 2015, Erlangen.

Zhao, Y., Liu, K., Zheng, M., Bares, J., Dierichs, K., Menges, A. e Behringer, R.P. (2016), *Packings of 3D Stars: Stability and Structure*, in «Granular Matter» n. 18.

## Su ordine & caos/ forma & frammento

Asch, M. G. (2004), *La psicologia della Gestalt nella cultura tedesca dal 1890 al 1967*, Milano: Franco Angeli.

Bachelard, G. (1975), *La poetica dello spazio*, Bari: Dedalo.

Bak, K. C. (1989), *The Physics of Fractals* in «*Physica D: Nonlinear Phenomena*», Volume 38, nn. 1–3, September 1989.

Barnsley, M. (1988), *Fractals Everywhere*, UK: Academic Press Inc.

Barthes, R. (1983), *Empire of Signs*, New York: Hill and Wang.

Baryshev, Y. e Teerikorpi, P. (2002), *Discovery of Cosmic Fractals*, World Scientific Pub Co Inc.

- Baudrillard, J. (1988), *La sparizione dell'arte*, Milano: Abscondita.
- Baudrillard, J. e Nouvel, J. (2003), *Architettura e nulla. Oggetti singolari*, Milano: Electa.
- Bauman, Z. (2003), *Intervista sull'identità*, Vecchi, B. (a cura di), Roma: Laterza.
- Bauman, Z., (2006), *Vita liquida*, Roma: Laterza.
- Benevolo, L. (1991), *La cattura dell'infinito*, Bari: Laterza.
- Berque, A. (1986), *Vivre l'espace au Japon*, Parigi: Presses Universitaires de France.
- Biraghi, M. (2008), *Storia dell'architettura contemporanea I. 1750-1945*, Torino: Einaudi.
- Biraghi, M. (2008), *Storia dell'architettura contemporanea II. 1945-2008*, Torino: Einaudi.
- Biuso, A. G. (2009), *La mente temporale*, Roma: Carocci.
- Bohm, D. (1996), *Universo, Mente E Materia. L'ordine Sottostante Al Caos Nella Fisica Moderna*, Como: Red.
- Boyer C. (1990), *Storia della matematica*, Milano: Mondadori, Milano.
- Bozzi, P. (1989), *Fenomenologia sperimentale*, Bologna: Il Mulino.
- Briggs, J. (1993), *L'estetica del caos*, Como: Red.
- Brunetti, F. (1964), *Opere di Galileo Galilei*, vol. II, Torino: UTET.
- Cacciari, M. (2002), *Loos e il suo angelo*, Milano: Electa.



## Riferimenti bibliografici

Cacciari, M. (2004), 'Nomadi in prigione', in *La città infinta*, Bonomi, A. e Abruzzese, A. (a cura di), Milano: Mondadori.

Caja, M., Landsberger M. e Malcovati, S. (a cura di) (2015), *Tipo, forma, figura*, Milano: Libraccio.

Capozzi, R. (2010), *Le architetture ad aula: il paradigma Mies van der Rohe*, Napoli: Clean.

Carbonara, G. (1997), *La Teoria di Cesare Brandi in Avvicinamento al restauro. Teoria, storia, monumenti*, Napoli: Liguori.

Cartesio, (2007), *Meditazioni metafisiche*, traduzione italiana di Lucia Urbani Ulivi, Milano: Bompiani.

Casiato, M. e Muratore, G. (1985), *Gibellina: il museo*, Roma: annali dell'architettura italiana.

Cassirer, E. (2009), *Eidos ad Eidolon. Il problema del bello e dell'arte nei dialoghi di Platone*, Milano: Raffaello Cortina.

Channah, E. e Desser D. (1994), *Cinematic Landscapes: Observations on the Visual Arts and Cinema of China and Japan*, Austin: University of Texas Press.

Colquhoun, A. (1989), *Architettura moderna e storia*, Bari: Laterzia.

Crosbie M. J. (1983), *Is It a Catenary? New questions about the shape of Saarinen's St. Louis*, Arch. AIA Journal (June).

Crotti, S. (2000), *Figure architettoniche: soglia*, Milano: Bompiani.

Cuomo, A. (2015), *La fine (senza fine) dell'architettura*, Napoli: Deleyva.

Curtis, W. (1982), *Modern architecture since 1900*, Oxford: Phaidon Press.

D'Alfonso, E. e Franzini, E. (1991), *Metafora, mimesi, morfogenesi, progetto*, Milano: Guerini.

D'Arcy, W.T. (1992), *On Growth and Form*, USA: Dover Publications.

D'Urso, S. (2008), *Barcellona, lo spazio pubblico tra infrastrutture e paesaggi*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli.

D'Urso, S. (2009), *Il senso dell'abitare contemporaneo. vol. 1: La casa unifamiliare*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli.

D'Urso, S. (2012), *Riflessioni sull'architettura. Per un ripensamento nell'epoca della sua presunta crisi*, Catania: Bonanno.

D'Urso, S. (2017), *Memorie di un luogo. Artifici mnemotecnici nel progetto dello spazio pubblico*, Catania: Malcor D'.

D'Urso, S. e Cassarà, L. (2013), *Goodbye Topolinia. Su architettura e fumetto*, Catania: Malcor D'.

D'Urso, S. e Miccione, D. (2013), *Singolarità e formularità*, Catania: Malcor D'.

Dal Co, F. (1994), *Tadao Ando: le opere, gli scritti, la critica*, Milano: Electa.

De Bernardi, M.L. 1999, *La forma e la sua immagine*, Pisa: ETS.

De Rosa, A. (1998), *L'infinito svelato allo sguardo*, Torino: Città Studi.

Deleuze, G. (1968), *Differenza e ripetizione*, Bologna: Il mulino.

Deleuze, G. (1969), *Logica del senso*, Milano: Feltrinelli.

Deleuze, G. (1988), *La piega. Leibniz e il Barocco*, Torino: Einaudi.

Deleuze, G. (2002), *Foucault*, Napoli: Cronopio.

## Riferimenti bibliografici

Dell'Osso, R. (2007), *L'architettura della villa*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli.

Derrida, J. (2008), *Adesso architettura*, Milano: Libri Scheiwiller.

Di Blasi, M. T. (1997) *Il Filo di Arianna - Chiesa di S. Euplio Monumento funerario romano (ipogeo)*, Catania: Maimone editore. Dorfles, G. (1986), *Elogio della disarmonia. Arte e vita tra logico e mitico*, Milano: Garzanti.

Dorfles, G. (1986), *Elogio della disarmonia. Arte e vita tra logico e mitico*, Milano: Garzanti.

Eco, U. (1962), *Opera aperta: forma e indeterminazione nelle poetiche contemporanee*, Milano: Bompiani.

Eisenman P. (1999), *Diagram Diaries*, New York: Universe Pub.

Eisenman, P. (1987), *La fine del classico e altri scritti*, Rossi, R. (a cura di), Venezia: Cluva.

Eisenman, P. (2009), *La base formale dell'architettura moderna*, Bologna: Pendragon.

Emmeche, C. (1996), *Il giardino nella macchina. La nuova scienza della vita artificiale*, trad. it. S. Frediani, Torino: Bollati Boringhieri.

Fachinelli, E. (1989), *La mente estatica*, Milano: Adelphi.

Galilei G. (1990), *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e i movimenti locali*, Giusti, E. (a cura di) Torino: Giulio Einaudi.

Goldberger, A.L. et al (1990), *Chaos and Fractals in Human Physiology*, Scientific American, 1990 Feb, vol. 262, n. 2.

- Heisenberg, W. (1958), *Fisica e Filosofia*, Milano: Il saggiatore, 2015.
- Heyman J. (1982), *The Masonry Arch*, Chichester, Ellis Horwood Limited.
- Juergens, H. et al. (1990), *The Language of Fractals*, Scientific American, 1990 Aug, vol. 263, n. 2.
- Kanizsa, G. (1979), *Grammatica del vedere. Saggi su percezione e Gestalt*, Bologna: Il Mulino.
- Kanizsa, G. (a cura di) (1971), *I fondamenti della psicologia della Gestalt*, Firenze: Giunti.
- Kanizsa, G. e Caramelli, N. (a cura di), (1988), *L'eredità della psicologia della Gestalt*, Bologna: Il Mulino.
- Kanizsa, G. e Legrenzi, P. (a cura di), (1978), *Psicologia della Gestalt e psicologia cognitivista*, Bologna: Il Mulino.
- Kanizsa, G., Legrenzi, P. e Sonino, M. (1983), *Percezione, linguaggio, pensiero*, Bologna: Il Mulino.
- Katz, D. (1948), *La psicologia della forma*, Torino: Boringhieri.
- Kline M. (1991), *Storia del Pensiero Matematico; Volume I: dall'antichità al Settecento*, Torino: Giulio Einaudi.
- Koolhaas, R. (1978), *Delirious New York: A Retroactive Manifesto for Manhattan*, Londra: Thames & Hudson.
- Koolhaas, R. (2006), *Junkspace*, Macerata: Quolibet.
- Leyton, M. (2005), *Shape as Memory \_The Information Technology Revolution in Architecture*, Roma: EdilStampa.

## Riferimenti bibliografici

Linazasoro, J. I. (2015), *La memoria dell'ordine. Paradossi dell'architettura moderna*, Siracusa: Lettera22.

Liotard, J-F. (1979), *La condizione postmoderna: rapporto sul sapere*, Milano: Feltrinelli.

Maistrini, M. (2005), *Il figurale in J.-F. Lyotard*, Milano: Mimesis.

Mandelbrot, B. (1977) *Fractals: Form, chance and Dimension*, USA: W.H. Freeman & Company.

Mandelbrot, B. (1983) *The Fractal Geometry of Nature*, USA: W.H.Freeman & Company.

Maranjo, C. (1973), *Teoria della tecnica Gestalt*, Roma: Melusina.

Marino, B. G. (2013), *Architettura, archeologia e paesaggio tra preesistenze e progetto. Temi emergenti: le "cose" e l'autenticità*, in *Pietra su Pietra. La storia come materiale di progetto*, Milano: CUES.

Merlau-Ponty, M. (1945), *Fenomenologia della percezione*, Milano: Il Saggiatore, 1972.

Messina, B. (2008), *Spazi domestici del XX secolo*, Siracusa: Lettera22.

Messina, B. (2014), *Villa Savoye e la poetica dell'ossimoro*, Siracusa: Lettera22.

Messina, B. (a cura di) (1993), *Francesco Venezia: architetture in Sicilia 1980-1993*, Napoli: Clean.

Mies Van der Rohe in «Die Form», 1923.

Moneo, R. (1988), *L'idea di durata e i materiali da costruzione in La solitudine degli edifici ed altri scritti. Questioni intorno all'architettura*, Casiraghi, A.

e Vitale, D. (a cura di), Torino: Allemandi.

Montaner, J.M. (1996), *Dopo il movimento moderno. L'architettura della seconda metà del '900*, Roma-Bari: Laterza.

Morin, E. (2000), *La testa ben fatta*, Milano: Raffaello Cortina Editore.

Moussavi, F. and Kubo M. (2008), *The Function of Ornament*, Barcelona: Actar.

Musso, P. (1997), *Filosofia del caos*, Milano: FrancoAngeli.

Niemeyer, O. (1978), *La forma nell'architettura*, Giancotti A. Benedikt, M. (a cura di), Milano: Mondadori.

Osserman R. (2010), *Mathematics of the Gateway Arch*, Notices of the American Mathematical Society vol. 57, n. 2.

Pareyson, L. (1954), *Estetica. Teoria della formatività*, Torino: Edizioni di Filosofia.

Peitgen, H.-O. e Richter, P.H. (1986), *The Beauty of Fractals*, New York: Springer.

Peitgen, H.-O. e Saupe, D. (1988), *The Science of Fractal Images*, New York: Springer.

Perls, F. (1977), *L'approccio della Gestalt. Testimone oculare della terapia*, Roma: Astrolabio.

Piano, R. (1997), *Giornale di bordo*, Firenze: Passigli.

Pluchino, A. (2015), *La firma della complessità: una passeggiata al margine del caos*, Catania: Malcor D'.

## Riferimenti bibliografici

Prigogine I. e Stengers I. (1979), *La nuova alleanza. Metamorfosi della scienza*, Torino: Einaudi, 1999.

Prigogine, I. (1997), *La fine delle certezze: il tempo, il caos e le leggi della natura*, Torino: Bollati Boringhieri.

Prigogine, I. (2011), *Le leggi del caos*, Roma-Bari: Laterza.

Purini, F. (2001), *Comporre architettura*, Bari: Laterza.

Richie, D. (2011), *Viewed Sideways*, Berkley: Stone Bridge Press.

Rossi, A. (1987), *Frammenti*, in *Architetture 1959-1987*, Ferlenga, A. (a cura di), Milano: Electa.

Rossi, A. (1990), *Autobiografia scientifica*, Milano: Nuove Pratiche.

Rowe, C. (1981), *Collage city*, Milano: Il saggiaatore.

Rowe, C. (1990), *La matematica della villa ideale e altri scritti*, Bologna: Zanichelli.

Schroeder, M.R. (1991), *Fractals, Chaos, Power Laws*, New York: Dover.

Simonetti C. (2006), *Galileo e la catenaria*. Archimede, anno LVIII, n. 4, Firenze: Le Monnier.

Sornette, D. (2004), *Critical Phenomena in Natural Sciences: Chaos, Fractals, Selforganization and Disorder*, New York: Springer.

Stewart, I. (2009), *Dio gioca a dadi? La nuova matematica del caos*, Torino: Bollati Boringhieri.

Tafari, M. (1984), *Il frammento, la figura, il gioco. Carlo Scarpa e la cultura architettonica italiana*, in *Carlo Scarpa, opera completa*, Dal Co, F. e Mazzariol,

G. (a cura di), Milano: Electa.

Thom, R. (1980), *Parabole e catastrofi. Intervista su matematica, scienza e filosofia*, Giorello G. e Martini, S. (a cura di), Milano: Il Saggiatore.

Thom, R. (1980), *Stabilità strutturale e morfogenesi. Saggio di una teoria generale dei modelli*, Torino: Einaudi.

Thom, R. (1985), *Modelli matematici della morfogenesi*. Torino: Einaudi.

Thom, R. (1990), *Morfologia del semiotico*, Milano: Booklet.

Toccafondi, F. (2000), *Il tutto e le parti. La Gestaltpsychologie tra filosofia e ricerca sperimentale*, Milano: Franco Angeli.

Trinh Xuan, T. (1998), *Il caos e l'armonia. Bellezze e asimmetrie da mondo fisico*, Bari: Dedalo, 2000.

Tschumi, B. (2005), *Architettura e disgiunzione*, Bologna: Pendragon.

Turcotte, D. (1997). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, UK: Cambridge University Press.

Valéry, P. (1938), *Du sol et de l'informe*, in *Degas Danse Dessin* in Id., *OEvres*, II, éd. Hytier, Paris: Gallimard, 1960.

Valéry, P. (1921), *Eupalinos o l'architetto*, Milano: Mimesis, 2011.

Valtolina, A. (2016), *Il sogno della forma: Un'idea tedesca nel Novecento* di Gottfried Benn, Macerata: Quodlibet.

Vattimo G. (1980), *Le avventure della differenza*, Milano: Garzanti.

Venezia, F. (1998), *L'architettura, gli scritti, la critica*, Documenti di architettura, Milano: Electa.



## Riferimenti bibliografici

Venezia, F. (2010), *La natura poetica dell'architettura*, Pordenone: Giavedoni.

Venturi, R. (1980), *Complessità e contraddizioni nell'architettura*, Bari: Dedalo.

Vidler A. (2009), *La deformazione dello spazio. Arte, architettura e disagio nella cultura moderna*, trad. it. Laera, M. (a cura di), Milano: Postmedia book.

Vidler, A. (2006), *Il perturbante dell'architettura*, Torino: Einaudi.

Villarceau A. Y. (1853), *Sur l'établissement des arches de pont*, Parigi: Imprimerie Impériale.

Viola, F. 2013, *Architettura incompiuta, architettura informe in Pietra su Pietra. La storia come materiale di progetto*, Milano: CUES.

Von Ehrenfels, Ch. (1979), *Le qualità figurali*, Faenza: Errano, 1980.

Wittkower, R. (1953), *Systems of Proportion*, in *Architects' year book V*.

Wittkower, R. (1992), *Idea e Immagine*, Torino: Einaudi.

Wölfflin, H. (2012), *Concetti fondamentali della storia dell'arte*, Milano: Abscondita.

Zevi, B. (1948), *Saper vedere l'architettura*, Torino: Piccola biblioteca Einaudi.

Zevi, B. (1950), *Storia dell'architettura moderna I*, Torino: Einaudi.

Zevi, B. (1950), *Storia dell'architettura moderna II*, Torino: Einaudi.

Zumthor, P. (2003), *Pensare architettura*, Milano: Mondadori.