

Elena Casalino

BIOMIMETICA:
INSEGNAMENTI DALLA NATURA
PER STRUTTURE OTTIMIZZATE DEL FUTURO



Politecnico di Torino
Tesi di Laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile

Collegio di Architettura
Codice Classe LM-4 (DM270)

a.a 2018/2019

Relatore: Bernardino Chiaia

Un ringraziamento speciale a:

A tutti i futuri architetti

INDEX.

1.

2.

3.

INTRODUZIONE

PREMESSE E TEMI.....6

OBIETTIVI.....8

LE ORIGINI.....11

1.1 UOMO NATURA E
ARCHITETTURA.....12

1.2 GLI ESITI DELLA
BIOMIMETICA
ANTICA.....22

FARE BIOMIMETICA OGGI.....29

2.1 DEFINIZIONE.....30

2.2 IL PENSIERO
BIOMIMETICO:
PROBLEM-BASED
E SOLUTION-BASED.....35

2.3 BIOMIMESI DI
FORMA,
PROCESSO
E SISTEMA.....39

► CASI STUDIO

01. WATERCUBE.....42

02. TURNING TORSO.....44

I FRATTALI.....46

03. CRANBROOK SCIENCE
CENTRE.....47

04. EASTGATE CENTRE.....48

05. URBAN ALGAE
CANOPY.....49

06. SILK PAVILION.....50

PROGETTARE COME LA NATURA.....53

3.1 BIOMIMETICA COME
SOLUZIONE
AMBIENTALE.....54

3.2 ECONOMIA
CIRCOLARE:
*CRADLE TO
CRADLE*.....59

► CASI STUDIO

07. CARDBOARD TO
CAVIAR.....66

08. MOBIUS PROJECT.....68

09. EDEN PROJECT.....70

10. SAHARA PROJECT.....72

3.2.1 *LIFE CYCLE
ASSESSMENT
E CRADLE TO
CRADLE*.....74

3.3 L'OTTIMIZZAZIONE:
NATURA VS
ARCHITETTURA.....77

3.4 MATERIALI
NATURALI VS
INGEGNERISTICI.....81

4.

► CASI STUDIO

- 11. L'EFFICIENZA UMANA
COME ISPIRAZIONE 89
- 12. UN VETRO INNOVATIVO 95
- 13. CALCESTRUZZI "VIVI" 96
- 14. MATERIALI CON MEMORIA
DI FORMA 98

3.5 LA GEOMETRIA OTTIMIZZATA DELLA NATURA 101

3.6 STRUCTURE FIRST: I PADRI DELL' OTTIMIZZAZIONE STRUTTURALE 110

► CASI STUDIO

- 15. ANTONI GAUDÍ:
BIOMIMETICA O NO? 120

3.7 IMPARARE DAGLI ERRORI 127

L'APPROCCIO PARAMETRICO ALLA BIOMIMETICA 135

4.1 LE ORIGINI DEL PARAMETRICISMO... 136

4.2 LA LOGICA DEL GENERATIVE- DESIGN 140

4.3 LA PROGETTAZIONE CON GRASSHOPPER 146

► CASI STUDIO

- 16. AL BAHAR TOWERS 152
- 17. ICD-ITKE RESEARCH
PAVILION 2013-14 154
- 18. ESPLANADE THEATRE 156
- 19. SHI LING BRIDGE 158
- 20. HYGROSKIN ED
HYGROSCOPE 160

4.4 L'URBANISTICA PARAMETRICA 162

► CASI STUDIO

- 21. ISTANBUL
MASTERPLAN 168
- 22. IAAC-GENETIC
OPTIMISATION 170

4.5 RAGIONARE NELLA TERZA DIMENSIONE 173

► CASO STUDIO

- 23. PROGETTAZIONE DI UN MURO
CON STAMPA 3D 184

CONCLUSIONI 187

RINGRAZIAMENTI 191

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA 192

INTRODUZIONE

Premesse e temi

“Ogni cosa che puoi immaginare, la natura l’ha già inventata” disse il fisico tedesco A. Einstein: un concetto chiave su cui riflettere al giorno d’oggi.

Seppure il termine biomimetica sia piuttosto recente, il concetto, al contrario, è molto antico: sin dall’epoca primitiva l’uomo si è istintivamente ingegnato in strumenti e costruzioni funzionali ispirandosi alla natura.

Per capire pienamente come si è giunti oggi alla definizione di tale scienza nonché ad una nuova reinterpretazione e concezione del progettare, è fondamentale contestualizzare, descrivendo la mutazione del rapporto tra uomo, architettura e natura avvenuto nel corso della storia, parallelamente al cambio ideologico di ogni epoca. Oggi si può affermare che, nella maggior parte dei casi, si è persa quella “spiritualità”, quella necessità di instaurare un profondo legame con la natura e la crisi ambientale odierna è una chiara dimostrazione di quanto gli interessi economici e la dominanza di molti paesi nel quadro mondiale abbiano portato al declino del pensiero umano in questi termini. L’uomo è colui che inevitabilmente abita da sempre la natura e oggi giorno più che mai, il progettista deve sviluppare una coscienza critica e dimostrare che solo tramite l’architettura sostenibile, o meglio ancora ispirata al mondo naturale, può ripristinare tale legame. Il rapporto uomo-ambiente-architettura costituisce il filo conduttore di questa ricerca e rappresenta quel punto di partenza volto a instaurare un tipo di auto-riflessione cosciente, soprattutto sulla valenza del settore della biomimetica come soluzione a tale crisi.

In architettura, *Biomimetic-Thinking* equivale a investigare sul vastissimo mondo dei meccanismi della biologia, arricchendo, così, il concetto di sostenibilità; significa ricavare più informazioni e soluzioni possibili dal mondo naturale e,

conseguentemente, reinterpretare e riprodurre tali funzionamenti con l'obiettivo di incrementare il benessere stesso dell'uomo. Il mondo biologico funge infatti da fonte principale d'ispirazione, in relazione alla enorme quantità di soluzioni che può ricavarne l'uomo. Di fatto la similitudine tra il funzionamento e le necessità di un edificio e quelle di un organismo è più marcata di quanto possa apparire a prima vista. L'edificio del futuro tende ad avvicinarsi sempre di più ad un organismo vivente, che respira, si adatta alle condizioni in cui si trova in risposta agli stimoli esterni e infine, inevitabilmente, muore dissipandosi nell'ambiente; senza produrre alcun tipo di rifiuto, al contrario, generando ulteriore "vita", chiudendo così il ciclo.

Partendo da questo presupposto, si indagano le strategie per cui la progettazione odierna possa avvicinarsi all'essenza del *Nature-Thinking*, cercando di capire il processo delle tecniche generative in natura. Così come la natura è in grado di minimizzare la materia esistente e i consumi energetici, l'architettura deve proporsi di economizzare in un modo analogo, adottando gli strumenti che ha a disposizione.

Partendo dal concetto di ottimizzazione, in particolare sul legame indissolubile tra struttura, forma e materiale, si confrontano le due differenti gerarchie del processo di ottimizzazione che avviene in natura (secondo il *Nature-Thinking*) e in architettura (seguendo il *Design-Thinking*) e, infine, si espone la logica dell'efficienza di alcune forme geometriche della natura.

Successivamente, si affronta il settore dell'ottimizzazione strutturale ispirata al mondo naturale partendo dagli esordi, ovvero gli anni Cinquanta. Ciò innesca una riflessione: a contrastare quelle difficoltà di calcolo individuate dai progettisti di un tempo, i vantaggi oggi offerti dalla progettazione tecnologica odierna sono ineguagliabili; per esempio, il processo generativo dei nuovi software parametrici si rispecchia, in qualche modo, nell'essenza del processo di creazione naturale. A partire dal terzo capitolo, si indagano proprio tali strategie che si avvicinano concettualmente al *Nature-Thinking*. Si evidenziano, dunque, i vantaggi dell'approccio parametrico, sottolineando quanto abbia rivoluzionato definitivamente la logica della progettazione, basandosi su una precisa

valutazione a priori di una serie complessa di parametri. Inoltre, vengono approfonditi nuovi sistemi che semplificano la realizzazione di artefatti biomimetici, come il metodo della stampa 3D, uno strumento di riproduzione ecologico, associato alla progettazione parametrica: attraverso l'analisi di alcuni esempi concreti, si evidenziano molteplici vantaggi.

Obiettivi

L'intento di questo lavoro è un invito a prendere coscienza di come le scelte di tutti i giorni, abbiano effetti immediati e concreti sull'ambiente in cui viviamo, comprendendo sensibilmente lo stretto legame primitivo tra l'uomo ed il suo habitat, il meraviglioso mondo della natura che stiamo danneggiando poco a poco.

La natura non si esprime attraverso la parola, il suo linguaggio è l'efficienza. Si vuole dimostrare che, grazie all'impegno e ad una grande collaborazione tra specialisti di settori diversi, la biomimetica è - e sarà - la soluzione a molti problemi. Lo studio della natura può rivelare soluzioni più sostenibili in termini di efficienza, processi, funzioni, sistemi e materiali.

L'invito è quello d'interrogare la natura in modo nuovo e con nuovi strumenti scientifici e culturali, oltre ad integrare efficacemente i principi e gli strumenti della biomimesi con le strategie più consolidate della progettazione sostenibile.

Janine Benyus, fondatrice del *Biomimicry Institute*, lasciò intendere il significato della propria filosofia così:

"Uno dei modi più importanti per intendere questo concetto è capire ciò che non è. A volte la gente mi dice: "Oh, sto facendo biomimetica! Ho appena messo il pavimento in sughero a casa mia". Oppure, "pulisco le mie acque reflue con i batteri". Per ripulire la confusione, abbiamo introdotto i concetti di

*bio-utilizzato e bio-assistito, che sono molto diversi da quello del fare biomimetica”.*¹

Tale scienza potrà sì in futuro fornire all'architettura, come all'ingegneria e al design, un contributo decisamente promettente e soprattutto strategico, ma grazie a soluzioni progettuali innovative che superino l'essenza della sostenibilità, elevandosi ad una dimensione più sensibile nei confronti della natura e non solo: biomimetica significa equilibrio tra l'aspetto ambientale, socio-culturale ed economico.

In definitiva, l'invito è quello di unire le forze per cambiare l'ottica di progettazione e avere fiducia nel progresso, credere in ciò che la natura fa ed è: sensibile, logica ed efficiente con ciò che ha. La speranza è quella di innescare nella mente dei nuovi progettisti, in quanto partecipanti alla creazione di un nuovo futuro, un meccanismo di pensiero differente: mirare ad uno sviluppo che sia soprattutto sostenibile e credere a quella splendida affermazione di Francis Bacon, il quale già nel Seicento, sosteneva che *“alla Natura si comanda solo ubbidendole”*.

1. Tradotto dalla seguente fonte:
https://biomimicry.net/b38files/A_Biomimicry_Primer_Janine_Benyus.pdf

1

LE ORIGINI

*<<Troverai di più nei boschi che nei libri.
Gli alberi e le pietre ti insegneranno
ciò che non si può imparare dai maestri.>>*

S. Bernardo

1.1 Uomo, natura e architettura²

La contestualizzazione della relazione tra l'uomo e la natura nel corso della storia è di fondamentale importanza per arrivare a definire e comprendere gli aspetti inerenti alla biomimetica.

Arriveremo ad immaginare le caratteristiche della nuova architettura ed a descriverne i propri campi operativi attraverso la comprensione dell'evoluzione del rapporto tra architettura e ambiente in un contesto storico, ricostruendo le principali fasi del pensiero dell'uomo, definendo analogie e divergenze con il pensiero attuale.

Si tratta di un rapporto per sua natura complesso e bidirezionale, di interazione dinamica che nasce proprio con l'arrivo dell'essere umano sulla Terra. La natura è definibile come l'habitat idealmente e potenzialmente perfetto per l'uomo, grazie al quale si è potuto evolvere servendosi delle migliori strategie per vivere e riprodursi.

Come afferma Renzo Piano:

“Quello dell'architetto è un mestiere antico come cacciare, pescare, coltivare ed esplorare. Dopo la ricerca del cibo...viene la ricerca della dimora. Ad un certo punto, l'uomo, insoddisfatto dei rifugi offerti della natura, è diventato architetto.”

Una vera e propria cultura urbana nacque - in un periodo compreso tra gli 11000 e i 9500 anni fa - col passaggio dall'economia di caccia a quella dell'agricoltura,

2. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- Curtis W. J., *Modern Architecture Since 1900*, Phaidon, London, 2000
- Frampton K., *Storia dell'architettura moderna*, Zanichelli, Bologna, 2008
- Gruber P., *Biomimetics in architecture: architecture of life and buildings*, SpringerWienNewYork, Mörlenbach, 2011
- Peretti G., *Verso l'ecotecnologia in architettura*, BE-MA editrice, Milano, 1997
- Spagnoli L., *Storia dell'urbanistica moderna: 1*, Zanichelli, Bologna, 2008

quando l'uomo diventò sedentario e la costruzione equivaleva al bisogno di ripararsi.

La necessità di abitare la natura stimolò l'essere umano, quindi, a costruire sempre di più.

Dalle prime dimore primitive agli imponenti edifici dedicati al culto di divinità. Perché la necessità di edifici sacri? L'uomo tuttavia, non smise mai di interrogarsi sull'identità della natura. L'essere umano poco a poco si identificava con le sue esperienze sensoriali relative all'ambiente in cui risiedeva per comprendere meglio la natura, la cui origine, nel corso della storia, ha sempre frustrato la conoscenza umana. L'esistenza delle antiche civiltà, di fatto, si basava su una stretta e costante relazione e dialogo con la natura, la quale rappresentava un mistero da scoprire, imitare e venerare.

Per giustificarla e non essere intimorito da essa, l'uomo individuò nella natura la presenza di entità spirituali, divine, uniche veri responsabili di tutti gli eventi del mondo. Le culture antiche si fondavano su tradizioni, leggende e credenze

[Fig. 1] Immagine di una delle recenti scoperte nella giungla del nord del Guatemala di una delle "megapoli" appartenente alla civiltà Maya. Photo credit NationalGeographic©



religiose, con l'intento di tradurre in modo allegorico – o divino - la natura e i suoi fenomeni, creando vere e proprie leggi fisiche e chimiche.

Nacque così l'architettura sacra, oggi un patrimonio inestimabile, che contraddistingue e manifesta le conoscenze e credenze dell'epoca di ogni cultura nel mondo e nel tempo. Tra queste, le costruzioni monolitiche rappresentano uno dei misteri tutt'oggi più inspiegabili tra gli archeologi, come il famoso complesso di Stonehenge, un vero e proprio santuario astronomico dell'era neolitica, situato nella piana di Salisbury a sud di Londra³.

L'orientamento degli edifici sacri era ritenuto di grande importanza nell'antichità, rappresentando proprio quel nesso tra uomo e natura; le civiltà affascinanti del passato, quali Maya⁴, Inca⁵, Egizi⁶ e Babilonesi⁷ basandosi sugli orientamenti planetari o stellari, crearono intere città ed edifici perfettamente funzionali che, oggi, risultano curiosamente inspiegabili tenuto conto delle tecniche di

3. Varie sono le ipotesi scientifiche circa le funzioni di questo tempio dell'era neolitica: una delle più plausibili è che avesse una finalità astronomico-calendariale

4. I Maya erano esperti astronomi, in grado di osservare i pianeti e le stelle con incredibile precisione, pur non possedendo né telescopi né strumenti moderni. Con semplici strumenti, prevedevano le eclissi, il sorgere e il tramonto del sole e dimostravano approfondite conoscenze astronomiche sui cicli della luna e sulle stelle. Per i maya, questi elementi celesti rappresentavano delle divinità. La stella polare era molto importante per la loro cultura, probabilmente usata come guida per l'orientamento degli edifici. I Maya erano molto attenti al moto degli astri, costruirono infatti le loro città seguendo particolari allineamenti. Molte città erano orientate verso la levata o il tramonto del Sole ai solstizi, inoltre l'orientazione teneva conto della latitudine del luogo. Inoltre i Maya utilizzavano gli assi delle loro città e quelli dei palazzi più importanti per determinare con l'anticipo di uno o due dei loro mesi il passaggio del Sole allo zenit.

5. Gli Inca diedero alla luce una delle sette meraviglie del mondo moderno, Machu Picchu. Esiste una solida evidenza che furono seguiti criteri astronomici e sacri per la costruzione di questa cittadina delle Ande peruviane. Infatti l'allineamento di alcuni edifici importanti coincide con l'azimut solare durante il solstizio, in maniera costante e per niente casuale con i punti di aurora e tramonto del sole in determinati periodi dell'anno con le vette dei monti circostanti.

6. Le piramidi sorsero durante l'Antico Regno (2850 – 2200 a.C. circa) e il loro uso si estese fino alla XVII dinastia, intorno al 1600 a.C. È ben noto il fatto che le cinque piramidi principali della quarta dinastia (le tre maggiori di Giza e le due di Snefru a Dashur) furono orientate con un alto grado di precisione ai punti cardinali. Tuttavia è difficile stabilire oggi con precisione l'orientamento originale, poiché il loro rivestimento è quasi interamente distrutto, salvo alcune eccezioni.

7. I Babilonesi nutrivano un grande interesse verso il cielo. I Babilonesi diedero un nome alle costellazioni e le collocarono in posizioni che avevano un rapporto preciso l'una con l'altra. Tra le tavolette di creta scoperte nelle rovine della civiltà babilonese sono state ritrovate mappe stellari.

costruzione e delle conoscenze astronomiche del tempo. Servendosi dell'intuizione, diedero alla luce elementi imponenti ed eccezionali, strettamente legati a fenomeni naturali.

Anche in Oriente, in tempi molto antichi, l'architettura veniva influenzata dal rapporto dell'essere umano con la natura, come attesta Il *Vastu Shastra*⁸. In particolare i templi indù venivano impostati secondo un disegno - il *vastupurusha mandala* - che raffigurava il corpo dell'uomo cosmico originale, quale riferimento per organizzare gli spazi interiori.

L'applicazione di questa dottrina permetteva di ottenere degli ambienti abitativi sereni ed equilibrati, per raggiungere il benessere e il successo personale in ogni settore della vita e soprattutto armonizzare la relazione spazio-uomo-natura. I testi antichi Vastu attestavano che per il benessere di tutta l'umanità, tutte le case, i villaggi e le città dovevano essere costruite in armonia con la natura.

Ancora in Oriente, risalente all'età neolitica, l'uomo praticava una dottrina molto simile, ovvero il *Feng Shui*⁹, che consiste nell'identificare i siti abitativi più idonei per la costruzione di una casa, in base alle caratteristiche naturali del contesto, quali topografia, vento, acqua, configurazione del luogo... Secondo questa filosofia, per esempio, la facciata e l'ingresso principale di una casa è importante che siano rivolti a sud, oppure che nelle vicinanze ci siano corsi d'acqua - poiché

8. Ovvero "scienza della costruzione", "architettura" in sanscrito, è probabilmente l'architettura più antica del mondo - si può datare ad almeno 5.000 anni fa - e proviene dalla cultura dell'antica India. Secondo questa dottrina le leggi della natura influenzano le abitazioni umane e i suoi modelli sono basati sugli allineamenti direzionali. Il Vastu non segue la cultura indiana e non è condizionato dalla geografia del territorio e i suoi principi sono applicabili con successo in ogni regione del mondo. Ancora oggi si occupa della forma, delle proporzioni, delle misure, dell'orientamento, e dell'ambiente circostante la casa, delle aperture ed infine dei materiali.

9. Un'antica arte geomantica taoista della Cina molto antica, le cui, per quanto incerte, sono state scoperte delle tombe risalenti al Neolitico che sembrano seguirne i principi nella costruzione. Feng shui significa letteralmente "vento e acqua", in onore ai due elementi che "purificano" la terra. Secondo il taoismo esistono due principi generali che guidano lo sviluppo degli eventi naturali, essi sono il Ch'i e l'equilibrio dinamico di Yin e Yang. Lo yin è il principio umido oscuro e femminile - rappresentato dall'acqua -, mentre lo yang è il principio caldo luminoso e maschile - il vento inteso forse più come respiro -. In fondo acqua e aria sono indispensabili per la vita.

porta ricchezza - o ancora, che l'interno dell'abitazione non abbia angoli eccessivamente acuti che blocchino il flusso dell'energia benefica.

Ne è un esempio la cittadina rurale cinese di Hongcun, la cui popolazione progettò otto secoli fa i propri villaggi creando una rete idraulica ispirata al sistema digestivo della mucca, sia per evitare incendi che per l'irrigazione.

Percorrendo la linea del tempo, tutt'altro panorama fu quello dell'epoca classica. Equilibrio e simmetria, bellezza sinuosa ed eterna contraddistinguevano le opere classiche, accompagnate da un'ingegneria notevole, soprattutto appartenente all'epoca romana. Fu così che in epoca greca e romana, grazie ai nuovi codici espressivi dell'architettura - i cosiddetti ordini architettonici - si continuò a costruire iniziando ad urbanizzare, sorsero nuovi templi, e strade di collegamento tra i nuovi insediamenti. L'uomo doveva iniziare a razionalizzare gli spazi secondo le esigenze, ricorrendo per esempio alla suddivisione del terreno in maglie organizzate.

L'uomo medievale, affidandosi completamente nelle mani di Dio per difendersi da una natura ostile, selvaggia e malvagia, non può definirsi in armonia con

[Fig. 2] Villaggio di Hongcun in Cina. La pianta fu disegnata secondo i criteri della geomanzia, ovvero il Fengshui. L'intero villaggio si sviluppa attorno al "cuore della mucca", il lago. Photo credit Beautiful Guangxi/Twitter©



l'ambiente. Peste e carestie in quell'epoca rappresentavano una punizione divina, solo l'avvicinamento alla religione aveva un potere salvifico.

Un senso di inferiorità di fronte alla vastità del mondo che lo circonda, da sempre, ha turbato l'uomo nella storia, un'entità alla quale poteva solo sottostare e adattarsi, essendo di fatto parte integrante di essa. Tuttavia, durante il Medioevo, spesso definito come periodo oscuro e primitivo, l'uomo diede luce al meraviglioso paesaggio rurale, in un rapporto del tutto costruttivo con la natura. Con il nuovo sviluppo demografico poco a poco sorsero nuove città e villaggi. Le innovative grandi strutture, furono frutto di un lavoro complesso che vedeva coinvolti architetti, committenti, maestranze edili, artigiani, pittori, vetrai... Le cattedrali gotiche sono probabilmente l'esempio più noto e spettacolare di edilizia sacra in ambito cristiano - come in Francia, Germania e Inghilterra -, sorte soprattutto per dimostrare il proprio potere ed accogliere i pellegrini che si muovevano in Europa.

Con l'avvento dell'Umanesimo e lo stravolgimento dei valori sociali, l'uomo, in quanto al centro del mondo ed essere superiore, invece di sottomettersi, cercò finalmente di dominare la natura. Contemporaneamente molti artisti si dedicarono allo studio accurato degli antichi monumenti greci e romani, ricercando in quelle rovine i rapporti matematici peculiari dell'armonica proporzione dell'arte classica. Non solo si rivalutarono i valori classici dei filosofi antichi quali Talete, Platone, Aristotele, Pitagora, ma vi fu anche una riscoperta di molte discipline del mondo antico, tanto che l'architettura rinascimentale, splendore delle arti, si contrappose alla tradizione gotica di provenienza nordeuropea e si riallacciò idealmente alla tradizione greca e romana, la quale tornò così ad essere la forza che regolarizzava l'armonia del paesaggio. Di fatto con l'elaborazione della prospettiva da parte di Filippo Brunelleschi, l'arte del Rinascimento segnò in maniera inequivocabile il suo distacco dal gotico internazionale.

Durante il successivo periodo Illuminista fu la ragione a dominare la società, tramite due strumenti molto potenti: la scienza e la tecnologia.

La modernità e le nuove scoperte scientifiche del Seicento portarono ad un ulteriore sviluppo del concetto di progresso. L'uomo, spinto dalla necessità di migliorare le sue condizioni di vita, estese sempre più il suo dominio sulla natura. In questo periodo storico il filosofo inglese Francis Bacon spiegava che tali cambiamenti erano dovuti proprio a un'evoluzione del concetto del rapporto tra l'uomo e la natura. Iniziò a delinearsi la distinzione tra uomo civile e indigeno: il primo domina la natura a suo vantaggio, ne è superiore e possiede i mezzi e le conoscenze scientifiche per la realizzazione di progetti, mentre l'ultimo non è né educato né civilizzato. Il concetto di benessere, strettamente legato a quello di progresso, distingueva ulteriormente l'uomo civile dal selvaggio: in linea con la filosofia dell'epoca, la quale prevedeva che il raggiungimento del benessere fosse possibile modificando la natura, l'uomo civile iniziò dunque a costruire un mondo prevalentemente artificiale e tecnologico.

Con questa visione antropocentrica, la conseguenza fu il cambiamento radicale del rapporto uomo-natura, ben diverso da quello primitivo.

Allo stesso modo, il periodo seguente abbandonò quella creatività e quel fondamentale equilibrio con il mondo naturale: l'epoca della rivoluzione industriale marcò la completa disgregazione di tale relazione.

Gli sviluppi tecnologici e la nuova visione consumistica, concedendo parallelamente un miglioramento della vita, da un lato rappresentarono l'inizio del decollo ambientale, tradotto brevemente in inquinamento, rapido consumo di materie prime e del pianeta stesso. L'architettura rispose a questi problemi creando nuove fasce verdi e parchi perché le città potessero respirare e le fabbriche vennero isolate dalle zone abitate. Gli insediamenti urbani cambiarono poco a poco poiché l'industrializzazione portò ad una crescita rapidissima della popolazione urbana, inoltre si eliminarono progressivamente le mura, rendendo così possibile un nuovo rapporto città-campagna, grazie alle nuove vie di comunicazione. In quanto alla tipologia di edificio, la gerarchia sociale prevedeva che i nobili vivessero in tenute e villini indipendenti nelle campagne, i borghesi in condomini multi-piano di maggior qualità, mentre gli operai alloggiavano in condizioni insalubri nelle tipiche case a ballatoio. Non mancarono tuttavia esempi

di ritorno all'architettura rurale, vernacolare, la quale prevedeva l'uso di materiali locali e tecniche di costruzioni tradizionali.

Intorno alla metà del XIX secolo si verificarono ulteriori importanti progressi nel campo della tecnologia edilizia, nuovi materiali come l'acciaio e il vetro divennero protagonisti, oltre all'utilizzo di materiali del luogo.

Agli inizi del Novecento il Movimento Moderno cercò di raggiungere l'efficienza progettuale: funzionalità e razionalismo furono la nuova chiave di lettura degli spazi, la quale assunse differenti caratteri in ogni paese europeo.

La crescente pressione esercitata dalle masse derivante dall'emergenza abitativa e dalla richiesta di uguaglianza sociale, portò gli architetti moderni - soprattutto centro-europei - ad impegnarsi sempre più sul fronte dell'ottimizzazione e sugli aspetti tecnico-politici, alterando in maniera significativa il rapporto uomo-ambiente e, specialmente, quello edificio-ambiente. A causa di un approccio decisamente funzionalista, tuttavia impiegato a buoni fini, quali il miglioramento delle condizioni di salubrità, igiene ed efficienza richiesti dai nuovi standard, gli edifici acquisirono forme pure e esemplificate: imponenti blocchi funzionali e interi quartieri densamente popolati sorsero nelle maggiori città europee.

Pur in un contesto così fortemente determinato, gli approcci che miravano ad una maggiore integrazione tra architettura e natura non mancarono neppure

[Fig. 3] Le Corbusier. Una delle immagini-simbolo più rappresentative che sono associate al suo nome è rappresentata da quella del Modulor: un uomo stilizzato, con il braccio alzato e la mano aperta, a cui ogni edificio, ogni manufatto, ogni oggetto d'uso quotidiano deve commisurarsi. Fonte: <https://www.millennialsofficial.com/>



nell'era funzionalista. Un ritorno a quel rapporto di fatto risultato indissolubile tra uomo-natura-architettura si evince nelle opere di grandi architetti del tempo come Le Corbusier¹⁰, Alvar Alto¹¹, Frank L. Wright¹², i quali diedero le basi e gli impulsi per un'ottica di progettazione futura più sostenibile.

Tuttavia, alle prime nuove costruzioni novecentesche a più piani, seppure imponenti e attrattive, mancava efficienza: richiedevano grandi quantità di energia - spesso i grattacieli avevano problemi relativi alla mancanza di sufficiente pressione dell'acqua - per il riscaldamento e il raffrescamento. La tecnologia architettonica e l'ingegneria del tempo non erano ancora sufficienti. Il contesto storico relativo all'evoluzione del pensiero dell'uomo in merito alla natura così descritto vuole dunque rappresentare una sorta di relazione amore-odio, un ciclo che si ripete inevitabilmente. A partire dal XVIII secolo di fatto si insinuò nella mente dell'uomo l'idea di dominio della natura: una delle cause del continuo scontro tra i due, il cui rischio odierno è vedere noi uomini sconfitti.

10. Le Corbusier (1887-1966). Nei suoi scritti la natura è un tema nettamente prevalente, talvolta la natura viene rappresentata come forza opposta, altre volte ancora come sistema di cui l'uomo fa parte. L'architetto considerava la natura come l'unico mezzo che potesse garantire la rigenerazione dell'intera umanità. Le sue ricerche si incentrarono sull'uomo, considerato ultimo destinatario e protagonista di ogni architettura. Tra le immagini-simbolo che sono associate al suo nome, quella del Modulor è una delle più rappresentative. Disse l'architetto «Il sistema metrico è astratto e noi abbiamo disumanizzato il nostro sistema di misurazione. Ho creato un sistema dimensionale che risponde a tutte le esigenze dell'uomo – seduto, in piedi, sdraiato...».

11. Alvar Aalto (1898-1976). Il funzionalismo organico trovò piena attuazione. In lui si identificò la produzione di un'intera nazione, la Finlandia, la cui situazione politica e sociale non conosceva i contrasti drammatici che agitavano i maggiori stati europei tra le due guerre. Di fatto le sue opere furono sempre caratterizzate da un regionalismo e un individualismo che rispecchiavano il suo paese, tradotto in integrazione tra edificio e contesto.

12. Frank Lloyd Wright (1867-1959). Dopo aver lavorato a Chicago nello studio di Louis Sullivan, padre nobile del Movimento Moderno, Wright elaborò la sua personale idea di architettura: la sua fu un'architettura volta a mettere in relazione l'uomo, la natura e lo spazio architettonico. Da qui l'identificazione di "architettura organica", la quale trae ispirazione dal contesto circostante: il pronunciato sviluppo orizzontale degli edifici si rifaceva alla sterminata prateria americana che circonda Chicago; gli spazi interni della casa dialogavano con l'esterno e con il verde grazie alle ampie superfici trasparenti; il cuore della casa era la zona giorno: il camino diventò elemento domestico simbolico intorno al quale la famiglia si riuniva. Wright recuperò i modelli dell'architettura vernacolare americana, ma ne reinterpretò le funzioni, utilizzò ingegnosamente le nuove tecnologie e i nuovi materiali disponibili, come l'acciaio e il cemento armato.

L'uomo attuale ha la tendenza a guardare la natura come spettatore, ne studia le leggi con un approccio prettamente quantitativo e analitico. Ed è questo il divario tra il passato e il presente: proprio la mentalità stessa dell'essere umano di molti secoli addietro, se avesse avuto i mezzi per distruggerla, probabilmente non glielo avrebbe permesso. Come distruggere qualcosa che si onora? La proposta attuale non è prettamente onorarla nel senso del termine, bensì assecondarla e imitarla, traendo beneficio dalle sue ammirabili capacità.

La direzione definibile più drammatica, per la quale l'uomo ha optato negli ultimi secoli addirittura fino ad oggi è quella più distruttiva nei confronti della natura, ed il dramma ecologico ne è la più evidente espressione. I problemi inerenti all'ambiente riguardano sostanzialmente l'amministrazione di ogni paese dei processi produttivi, le risorse rinnovabili e non, i beni culturali, i meccanismi di regolazione e di previsione dei fenomeni naturali.

Fortunatamente gli anni Novanta rappresentarono gli inizi di una trasformazione importante: si passò da un approccio antropocentrico ad uno biocentrico. Ad essere in gioco era senz'alcun dubbio l'esistenza dell'uomo. In questo senso si iniziò ad intravedere un passaggio verso un'etica ecologica e sostenibile. In quanto all'edilizia, si affermarono i primi sistemi di certificazione e classificazione degli edifici, fondamentali per valutare e attestare le qualità del progetto.

La diffusione di strumenti di valutazione sempre più accurati e sensibili ai fattori che influiscono sulla sostenibilità ambientale oltre che sulla salubrità, dimostra lo sforzo della nostra società in termini di una visione eco-sistemica. Gli strumenti odierni offrono nuove possibilità per la valutazione e progettazione, le quali poco a poco cercano di ristabilire quel rapporto armonico tra architettura e natura, non solo visto come concetto legato ad aspetti quantitativi o performativi, ma come processo di graduale apprendimento di metodi e processi. L'idea di imparare dalla natura costituisce la base del concetto stesso di biomimetica, ma ha radici molto più profonde che si ritrovano nella storia dell'architettura sin dai manufatti vernacolari.

1.2 Gli esiti della *biomimetica* antica¹³

I primi approcci di tipo biomimetico sono piuttosto antichi, poiché la relazione uomo e natura era molto stretta nella quotidianità dei nostri antenati.

Tuttavia come è stato spiegato, questo rapporto non fu costante, né un processo lineare che parte da esempi semplici per svilupparsi con il tempo in più maturi progetti, bensì è episodico e discontinuo, presentando picchi di ingegnosità in tutte le epoche.

Un esempio risalente a ben tre millenni fa, è il caso di una popolazione cinese che scoprì una tecnologia in grado di riprodurre un filamento che imitava la seta. Anche molti intellettuali nel tempo si interrogarono sulla natura e osservandola, raggiunsero importanti obiettivi.

La straordinaria importanza dello studio dei fenomeni naturali per lo sviluppo di artefatti antropici è particolarmente evidente nel lavoro di Leonardo da Vinci, uno dei più abili osservatori degli eventi naturali. Già nel lontano Cinquecento, si addentrò in una faccenda assai complicata: volare, uno dei più grandi sogni dell'umanità, uno dei progetti più ambiziosi al quale l'essere umano si fosse mai avvicinato. Leonardo, studiando il concetto e la meccanica del volo, in seguito al ragionamento e ad un'attenta osservazione del mondo dei volatili, ebbe un'intuizione capace di discostarlo dalle convinzioni degli scienziati dell'epoca, unendo natura e ingegneria. Fu così che poco a poco progettò strumenti capaci

13. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- Gruber P., *Biomimetics in architecture: architecture of life and buildings*, SpringerWienNewYork, Mörlenbach, 2011
- J. F. V. Vincent, *Stealing ideas from Nature*, Springer, Vienna, 2011
- Pawlyn M., *Biomimicry in Architecture*, RIBA Publishing, Londra, 2011
- Niklas K. J., Spatz H. C., Vincent J. F. V., *Plant Biomechanics: an overview and prospectus*, American Journal of Botany 93(10): 1369–1378, 2006
- Richter J. P., *The Notebooks of Leonardo da Vinci (volume 2)*, Dover Fine Art, New York, 1970.

di supportare, a livello teorico, il volo umano: il paracadute, la vita aerea - da molti considerata prototipo dell'elicottero - e le molte ali battenti progettate e costruite, sono solo alcuni esempi di come il genio toscano tentò di realizzare il suo sogno più grande. Sfortunatamente Leonardo non aveva previsto un meccanismo in grado di generare sufficiente potenza per garantire il decollo. Bisognava attendere infatti fino alla fine del XIX secolo con Otto Lilienthal¹⁴, Igo Etrich¹⁵ e i fratelli Wright¹⁶. Tuttavia, il fatto che moltissimi dei suoi progetti fossero il risultato delle sue attente analisi nonché del suo intimo dialogo con la natura, rendono Leonardo da Vinci senza alcun dubbio il padre assoluto del pensiero biomimetico.

Più avanti, mettendo in pratica proprio quelle scoperte di Leonardo, i progetti di Sir George Cayley furono determinanti nel campo dell'ingegneria navale, soprattutto della fluido-dinamica. L'ingegnere britannico nel 1809 studiò la forma del corpo del delfino per sviluppare la forma di uno scafo, ottenendo un minore coefficiente di resistenza e nel 1843 progettò un prototipo di *aerotrasportatore*. Uno scienziato francese di nome René de Réaumur apportò un grande sviluppo nel mondo dell'industria, su ispirazione animale, in particolare nella produzione della carta. Durante i suoi studi sugli insetti compiuti intorno agli anni '30 e '40 del Settecento, individuò una specie particolare di vespa nominata *vespa della carta*. Lo scienziato osservò che questi insetti erano in grado di masticare le fibre di legno - la cellulosa - e, senza quindi ingerirle, utilizzarle per la formazione del nido: quello che ottenevano era appunto un tipo di carta. De Réaumur pensò che il legno poteva essere convertito a grande scala, come altri materiali organici, in carta, abbandonando quindi il massiccio impiego di fibre di cotone.

14. Otto Lilienthal (1848-1896) fu un pioniere dell'aviazione tedesco. In particolare studiò il volo delle cicogne; sperimentò circa 3000 voli con diversi apparati e sfortunatamente morì nel 1896 durante una prova.

15. Igo Etrich (1879-1967), aviatore e ingegnere di origini austriache; nel 1907 inventò un elegante monoplano chiamato Dove, in seguito alle osservazioni e agli studi sul volo di una colomba.

16. I fratelli americani Wilbur (1867-1912) e Orville Wright (1871-1948) nel 1903 diedero alla luce il primo strumento di volo motorizzato.

La storia dimostra che ingegneri e fisici apportarono grandi innovazioni anche da uno studio meticoloso delle piante, le quali vennero utilizzate come modello per illustrare principi fisici o costruire dispositivi meccanici.

Galileo Galilei utilizzò steli d'erba cavi per dimostrare nel 1638¹⁷ la sua idea che i materiali da costruzione resistono meglio alle forze di flessione se collocati in posizione periferica piuttosto che centrale. Inoltre sviluppò il suo concetto di auto-somiglianza geometrica, confrontando le caratteristiche di una quercia piccola con una di maggior grandezza. L'interesse di Leonardo da Vinci per la meccanica dei fluidi derivò soprattutto dalla sua attenta osservazione in particolare di tronchi, dimostrando che ad ogni livello di ramificazione dell'albero, la somma delle sezioni trasversali dei rami era uguale alla sezione del tronco¹⁸. Inoltre, i suoi disegni del primo paracadute e l'elica dell'autogiro - un precursore dell'elicottero - si basarono su esami meticolosi relativi al pappo del dente di leone e al frutto dell'acero.

Nell'Ottocento il britannico Herbert Spencer¹⁹ giunse ad importanti conclusioni a livello cellulare; attestò infatti che lo stress meccanico interno stesso era la causa della formazione di legami forti nelle pareti delle cellule vegetali. Mentre Culman, il creatore della statica grafica, applicò per prima cosa i suoi metodi matematici per lo studio dei gambi delle piante (nello stesso modo come nelle ossa).

Sebbene i primi scritti generali sulla biomeccanica fossero quelli di Aristotele, la biomeccanica delle piante divenne chiaramente definita con la pubblicazione di Simon Schwendener²⁰ *Das mechanische Prinzip im anatomischen Bau der*

17. La dimostrazione si trova nel libro *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica e i movimenti locali*, un trattato di Galileo Galilei, pubblicato a Leida (Paesi Bassi) nel 1638 dall'editore Ludovico Elzeviro.

18. Questa legge rimase empirica fino a quando il fisico francese Christophe Eloy lo dimostrò scientificamente. Si trovano approfondimenti nel libro di Christophe Drénou e Georges Feterman, *Face aux arbres: apprendre à les observer pour les comprendre*, 2009.

19. Herbert Spencer (1820-1903) fu un filosofo britannico di impostazione liberale, teorico del darwinismo sociale.

20. Simon Schwendener (1829-1919) botanico svizzero, noto per i suoi studi sulla fitotomia e sulla fisiologia delle piante e sulla simbiosi del lichene.

Monocotyledonen - I principi meccanici dell'anatomia dei monocotiledoni - pubblicata nel 1874.

Tuttavia alcuni testi sporadici sui fenomeni meccanici delle piante fecero la loro apparsa ancora prima di Schwendener²¹. Ad esempio, Du Monceau²² già nel 1785 confrontò gli scheletri animali con il legno degli alberi; Charles Bonnet²³ nel 1794 disegnò le analogie che si presentavano tra l'epidermide delle piante erbacee e gli esoscheletri di alcuni insetti. A seguire, T. A. Knight²⁴ nel 1811 studiò gli effetti di perturbazione meccanica relativi alla morfologia degli alberi e alla loro crescita. Simon Schwendener fu il primo ad esplorare in dettaglio tali concetti e a scoprire quanto fossero fondamentali per capire l'anatomia funzionale e la morfologia delle piante. Il suo libro continuò ad influenzare la biomeccanica per i seguenti quarant'anni fino a quando non venne contraddetto²⁵.

Nel XIX secolo il botanico svizzero espresse il suo punto di vista biomimetico, riconoscendo le doti che appartengono alla natura:

“Senz'alcun dubbio il processo di formazione delle piante si serve degli stessi principi degli ingegneri, ma la loro tecnologia è molto più fine e perfezionata”.

Tra il 1874 e il 1887 Schwendener fornì uno dei primi confronti biomeccanici completi fra diversi tipi di piante tra cui la felce, l'equiseto, il lycopode e gli steli di piante da fiore e interpretò correttamente le distribuzioni delle sollecitazioni in relazione all'ambiente in cui cresce ogni pianta. In questo senso, fu uno dei primi a notare quella relazione oggi fondamentale tra design meccanico e contesto

21. Simon Schwendener (1829-1919) fu un botanico svizzero, noto per i suoi studi sulla fitotomia e sulla fisiologia delle piante, e sulla simbiosi del lichene.

22. Henri Luis Duhamel du Monceau (1700-1782) fu un botanico e agronomo francese.

23. Charles Bonnet (1720-1793) fu un biologo e filosofo svizzero, scopritore della partenogenesi e autore di una teoria dell'evoluzione.

24. Thomas Andrew Knight (1759-1838), fu botanico ed orticoltore inglese.

25. Ovvero finché il lavoro di Wladimir Rasdorsky (cfr. nota 25), messo a punto tra il 1911 e il 1937, confutò molte delle sue teorie meccaniche.

ecologico. Allo stesso modo, Schwendener e Rasdorsky²⁶ sostennero in modo convincente che le piante erano costituite da materiali compositi. Entrambi videro un'analogia tra il cemento armato e la conformazione anatomica di steli e foglie, un'idea che fu rapidamente adottata da F. O. Bower, a cui si deve l'importante scoperta per cui le cellule vegetali ed i tessuti potessero essere modellati come i materiali compositi complessi.

Wladimir Rasdorsky condusse studi accurati sulle piante terrestri e concluse che la flessibilità e la rigidità delle piante rappresenta la loro "forma di difesa" per sottostare alle forze di resistenza indotte dal fluido e al loro stesso peso. Inoltre manifestò il proprio disaccordo con la teoria biomeccanica di Schwendener, affermando che tutte le piante in realtà tendono ad essere il più rigido possibile e quindi trascurano che un'alta flessibilità possa essere di qualche vantaggio.

Tuttavia le conclusioni di Rasdorsky e Schwendener sostenevano che "l'architettura" e la crescita delle piante terrestri rispondono in modo adattivo alla dinamica e alle forze statiche. Questo concetto fu decisamente importante e lo è tutt'oggi nello studio sia della biomeccanica delle piante che della biomimetica.

26. Wladimir Rasdorsky fu un botanico di origini russe contemporaneo di Schwendener.



[Fig. 4] Adattamento naturale. Photo credit Paul Howell©

2.

FARE BIOMIMETICA OGGI

*<<La natura non ha fretta,
eppure tutto si realizza.>>*

Lao Tzu

2.1 Definizione²⁷

Si arriva finalmente a definire più precisamente quello che si intende per biomimetica nel senso attuale, in quanto dottrina, filosofia, scienza ed approccio sostenibile. Innanzitutto l'origine etimologica della parola viene dal greco *bios*, che significa vita, e *mimesis*, ovvero imitazione. Coniato solo nel 1969 da Otto Schmitt²⁸, il termine si riferisce a quella disciplina che studia ed imita le caratteristiche degli esseri viventi e dei processi biologici come modello di riferimento, ponendosi come obiettivo il miglioramento delle attività e delle tecnologie umane.

Questa scienza è incentrata sull'idea che non esiste un modello migliore della natura per lo sviluppo di qualcosa di nuovo, avendo essa già prodotto risultati eccellenti in termini di produttività e funzionalità. La diffusione di questo concetto si deve più concretamente alla biologa statunitense Janine Benyus, fondatrice del Biomimicry 3.8 Institute²⁹ che nel 1997 ha fatto conoscere al grande pubblico questa affascinante scienza. La biologia come punto di partenza ci invita a riformulare il nostro pensiero in merito a cosa intendiamo per innovazione e sostiene che dovremmo considerare la natura come:

27. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- Benyus J., *Biomimicry: innovation inspired by Nature*, USA, 1997

- <http://www.green.it/biomimetica-architettura/>

- López M., *Nuevas fronteras biológicas: hacia una Arquitectura del futuro*, Rivista TRP21, Teoría, N°4, SI.FADU.UBA, Buenos Aires, 2016

28. Otto Herbert Schmitt (1913-1998) fu un inventore, ingegnere, e biofisico americano noto per i suoi contributi scientifici alla biofisica e per stabilire il campo di ingegneria biomedica .

29. Il Biomimicry 3.8 Institute, situato a Missoula, nel Montana, è un'organizzazione no profit dedicata alla formazione e alla divulgazione del sapere biomimetico, fondata da Janine Benyus nel 1998.

- **modello:** possiamo imitare da essa modelli che ispirino soluzioni tecniche efficienti
- **misura:** possiamo identificare in essa standard ecologici come riferimenti quantitativi e qualitativi
- **mentore:** è la natura la maestra che ci segue nella ricerca della soluzione più efficiente.

È la natura dunque che vince il ruolo di protagonista nel progetto biomimetico. Tuttavia è necessario distinguere e precisare il significato di alcune discipline che, trattandosi di studio di strutture e comportamenti biologici, comportano processi e metodi differenti che forniscono basi e conoscenze necessari per la biomimetica. Negli ultimi decenni l'interesse dei ricercatori volti alla progettazione e allo studio di soluzioni per facilitare e ottimizzare la vita dell'uomo, ha originato una serie di discipline caratterizzate dalla presenza del prefisso *bio*, le quali si riferiscono a distinti ambiti disciplinari, come l'architettura, l'ingegneria, la biologia, la medicina, la fisica, la chimica.

La bionica, conosciuta anche come mimetica biologica, è una scienza interdisciplinare che, in un senso più stretto, si riferisce al campo dell'ingegneria biomedica, specialmente alla riproduzione e sostituzione di funzioni degli organismi viventi da parte di organi artificiali. In tal modo applica teorie e tecniche biologiche, fisiche e matematiche, basandosi sul fatto che gli apparati artificiali possono svolgere in maniera simile i compiti di un sistema biologico. La biomeccanica invece studia il comportamento degli organismi biologici, giustificati e spiegati attraverso l'applicazione delle leggi della meccanica. In particolare analizza il comportamento delle strutture fisiologiche quando sono sottoposte a sollecitazioni statiche o dinamiche.

Inoltre la biotecnologia si riferisce all'applicazione tecnologica che si serve dei sistemi biologici, degli organismi viventi o di derivati di questi, per produrre o modificare prodotti o processi per un fine specifico: impiegando tecniche

biologiche e attraverso modificazioni di cellule batteriche e animali, per esempio, è possibile riprodurre sostanze specifiche.

Ancora diverso è il biomorfismo - o *shallow biomimicry* - ovvero una riproduzione alquanto fedele di forme naturali di strutture biologiche, senza alcuno scopo funzionale obbligatorio.

La bioispirazione è infine un campo più generale a cui appartengono tutti quei progetti ispirati alla natura. Ne fa parte, per esempio, il biodesign.

La biomimetica non è uno studio o una tendenza recente, né una pura imitazione della natura - per questo si distingue dal biomorfismo -, bensì una filosofia contemporanea che cerca soluzioni sostenibili in natura, attraverso la comprensione delle regole che le governano. Questo approccio multidisciplinare segue una serie di principi concreti collaborando e servendosi di tali scienze.

I meccanismi naturali hanno vantaggi fondamentali al giorno d'oggi: sembrano funzionare meglio di alcune delle tecnologie più avanzate attualmente, richiedono meno energia e non producono rifiuti o lasciano tracce. Piante, animali, microbi, ecosistemi presenti sul pianeta prima di noi, hanno trovato quello che funziona e che è duraturo nel tempo, e lo hanno fatto rispettando l'ambiente. Perciò, imitando gli organismi che meglio si sono adattati al nostro habitat, ci diamo l'opportunità di creare un futuro sostenibile e di riuscire a far fronte alle molteplici avversità che influenzano profondamente il nostro benessere. Per questo ha anche aperto le porte a guadagni realistici, eliminando sprechi e risparmiando sulle spese di ricerca.

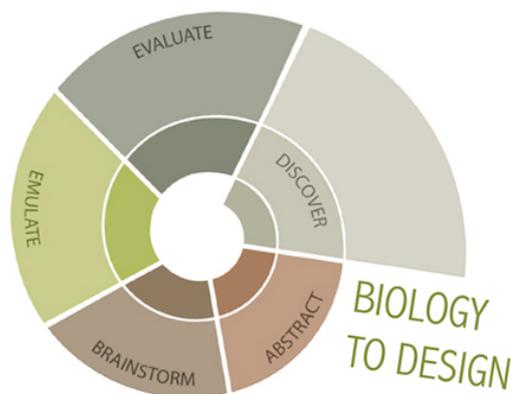
Si pensi effettivamente alle infinite possibilità di studio e applicazione nel campo dell'architettura: edifici a consumo zero ispirati ai principi di termoregolazione degli animali, o a strategie di adattamento di una pianta in climi estremi. È incredibile ed affascinante pensare che le possibilità siano infinite quanto gli esempi di organismi esistenti in natura, con i suoi 3,8 miliardi di anni di evoluzione, sperimentazione, prove, errori, adattamento e sopravvivenza.

Se vogliamo imitare consapevolmente l'ingegno della natura, ci ricorda la biologa Benyus, dobbiamo guardare ad essa in modo diverso, cambiare strategia al momento della progettazione. Nel 2007 e nel 2011 la scienziata ha proposto,

con l'aiuto del suo gruppo di ricerca, due schemi, le cosiddette *biomimicry design spirals* (cfr. fig. 5-6), le quali descrivono le fasi di quell'innovativa metodologia di progettazione biomimetica, più concretamente secondo il *Biomimicry-Thinking* dettato da Benyus.

La geometria della spirale, non a caso, viene scelta dalla biologa proprio in riferimento ad una forma biologica che meglio potesse esprimere la natura evolutiva dei processi naturali. Janine Benyus prevedeva in questa prima versione cinque fasi:

- [1]. **Discovery** (scoperta): tutto ha inizio con l'individuazione di una caratteristica importante di un organismo biologico.
- [2]. **Abstract** (astrazione): secondo questa fase si captano in termini astratti le caratteristiche in questione dell'organismo stabilito.
- [3]. **Brainstorming**: si procede con la ricerca dei possibili campi di applicazione e si uniscono tutte le idee in un brainstorming generale, un quadro completo di tutte le possibili scelte progettuali.
- [4]. **Emulate** (emulazione): ovvero quando si procede alla vera e propria fase di progettazione unendo tutte le informazioni ottenute.
- [5]. **Evaluate** (valutazione): infine si valuta se il progetto rispetta quelle caratteristiche dei principi biomimetici stabiliti.

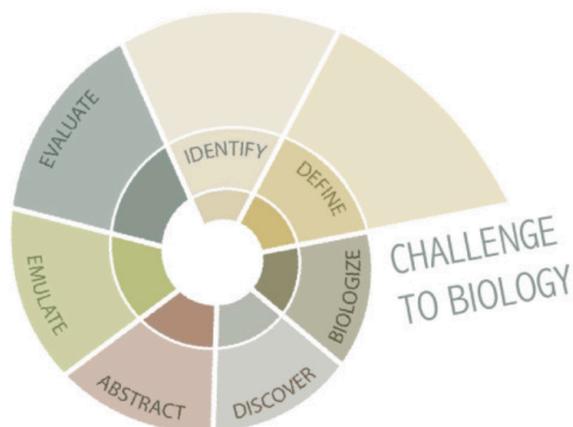


[Fig. 5] La versione del 2007 della spirale *Biology to design*, un approccio guidato dalla biologia ed orientato alla ricerca del processo biomimetico. Image credit Biomimicry 3.8©

La seconda versione prende il nome di *challenge to biology*, in riferimento proprio a quella complessa sfida tra progettista e prodotto finale, in merito alla reinterpretazione dei requisiti biologici.

Si distinguono sei fasi, simili al primo approccio sopra citato. Tuttavia la differenza consiste nell'introduzione delle prime due fasi di identificazione e traduzione delle informazioni, considerate fondamentali per un approccio iniziale investigativo più completo.

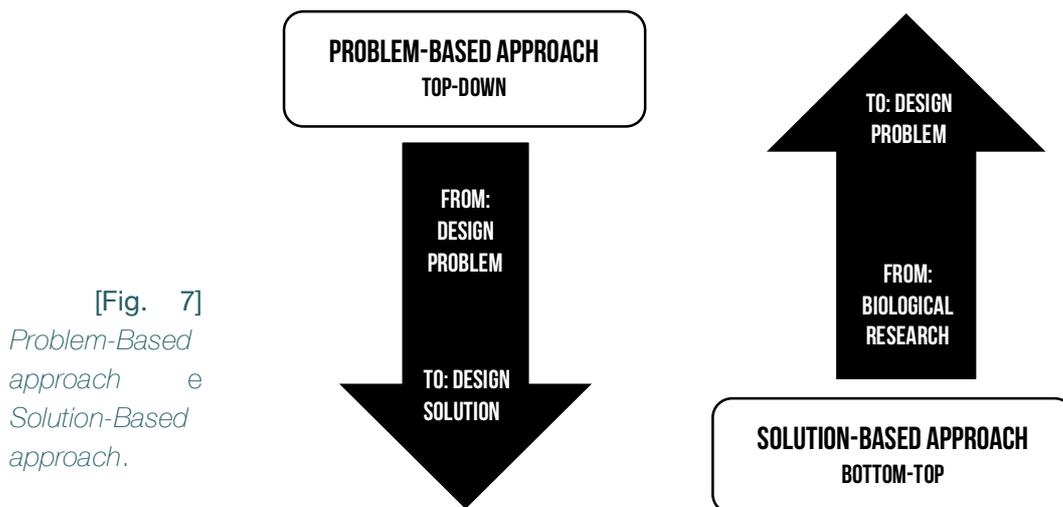
- [1]. **Identify** (identificazione): per prima cosa si investiga su quale sia la funzione chiave che deve soddisfare il design.
- [2]. **Define** (definizione): si cerca di definire la sfida in termini di condizioni operative, ovvero si definiscono i parametri del contesto su cui si va a operare.
- [3]. **Biologize**: i comportamenti di un organismo in termini biologici si traducono in termini progettuali.
- [4]. **Discover** (scoperta)
- [5]. **Abstract** (astrazione)
- [6]. **Emulate** (emulazione)
- [7]. **Evaluate** (valutazione)



[Fig. 6] Il processo di *Challenge to biology* proposto da J. Banyus nel 2011. Image credit Biomimicry 3.8©

2.2 Il pensiero biomimetico: *Problem-Based* e *Solution-Based*³⁰

Raggiungere la cosiddetta *Era ecologica* entro il 2050³¹ è un obiettivo importante che coinvolge anche l'architettura e l'approccio alla progettazione. Per comprendere meglio il "quadro biomimetico" è utile descrivere i differenti metodi possibili di progettazione, con lo scopo di mostrare la valenza di questa scienza, volta soprattutto alla sostenibilità e al design generativo in architettura. Secondo un esame condotto da M. Pedersen Zari³² alla Victoria University in Nuova Zelanda nel 2007, esistono due approcci distinti alla biomimetica: un approccio progettuale che, a partire da un problema, si occupa di trovare la soluzione e la sua relativa applicazione (*Problem-Based*), mentre l'altro parte



30. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- Rasha Mahmoud Ali El-Zeiny, *Biomimicry as a Problem Solving Methodology in Interior Architecture*, Procedia: Social and Behavioral Sciences, 2012

- <https://www.biomimicry.org/>

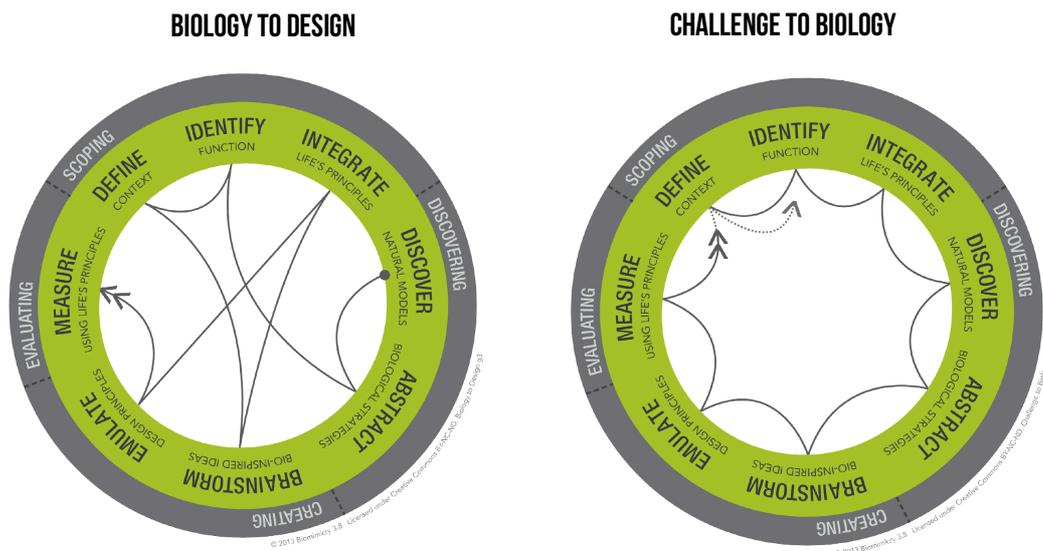
31. In seguito alla decisione da parte della Commissione di Bruxelles, gli obiettivi su cui si deve impegnare ogni paese dell'UE includono la riduzione delle emissioni di CO2 dell'50%, la riduzione dell'impronta ecologica a 1,44gha/persona e infine, l'aumento dell'HDI (indice di sviluppo umano).

32. Maibritt Pedersen Zari, professoressa associata della Victoria University of Wellington della Nuova Zelanda. Lavora nel settore della sostenibilità, dell'architettura generativa e dell'*Urban design*.

dalla soluzione progettuale (*Solution-Based*) - che si identifica come la caratteristica naturale da emulare - e affronta e risolve i problemi riscontrati durante l'iter per poterla applicare.

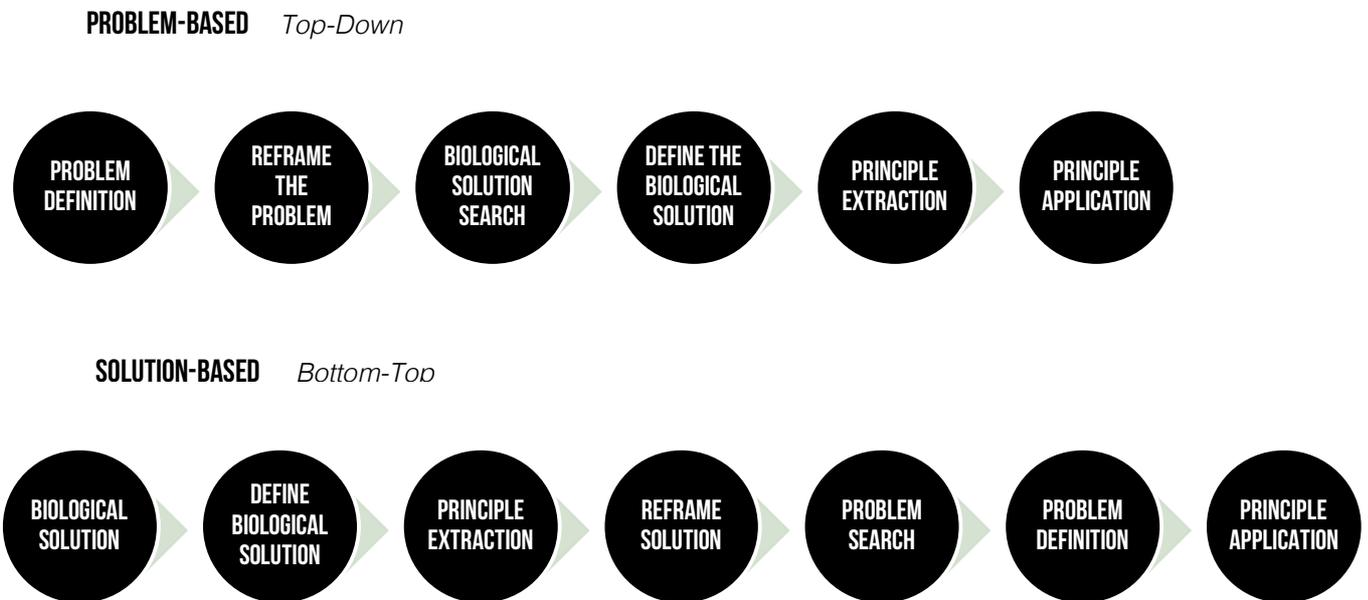
Il *Problem-Based approach* viene anche indicato come *Top-Down*, approccio dall'alto verso il basso o altrimenti, in relazione al fatto che la conoscenza biologica influenza il design umano, prende il nome proprio dal *Biomimicry-Thinking* di J. Benyus *Biology to design* (cfr. fig 8). Nel momento in cui viene localizzato un problema di progettazione, secondo questo metodo si parte dall'esigenza di ricercare una possibile soluzione studiando come gli organismi e i sistemi presenti in natura hanno già risolto in precedenza simili problemi.

Il *Solution-Based approach*, rinominato anche *Bottom-Top*, approccio dal basso verso l'alto, o *Challenge to biology* da J. Benyus, si basa sull'identificazione di una soluzione ponendosi come obiettivo finale la sua applicazione. Se si considera che, come sostiene J. Benyus, il mondo naturale offre tante soluzioni ai problemi tanti quanti sono gli organismi viventi, allora la fase fondamentale della progettazione coincide proprio con la scelta dell'organismo in questione da studiare.



[Fig. 8] *Biology to design* e *Challenge to biology*, i due modelli del pensiero biomimetico proposto da J. Benyus. Image credit Biomimicry 3.8©

Una ricerca svolta presso il Georgia Institute of Technology da Michael Helms Swaroop S. Vattam e Ashok K. Goel, presso il Design Intelligence Lab nel 2006, ha definito entrambi gli approcci attraverso i passi illustrati in figura 9. Il primo processo parte dall'individuazione di un problema di progettazione e segue con un'analisi dei modi in cui altri organismi o ecosistemi in natura l'hanno risolto precedentemente. Il secondo invece parte dall'identificazione di un tratto specifico in un organismo o ecosistema e arriva a tradurlo in un design che risponda ad un problema umano.



[Fig. 9] Gli step dell'approccio Problem-Based e Solution-Based di Michael Helms Swaroop S. Vattam e Ashok K. Goel.

Sulla base di quanto sopra, si intende che l'identificazione della soluzione ottimale dunque nasce soprattutto dalla conoscenza della biologia, e quindi risulta fondamentale la collaborazione tra progettisti e biologi.

Dal momento che, bisogna alimentare la ricerca orientata al successo del prodotto, l'elemento che più occorre ottimizzare è la rapidità della ricerca stessa. Considerando la vastità degli organismi naturali il compito appare più che complicato anche per i più esperti nel campo. Per cercare di ridimensionare questa difficoltà, alcuni studiosi hanno proposto diverse soluzioni.

Un metodo elaborato appunto per avvantaggiare i progettisti nella ricerca è quello di Janine Benyus, impiegato oggi da milioni di persone nel mondo, fornisce uno strumento di ausilio per la progettazione biomimetica. Il sito, soprannominato *asknature.org* e lanciato nel 2008 dal Biomimicry Institute, si propone l'obiettivo di raccogliere una sempre crescente quantità di esempi di applicazioni biomimetiche, consultabili gratuitamente sulla rete da tutti gli utenti. Inoltre il Biomimicry 3.8 ha recentemente presentato il progetto *Synapse*, che offre servizi di consulenze di progetto per i professionisti che operano nel campo, basandosi su un *database* di informazioni provenienti dal mondo naturale.

È il caso di nominare anche l'invenzione di una società di consulenza che consiglia un metodo più analitico e complesso per la progettazione biomimetica, ovvero *BioTRIZ*. Il metodo, proposto nel 2008 dai professionisti Julian Vincent e Olga e Nikolay Bogatyrey, si basa sull'evoluzione del *problem-solving* di un programma già esistente - ovvero il *TRIZ*, elaborato negli anni '60 da Genrich Saulovich Altshuller - apportando al suo sistema nuove variabili biologiche, creando un nuovo *database* contenente distinte caratteristiche appartenenti agli organismi naturali. Oggi rappresenta un modello di *problem-solving* di matrice biologica - poiché analizza problemi e soluzioni del mondo biologico - largamente utilizzato.

Ebbene questo è il mondo della biomimetica, un mondo complesso di informazioni, il cui successo dipende dalla collaborazione di professionisti provenienti da campi distinti.

2.3 Biomimesi di forma, processo e sistema³³

Se dunque questa disciplina si occupa di *mimesis*, più precisamente, sono individuabili diversi livelli di bio-ispirazione in un progetto: Janine Benyus distingue tre scale differenti, con lo scopo di approfondire ed inquadrare più precisamente le possibili interazioni tra architettura e natura.

Il biomimetismo si può adoperare secondo i livelli di:

- **forma** o **struttura**: quando si prevede l'imitazione di una specifica forma di un organismo vivente, la cui **funzione** è strettamente relazionata ad essa
- **processo**: quando si ricorre all'imitazione e reinterpretazione di un processo che avviene in un organismo, per esempio di tipo chimico
- **sistema**: significa ricreare un sistema efficiente dove tutti i residui prodotti siano riutilizzabili, riciclabili.

33. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- López M., *Nuevas fronteras biológicas: hacia una Arquitectura del futuro*, Rivista TRP21, Teoría, N°4, SI.FADU.UBA, Buenos Aires, 2016
- Franco J. T., *Arquitectura Biomimética: ¿Qué podemos aprender de la Naturaleza?*, Plataforma Arquitectura, 7 Gennaio 2019
- Cilento K., *Happy Magic Water Park*, ArchDaily. 26 Agosto 2010
- Skinner S., *Geometría Sagrada*, Gaia Ediciones, Madrid, 2007
- Radaelli C., *Pechino 2008: inaugurato il Water Cube*, Rivista Arquimagazine, 2008
- <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/hsb-turning-torso/>
- <http://www.stevenholl.com/projects/cranbrook-science-institute>
- Holl S., *Parallax*, Princeton Architectural Press, 2000
- <http://www.buildlab.it/>
- <http://www.mickpearce.com/Eastgate.html>
- <http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idcat=3&idsubcat=59&idproj=129>
- <https://wyss.harvard.edu/spinning-up-a-silk-pavilion/>

Dunque possiamo arrivare ad un'ulteriore definizione di biomimetica, ovvero come la disciplina che, attraverso la ricerca di modelli biologici, produce soluzioni di design sostenibile emulando forme, processi e sistemi naturali.

Generalmente la forma, la funzione e la struttura di un elemento si possono definire come la chiave dell'efficienza della natura, nonché il risultato di miliardi di anni di evoluzione. Sulla base di questo concetto scrisse Alvar Aalto: *"La forma non è altro che il desiderio di vita eterna sulla Terra"*.

Ogni modello naturale è stato sottoposto a varie condizioni durante la sua esistenza e ha dovuto dunque, nel tempo, sviluppare determinate caratteristiche per poter sopravvivere a tali condizioni a lei ostili.

Come è ben noto, Darwin definì la selezione naturale come il principio per cui ogni minima variazione, se necessaria per la sopravvivenza dell'individuo esposto a specifiche condizioni ambientali, tende a conservarsi e trasmettersi ai relativi discendenti. Secondo tale concezione darwiniana, la selezione naturale viene indicata come quel processo naturale che determina il cambiamento evolutivo adattivo; essa inoltre si configura come un filtro che mantiene e registra quei tratti ereditabili risultati vantaggiosi per la generazione precedente, con l'obiettivo di migliorare l'adattamento degli organismi al proprio ambiente.

La natura risponde con soluzioni estremamente complicate che, nella storia dell'evoluzione, hanno dato origine a forme sempre più complesse ed articolate, sebbene più giustificabili in termini di funzionalità ed efficienza. Un essere vivente è efficiente quando l'unione di forma e struttura è funzionale: così ragiona la natura.

L'architetto e ingegnere tedesco Frei Otto si esprime così in merito alla relazione tra natura, vista come un insieme di leggi matematiche e il dovere del progettista:

"Le costruzioni possiedono una forma e una struttura interna, le quali nascono attraverso un processo di sviluppo comune, a seconda delle leggi fisiche e chimiche o del potere creativo umano".

A seguire, vengono proposti degli approfondimenti, ossia dei casi studio, relativi alla biomimesi di primo e secondo livello, passando dal concetto teorico di biomimetica al senso pratico del termine, analizzando alcune architetture realizzate nel mondo. I seguenti progetti, caratterizzati da un'estetica unica, celebrano un forte contributo all'efficienza derivante dalla morfologia di determinate strutture naturali, adattandole a complessi sostenibili in termini energetici, o, in alcuni casi, nella scelta dei materiali, in stretta relazione con il mondo biologico. La biomimesi di terzo livello, riguardante la mimesi a livello di sistema, viene affrontata più avanti (*cf. cap. 3*) insieme alle premesse ambientali.

CASI STUDIO | Biomimesi di forma e funzione

Il progetto del *Watercube* di Pechino, in collaborazione con il China State Construction Engineering Corp e Arup, appartiene allo studio australiano PTW Architects, che si è incaricato del nuovo complesso sportivo di nuoto, iniziato nel 2003 ed inaugurato nel 2008, destinato ad ospitare i Giochi Olimpici. L'edificio prevede una struttura composta da un particolare materiale, l'ETFE che, oltre ad essere il compromesso perfetto per imitare e ripetere le sagome irregolari di una bolla - quando il vetro non sarebbe possibile -, è molto efficiente in termini ecologici: la pelle, costituita da un doppio strato trasparente, utilizza il 90% dell'energia solare per facilitare il riscaldamento delle piscine e degli interni della costruzione. Durante la costruzione le bolle sono state poste in opera e gonfiate in seguito. L'edificio è dotato di un sistema di controllo che regola il pompaggio continuo delle bolle per mantenere uno stato di efficienza a livello strutturale. Arup prese l'ispirazione per realizzare tali "bolle di sapone strutturali" da una soluzione, studiata da due professori irlandesi del Trinity College di Dublino, che prevede l'impiego di tre tipi di nodi e tre tipi di partiture, ottenuti da lamiera di acciaio, poi bullonati in sito. Grazie ad uno specifico software, inoltre, sono stati semplificati gli elementi costituenti la struttura, per cui le 22'000 barre in acciaio sono state ridotte a 10 tipi di spessori e 3 lunghezze standard. La particolare geometria organica e reticolare esterna consente di rispondere efficacemente ai fondamentali requisiti antisismici imposti.

[Fig. 10] Il *Watercube* in costruzione. Particolare dello spigolo del blocco rettangolare, uno squilibrio tra l'armonia delle forme naturali delle bolle e la regolarità del complesso. Fonte: <https://www.arkineta.blogspot.com/>



Di giorno l'edificio si tinge delle tonalità grigio-azzurre del cielo e di notte, per un effetto ancor più scenografico, gli architetti hanno ideato un'illuminazione d'impatto sia interna che esterna, per cui ogni pannello di ETFE si può dipingere di distinte tonalità cromatiche.

Gli architetti stessi lo definiscono una vera e propria esperienza sensibile con l'acqua, tradotta in oltre 4'000 bolle. La semplicità della forma rettangolare scelta, viene giustificata dagli ideatori come l'intento di dialogare con il vicino "nido" di Herzog e De Meuron, appartenente anch'esso al complesso del *Beijing Olympic Green*. Tuttavia, considerando tali affermazioni e seppur questo edificio sia emblematico, gli spigoli dalla forma rettangolare rompono da un lato quella disposizione armonica ideale delle bolle che ritroveremmo in natura.



[Fig. 11] Illuminazione notturna del Watercube: le combinazioni di colori sono potenzialmente infinite, poiché alle bolle sono stati applicati oltre 440.000 LED in grado di tingersi di moltissime gradazioni distinte, il tutto controllabile da un software. Photo credit Wikimedia©

Calatrava si ispira alla torsione del busto umano come una metafora per il progetto *Turning Torso*, un grattacielo residenziale di Malmö, una vera e propria scultura abitabile, con l'obiettivo di risollevare la cittadina svedese in termini di sostenibilità. Questo progetto rappresenta un significativo passo avanti nel settore delle costruzioni, in quanto vuole sottolineare l'importanza della struttura biologica della spirale, la quale, trattandosi tuttavia di un'altezza di 190 metri, dimostra una buona resistenza al carico del vento. L'edificio vuole raffigurare la torsione tramite la rotazione di 9 unità cubiche, ognuna della quale viene supportata da un elemento esterno equivalente a una "spina dorsale" in acciaio verniciato, tramite grandi puntoni diagonali e orizzontali anch'essi in acciaio, volta a contrastare deformazioni per forze orizzontali di compressione e trazione del vento. Questi elementi collegano la spina dorsale ad una parete strutturale nella parte superiore del cubo, trasferendo le forze di taglio al nucleo in calcestruzzo. La struttura portante principale nonché lo scheletro del torso, è di fatto costituito da una colonna inclinata in cemento armato che si estende lungo l'intera altezza dell'edificio ed un'anima con forma cilindrica in cemento armato di 10,6 metri di diametro, il cui centro corrisponde esattamente al centro di rotazione dei piani. La rotazione totale dell'edificio è di 90° e condiziona dunque tutti gli elementi componenti il complesso, condizionando la geometria dei gli elementi portanti, dell'involucro esterno, delle finiture interne, nonché dei condotti di installazione; inoltre le piante degli alloggi e degli uffici, situati ai primi piani, sono di dimensioni variabili per ogni piano, eccetto la cucina e il bagno, i quali vengono sempre posti nella stessa posizione per facilitare le installazioni.

[Fig. 12] A sinistra, la magnifica vista che si apprezza da un appartamento-tipo. Si noti come la rotazione venga enfatizzata anche negli spazi interiori, grazie alle aperture. Photo credit ©Barbara Burg + Oliver Schuh. A destra una vista di una sala conferenze, nei primi piani dell'edificio. Photo credits Marcus Karlsson Säll©.



I “punti fissi” invece sono logicamente collocati nel nucleo centrale, dove sono collocati il vano scala e gli ascensori. L'esterno dell'edificio è stato rivisitato da pannelli in cristallo e alluminio. Calatrava riuscì dunque a rappresentare una propria idea artistica, la quale, nonostante si rivelò una vera sfida ingegneristica, si convertì rapidamente in un edificio del tutto emblematico per una città in piena crescita socio-economica.

[Fig. 13] Turning Torso, Malmö. Photo credit Mirko Junge©



I frattali

Un metodo che la natura ha sviluppato e migliorato nel corso dell'evoluzione è il processo di crescita di tipo frattale, con lo scopo di massimizzare l'efficienza dell'organismo vivente. Il termine, coniato nel 1975 dallo studioso da Benoît Mandelbrot nel libro *Les Objets Fractals*, deriva da "frazione del tutto", cioè indica come un tratto specifico di un elemento frattale possa essere contenuto in ogni frazione o parte. La geometria euclidea inoltre non è incapace di descrivere la natura in quanto ente molto complesso, limitandosi perciò a descrivere tutto ciò che è regolare. Queste grandezze infatti non possono spiegarsi tramite delle funzioni, bensì ricorrendo ad algoritmi specifici. In natura gli esempi di forme di questo tipo sono infiniti: alberi, felci, broccoli, nuvole, fiocchi di neve, cristalli, ammassi di galassie, fiumi e coste. In un albero ogni suo ramo è simile all'intero albero, ogni rametto è a sua volta simile al proprio ramo, e così via. L'aspetto di una piccola parte viene replicato in miniatura, anche se non risulta essere identica, comunque molto simile. Spiegò lo studioso Mandelbrot sulle relazioni fra frattali e natura:

“Si ritiene che in qualche modo i frattali abbiano delle corrispondenze con la struttura della mente umana, è per questo che la gente li trova così familiari. Questa familiarità è ancora un mistero e più si approfondisce l'argomento più il mistero aumenta”.

I frattali possiedono quindi caratteristiche che descrivono la natura e i comportamenti dell'uomo attraverso una geometria non rigida ma adattabile all'infinita varietà di forme esistenti in natura. Ne esistono di due tipi, di forma geometrica - come i fiocchi di neve - o aleatoria, creati da computer e impiegati in modelli informatici o giochi. Un aspetto da non sottovalutare è che i frattali naturali, a differenza di quelli matematici, possiedono una fine, per cui si può arrivare al grado di dettaglio molecolare in cui cessa la ripetizione della forma data.

[Fig. 14] Differenti rappresentazioni di geometrie frattali presenti in natura. A partire dall'alto: un fulmine (Depositphotos©), l'andamento frattale di un fiume (NASA/GSFC/LaRC/JPL), il fossile di una conchiglia nautilus (<https://www.frattali.it/>), una pianta grassa (<https://www.incredibilia.it/>), il broccolo romanesco (<https://www.riflessologiafrattale.it/>), l'incredibile corolla di un girasole (www.scuolalista.it) e infine un tipo di frattale "artificiale" con forma aleatoria, ricavato da modelli matematici (<https://www.aquaphi.it/>).

CASI STUDIO | Biomimesi di forma e funzione

In questo progetto di Steven Holl per l'ampliamento dell'Istituto di Scienza del Campus di Cranbrook nel Michigan, è proprio la geometria frattale con le sue configurazioni più naturali a sostituire quelle forme idealizzate della geometria euclidea. Secondo l'architetto *"è l'idea che conta e ad essa dev'essere asservito ogni aspetto formale"*.

Per dare l'idea di disordine generato dal movimento, Holl sfruttò le proprietà dei frattali, precisamente utilizzando un modello di attrattori sviluppato dallo scienziato Edward Lorenz nel 1963. Nella geometria frattale un attrattore è un'area che attira verso di sé punti, i quali, nonostante seguano percorsi caotici o apparentemente imprevedibili, restano sempre in orbita. Si considera frattale una geometria caratterizzata dalla proprietà di autosomiglianza: su qualsiasi scala, ridotta o ingrandita, l'attrattore fa sì che si creino delle geometrie simili o identiche a sé stesse. In questo caso, le forme dei frattali diventano per l'architetto un espediente per rappresentare un'idea di caos.

Holl ha immaginato di accorpate il nuovo edificio ad uno già esistente, dandogli proprio la stessa forma a U del precedente; i due blocchi inoltre si 'abbracciano' analogamente alle superfici della geometria frattale, attratte inevitabilmente l'una all'altra.

Osservando da lontano l'atrio, i corridoi o il giardino del campus, gli studenti in movimento si possono identificare come tanti piccoli punti colorati che percorrono cammini distinti e caotici, tuttavia non si allontanano mai dal loro polo di attrazione, ovvero un'aula o lo stesso edificio. Non si trovano né indicazioni né vengono segnati percorsi obbligatori ma, piuttosto, l'architetto sceglie di mostrare lo spazio così com'è: pura libertà di circolazione, analogamente ai frattali al momento di generare percorsi ripetitivi, apparentemente imprevedibili e caotici, ma per niente casuali.

[Fig. 15] Ampliamento dell'Istituto di Scienza Cranbrook's Campus, Michigan. Particolari degli spazi esteriori. Fonte: <http://www.stevenholl.com/>





[Fig. 16] Rappresentazione di un termitaio. Si noti il fungo posizionato giusto nel centro. Fonte: <https://www.sciwhy.blogspot.com/>

Un classico esempio è il sistema di raffreddamento passivo del centro polifunzionale Eastgate Building ad Harare, nello Zimbabwe, dell'architetto sudafricano Mick Pearce in collaborazione con lo studio ingegneristico Arup, inaugurato nel 1996. L'edificio imita a grandi linee il processo di costruzione dei termitai africani, ma non per questo necessita di dover riprodurre fedelmente l'estetica. Le termiti generano strutture piuttosto complesse, composte da cumuli di terra realizzati dagli insetti stessi con lo scopo di mantenerne l'interno a una temperatura fresca e costante, indispensabile per farvi crescere il fungo di cui si nutrono. Le basse temperature sono garantite da una serie di canali scavati nel sottosuolo che creano un ambiente ventilato. Analogamente, l'architetto Pearce è riuscito a riprodurre questo sistema nel suo edificio, dotandolo di una serie di camini laterali e di un tunnel centrale che consentono di ventilare in modo naturale gli ambienti evitando l'utilizzo di

impianti di climatizzazione, garantendo temperature gradevoli e controllate. L'edificio riproduce l'ideale ecosistema di una termite e rispetta ideali di sostenibilità a tutti gli effetti. Si pensi che il consumo generale di un edificio rappresenta ben il 40% di tutta l'energia utilizzata dall'umanità. L'edificio dell'architetto Mick Pearce utilizza il 90% di energia in meno per la ventilazione rispetto agli edifici convenzionali di simili dimensioni e non solo, ha già fatto risparmiare ai proprietari degli edifici oltre 3,5 milioni di dollari per quanto riguarda i costi di condizionamento dell'aria.



[Fig. 17] Eastgate Building di Mick Pearce, Zimbabwe, adibito a centro commerciale e uffici. Fonte: <https://www.mickpearce.com/>

CASI STUDIO | Biomimesi del processo

L' *Urban Algae Canopy* è un prototipo di padiglione, progettato dal team *ecoLogic Studio*, in occasione dell'Expo di Milano del 2015. Gli ideatori hanno voluto riprodurre un'architettura bio-digitale che consiste appunto nella coltivazione di un particolare tipo di alga, assistita digitalmente in tempo reale. Questa particolare struttura, la prima in tutto il mondo, progettata con l'aiuto di Taiyo Europe, è costituita da pannelli di ETFE a triplo strato, i quali ospitano al proprio interno una coltivazione di micro-alghe. Tale copertura, reagisce in relazione ai flussi di energia luminosa, d'acqua e di anidride carbonica, oltre che ai movimenti dei visitatori. Il ritmo di crescita delle alghe è variabile in relazione a tali fattori: ciò fa sì che, per esempio, in caso di un intenso flusso solare, i microrganismi si densifichino, procurando ombra all'interno dell'ambiente. I progettisti hanno quindi voluto creare artificialmente un complesso digitale "vivente", che sostanzialmente si relazioni con l'esterno e si adatti alle condizioni circostanti. Il beneficio ambientale di tale progetto consiste nel liberare, tramite le alghe, l'equivalente in ossigeno di quattro ettari di bosco, insieme alla produzione di quasi 330 libbre di biomassa al giorno. "È giunto il momento di superare la segregazione tra tecnologia e natura tipica dell'era meccanica, per abbracciare una comprensione sistemica dell'architettura", conclude Claudia Pasquero di *ecoLogicStudio*. *"In questo prototipo i confini tra la dimensione materiale, spaziale e tecnologica sono stati attentamente articolati per raggiungere efficienza, resilienza e bellezza"*.

L'unica essenziale difficoltà che incontra il progetto, logicamente, consiste nel ricreare un perfetto habitat che rispetti le qualità necessarie alle micro-alghe per vivere, senza procurare loro uno stress eccessivo. Giorni caratterizzati da un'illuminazione solare intensa, in seguito ad altri meno soleggiati, costituisce il problema di fondo, che il team si propone di gestire nella maniera più sensibile possibile.

[Fig. 18] *Urban Algae Canopy*, Expo di Milano, 2015. Photo credit *ecoLogic Studio*©



Il *Silk Pavilion*, uno degli esperimenti più esemplari del Mediated Matter Group, unisce strategie digitali con una fabbricazione biologicamente ispirata. Tale esperimento, completato nel 2013, trova la propria essenza biomimetica nel processo di costruzione.

Per creare il padiglione, di una superficie di circa 30m², per prima cosa il team ne ha progettato la geometria generale del padiglione, consistente in 26 moduli esagonali e pentagonali in acciaio. La struttura, grazie a un braccio meccanico (CNC), è stata avvolta da un multistrato di filo di seta secondo un algoritmo che ne controllava l'andamento, per definire i vari gradi di densità della struttura primaria. Dopo aver unito i pannelli, sono stati impiegati circa 6'500 bachi da seta attorno alla base della struttura, i quali, esercitando le loro naturali capacità di filatura, hanno riempito gli spazi tra i pannelli, generando una struttura sorprendentemente robusta. Inoltre, il team ha posizionato in modo strategico una serie di aperture, in relazione allo studio delle traiettorie solari, in grado di regolare l'entrata della luce naturale, controllando il calore e apportando alla struttura una luminosità decisamente accattivante.

[Fig. 19] Fasi del processo di montaggio del Silk Pavilion. Photo credit Mediated Matter Group©



“Se dovessi disfare la seta che comprende la massiccia struttura, si estenderebbe da Boston alle Hawaii” afferma James Weaver del Wyss Institute, uno dei professori a capo della ricerca: un lavoro senza dubbio curioso ed originale, unico nel suo genere.

Potenzialmente, tale processo potrebbe essere traslato ad un livello di produzione quasi “industriale”, in quanto i bachi utilizzati in questo caso, una volta adulti, possono produrre circa 1,5 milioni di uova, un vero e proprio ecosistema, l’equivalente per la riproduzione di 250 padiglioni analoghi. Tuttavia, il padiglione vuole limitarsi ad essere un esempio di quel punto intermedio tra un processo biologico, in questo caso controllato, ed il beneficio che ne può trarre l’uomo nella realizzazione di uno spazio funzionale.

[Fig. 20] Silk Pavilion completato. Photo credit Mediated Matter Group©



3. **PROGETTARE COME LA NATURA**

*<<Credi che finché la Terra è rotonda,
potrai trovare ovunque paesaggi naturali?
Può una faccia rotonda avere più di un naso?>>*

Salvador Dalí'

3.1 Biomimetica come soluzione ambientale³⁴

Come già annunciato, è solo da qualche decennio che si è sviluppata la consapevolezza dell'importante ruolo che lo studio della biomimetica può svolgere a supporto di una rigenerazione responsabile e consapevole dell'ambiente costruito. Tali studi stanno dimostrando quanto la natura abbia messo a punto nel corso dell'evoluzione, ossia tutte quelle strategie volte al risparmio e alla razionalizzazione dell'uso di materiali, con particolare attenzione all'ottimizzazione del consumo energetico e degli scambi metabolici.

Si parta dal presupposto che oggi ci ritroviamo sull'orlo di una grave crisi ambientale e che il pianeta risente dell'irresponsabilità umana: siamo piccoli, ma capaci tuttavia di essere un grande peso per il nostro ambiente.

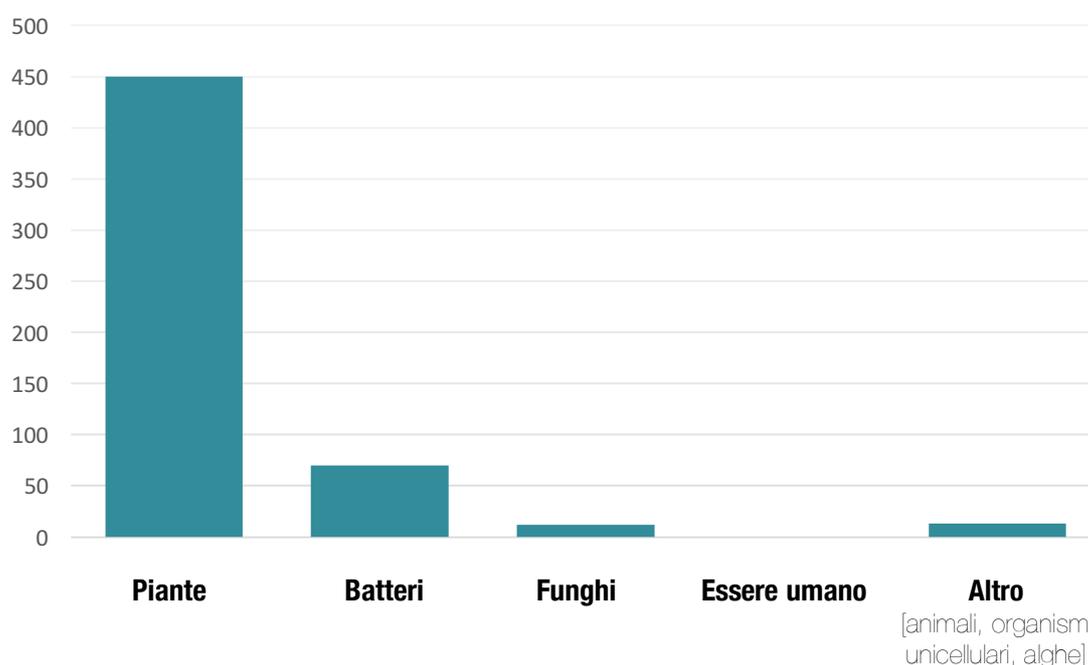
Il lavoro di Ron Milo, professore del Weizmann Institute of Science di Israele, vuole dimostrare proprio quanto detto, quantificando il "peso dell'umanità" rispetto a piante, animali e ogni altra forma di vita sulla Terra, stimando tale quantità in carbonio. Secondo Milo ed il suo *team* la biomassa totale presente sulla Terra è costituito da 550 GT di carbonio - dove 1 gigatonnellata (GT) equivale a 1 miliardo di tonnellate -. Per la maggior parte, circa 450 GT di carbonio si tratta di piante. Il resto è formato da batteri, funghi, organismi

34. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- Carrington D., *Humans just 0.01% of all life but have destroyed 83% of wild mammals*, The Guardian.com, 21 Maggio 2018
- Tucci F., *Tecnologia e natura. Gli insegnamenti del mondo naturale per il progetto dell'architettura bioclimatica*, Alinea Editrice, Firenze, 2009
- Tucci F., *Paradigmi della natura per progettare involucri architettonici*, International Journal of Architecture, Art and Design AGATHÓN 02, 2017
- Bonser R.H.C., *Patented Biologically-inspired Technological Innovations: A Twenty Year View*, Journal of Bionic Engineering vol.3, 2006
- Pallasmaa J., *Animal Architecture*, Suomen Rakennustaitteen Museo, Helsinki, 1995
- Pallasmaa J., *Architecture in miniature*, Suomen Rakennustaitteen Museo, Helsinki 1991

unicellulari, alghe ed animali. Si dimostra evidentemente che la maggior parte della biomassa presente sulla Terra dunque è formata da vegetali (cfr. fig. 21).

I ricercatori sottolineano che i risultati dello studio sono approssimativi, tuttavia evidenziano che l'uomo, seppur piccolo in termini di biomassa e molto più giovane rispetto al pianeta, sia stato in grado di modificarlo profondamente. Nel corso della storia del pianeta, l'uomo ha inoltre provocato la scomparsa dell'83% dei mammiferi totali e circa il 50% delle piante³⁵.



[Fig. 21] Lo studio *The biomass distribution on Earth* di Ron Milo ha quantificato il peso della biomassa in carbonio poiché, a differenza del peso (inteso come effetto della gravità su di un corpo), non è influenzato dalla quantità dell'acqua presente nel corpo stesso. Riproduzione e rielaborazione dell'autore della fonte: <https://www.pnas.org/>.

35. Si pensi all'utilità delle piante, insostituibile da alcun essere vivente, poiché sono responsabili del 98% dell'ossigeno atmosferico prodotto, ottenuto attraverso il processo di fotosintesi, sia producono energia, proprio sotto forma di combustibili fossili come petrolio e carbone. Fonte: <https://www.repubblica.it/ambiente/>

Più in generale, gli organismi viventi animali e soprattutto i vegetali, i quali oltre ad essere presenti in netta maggioranza rispetto all'essere umano, possiedono vantaggi e potenzialità incredibili. Considerando che utilizzano esclusivamente energie rinnovabili sia per produrre riscaldamento e raffrescamento, che per generare movimento, sia per garantire una buona ventilazione e traspirazione, che per compiere le complesse sintesi metaboliche, probabilmente, è proprio grazie a tutto ciò, che animali e vegetali sono riusciti nel tempo ad evolvere tanto, in simbiosi con l'ambiente. Da ciò deriva il loro comportamento, seppur inconsapevole, del tutto sostenibile con la natura. Nelle operazioni di adattamento, regolazione, interazione e metabolizzazione hanno sviluppato caratteristiche tali da garantire al meglio i processi, per esempio per garantire lo scambio di ciò che è materiale o immateriale, di risorse fisiche ed energetiche. Già nel 1995 fa l'architetto finlandese Pallasmaa affermava in *Animal Architecture* il funzionalismo totalmente ecologico in particolare degli animali:

“L'architettura animale è in perfetta armonia con il contesto ecologico, non esaurisce le risorse naturali e non crea problemi di rifiuto e di inquinamento.

L'uso prolungato e il riuso sono, per essi, considerazioni economiche importanti».

È inoltre curioso ed affascinante poter considerare animali e piante come “piccoli architetti”; alcuni animali sono in grado per esempio di programmare la propria “costruzione” secondo la stagione dell'anno che meno richieda energia, sfruttando i parametri climatici, mentre le piante generalmente possiedono la capacità di modificare la propria crescita producendo nuovo materiale di supporto, laddove alcune regioni vengano eccessivamente sollecitate o siano indebolite. In questo caso specifico è la biomeccanica vegetale quella disciplina, seppur relativamente recente ma alquanto complessa che, in parole semplici, si occupa di studiare il modo in cui determinate piante crescono in uno specifico

ambiente per fare fronte sia al supporto strutturale, sia alle funzioni biologiche³⁶. Studiando a fondo quindi tali processi biologici è possibile avere importanti spunti e indicazioni per arricchire e approfondire le basi per scelte strategiche progettuali innovative e tecnologicamente efficaci. Gli organismi biologici sono potenzialmente illimitati ed è chiaro come i progettisti possano ricavare dalla natura sempre più proficui suggerimenti.

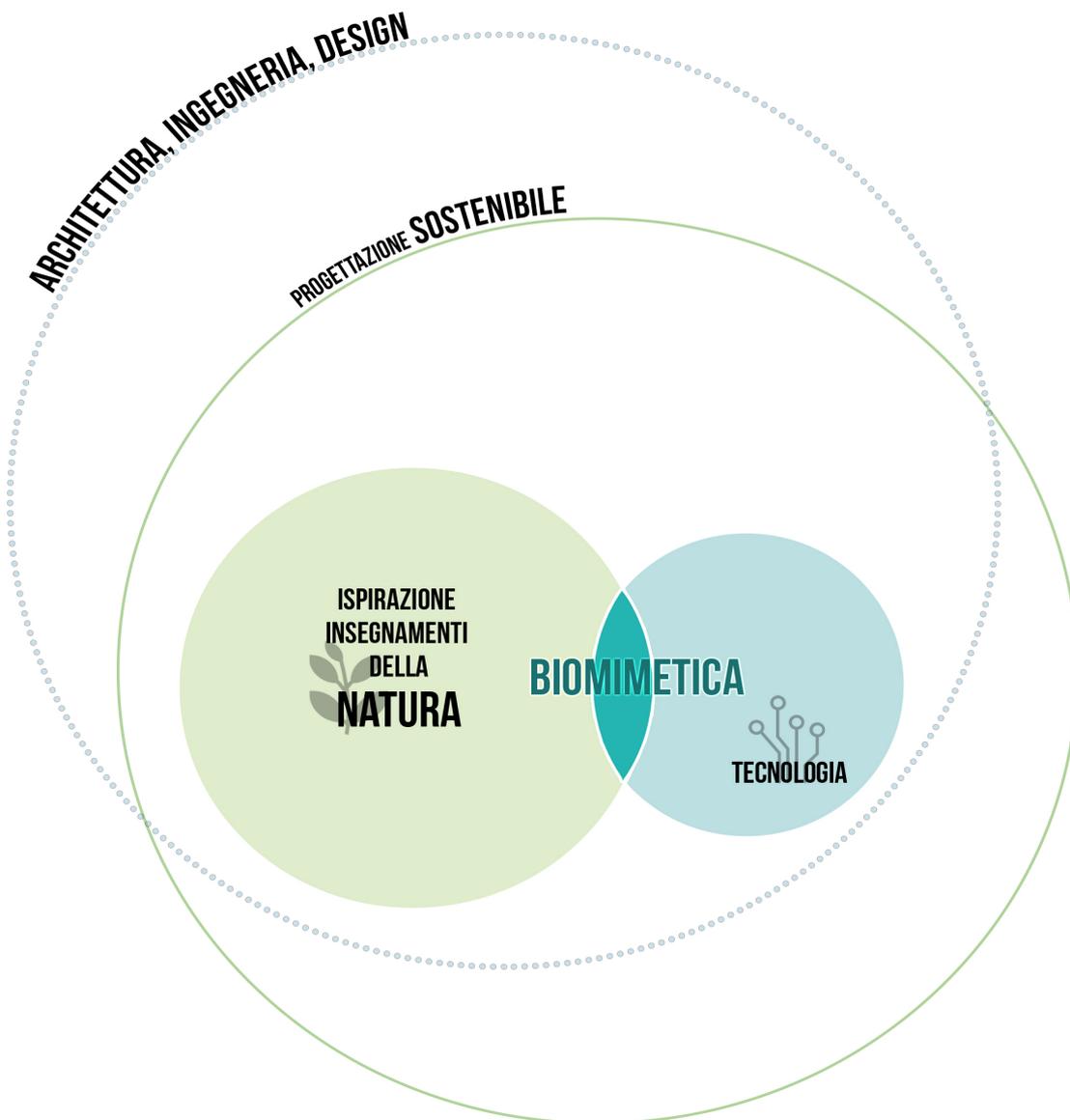
Tuttavia, considerando uno dei principi base delle teorie evolutive, secondo il quale tutti gli esseri viventi presentano un carattere adattativo, in una società come la nostra, in cui l'ambiente si sta trasformando ad una velocità superiore a quella sperimentata in passato, è urgente trovare delle soluzioni efficaci per la salvaguardia del mondo biologico.

Il cambiamento climatico, l'esaurimento di risorse e l'esponenziale aumento demografico sono solo alcuni fattori che influiscono su tutti i sistemi terrestri e la soluzione più plausibile è raggiungere l'adattamento ad un equilibrio, di fatto, nuovo.

Oggi, lo sforzo condiviso da centinaia di ricercatori in tutto il mondo, tra cui chimici, designer, ingegneri, architetti, biologi e antropologi, è un tentativo continuo di creare idee e metodi innovativi per lo sviluppo di un nuovo pensiero ecologico globale, col fine di contribuire ad una progettazione più attenta e consapevole socialmente.

A questo punto è importante precisare un ulteriore concetto. Se l'architettura sostenibile si basa sulla costruzione di edifici che limitino il più possibile l'impatto ambientale, mirando all'efficienza energetica, al miglioramento della salute, del comfort e della qualità, attraverso la progettazione di strutture e tecnologie appropriate, la biomimetica unisce a tutto ciò l'aspetto biologico, l'ispirazione di origine naturale, che la contraddistingue e la determina in quanto tale.

36. Questo fenomeno è conosciuto come crescita adattativa ed ha l'effetto di causare irregolarità nella forma, denominate difetti.



[Fig. 22] “Fare architettura sostenibile” non vuol dire direttamente “fare biomimetica”, ma “fare biomimetica” significa “fare architettura sostenibile”. La biomimetica è quell’unione tra la progettazione ispirata agli insegnamenti della natura e la conseguente emulazione tramite l’aiuto fornito dalla tecnologia.

3.2 Economia circolare: *Cradle to Cradle*³⁷

Una delle idee di progettare che più si avvicina alla stessa strategia impiegata dalla natura appartiene agli autori del celebre libro³⁸ *From Cradle to Cradle* Michael Braungart e William Mc Donough, i quali, propongono e descrivono un approccio del tutto innovativo volto a contrastare tale crisi ambientale.

I due si interrogano sulla vita di una formica. Ebbene, si può affermare che le formiche abbiano colonizzato il pianeta Terra intero e, costituendo ben tra il 15 e il 25% della biomassa animale esistente, sono presenti nella maggior parte degli ecosistemi. Il caso di questi insetti attesta che non è la crescita demografica ad essere una delle cause dell'emergenza ambientale: come appena accennato, la somma totale di tutte le formiche creano una biomassa ben maggiore di quella di tutti noi umani. Le formiche sono state incredibilmente industriose per milioni d'anni e la loro produttività ha nutrito sia piante, che animali e suolo. Pare ovvio che l'industria e la produzione umana, seppur in attività da molto meno tempo, siano state le cause principali del degrado attuale di quasi ogni ecosistema terrestre. Siamo sull'orlo di una catastrofe ambientale e di un'emergenza

37. Sintesi e rielaborazione dalla seguente fonte:

- Braungart M., Mc Donough W., *From Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, North Point Press, New York, 2002

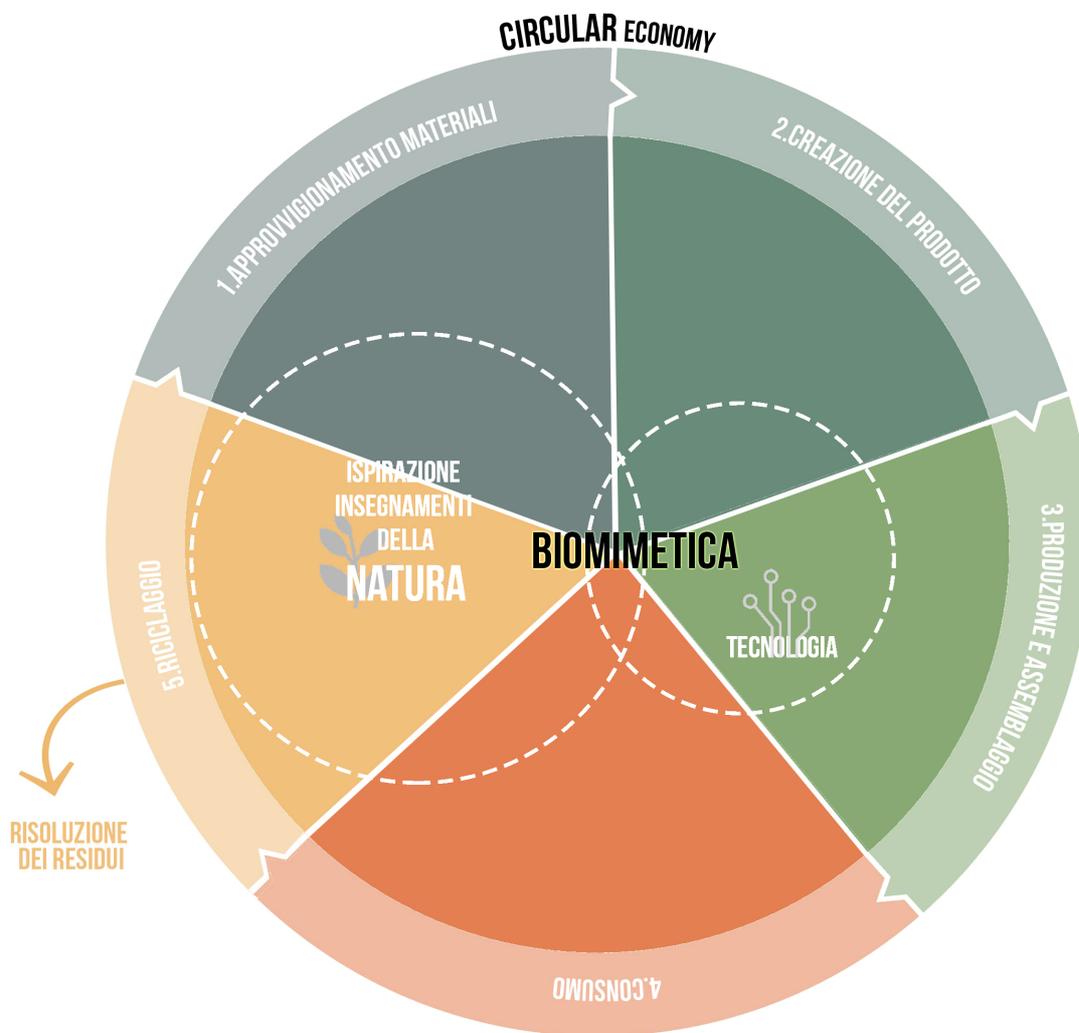
38. Questo libro descrive un approccio radicalmente diverso alla progettazione e alla produzione degli oggetti di uso comune che può dar vita alla nuova rivoluzione industriale. Se si ha l'occasione di tenere in mano questo libro, si noterà immediatamente che non è di carta (quindi, nessun albero abbattuto), ma di un materiale sintetico, un composto di resine della plastica e altri materiali inorganici. Il libro è impermeabile, molto resistente, non emette tossine nell'aria mentre lo si legge, al contrario di in un libro tradizionale, il cui inchiostro è composto di nerofumo e metalli pesanti. Le pagine e la copertina sono totalmente biodegradabili, mentre quelle di un libro normale sono una combinazione di diversi elementi, fra cui idrocarburi alogenati e metalli pesanti, con il risultato che non può essere destinato al compostaggio e l'incenerimento darà luogo ad emissioni di uno degli elementi più tossici esistenti, la diossina. Il libro C2C, al contrario, è quello che loro definiscono un nutriente industriale, vale a dire che può essere scomposto e riutilizzato infinitamente nel ciclo industriale per creare altri libri o prodotti.

sanitaria: consumiamo troppo, riproducendoci eccessivamente, creiamo quantità industriali di rifiuti. Michael Braungart e William Mc Donough si soffermano soprattutto su quest'ultimo aspetto. Ebbene sono gli scarti prodotti ad essere il maggior ostacolo ambientale. L'invito è rivolto specialmente alle aziende - maggiori responsabili -, le quali si devono impegnare nel limitare gli scarti tossici rilasciati nell'ambiente, nel riciclo del numero più elevato possibile di prodotti e soprattutto nel miglioramento della gestione dei rifiuti.

L'idea di base è quella di puntare a creare una società umana ecologica, totalmente priva di rifiuti, analogamente a ciò che avviene in natura, sostenendo l'equilibrio esistente degli ecosistemi. Nel concreto, il loro obiettivo consiste nell'eliminare il concetto stesso di scarto a partire dal primo momento della progettazione di un qualsiasi prodotto. La proposta del chimico e dell'architetto richiede un cambiamento radicale nell'industria, sostenendo un nuovo tipo di valutazione del ciclo di vita, il cosiddetto *life cycle assessment*, passando da un *downcycle*³⁹ a *upcycle*: il prodotto industriale quindi deve essere ideato in partenza per non avere mai fine, essendo reintrodotta nel ciclo produttivo come materia prima o reintegrato perfettamente nel ciclo naturale e inoltre, il riciclo deve essere tale da migliorare le caratteristiche del prodotto originario. Il ciclo di produzione diviene in tal modo un circolo chiuso, come del resto è quello della natura, dove infatti, il concetto di rifiuto non esiste: l'unico ciclo in questione è quello metabolico e quattro dei sei elementi che formano la quasi totalità delle molecole degli esseri viventi - idrogeno, ossigeno, azoto e carbonio - vengono sempre riciclate e trasformate in nuova vita. Secondo Braungart e Mc Donough il ciclo dell'economia circolare viene proprio definito da tale uguaglianza:

rifiuto = cibo.

39. Il termine *downcycle* fu usato per la prima volta da Reiner Pilz in un'intervista di Thornton Kay a SalvoNEWS nel 1994. Ciò si riferisce al riciclaggio di rifiuti in cui il materiale riciclato è di qualità e funzionalità inferiore rispetto al materiale originale.



[Fig. 23] Più nello specifico, la biomimetica rientra nel circolo chiuso della circular economy, dettata da Braungart e Mc Donough.

Seguendo tale concetto, il processo industriale sarebbe così fatto: le nuove industrie producono acque di scarico perfettamente potabili e il terreno circostante si trova in perfette condizioni per essere utilizzato per altre attività. Il prodotto industriale non deve rilasciare alcuna emissione tossica e, invece di terminare il ciclo di vita, si decompone nella terra, fertilizzando il suolo e diventando nutriente, ossia una materia prima di buona qualità per successivi processi produttivi. Si trae beneficio anche dalle acque di scolo, le quali vengono trattate da organismi viventi: alghe, piante, pesci, lumache e microbi, un vero e proprio piccolo ecosistema che si serve delle sostanze nutritive dell'acqua per sopravvivere e contemporaneamente la purifica, rendendola potabile e pronta per il riutilizzo.

Anche la tipologia di edificio efficiente proposta da Braungart e Mc Donough deve seguire tali parametri: deve essere in grado di produrre più energia di quanta ne si consumi, di purificare il suolo e le proprie acque di scarico. Aggiungono gli autori: *"Immagina un edificio come un albero e una città come una foresta"*.

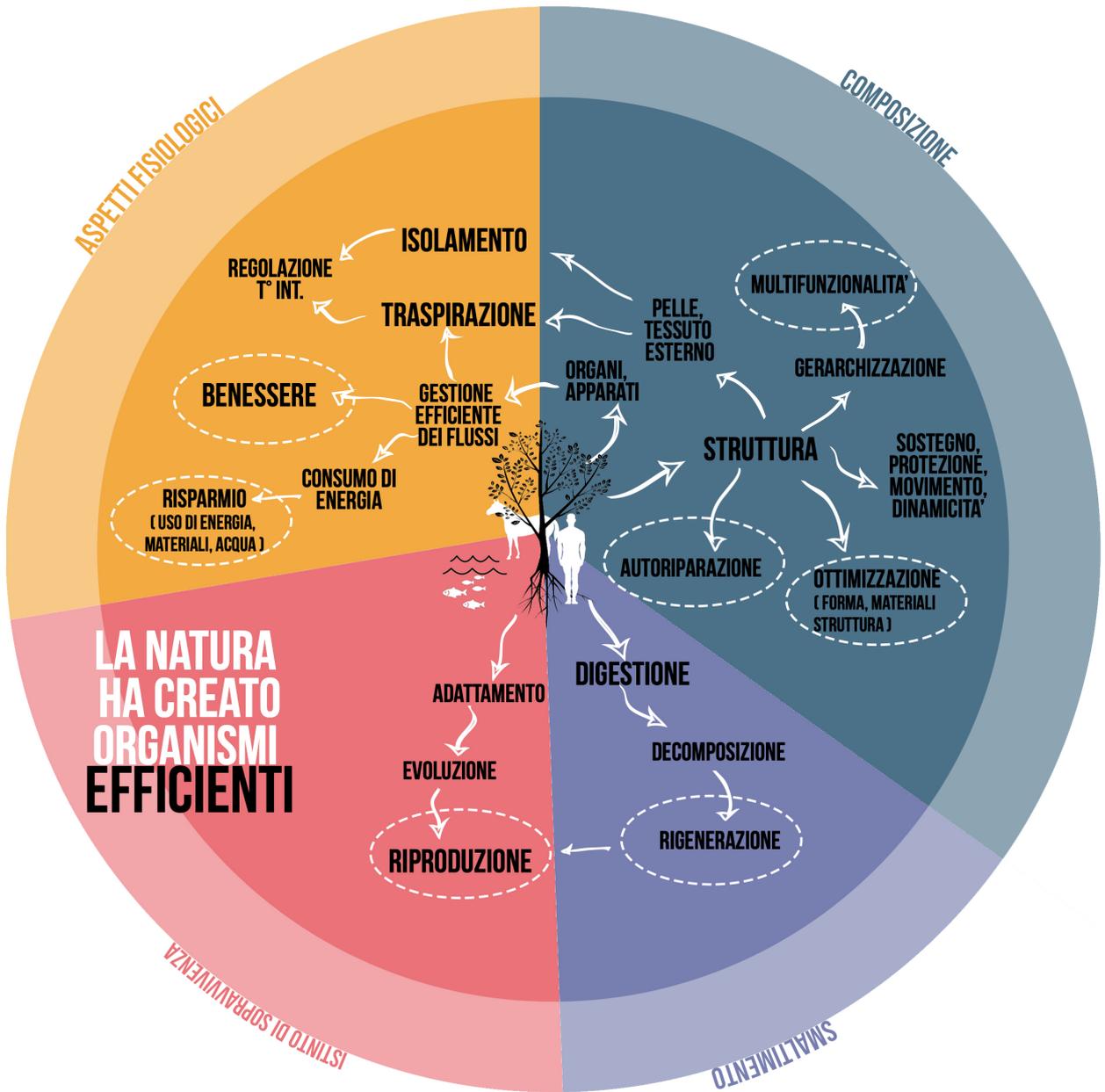
Ebbene, si pensi ad una sequoia, la quale, potendo raggiungere quasi 100 metri di altezza, senza alcun rumore, riesce a far arrivare alle proprie estremità diverse centinaia di litri d'acqua, il tutto, sfruttando energia solare. L'approccio all'architettura dovrebbe essere pensato in questi termini.

Inoltre, se un sistema organico prevede il perfetto smaltimento di tutti i suoi componenti nel tempo, allo stesso modo, il progettista deve avere rispetto verso il ciclo di vita degli elementi. Analogamente a ciò che accade in natura, la stessa sequoia, quando muore, non rilascia nell'ambiente alcun tipo di residuo tossico, si decompone e infine, fertilizza il suolo per dar luce ad una nuova vita. Se ci si sofferma sul concetto che, in fin dei conti, il divario tra un edificio in termini "fisiologici" ed un organismo vivente non è così marcato, l'approccio alla progettazione necessariamente cambia.

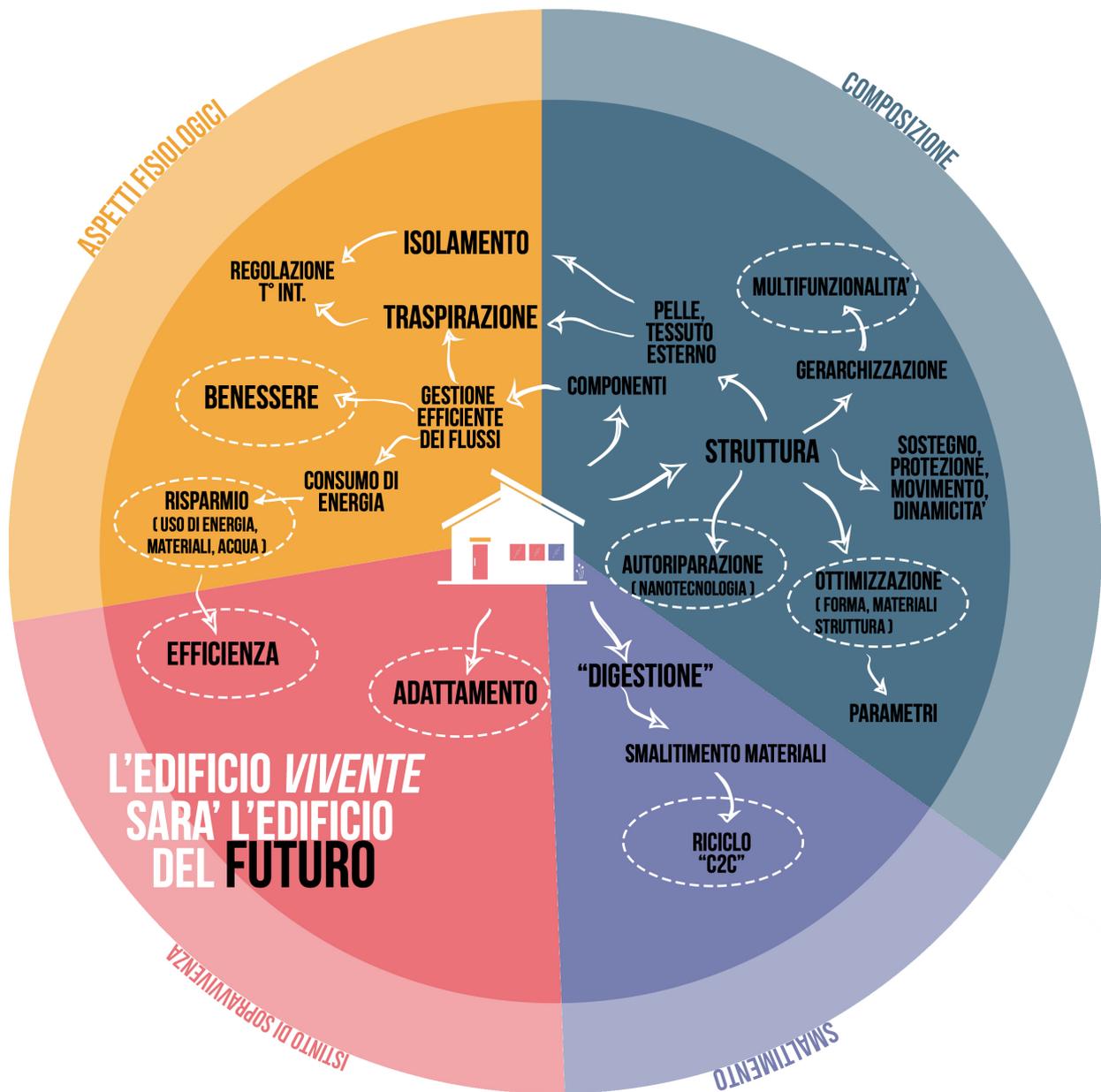
In questi termini è proprio la biomimesi di terzo livello, chiamata anche *Deep biomimicry* da Janine Benyus, quella ricerca più approfondita volta all'emulazione del funzionamento di intere unità ecologiche. Verrà affrontato a

seguire più nel concreto, citando ed analizzando alcuni casi studio innovativi, i quali manifestano l'idea di voler considerare un intero progetto in quanto facente parte di un intero ciclo di vita sostenibile, proponendo un vero e proprio ecosistema.

“IMMAGINA UN EDIFICIO COME UN ALBERO”



...E UNA CITTÀ COME UNA FORESTA”



[Fig. 24] Parallelismo tra il mondo biologico e l'edificio. L'edificio del futuro mira a possedere una valenza più organica di quella che tradizionalmente gli si attribuisce. In tale schema si vogliono evidenziare quegli aspetti fondamentali che saranno da analizzare per la progettazione del futuro. L'intento di tale elaborazione è quello di riflettere sulla somiglianza, in fin dei conti netta, in termini di struttura, funzionamento e smaltimento tra un organismo vivente ed il costruito. L'edificio del futuro sarà efficiente se la progettazione terrà conto dei termini quali benessere, ottimizzazione, multifunzionalità, adattamento, dinamicità, riciclo. L'edificio nasce, si adatta alle condizioni esterne, interne, alle esigenze dell'uomo, respira, e infine, si decompone e muore. L'efficienza è un aspetto che, seppure nello schema di sinistra non viene citato per una questione di banalità, va curato in diversi ambiti in fase di progettazione e si identifica senza dubbio nell'edificio del futuro.

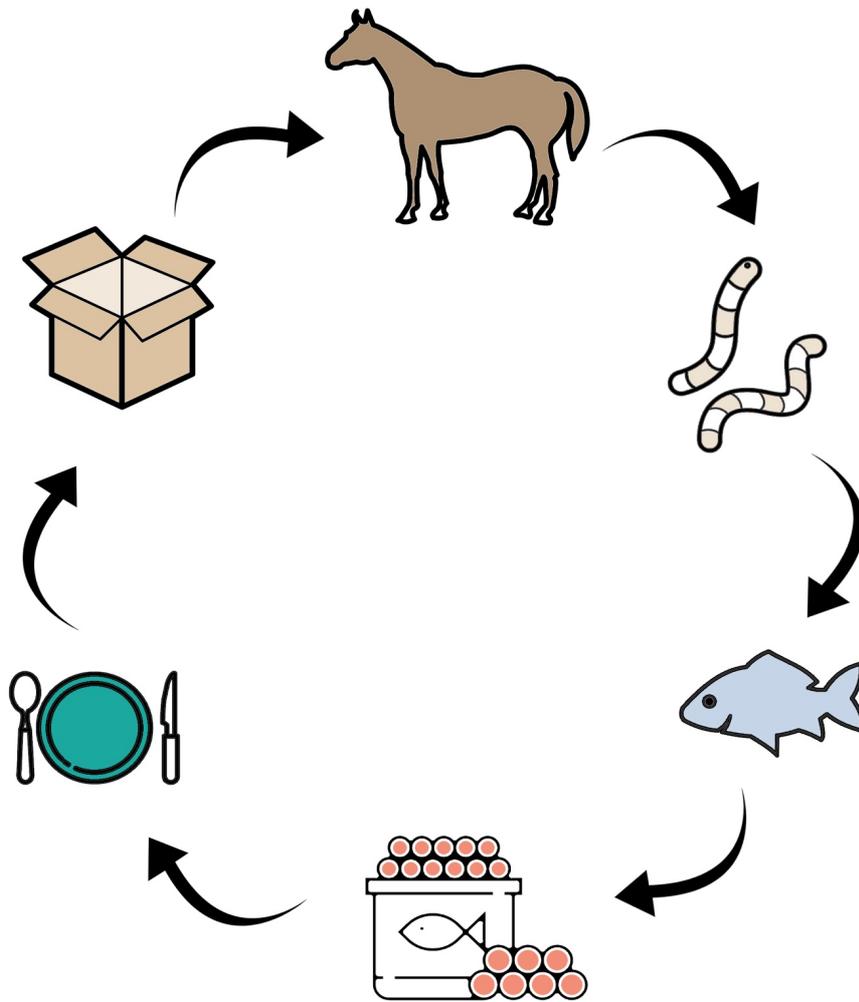
“Secondo la biomimetica se si dispone di una risorsa sottoutilizzata non si pensa “in che modo posso disfarmene?” ma piuttosto “cosa posso aggiungere al sistema per creare maggior valore?”

Michael Pawly

Ebbene un ottimo esempio di questa linea di pensiero è il progetto *Cardboard to Caviar* - noto anche come *ABLE Project* - il quale attesta che i sistemi lineari dispendiosi possono essere trasformati in sistemi a ciclo chiuso senza alcuna produzione di rifiuti, sostenendo il principio del *cradle to cradle*. In ogni fase di questo progetto, avviato da Graham Wiles ⁴⁰, si applica quell'importante principio biomimetico che vede i rifiuti come una risorsa con cui si può alimentare un altro processo. Questa parte del progetto inoltre ha una valenza sociale non da poco, poiché prevedeva una parte di lavoro svolto in collaborazione con ex utilizzatori di eroina e persone portatrici di handicap e ha raggiunto enormi successi anche grazie al loro coinvolgimento in attività produttive come questa. Questo progetto dimostra il potenziale vantaggioso di trasformare un materiale di scarto in un prodotto di alto valore, apportando numerosi benefici sociali, economici ed ambientali, basandosi su semplici cinque passi:

- [1]. Si parte dai prodotti di scarto di un ristorante, dei cartoni
- [2]. Avviene il riciclaggio del cartone: viene sminuzzato in modo che possa essere venduto ai centri equestri come lettieri per cavalli
- [3]. Il centro equestre si occupa di ritirare i cartoni e istituisce un sistema di compostaggio
- [4]. Una piccola fattoria di pesce si occuperà di allevare lo storione siberiano, il quale si nutrirà proprio di quei vermi che derivano dal compostaggio del centro equestre
- [5]. Lo storione dovrebbe poco a poco produrre il lotto di caviale
- [6]. Si vende il prodotto ottenuto: il caviale viene comprato dai ristoranti. Si chiude il ciclo.

40. Graham Wiles è il direttore della Green Business Network®, un'organizzazione no-profit inglese che si pone come obiettivo la creazione di una società giusta e sostenibile dal punto di vista ambientale.



[Fig. 25] Rappresentazione del concetto del Cardboard to caviar di G. Wiles, rappresentato come il ciclo chiuso di un'economia circolare e sostenibile.

Il progetto *Mobius* di Exploration, fondata nel 2007 dall'architetto Michael Pawlyn, ha l'ambizioso obiettivo di ospitare una serie di attività all'interno di una unica struttura, in modo tale da creare un ciclo chiuso di produzione senza creare alcun tipo di rifiuto.

Si tratta in generale di un concetto che si potrebbe applicare a molte aree urbane esistenti, contribuendo alla sostenibilità. Fino ad oggi, annuncia l'architetto, capita raramente di visualizzare e concepire le aree delle infrastrutture come aree "abitabili" e ancor meno, di usufruire di questi spazi, traendo benefici da essi stessi. L'idea del progetto è proprio quella di popolare vari punti della città, estendibile a qualsiasi area urbana di tali caratteristiche, in modo tale da ricavare dei veri e propri prodotti consumabili dai cittadini, in modo da poter beneficiare degli scarti prodotti impiegandoli per il ciclo seguente. Nel concreto, il progetto prevede una serra comune adibita alla coltivazione, un ristorante che serve piatti di stagione con prodotti coltivati proprio in tale serra, un ricco allevamento di pesci commestibili ed un mercato alimentare. In particolare il ristorante prevede di riutilizzare i residui dei chicchi di caffè di scarto per coltivare funghi, che a loro volta, vengono serviti al pubblico.

Pawlyn evidenzia il fatto che proprio accorpendo cicli di cibo, energia, acqua e rifiuti in una sola struttura, si possono ottenere risultati sorprendenti. I progettisti hanno quindi previsto l'utilizzo di un innovativo digestore anaerobico per ridurre i problemi di smaltimento dei rifiuti, per esempio per eliminare forti odori e contrastare l'inquinamento idrico. Tale sistema è fondamentale anche per la produzione di biogas, i quali vengono in seguito impiegati per il riscaldamento o per la produzione di elettricità. Ciò che ulteriormente contribuisce al carattere decisamente sostenibile di tale progetto è il sistema di trattamento delle acque reflue impiegato, denominato *Living Machine*, commercializzato dalla società americana *Living Machine Systems*. Si tratta di un sistema intensivo di biorisanamento in grado di produrre sottoprodotti benefici, come acqua di qualità, piante ornamentali o prodotti vegetali da impiegare come materiali da costruzione, biomasse energetiche, mangimi per animali. Il fatto di collocare il sistema di serbatoi, tubi e filtri all'interno della serra, aiuta a prevenire il congelamento in climi freddi e aumenta il tasso di attività biologica.



[Fig. 26] Concept del progetto Mobius. Il materiale previsto per la copertura è un polimero ad alta resistenza, ovvero l'ETFE, il quale può coprire superfici sette volte superiori a quelle del vetro, con un peso pari a un centesimo rispetto a quello del sistema a doppi vetri. Photo credit Exploration©

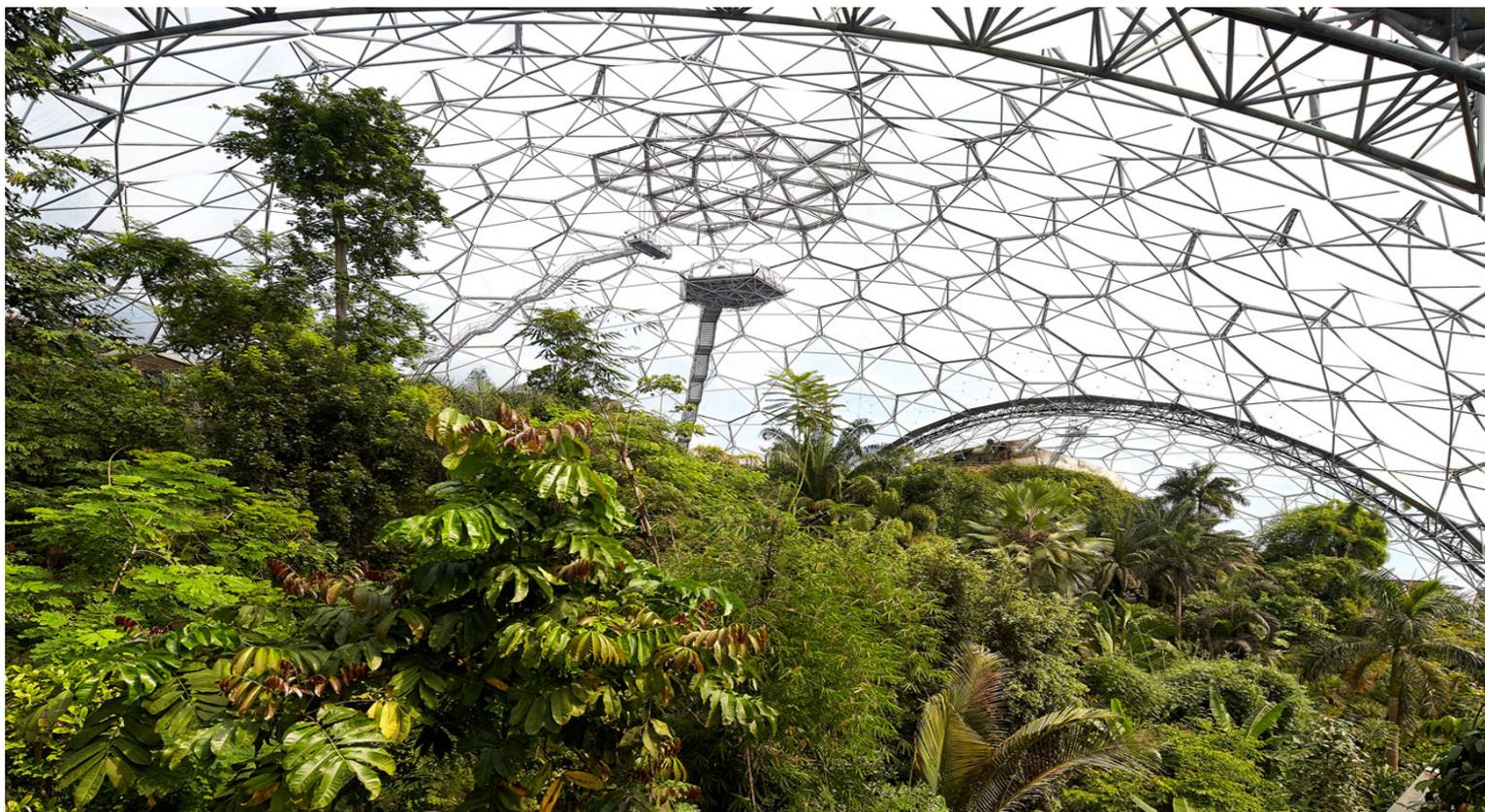
L'obiettivo di Grimshaw Architects in collaborazione con Michael Pawlyn, nell'ambizioso *Eden Project*, è quello di dare un riconoscimento alla biodiversità della fauna terrestre e, allo stesso tempo, guardare al futuro. Il progetto vede la netta trasformazione di un luogo anonimo di circa 15 ettari in un impressionante sito multifunzionale che pone al centro l'esperienza del visitatore. Infatti, nel complesso viene anche incluso un edificio dedicato esclusivamente al pubblico, il quale offre delle ottime viste sulle cupole geodetiche, ovvero il fulcro del progetto. I due grandi blocchi comprendenti 4 cupole ciascuno di diversa grandezza e connesse fra loro, rappresenta un adattamento del modello delle strutture pensate da Fuller ad un vero e proprio sistema biologico: una reinterpretazione radicale della serra. Durante l'intero processo di progettazione, spiegano gli architetti, non è mai mancata l'ispirazione alle soluzioni proposte dalla natura, come nella forma, nella *texture* della struttura a celle alveari.

Le varie parti sono state concepite per sfruttare al massimo la superficie adattandosi alla topografia del terreno e contemporaneamente ottimizzando l'orientamento solare.

Anche in questo caso, in analogia a quello citato precedentemente, il materiale utilizzato per la copertura è l'ETFE, assemblato in cuscini a triplo strato in seguito gonfiati ad aria per assumere maggior resistenza e isolamento termico. Tale struttura può garantire fino ad oltre 100m di diametro.

[Fig. 27] Il fulcro del progetto Eden: i due grandi blocchi di serre di differenti dimensioni ospitano le più affascinanti specie di piante appartenenti a due fasce climatiche distinte: troviamo il Humid Tropical Biome ed il Warm Temperate Biome. Fonte: <https://www.arch2o.com/>





[Fig. 28] Vista interiore da una delle sfere geodetiche. Si noti la leggera struttura in acciaio e soprattutto i relativi particolari di giunzione fra due cupole: i progettisti dichiarano che per risolvere tali parti l'ispirazione derivò dalle ali di un drago. Si raggiungono altezze fino ai 55 m. Fonte: <https://www.edenproject.com/>

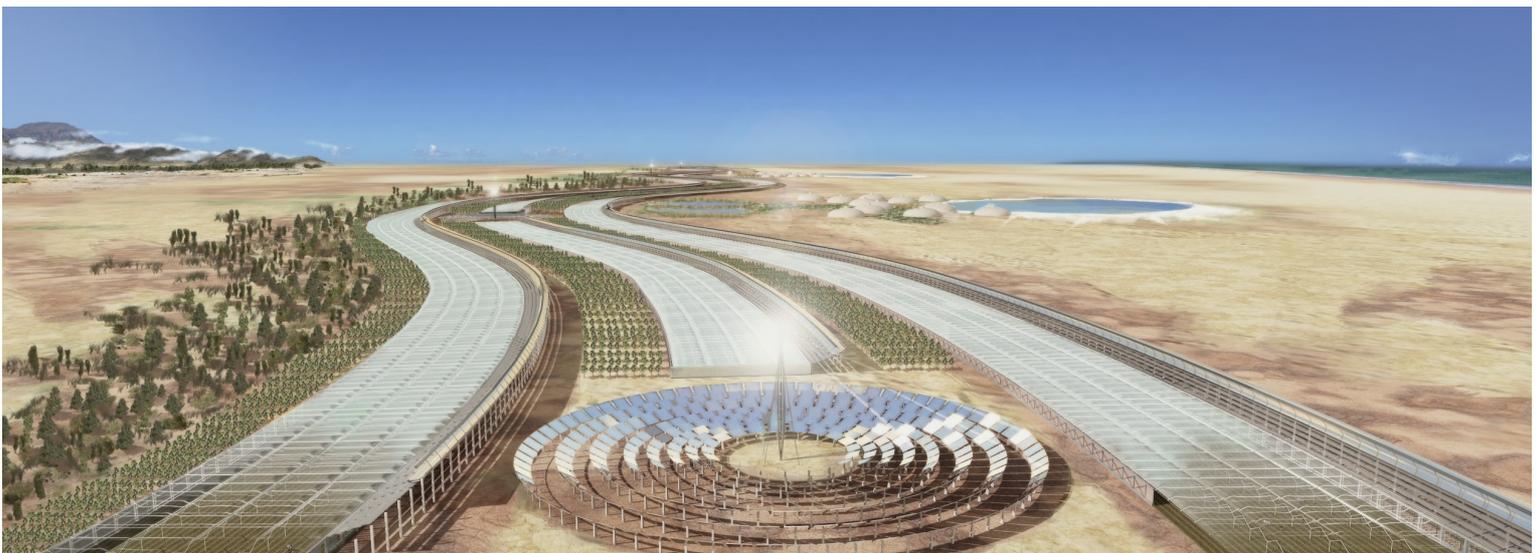
L'efficienza del telaio si basa sui componenti delle forme geometriche: tubi e giunti in acciaio leggeri, relativamente piccoli e facilmente trasportabili. Il risultato è una delle strutture più leggere mai create prima, nonché un edificio che, già per conformazione, minimizza le dispersioni termiche e inoltre, attraverso principi di progettazione solare passiva, si auto-riscalda per la maggior parte dell'anno. La suddivisione in due complessi diversi di cupole geodetiche si spiega nella riproduzione di due biosfere distinte da esplorare, il *Humid Tropical Biome* con un ambiente di 330.110 m³ simile alla giungla ed il *Warm Temperate Biome* di 85.620 m³, con specie vegetali provenienti dal Mediterraneo, Sud Africa e California. Il grande complesso prevede il riutilizzo delle acque per umidificare gli ambienti e l'irrigazione.

Dall'apertura nel 2001, il Progetto Eden ha attirato oltre 13 milioni di visitatori, ha vinto numerosi premi e, durante i suoi primi tre anni di attività aperta al pubblico ha contribuito con 0,5 miliardi di sterline all'economia locale. *Eden Project* è ora una delle prime tre attrazioni turistiche nel Regno Unito e la seconda destinazione più visitata al di fuori di Londra.

The Sahara Forest Project fu proposto nel 2009 da una società norvegese e si propose come grande iniziativa per far fronte alla desertificazione, un fenomeno che continua ad aumentare a causa del cambio climatico. I progettisti si sono quindi posti come obiettivo quello di realizzare e diffondere soluzioni innovative creando nuovi spazi di ricerca e di lavoro, nell'ambito della sostenibilità ambientale. Il progetto in sé è un'opera di riforestazione e ripopolazione, un modello applicabile in futuro in diverse zone disabitate nel mondo di analoghe caratteristiche, per far fronte ai problemi legati alla sovrappopolazione mondiale, generando vita, cibo e acqua per il sostentamento, tramite una serie di determinati processi attentamente studiati. Il complesso è in grado di sopportare perfettamente le condizioni estreme desertiche e raggiunge l'autosufficienza sfruttando le risorse presenti in grande quantità nelle zone desertiche marine: il sole, il vento e l'acqua salata. Si vuole creare dunque una serie di sistemi densamente interconnessi, a rifiuti zero, che si basano sull'energia solare, in modo che sia effettivamente "riparativo" per l'ambiente e i suoi spazi.

Secondo le stime della NASA, ogni metro quadrato di deserto riceve, in media, tra i 2.000 e i 3.000 chilowatt/ora di energia solare all'anno. Poiché il Sahara ha una superficie di circa nove milioni di chilometri quadrati, ciò significa che l'energia totale disponibile - cioè se ogni centimetro del deserto assorbisse ogni goccia di energia solare - è di oltre 22.000 milioni di gigawattora (GwH) all'anno. Inoltre se fosse considerato un paese, sarebbe il quinto per estensione al mondo, superando il Brasile. Tale deserto potrebbe produrre più di sette volte il fabbisogno di elettricità dell'Europa e di tutto il Nord Africa, con emissioni di carbonio quasi nulle.

[Fig. 29] Modello di un prototipo del Sahara Project in Tunisia. Si noti il sistema a specchi della centrale, la folta vegetazione che si viene a creare grazie all'accumulo dell'acqua ricavata dall'ambiente e le immense serre, la fonte di approvvigionamento principale. Fonte: <https://www.saharaproject.com/>



Il progetto prevede una serra dotata di un sistema di griglie montate sulla copertura, le quali ricavano acqua grazie a dei condensatori. Poco a poco le gocce vengono rilasciate in piccole quantità alle piante all'interno. Tale meccanismo prende ispirazione dallo scarafaggio del deserto, lo *Stenocara gracilipes*, il quale per sopravvivere ai difficili climi desertici, riesce a procurarsi acqua condensando l'umidità dall'ambiente circostante, il tutto grazie al proprio guscio, dotato di una conformazione specifica che gli permette di orientare le gocce verso la bocca.

La brezza marina inoltre aiuta a rinfrescare l'ambiente interno per cui la serra si mantiene relativamente fresca e umida e non è necessario un gran consumo d'acqua ulteriore per le piante al suo interno. Nei pressi della parte esteriore della serra quindi l'acqua ricavata dall'ambiente, venendosi ad accumulare, permette la popolazione di una vegetazione in continua espansione. Ed ecco che si ha una netta trasformazione, da un terreno totalmente arido ad uno biologicamente produttivo. Per ricavare energia solare inoltre i progettisti hanno previsto una centrale, costituita da una serie di specchi, per contribuire a massimizzare l'intensità dei raggi solari per la conversione in energia elettrica. Tale centrale necessita di acqua demineralizzata, ma di fatto, viene già prodotta dalla serra. È inoltre risaputo che le centrali producano calore: in questo caso viene sfruttato per far creare condensa e ricavare ulteriore acqua. Nelle zone di ombra del complesso della centrale è possibile far crescere diversi tipi di ortaggi che non potrebbero nascere nelle zone desertiche eccessivamente soleggiate e aride. Infine, quel sale ricavato dall'aria marina che si accumula sugli evaporatori in grandi quantità può essere utilizzato come materiale da costruzione, sostenibile e decisamente leggero.

I progetti che fino ad ora sono stati realizzati si trovano in Qatar e in Giordania e stanno testando di fatto l'efficienza di tale sistema e valuteranno se possa essere una possibile soluzione applicabile a più larga scala nel mondo.

[Fig. 30] Foto della realizzazione del Sahara Project in Qatar, nei pressi della città di Doha. Photo credit saharaforestproject/Flickr©



3.2.1 *Life Cycle Assessment e Cradle to cradle*⁴¹

A seguito di tali considerazioni e concetti sopra enunciati, si vuole chiarire quella distinzione tra l'analisi del ciclo di vita conosciuto come *Life Cycle Assessment* o LCA, e il concetto del C2C, entrambi metodologie per far fronte alla crisi ambientale, seppure differenti.

Purtroppo fino agli anni Settanta, quando si è iniziato ad adottare il metodo del LCA, l'uomo ha scarsamente valutato gli effetti dell'impatto ambientale di determinate attività antropiche; ciò significa che, senza accorgersene, ha causato danni irreversibili. Tale metodologia segue un approccio quantitativo - *assessment* significa proprio quantificare – e prevede lo studio dell'intero ciclo di vita di un prodotto definendo tutte le sostanze e i materiali utilizzati. Infine si calcola il potenziale impatto ambientale del prodotto, a partire dalla sua produzione allo smaltimento. Il LCA si basa su una solida base scientifica che tiene conto delle ricerche relative agli effetti di determinate sostanze sull'ambiente, effettuate durante molti anni di esperienza.

Analogamente, due dei principi fondamentali dettati dal *Cradle to Cradle* come il LCA, si basano su analisi relative ai materiali impiegati in un prodotto. Il primo si riferisce in particolare al riutilizzo, quindi al recupero di materiali e al riciclaggio alla fine della vita di tale prodotto. Il secondo principio si rifà al *material health*, più precisamente, alla composizione chimica dei materiali in questione e quindi, alla valutazione e classificazione del rischio di tossicità di tutti i materiali che compongono il prodotto. Braungart e Mc Donough inoltre includono al loro approccio gli aspetti sia ambientali che sociali della sostenibilità. La divergenza principale con l'analisi del ciclo di vita o, se vogliamo, il vantaggio, è basicamente

41. Sintesi e rielaborazione dalle seguenti fonti:

- Bor A., Hansen K., Goedkoop M., Rivière A., Alvarado C., Van den Wittenboer W., *Usability of Life Cycle Assessment for Cradle to Cradle purposes*, NL Agency NL Environment and NL Energy and Climate, Utrecht, 2011

- Bjørn A., Zwicky Hauschild M., *Cradle to cradle and LCA*, ResearchGate, 2018.

relativo alla definizione stessa, in quanto il C2C è assimilabile ad una vera e propria filosofia di pensiero, che, a differenza del LCA, tiene conto anche della responsabilità sociale. Se il metodo del LCA viene utilizzato anche per migliorare determinati prodotti, il C2C è caratterizzato da una più ampia visuale, secondo il quale per esempio, se un sistema è di per sé non ottimale, non viene migliorato cambiando piccoli fattori, ebbene, si agisce sull'intero sistema, offrendo altre alternative. Per tale ragione, l'approccio è quindi definibile dal basso verso l'alto o *Bottom-Up*. Si tratta sempre di metodi di investigazione che nascono dal basso, dall'osservazione. Rispetto al LCA, si tratta di un approccio più naturale poiché sono previste determinate correzioni nel tempo, in analogia a ciò che avviene negli organismi durante secoli di evoluzione. Un'altra grande differenza è infatti a livello di strategia. L'idea ottimista, nonché l'obiettivo che propongono Braungart e Mc Donough è determinante: l'idea non è ridurre gli impatti negativi, come avviene nel LCA, ma piuttosto aumentare quelli positivi.

Tali approcci sono in sintesi due strumenti di sostenibilità molto diversi. Se il primo riguarda brevemente calcoli quantitativi e misurazioni, nonché un approccio *Top-Down*, che propone la soluzione ad un problema, C2C è un'analisi più qualitativa, volta invece ad anticipare tale problema. Braungart e Mc Donough affermano che è possibile, rispettando il loro pensiero, che la fine di un ciclo sia l'inizio di un altro.

	C2C	LCA
Purpose / intentions	<i>Classify/substitute</i> harmful materials for optimal results in a defined C2C nutrient flow scenario. Hazardous chemicals are detrimental from the perspective of 'biological nutrition'. Technical properties may be detrimental from the perspective of 'technical nutrient' management.	<i>Measure</i> the extent of hazardousness of emissions that occur in the various steps of the lifecycle, while not taking into account the chemical content of the material (unless this results in emissions in the use or end of life stages, with an objective (open source) expert system).
Compare	The idea is not to compare two (functionally similar) C2C products. C2C compares a given product at different stages of its optimization (redesign).	It is possible to compare products, also only on toxicity.
Strategy	'The <i>right</i> material at the right place, in the right time' (defined C2C nutrient scenario). → If toxic: 1) <i>look for alternative</i> (absolute), 2) if no alternative is available, aim to reduce the risk of exposure and retain the weak point as an opportunity for innovation within a company's industrial partners.	' <i>Minimize impact</i> ' (ecodesign strategy, LCA has no design strategy). → try to design a product with <i>less toxic impact</i> (relative).
Looks at	The <i>adequacy of the material</i> as: - Biological nutrient (for biological systems that they will come into contact with (e.g. via inhalation or ingestion, humans, water, soil)); - Technical nutrient (for technical systems capable of reusing materials with defined quality).	The (toxicological) <i>emission</i> of materials, assuming some of the chemicals contained in the material will be emitted. 'Embedded toxicity' is not included in the assessment; provided there are no toxic emissions, the impact is zero.
What is assessed	The <i>material properties</i> (toxicology, chemical/physical properties) and their capacity to support the C2C scenario in a beneficial way.	<i>Emissions</i> occurring over the life cycle. It depends on the end of life scenario to what extent the content is being assessed.
Assessment means	(Quality of nutrients) <i>classification</i> into A (optimal), B (could be optimized), C (tolerable) and X (not acceptable), grey (not characterized).	(Quantitative) <i>impact calculation</i> .
Based on	1) the <i>properties</i> of the materials and 2) the <i>suitability</i> of the context	<i>Emissions</i> during the whole life cycle.
Model	1) The <i>possibility</i> of living systems to come in contact (oral, dermal, inhalation) with the substances/ materials during the past, present and intended future of the product with beneficial impacts; 2) The <i>possibility</i> of (theoretical/operational) technical systems to process materials with beneficial resource impacts during the past and the intended future of the technical product.	<i>Assess</i> the impact of the <i>actual</i> (and not potential emissions), and then assess the fate and exposure of the emission.

[Fig. 31] Confronto fra Cradle to Cradle e Life Cycle Assessment in relazione all'approccio alla tossicità dei materiali costituenti un generico prodotto. Pubblicato da Bor A., Hansen K., Goedkoop M., Rivièrè A., Alvarado C., Van den Wittenboer W. in *Usability of Life Cycle Assessment for Cradle to Cradle purposes*.

3.3 L'ottimizzazione: Natura vs Architettura⁴²

Dopo aver definito il significato di biomimetica ed aver sottolineato la sua importanza come strategia sostenibile in campo ambientale, questa parte si focalizza su un aspetto cruciale che caratterizza tale strategia innovativa: l'ottimizzazione. Come prevede il *Biomimicry-Thinking*, dunque questa fase d'investigazione inizia interrogando la natura su come avviene l'ottimizzazione negli organismi, per poi reinterpretare il concetto in chiave di progettazione.

In termini di ottimizzazione, come già ribadito, la natura non fallisce. Sono molteplici le strutture naturali che nel corso dell'evoluzione sono risultate efficienti e che oggi si possono riutilizzare nel campo dell'architettura, senza dimenticare che molti materiali ad alte prestazioni tecnologiche o strutturali che si stanno usando nel campo della costruzione - potenzialmente infiniti quelli che ancora si possono scoprire - non sono altro che di derivazione biologica.

A questo punto è importante distinguere quei tre elementi fondamentali ottimizzati di un organismo: materiale, struttura e forma.

In generale, si può affermare che le strutture del mondo biologico sono per natura efficienti, in quanto durante il processo di crescita, ottimizzano questi tre elementi, vincolati sempre da un rapporto indissolubile. Ciò significa che per raggiungere le maggiori prestazioni fisico-meccaniche e funzionali possibili, la natura tende parallelamente a ottimizzare la materia, utilizzandone la minor quantità possibile e sfruttandone al meglio le caratteristiche: il risultato è una forma a sua volta ottimizzata, ottenuta con il minor dispendio di energia

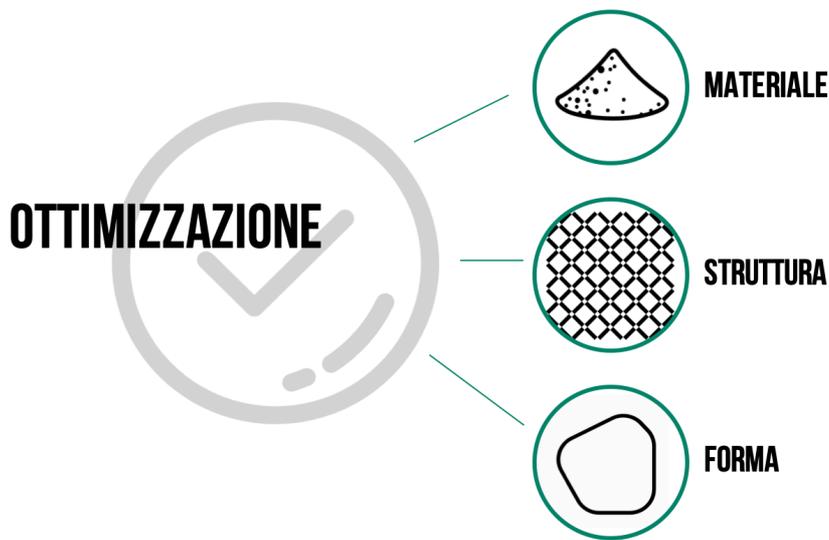
42. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- Ashby M.F., *Materials and the Environment*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2009

- Tucci F., *Tecnologia e natura. Gli insegnamenti del mondo naturale per il progetto dell'architettura bioclimatica*, Alinea Editrice, Firenze, 2008

- Pallasmaa J., *Architecture in miniature*, Museum of Finnish architecture, Helsinki, 1991

- Sala G., Di Landro L., Airoidi A., Bettini P., *Tecnologie e materiali aerospaziali* (cap.63), Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale-Politecnico di Milano.



[Fig. 32] I tre elementi che sintetizzano l'ottimizzazione della natura di un organismo biologico. Il materiale viene minimizzato e infine, una volta decomposto, non rilascia rifiuti tossici per l'ambiente. La struttura raggiunge la massima efficienza con il materiale a cui ha disposizione ed è multifunzionale; dal punto di vista di supporto e protezione è studiata dalla natura in modo tale da garantire il miglior svolgimento possibile delle attività fondamentali per l'organismo. Anche la forma, dalla più infinitesima a quella macroscopica di un organismo, è il risultato dell'ottimizzazione negli anni di evoluzione, per istinto di sopravvivenza.

possibile. Per questo motivo gli esseri viventi sono paragonabili a delle “macchine perfette” ed efficientissime.

In particolare, in natura, così come dovrebbe avvenire in architettura, si ha un significativo risparmio energetico durante lo svolgimento di attività o processi biologici. Per minimizzare l'utilizzo di energia, altro concetto intrinseco dell'ottimizzazione di un organismo, occorre focalizzare l'attenzione su alcuni aspetti delle prestazioni meccaniche dei materiali e della struttura. Per evitare uno sforzo fisico inutile, la natura ottimizza la quantità di materiale da utilizzare durante la crescita e durante lo sviluppo di un organismo, impiegandolo solo dove necessario. Materiale e struttura crescono contemporaneamente all'organismo e a seconda delle sollecitazioni esterne; anche in questo caso la natura sceglie i punti più opportuni per concentrare la materia, laddove sia utile:

alberi e arbusti cambiano l'orientamento del tronco in direzione opposta al vento per resistere alle sollecitazioni orizzontali e concentrano i suoi rami dove l'esposizione al sole è maggiore. Secondo lo stesso principio, un osso può ricomporsi in caso di frattura: tali meccanismi che si innescano a livello cellulare non sono facili da spiegare scientificamente né sono perfettamente conosciuti, tuttavia, è noto che durante l'evoluzione hanno reso l'organismo ottimizzato. Si può quindi dedurre che i materiali biologici sono decisamente *intelligenti*. Ciò che è ben noto a livello cellulare è l'ottimizzazione in termini energetici. Anche in questo caso la ragione risiede nella questione dell'evoluzione della specie.

Una valida ipotesi afferma che gli organismi viventi esistono sulla base di un consumo minimo di energia che viene restaurata attraverso l'alimentazione e la luce solare. Anche a livello cellulare l'energia viene impiegata in maniera ottimizzata per compiere l'ampia quantità di funzioni vitali, un concetto di fondamentale importanza che ha garantito la sopravvivenza e la riproduzione.

Per il principio di minimizzazione dell'energia, legata anche al risparmio di materiale, l'organismo riesce a garantire, per esempio, la massima rigidità per unità di massa alla propria struttura, soprattutto nel caso degli animali. Anche il corpo umano è la prova di una struttura complessa che dimostra la propria efficienza da circa 200.000 anni.

A livello molecolare, adottando tale principio di risparmio energetico, le reazioni chimiche avvengono a temperatura ambiente o comunque non necessitano di temperature estreme; molti materiali biologici con elevate caratteristiche meccaniche, per esempio, possono essere prodotti senza richiedere temperature eccessive. Un'altra caratteristica fondamentale in natura è il principio secondo il quale l'ottimizzazione degli organismi viventi è anche di tipo organizzativo: grazie alla gerarchizzazione degli elementi, a partire da una scala microscopica, si può dire che le strutture tendono ad essere più efficienti, per il fatto che un'ottima organizzazione favorisce la multifunzionalità dell'organismo. Per esempio, la composizione dell'arbusto di un albero facilita sia la funzione strutturale, sia quella per la distribuzione di sostanze nutritive all'intero organismo. Il corpo umano può essere considerato l'emblema della

multifunzionalità, se si pensa alle quantità di processi di natura distinta che deve gestire in contemporanea, come la respirazione, la circolazione sanguigna, il movimento, l'equilibrio, le sensazioni, il ragionamento, il pensiero...

3.4 Materiali naturali e ingegneristici⁴³

I materiali biologici che la natura possiede da oltre 3,8 miliardi di anni, vengono classificati principalmente in minerali, tessuti duri e resistenti, molli e flessibili, alleggeriti, porosi, autoriparanti, idrofobici, adesivi. Le materie prime biologiche disponibili, seppur limitate, offrono la possibilità di generare una varietà di tessuti anche molto diversi tra loro, in grado di svolgere un'ampia quantità di funzioni. Le strutture naturali vengono oggi studiate con un crescente interesse in quanto rappresentano una proficua fonte d'ispirazione per creare nuovi materiali tecnologici.

Durante la preistoria i materiali più utilizzati erano ceramiche, vetri, alcuni materiali compositi e polimeri naturali; in questi ultimi decenni questi due ultimi sono quelli che più rappresentano una forte crescita, oltre per esempio a quelli ceramici ultra-performanti⁴⁴. Come accennato nel precedente paragrafo, considerando i tre elementi dell'ottimizzazione, la scelta dei materiali è sicuramente rilevante in fase progettuale in termini di guadagno di tempi, costi ed energia.

43. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- Pagani R., Chiesa G., Tulliani J. M., *Biomimetica e Architettura. Come la natura domina la tecnologia*, Francoangeli, Milano, 2015
- Luz G.M., Mano J.F., *Biomimetic design of materials and biomaterials inspired by structure of nacre*, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2009
- Fratzl P., Weinkamer R., *Nature's hierarchical materials*, Progress in materials Science, 2007
- Ashby M. F., *Materials and the Environment*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2009
- Bertolini L., Carsana M., *Materiali da costruzione (volume primo). Struttura, proprietà e tecnologie di riproduzione*, CittàStudiEdizioni, Torino, 2010
- Gordon J. E., *Strutture sotto sforzo*, Zanichelli, Bologna, 2005
- Aimar F., *Nuovi materiali per il building: le strutture*, Wolters Kluwer Italia, Milano, 2017
- Gibson L. J., Ashby M. F., *Cellular solid, Structure and properties*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

44. Si tratta di ceramiche conosciute anche come "refrattarie", in grado di resistere a temperature superiori a 2000 °C.

Per molto tempo la conoscenza in merito alle strutture e ai materiali è appartenuta tradizionalmente agli artigiani, ai costruttori, ai progettisti; i tentativi di prevedere il comportamento di determinati materiali in relazione alla propria resistenza meccanica è da sempre stato un compito arduo per l'uomo. Solo agli albori dell'Ottocento, per quanto riguarda il calcolo di grandi strutture in acciaio e ferro, i matematici riuscirono ad ottenere risultati teorici decisamente più soddisfacenti e concreti. Tuttavia i fallimenti furono diversi, per cui alcune previsioni ingegneristiche causarono disastri che passarono immancabilmente alla storia (*cf. par. 3.7*). Grazie agli studi più "accademici" e specializzati a partire dal Novecento, iniziarono i miglioramenti nel campo dell'ingegneria delle strutture, soprattutto grazie ad una proficua collaborazione tra differenti discipline. Tuttavia, l'ingegneria tendeva ad utilizzare metalli come acciaio ed alluminio piuttosto che materiali non altamente contaminanti.

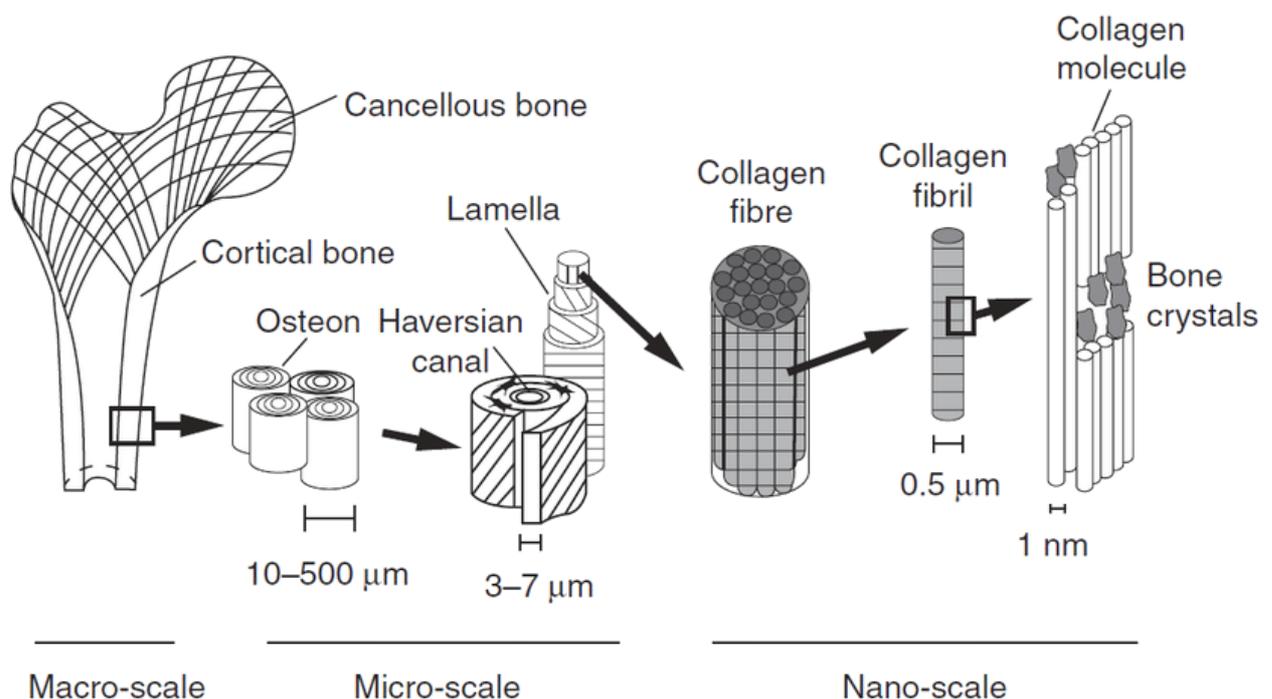
Spesso la formazione era talmente specializzata in un settore che la tendenza era quella di separare la sfera della scienza dei materiali con quella dello studio sulle strutture. Fortunatamente, in questi ultimi tempi si stanno accorciando tali distanze: grazie all'avvento della biomeccanica e ad uno studio più approfondito sui materiali impiegati dalla natura nella creazione di strutture biologiche complesse, in un futuro, ingegneria ed architettura necessiteranno collaborare maggiormente con la sfera della biologia e della chimica.

Durante l'evoluzione, di fatto, la natura ha creato a partire da zero, con la materia a disposizione, un'ampia quantità di materiali adatti per creare organismi efficienti: la struttura di un qualsiasi organismo beneficia delle prestazioni del materiale per ottenere la massima resistenza meccanica - per motivi di difesa, protezione o, in generale, necessità di sopravvivenza -. La pressione evolutiva tuttavia ha fatto sì che i materiali naturali fossero un numero limitato in modo che, nello stesso organismo, "pochi" elementi potessero ricoprire differenti ruoli. La maggior parte dei materiali naturali è costituita da tessuti molli - presente e fondamentale anche nei vegetali -, mentre quelli rigidi apparvero più tardi durante l'evoluzione degli animali. L'ingegneria utilizza invece maggiormente materiali

rigidi, più resistenti alla deformazione di quelli del corpo umano per esempio, i quali lavorano in condizioni di deformazioni elastiche molto maggiori.

I tessuti duri che si trovano in natura sono quelli che più possiedono caratteristiche interessanti di resistenza meccanica e rigidità, per svolgere funzioni di supporto, taglio o protezione. Tale durezza deriva comunemente dalla presenza di minerali nei reticoli di tessuti e proteine, presenti in concentrazioni più abbondanti o meno. Il collagene è un ottimo esempio di come la natura con poco riesca ad ottenere risultati efficienti: la morfologia di tale proteina cambia, adattandosi all'elemento di cui fa parte. Si tratta della proteina strutturale più comune negli organismi viventi, la si ritrova nella struttura di ossa, muscoli, tendini, legamenti e cartilagini, oltre a formare il tessuto connettivo dove crescono e si sviluppano le molteplici cellule di un organismo.

L'osso è un materiale composito contenente minerali a base di idrossiapatite, collagene ed acqua. Una caratteristica fondamentale è che al propagarsi di una comune frattura, aumenta la tenacità ed è difficile che la frattura si propaghi ulteriormente. Tale struttura deve la sua efficienza, oltre che alla propria composizione microscopica, all'organizzazione gerarchica, la quale rende il sistema estremamente tenace di circa tre-cinque ordini di grandezza superiore rispetto a quella dei cristalli di cui è composto (cfr. fig.33).



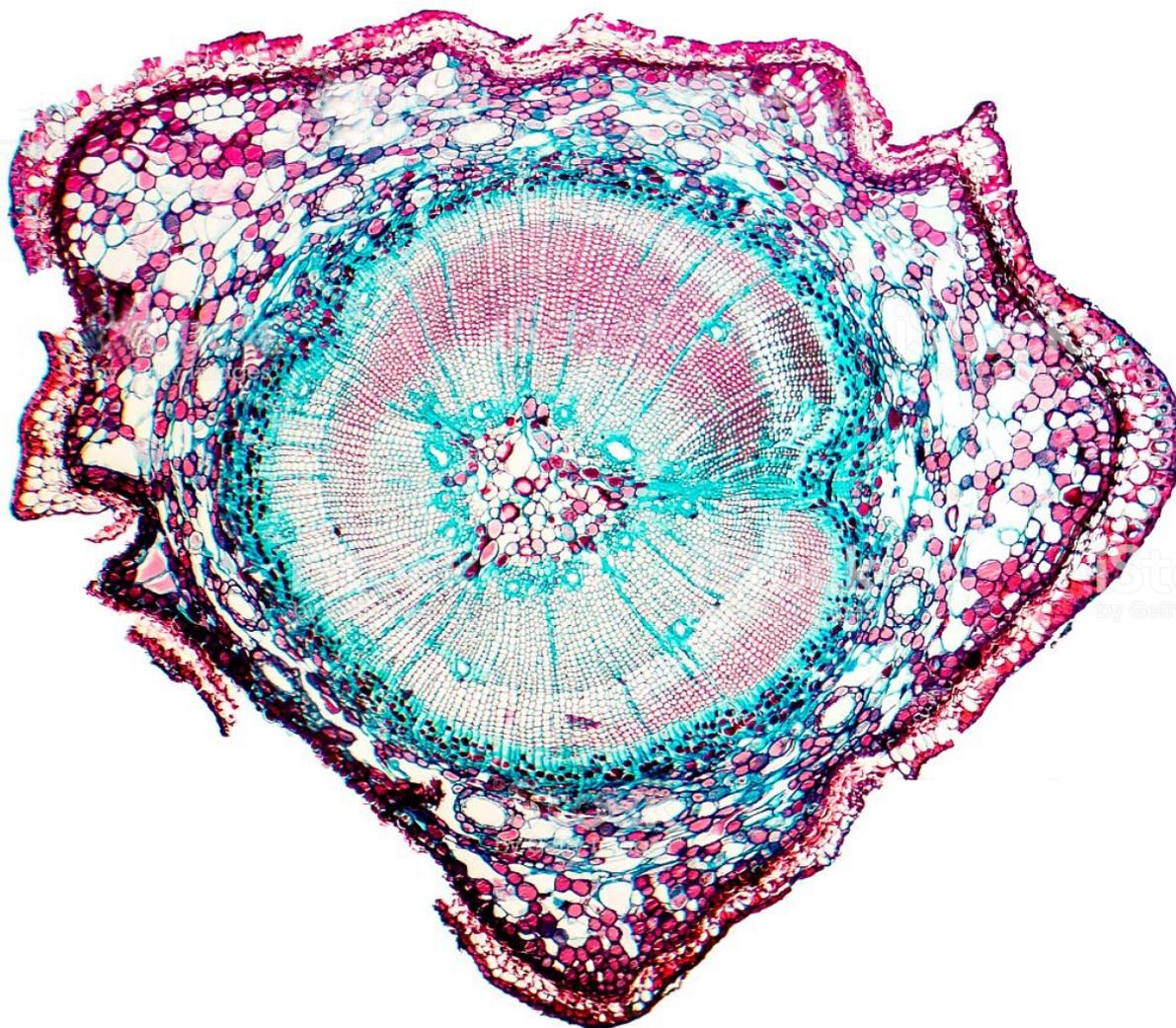
[Fig. 33] Rappresentazione della struttura gerarchica dell'osso secondo tre scale diverse di ingrandimento. Image credit Elsevier©

Nel settore dell'ingegneria l'osso costituisce senza dubbio un chiaro esempio di ottimizzazione ed è stato utilizzato come modello per la creazione di materiali compositi innovativi. Per esempio, il primo modello biomimetico artificiale ispirato alla struttura dell'osso, in forma più semplificata soprattutto per una questione di costi, è stato ideato utilizzando fasci di fibre di vetro unidirezionali e di carbonio. Tramite una serie di test al microscopio, si dimostrò che il nuovo materiale composito biomimetico rappresentava un interessante successo nel campo dell'ingegneria dei materiali: il fatto di riprodurre l'analoga tenacità caratteristici della microstruttura dell'osso umano fa supporre interessanti sviluppi per tale settore (*cf. caso studio 11*).

Altri esempi di materiali biologici duri si ritrovano nel caso degli esoscheletri e sono costituiti da chitina mineralizzata - responsabile della resistenza a deformazione -, secondo una particolare disposizione a diagonale, adatta ad arrestare la propagazione di fessure, garantendo maggior tenacità alla struttura. Tale principio viene impiegato nei materiali compositi cementizi ingegnerizzati (ECC), ovvero delle malte rinforzate dall'aggiunta di fibre polimeriche in grado di evitare fenomeni di rottura incontrollati e soprattutto di auto-ripararsi. In caso di fessure, non superiori ai 50-60 micron, i componenti polimerici formano una fitta rete omogenea per evitare il collasso strutturale e alcune parti cementizie si idratano e occupano tali microfessure.

Le strutture alleggerite presenti in natura invece prevedono una conformazione a celle cave più o meno regolari, una minimizzazione di materiale e peso: osservato al microscopio, il fusto delle piante appare costituito da uno strato esterno solido e resistente che circonda un nucleo leggero e poroso. Ancora, la cellulosa, un polimero che si trova in grandi quantità nelle pareti cellulari delle piante, conferisce resistenza a trazione. In termini ingegneristici tuttavia la porosità è particolarmente difficile da riprodurre, tuttavia, oggi la tecnologia è uno strumento prezioso in questi termini.

Uno dei materiali naturali maggiormente impiegati oggi, utilizzato sin da tempi molto antichi, è il legno, per la sua elevata rigidità e resistenza specifica simile a quella degli acciai. Il componente principale è la cellulosa, organizzata in micro-



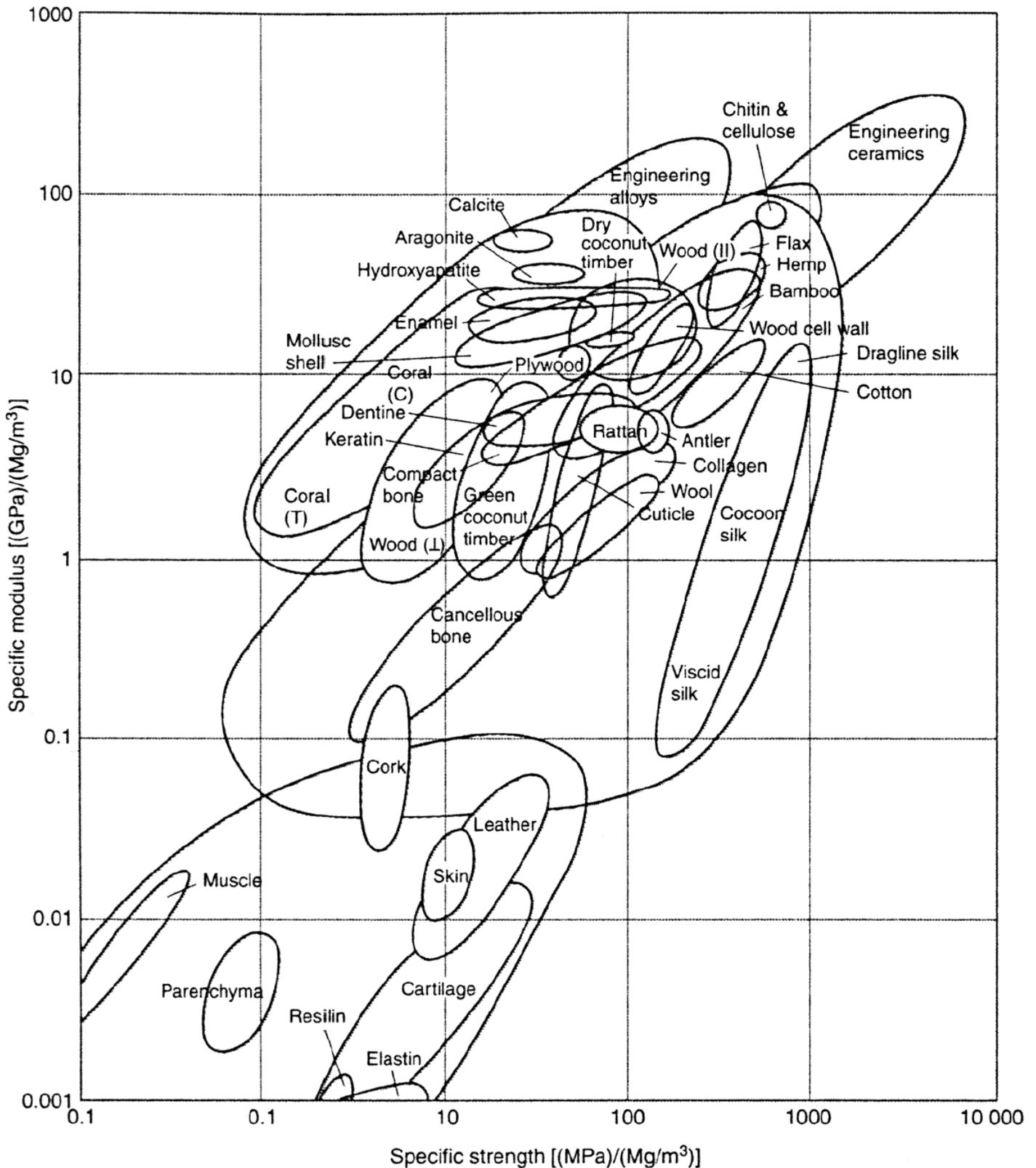
[Fig. 34] Immagine al microscopio della struttura porosa del tronco di pino. La porosità contribuisce anche a bloccare la propagazione di cricche, oltre che a garantire il passaggio delle sostanze vitali per l'albero. Photo credit Dr_Microbe©

fibrille: è la struttura gerarchizzata in ben 4 livelli che conferisce tali caratteristiche meccaniche al legno. Le fibre del legno apportano un'altra caratteristica fondamentale che possiede tale materiale prezioso, ovvero la tenacia a frattura, di tipo anisotropo. Grazie alle sue proprietà vantaggiose è un materiale ampiamente utilizzato nel campo delle costruzioni, oltre al fatto di essere ecologico. La lavorazione del legno infatti non è considerata inquinante, poiché le emissioni di CO_2 prodotte sono molto ridotte, inoltre è al 100% biodegradabile e non prevede alti costi di trasformazione in termini energetici rispetto a quasi tutte le altre materie prime.

Più in generale, per aiutare il progettista in questa ardua scelta alla ricerca del miglior materiale, l'ingegnere inglese Michael Farries Ashby, creò una serie di diagrammi, oggi molto utilizzati. Da questi diagrammi per esempio si può individuare come il legno, in direzione delle fibre, presenti una ottima resistenza alla trazione, mentre in direzione trasversale si comporti meglio a compressione. Ovviamente il risultato ottenuto da tali diagrammi è indicativo e si consiglia sempre una ulteriore valutazione del compromesso di Ashby.

I parametri di cui si tiene conto sono diversi e sono adattabili a seconda delle esigenze del progettista. In figura 35 vengono raggruppate varie categorie di materiali naturali a seconda della resistenza specifica e della elasticità a deformazione specifica. Tale approccio contribuisce a sviluppare una maggior sensibilità nella scelta dei materiali, la quale dev'essere presente sin dagli albori di un progetto e, soprattutto, innesca nella mente del progettista una serie di valutazioni sul comportamento del materiale in determinate caratteristiche. Come si affronterà più avanti infatti (cfr. par. 3.5), nel processo "classico" definito *Design-Thinking*, la scelta dei materiali non influenza profondamente quella ricerca verso il *form-finding* e risulta essere, erroneamente, di secondaria importanza.

Considerando la questione ambientale odierna e i concetti del *Cradle to Cradle*, al momento della scelta dei materiali da impiegare, risulta di fondamentale importanza quindi il fattore ecologico. Nonostante copiare la natura sia molto complesso, fortunatamente si stanno progressivamente accorciando le distanze dal mondo biologico grazie a efficienti metodi di ricerca come potenti microscopi, microtomografi e calcolatori ad alta velocità, facilitando la ricerca di nuovi materiali. In natura i materiali sono straordinariamente efficienti perché soddisfano elevate esigenze meccaniche, chimiche, termiche o elettriche garantendo l'ottimizzazione strutturale anche in risposta alle esigenze vitali e di protezione da organismi o agenti esterni. Anche la rigenerazione di tessuti o estremità è un aspetto fondamentale da non sottovalutare che avvantaggia la sopravvivenza degli organismi viventi. Basandosi sul concetto della bio-



[Fig. 35] Rappresentazione di un tipo di diagramma di Ashby. Vengono riportate diverse classi di materiali biologici, classificati a seconda della resistenza meccanica specifica in ascissa, e il modulo di Young specifico, in ordinata, tutto in rapporto alla densità (Mg/m³).
Fonte: M. F. Ashby, L.J Gibson, U. Wegst, R. Olive.

ispirazione, è importante tener conto che il prodotto di un materiale che si può ottenere oggi artificialmente può risultare molto diverso da quello biologico di partenza, ma l'obiettivo è che risolva i rispettivi problemi strutturali, meccanici, chimici e fisici di cui si ha bisogno.

La nanotecnologia ed i suoi *smart materials* detti anche materiali intelligenti, sono materiali compositi che si sono prodotti e sviluppati a partire dagli anni Novanta. Impiegati in svariati campi come in biomedica, architettura, design e robotica, sono tutt'oggi un bene prezioso. Tali materiali si avvicinano al comportamento biologico; alcuni sono in grado, per esempio, di interagire istantaneamente con l'ambiente esterno. Una importante caratteristica di alcuni materiali artificiali prodotti dall'uomo consiste nella capacità di resistenza al degrado ambientale o nell'autoriparazione, raggiunta tramite l'ispirazione al mondo naturale. La ricerca nel campo dei materiali oggi si dirige soprattutto verso la creazione di biopolimeri innovativi come una valida alternativa a quelli derivanti dal petrolio: dei veri e propri prodotti biocompatibili con caratteristiche spesso superiori a quelli attuali. Un ulteriore fattore che influisce sulla questione ambientale è la relazione tra il materiale scelto e la tipologia di struttura progettata: per esempio, è corretto considerare di scomporre gli elementi in sotto-elementi in modo tale che i materiali possano essere facilmente recuperati, riutilizzati e smaltiti senza provocare danni all'ambiente. Oggi purtroppo è piuttosto comune che molti elementi impiegati nel campo delle costruzioni siano composti da diversi strati di materiali chimici uniti e rigidamente incollati, impedendo il riciclo. Inoltre, seppur il cemento sia largamente utilizzato, in quanto costituito da materiali organici e classificato un materiale sostenibile con ottime proprietà, la sua demolizione, se presenti armature, necessita di un grande dispendio di energia. L'idea del *Cradle to Cradle* (cfr. par. 3.2) parte proprio dal fatto che il riciclo ed il riuso dei materiali dev'essere un fattore da considerare a priori. Tutto ciò costituisce un altro ambizioso obiettivo dell'architettura biomimetica, una vera e propria sfida volta alla ricerca di nuovi impieghi di materiali naturali, potenzialmente infiniti, che possano bilanciare la somma dei totali consumi energetici, con il fattore ecologico.

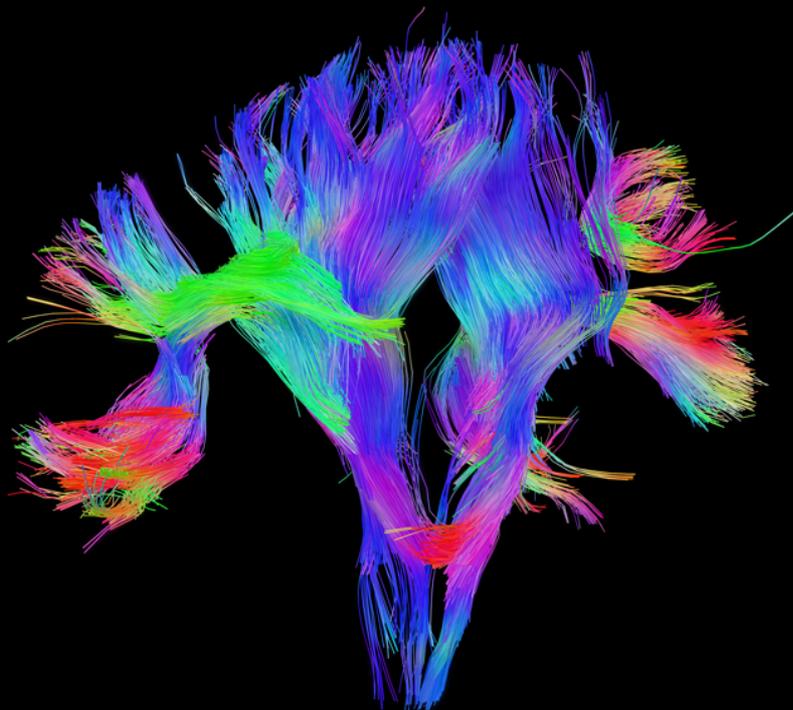
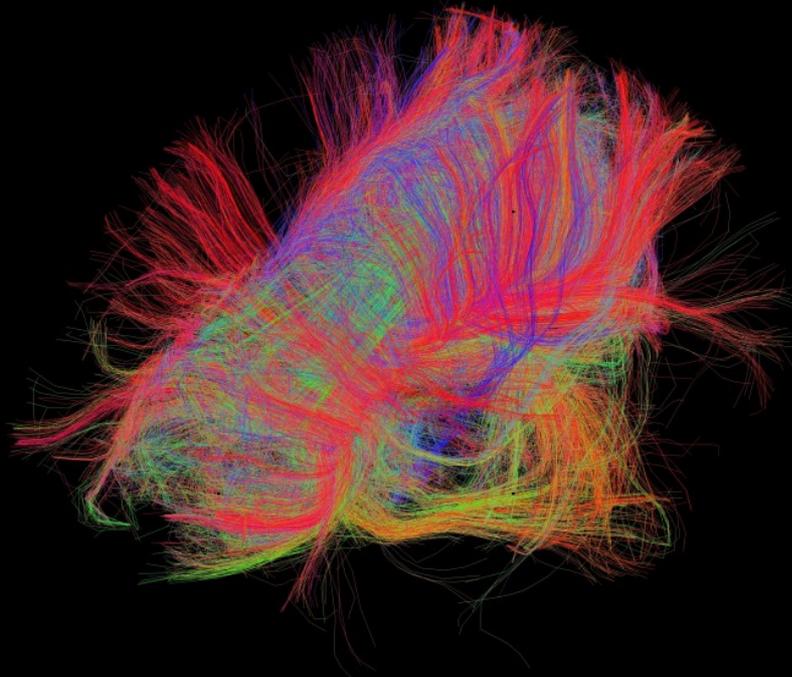
L'efficienza umana come ispirazione⁴⁵

Il corpo umano è un organismo ben specializzato ed organizzato, lavora con la massima efficienza gestendo in contemporanea molteplici nonché complicati processi. Lo si potrebbe, per assurdo, paragonare ad una macchina potenzialmente perfetta, per cui a partire da una scala microscopica a macroscopica, così come ogni organismo esistente in natura, gestisce ogni propria funzione autonomamente, minimizzando tempo e dispendio di energia. La fisiologia e quindi il “funzionamento” del corpo umano è in stretta relazione alla propria struttura, la quale è la responsabile del corretto svolgimento dei processi che avvengono ogni infinitesima frazione di secondo⁴⁶. Così come ogni cellula del nostro corpo è strutturata specificatamente per svolgere determinati processi nel modo più efficiente possibile, o come il flusso sanguigno, che garantisce la distribuzione di sostanze vitali attraverso un'impeccabile e fittissima rete di vasi trasportatori di sezioni e spessori variabili secondo una struttura ottimizzata di tipo frattale; si pensi inoltre ai neuroni, i quali, come avviene in molti altri organismi viventi pluricellulari, si distribuiscono lungo una rete neuronale che comporta processi elettrochimici. Seppur molto complesso, ciò fa del cervello umano il più ammirabile frutto dell'evoluzione, in quanto a capacità di elaborare informazioni e rapidità di risposta agli stimoli. A tal proposito James D. Watson affermò che il cervello è la cosa più complessa che abbiamo scoperto finora nell'universo. Infatti, in solo 1.300-1.500 grammi di tessuto gelatinoso, sono contenute circa 100 miliardi di cellule, i neuroni, ognuna delle quali attua in media 10 mila connessioni con le cellule delle vicinanze.

45. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- Atlante di Istologia, Dipartimento di Medicina Sperimentale dell'Università di Genova, disponibile su www.istologia.unige.it, ultimo accesso 30 Marzo 2019
- Hensel M., Menges A., Weinstock M., *Self-organization and Material Constructions*, Architectural Design Journal AD, Techniques and Technologies in Morphogenetic Design, Wiley Online Library, Marzo/Aprile 2006, ultimo accesso 20 Marzo 2019
- Thompson D. W., *On Growth and Form*, Cambridge University Press, Cambridge, 1917
- Oxman N., *Material-based Design Computation*, PhD, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (USA), 2010
- Gordon J. E., *Strutture sotto sforzo*, Zanichelli, Bologna, 2005
- Rosenfield K., McConnell A., *Escalera Vertebrae*, Plataforma Arquitectura, 22 feb 2013

46. Si pensi solo che i neuroni inviano e ricevono segnali da e verso il cervello ad una velocità superiore a 240 km/h.



Durante la formazione del feto, quindi in solo 8 mesi o poco più, l'organismo produce circa 250 mila neuroni al minuto. Solo 2 o 4 settimane prima della nascita, la produzione neuronale si arresta ed ha inizio una seconda fase per il cervello, che dura tutta la vita: si creano poco a poco nuove connessioni cellulari.

Oltre a tutti questi meccanismi che si innescano necessariamente, il corpo umano deve inoltre gestire la propria risposta alla forza di gravità e alla pressione atmosferica. Al fine di contrastare tali forze agenti su di esso, più in generale, gli organismi viventi pluricellulari, per mantenere la propria forma e rispettare i requisiti di locomozione necessari, sono caratterizzati da un'organizzazione strutturale specifica, ovvero ad endoscheletro⁴⁷ - come nel caso del corpo umano - ed a esoscheletro⁴⁸.

In quanto alla struttura ossea che sostiene e protegge il corpo umano, è assai complessa: un sistema di ben 206 ossa che, oltre a permettere una vasta possibilità di movimenti, garantisce il sostegno all'apparato locomotore. Potenzialmente più resistenti del calcestruzzo, l'osso rappresenta un'ottimizzazione di peso e di conseguenza di materiale, dovuta alla porosità della struttura, presente in percentuali distinte a seconda della lunghezza dell'osso, costituita da collagene e proteine. La schiuma che costituisce la parte spugnosa, o trabecolare, che apporta leggerezza ed elasticità, è in grado di cambiare la propria densità in risposta a sforzi ripetuti durante l'attività fisica. Tale struttura è paragonabile a quella di un nido d'ape, in cui le lamelle si dispongono in modo tale da sopportare al meglio le sollecitazioni meccaniche a cui è sottoposto. La parte più esterna è costituita da un tessuto compatto non poroso, il quale conferisce resistenza meccanica, rigidità e durezza: si tratta di una componente minerale presente in una percentuale in genere dal 50 al 70%. Tuttavia l'osso guadagna maggior forza e flessibilità soprattutto dal modo in cui stratifica in modo intelligente i suoi elementi strutturali. Quel composto di calcio-collagene forma fibre lunghe e resistenti che si intrecciano e infine si irradiano verso l'esterno costituendo cilindri concentrici chiamati osteoni, che si combinano con canali interconnessi per creare lo strato liscio e bianco dell'osso. Oltre alla gerarchia strutturale e ad una composizione resistente, le ossa possono evolversi con il corpo: possedendo una naturale

[Fig.36]

A sinistra, alcune rappresentazioni dell'attività delle fibre nervose del cervello umano. Photo credit ©USC Mark and Mary Stevens Neuroimaging and Informatics Institute of Southern California.

47. La struttura ad endoscheletro si sviluppa all'interno, come avviene nel corpo umano. Tale struttura può crescere facilmente, poiché non sono imposti alcuni limiti di forma.

48. Struttura ad Esoscheletro: si sviluppa al di fuori del corpo stesso, come per esempio nel caso dei molluschi. Possiedono il vantaggio di essere più resistenti, perché sono maggiormente esposte, inoltre fungono da protezione.

tendenza a crescere lungo la direzione delle sollecitazioni, crescendo le ossa si rafforzano e si induriscono nella direzione del peso mentre si creano vuoti in luoghi dove non c'è bisogno di resistenza. Ciò significa che la sua anatomia riflette le tensioni comuni che incontra: il tessuto osseo cresce solo dove sarà funzionale. Di conseguenza, per esempio, due ossa del femore per esempio nel corpo di una persona normale hanno forme, dimensioni e angoli leggermente diversi. L'osso è per questi motivi definito un tessuto attivo, ovvero in costante cambiamento. Col passare del tempo o semplicemente quando è a riposo prolungato, l'osso diventa meno denso, i pori all'interno dell'osso diventano più grandi. Ciò è ancora la conferma che la natura crea forme e strutture tenendo conto dei requisiti strutturali, nonché energetici, dell'organismo. Grazie alla sua efficiente composizione e struttura di fatto la resistenza e l'elasticità dell'osso sono ben maggiori di quanto si possa pensare. Si stima che la forza tensile dell'osso è compresa tra i 700 e i 1'400 kg/cm², mentre quella in compressione è tra i 1'400 e 2'100 kg/cm². Questi valori sono paragonabili a quelli dell'alluminio e del cosiddetto acciaio "dolce", con la differenza che l'osso è molto più leggero ed anche molto più elastico di questi materiali (cfr fig.37).

NATURA VS INGEGNERIA

MATERIALE	PESO SPECIFICO ρ	LAVORO DI FRATTURA SPECIFICO W/ρ [J/m ²]	RESISTENZA A COMPRESSIONE SPECIFICA σ/ρ [MN/m ²]	MODULO DI YOUNG σ/ρ [MN/m ²]
Osso	2.0	1'000	60	75
Acciaio dolce	7.8	10'000-100'000	50	40

[Fig. 37] Proprietà approssimative a parità di peso dell'osso confrontato con l'acciaio dolce. L'osso risulta possedere maggior elasticità e, in quanto al valore di lavoro a frattura, risulta particolarmente vulnerabile: ciò è la conseguenza della formazione di fessure negli osteoni, che indeboliscono la propria resistenza meccanica. Tuttavia le ossa non necessitano di valori molto alti come l'acciaio poiché sono ben protette dai tessuti. Fonte: Gordon J. E., Strutture sotto sforzo, Zanichelli, Bologna, 2005.

Ebbene, viste le proprietà eccezionali delle ossa, sono molteplici i progetti che soprattutto nel mondo dell'architettura e del design si sono ispirate a tali conformazioni e ne hanno colto interessanti caratteristiche. Un esempio accattivante è il *Vertebrae Staircase* dell'architetto canadese Andrew McConnell, una scala a chiocciola atipica che riprende la conformazione della spina dorsale della balenottera azzurra. Secondo l'artista, il progetto "non è semplicemente la mimica della forma organica, ma un'esplorazione nella struttura modellante". Il progetto richiede infatti una dettagliata analisi delle caratteristiche delle vertebre, in particolare della zona lombare della balena. Studiando le proprietà autoportanti di tale struttura e gli incastri tra vertebre, l'architetto giunse ad un'ottimizzazione ed una standardizzazione dell'elemento composta da 28 elementi che reinterpretano le vertebre tutte uguali, ad eccezione di quelle posizionate agli estremi della scala. La superficie esterna è composta da diverse stratificazioni di fibra composita durevole e resistente, mentre gli elementi di rinforzo della struttura della parte interna che congiungono le vertebre sono perni in acciaio. La parte interna del corrimano e i lati di ogni

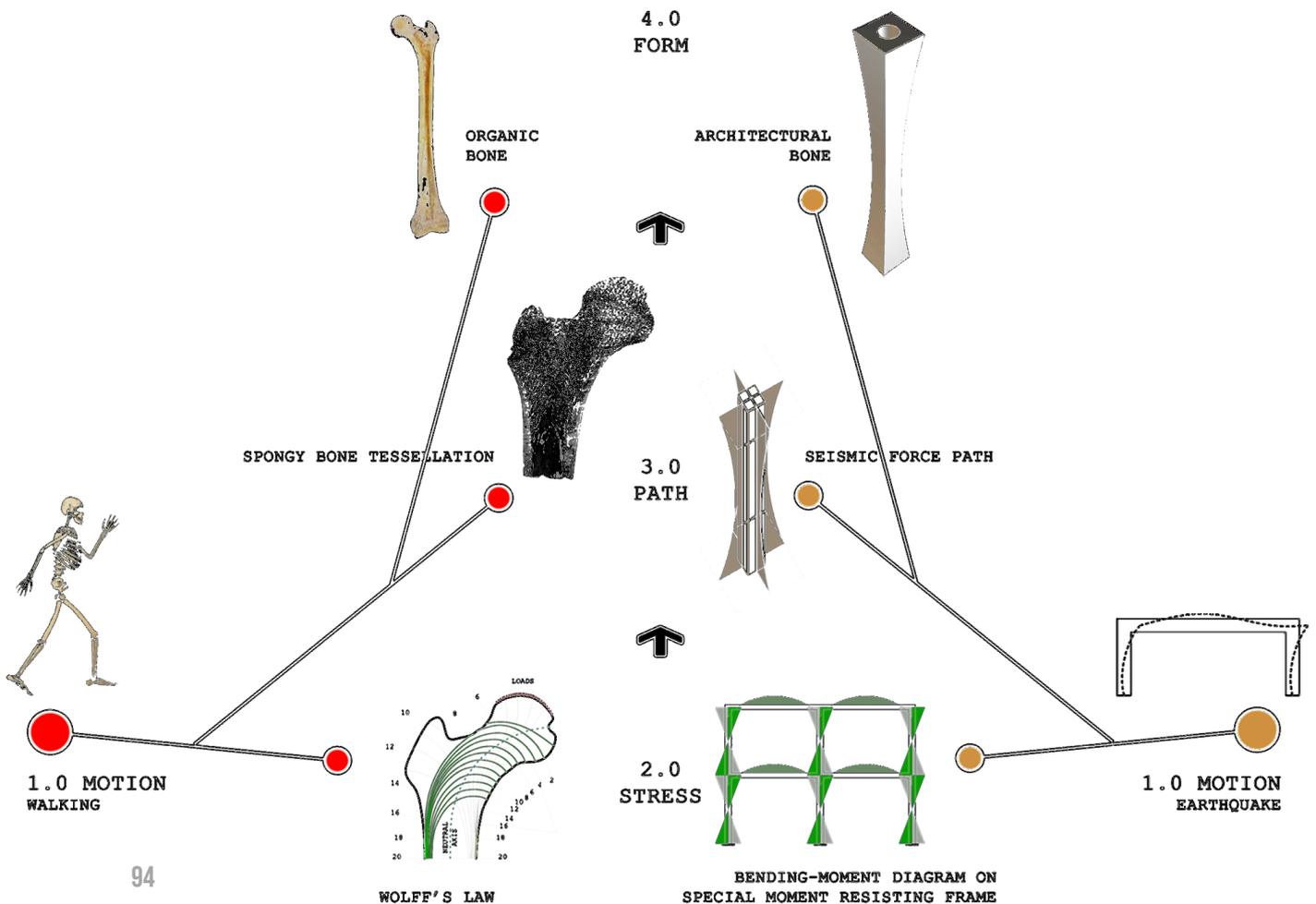
[Fig. 38] *Vertebrae Staircase*, Andrew McConnell. Photo credit Andrew McConnell©



scalino inoltre sono attraversati all'interno da una spirale strutturale continua, rinforzati da una spuma resistente e una rete di barre di acciaio. Tali elementi insieme alle due grandi piastre di acciaio poste alle estremità permettono alla scala di resistere con successo alle forze rotazionali e torsionali derivanti dalla forma a spirale e dagli scalini a sbalzo.

L'azienda portoricana Tectonica Architecture ha ulteriormente amplificato le ricerche sulla struttura ossea umana, applicandole nella sismica degli edifici. L'osso umano che più si dimostra particolarmente forte, il femore, viene in questo caso impiegato nella progettazione di telai in cemento armato. La tecnologia del telaio, chiamata STICK.S, emula la cavità del femore umano, fornendo la massima resistenza con il 30% in meno di materiale rispetto alle strutture edilizie convenzionali.

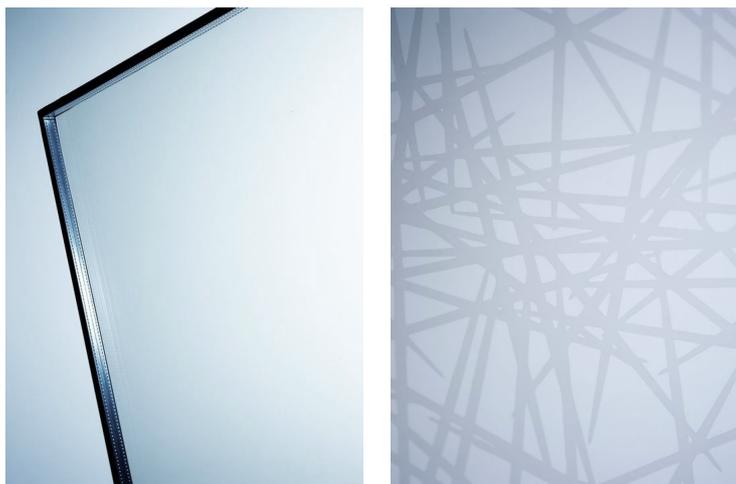
[Fig. 39] Schema del progetto STIK.S di Tectonica Architecture. Fonte: Wilfredo Méndez Vázquez.



CASI STUDIO | Materiali naturali e ingegneristici**Un vetro innovativo**⁴⁹

L'azienda tedesca Arnold Glas ha sviluppato in collaborazione con American Bird Conservancy un tipo di vetro decisamente innovativo, conosciuto come *Ornilux*. L'esigenza nacque dalla risoluzione di un problema assai comune, relativo agli urti degli uccelli soprattutto nelle aree in cui la trasparenza è una priorità assoluta. I ricercatori stimano che centinaia di milioni di uccelli vengono uccisi ogni anno in Nord America a causa di collisioni con il vetro. *Ornilux* offre una soluzione unica, mantenendo la trasparenza estetica del vetro e allo stesso tempo creando marcatori visivi che avvertono gli uccelli dell'avvicinamento ad un ostacolo. Nello specifico si tratta di un vetro efficiente energeticamente che possiede uno speciale rivestimento che, riflettendo i raggi UV, anche se non apprezzabile dall'occhio umano, rende ben visibile agli uccelli la propria presenza (cfr. fig 40). L'ispirazione biomimetica deriva da una particolare specie di ragno, il quale ha messo a punto una tecnica efficiente che gli permette di catturare più facilmente un numero maggiore di prede grazie alla conformazione della propria tela. Il ragno, infatti, produce una ragnatela in grado di riflettere i raggi UV; gli insetti più piccoli ne rimangono intrappolati poiché non sono in grado di riconoscere la presenza di tale ostacolo, al contrario, animali più grandi, tra cui gli uccelli, riescono ad individuarlo. Il ragno così riesce a cibarsi più facilmente e la tela, grazie a tale protezione dagli animali più grandi, non risulta molto vulnerabile.

[Fig. 40] *Ornilux* è disponibile come vetro stratificato o come strato unico unito ad un vetro basso emissivo o a rivestimenti a controllo solare. A sinistra, la rappresentazione di come è visibile all'occhio umano, a destra, una rielaborazione di come lo vedrebbero gli uccelli. Fonte: Arnold Glas.



49. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:
- www.ornilux.com

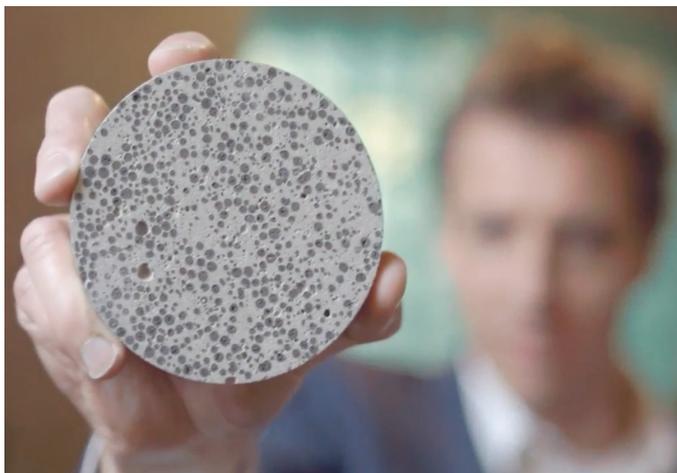
Calcestruzzi “vivi”⁵⁰

Una delle capacità più spettacolari ed invidiabili della natura è quella della rigenerazione, o meglio, dell'autoriparazione di parti danneggiate: in molti casi le cellule, una volta danneggiata una parte dell'organismo, sono in grado di riprodurre altre simili. L'uomo possiede analoghe caratteristiche soprattutto nella pelle ma anche nelle ossa, nella lingua e nel fegato. Alcune specie animali come il cetriolo di mare, adotta tale tecnica per difendersi da predatori, espellendo alcune parti, per poi rigenerarle in seguito.

Nel campo della scienza dei materiali, si sono ottenute analoghe prestazioni attraverso la progettazione di calcestruzzi autoriparanti, in grado di minimizzarne danneggiamento e deterioramento. Essendo uno dei materiali più utilizzati in campo edile, la manutenzione è un problema all'ordine del giorno. Tramite lo studio di fibre cave, additivi minerali, batteri, microcapsule e materiali nanotecnologici applicati al calcestruzzo, si è giunti a risultati

sorprendenti. Grazie all'utilizzo di fibre, per esempio, un calcestruzzo acquisisce maggior duttilità e può agire sulle microfratture, limitando la propagazione: il materiale è infatti in grado di occupare le fessure idratandosi a contatto con l'aria.

La ricerca del professore Hendrik Marius Jonkers dell'università olandese di Delft, si concluse con la creazione di un



[Fig. 41] Calcestruzzo autoriparante proposto dal team dell'università di Delft guidato dal professore Hendrik Marius Jonkers. Le microcapsule contenenti i batteri sono ben visibili (in nero).

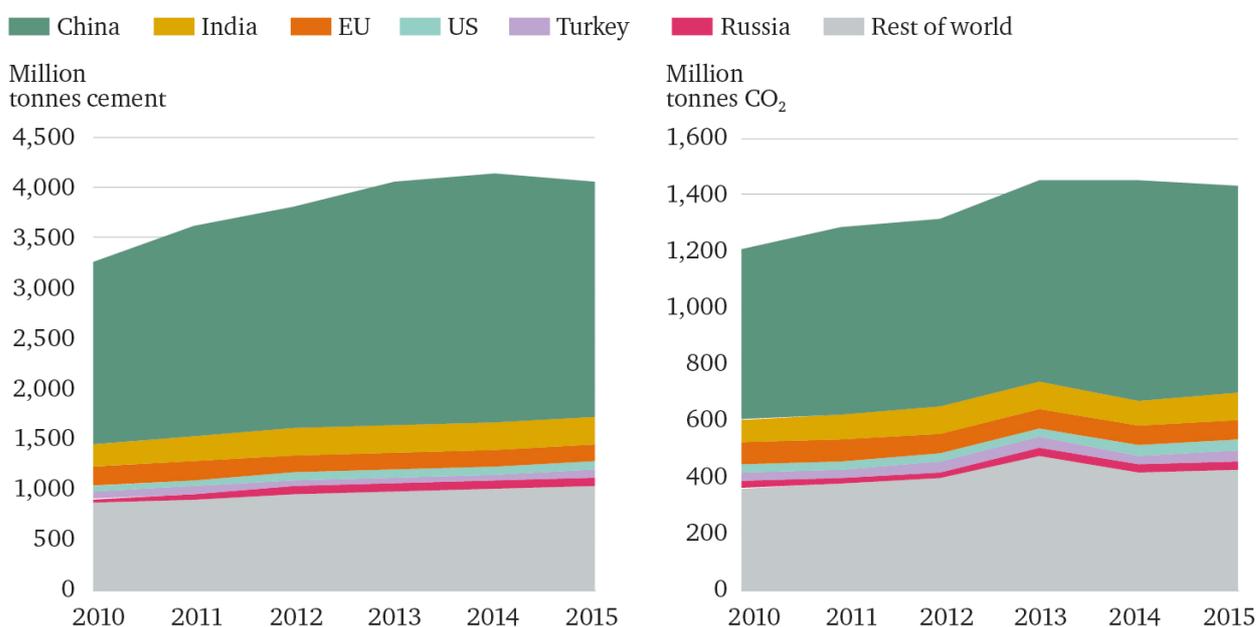
50. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- Pagani R., Chiesa G., Tulliani J. M., *Biomimetica e Architettura. Come la natura domina la tecnologia*, Francoangeli, Milano, 2015
- www.asknature.org
- <http://www.worldwatch.org/>
- <https://www.epo.org/mobile/european-inventor/finalists/2015/jonkers.html>

calcestruzzo biologico con proprietà autoriparanti, grazie all'aggiunta di batteri al momento della creazione della miscela. Non nocivi per l'uomo, possono sopravvivere fino a 200 anni grazie alle speciali microcapsule biodegradabili che li contengono; in caso di fessure, questi batteri sono in grado di produrre calcare, che conferisce al calcestruzzo le proprietà "curative" richieste. Al formarsi di una fessura, l'acqua che riesce ad entrare nel calcestruzzo e fa sì che i batteri si attivino: a loro volta, assumendo le sostanze nutrienti contenute nelle microcapsule, si riproducono in quantità e infine riparano il conglomerato.

Tale scoperta ha una valenza non solo economica, in termini di costi di manutenzione e produzione, ma anche ecologica. Il processo industriale di produzione del calcestruzzo è uno dei più inquinanti: una ricerca del Worldwatch Institute dimostra che di fatto le emissioni di gas serra derivanti da tale produzione sono responsabili del cambiamento climatico.

Se consideriamo che quasi il 70% delle infrastrutture in Europa prevede l'utilizzo di calcestruzzo e che dal 7 al 12% delle emissioni annue di CO₂ totali sono legate proprio alla produzione del conglomerato cementizio, la ricerca di Jonkers potrebbe essere una delle vie verso la diminuzione delle emissioni di anidride carbonica.



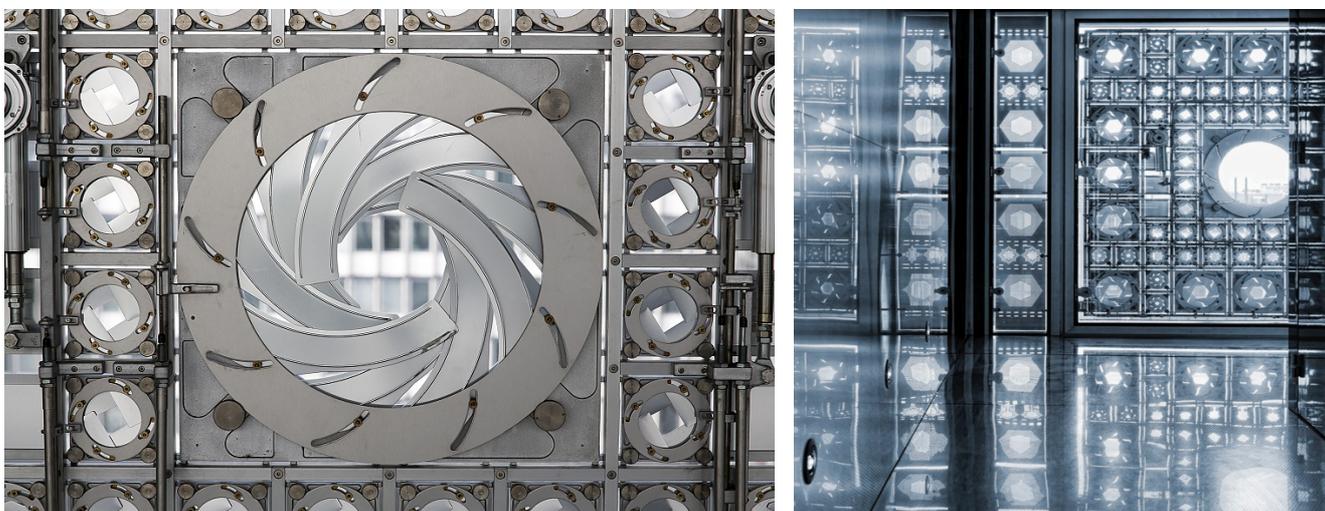
[Fig. 42] Studio condotto da nel 2016 dalla Chatham House sulla quantità di cemento prodotto dal 2010 tal 2015 a livello mondiale (a destra) e le relative emissioni di CO₂ (a sinistra). La Cina si conferma il maggior produttore e responsabile di più del 50% delle emissioni totali. Fonte: <https://www.carbonbrief.org/>

CASI STUDIO | Materiali naturali e ingegneristici

Materiali con memoria di forma⁵¹

I materiali con memoria di forma potranno costituire in futuro un grande supporto sia all'architettura che all'ingegneria. Si tratta in genere di un particolare insieme di leghe generalmente metalliche caratterizzate da due proprietà fondamentali, la superelasticità e la capacità di recuperare la propria forma, in seguito a degli stimoli esterni. In questi ultimi anni in architettura si stanno riscoprendo le potenzialità di questi materiali, per esempio per regolare il passaggio del flusso solare in relazione al cambio di temperatura, nel caso delle cosiddette *responsive skins*: le potenzialità future di tali dispositivi sono decisamente incoraggianti e contribuiscono ad una maggior controllabilità delle condizioni interne garantendo un risparmio in termini energetici, ancor più se non associati a dispositivi elettrici. L'esempio parigino dell'Institut du Monde Arabe

[Fig. 43] Facciata dell'Institut du Monde Arabe, Jean Nouvel,, Parigi, 1981-1987. Photo credits Darrell Godliman



di Jean Nouvel, nonostante i problemi derivanti dalla propria sofisticatezza, sicuramente fu un progetto ambizioso che, già a suo tempo, puntava ad evidenziare quella necessità di

51. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- <https://www.iacblog.com/>

- <http://www.liftarchitects.com/>

cambiamento del concetto di facciata: un complesso architettonico può guadagnare in termini di consumi energetici se l'architetto prevede una regolazione autonoma del sistema di ombreggiamento progettato. Grazie ai materiali con memoria di forma è quindi possibile semplificare i meccanismi di controllo della facciata per ottenere controllo in linea con quello già proposto negli anni '80 dall'architetto francese.

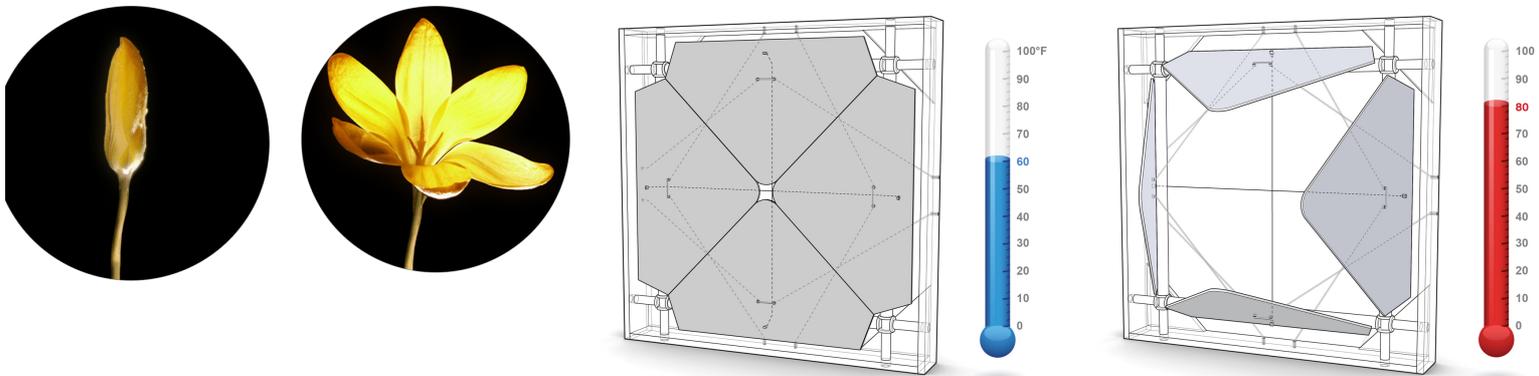
Un caso decisamente interessante è stato presentato presso il centro di architettura avanzata di Barcellona (IAAC) da quattro studenti, i quali hanno ideato una struttura composta da polimeri a memoria di forma. L'auspicio del team è appunto quello di poter applicare tale struttura, ancora un prototipo, per conferire agli edifici del futuro un aspetto vivo, dinamico ed adattabile, come accade negli organismi biologici. La geometria proposta presenta dei pannelli triangolari a cui è stato applicato un particolare polimero, in grado di piegarsi notevolmente a partire da circa 60°C e recuperare la sua forma ed irrigidirsi all'abbassamento della temperatura. Quando un materiale SMA - *Shape Memory Alloy* - si trova a temperatura più bassa, ovvero della fase di martensite, può essere facilmente deformabile da piegamenti, stiramenti, torsioni, flessioni o distorsioni. Tuttavia, quando la lega viene riscaldata la sua conformazione atomica passa alla fase austenitica, per cui recupera la sua forma originale.



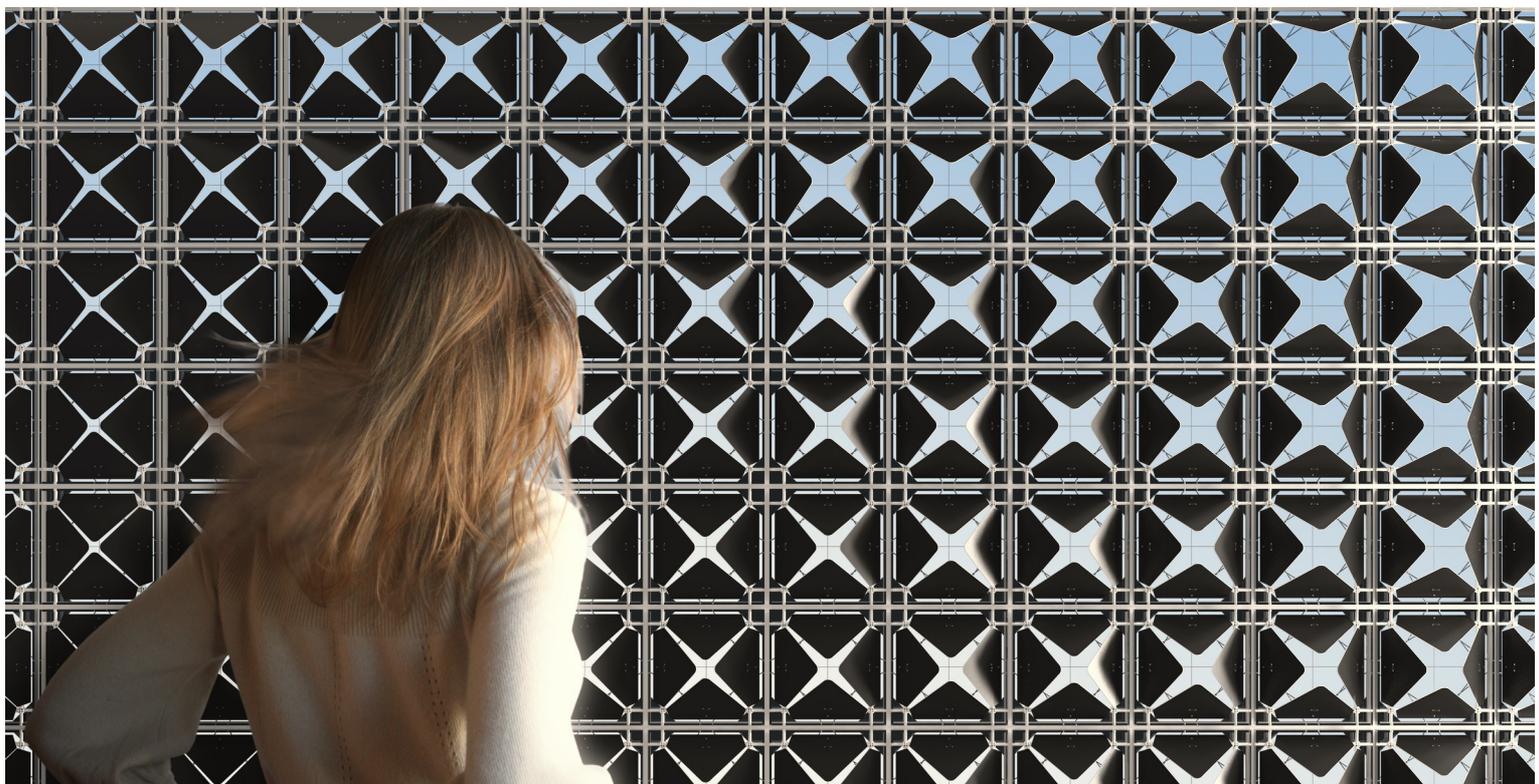
[Fig. 44] Proposta progettuale del programma *Translated Geometries*, IAAC. Il disegno a tassellatura triangolare ha favorito una grande flessibilità e ha reso la struttura più pieghevole. L'ispirazione deriva dall'artista di origami Ron Resch. Photo credits IAAC©

Il team americano di LIFT Architects ha ideato Air Flow, un dispositivo che si ispira al comportamento di un fiore, in grado di rispondere alle variazioni di temperatura dell'ambiente circostante. Basandosi sui principi naturali, l'Air Flow è perfettamente funzionante senza alcun tipo di elettricità. Il fiore di crocco giallo reagisce a uno spostamento di temperatura dal freddo al caldo, aprendosi e chiudendosi, in base all'estensione di due strati differenti di cellule, uno interno ed uno esterno: a basse temperature, lo strato esterno si espande più velocemente

rispetto a quello interno, quindi i petali provocano la chiusura del fiore, mentre in un ambiente più caldo, al contrario la crescita cellulare dello strato interno fa sì che il fiore si apra (cfr. fig. 45). Gli architetti hanno dimostrato che un comportamento analogo si poteva ottenere per una facciata, utilizzando un filo di metallo con memoria di forma, fabbricato su misura, collegato a dei pannelli. In questo caso la facciata presenta un sistema a doppia pelle, ponendo verso il lato esterno quella con memoria di forma. In inverno i dispositivi componenti la facciata esteriore si chiudono, permettendo alla camera d'aria a tenuta stagna, compresa tra i due strati di pareti, di riscaldarsi; in estate, il materiale con memoria di forma si contrae e innesca l'apertura dei pannelli triangolari, garantendo così un sistema innovativo di ventilazione come sistema di raffrescamento interno.



[Fig. 45] In alto a sinistra il fiore di crocco giallo in apertura e chiusura a seconda del calore solare; in alto a destra il funzionamento dei pannelli Air-Flow proposti da LIFT Architects. In basso si può apprezzare l'effetto finale della facciata completata. Photo credits LIFT Architects©



3.5 La geometria ottimizzata della natura⁵²

Nel corso della storia furono moltissimi gli studiosi che si interrogarono sull'origine e sulla geometria delle forme naturali. Uno dei primi "biomatematici" della storia fu D'Arcy Wentworth Thompson⁵³, il quale affermò che l'influenza della fisica e della meccanica sullo sviluppo di forma e struttura degli organismi erano stati sottovalutati fino ad allora. Il biologo tentò di descrivere nel suo libro *On growth and form* il legame tra moltissime forme naturali e la matematica. L'opera divenne senza dubbio una referenza importante per architetti, ingegneri e biologi, tuttavia non riscosse il successo auspicato. Thompson di fatto si schierò contro i sostenitori del Darwinismo: dichiarò appunto che l'evoluzione della specie non era la responsabile del cambiamento delle strutture biologiche. Secondo il biologo scozzese erano le leggi fisiche e la meccanica, infatti, le determinanti fondamentali della forma e della struttura di un organismo vivente, considerando quindi secondarie tali teorie evolutive ottocentesche. La forma di un oggetto era dunque analoga a quella del diagramma di forze che lo definivano. Come oggi sappiamo, la geometria delle strutture naturali viene fortemente influenzata sia dalle leggi fisiche - proprio come affermava Thompson -, ma soprattutto, dipende fortemente dalle esigenze necessarie per vivere, per una questione inevitabile di sviluppo ottimale e di sopravvivenza della specie. Durante i secoli di evoluzione infatti, gli organismi viventi hanno ottenuto poco a poco un'ottimizzazione della forma, tramite un processo di modificazione della

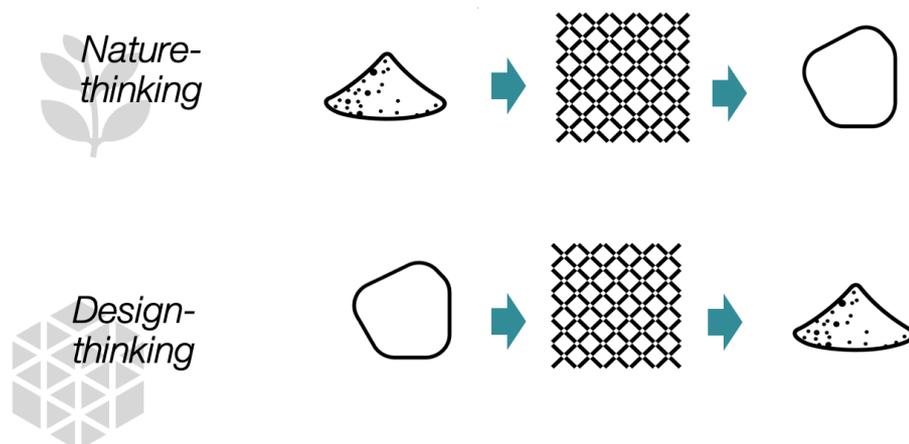
52. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- Skinner S., *Geometría Sagrada*, Gaia Ediciones, Madrid, 2007
- Graziotti A., *Le cupole geodetiche*, Simmetria Edizioni, Roma, 2012
- Brebbia C. A., *Design and Nature III: Comparing Design in Nature with Science and Engineering*, Wessex Institute of Technology, Southampton, 2006
- Thompson D. W., *On growth and form*, Cambridge University Press, Cambridge, 1917
- Gruber P., *Biomimetics in architecture: architecture of life and buildings*, SpringerWienNewYork, Mörlenbach, 2011
- <https://asknature.org/strategy/spiral-fibers-strengthen-tree-trunk/#.XJOyFURKh0s>

53. D'Arcy Wentworth Thompson (1860 – 1948) fu un matematico e biologo scozzese.

propria geometria. Inoltre, per garantire il corretto svolgimento di determinate funzioni, molti organismi tendono ad alleggerire il più possibile la propria struttura.

Generalmente, in natura, il materiale si distribuisce in modo eterogeneo per adattarsi alle prestazioni strutturali e, tale eterogeneità, è resa possibile grazie all'integrazione tra forma, struttura e materiale. Nel caso della formazione di ossa, tessuti cellulari, minerali o tronchi di alberi ed arbusti, si può notare un preciso comportamento che segue la natura nella definizione della forma. La strategia della natura in molti casi è la seguente: a partire da uno o più materiali presenti in natura, tramite legami chimici che si instaurano tra gli atomi in relazione ai materiali di cui è composto, si genera una struttura regolare o irregolare, la quale apporta una forma "macroscopica" ben specifica all'organismo in questione. Il principio generale è che contrariamente ad un approccio a priori alla forma tipico della progettazione classica, in Natura la sequenza di progettazione *forma-struttura-materiale* è tipicamente invertita (cfr. fig. 46).



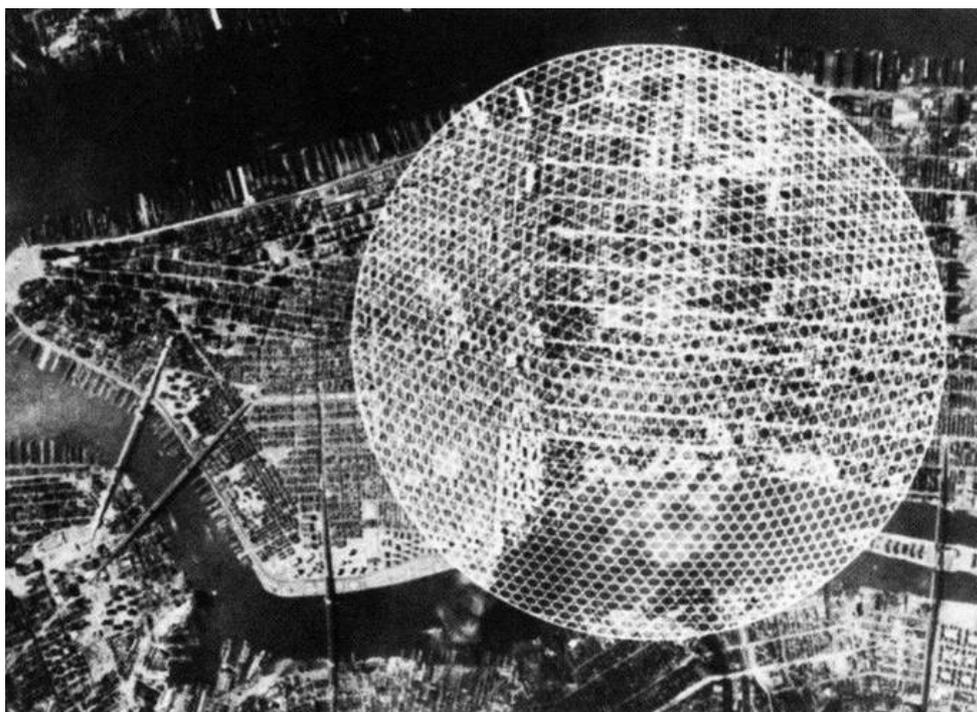
[Fig. 46] Rappresentazione a confronto del Nature-thinking ed il suo inverso approccio tradizionale del Design-thinking, nel quale la forma è la determinante del progetto a priori.

Come dare priorità al materiale rispetto alla forma nei processi di generazione e rappresentazione del design scelto, come avviene nel caso del *Nature-Thinking*? L'immagine che si associa all'architetto-designer come *form-giver* ha dominato per secoli tale professione. Questa considerazione indica che generalmente, nella maggior parte dei casi, le soluzioni strutturali vengono affrontate a posteriori, al momento di soddisfare tutti i requisiti necessari del complesso architettonico, in relazione alla forma desiderata prestabilita. In quest'ottica, la scelta del materiale viene influenzata dalla struttura, oltre che dal sistema costruttivo scelto. Ciò non toglie che spesso per la creazione di grandi infrastrutture, ponti e grattacieli si ha un ulteriore capovolgimento del processo, ovvero si segue la linea del *structure first*, la quale sostiene che sono le scelte strutturali ad influenzare la forma e i materiali in alcuni casi, vengono considerati come una caratteristica della forma stessa.

Il processo del *Nature-Thinking* così descritto, forse un po' rigido e generalizzato, tuttavia può giustificare l'origine di solo alcune forme presenti in natura, mentre non si può applicare un criterio così lineare per spiegare quella di molte altre. Questa affermazione inoltre non deve creare confusione o fraintendimenti in termini di biomimesi. Seguire un processo inverso (*Design-Thinking*) all'approccio della natura durante l'intera fase di progettazione, non significa non rispettare criteri biomimetici: tale percorso si può intraprendere indipendentemente dall'approccio progettuale.

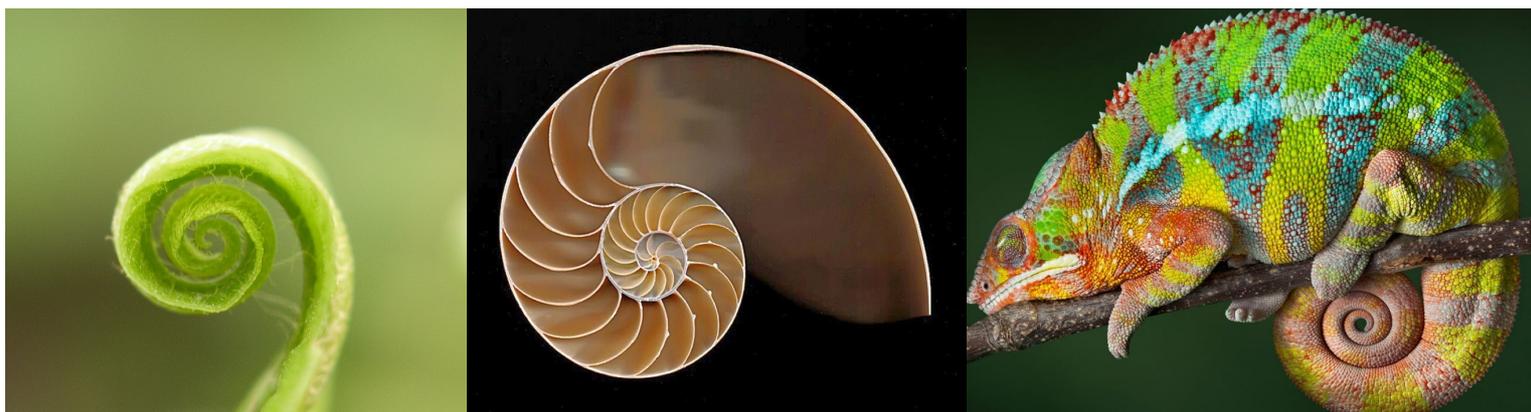
Alcune forme naturali si "giustificano" secondo altri criteri, per esempio, soffermandosi in particolare sul processo di crescita e sviluppo di determinati organismi. Si osserva che, in alcuni casi, è presente una progressione ordinata e organizzata. Ciò si osserva nel *nautilus* (cfr. fig. 48), nelle piante o nei tronchi degli alberi, in cui sono ben visibili i segni della crescita, l'andamento, secondo un ritmo ben preciso, giustificabile in termini di efficienza. Altre forme naturali che identificano la propria efficienza nella forma sono le forme sferiche, come ad esempio le bolle, le quali raffigurano la geometria tridimensionale che più ottimizza la quantità di materiale necessario, sfruttando la maggiore quantità di volume possibile.

Ispirandosi a questo concetto, oltre che alle strutture naturali ordinate dei cristalli, il celebre architetto americano Buckminster Fuller coniò il termine *cupola geodetica*, progettando una delle strutture autoportanti più efficienti dal punto di vista costruttivo. Infatti questa struttura, concettualmente molto semplice, interessa superfici a terra molto estese e prevede l'uso di elementi modulari indeformabili, di dimensioni notevolmente ridotte rispetto a quelli impiegati



[Fig. 47] *The Domed City*, Buckminster Fuller, 1960. Il progetto di una “città-cupola”, prevedeva che i grattacieli di Manhattan venissero ricoperti da un'enorme cupola trasparente larga 3 Km e alta uno e mezzo. Il progetto, tuttavia utopistico, avrebbe ripagato i costi della cupola grazie ai risparmi energetici ricavati in soli dieci anni. Fuller voleva infatti racchiudere il centro di Manhattan in un clima controllato. Fonte: <https://archpaper.com/>

secondo metodi tradizionali: si tratta di una suddivisione in triangoli tutti simili tra loro, che possono essere raggruppati in pentagoni o esagoni. La sua efficacia statica deriva dal fatto che la struttura scarica gli sforzi di compressione su elementi di tensione, ed è inoltre caratterizzata da una spiccata simmetria in tutte le direzioni. La cupola geodetica è l'unica struttura che all'aumentare delle sue dimensioni, ottimizza la sua resistenza, senza necessità alcuna di supporti interni come pilastri o colonne. Anche dal punto di vista ambientale, le cupole geodetiche offrono grandissimi vantaggi in termini di risparmi energetici.



[Fig. 48] A sinistra la foglia di felce in fase di crescita (<https://www.davidnorget.com/faq/>). Al centro la magnifica conchiglia *nautilus*. Si notino le camere, delimitate da setti trasversali, le quali crescono rispettando perfettamente le proporzioni (<https://www.basicknowledge101.com/subjects/math.html>). A destra l'immagine di un camaleonte e la sua coda con forma di spirale (<https://wpmisc.com/wallpaper-441115>)

Una curva con proprietà affascinanti è la catenaria - particolarmente utilizzato, come si vedrà in seguito (*caso studio 15*) nei capolavori modernisti dell'architetto catalano Antoni Gaudí -, una curva risultante dalla disposizione "spontanea" di un oggetto per gravità.

Un'altra forma naturale abbastanza ricorrente nel mondo dell'architettura è la spirale; come dimostra la natura delle conchiglie, seppur caratterizzate da una superficie piuttosto sottile, tuttavia, grazie alle curvature di cui sono dotate, sia *locali* che *globali*⁵⁴ sono molto resistenti meccanicamente. Come è ben noto, infatti, le strutture con forma maggiormente ottimizzata sono quelle che possiedono curvatura; definite come una magnifica immagine della vita, ne esistono vari tipi - piane, tridimensionali, geometriche, rettangolari, logaritmiche...-, tuttavia ciò che hanno in comune è il processo di espansione e crescita. Si nota che le spirali logaritmiche si sviluppano secondo un ritmo geometrico: i raggi che si possono tracciare partendo dal centro fino a un

54. La curvatura può essere di tipo "locale", quando interessa una zona limitata della struttura pur potendo essere ripetuta, come accade per le lamiere ondulate. Oppure si definisce "globale" quando è una e si estende per tutta la superficie, come accade per esempio nelle volte o nelle cupole. Una struttura dotata di entrambe queste tipologie di curvatura, si dimostra essere estremamente resistente meccanicamente.

qualsiasi punto della spirale, formano una progressione geometrica. Questo tipo di spirale rappresenta l'unica curva che non altera la propria forma al crescere. In natura si trovano sotto forma di conchiglie, corna di animali, foglie, DNA, tornado, galassie... Molte strutture a spirale seguono la spirale di Fibonacci, ovvero quella curva che rispetta la omonima progressione, considerabile come l'approssimazione della spirale aurea. Nel 1753 il botanico scozzese Robert Simpson osservò che tale successione raffigurava la formula della crescita di moltissime piante, in particolare nel numero delle foglie e dei petali. Un dato curioso è che la quantità di petali di una pianta non arriva mai al 144, un numero che rappresenta un limite ricorrente della successione di Fibonacci in natura.

Nel caso delle corna di animali, la spirale possiede caratteristiche simili a una molla, in quanto è in grado di assorbire e attutire i colpi, sicuramente un vantaggio durante uno scontro con altri animali. Il DNA, scoperta solo nel 1953 da James Watson e Francis Crick, è anch'essa relazionata con la spirale: in questo caso la doppia elica risulta una disposizione migliore rispetto ad una lineare per il fatto di poter minimizzare l'energia e gli spazi nella distribuzione delle proteine e perché possano interagire nel modo più efficiente possibile.

Nel mondo animale, le api sono riconosciute abili ottimizzatrici per la loro abilità di creare una struttura piana perfettamente suddivisibile in celle esagonali uguali, ottimizzando il materiale a disposizione e lo spazio, senza creare vuoti né sovrapposizioni⁵⁵; l'esagono è inoltre quel poligono che racchiude una data superficie con il minore perimetro possibile.

Altri animali invece hanno sperimentato l'efficienza dell'ottimizzazione strutturale su sé stessi, come l'istrice, il riccio, caratterizzati da strutture a guscio cilindrico nelle loro spine: ciò significa che durante la crescita hanno sviluppato una determinata resistenza strutturale nonostante possiedano un rivestimento esterno relativamente sottile di un materiale quasi totalmente denso, supportato

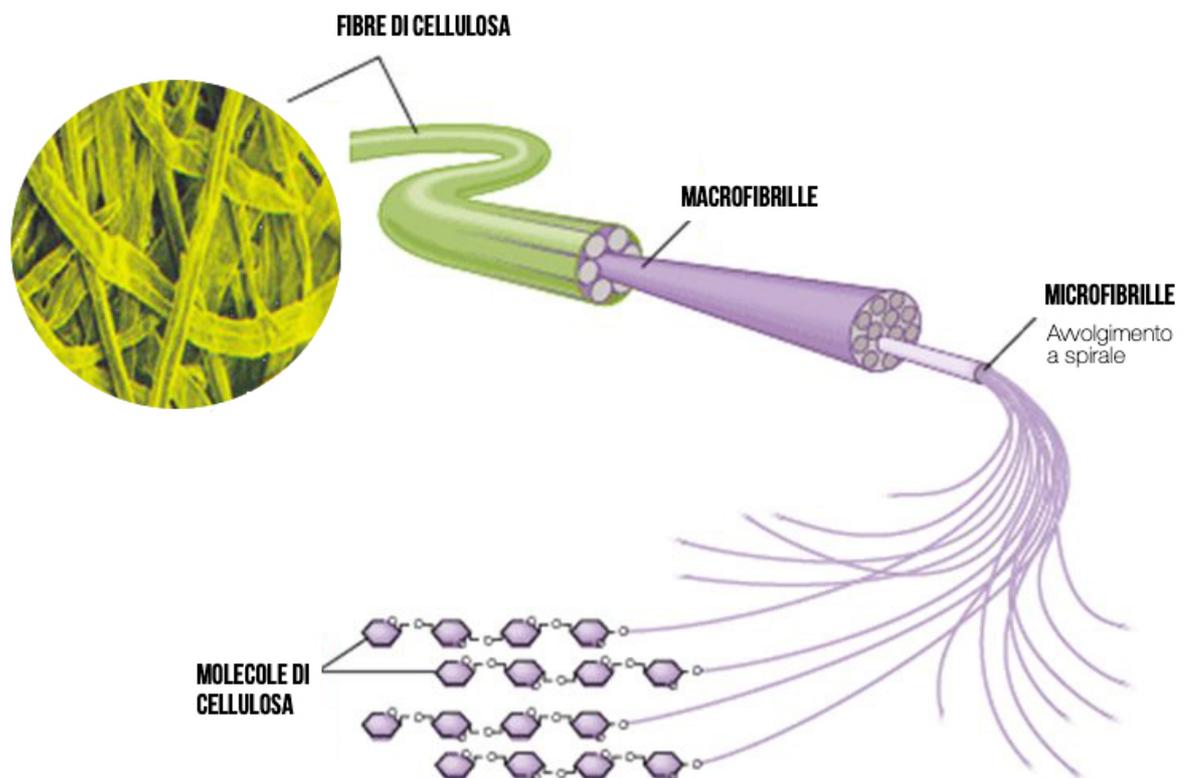
55. Il fenomeno in questione prende nome di tassellatura: le celle regolari dei vespai permettono di comporre superfici uniformi senza che si creino spazi vuoti tra un esagono e l'altro. La tassellatura è un fenomeno che si verifica anche con altri tipi di forme geometriche più regolari o meno.

da un nucleo cellulare di bassa densità e siano soggette ad una combinazione di compressione e flessione.

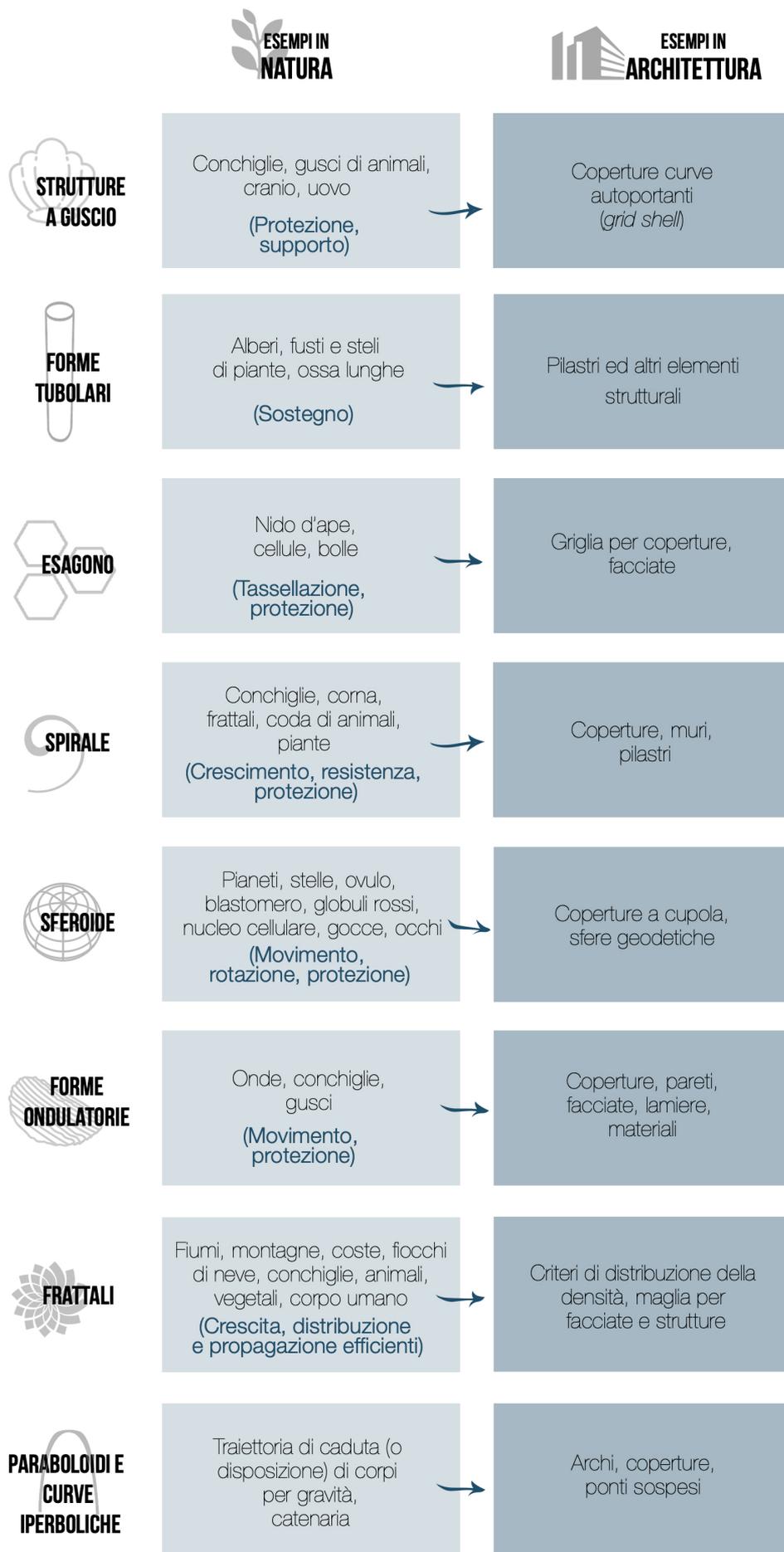
Anche nel mondo vegetale, le strutture tubolari sono frutto di un'ottimizzazione della forma e della struttura raggiunta durante il corso dell'evoluzione naturale, come accade negli steli delle piante o nei tronchi di alberi e arbusti. In generale le piante sono accumulatori di energia solare in grado di usufruire dell'acqua per garantire il raffreddamento, raggiungono l'indipendenza nutriziva grazie ai gas atmosferici e ad alcuni composti minerali e, in quanto all'organizzazione della propria struttura, occupano lo spazio sviluppando al massimo la superficie e minimizzando il volume. Inoltre, è evidente che oltre a garantire l'efficienza meccanica secondo le proprie esigenze, la propria struttura assume una tale configurazione per facilitare, per prima cosa, le funzioni vitali per l'organismo. Una pigna femminile di pino, per esempio, oltre a incorporare in generale le qualità di una struttura frattale, possiede delle cavità al di sotto delle squame che fanno sì che si incrementino le correnti d'aria, presumibilmente carica di polline - il seme maschile -, verso i coni femminili, e così, aumentino le possibilità di riproduzione dell'organismo.

La natura, quindi, possiede una capacità di reagire alle sollecitazioni esterne e risolve coscientemente e corregge nel tempo la forma, mettendo alla prova i materiali che più ha a disposizione. Un caso interessante è quello degli alberi, che rappresentano un elevato senso di adattamento, sia per finalità meccaniche che biologiche: i tronchi sono in grado di adattare la propria forma ad esigenze strutturali, climatiche e biofisiche, grazie anche alle ottime qualità di resistenza ed elasticità che rendono il legno uno dei principali materiali da costruzione. Per esempio tende a modificare l'inclinazione del proprio tronco per contrastare forti correnti d'aria o per usufruire una maggior esposizione al sole. Se invece un corpo esterno esercitasse una pressione costante in un punto del tronco, l'albero sarebbe in grado di adattare la propria crescita e di conseguenza ne modificherebbe la forma. Dove invece vi sono danneggiamenti o buchi, il tronco aumenta la propria concentrazione di materiale, risultando quindi più spesso e ampio. Diversi studi sulla struttura del legno vista al microscopio hanno

dimostrato che la struttura della parete cellulare influisce sulle caratteristiche meccaniche e fisiche del legno: la densità della materia, così come altri fattori, tra cui l'inclinazione delle microfibrille di cellulosa, determinano le caratteristiche di stabilità dimensionale ed in parte a quelle meccaniche (cfr. fig. 49). Tronchi, rami e fusti di alcuni alberi, in particolare il pino silvestre e l'abete rosso, seguono un modello di crescita a spirale proprio per contrastare le forze del vento. Gli studiosi hanno dimostrato che la disposizione a spirale delle microfibrille infatti è più resistente alla rottura rispetto ad una configurazione più rettilinea: avendo più elasticità, resiste maggiormente alla deformazione. La spirale fa sì che avvenga un trasferimento delle forze di compressione e tensione, equalizzando così le sollecitazioni uniformemente.



[Fig. 49] La struttura microscopica del legno a partire dalla cellulosa. Photo credit Lara Maistrello©



[Fig. 50] Il rapporto tra le principali forme presenti in natura e la conseguente correlazione in architettura.

3.6 *Structure first*: i padri dell'ottimizzazione strutturale⁵⁶

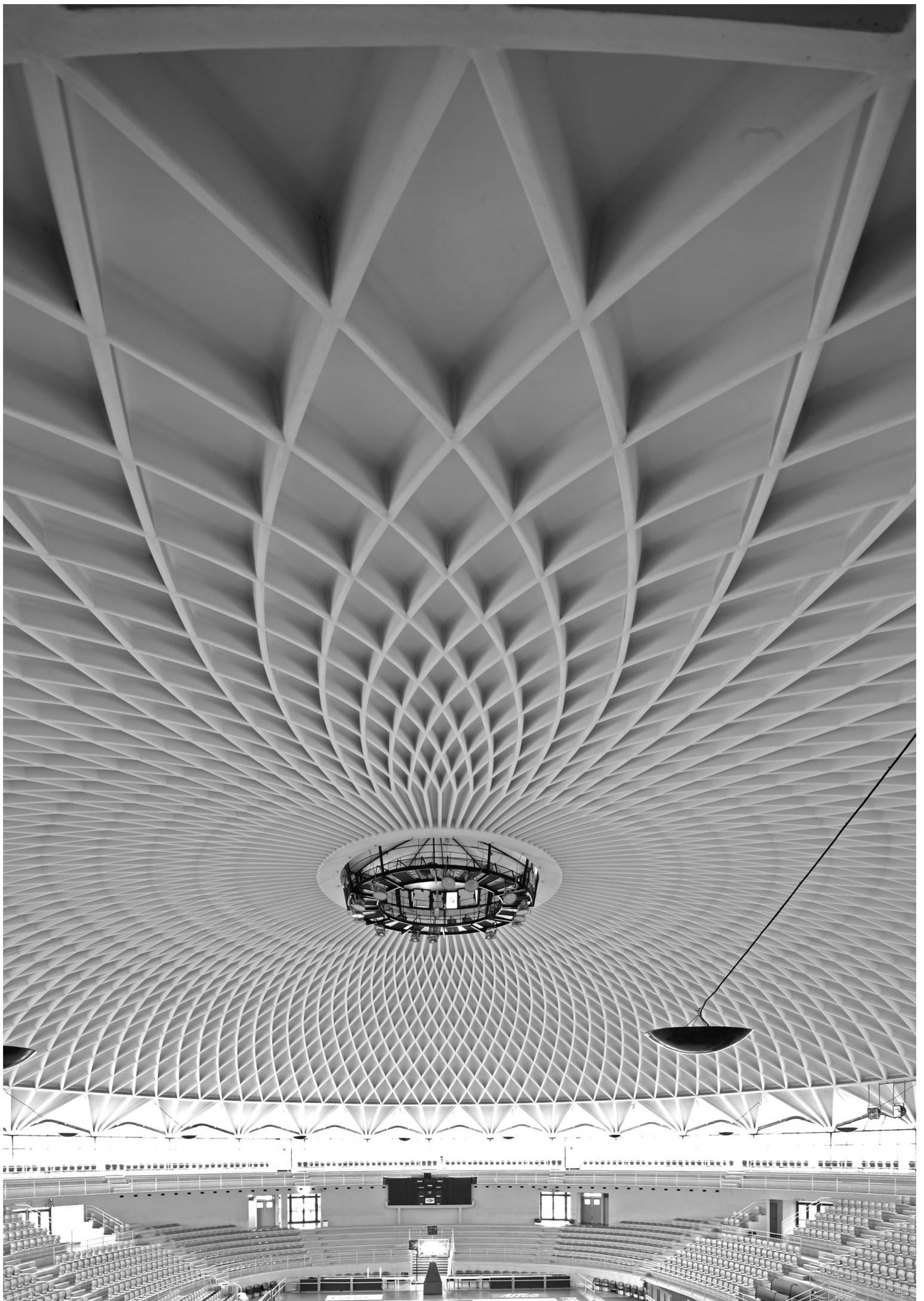
Numerosi architetti ed ingegneri, già a partire dagli anni Cinquanta, contribuirono alla ricerca dell'ottimizzazione strutturale ispirata ai principi del mondo naturale. Si pensi anche al contesto storico: è a partire dagli anni del dopoguerra che si trasmise inevitabilmente quella voglia di innovare il mondo della progettazione che stimolò moltissimi ingegneri nel mondo. Fu il caso dei primi strutturisti che, nonostante le differenze culturali, condividevano l'idea per cui nel campo della costruzione era necessario un nuovo approccio metodologico che si ispirasse ai principi perfezionati dalla natura. In quegli anni si cominciarono ad approfondire gli studi strutturali che imitassero il comportamento delle strutture presenti in natura come steli di piante, scheletri, conchiglie o figure geometriche regolari come sfere, triangoli, esagoni, ripetuti in modulo per creare maglie ben resistenti. Fu il momento degli italiani Pier Luigi Nervi, Riccardo Morandi, Sergio Musmeci, del francese Robert Le Ricolais; in Spagna presero piede Eduardo Torroja e Felix Candela, a Sydney il lavoro dell'architetto danese Jørn Utzon sancì quel legame tra architettura e natura e ancora, partì dagli Stati Uniti una ricerca ingegneristica non da poco con Buckminster Fuller ed Eero Saarinen.

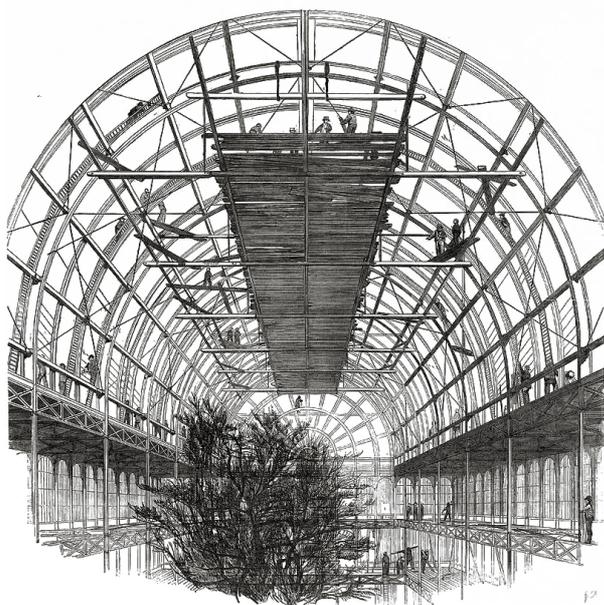
[Fig. 51] A

destra, particolare delle nervature interne della copertura del Palazzetto dello sport di Nervi.
Fonte: <https://www.architectural-review.com/>

56. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

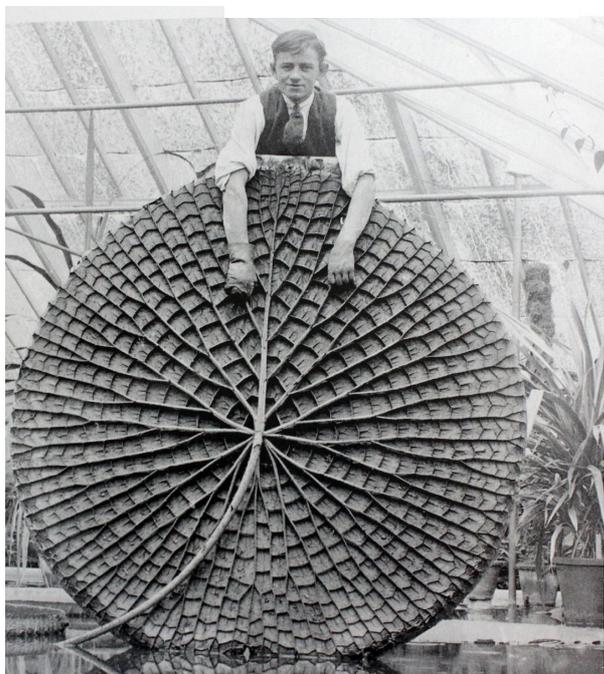
- Manfredini A., *Questioni di progettazione architettonica*, Alinea, Firenze, 2000
- Tedeschi A., *AAD. Algorithms-aided Design*, Le Penseur, Potenza, 2014
- Gruber P., *Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings*, SpringerWienNewYork, 2011
- Aymar F., *Le tensostrutture di Frei Otto: la copertura dell'Olympiastadio di Monaco*
- Torroja E., *La concezione strutturale*, Città Studi, Milano, 1995
- Winston A., *Frei Otto: a life in projects*, Dezeen, Marzo 2015





[Fig. 53] Un disegno dell'English School durante la costruzione del Crystal Palace di Paxton, la cui facciata si ispira probabilmente alla foglia della Victoria Amazonica (in basso).

[Fig. 52] Foglia dell'Amazonia. Foto tratta da Delamotte's Crystal Palace: A Victorian Pleasure Dome Revealed by Ian Leith.



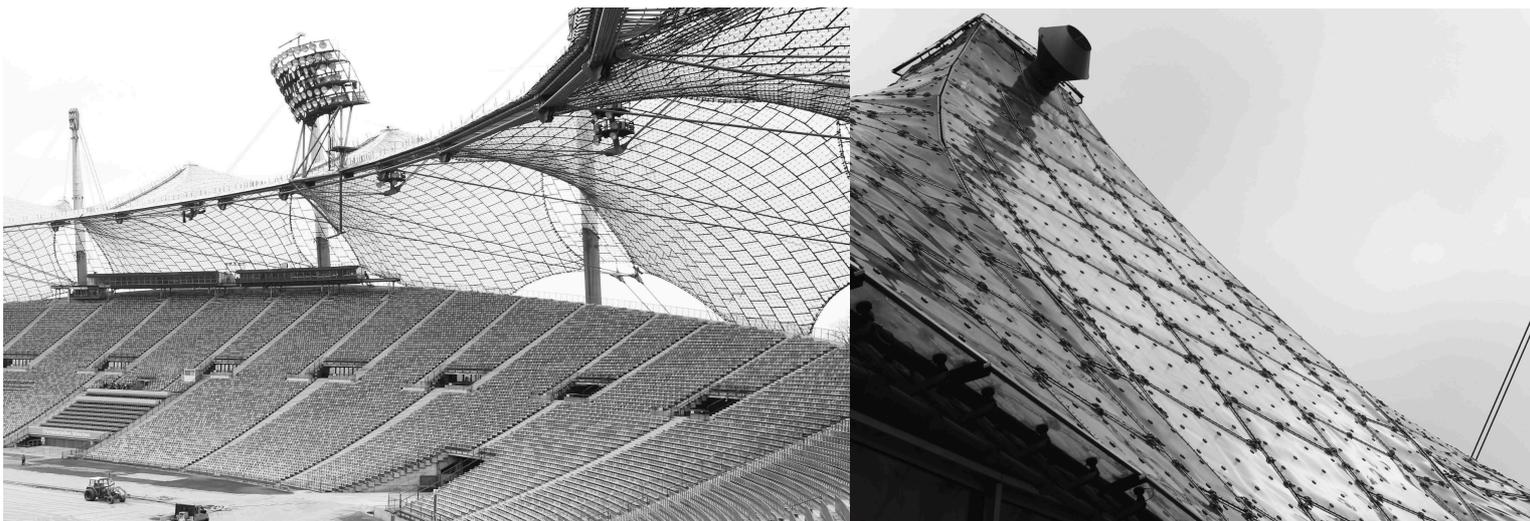
Tutte le opere di Pier Luigi Nervi furono progettate basandosi su molteplici geometrie ottimizzate della natura, a seconda delle funzioni strutturali richieste.

All'ingegnere lombardo si devono importanti conoscenze e sperimentazioni sulle costruzioni in cemento armato e alla prefabbricazione strutturale; Nervi brevettò il ferrocemento nell'aprile del 1943, prendendo spunto dal *ferciment* del francese Joseph-Louis Lambot, impiegato a metà ottocento nella costruzione di imbarcazioni. Tale materiale era diverso dal tradizionale calcestruzzo armato per il fatto che le armature di metallo erano per lo più formate da fasci di fili di ferro di un diametro molto ridotto, circa 0,5-1,5. Pier Luigi Nervi si dedicò all'architettura dei grandi spazi come stadi, torri, sale e senza dubbio, la sua opera maestra è il Palazzetto dello Sport di Roma, terminato nel 1957 in collaborazione con Vitellozzi. La cupola circolare, con un diametro di circa 60 metri, è sorretta da 36 cavalletti radiali inclinati secondo la linea di tangenza sul bordo della cupola ed è formata da ben 1620 pezzi prefabbricati. Le nervature della cupola contribuiscono ad alleggerire la struttura e determinano la distribuzione degli sforzi di tensione sulla superficie; non è ben noto il metodo di Nervi per strutturare esattamente la geometria della forma. Si riscontra tuttavia una tale similitudine con la copertura del transetto del Crystal

Palace di Paxton, appartenente a ben un secolo prima, anch'esso ispirato alle nervature di una pianta, in questo caso alla foglia dell'Amazzonia. Le nervature del Palazzetto (*cf. fig. 51*), responsabili della riduzione dei carichi trasversali, vengono irrigidite dallo strato esterno del guscio a esse collegato. Riconducibili a quell'andamento frattale a spirale della corolla di un girasole, analogamente alla copertura degli Hangar di Orvieto e Orbetello, rispettivamente del '35 e del '40, trasmettono sinuosità e leggerezza all'intero complesso. Considerando che questo progetto appartiene agli anni cinquanta, si può intuire la grandiosità di quest'opera, oltre alla precisione con cui Nervi calcolò singolarmente e manualmente ogni elemento.

I telai in cemento armato a due cerniere dello Stadio Flaminio, ennesimo capolavoro di Nervi, o ancora, i pilastri a sagoma variabile del viadotto di corso Francia per le Olimpiadi romane del 1960, fecero rapidamente il giro del mondo, rinnovando l'architettura del cemento. Così come gli esperimenti di Frei Otto, che, sempre relativi all'alleggerimento delle strutture, rivoluzionò il campo delle tensostrutture. Il successo dell'ingegnere tedesco sfociò nel capolavoro emblematico dell'Olympiapark di Monaco del 1972, un progetto di riqualificazione di una zona che soffrì i bombardamenti della seconda guerra mondiale in seguito bonificata. Senza dimenticare le precedenti Olimpiadi

[Fig. 54] La copertura dell'Olympiapark di Monaco si presenta come un radicale paesaggio artificiale. Fluendo attraverso una tensostruttura sospesa, intenta imitare i rilievi delle Alpi svizzere. Costituita da leggere membrane iperboliche (a destra), funge da collegamento tra gli edifici simbolo di tale complesso, quali il Natatorium, la palestra e l'imponente stadio principale (a sinistra), da 80.000 posti a sedere. Photo credits Antonio Martín Corchero/Flickr©.



svoltesi a Berlino nell'estate del 1936, il team costituito anche da Günther Behnisch, Jörg Schlaich e Günther Grzimek, valutò l'idea di dare una seconda opportunità al paese per risollevarsi da un periodo buio e rinascere dal punto di vista economico e sociale la Germania. Il progetto si pose l'obiettivo di esporre al mondo una struttura degna di essere contemporanea, contrapposta a quella classicista del precedente Stadio Olimpico di Berlino di Albert Speer.

Il metodo progettuale di Otto fu in generale decisamente innovativo, poiché prevedeva la sperimentazione su modelli di tensostrutture a differenti scale, utilizzando lamine di sapone. L'accuratezza e la precisione delle sue tecniche gli permisero di coprire grandi luci tramite strutture relativamente leggere, studiando i comportamenti fisici della materia soggetta a sollecitazioni. Otto dimostrò inoltre la propria sintonia con le forme naturali non solo tramite le proprie opere ingegneristiche: dedicò molti anni alla ricerca di principi razionali, sull'equilibrio tra scienza, tecnica e natura, poiché come scrisse nelle sue teorie, sia l'uomo, così come la tecnica, sono parti integranti della natura. Fu Otto a coniare l'espressione "struttura portante naturale", per indicare che ad ogni progetto appartiene solo una soluzione costruttiva minima, che al tempo stesso, va adattata dal punto di vista estetico. Fu nel 1975 ad essere il primo a sperimentare le coperture autoportanti a *gridshell*⁵⁷ con la Multihalle di Mannheim, la più grande al mondo, di forma insolita per l'epoca, costituita da un reticolo complesso e flessibile in legno che copriva un'ampia luce. Tali strutture si denominano resistenti per forma, proprio per il fatto che se il materiale utilizzato possiede una determinata flessibilità, viene vincolato ad estremità fisse seguendo una specifica disposizione è in grado di autosostenersi, di sopportare carichi e coprire luci relative.

57. Il sistema costruttivo delle gridshell, conosciuto anche come a graticcio, si rifà a tecniche costruttive molto antiche. Si ispira, infatti, sia ad una tecnica millenaria, tipica di alcune popolazioni asiatiche e australiane, di lavorare il bambù, sia alla sapiente tradizione costruttiva degli scafi in legno.



[Fig. 55] Particolare del gridshell della Multihalle di Mannheim di Frei Otto. Photo credit Tatsuya Krause©

Anche l'ingegnere italiano Musmeci, quasi ossessionato dalla ricerca della forma, come Frei Otto applicava ai propri progetti un metodo non del tutto tradizionale, come si riscontra per esempio nel caso del ponte sul Basento del 1967. Proprio con l'obiettivo di individuare la forma ottimale per la propagazione delle forze, prevedendo quindi il minimo dispendio di materia ed il minor peso della struttura, l'ingegnere romano studiò le linee di distribuzione delle forze della membrana di cemento armato servendosi di numerosi modelli in scala realizzati con film di sapone, il neoprene e il metacrilato. La forma, in questo caso organica ed articolata, non è generalmente mai scontata per l'ingegnere, al contrario, diviene la protagonista del progetto. La geometria dell'elemento progettato viene quindi ricavata sperimentalmente secondo leggi fisiche. Seguendo la logica di pensiero dell'approccio precedentemente citato del *Design-Thinking* (cfr. par. 3.5), i casi sopra citati appartengono in generale ad un approccio definibile "structure first" come base del processo del *form-finding*: la struttura influenza il tipo di materiale e soprattutto la forma. Il caso del Palazzetto dello sport di Nervi ne è l'emblema: qui la struttura compone la forma. Quelle nervature ben visibili, scandiscono di fatto l'armonia della forma della copertura stessa. Il

[Fig. 56] Il ponte sul Basento, nominato anche "ponte Musmeci", è un viadotto dell'industria sul fiume Basento che costituisce la connessione stradale tra l'uscita "Potenza Centro" sul raccordo autostradale Sicignano-Potenza e le principali vie di accesso nella zona sud di Potenza; ha una lunghezza totale di 560 metri. Photo credit Alessandro Lanzetta©



procedimento progettuale di base, indipendentemente dal fatto che l'ispirazione potesse partire da una pianta di girasole, era volto soprattutto alla ricerca di una forma efficiente soprattutto strutturalmente.

L'ingegnere francese Le Ricolais definì la struttura *“per noi che ci occupiamo di matematica, la sola cosa stabile in un mondo in relativa crescita”*⁵⁸: la struttura, ben visibile, chiara e pura, diventa sinonimo di verità.

L'approccio progettuale generalmente di tali ingegneri ed architetti quindi, oltre all'aspirare alla leggerezza e alla minimizzazione dei materiali, si poneva come obiettivo principale di lavorare la forma come una struttura ben resistente, ricorrendo in conclusione all'antica disciplina della geometria. Eduardo Torroja concordava con le idee di Thompson, per cui:

*“Linee e superfici sono sempre legate a leggi matematiche e fisiche che ne fissano le proprietà. Non si deve mai dimenticare che l'estetica, con la sua innegabile componente soggettiva, è intimamente legata alle proprietà geometriche, analitiche, meccaniche e resistenti delle superfici e delle linee che delimitano la massa della costruzione. Ogni linea matematicamente definita possiede una verità intrinseca, esprime una legge, rappresenta un'idea, reca con sé il pregio di una virtù: negare queste cose significa rinchiudersi nel cieco ed egoista rifugio della pigrizia e dell'ignoranza”*⁵⁹.

Ingegnere, creatore e innovatore nel campo delle strutture, sosteneva che, considerando che ogni materiale possiede una “personalità” specifica, ogni forma impone un determinato fenomeno di tensione. La nascita di un complesso strutturale è il risultato di un processo creativo, una fusione tra arte, tecnica, immaginazione, ingegno e sensibilità: *“l'idea modella il materiale in una forma resistente”*⁶⁰.

58. Le Ricolais R., *La structure dans les arts et les sciences*, Editions de la Connaissance, Bruxelles, 1966.

59. Tratto da Torroja E., *La concezione strutturale*, Città Studi, Milano, 1995

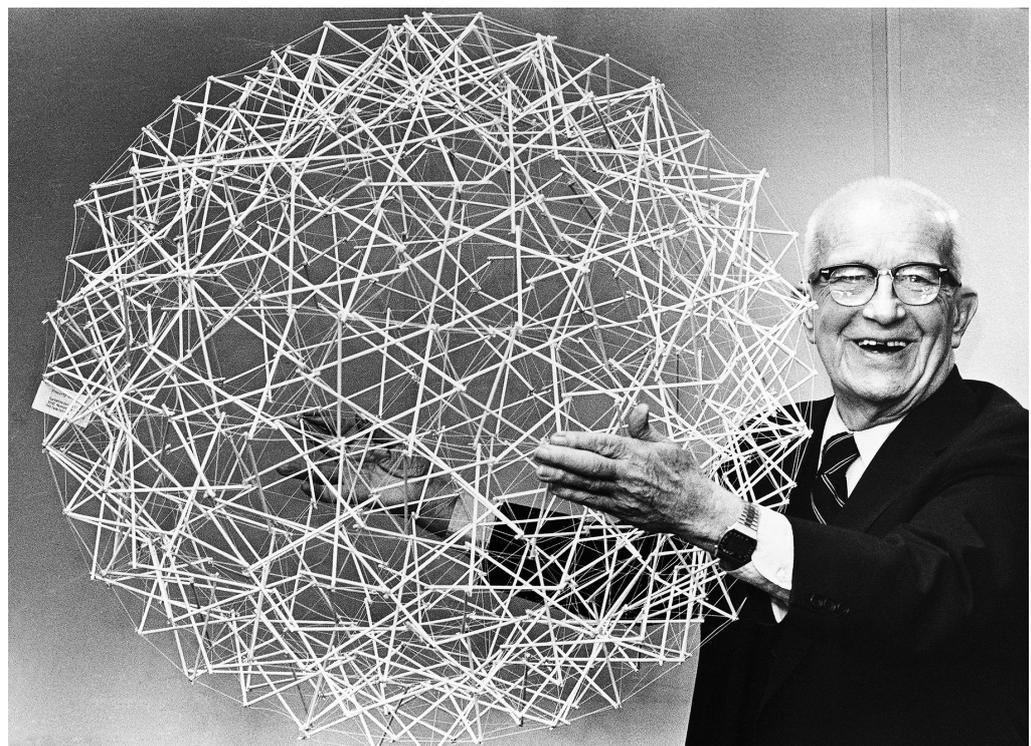
60. Tratto da Torroja E., *Razón y Ser de los Tipos Estructurales*, Editorial CSIC, Madrid, 2010

Anche l'architetto Buckminster Fuller, seppure la maggior parte dei suoi progetti rimasero sulla carta, contribuì alla rivoluzione ingegneristica post-guerra.

In molti suoi modelli Fuller lavorava con il triangolo ed il tetraedro, definiti da lui stesso entrambe come le forme più efficienti della geometria, soprattutto grazie alla capacità di indeformabilità. Inoltre, si poteva largamente impiegare nel campo dell'ottimizzazione strutturale poiché era facilmente convertibile in combinazioni spaziali di reti o maglie complesse, offrendo grande accessibilità, così come versatilità nell'assemblaggio.

Fuller sosteneva che in natura ci fosse un sistema di forze vettoriali orientati nella direzione che garantisce massima resistenza con strutture minime, come nel caso dei reticoli di tetraedro.

Negli anni sviluppò un sistema vettoriale di geometria che soprannominò "geometria energetica-sinergica". L'unità di base di questo sistema è il tetraedro che, in combinazione con ottaedri, forma strutture spaziali efficienti, anche dal punto di vista del risparmio di materiale. In definitiva, la conseguenza architettonica dell'uso di tale geometria fu la cupola geodetica, introdotto nel 1951.



[Fig. 57] B. Fuller con un modellino di una "tensegrity structure", 18 Aprile 1979. Fonte: <http://www.pbs.org/>

A partire già dagli anni '50, con Eero Saarinen apparvero in architettura forme decisamente dinamiche e futuristiche per l'epoca. Il progetto del famoso Terminal TWA dell'aeroporto JFK di New York (*cf. fig. 58*), costruito tra il 1956 e il 1962, ispirato alle ali di uccello, resta uno dei capolavori dell'architetto finlandese e sancisce l'inizio di una nuova epoca, fatta di strutture leggere, organiche e funzionali. Influenzato dai propri studi sulla scultura e dal panorama americano all'avanguardia, le sue opere sono il risultato di una ricerca formale minuziosa, accompagnata da uno studio accurato sull'ottimizzazione della struttura relazionata alle proprietà meccaniche del cemento armato sotto sforzo, e da un approccio pragmatico alla funzionalità del prodotto e ai requisiti per la produzione.

[Fig. 58] Terminal TWA dell'aeroporto JFK di New York. Attualmente è in fase di ristrutturazione per diventare un hotel per i passeggeri dell'aeroporto. Photo credit Mikiko Kikuyama©



Antoni Gaudí: biomimetica o no?⁶¹

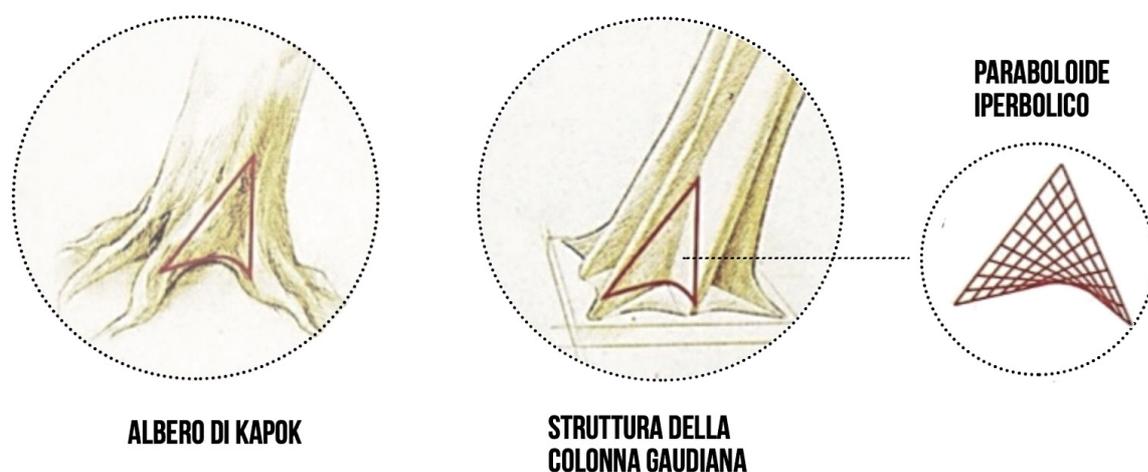
Il tessuto urbano di Barcellona è inconfondibile grazie alla bellezza che permea alcuni edifici insoliti e ben noti, opera del geniale architetto Antoni Gaudí, maestro dell'ingegneria e dell'architettura, oltre che scultore, pittore e fotografo. Considerato il massimo esponente del Modernismo, d'altro canto, la propria personalità risultò meno organica a tale movimento artistico, seppur condividendo i presupposti ideologici e tematici.

Il suo stile unico, originale ed inconfondibile derivò da una particolare ispirazione nelle forme presenti in natura, che progressivamente iniziò a costituire la base dei suoi progetti. Tuttavia, in alcuni casi, si che Gaudí eccedeva in forme piuttosto appariscenti, spesso zoomorfiche e surrealiste, di fatto puramente estetiche e prive di alcun aspetto funzionale; seppur ideatore di geniali sistemi e soluzioni strutturali, in quanto abile artista, integrò alle sue architetture quel tocco decisamente scultoreo ed inconfondibile. Eppure quell'approccio biomimetico, al contrario, è identificabile nell'essenza delle sue opere e nella proficua ricerca e sperimentazione delle forme ottimizzate in natura: ciò che propose Gaudí fu un nuovo modo di vedere e sperimentare l'architettura, non del tutto scontato per l'epoca. Dopo una vita dedicata ad osservare il mondo biologico, giunse alla conclusione che in natura si nascondevano forme geometriche talmente interessanti ed affascinanti da poterle convertire in architettura, sostenendo quel legame inscindibile natura-forma-funzione. La *Sagrada Família* fu senza ombra di dubbio la sua opera più emblematica, dove mise in pratica molte delle sue tecniche. L'architetto catalano non condivideva le soluzioni strutturali proposte dall'imponente architettura gotica nella progettazione della cattedrale; definita da lui stesso "arte industriale", vi trovava molti difetti, come proporzioni prive di armonia, o strutture troppo complesse e fragili, sia perché prevedevano la creazione di elementi eccessivamente esposti e vulnerabili come i contrafforti, o perché le coperture non resistevano al fuoco, né all'umidità. Inoltre, la demolizione di una parte di essa non era neppure una soluzione pratica, poiché poteva portare alla distruzione dell'intero edificio. Gaudí trovò numerosi accorgimenti, perfezionando appunto i principi dell'architettura gotica:

61 Sintesi e rielaborazione dai seguenti testi:

- Boada P., *El Temple de la Sagrada Família*, Editorial Barcino, Barcelona, 1929
- Martinell C., *Conversaciones con Gaudí*, Ediciones Punto Fijo, Barcelona, 1969
- Huerta Fernández S., *El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí*. In: "Salvador Tarragó: miscel·lània", pg. 133-162, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2013
- Martinell C., *Gaudí i la Sagrada Família comentada per ell mateix*, Edicions Cossetània, 1999
- Samper A., Herrera B., *Análisis de comparación fractal de la Sagrada Família con las Catedrales Góticas*, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, 2015.

dotò la propria basilica di un doppio tetto in pietra per garantire una lunga vita, le spinte orizzontali vennero ridotte verticalizzando gli sforzi e creando un interessante sistema di colonne inclinate e ramificate, di una configurazione simile a quella di un albero. Grazie ad un particolare studio sul processo di crescita elicoidale di un ramo di oleandro, una struttura che dà forza e consente alle foglie di ricevere la luce solare⁶², trovò l'ispirazione per ideare le tipiche "colonne gaudiane". Gaudí credeva che gli edifici dovessero possedere un aspetto animato, perciò un'architettura, in quanto organismo vivente, doveva essere rappresentata in quanto tale: la struttura portante della basilica di fatto intenta rappresentare un bosco in crescita, vivo e rigoglioso (cfr. fig. 59).



[Fig. 59] La colonna gaudiana, definita anche a stella, si ispira alla crescita elicoidale dei vegetali. La si trova protagonista nel capolavoro della Sagrada Família, tramite una versione semplificata della struttura del tronco di un albero. Secondo Gaudí la colonna non necessitava grandi decorazioni architettoniche come una base o un capitello, eccetto in presenza di una valenza religiosa. Per creare la "foresta" all'interno della chiesa, Gaudí incise forme arboree nelle colonne, rappresentando anche i "nodi" nella navata centrale, in corrispondenza della diramazione delle colonne come dal tronco di un grande albero.

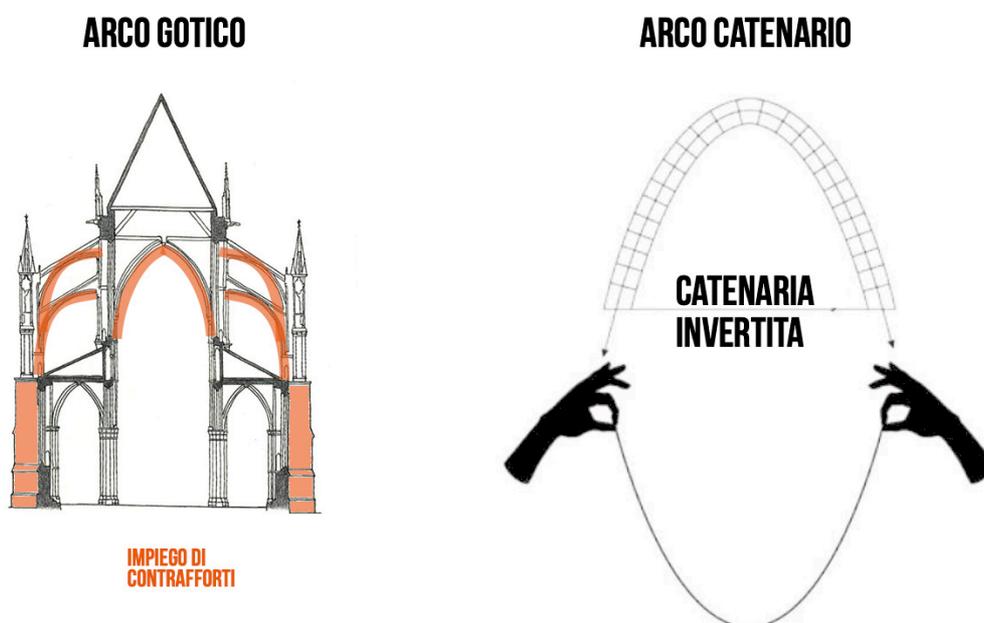
62. Esistono alcuni tipi di piante - come il caso dell'*Abelia Chinensis*, nota a Gaudí - che prevedono una organizzazione per piani delle loro foglie, ossia una struttura elicoidale; crescendo, i vari livelli regolano gradualmente l'orientamento della foglia, con l'obiettivo di rispettare la quantità necessaria di superficie che riceve luce solare, senza che i piani superiori non ombreggino quelli inferiori.





Per risolvere i grandi problemi ingegneristici della basilica e non ricorrere ad un'architettura così massiccia come quella gotica, il segreto fu introdurre, per la prima volta nell'architettura, il concetto della catenaria⁶³, la curva gaudiana per eccellenza, presente anche nei progetti di Casa Batlló, Parc Güell, del Colegio de las Teresinas e tanti altri. Queste le parole di Gaudí:

“La catenaria dà eleganza e spiritualità all'arco, eleganza e spiritualità ne fanno l'intera costruzione, evita contrafforti, l'edificio pesa meno. Guadagna uno stile vaporoso e si regge senza strani accessori ortopedici”.



[Fig. 60] Rappresentazione dell'arco catenario, molto vantaggioso rispetto al sistema di archi e contrafforti che contraddistinguono lo stile gotico.

63. La catenaria è la curva secondo la quale si dispone una catena, una fune o un filo omogeneo flessibile sospeso ai due capi per effetto della forza di gravità. Come tale, la catenaria fu presa in esame da Galileo, che però la identificò con una parabola (di cui ricorda la forma), e fu poi studiata da G.W. Leibniz, G. Bernoulli e C. Huygens, che le diedero il nome nel 1691. Definita come curva piana iperbolica, può essere espressa matematicamente tramite il coseno iperbolico. L'impiego di queste forme risale alla fine del XVI secolo. Intorno al 1670 R. Hooke presentò la questione relativa a qual era la forma ideale di un arco e la sua relativa spinta verso i suoi contrafforti. Nel 1676 spiegò che nello stesso modo di come appendeva un filo flessibile, così, invertito, si sosterebbe un arco rigido. Se gli archi si sostengono è perché vi è contenuta una catenaria al loro interno.

L'idea era quella di intendere il funzionamento degli archi analogamente alle corde - o catene - sospese: la catenaria fu una delle scoperte più geniali per lo studio delle strutture. In considerazione del fatto che tale curva geometrica possiede in ogni suo punto una distribuzione uniforme del peso, il suo corrispondente arco catenario "rovesciato" lavora per compressione, eliminando gli sforzi a trazione.

In molti dei suoi progetti, la strategia per ricavare tali curve fu decisamente di natura pratica e sperimentale: creando una serie di modelli di studio ad archi "sospesi", Gaudí poté così ricavare la distribuzione strutturale più efficiente per la basilica (cfr. fig. 61).



[Fig. 61] "Modello appeso" ideato per la Sagrada Família, con un sistema di corde e sacchi di juta. In molti dei suoi progetti Gaudí utilizzò questo metodo pratico, che gli permise di realizzare calcoli più rapidamente rispetto ai metodi più tradizionali dell'epoca. Photo credit Josep Maria Puche©.

Inizialmente si applicavano dei carichi, ancora ipotizzati, agli archi del modello, contando il peso proprio del solaio e dei muri. Il risultato ottenuto quindi era un insieme di curve catenarie, ovvero la conformazione che per gravità assumono le corde.

Nel modellino in figura, ideato per la basilica, le linee di forza lungo le quali viene scaricato il peso dagli archi restano contenute all'interno della struttura e vanno a finire interamente sulle due basi d'appoggio. Suddividendo lo spazio in piccoli moduli indipendenti e autoportanti, Gaudí creò una struttura perfettamente resistente alle forze di trazione meccanica e alleggerita, in quanto non fu necessario alcun tipo di contrafforte. L'architetto precisò sulla struttura, inoltre, che in seguito ai risultati degli esperimenti e calcoli minuziosi da lui effettuati in laboratorio e all'Università, tutti i materiali della basilica vengono fatti lavorare a una decima parte del coefficiente di frattura.

3.7 Imparare dagli errori⁶⁴

Come la storia insegna, anche in architettura non esiste successo che non sia accompagnato da un fallimento. In Europa il boom edilizio degli anni '60 e '70 portò con sé successi ed insuccessi. Per esempio, secondo i dati del Censis, il patrimonio edilizio in Italia aumentò vertiginosamente soprattutto tra il 1958 e il 1963 in relazione ad un'altissima crescita demografica: nel 1951 si costruirono circa 10,7 milioni di abitazioni, che solo quarant'anni più tardi raddoppiò. Le problematiche più consistenti si verificarono nelle zone periferiche delle grandi città italiane ed europee, in seguito alla forte domanda di alloggi da parte dei ceti medi e medio-bassi. La costruzione di interi nuovi quartieri, per necessità di ospitare rapidamente una sempre maggiore massa di popolazione, portò a fenomeni di segregazione, ghettizzazione, criminalità ed esclusione sociale. L'idea del quartiere autosufficiente non fu possibile, in seguito anche a problemi di costi eccessivi di gestione di tali zone. Quei valori tanto desiderati da Wright e Le Corbusier dell'architettura contemporanea, intesa come approccio razionale a dimensione dell'uomo, fallirono in molti casi come in Italia nel resto del mondo, secondo svariate sfumature. Il termine "macchine per abitare" venne effettivamente mal interpretato da molti, in un certo senso compreso lo stesso Le Corbusier; nacquero in questo senso interi quartieri in cemento armato non solo antiestetici, ma piuttosto disfunzionali sul piano sociale, senza dimenticare i problemi energetici o legati alla gestione e manutenzione.

64. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- Montanari G., Bruno A., *Architettura e città nel Novecento. I movimenti e i protagonisti*, Carrocci, Roma, 2009

- Frampton K., *Storia dell'architettura moderna*, Zanichelli, Bologna, 2008



[Fig. 62] Scampia, Napoli. Il quartiere di Scampia venne costruito verso la metà degli anni '50, con l'obiettivo di dare alloggio ai terremotati della città. Di fatto, fu un caso clamoroso di abuso edilizio, ancora oggi un luogo di alta criminalità e delinquenza.

Fonte <https://archive.4plebs.org/>



[Fig. 63] Le “Case bianche” di Milano, nel quartiere popolare di Taliedo, rappresenta un esempio di rapida espansione della città agli inizi degli anni '60. In quasi due anni, tra il 1961 e il 1963, si elevarono 501 appartamenti di edilizia popolare per un totale di 1650 abitanti.

Fonte <https://www.raiplayradio.it/>

A Milano sorsero velocemente agglomerati piuttosto concentrati e disordinati, soprattutto privi di servizi. Nella capitale, un'ampia percentuale di abitazioni non possedeva bagno, luce, acqua, o gas. Nel 1963, conseguentemente alla non approvazione della proposta Sullo sulla riforma della legge urbanistica, durante il corso degli anni '60 si verificò un disinteresse da parte degli urbanisti verso il dibattito culturale in merito a tale riforma. Nel frattempo la speculazione edilizia prese piede in molte città italiane e, come soluzione, vennero rilasciate molto facilmente numerose licenze per la costruzione non controllata dallo stato. La necessità di ristrutturare la riforma urbanistica fu evidente particolarmente in seguito al caso del 1966 dell'improvvisa frana che colpì Agrigento a causa del sovraccarico di abitato. Grazie alla legge Ponte, approvata nel 1967, si iniziò a combattere maggiormente la speculazione edilizia e fondiaria tramite sanzioni, inoltre vennero definiti e introdotti i nuovi standard urbanistici ed edilizi. Ciò nonostante, tale fenomeno sopravvisse fino al giorno d'oggi.

Seppur a partire dagli anni '50 vi sia stato un incremento positivo dell'ingegneria in calcestruzzo, i fallimenti non mancarono. Tuttavia, anche in questo caso relazionato a problemi di gestione a livello statale e politico, si ricordi il caso del crollo del ponte Morandi di Genova, costruito tra il 1963 ed il 1967, che il 14

[Fig. 64] Crollo del ponte Morandi, Genova, 14 Agosto 2018. Fonte: <https://www.performgroup.com/>

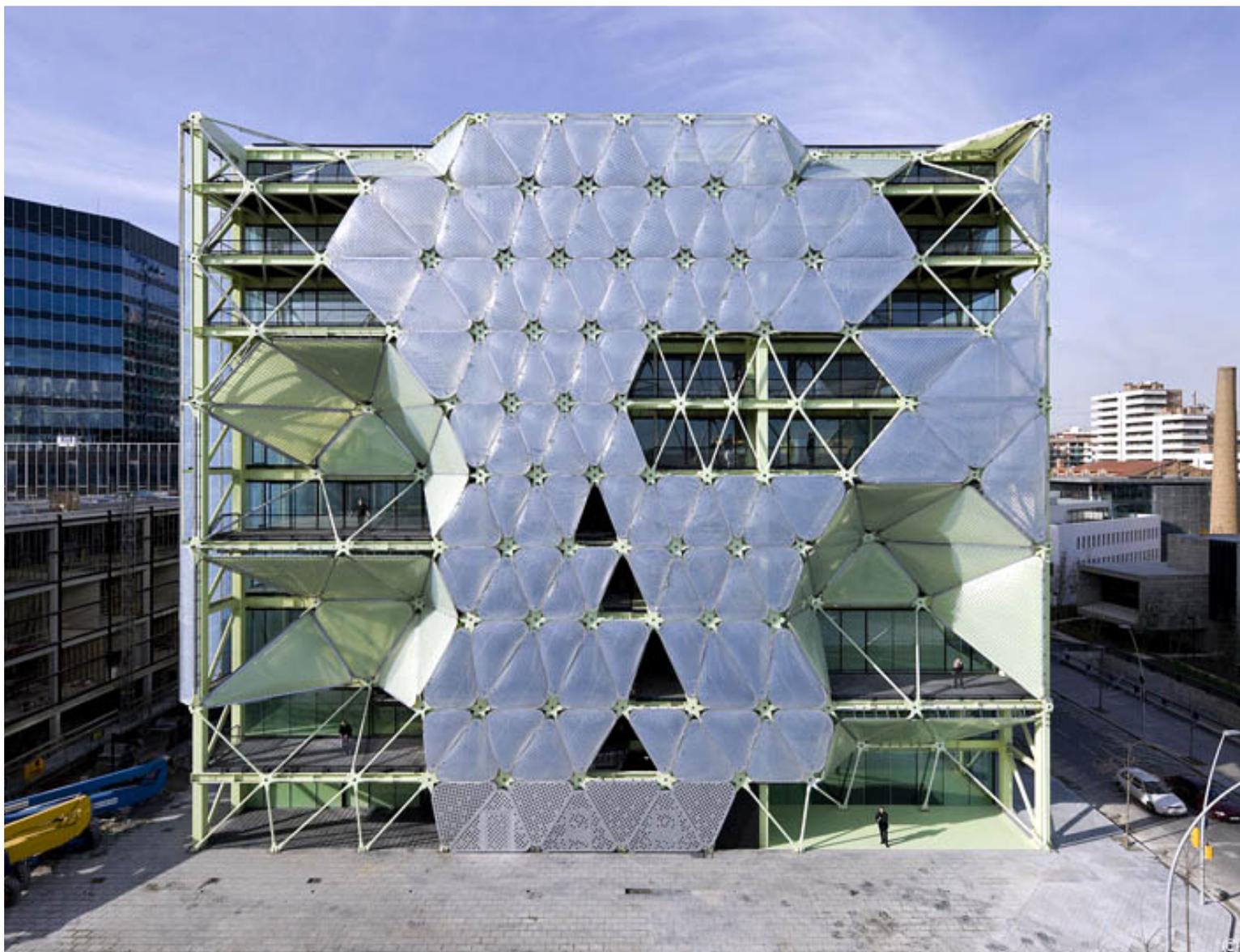


agosto 2018 portò con sé 43 vittime. Seppur considerato a suo tempo un'opera decisamente all'avanguardia, ciò non toglie che la questione critica risiedesse a livello strutturale: l'idea di realizzare tiranti in calcestruzzo si rivelò una proposta errata dal punto di vista meccanico, in quanto tale materiale non risulta adatto a sopportare eccessivi sforzi di trazione.

A partire finalmente dagli anni '90 si è assunto un controllo maggiore e più determinante e sensibile in fase progettuale, oltre ad aver introdotto il concetto di "sostenibilità" all'interno del vocabolario ordinario del progettista.

Se tali esempi vogliono sottolineare principalmente strategie progettuali non idonee che oggi l'architetto è in grado di correggere, l'invito è guardare al futuro, fare un passo in avanti e dirigersi verso una nuova linea di pensiero: il nuovo obiettivo del progettista non solo equivale a garantire maggior benessere, bensì efficienza e funzionalità, senza dimenticare che fattori come isolamento, alienazione, disturbo ed insicurezza sono tutti sintomi appartenenti ad una società non sana e debole, anche se ancora presenti tutt'oggi.

L'ispirazione nel mondo naturale, come si vedrà in seguito, associato a strategie computazionali, è uno strumento che, solo in questi ultimi anni, si sta rivelando decisamente valido per una progettazione responsabile, ottimizzata, controllata e soprattutto adattabile. Tramite una serie di esempi concreti, si vuole approfondire nel dettaglio l'impatto positivo che esercita la tecnologia sulla progettazione del futuro, a piccola e a grande scala; l'obiettivo di tale strategia innovativa è ottenere un controllo continuo durante l'intera fase progettuale, adattando il complesso architettonico con il proprio intorno. Tuttavia, negli anni, la tecnologia può rivelarsi un'arma a doppio taglio; sono molti i progetti a priori considerati innovativi e sostenibili risultati poi fallimentari. L'edificio Media-tic (*cfr. fig. 65*), inizialmente considerato come esempio di architettura biomimetica e totalmente efficiente in termini energetici, si rivelò fallimentare. La facciata vetrata esposta a sud implica alti costi di ventilazione meccanizzata durante i periodi caldi: l'edificio risulta totalmente decontestualizzato rispetto all'ambiente di Barcellona, mentre la facciata mostrata in figura 64 secondo i lavoratori provoca rumori piuttosto fastidiosi al proprio interno.



[Fig. 65] L'edificio Media-tic, inaugurato nel xx, è situato nel 22@ di Barcellona, il nuovo quartiere tecnologico all'avanguardia della città. Photo credit Iwan Baan©

D'altro canto, se adottati nella maniera corretta, i mezzi tecnologici di cui si dispone oggi, in particolare la modellazione parametrica e la stampa 3D, oltre ad apportare un approccio maggiormente creativo, sono strumenti più affidabili e intuitivi: nel capitolo a seguire si affrontano le fasi principali della progettazione assistita da programmi parametrici, per cui il progettista avrà la possibilità di compiere verifiche e correzioni di ogni singolo dettaglio, tramite delle simulazioni

interattive. Tali software innovativi, basati su operatori logici informatici di fatto rappresentano uno strumento ormai urgentemente necessario che, in un futuro prossimo, potrà stimolare ancor più la progettazione biomimetica, tanto a livello architettonico che urbanistico (*cf. par. 4.4*).

4

L'APPROCCIO PARAMETRICO ALLA BIOMIMETICA

*<<Quando il risultato guida il processo
andremo sempre e solo dove siamo già stati.
Se, invece, il processo guida il risultato,
potremmo non sapere dove stiamo andando
ma sapremo di essere nella direzione giusta>>*

Bruce Mau

4.1 Le origini del parametricismo⁶⁵

Il parametricismo come viene interpretato in senso odierno è da intendere come l'evoluzione di un pensiero che si iniziò a manifestare già a partire dagli anni '30. Le origini di tale approccio non coincidono dunque prettamente con l'avvento dell'era informatica piuttosto si insediano nella necessità di rinnovamento nel settore della progettazione, concretizzatasi a partire dagli anni '50. Per alcuni fu il risultato, di origine spontanea, di un miglioramento in termini di qualità della vita e benessere, in seguito ai danni provocati dall'epoca Modernista.

Luigi Moretti, già a partire dagli anni '30, lamentò l'inadeguatezza in particolare del movimento razionalista, in quanto, secondo la propria opinione, non era stato in grado di rispondere alle nuove esigenze funzionali, bensì propose soluzioni essenzialmente formali. Il ruolo dell'architettura, a giudizio di Moretti, doveva dirigersi verso una più attenta analisi strutturale, tramite l'applicazione di metodi matematici e l'individuazione di parametri, ovvero valori numerici, che descrivessero una struttura nella sua totalità. Moretti la definì nel 1939 per questo motivo architettura parametrica, come un linguaggio del tutto nuovo, fatto di relazioni e concatenazioni tra differenti elementi. I principali esponenti del parametricismo, denominato "analogico", come già accennato in precedenza (*cf. par. 3.6*), furono già Gaudì, Wright, Le Corbusier, Otto, Fuller, Nervi e Musmeci, i quali studiarono tramite prove sperimentali il comportamento dei tradizionali materiali da costruzione sottoposti a conformazioni innovative.

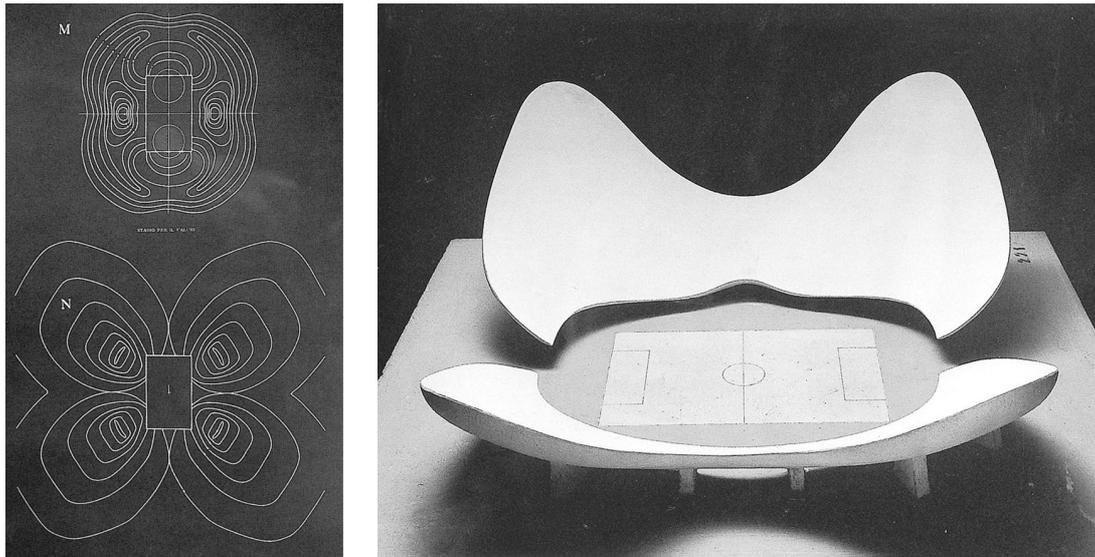
65. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

-Tedeschi A., *AAD Algorithms Aied Design. Parametric Strategies using Grasshopper*©, Le Penseur Publisher, Potenza, 2014

- Schumacher P., *Parametricism: a new global style for architecture and urban design*, AD Architectural Design – Digital cities, vol. 79, n. 4, Luglio Agosto 2009

- Pontello E., *Approccio Parametrico alla Progettazione Architettonica*, Tesi di Laurea Triennale in Scienze dell'Architettura, Università degli Studi di Udine, 2015.

- De Cesco M., Ezechieli C., Morlacchi A., *Architetture biomimetiche: le soluzioni messe a punto dalla natura diventano strategie progettuali*, Rivista ioArch, n° 65, Agosto 2016



[Fig. 66] Proposta di uno stadio di calcio di Luigi Moretti per la XII esposizione Triennale di Milano, 1960. Il progetto si basa sullo studio di curve (parametri) per la realizzazione della forma. L'obiettivo era che tutti gli spettatori godessero della stessa visuale. Fonte: <https://www.aboutartonline.com/>



[Fig. 67] Il padiglione Philips, progettato da Le Corbusier in occasione dell'Esposizione Universale del 1958 a Bruxelles. Il progetto presenta già un'idea primordiale di approccio parametrico in merito alla forma, la quale doveva soddisfare determinati requisiti acustici e di illuminazione. Purtroppo il padiglione venne smantellato poco tempo dopo. Photo credit ©Wikimedia commons.

Tale approccio favorì in particolare la progettazione strutturale del calcestruzzo armato, così come, più avanti, con l'avvento dell'era informatica, rivoluzionò radicalmente il settore dell'architettura, del design e dell'ingegneria. Inoltre l'aeronautica, per affrontare alcune problematiche relative alle dinamiche dei flussi, fu necessario un forte impulso al settore informatico, per il calcolo sul comportamento delle strutture. Con la diffusione dei primi *Sketchpad*, introdotti nel 1963 da Ivan Sutherland, cambiò decisamente l'approccio al disegno architettonico: queste interfacce grafiche digitali instaurarono un nuovo linguaggio sostanzialmente più visuale e diretto con il progettista. Lo *Sketchpad* fu considerato il primo programma interattivo precursore dei CAD, ovvero del mondo della progettazione assistita da computer. Utilizzando una penna ottica, il progettista poteva creare direttamente sullo schermo linee e curve. Anche se di fatto Sutherland non si riferisce mai al termine "parametrico", di fatto, tale sistema si rifaceva ad equazioni parametriche.

Nel 1987 Samuel Geisberg sviluppò un software conosciuto come Pro/ENGINEER per la progettazione di sistemi meccanici, lavorando su vincoli di input per la modellazione tridimensionale. In fine, verso gli anni '90, vennero rilasciati i primi software parametrici che si basavano su una serie di algoritmi. Su questo principio si basa Grasshopper, un *plug-in* di Rhinoceros oggi molto utilizzato, ideato nel 2007 da David Rutten della Robert McNeel & Associates (cfr. par. 4.3).

I primi grandi studi di architettura ad accogliere programmi di tipo parametrico furono quelli di Frank O. Gehry e di Zaha Hadid. Patrick Schumacher⁶⁶, architetto e docente tedesco, oggi direttore dello studio Hadid, definisce nel *Parametricist Manifesto* del 2008 la nascita di un vero e proprio stile: il parametricismo è una coerenza di principi, un insieme di ambizioni ed elementi manipolabili e controllabili sotto ogni aspetto. Il risultato di tale processo sarà una vasta

66. Patrik Schumacher, esperto di progettazione parametrica, ha insegnato presso l'AA DRL School of Architecture di Londra dal 1996 ed è partner di Zaha Hadid Architects. Nel 1999 ha completato il suo dottorato di ricerca presso l'Institute for Cultural Science, Università di Klagenfurt.

quantità di varianti e le forme risultanti passeranno da figure geometriche in un certo senso “statiche e rigide”, ad entità animate e malleabili, decisamente più dinamiche.

Lo sviluppo e il perfezionamento dei sistemi di modellazione parametrica consentì di fatto la possibilità di rappresentare “il reale”, integrando in un unico modello informatico la fusione di realtà di natura geometrica e comportamentale, analogamente ad un organismo naturale. L’abbandono della cosiddetta Carbon Age, afferma Michael Pawlyn, porterà, sostenendo i principi di Schumacher, ad una nuova architettura del futuro:

“Credo che la biomimetica rappresenti un territorio molto ricco e per buona parte inesplorato con grandi opportunità, sia per gli architetti che per l’industria. Credo che l’età dei combustibili fossili sia stata un enorme dirottamento dalla capacità di trovare soluzioni creative e originali ai nostri problemi. È stato talmente facile bruciare combustibili fossili per soddisfare tutte le nostre necessità che ci siamo distaccati dalla natura e perso ogni capacità di adattamento creativo alle diverse circostanze.

4.2 La logica del *Generative-design*⁶⁷

In un contesto di progettazione biomimetica, l'approccio denominato "generativo" risulta essere decisamente vantaggioso poiché offre l'opportunità di avvicinarsi il più possibile alle complessità del mondo della natura.

Lars Hesselgren⁶⁸ lo definisce così:

"Design generativo non significa disegnare un edificio, ma un sistema che disegni l'edificio".

Ebbene, si tratta di una metodologia progettuale di altissimo potenziale, applicata nel campo della progettazione computazionale parametrica. Si rivela infatti come una strategia progettuale del tutto innovativa ed efficace, in grado di imitare il processo generativo biologico, attraverso relazioni di algoritmi denominati appunto generativi (*cf. fig. 68*). In architettura si applica nell'ambito del *form-finding*, ovvero nella ricerca dell'ottimizzazione della forma, generata attraverso un processo di crescita "naturale" computerizzato.

67. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- Baldissara M., *Biomimetica degli spazi. Sperimentazioni digitali di processi biologici in architettura*, Tesi di Dottorato di ricerca in Teorie e Progetto, Dipartimento di Architettura e Progetto della Sapienza di Roma, 2018

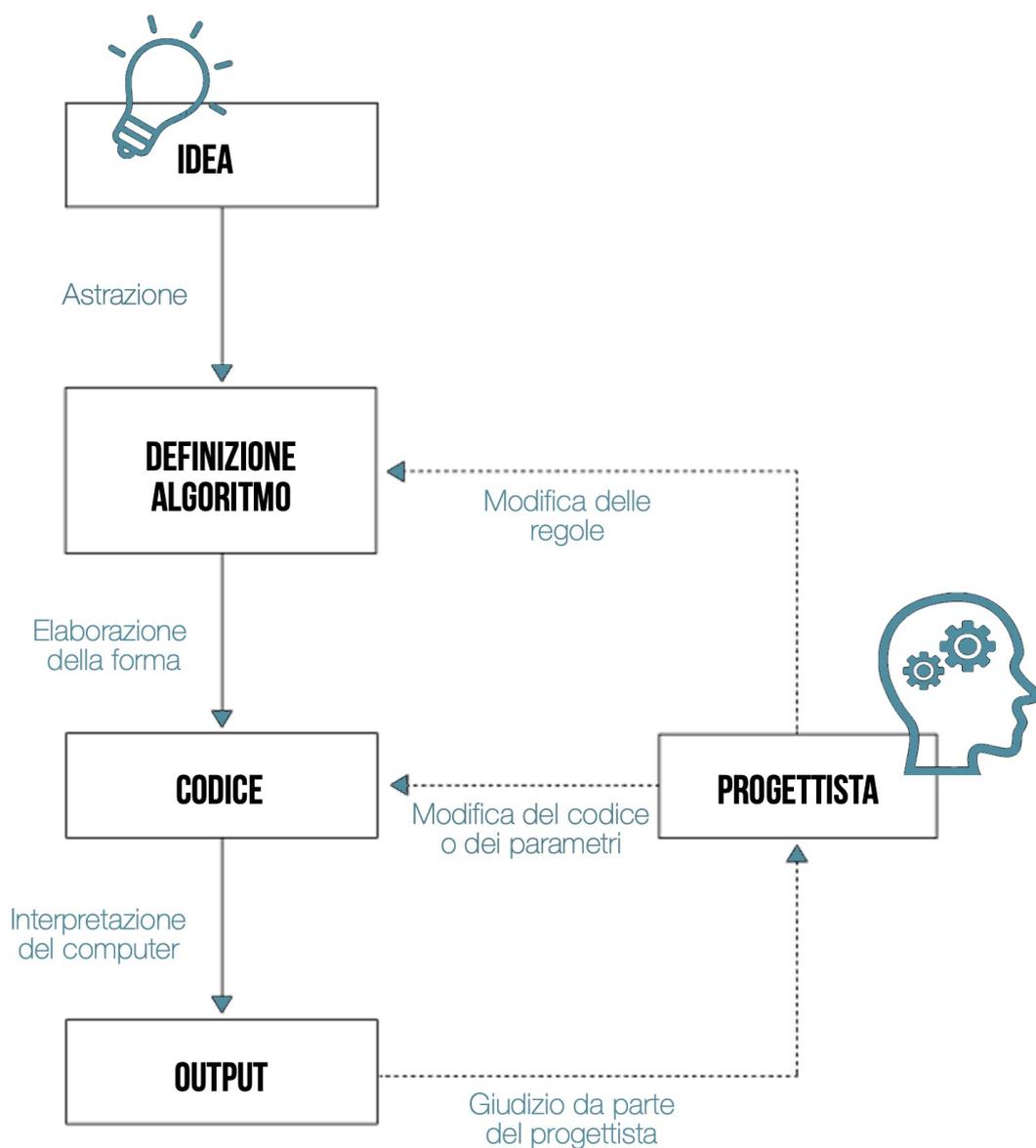
- Schumacher P., *The Autopoiesis of Architecture, Volume I: A New Framework for Architecture: A Conceptual Framework for Architecture*, John Wiley & Sons Ltd, Hoboken, 2010

- Tedeschi A., *AAD Algorithms Aied Design. Parametric Strategies using Grasshopper©*, Le Penseur Publisher, Potenza, 2014

- Pontello E., *Approccio Parametrico alla Progettazione Architettonica*, Tesi di Laurea Triennale in Scienze dell'Architettura, Università degli Studi di Udine, 2015.

68. Lars Hesselgren, direttore di ricerca di PLP Architecture, è un pioniere nel campo delle nuove tecnologie e grande sostenitore della progettazione parametrica applicata all'architettura e all'urbanistica. La sua ricerca si concentra soprattutto sui nuovi sistemi di mobilità all'interno delle città e sui nuovi materiali nel campo della costruzione.

Pertanto Ingegneri, architetti e designers portano avanti oggi una ricerca fondamentale per la progettazione ottimizzata del futuro, la quale, lavora inevitabilmente in un panorama fortemente influenzato dallo sviluppo tecnologico, a livello generale ormai in crescita esponenziale. Si può dire che tale approccio progettuale operi infatti in un ambito di “ecologia informatizzata”, un mondo decisamente dinamico e all’avanguardia, che trae vantaggi dalla creatività sostenibile del mondo naturale.



[Fig. 68] La logica della progettazione generativa si basa sul un processo non lineare. Fonte: Bohnacker H., Laub J., Groß B., Lazzeroni C., Generative Gestaltung, 2009.

Gli attuali software di calcolo semplificano significativamente di fatto le capacità di *mimesis* delle complesse strutture naturali rispetto ai metodi più tradizionali, basandosi su relazioni matematiche e fisiche. Le leggi che governano il mondo scientifico hanno sempre giocato un ruolo significativo nel processo generativo della forma nell'arte e nell'architettura nell'arco della storia. La natura è considerata sin dall'antichità un equilibrio di numeri, relazioni e rapporti matematici: tali software sono in grado di riprodurre l'efficienza di strutture e meccanismi naturali, reinterpretandoli sotto forma di funzioni matematiche ed algoritmi.

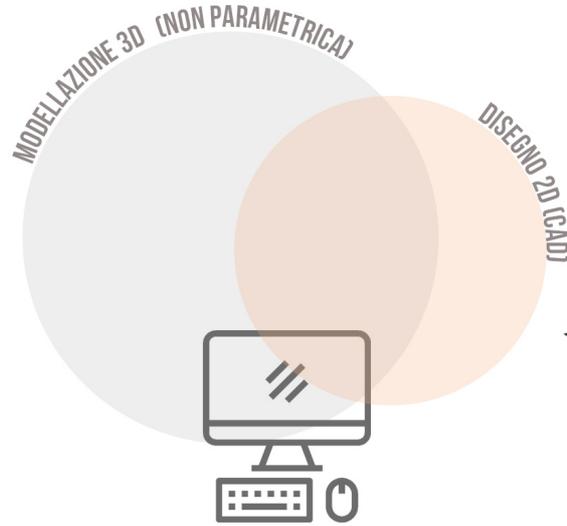
Si arriva dunque ora a definire la differenza tra due approcci nel campo della progettazione. Il processo di *form-making* appartiene a quella più tradizionale, che non coincide con il raggiungimento dell'ottimizzazione della forma a tutti gli effetti. Banalmente, secondo tale approccio, il progettista si limita a disegnare uno o più elementi architettonici aventi una forma più o meno complessa, tramite programmi per il disegno 2D o un qualsiasi programma di modellazione 3D: tale processo si basa sull'intuizione e la capacità di previsione del progettista. Al contrario, le potenzialità del *form-finding* che, come già accennato, cerca di avvicinarsi concettualmente al *Nature-Thinking*, tanto caro alla progettazione biomimetica, permette di generare "da zero" la forma più ottimizzata possibile a partire da una geometria solo ipotizzata. La forma in questo caso è la manifestazione fisica di un lungo processo di elaborazione e relazioni di algoritmi e parametri: impostando le esigenze necessarie, ad esempio carichi e proprietà dei materiali utilizzati, il programma è in grado di generare la forma più funzionale possibile, secondo la logica degli algoritmi creati del progettista. Questa volta è l'imprevedibilità della forma la vera essenza di tale processo generativo.

[Fig. 69]

La progettazione di questi ultimi decenni si sta dirigendo verso quella generativa (evidenziato in azzurro). I programmi di *form-finding* parametrici più utilizzati sono Rhinoceros, Revit e Microtation, una totale rivoluzione nel mondo della progettazione rispetto alla modellazione 3D tradizionale e CAD.

1. FORM-MAKING

[Modellazione classica, "solida"]

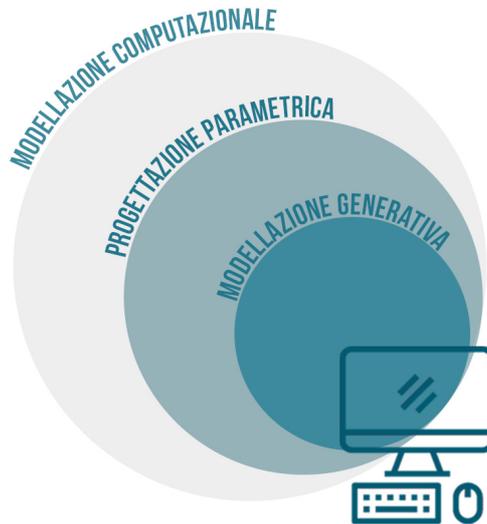


PRODOTTO



2. FORM-FINDING

[Modellazione dinamica, "naturale"]



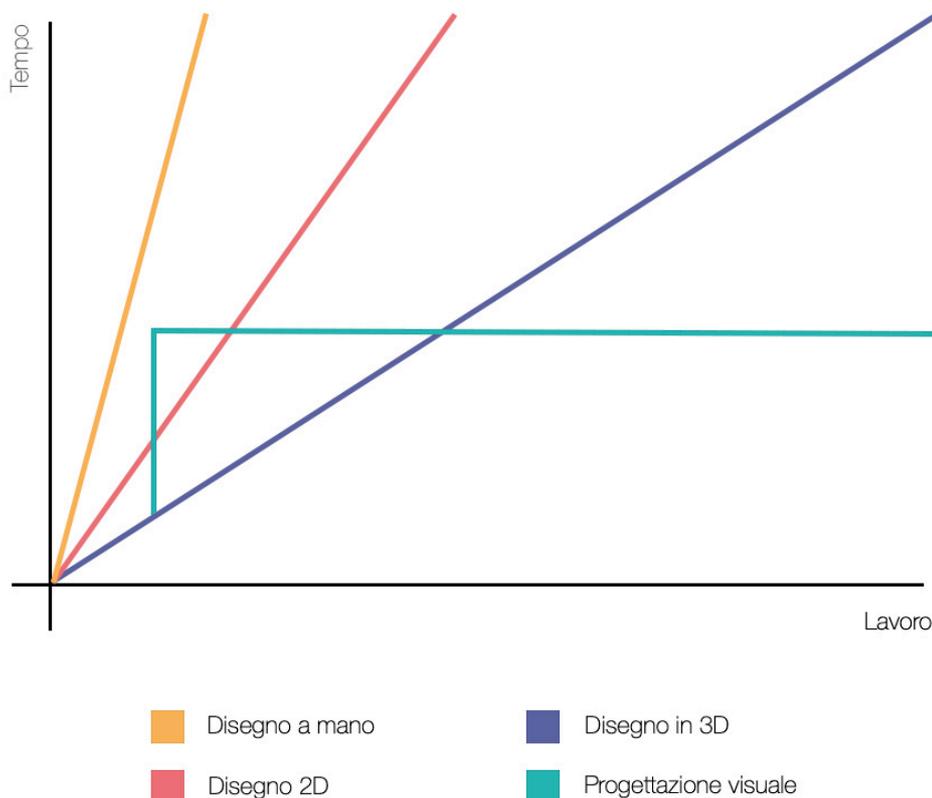
Algoritmi
generativi



PRODOTTO



Tuttavia l'approccio del *form-finding* implica un lavoro decisamente dispendioso in termini di tempo, ma d'altro canto, la precisione è matematica; i software di modellazione parametrica in generale semplificano al progettista una mole di lavoro non indifferente, come si può evincere dal seguente schema. Confrontando i metodi classici tradizionali con quelli di progettazione visuale, è facile individuare la soluzione più efficiente degli ultimi tempi. Tuttavia il disegno a mano libera o 2D tramite CAD resteranno sempre validi "aiutanti".



[Fig. 70] Confronto tra metodi più tradizionali (AutoCAD, disegno a mano, modellazione 3D non parametrica) e progettazione visuale (tra cui Grasshopper, Dynamo, Generative Components, etc.). Il disegno a mano richiede logicamente troppo tempo per una grossa mole di lavoro; se il disegno 2D può risultare più rapido grazie all'impiego di programmi CAD, la modellazione 3D aiuta ulteriormente a minimizzare i tempi e poter ottenere dal modello tridimensionale per esempio piante e sezioni facilmente, la progettazione visuale riesce ad ottenere risultati precisi e ancora più sofisticati in meno tempo. Fortemente relazionata alla modellazione 3D (per questo la sua origine è determinata su tale asse), nell'ultimo caso l'andamento iniziale è verticale e può sembrare che non sia in atto alcun tipo di avanzamento progettuale (mentre la lunghezza dipende dall'esperienza del progettista). Al contrario, quel tempo è speso intelligentemente e corrisponde infatti alla fase di applicazione degli algoritmi da parte del progettista, mentre la fase retta seguente rappresenta la possibilità di ottenere dal programma i dati necessari in qualsiasi momento per l'avanzamento del progetto. Rielaborazione tratta da Pontello E., *Approccio Parametrico alla Progettazione Architettonica*, Tesi di Laurea Triennale in Scienze dell'Architettura, Università degli Studi di Udine, 2015.

Nel caso fosse invece necessario apportare alcune modifiche al modello, i programmi parametrici lavorano su sequenze logiche progressive, per cui ogni modifica innesca a catena altri cambiamenti in maniera molto pratica, dinamica ed intuitiva, mentre nel CAD il disegno dev'essere modificato ripetitivamente e manualmente, esattamente ciò che la progettazione algoritmica cerca di evitare. In questo modo si ottiene un controllo sul progetto completo e costante in tutta la sua complessità.

In sintesi, l'architettura generativa si può dire che rappresenti un capovolgimento di approccio, dal tradizionale *Top-Down* a quello denominato *Bottom-Up*: invece di partire da una visione più globale sul funzionamento di un sistema per poi definire e perfezionare gli elementi minori, al contrario, si inizia con la progettazione dei singoli componenti per assemblarli e generare un intero sistema completo e più efficiente. Per esempio, quando si parte da un'ipotesi formale che è legata al programma architettonico viene adattata per far funzionare il sistema. In questo modo il "prodotto" emerge in modo naturale, spontaneo ed intelligente. Per questo l'approccio del parametricismo generativo in un certo senso sta rivoluzionando l'ottica progettuale, anche se, di fatto, non è nulla di nuovo: in fin dei conti significa appoggiarsi al mero funzionalismo, seppur tramite tecniche innovative. La forma, essendo attraverso una logica parametrica l'espressione della massima efficienza, rappresenta la manifestazione della funzione. I processi chiave del parametricismo sono costituiti dalla variazione e dalla correlazione, per cui ogni dato progettuale entra a far parte di un sistema di rapporti causa-effetto. È il progettista che decide, inventa, crea regole simili a tutti gli effetti a quelle naturali, generando ulteriori algoritmi: il risultato è un equilibrio armonico di relazioni numeriche. La progettazione appare così più organica, viva, dinamica, adattiva, come la natura: l'architettura si comporta analogamente a quell'albero, che a secondo della luce solare, muta la direzione del proprio tronco per trovare un nuovo equilibrio vitale. Le potenzialità, inutile dirlo, sono senz'altro vastissime: oggi il parametricismo si applica in vari campi, dalla progettazione a livello urbano, architettonico, ingegneristico, al design, all'arte e alla moda.

4.3 La progettazione con Grasshopper⁶⁹

Tra i programmi di progettazione parametrica e in particolare quella generativa, Grasshopper è sicuramente uno dei più utilizzati, grazie alle sue enormi potenzialità. Innanzitutto si tratta di un programma di progettazione algoritmica versatile, ovvero adattabile a diverse scale a seconda dell'oggetto in questione, dal dettaglio al livello urbano. La progettazione biomimetica sicuramente viene avvantaggiata se affiancata da un software di tale sofisticatezza, lasciando più spazio alla creatività dell'architetto. Le possibili strutture naturali riproducibili infatti sono potenzialmente infinite poiché sono riconducibili a dati matematici ed algoritmi: strutture ramificate, superfici a griglie regolari o irregolari, a celle esagonali, porose, complesse coperture a guscio, come molte altre. Le strutture vengono elaborate tramite dati algoritmici, gestiti secondo una conformazione gerarchica ad albero: in questo modo il programma può creare relazioni molto complicate tra oggetti e realizzare forme assai complesse. In altri casi è inoltre possibile riprodurre veri e propri sistemi reattivi, che rispondano in un certo modo agli stimoli esterni, come alla luce solare (*cf. caso studio 15*).

69. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

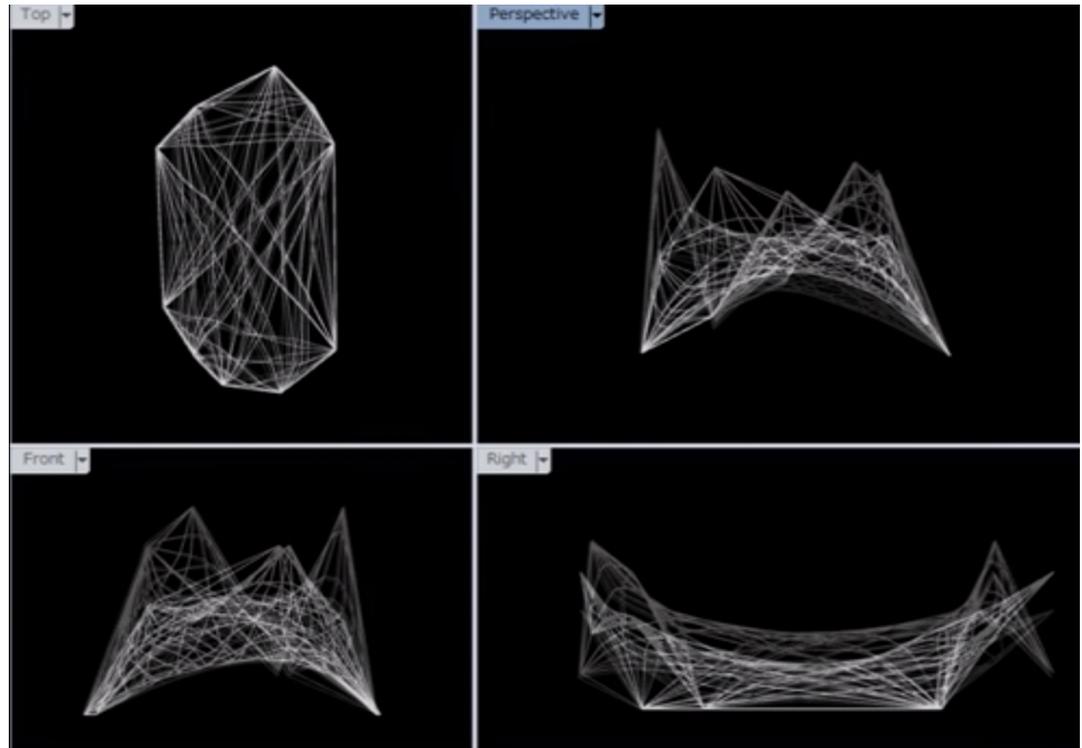
- Tedeschi A., *AAD Algorithms Aied Design. Parametric Strategies using Grasshopper*®, Le Penseur Publisher, Potenza, 2014
- Piattaforma Food4rhino (www.food4rhino.com)
- Cilento K., *Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas*, ArchDaily, 05 set 2012
- ICD-ITKE University of Stuttgart, *ICD-ITKE Research Pavilion 2013-14*, Archidaily, 08 Luglio 2014
- <https://www.dpa.com.sg/projects/esplanadetheatresonthebay/>
- <http://www.archnewsnow.com/features/Feature101.htm>
- Rawn E., *Shell Lace Structure: Tonkin Liu's Nature-Inspired Structural Technique*, Archidaily, 24 Settembre 2014
- ArchDaily Team, *HygroSkin-Meteorosensitive Pavilion / Achim Menges Architect + Oliver David Krieg + Steffen Reichert*", ArchDaily, 09 Sep 2013
- <http://www.achimmenges.net/?p=5612>
- <http://www.achimmenges.net/?p=5083>

I componenti di Grasshopper svolgono l'operazione richiesta elaborando l'input sotto forma di dati numerici e generando come risultato del nuovo algoritmo un output. Si tratta in generale di un programma in cui si possono impostare una quantità considerevole di parametri, creando centinaia di diversi algoritmi: per questo è molto diffuso tra studenti e professionisti. Grasshopper supera la tradizionale progettazione, oltre che nella ricerca di nuove forme talvolta inusuali - tramite un approccio *form-finding* -, ma anche in termini di analisi sull'ottimizzazione morfologica, strutturale ed ambientali, grazie ad ulteriori plug-in disponibili; in alcuni casi inoltre è in grado di elaborare vere e proprie simulazioni dinamiche per compiere alcune verifiche, per esempio in relazione al comportamento della struttura, oppure ottimizzare la forma in base ad analisi climatiche ed ambientali. Grazie alla piattaforma Food4Rhino, sono disponibili moltissimi plug-in in continuo aggiornamento, dove si possono trovare anche componenti o materiali già creati precedentemente da altre persone e condivisi sulla piattaforma. La quantità di plug-in e documenti scaricabili messi in condivisione sono centinaia; un lavoro di tipo collaborativo di fatto è ormai fondamentale per una progettazione efficiente. LunchBox è un plug-in per Grasshopper per generare forme matematiche, come pannelli a griglie regolari e rappresenta una delle estensioni più utilizzate. Per riprodurre una superficie per esempio a celle esagonali il progettista solo dovrà definire la superficie di destinazione ed il numero di suddivisioni perché il programma possa operare. Grazie all'estensione Voronoi è possibile produrre facilmente le cosiddette celle di Voronoi su qualsiasi superficie NURBS⁷⁰. Weavebird permette invece di gestire più rapidamente l'editing delle *mesh*. Le estensioni più utilizzate per la ricerca dell'ottimizzazione della forma sono Kangaroo, Karamba3D, Millipede, e Galapagos. Il primo permette di verificare e risolvere i vincoli di una struttura svolgendo una simulazione interattiva, come Karamba3D, un programma che permette di analizzare la risposta di strutture, in particolare, di tipo reticolare e a

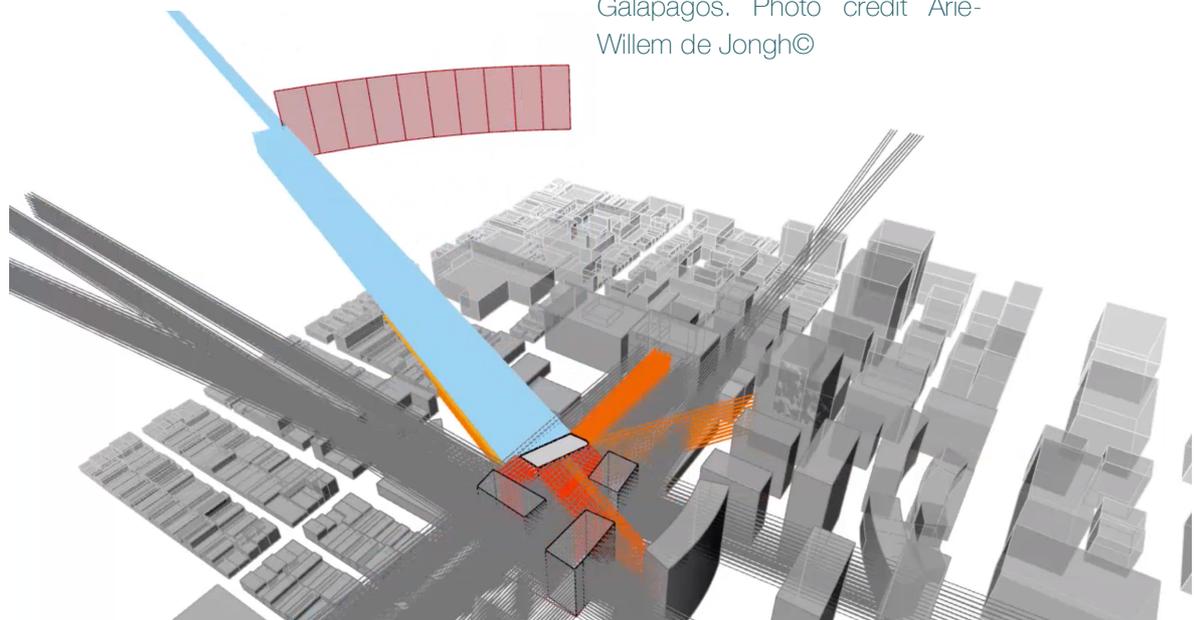
70. NURBS è un acronimo che sta per Non Uniform Rational Basis-Splines, traducibile in "*Splines* razionali non uniformi definite da una base", una classe di curve geometriche utilizzate nel settore della grafica computazionale per rappresentare curve e superfici.

conchiglia, sotto carichi arbitrari. Il vantaggio di Millipede è che l'ottimizzazione strutturale può essere gestita in diversi modi, grazie alla varietà possibili di analisi; si utilizza specialmente su telai ed elementi a scocca 3D, su elementi a piastra 2D, ma anche su elementi volumetrici 3D in generale.

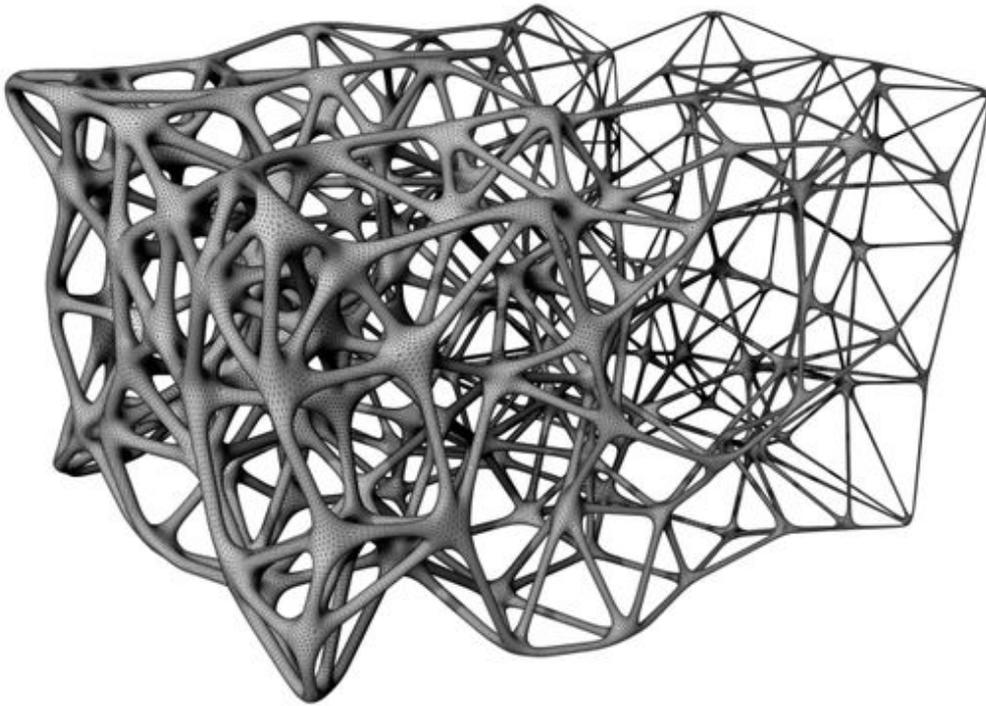
[Fig. 71] Esempio dell'elaborazione della forma ottimizzata, tramite il plug-in Galapagos. Photo credit Tatsunori Shibuya©



[Fig. 72] Esempio di ottimizzazione delle viste degli edifici in relazione all'impatto solare tramite il plug-in Galapagos. Photo credit Arie-Willem de Jongh©

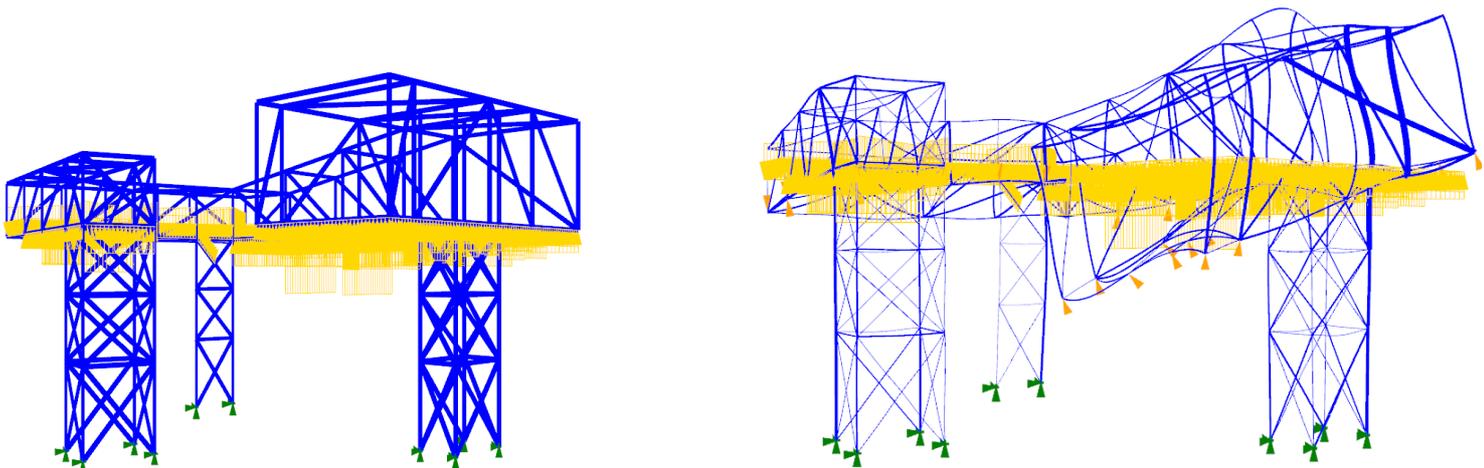


Galapagos è molto utile per ottimizzare strutture complesse con molte variabili. Si utilizza per esempio per l'ottimizzazione della forma di uno o più edifici per la massimizzazione delle viste, per ottimizzare un sistema di facciata in base alla radiazione solare o per dimensionare i componenti di una struttura spaziale minimizzando peso e costi.



[Fig. 73] Struttura ottimizzata ispirata alla morfologia porosa delle ossa, ottenuta tramite il plug-in Exoskeleton. Photo credit David Stasiuk©

[Fig. 74] Esempio della simulazione interattiva approssimata di una struttura al momento dell'applicazione dei carichi, tramite il plug-in Karamba3D . Fonte: <https://www.karamba3d.com/>



Il sistema di componenti e di relazioni tra algoritmi su cui si basa il programma apporta un grande vantaggio rispetto alla progettazione più classica, come già accennato nel paragrafo precedente, quale la velocità di esecuzione dei processi di creazione della forma. Tuttavia, la procedura di tali operazioni è assai complessa e richiede una formazione specifica da parte del progettista.

Risulta comunque difficile individuare quale sia il miglior programma di progettazione parametrica oggi, poiché dipende dalla complessità del progetto e delle relative necessità che richiede, ma sicuramente, Grasshopper viene considerato il software parametrico forse più completo. Revit, appartenente alla famiglia Autodesk dal 2002, è anch'esso un programma CAD e BIM di progettazione parametrica molto utilizzato oggi, seppur limitato in termini di *form-finding*, in quanto le interazioni algoritmiche definibili non sono infinite. Inoltre il livello di dettaglio che offre Grasshopper è molto maggiore, arrivando infatti alla precisione millimetrica. Rhinoceros nacque, se non altro, come strumento di modellazione per oggetti principalmente di *Jewelry design* o *Product design*, i quali richiedono una definizione del dettaglio molto elevata. Al contrario Revit limita la progettazione soprattutto alle strutture "architettoniche" mentre non è particolarmente predisposto nel campo dell'ingegneria civile, per la costruzione di strade e infrastrutture; per questo motivo Autodesk ha sviluppato un altro software BIM più specifico come Civil 3D.

L'interfaccia di Grasshopper e Dynamo, il suo corrispondente in Revit, sono molto simili. Dynamo si affida ad Autodesk Shape Manager per tutti i suoi calcoli geometrici, un'enorme libreria di elementi messi in condivisione, che però può creare problemi di compatibilità con il programma. Grasshopper per questo motivo è più rapido perché utilizza il motore geometrico di Rhino, il quale prevede prodotti sempre compatibili. A parte ciò, Dynamo resta ancora molto capace. Tale programma è in grado di funzionare autonomamente, anche se viene utilizzato maggiormente in parallelo con Revit. La sua principale qualità è dunque il fatto di poter interagire direttamente con il sistema BIM, oggi largamente impiegato soprattutto per la gestione esaustiva del "comportamento" di un complesso architettonico durante la sua vita utile.

Tuttavia l'ottica di progettazione verso la quale si sta dirigendo l'architettura, soprattutto di questo ultimo decennio, prevede l'utilizzo in parallelo di differenti software, poiché ognuno è effettivamente specializzato in qualcosa di diverso. I sistemi BIM per esempio sono più utili per l'analisi dell'intero ciclo di vita di un complesso architettonico, mentre i programmi di progettazione generativa come Grasshopper sono utili soprattutto per l'ottimizzazione strutturale ed energetica, oltre che per compiere analisi prestazionali.

I casi studio proposti nelle pagine seguenti indicano esempi concreti di architetture, dalle più semplici e tradizionali a sofisticate e futuriste, le quali trovano la propria essenza biomimetica sia nell'efficienza delle strutture naturali a cui si ispirano, sia in quell'aspetto "vitale" ed organico ottenuto grazie alle potenzialità dei software parametrici.

CASI STUDIO | La progettazione parametrica

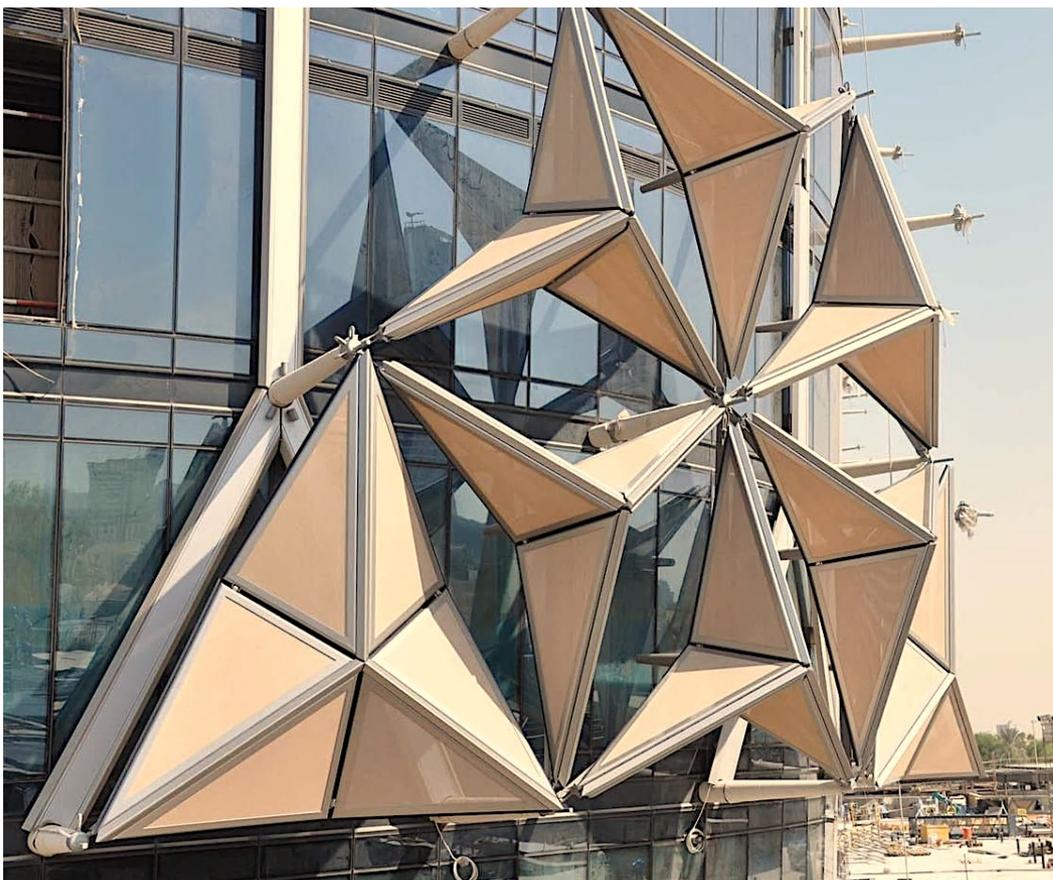
Un celebre esempio che dimostra come la progettazione parametrica permetta di progettare sistemi sofisticati e dinamici in grado di relazionarsi con l'esterno è quello delle Al Bahar Towers di Abu Dhabi, ideato dallo studio Aedas, in collaborazione con Arup. I progettisti sono stati in grado di gestire il funzionamento della facciata in risposta all'esposizione al sole, precisamente in base al cambiamento degli angoli di incidenza durante i diversi giorni dell'anno, ottenendo un risultato decisamente accattivante alla vista. Le analisi dei flussi solari nei diversi giorni dell'anno sono state eseguite con l'aiuto di software parametrici, per cui è stato possibile individuare il più adeguato sistema di ombreggiamento in apertura e chiusura da adattare alle due torri; il team ha inoltre ricavato la porzione precisa della facciata nord dove non era richiesto alcun sistema di oscuramento.

Il design e la forma generale dell'edificio sono stati ottimizzati per migliorare la ripetizione del pannello triangolare, effettuando inoltre la planarizzazione delle superfici vetrate, una scelta che ha contribuito a ridurre significativamente la complessità del sistema e contenere i costi. Inoltre, la pianta radiale delle torri, oltre ad essere sinonimo di efficienza in termini di superficie, ottenendo

[Fig. 75] Al Bahar Towers, Aedas Architects, completate tra il 2010 e il 2012. Per un totale di 150m d'altezza e 25 piani, ospita circa 1000 impiegati. Il progetto vinse il Tall Building Innovation Award nel 2012 ed il premio Society of Façade Engineering Award 2013. Photo credit Beno Saradzic©



il volume maggiore con la superficie minima, è stato articolato per ridurre l'esposizione solare sulle superfici maggiormente esposte. La corona della torre è stata tagliata ad angolo per massimizzare il guadagno solare per i pannelli fotovoltaici della copertura. La geometria regolare ma complessa della facciata è frutto di una progettazione parametrica accurata. Il risultato è una struttura a nido d'ape, un'ottima soluzione in termini strutturali, sismici e in relazione ai carichi del vento, considerando il fattore aerodinamico. I progettisti si sono ispirati alla tradizione araba del *mashrabiya*, una configurazione efficiente molto antica di ombreggiamento e protezione, reinterpretata in questo caso in chiave tecnologica. Tale sistema evita inoltre la necessità di vetri molto scuri, riducendo significativamente così la necessità di illuminazione artificiale, fornendo al tempo stesso una migliore visuale per gli occupanti dell'edificio. I triangoli costituenti la *texture* della facciata intelligente, possono essere paragonati a degli ombrelli che si aprono e si chiudono in base alla luce solare grazie a degli attuatori, controllati da sensori tramite il Building Management System, un sistema di controllo installato negli edifici che controlla e monitora le apparecchiature meccaniche ed elettriche dell'edificio. Il team sviluppò diversi modelli per la simulazione del movimento, ispirandosi agli origami. Ogni triangolo è costituito da una rete in fibra di vetro rivestita in PTFE, la miglior soluzione in termini di resistenza a temperature elevate, oltre ad essere "autopulente". Tale geometria è inoltre stata studiata per reagire alla luce solare riducendo il fattore di abbagliamento, risparmiando fino ad un 50% di energia per il raffrescamento dell'ambiente interno. Un capolavoro ed un trionfo insomma dell'architettura parametrica che, tuttavia, costò ben 245'000'000\$ all'Abu Dhabi Investment Council, confermando un'ennesima volta la capitale degli Emirati una delle città più innovative nel settore dell'architettura.



[Fig. 76] Particolare della facciata intelligente. I triangoli sono collocati a più di un metro di distanza dalla facciata. Tale conformazione ha inoltre favorito l'utilizzo di vetri non troppo oscuranti e un relativo risparmio dei costi. Photo credit Arup©

CASI STUDIO | La progettazione parametrica

Alcuni studenti e ricercatori dell'Institute for Computational Design (ICD) e l'Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE) dell'Università di Stoccarda, tra il 2013 e il 2014, hanno messo a punto un padiglione in grado di dimostrare le potenzialità dei nuovi processi di progettazione parametrica e di fabbricazione robotizzata. Tale progetto conferma la tesi secondo la quale la collaborazione di un team multidisciplinare, costituito in questo caso da biologi, paleontologi, architetti ed ingegneri, sia risultata fondamentale per un approccio biomimetico applicato all'architettura, unito alla fabbricazione robotica e a innovativi metodi computazionali. La particolare struttura, tessuta tramite una tecnica di avvolgimento robotizzata, si ispira al guscio dei coleotteri: ciò ha reso possibile creare una struttura resistente ma leggera, garantendo una totale libertà geometrica. Il modulo più grande presenta un diametro di 2,6 m ed un peso di soli 24,1 kg, mentre la superficie che ricopre il padiglione è di 50 m², per un totale di 593 kg. Grazie alla collaborazione con l'ANKA Synchrotron Radiation Facility e l'Institute for Photon Science, mediante strumenti di tomografia micro-computerizzata è stato possibile studiare e analizzare la struttura dei gusci di vari coleotteri.

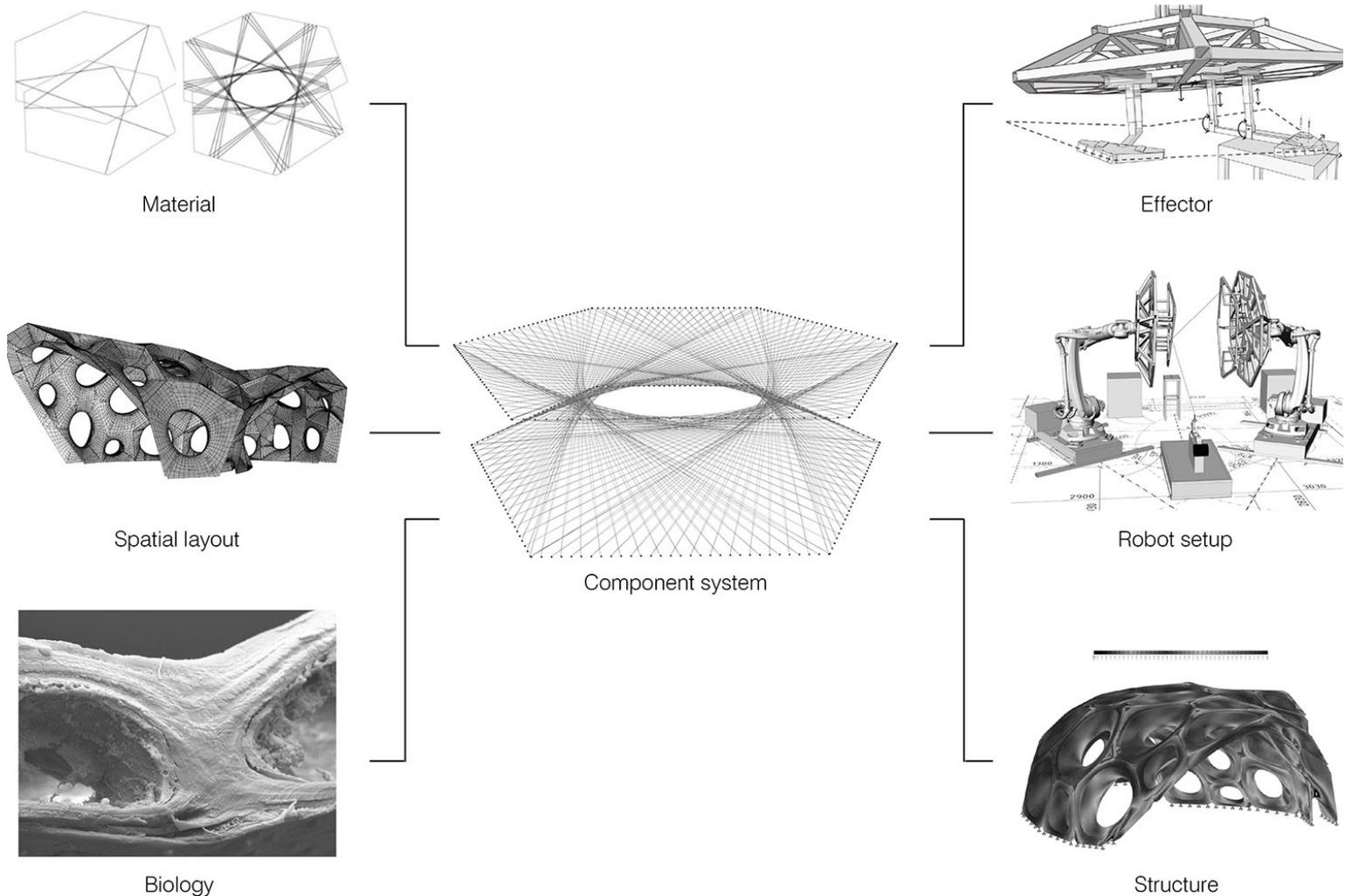
[Fig. 77] ICD-ITKE©



In seguito, tramite programmi di modellazione parametrica è stato possibile riprodurre le forme geometriche del guscio, creando un sistema a doppio strato.

Nello specifico, la struttura complessa del padiglione richiama la disposizione a doppia curvatura a colonna che si osserva appunto al microscopio nel guscio di coleottero. Il sistema modulare a doppio strato del padiglione inoltre si basa sulla morfologia delle trabecole e sulla disposizione delle fibre. Per avvicinarsi il più possibile alle caratteristiche del guscio e per realizzare il padiglione è stato impiegato un composto di polimeri rinforzati con fibre di vetro e carbonio, un materiale leggero e resistente, che avvolge la struttura portante in acciaio; è il differente posizionamento delle fibre ad incidere sulla libertà e complessità geometrica. Il metodo di fabbricazione dei moduli poligonali impiegato, senz'altro innovativo, ha semplificato largamente il processo di produzione: nella fattispecie si tratta di una serie di algoritmi che regola la sequenza specifica di avvolgimento della fibra in modo che sia resistente sfruttando le curvature. Inoltre, è stato calcolato che i due bracci robotici dovessero essere regolabili per tutti e 36 i pannelli componenti il padiglione; tale metodo ha anche evitato la produzione di scarti.

[Fig. 78] L'iter del processo di generazione del padiglione. Photo credit ICD-ITKE©



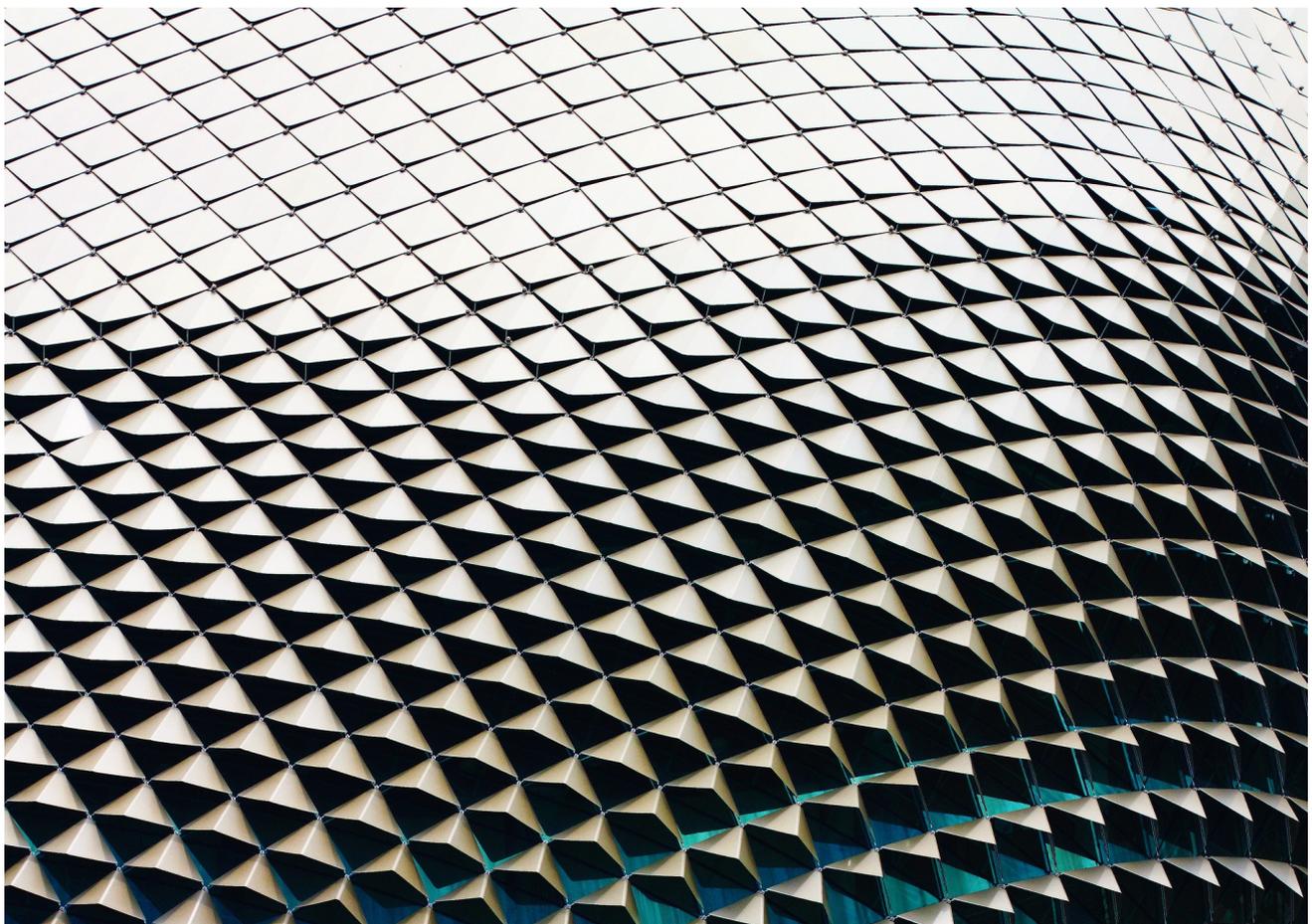
CASI STUDIO | La progettazione parametrica

L'Esplanade Theatre di Singapore, completato nel 2002, è un progetto di DP Architects, in collaborazione con Michael Wilford & Partners di Londra. Conosciuto come "The Durian", diventò indubbiamente un riferimento rappresentativo per la città di Singapore, dai caratteri contemporanei ed asiatici allo stesso tempo, una vera sfida per gli architetti: un edificio essenzialmente vetrato ma al tempo stesso protetto dal sole e dal calore.

Il programma si compone di ben quattro teatri, un'ampia sala da concerto, negozi, sale prove ed uffici. La qualità del suono richiesta risulta essere una tra le migliori al mondo, un prodotto del meticoloso lavoro da parte della società americana ARTEC Consultants Inc.

Le due "cupole" del teatro e della sala da concerto sono composte da una struttura relativamente leggera di un sistema di travi curve in acciaio, mentre ciò che indubbiamente rende unico tale complesso è la facciata: di giorno filtra la luce naturale regalando dei giochi di luce unici, mentre di notte risplende sulla città come una lanterna sulla costa. La suggestiva pelle esteriore è composta da un rivestimento triangolare in alluminio, che richiama un frutto asiatico, il durian. Poiché la posizione relativa del sole è pressoché costante tutto l'anno a Singapore, gli architetti

[Fig. 79] Esplanade Theatre, DP Architects, dettaglio della copertura bio-ispirata. Fonte: <https://www.dpa.com.sg/>



hanno ideato un sistema di rivestimento fisso: gli schermi triangolari sono stati ideati per essere più aperti o chiusi a seconda dell'angolo di incidenza del sole, per proteggere le facciate vetrate dalla luce diretta e apportando un miglioramento delle viste dall'interno.

Come uno schermo protettivo, analogamente al durion per difendersi dalla sovraesposizione solare, tale configurazione punta soprattutto all'ottimizzazione dei consumi energetici. Tale sistema permette infatti di ridurre i consumi energetici del 30%, in particolare con una riduzione dell'illuminazione artificiale del 55%. Un connubio perfetto insomma tra principi naturali, architettura ed efficienza.

Il programma si compone di ben quattro teatri, un'ampia sala da concerto, negozi, sale prove ed uffici. La qualità del suono richiesta risulta essere una tra le migliori al mondo, un prodotto del meticoloso lavoro da parte della società americana ARTEC Consultants Inc.



[Fig. 80] Il durian, il frutto della pianta asiatica del durio.



[Fig. 81] Esplanade Theatre, illuminazione notturna. Photo credit DPI Architects©

Il progetto del Shi Ling Bridge, solo idealmente completato tra il 2009 e il 2010, nasce nella foresta di Pietra nello Yunnan, patrimonio dell'Unesco della zona centro meridionale della Cina. Lo studio di architettura londinese di Tonkin Liu, in collaborazione con gli ingegneri di Arup, ha sviluppato una tecnica strutturale innovativa denominata *Shell Lace*, la quale prende ispirazione dalla conformazione del guscio di mare. Con l'aiuto della progettazione digitale avanzata e un'analisi ingegneristica sulle prestazioni delle conchiglie, è stato possibile generare una geometria nervata, sinuosa ed accattivante. La conformazione del guscio del mollusco, dovendo garantire la massima protezione all'animale, presenta la massima efficienza strutturale possibile, in termini di rigidità e resistenza e, allo stesso tempo, leggerezza: la conchiglia infatti presenta delle nervature che fanno sì che vi sia un risparmio di materiale. Analogamente l'architettura innovativa di Tonkin Liu rappresenta l'unione di massima leggerezza e minimizzazione del materiale, garantendo la massima resistenza strutturale. La sperimentazione tridimensionale tramite software parametrici per l'analisi di forme complesse, è stata integrata da metodi più tradizionali come modelli fisici fatti a mano, di carta e plastilina.

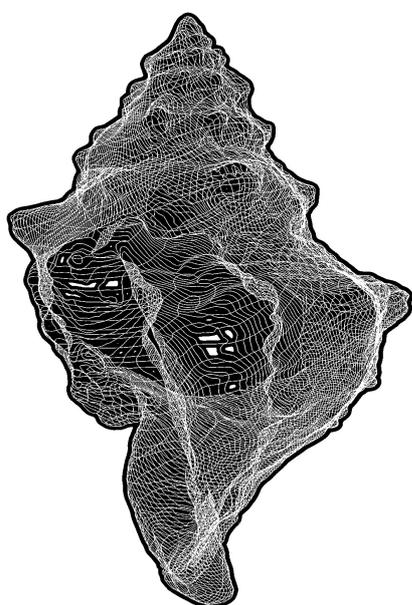


Applicata all'architettura e all'ingegneria civile, la tecnica del Shell Lace permette di irrigidire la struttura, riprendendo la conformazione ondulatoria. L'ottimizzazione strutturale si ritrova inoltre nella particolare torsione della colonna portante, dalla quale nascono i tre archi asimmetrici, nonché i veri e propri percorsi curvilinei. Per alleggerire il peso ed economizzare i costi del materiale, la scelta degli architetti è stata quella di perforare la struttura in lamiera metalliche, spesse solo 15 mm.

Il ponte offre uno spettacolare scenario naturale, uno dei più incredibili della Cina, creando un percorso pedonale e ciclabile di ben 75 metri. Per la sua innovatività fu proclamato vincitore del AJ/Lend Lease Award, tuttavia, non venne mai realizzato. I principi della tecnica *Shell Lace* vennero messi in pratica per la prima volta solo nel 2012, con il progetto di Burnley del *Rainbow Gate*, nella contea del Lancashire.



[Fig. 82] Rainbow Gate, studio Tonkin Liu, 2012, Burnley, Inghilterra. Il nome del padiglione deriva dall'effetto della rifrazione della luce che passa attraverso la copertura in lamiera perforata. Photo credit Tonkin Liu©.

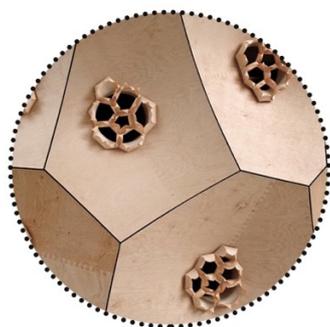


[Fig. 83] A sinistra, concept del ponte Shi Ling, in onore di un'esposizione presso il Royal Institute of British Architects. A destra, l'analisi di una conchiglia tramite un programma di modellazione 3D parametrico. Photo credit Tonkin Liu©

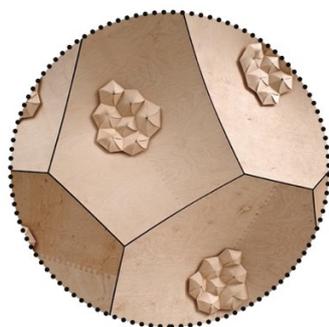
CASI STUDIO | La progettazione parametrica

Che gli edifici del futuro siano inevitabilmente legati ai materiali innovativi lo hanno dimostrato sino ad oggi numerosi prototipi, come per esempio i due esperimenti *Hygroskin* ed *Hygroscope*, una ulteriore fusione tra scienza biomimetica ed architettura parametrica. Il team, composto dal gruppo Menges Achim di Stoccarda ed i colleghi Steffen Reichert e Oliver David Kriegha, ha ideato due strutture in grado di automodificare la propria conformazione fisica in base alle variazioni climatiche, beneficiando solamente delle caratteristiche del legno. In questo caso non è richiesto alcun tipo di energia elettrica né alcun meccanismo metabolico, in quanto il materiale può reagire per proprio conto all'ambiente circostante regolando autonomamente l'umidità interna. *Hygroskin* (cfr. fig. 84) è un padiglione che è stato realmente costruito presso l'Università di Stoccarda, mentre *Hygroscope* (cfr. fig. 85) è un prototipo presentato nel 2012 presso il Centre Pompidou di Parigi, dopo ben cinque anni di ricerca: entrambi sfruttano le caratteristiche igroscopiche del legno, ovvero quella capacità di assorbire umidità dall'atmosfera quando il

CLIMA SECCO, CALDO



CLIMA UMIDO, FRESCO



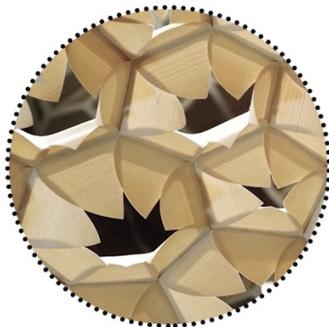
[Fig. 84] Apertura e chiusura. In basso: Hygroskin Pavilion. Photo credit ICD University of Stuttgart©



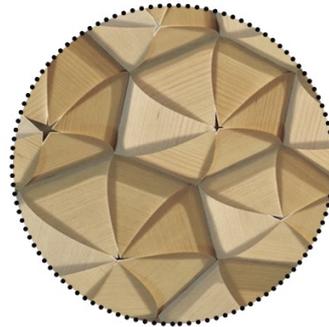
materiale è secco e di fornire umidità all'atmosfera quando è bagnato, mantenendo un grado di umidità equilibrata a quella circostante. Nel caso di *Hygroscope*, la teca in cui è posto riproduce perfettamente il microclima di Parigi, per cui è apprezzabile da vicino il cambio della facciata senza il bisogno di alcun macchinario. Ciascuna piccola apertura esagonale, anche in questo caso, presenta dei sottili fogli di legno triangolari che rispondono alle variazioni di umidità dell'ambiente, in base alla direzione delle fibre e allo spessore del materiale.

L'obiettivo che si pongono *Hygroskin* ed *Hygroscope* dunque, è principalmente quello di contrastare l'uso di apparecchiature di alta tecnologia, oltre che dimostrare che gli stessi risultati si possono ottenere sfruttando le strategie che già propone la natura, approfittando per esempio delle sole caratteristiche di un dato materiale. La tecnologia utilizzata si limita all'impiego di software parametrici basati su algoritmi generativi, di fondamentale importanza per la generazione della forma assai complessa, per il calcolo del materiale e per consentire la reattività della struttura meteo-sensitiva.

CLIMA SECCO, CALDO



CLIMA UMIDO, FRESCO



[Fig. 85] Apertura e chiusura. In basso, prototipo del padiglione Hygroscope, Centre Pompidou, Parigi. Photo credit Achim Menges©



4.4 L'urbanistica parametrica⁷¹

Gli strumenti di modellazione parametrica risultano essere efficaci su tutte le scale, dall' *Interior design*, all'architettura, alla progettazione urbana su larga scala. Partendo dalla considerazione sulla somiglianza tra un edificio ed un organismo vivente, di fatto, la città può essere considerata un insieme di elementi "vivi" che condividono lo stesso spazio: respira, filtra, si adatta all'ambiente. La metropoli, così come il piccolo paese, è un luogo di convivenza e implica perciò differenti tipologie di flussi, di persone, di trasporti, di energia e, fondamentalmente, l'architetto deve comprendere come gestirli nella maniera più efficiente. Infine, consuma inevitabilmente risorse energetiche, acqua e aria: la progettazione parametrica a livello urbano, in questi ultimi anni, sta proponendo soluzioni sempre più valide, dirigendosi necessariamente verso ideali il più sostenibili possibile.

Peter Schumacher invita gli architetti del futuro a comprendere sensibilmente la città, a livello di interazioni, relazioni e di utilizzo degli spazi, senza temere, del resto, di andare incontro alla creazione di un nuovo ordine architettonico. In relazione alla crisi ambientale odierna, ambire ad un futuro migliore e ad uno sviluppo verso il progresso senza investigare prima su quali siano le morfologie architettoniche da rivedere o da riprogettare, sembrerebbe più una strategia per riparare gli errori esistenti piuttosto che provare ad eliminarli. L'architettura si pone quindi a livello sociale come quella forza ordinatrice, quell'istituzione, tesa

71. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- Buhl J., Gautrais J., Kuntz P., Reeves N., Solé R. V., G. Theraulaz, Valverde S., *Topological patterns in street networks of self-organized urban settlements*, ResearchGate, Febbraio 2006

- Schumacher P., *Parametric Urbanism* (conferenza), AA School of Architecture, 6 Febbraio 2007

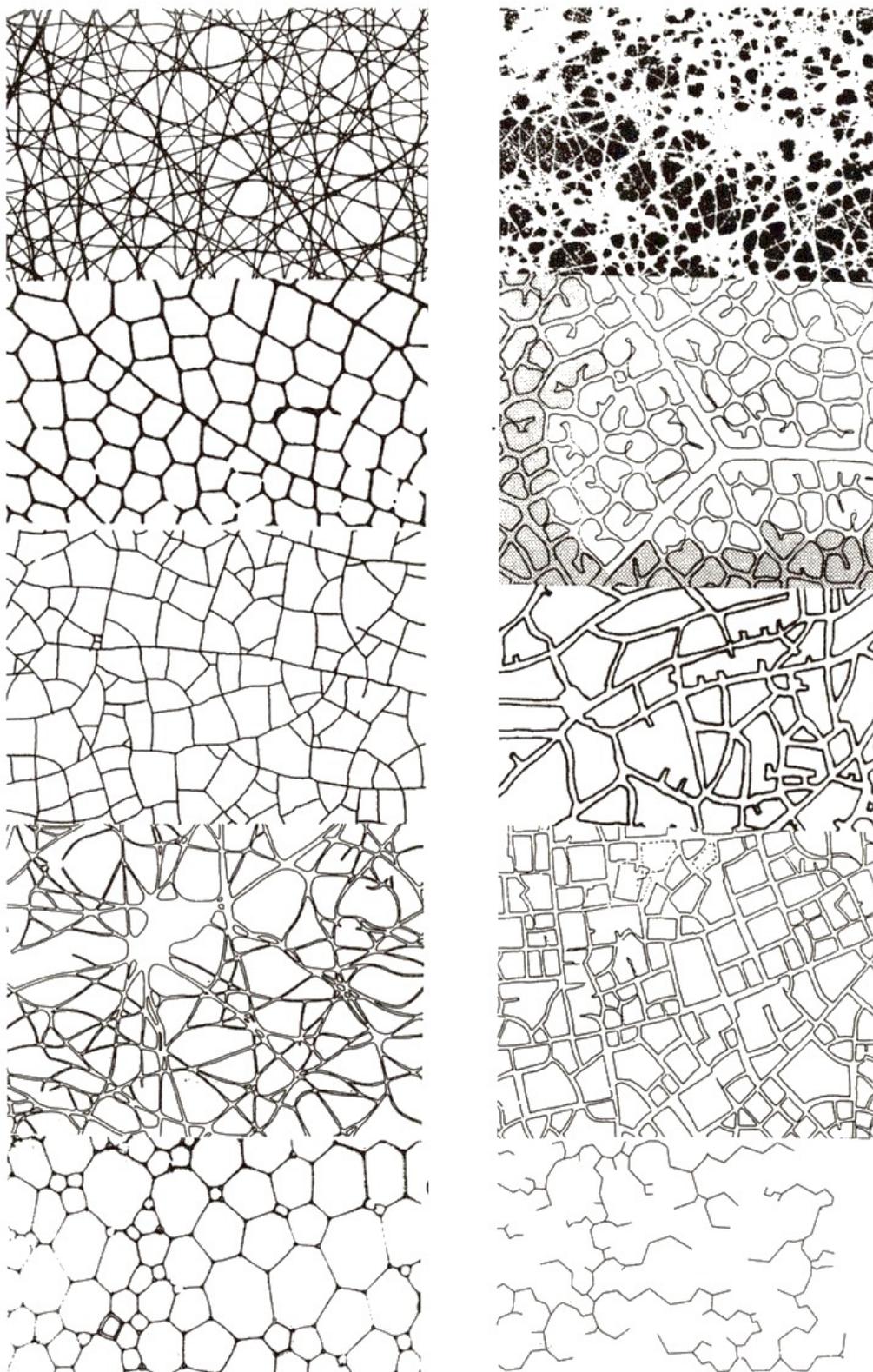
- Schumacher P., *Parametricism: a new global style for architecture and urban design*, AD Architectural Design – Digital cities, vol. 79, n. 4, Luglio/Agosto 2009

- Schaur E., *Ungeplante Siedlungen. Non-planned Settlements. IL 39*, Karl Krämer, Stoccarda, 1992

- <http://www.iaacblog.com/>

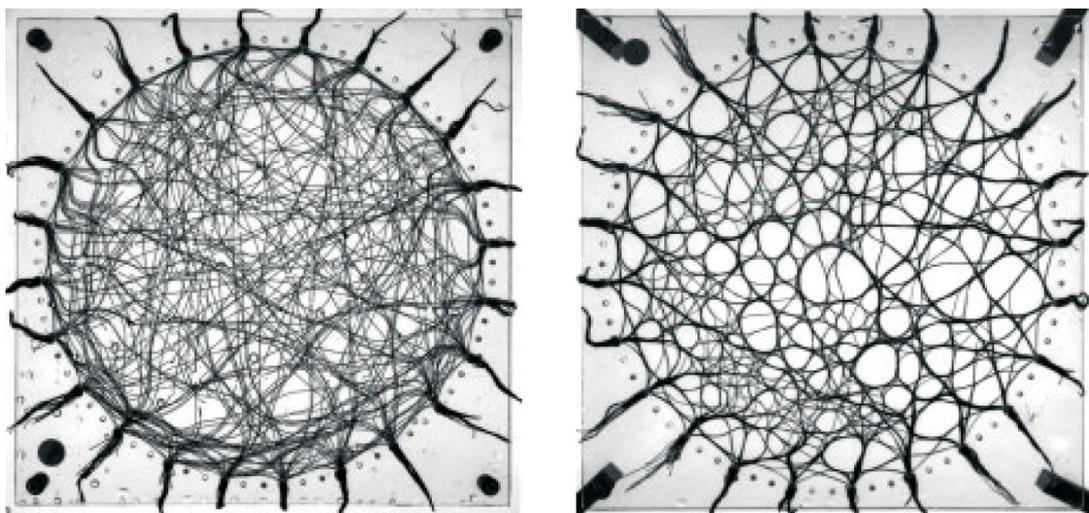
a garantire una vita produttiva, regolando e curando le interazioni e la comunicazione, dall'edificio alla città, evitando conflitti e alienazione. Il design parametrico è un potente strumento per progettare nuovi spazi urbani ordinati e coerenti, seppur contraddistinti da un alto livello di complessità. Già Le Corbusier si rese conto che sebbene la natura si presenti sotto forma di caos, tuttavia è governata da uno spirito di ordine. Anche se la sua comprensione in merito all'ordine della natura fu limitata dalle conoscenze scientifiche del suo tempo, oggi possiamo rivelare che l'ordine matematico e apparentemente caotico che propone la modellazione parametrica non è altro che una reinterpretazione in chiave moderna del cosiddetto "percorso dell'asino" di Le Corbusier, nonché una semplificazione efficiente delle geometrie.

Frei Otto pubblicò nella sua celebre opera *Occupying and Connecting* uno studio sulle distribuzioni naturali; in figura 86 viene illustrato il confronto tra le differenti disposizioni spontanee degli insediamenti urbani con alcuni processi di suddivisione che si ritrovano in natura, simili alle foglie, alle cellule, o alla tela di un ragno. Fu evidente quindi che, anche se non apparentemente ovvio, le configurazioni urbane preesistenti studiate da Otto, presentassero una somiglianza di tipo morfologico a tali disposizioni naturali, in quanto corrispondenti alla necessità e all'istinto umano di ricreare un proprio habitat in una forma e in un modo il più naturale possibile. Così come il mondo biologico tenta di organizzarsi nella maniera più efficiente, è la spontaneità la componente che ordina l'agglomerato urbano, secondo un ordine riconducibile alla matematica. La città, analogamente a una popolazione di piccoli insetti, segue determinati andamenti istintivi che fanno sì che l'habitat e la propria organizzazione al suo interno sia intuitivamente un'approssimazione di uno schema efficiente in termini di distribuzione, flussi e vivibilità. Una considerazione interessante viene da uno studio condotto nel 2006, con il quale si dimostrò che a scala urbana le configurazioni ad albero risultano essere le più vulnerabili al momento di interrompere uno o più percorsi. Al contrario, i sistemi urbani interconnessi sono i più "robusti" ed efficienti, in quanto economizzano gli spazi di percorrenza, ottimizzando i tempi.

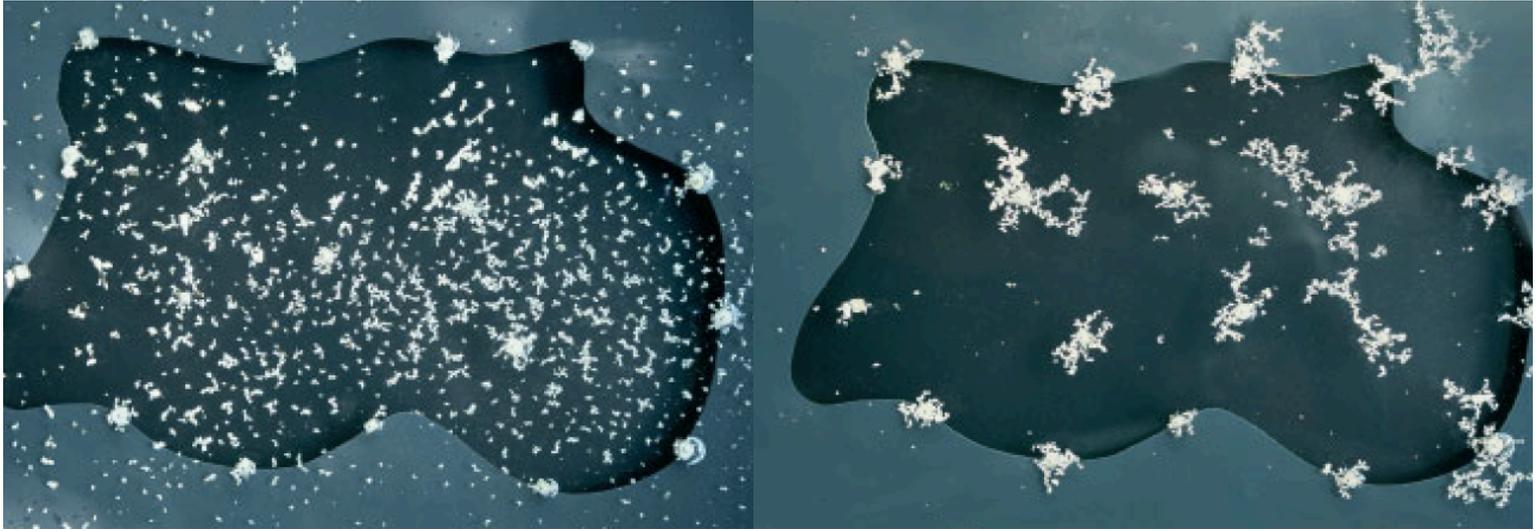


[Fig. 86] Immagine tratta da Frei Otto, *Occupying and Connecting*. Confronto tra processi di suddivisione del piano in natura (a sinistra) e negli insediamenti umani spontanei (destra). Fonte: <https://www.apps.acsa-arch.org/>

Già a partire dagli anni '80 Frei Otto condusse ulteriori esperimenti sui possibili schemi di insediamento urbano. Con un semplice filo di lana indagò quali fossero le connessioni più efficienti, creando un complesso di percorsi minimi, simile al lavoro di Marek Kolodziejczyk (*cf. fig. 87*), mentre con del polistirolo, dei magneti e degli aghi, basandosi sugli “attrattori”, ovvero i punti di massima concentrazione urbana - nel modello dei veri e propri poli magnetici - ottenne una morfologia simile a quella che si ritrova a livello urbano (*cf. fig. 88*). Analogamente, nell’osservare la pianta di una città storica, il nucleo più antico solitamente è contraddistinto da percorsi frenetici ed irregolari attorno ai relativi punti nevralgici della zona. L’idea di Frei Otto, così come la progettazione parametrica urbana oggi, fu quella di cercare di riorganizzare e “semplificare” la città, con l’intento di evitare quel caos, seppur naturale e spontaneo, che fino a quel momento aveva contraddistinto l’habitat: l’obiettivo di cui si occupa questo settore da poco più di un decennio a questa parte, è quello di arricchire il “sistema città” in un complesso più preciso, capace di valutare più sensibilmente le necessità dell’uomo.

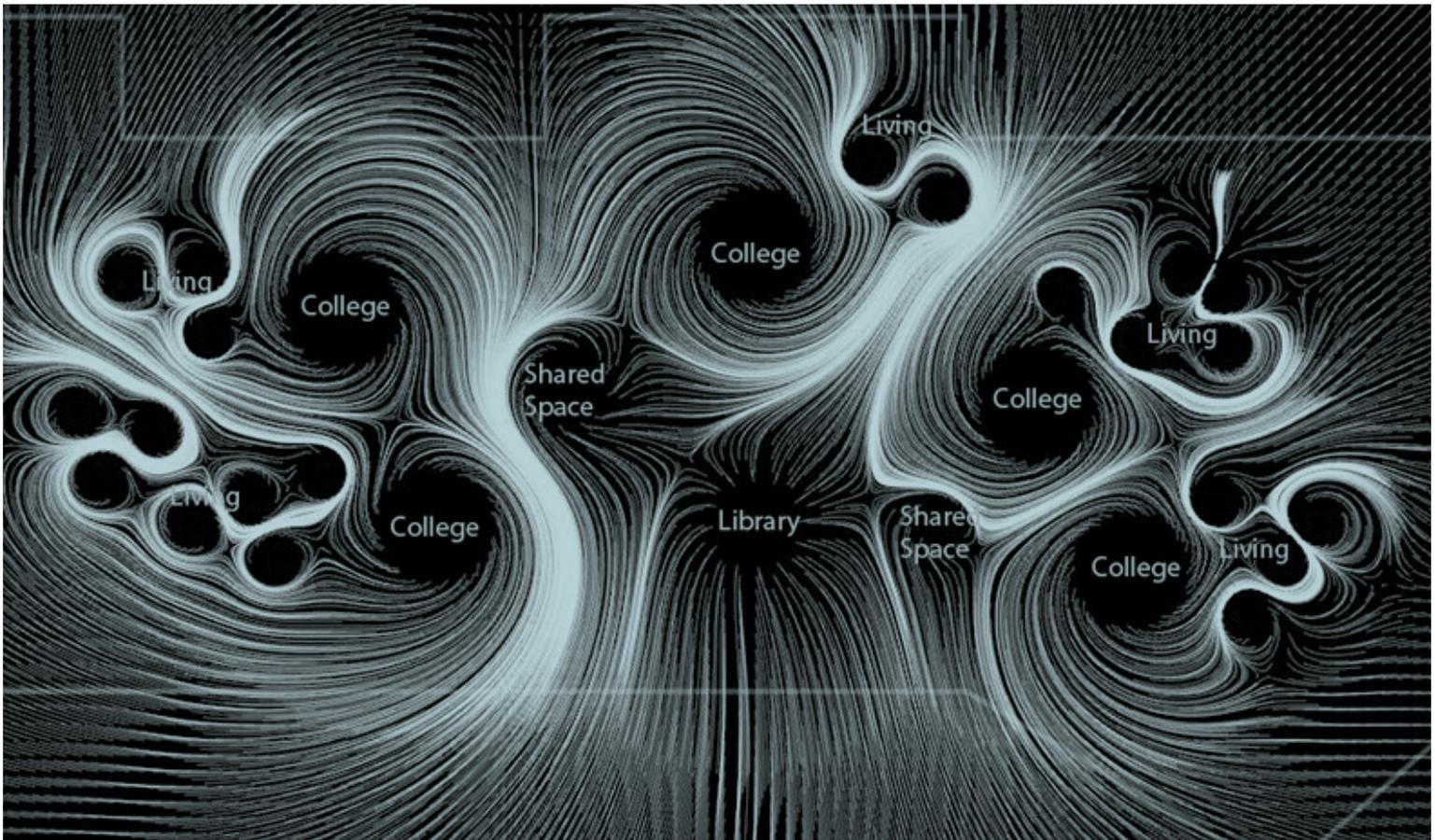


[Fig. 87] Marek Kolodziejczyk, modello a fili di lana per il calcolo di reti ottimizzate per i percorsi e gli spostamenti minimi all’interno della città, Institute for Lightweight Structures (ILEK), Stoccarda, 1991. Fonte: <https://hyonlim.tistory.com/>



[Fig. 88] Frei Otto, Institute for Lightweight Structures (ILEK), Stoccarda, 1992. Studio sulla concentrazione spontanea (in questo caso rappresentata tramite magneti e aghi) attorno ai punti nevralgici della città. Fonte: <https://hyonlim.tistory.com/>

[Fig. 89] Masterplan a livello urbano in base alla distribuzione e ai flussi; similitudine ad un campo magnetico. Photo credit ZHA©



Oggi, continuando tale logica di pensiero, abbiamo l'opportunità di poterci affidare all'indiscutibile capacità dei programmi di modellazione parametrica. Tale potenziale, a livello urbanistico e non solo, viene studiato particolarmente presso l'AADRL, attraverso il programma triennale di ricerca denominato *Parametric Urbanism*, vincitore di molteplici progetti.

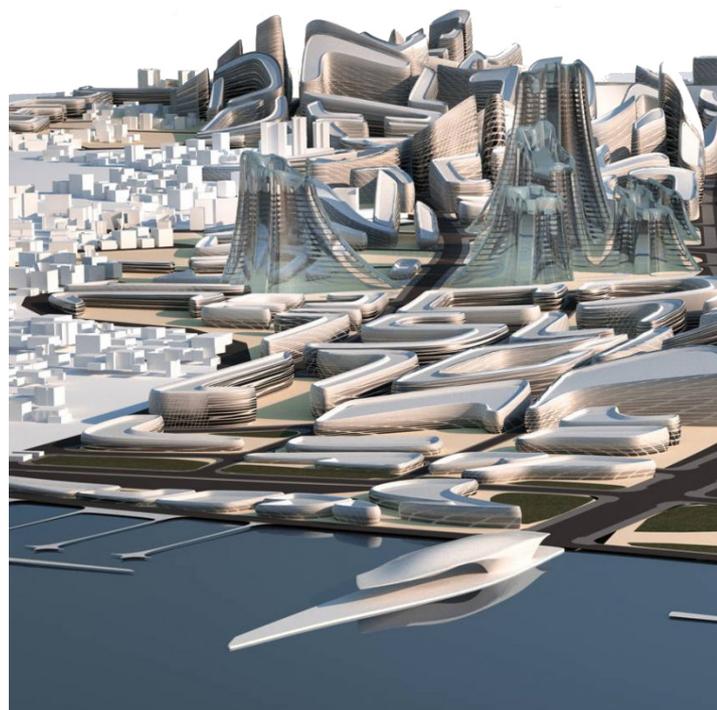
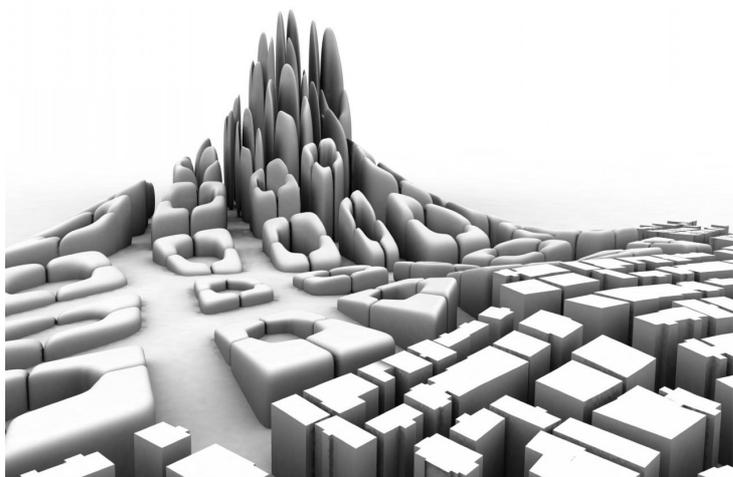
Il gruppo Zaha Hadid Architects sembra essere lo studio che finora più ha presentato idee valide a livello urbano di configurazioni e distribuzioni efficienti per le città del futuro (*cf. fig.89*). Le proposte di ZHA invitano a pensare a fluidi in movimento, flussi di onde, vortici, spirali. Patrick Schumacher li definisce "*sciame di edifici che vagano nel paesaggio*": non esistono linee e contorni netti, definiti. La città del futuro dovrà essere adattabile ad una quotidianità più dinamica, caratterizzata da una forte presenza tecnologica che incombe sullo stile di vita dell'uomo. Secondo tale filosofia, di conseguenza, dovendo ristrutturare più efficientemente la città, oltre a rivedere fattori come la "porosità" e la "respirazione" di un complesso urbano, cambierà anche il senso di orientamento al suo interno. Non si tratterà più infatti di identificare i riferimenti in concetti tradizionali - basandosi sulla posizione della tipica torre campanaria -, sebbene in percezioni locali, le quali potranno direzionarci. Le facciate stesse degli edifici, in relazione anche all'orientamento solare, avranno delle configurazioni tali da poter dirigere l'uomo, non più guidato da un sistema tradizionale di riferimento gerarchico, fatto prioritariamente di edifici e percorsi: l'urbanistica parametrica punta a creare nuove logiche di percorrenza, attraverso la riorganizzazione di nuovi tessuti, sistemi di collegamento, spazi aperti e molto altro, sempre nel rispetto delle condizioni topologiche del luogo. Non si dimentichino i grandi vantaggi dei software parametrici, in grado di svolgere ogni tipo di analisi a livello urbano. Nel caso del masterplan in Turchia (*cf. caso studio 21*) per la scelta dei percorsi è stato utilizzato il software Maya, che ha individuato la rete di deviazione minimizzata, riorganizzando piccoli cammini in "pacchetti di strade" più grandi.

Il *Kartal-Pendik Masterplan*, in fase di elaborazione dal 2005 da parte di Zaha Hadid, Architects, è il progetto urbano vincitore che propone la creazione di un nuovo centro urbano nella zona orientale di Istanbul. Per convertire un ex sito industriale in una nuova area funzionale e centrale della città, gli architetti hanno previsto la creazione di un nuovo distretto finanziario, così come teatri, auditorium, hotel, porti e residenze di alto livello. Il sito di progetto è ubicato nelle vicinanze di importanti linee di circolazione - incluse le maggiori infrastrutture di collegamento con la città e l'Europa e l'oriente -, i terminal portuali e le linee ferroviarie principali. Tale contesto, adiacente alla zona di progetto, ha rappresentato l'input per iniziare a tracciare i collegamenti principali, tra Kartal e Pendik, per definire la geometria del nuovo complesso urbano: il risultato è una griglia "deformata" (cfr. fig. 90), i cui assi longitudinali principali ne definiscono l'ossatura portante. Tale rete di collegamento, fondamentale per definire la densità delle differenti aree risultanti, è stata ricavata tramite il software Maya, definendo i percorsi secondo un approccio parametrico, rispettando i principi di minimizzazione, per esempio dei tragitti e dei tempi di percorrenza.



[Fig. 90] Definizione della griglia "deformata" in relazione ai percorsi primari e secondari. A destra, il masterplan definitivo. L'area totale di progetto è di 555 ettari. Photo credit ZHA©

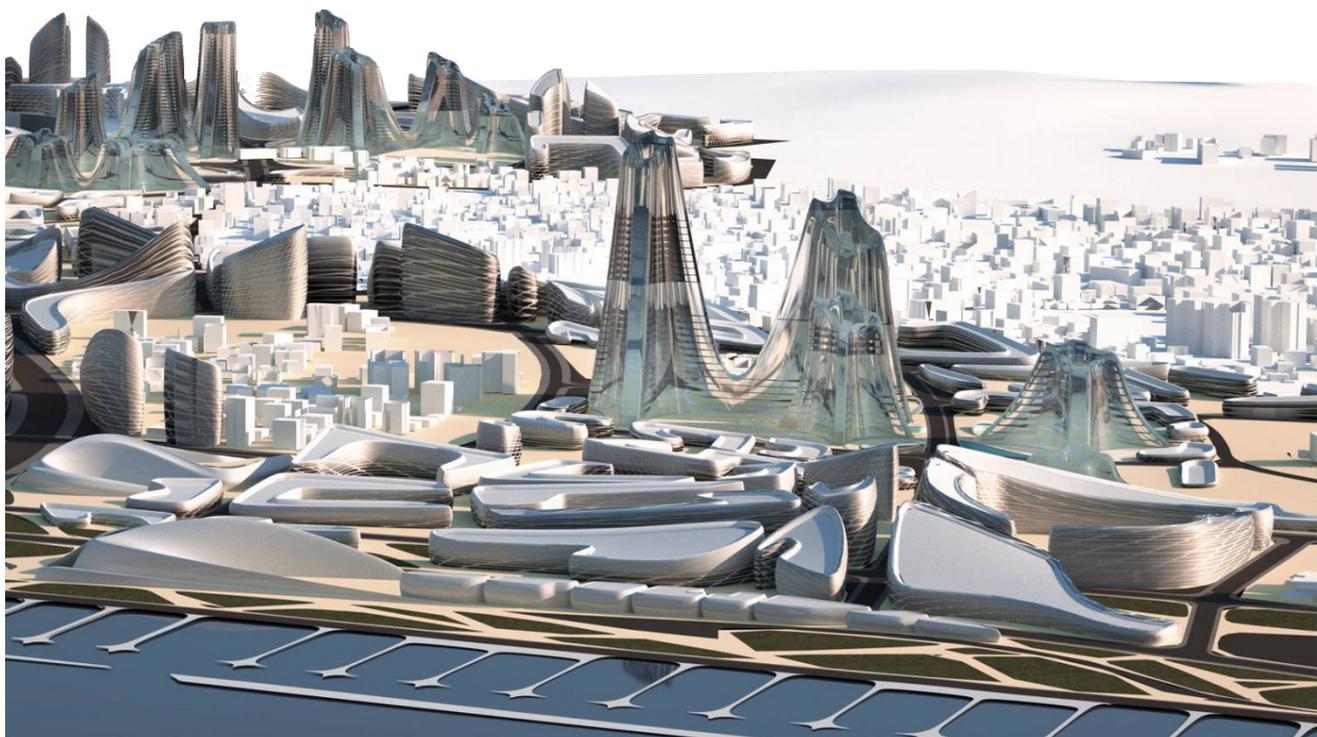
[Fig. 91] Concetto della variazione della densità urbana interpretata da ZHA. Le torri si estendono verso l'alto crescendo con la topografia del terreno, insieme ai blocchi di edifici più bassi. Photo credit ZHA©





Per quanto riguarda la distribuzione verticale, il team ha lavorato con due tipologie, a torre e a blocco perimetrale, per rispondere alla differente domanda di ogni quartiere. Le torri, che generalmente indicano un punto nevralgico della città, sorgono nei punti di attraversamento e negli incroci da cui partono altre reti di collegamento, mentre i blocchi vengono ripartiti lungo le vie secondarie. Il progetto punta alla omogeneità delle forme e quindi alla fusione di due tipologie così distinte, cercando di regolare in maniera graduale le altezze di entrambe, grazie al controllo del software. I picchi degli edifici indicano una restrizione dello spazio esterno, mentre i blocchi perimetrali più bassi sorgono in prossimità delle zone più ampie, come parchi e spazi comuni. Il masterplan proposto dimostra quindi un modo di intendere le logiche della nuova città del futuro, un sistema necessariamente dinamico e flessibile, adattabile contemporaneamente alla topografia e alla tipologia urbana, con l'obiettivo di integrarsi nella maniera più sensibile al contesto preesistente.

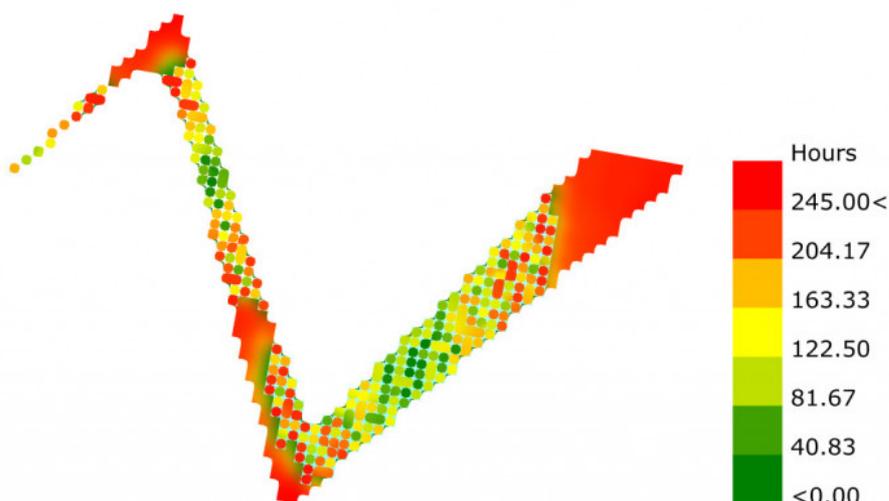
[Fig. 92] ZHA©



CASI STUDIO | L'urbanistica parametrica

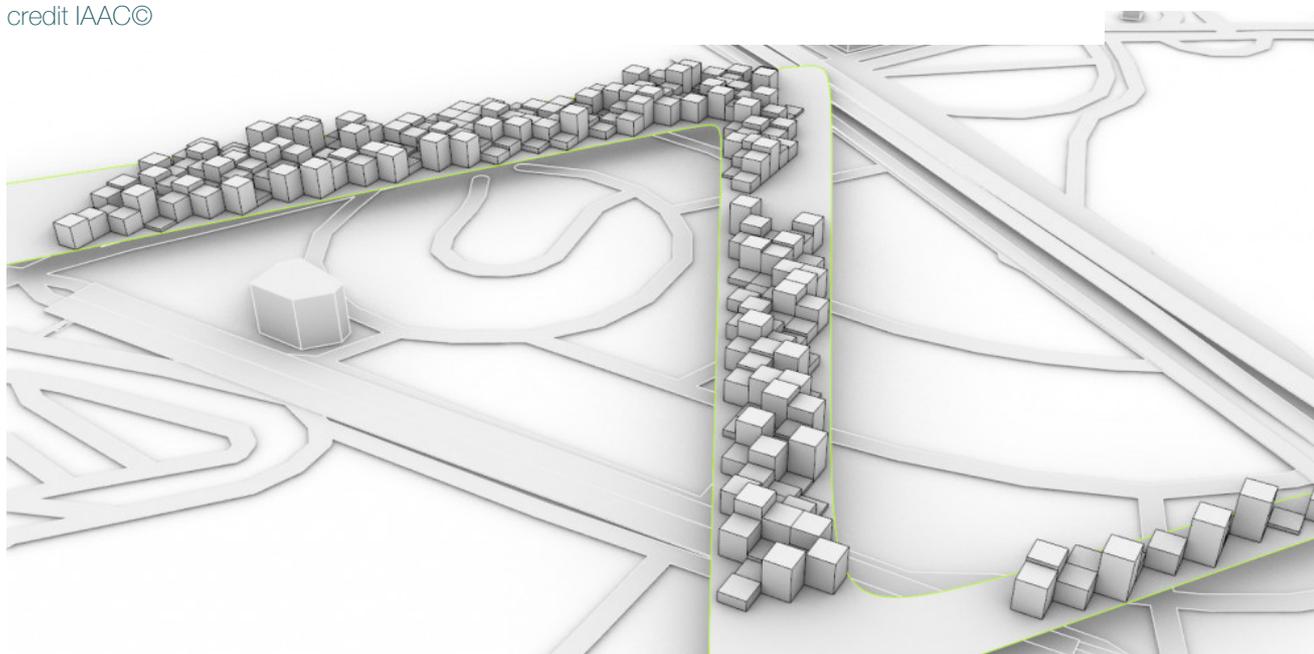
Secondo il corso di *Genetic Optimisation* tenuto presso IAAC, gli studenti sono stati invitati ad utilizzare software parametrici come Galapagos, Biomorpher - o programmi simili - con lo scopo di trovare la soluzione ottimale per una serie di interventi a livello urbano.

In entrambi i casi proposti, l'obiettivo era trovare la disposizione più efficiente da integrare nel tessuto preesistente di Città del Messico. Nel primo caso (cfr. fig. 94), tramite gli strumenti computazionali richiesti, le altezze ottimali degli edifici sono stati concepiti e calcolati in base alla radiazione solare durante le diverse ore del giorno (cfr. fig. 93), con lo scopo di ridurre la quantità di radiazione solare che colpisce la superficie del terreno e la superficie del tetto degli edifici stessi.



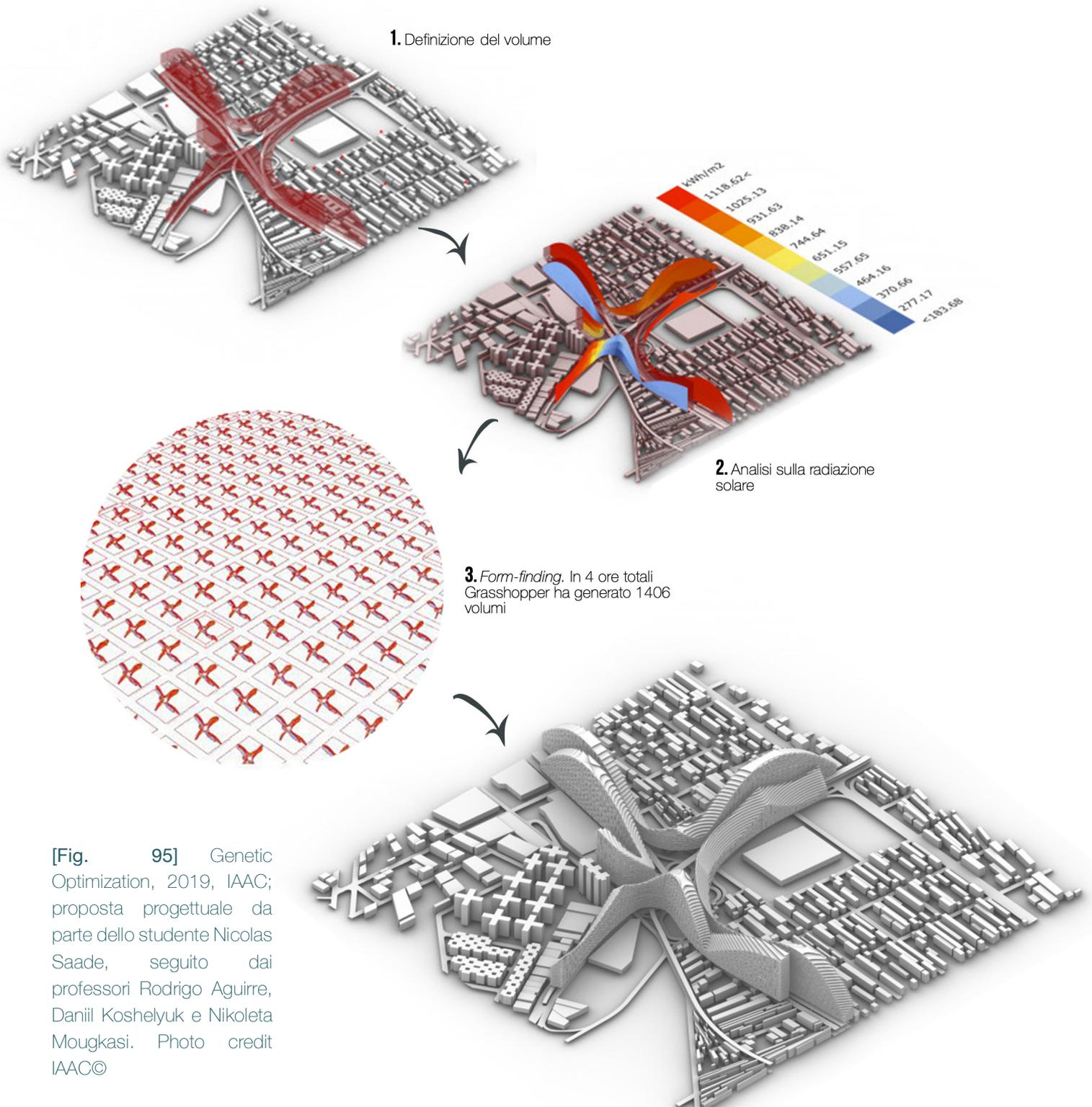
[Fig. 93] Analisi solare per la distribuzione ottimale degli edifici. Photo credit IAAC©

[Fig. 94] Genetic Optimization, 2019, IAAC; proposta progettuale da parte dello studente Pratik Girish Borse, seguito dai professori Rodrigo Aguirre, Daniil Koshelyuk e Nikoleta Mougkasi. Photo credit IAAC©

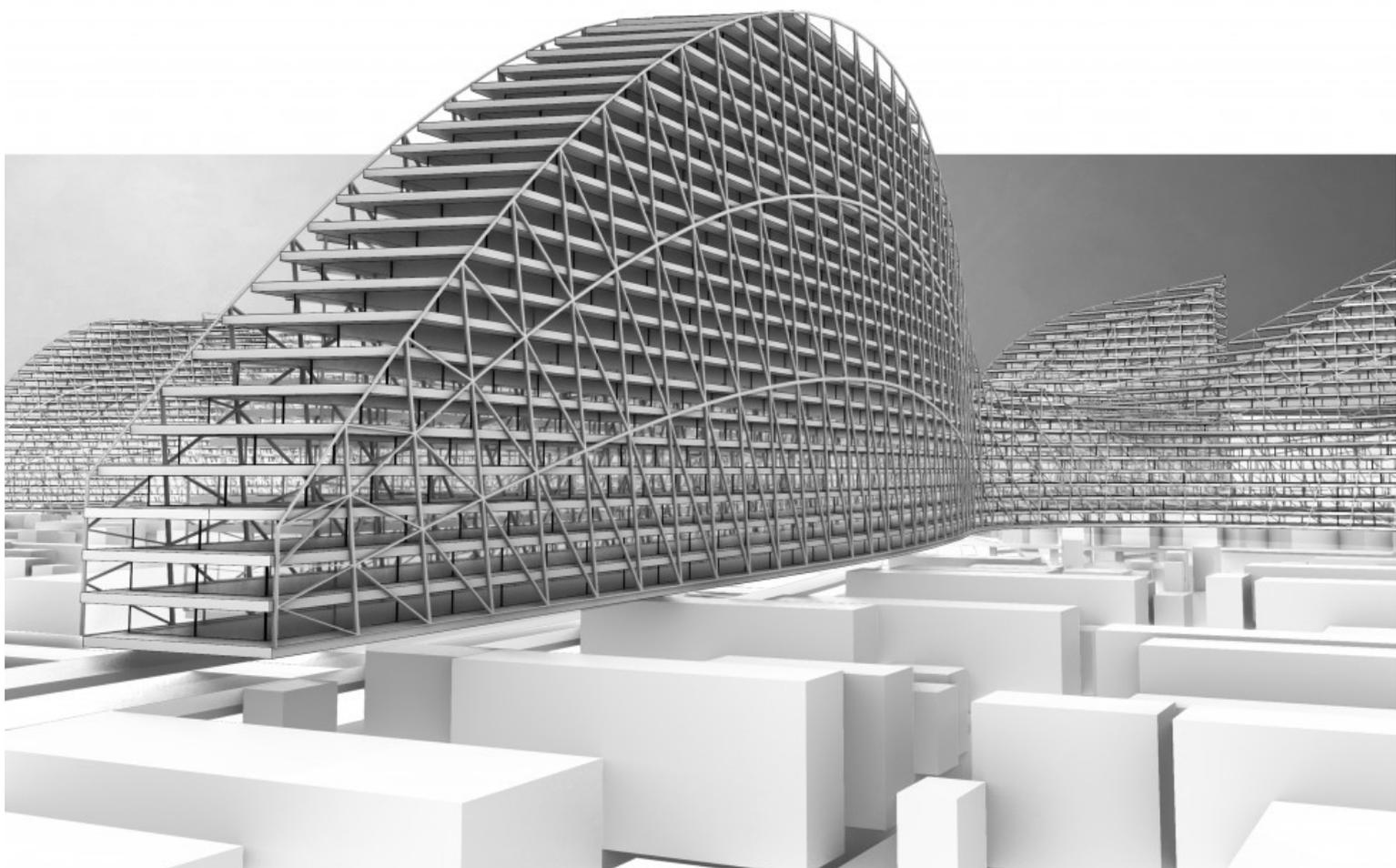


Tale analisi è stata necessaria per la definizione del tessuto urbano secondo i seguenti parametri: le superfici dove sono risultati i valori massimi di radiazione sono state destinate a spazi aperti, quali parchi, cortili e piazze, mentre i valori per definire l'altezza massima ottimale sono stati impostati con valori compresi tra i 3 e i 12m.

Anche nel secondo caso (cfr. fig.95) tramite i software Galapagos e Ladybug è stato possibile ottimizzare la forma degli edifici in relazione alla radiazione solare in base ai parametri indicati. Dopo aver ottenuto l'ottimizzazione della forma è stata infine applicata una griglia strutturale regolare per ripartire il volume in una serie di piani (cfr. fig. 96).



[Fig. 95] Genetic Optimization, 2019, IAAC; proposta progettuale da parte dello studente Nicolas Saade, seguito dai professori Rodrigo Aguirre, Daniil Koshelyuk e Nikoleta Mougkasi. Photo credit IAAC©



[Fig. 96] Render della proposta dello studente Nicolas Saade.
Photo credit IAAC©

4.5 Ragionare nella terza dimensione⁷²

Il nuovo stile a cui si riferisce Schumacher, conseguente alla progettazione generativa, si può dire sia così sfuggito dalla logica del piano bidimensionale, dirigendosi, anzi, verso le dinamiche della terza dimensione. Lo sviluppo esponenziale della tecnologia ha diretto i progettisti negli ultimi anni, anche se ancora un piccolo numero, verso l'esplorazione e la sperimentazione delle tecniche di stampa 3D, gettando poco a poco le basi per una nuova architettura del futuro. Se già l'approccio parametrico implica per il progettista un ribaltamento del processo mentale - limitandosi all'aspetto visuale -, addizionandovi la riproduzione tramite stampa 3D, si determina un condizionamento totale della logica del progetto: è fondamentale dunque, che il progettista abbia competenze sui processi necessari. D'altro canto si tratta, per il momento, di un campo ancora limitato, forse a causa della complessità di tale processo e alla sofisticatezza degli apparecchi robotici.

Tuttavia il metodo di stampa 3D rappresenta sicuramente un'ottima soluzione per una progettazione più sostenibile e "naturale". Linguaggi di programmazione e codificazione, *modelling* e stampa 3D oggi consentono di riprodurre in modo fedele forme complesse, tra cui funzionamenti e strutture cellulari di organismi, così come sistemi di organizzazione e di adattamento evolutivo tipici degli habitat naturali. I vantaggi che apporterebbe in campo biomimetico visto in questi termini, possono quindi far ben sperare in forti sviluppi futuri. Se la stampa 3D lascia molta libertà nella generazione di forme complesse, tuttavia bisogna conoscere nel dettaglio la tipologia della macchina utilizzabile e le restrizioni progettuali che comporta (*cf. fig. 98,99*). D'altro canto un vantaggio fondamentale da considerare è che la riproduzione tramite stampanti 3D non

72. Sintesi e rielaborazione delle seguenti fonti:

- <https://www.aniwaa.com/>

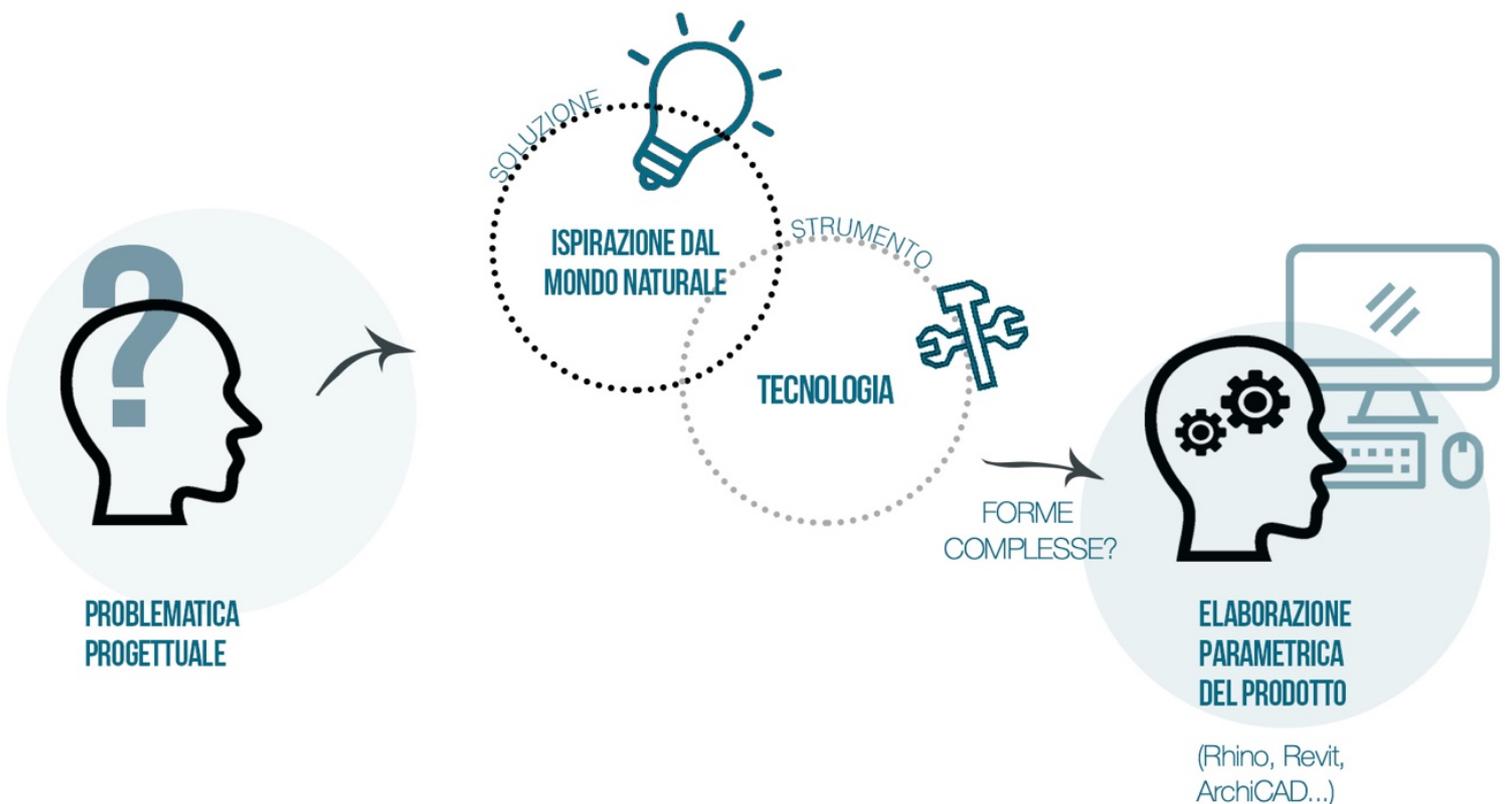
- <https://www.3dwasp.com/>

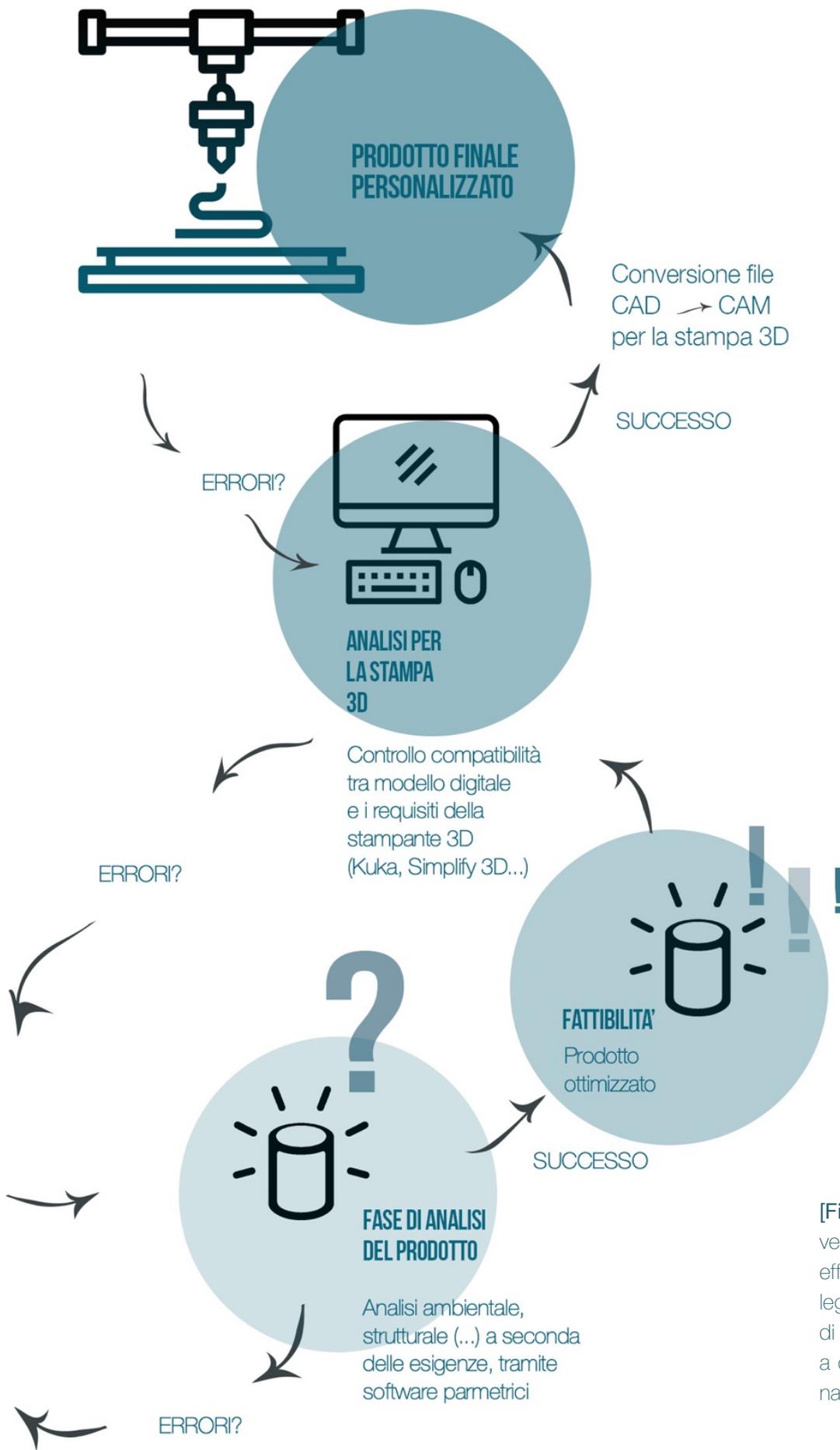
- <http://news.mit.edu/2017/3-d-graphene-strongest-lightest-materials-0106>

comporta grandi sforzi a livello di macchinari per la personalizzazione dell'artefatto: al contrario della produzione standardizzata, a un solo tipo di stampante corrispondono una quantità potenzialmente infinita di prodotti realizzabili. Tuttavia essendo ancora in fase di *testing*, la stampa 3D è ancora in svantaggio rispetto alla produzione a livello industriale, soprattutto a causa delle tempistiche piuttosto lunghe che richiede e i costi molto alti.

A seguire, entrando più nello specifico, si cercherà di riassumere il percorso progettuale attraverso le fasi dell'intero processo per la creazione dell'artefatto biomimetico, dalla fase di analisi sulle considerazioni iniziali, alla modellazione digitale, alla riproduzione in stampa 3D.

L'ARTEFATTO BIOMIMETICO





[Fig. 97] Il processo verso la risoluzione più efficiente dei problemi legati alla riproduzione di un prodotto ispirato a complesse strutture naturali.

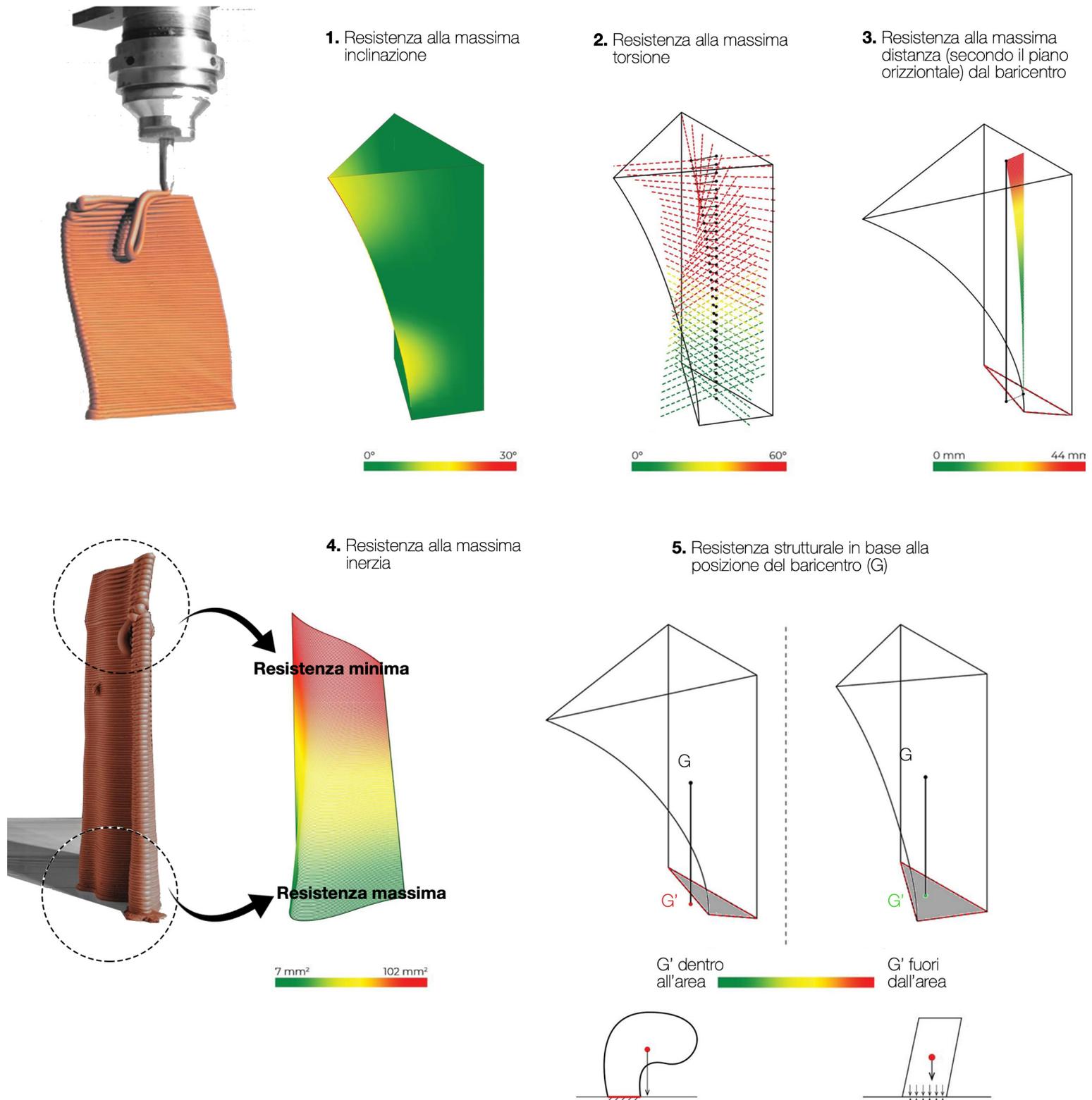
Come si evince, la progettazione 3D richiede al progettista non solo dimestichezza in quanto all'utilizzo dei software richiesti ma, soprattutto, implica ampie conoscenze sulle prestazioni dei materiali utilizzati per poter prevedere correttamente il relativo comportamento dei macchinari, come la fattibilità della riproduzione stessa del modello, considerando parallelamente tempi e costi. Tale tecnologia invita al progettista a considerare a priori nuovi parametri - di cui i metodi più tradizionali non tengono conto - che influenzeranno l'elaborazione del modello tridimensionale. Il tipo di materiale utilizzato e il grado di dettaglio che si vuole raggiungere condiziona le impostazioni di stampa, come lo spessore del *layer*, o ancora, più in generale, la morfologia della struttura stessa: se sono presenti curvature sporgenti eccessive, infatti, il materiale, a seconda della propria resistenza e dal tempo di essiccazione, potrebbe collassare. Per questo esistono limitazioni che vanno ben tenute a mente prima dell'approccio alla stampa. Tuttavia, esistono software come Cura, SLic3r o Simplify 3D, in grado di simulare dei test per verificare la validità del modello e limitare gli errori che, inevitabilmente, possono emergere al momento della stampa.

[Fig. 98] Analisi geometriche condotte da IAAC (Istituto di Architettura Avanzata della Catalogna) su dei modelli stampati in argilla cruda miscelata con additivi naturali. Gli errori possono essere di tipo manuale, o relativo alle deformazioni locali del materiale. Photo credit IAAC©



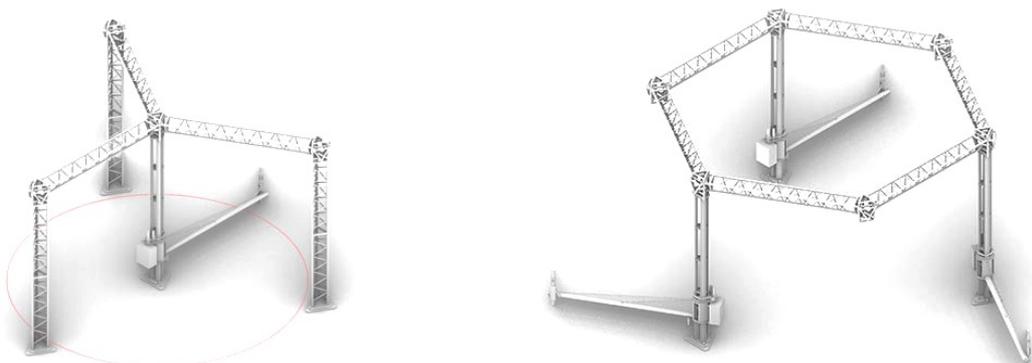
Il centro IAAC di Barcellona ha effettuato alcuni test su alcuni provini, come illustrato in fig. 99, facendo delle considerazioni sulle restrizioni della miscela di argilla ed additivi naturali utilizzata al momento di stampa.

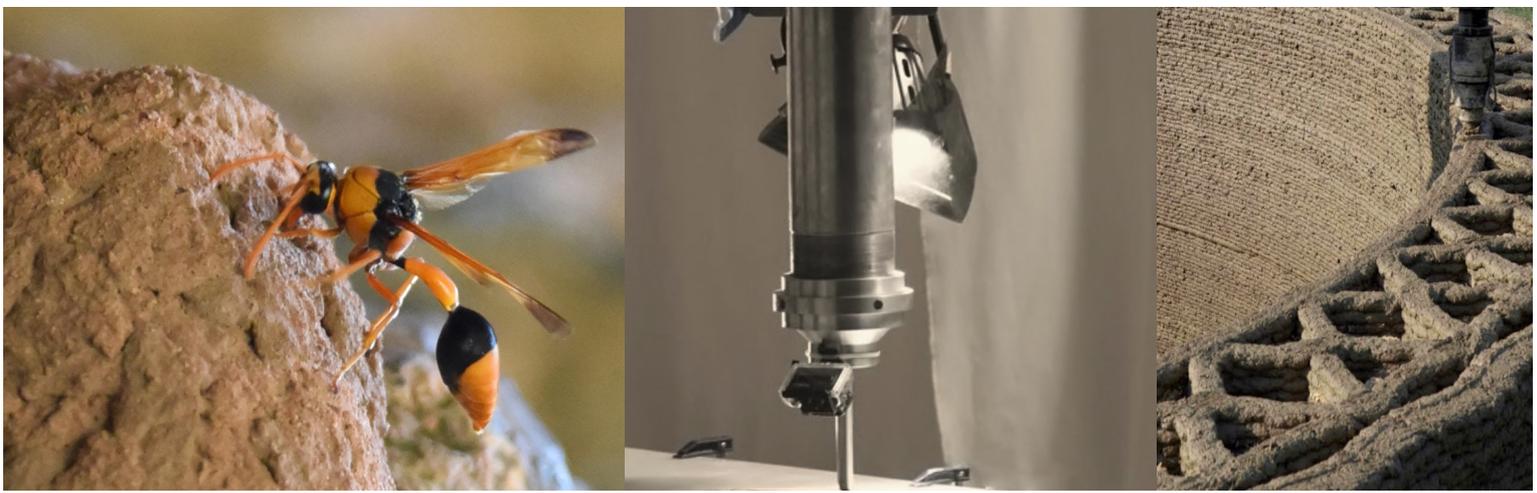
[Fig. 99] Analisi sulle limitazioni del materiale impiegato (argilla e additivi) in relazione alla forma data. Photo credit IAAC©



In generale il materiale più utilizzato a piccola e media scala per il momento è la plastica, che, anche se oggi è considerato un ostacolo al benessere ambientale, è principalmente impiegato a scopo sperimentale, nel campo del design, della moda, dell'ingegneria e dell'architettura. Per la produzione di manufatti di più grande scala oggi la maggior parte delle aziende si limitano ancora all'utilizzo del calcestruzzo. Ciononostante, le potenzialità della stampa 3D prevedono in un futuro molto prossimo, di fatto già in via di sviluppo, l'utilizzo innovativi di materiali ed eco-sostenibili, come bioplastiche, biocementi, terra, legno triturato e scarti organici. In Europa i principali centri che più portano avanti lo sviluppo e la ricerca della stampa 3D sono l'azienda italiana WASP, l'Istituto di Architettura Avanzata della Catalogna (IAAC), le aziende francesi Batiprint3D, XtreeE e Constructions 3D, il team russo di Apis Cor, l'olandese di CyBe Construction, insieme all'impresa slovena di BetAbram. Un progetto interessante portato avanti da WASP, in collaborazione con IAAC, consiste nel progetto *Gaia*, riprodotta grazie ad un sistema modulare di stampa dalla configurazione simile alle classiche gru da costruzione, studiato per essere adattabile ad altri progetti (cfr. fig. 100). L'impronta biomimetica risiede nel concetto di aver realizzato un habitat, o meglio, un'architettura, strato dopo strato, utilizzando il materiale del luogo: per la prima volta al mondo i muri sono stati realizzati in terra ed additivi naturali, mentre l'isolante al suo interno è costituito da lolla di riso, un materiale di scarto ottenuto dalla coltivazione del riso, presente in abbondanza nella zona.

[Fig. 100] Rappresentazione schematica del funzionamento di Crane WASP. Possibilità di combinare un modulo singolo, ampliando e aggiungendo traversi e di bracci stampanti, generando così un sistema di fabbricazione digitale infinito. Photo credit WASP©

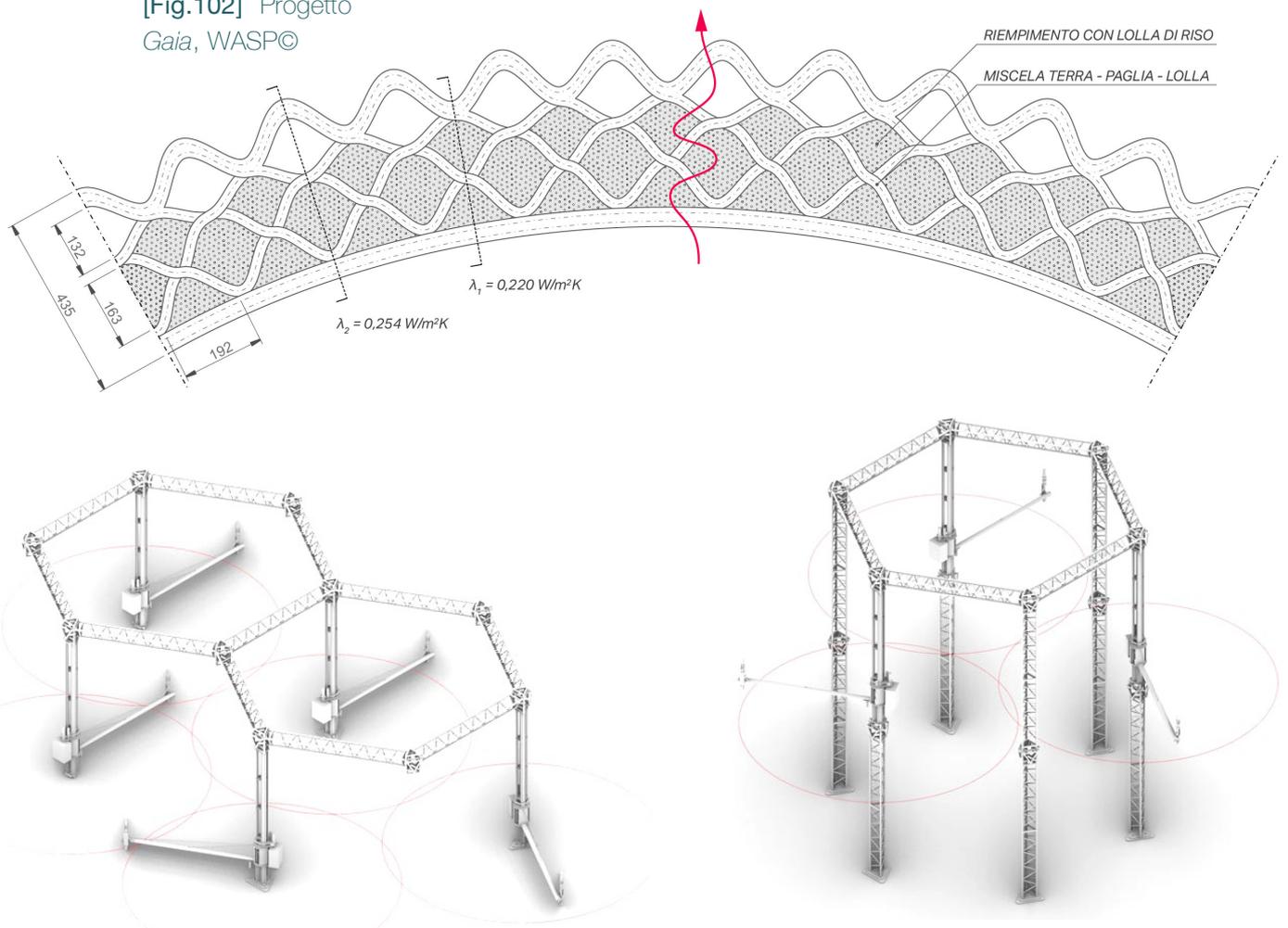




[Fig. 101] La sensibilità biomimetica del processo della stampa 3D. Photo credit ©WASP

Gaia è una casa ecosostenibile perfettamente abitabile, nata dalle risorse del suo intorno (cfr. fig. x). RiceHouse è l'azienda italiana che ha fornito le fibre vegetali impiegate per la creazione dei muri, costituite per il 25% dalla terra del sito, un 40% da paglia di riso trinciata, per il 25% da lolla di riso e il 10% da calce idraulica (cfr. fig. 102). La conformazione ondulata dei muri, oltre a creare un gioco dinamico ed unico, conferisce maggior resistenza strutturale rispetto ad un muro tradizionale e sopporta i climi estivi ed invernali senza richiedere elevati consumi.

[Fig.102] Progetto
Gaia, WASP©

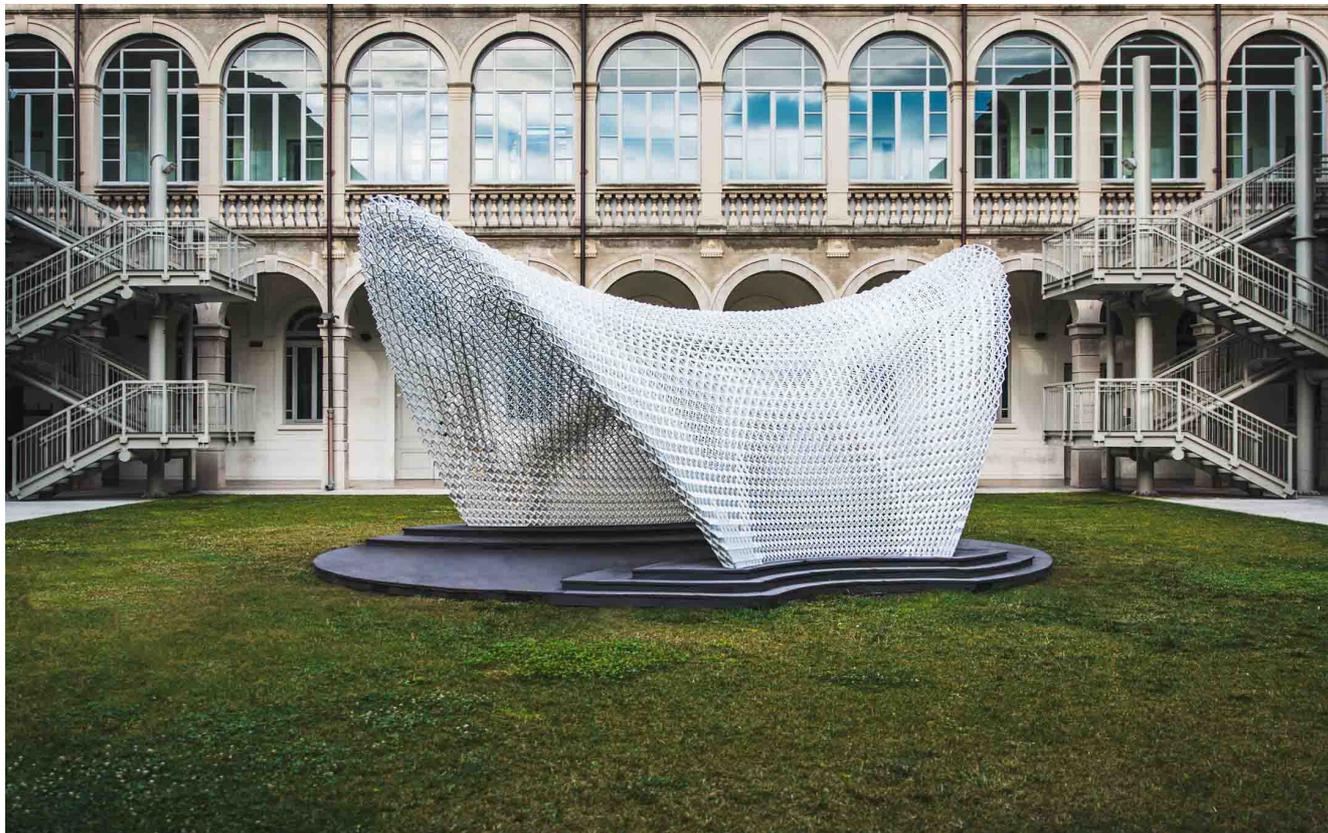


In questo caso il modulo di stampante singolo utilizzato (*il primo da sinistra, illustrato in fig. 100*) funziona in maniera autosufficiente e inoltre, presenta il vantaggio di poter lavorare con materiali fluido-densi differenti, come il cemento, il biocemento ed altri impasti di origine naturale. La stampa 3D rappresenta quindi un metodo efficace per affrontare il problema della scarsità di risorse.

Un ulteriore progetto sperimentale molto recente che coniuga la stampa 3D, la sostenibilità e la ricerca in campo biomimetico è il *Trabecuale Pavilion* (*cfr. fig. 104*), proposto dall'Actlab del Politecnico di Milano, in occasione del Made Expo 2017. Si tratta di un prototipo leggero, riprodotto totalmente tramite stampante 3D WASP con un biopolimero ad alte prestazioni.

[Fig. 103] Per la costruzione di *Gaia* (2018), il team WASP ha impiegato solo 10 giorni, per generale una superficie interna totale di 30 m², con un costo totale dei materiali necessari per la muratura di 900 €. Photo credit WASP©





[Fig. 104] Trabeculae Pavilion, Milano, 2017. Photo credit Gabriele Seghizzi©

La riproduzione di una morfologia tanto intricata ed irregolare, per un totale di 36 m², è stata possibile grazie ad un'accurata manipolazione attraverso software parametrici: è stato necessario creare algoritmi generativi complessi per poter riprodurre, in questo caso, la microstruttura interna delle ossa, le trabecole appunto. Analogamente alle ossa, la struttura del padiglione presenta una porosità variabile, così come orientamento e topologia, con l'obiettivo di ottimizzare l'efficienza meccanica complessiva.

Anche se, come già accennato, la stampa 3D tuttavia ancora presenta dei limiti nel coniugare forme e materiali, tuttavia, pare che alcuni architetti abbiano già dato largo spazio alla creatività e alle fantasie, dimostrando come la stampa 3D possa favorire in futuro la creazione di conglomerati architettonici complessi, soprattutto molto efficienti dal punto di vista della sostenibilità, rifacendosi al concetto del circolo chiuso. Le cosiddette *Aquaponic Future Houses* (cfr. fig. 105), ideate da Mihai Chiriac dell'Università di Westminster, dall'estetica "futurista", consistono in abitazioni a tre piani realizzate tramite stampa 3D in bioplastica interamente biodegradabile e di origine vegetale. Ogni modulo ospita

un sistema di coltura acquaponica, per cui si crea un vero e proprio ecosistema sostenibile, in cui le piante nutrono i pesci e viceversa. Mihai ha dichiarato in merito al suo progetto: *"Sebbene la proposta possa sembrare 'futuristica', credo che le tecnologie di stampa 3D e Biodesign diventeranno più diffuse in un futuro non troppo lontano, con l'evoluzione esponenziale dell'innovazione tecnologica"*.

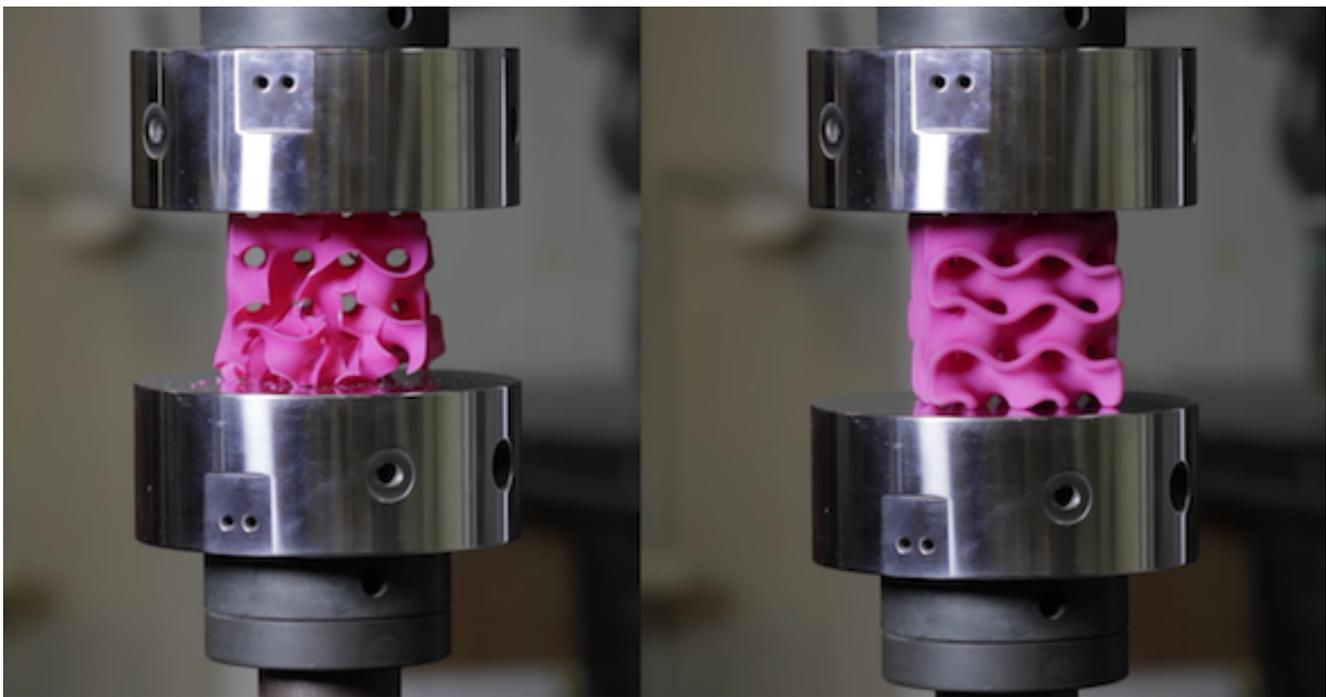
[Fig. 105] *Aquaponic Future Houses*, Mihai Chiriac, 2016. Un vero e proprio sistema auto-produttivo ed efficiente: gli abitanti possono beneficiare del cibo generato dalle coltivazioni acquaponiche e allo stesso tempo, di una qualità dell'aria migliorata. Photo credit Mihai Chiriac©



La stampa 3D è inoltre uno strumento utile nel campo della ricerca di materiali innovativi: un team di ricercatori del Massachusetts Institute of Technology (MIT) ha condotto numerosi esperimenti con materiali differenti, tra cui il grafene. Tale materiale è incredibilmente forte, avendo una resistenza simile a quella del diamante, ed elastico come la plastica. Grazie alla sua disposizione atomica, è

possibile creare uno spessore equivalente alle dimensioni di un solo atomo. Comprimendolo e testando varie configurazioni, i ricercatori sono stati in grado di ottenere un piccolo dispositivo poroso tridimensionale con una densità del 5% rispetto a quella dell'acciaio, ben 10 volte più resistente. La sua geometria complessa, simile ad una spugna e ottimizzata attraverso software parametrici, non sarebbe realizzabile, né conveniente in termini soprattutto economici e di sostenibilità, se riprodotta tramite sistemi più tradizionali: la stampa 3D, ancora una volta, si dimostra un ottimo strumento per creare dispositivi altamente efficienti e complessi, senza prevedere alcun sistema di montaggio di più pezzi.

[Fig. 106] Test effettuati su provini con diverse forme. Photo credit Melanie Gonick/MIT©



[Fig. 107]

I ricercatori del MIT hanno prodotto una struttura forte e stabile che ricorda quella di alcuni coralli e creature microscopiche come le diatomee. Queste forme, che hanno un'enorme superficie in proporzione al loro volume, si sono dimostrate straordinariamente forti. Photo credit Melanie Gonick/MIT©

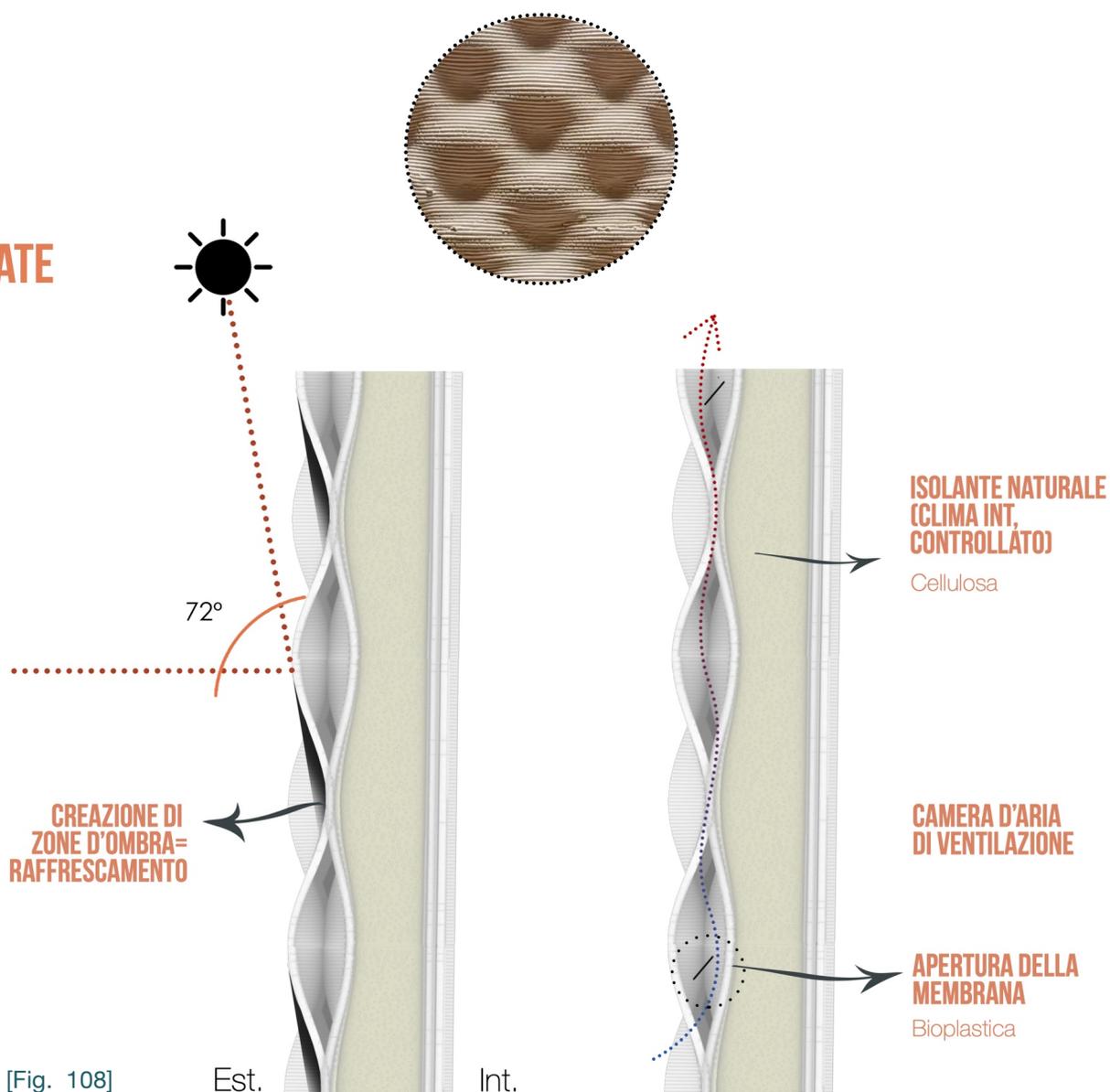


CASO STUDIO | Riproduzione in stampa 3D | Riprogettazione di un muro

Grazie alla collaborazione con IAAC ed il centro Noumena di Barcellona, una succursale di WASP, è stato possibile sperimentare il processo di riproduzione di un muro ecologico tramite la stampa 3D. La tipologia del muro tiene in considerazione i dati climatici di Barcellona, vale a dire l'incidenza solare, il grado di umidità e le temperature annuali.

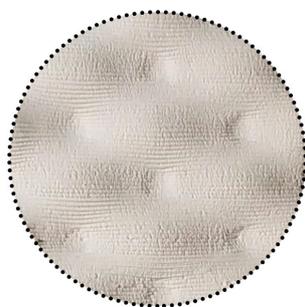
Attraverso un procedimento parametrico ed una valutazione del rendimento, è stato possibile ricreare un muro strutturale con un comportamento totalmente adattabile e controllabile tramite software parametrici. La morfologia del muro cerca di reinterpretare una configurazione a celle, traendone molteplici vantaggi.

1. ESTATE

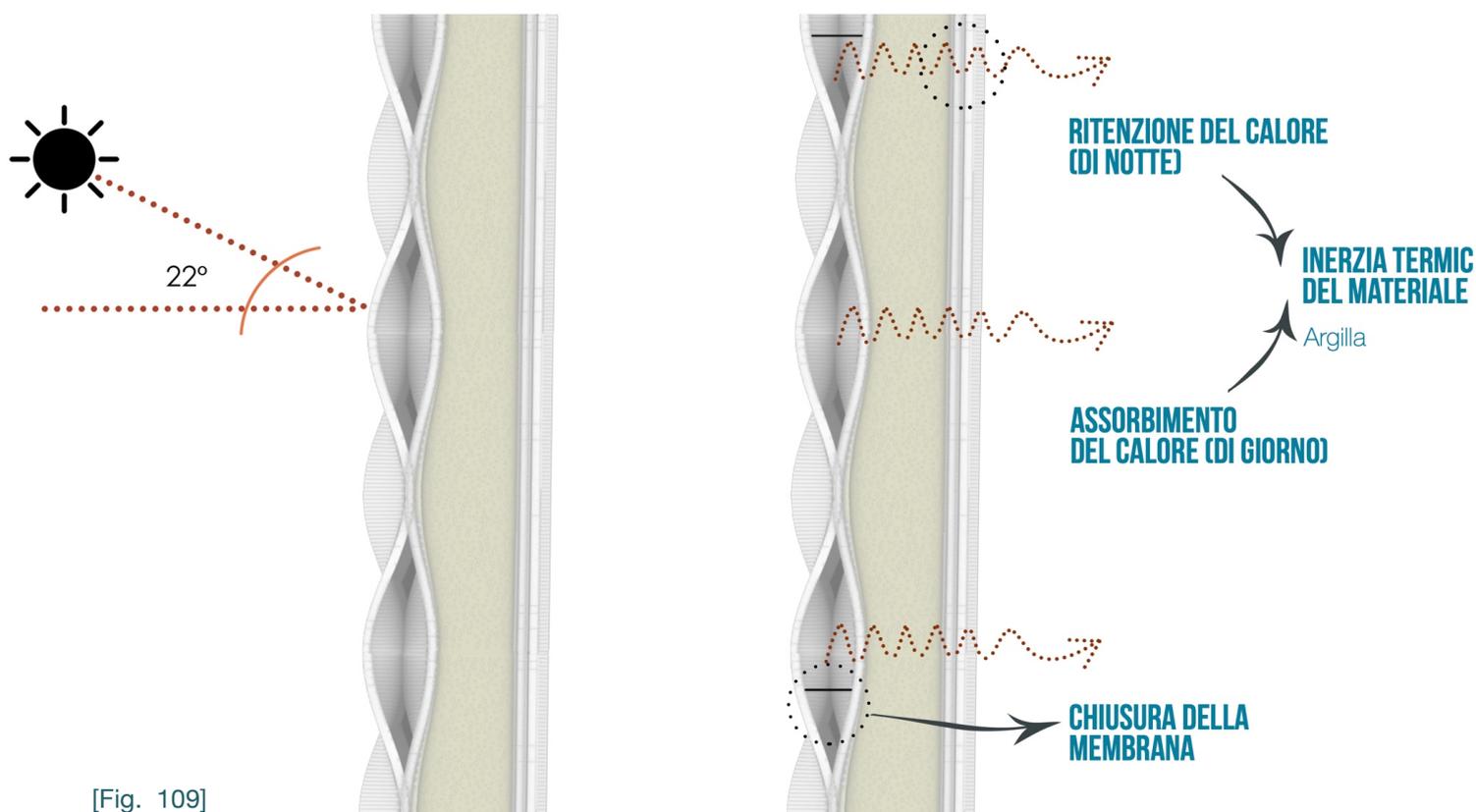


[Fig. 108]

Le ondulazioni, oltre a caratterizzare l'estetica del muro, apportano vantaggi strutturali rispetto ad un muro tradizionale - come nel caso del progetto *Gaia* di WASP - e permette l'ottimizzazione del refrigeramento estivo, oltre che all'assorbimento di calore in inverno (cfr. fig. 108,109). L'andamento ondulatorio di fatto, fa sì che in estate, tenendo conto di un'inclinazione dell'incidenza solare di circa 72°, si crei una zona d'ombra, per cui la parete non va incontro ad un surriscaldamento successivo. D'inverno, come il grado di incidenza è molto minore, ovvero intorno ai 22°, la parete è esposta al massimo al calore della luce solare, la quale, di notte viene ritenuta all'interno della struttura. Inoltre, il muro è stato ideato per inglobare al proprio interno una camera d'aria, che funge da ventilazione e da isolante. Si è ipotizzato un sistema di auto-regolazione grazie all'utilizzo di un materiale con memoria di forma, il nitinolo. Tale materiale permette l'apertura o a chiusura di una membrana di un materiale bioplastico, grazie al cambio di temperatura (cfr. fig.110).

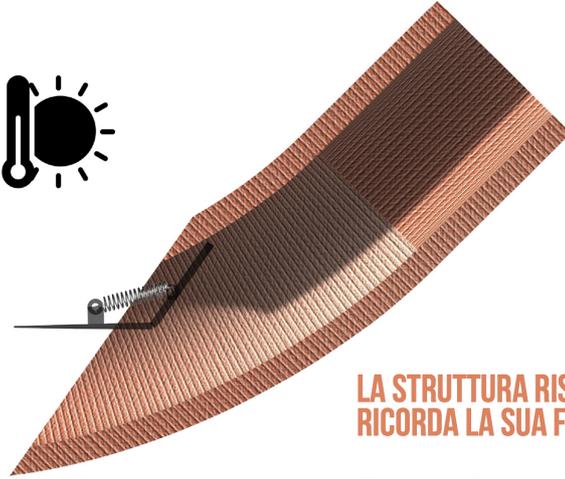


2. INVERNO



[Fig. 109]

1.



**LA STRUTTURA RISCALDATA
RICORDA LA SUA FORMA ORIGINAL**

(Austenite)

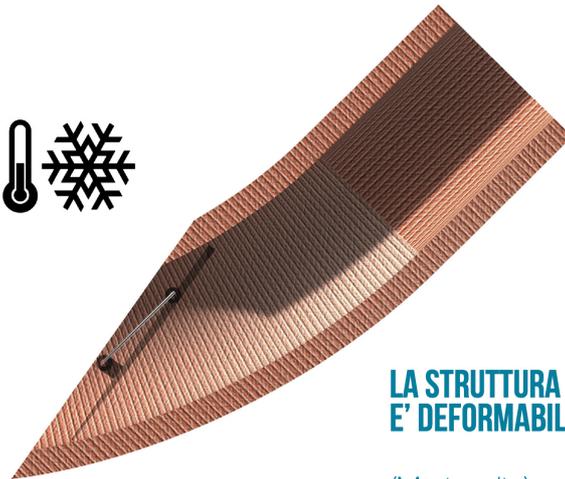
Molla di
nitinolo (SMA)



Membrana di
bioplastica



2.



**LA STRUTTURA RAFFREDDATA
E' DEFORMABILE**

(Martensite)

[Fig. 110] Schema del funzionamento del nitinolo, materiale con memoria di forma (SMA) in grado di regolare la ventilazione all'interno della parete.

CONCLUSIONI

Progettare come la natura? È possibile. Grazie ai principi della biomimetica trasmessi da Janine Benyus e allo sviluppo tecnologico in forte crescita il *Nature-Thinking* prenderà il sopravvento nella mentalità dell'architetto.

Il concetto del Cradle to Cradle e della *circular economy* è un concetto basilare dell'architettura sostenibile, di fatto non del tutto sconosciuto all'uomo. Nell'epoca preindustriale il villaggio autosufficiente, funzionale a garantire un sistema produttivo autonomo, nacque per necessità di autosostentamento nel rispetto della piena sostenibilità. Ciò che di fatto vuole esprimere l'approccio biomimetico è un ritorno a una sorta di mentalità "primitiva" per ripristinare un rapporto più sensibile con la natura, seppur adattandolo allo stile di vita attuale e alle esigenze future. La progettazione bio-inspirata rappresenterà una soluzione necessaria, direi quasi inevitabile: profondamente correlata a un approccio rispettoso e intelligente, sarà la premessa indispensabile per dare riposte efficaci al deterioramento ambientale e contrapporre una cultura dell'efficienza e dell'ottimizzazione. Aggiungere?

Tuttavia, vorrei precisare che, nonostante le parole "sostenibilità" e "biomimetica" oggi siano molto utilizzate nel settore dell'architettura, di fatto i casi identificabili oggi come *deep biomimicry* non rappresentano che una quota esigua di progetti. In più, alcuni prodotti architettonici che in questi ultimi anni sono stati etichettati come "biomimetici" manifestano delle contraddizioni nell'essenza del progetto stesso. Il caso analizzato del *Turning Torso* di Calatrava, per esempio, viene a prima vista identificato come tale per la propria forma, che, senza ombra di dubbio, richiama il corpo di un uomo in torsione. Se risulta chiaro che l'edificio soddisfa pienamente il concetto di biomorfismo, rappresentando movimento ed eleganza a tempo stesso, in termini di processo

biomimetico il giudizio non può essere analogo: per adattare il dinamismo della torsione alla torre, Calatrava non risolse i problemi strutturali derivanti ispirandosi alla effettiva fisiologia e alla funzionalità della colonna vertebrale umana. Ogni vertebra, infatti, anche se aiutata dal tessuto muscolare, è autoportante e non necessita di alcuna struttura interna. La torre, invece, presenta un doppio supporto, del tutto astratto ed estraneo: uno in acciaio verso l'esterno che unisce i "blocchi vertebrali" e infine, un'anima di cemento armato al suo interno. Tale considerazione non vuole mettere in discussione il grande merito dell'architetto né l'altissimo valore in sé dell'edificio, ma può essere utile per intendere che l'approccio biomimetico in questo caso non raggiunge una profondità né una sensibilità tale da poter essere considerato *deep biomimicry*. Analogamente, la facciata del *Watercube* di Pechino, ispirata alla disposizione naturale delle bolle, rappresenta una soluzione ingegneristica notevole, legata all'ottimizzazione del materiale e degli elementi costituenti la facciata che, tuttavia, non si propone come soluzione né pratica in fase di montaggio, né molto sostenibile dal punto di vista dei costi di costruzione e mantenimento.

Se la natura economizza, perché l'uomo non dovrebbe fare lo stesso?

Perché molti progetti davvero possano essere identificabili come biomimetici e sostenibili, di fatto, si dovrebbe mettere da parte una tale sofisticatezza di meccanismi o strutture che, alla progettazione del futuro, non piacerà.

Piuttosto, i sistemi messi a punto dal team Exploration di Michael Pawlyn mirano ad un equilibrio tra economia e sostenibilità ambientale: i progetti proposti non rappresentano la proposta di un'estetica rivoluzionaria futura come enuncia Partick Schumacher di Zaha Hadid Architects, ma piuttosto un sistema di economia circolare efficiente ed autosufficiente a mio parere geniale ed entusiasmante.

Un'ulteriore speranza per uno sviluppo futuro nell'ottica biomimetica in architettura è la progettazione generativa, che, già oggi, può convertire la creatività del progettista in risultati ottimizzati in termini di materiale, costi e tempi. Il parametricismo è di per sé un potenziale approccio biomimetico efficace in quanto si avvicina ad una riproduzione sempre più fedele dei meccanismi

naturali, oltre al fatto di permettere all'architetto di controllare la sostenibilità globale del progetto computazionalmente. Anche le forme più complesse, un tempo impensabili, risultano il prodotto di un'analisi proficua e sensibile verso l'obiettivo dell'ottimizzazione.

La tecnologia non solo porterà al potenziamento dei software parametrici nel controllo di un numero sempre maggiore di fattori, ma anche all'implementazione della stampa 3d a livello architettonico. Tale metodo di riproduzione apporta vantaggi stimolanti, ma è ancora agli albori, in quanto non è ancora diffusa a grande scala. Tuttavia, i casi presentati intendono stimolare curiosità e interesse verso tali tecniche, evidenziando soprattutto i vantaggi che ne derivano. Il progetto *Gaia* di Wasp utilizza materiali totalmente naturali, è economico, 100% riciclabile e funzionale; seppur non si ispiri a prima vista ad alcuna forma biologica, secondo la mia opinione, la sua essenza è senza dubbio profondamente biomimetica. Il fattore che più deve soddisfare un'architettura è, prima di ogni cosa, un'integrazione analoga con la natura. Il caso del *Silk Pavilion*, è il risultato di un esperimento molto interessante che però, a mio avviso, non rispetta del tutto un procedimento realmente basato sulla cooperazione tra uomo e animale. L'idea di fondo è, comunque, decisamente originale e può rappresentare una fonte d'ispirazione per nuove architetture ottimizzate del futuro.

Con lo sviluppo esponenziale della tecnologia e la diffusione di tecniche innovative su larga scala, si può prevedere facilmente un maggior adattamento da parte dell'architettura al ritmo biologico, oltre che a un comportamento più "vivo". Se la nanotecnologia sta già prendendo piede in questi ultimi decenni, la collaborazione tra un team di chimici, biologi e nanotecnologi con architetti, ingegneri e designers sarà la chiave per la progettazione del futuro. Le cosiddette *responsive skins* rappresentano un ottimo spunto per garantire all'edificio un fattore di autoregolazione analogo agli organismi viventi, così come l'implementazione di materiali con memoria di forma, per esempio, applicati alle facciate del futuro.

La ricerca quindi di impieghi innovativi nel campo dei materiali, dei software di progettazione e dei metodi di riproduzione robotici, entrano a far parte di un sistema a catena, in quanto si stimolano a vicenda: la necessità di sviluppo di ciascuno di questi settori sarà influenzato di conseguenza da ognuno di essi. Le tecniche di stampa 3D saranno ancora più dettagliate e vantaggiose a livello industriale, per esempio, quando vi sarà uno sviluppo più meticoloso anche da parte dei software di analisi dei modelli tridimensionali, o ancora, conseguentemente alla scoperta di nuovi impieghi di materiali innovativi o più tradizionali. In questi ultimi anni si stanno studiando i comportamenti tra i materiali naturali e la loro resistenza, per esempio, al degrado, all'umidità, all'acqua o semplicemente strutturale, nel caso in cui vengano miscelati con additivi anch'essi di provenienza naturale.

In questo lavoro di ricerca sono stati affrontati diversi casi a supporto di una futura progettualità sostenibile. Tuttavia arreca un senso di scoraggiamento pensare che le tecniche di progettazione ispirate al mondo naturale siano ancora lontane dalla produzione su grande scala, nonostante la crisi ambientale sia arrivata a un livello endemico.

A mio avviso, una speranza per trasmettere l'importanza di questa "nuova" mentalità risiede nella divulgazione di tali concetti: la biomimetica può essere affrontata nelle università e in vari settori lavorativi concepita come una scienza innovativa, un vero e proprio programma da sperimentare, insegnare ed applicare.

In considerazione della crisi attuale che stiamo vivendo, il mio auspicio è che sia l'artefatto *biomimetico* quello in grado di sopravvivere alla selezione naturale dell'architettura futura.

"L'architettura diventa generosa e significativa per gli esseri umani solo se è un'estensione gentile e delicata dell'ordine naturale"

Giancarlo de Carlo

RINGRAZIAMENTI

Innanzitutto vorrei ringraziare il mio relatore per avermi fatto avvicinare al mondo della biomimetica. Ho la sensazione che la ricerca a cui ho dedicato parecchio tempo ed interesse, abbia scaturito in me profonde riflessioni in merito alla mia futura professione.

Un ringraziamento speciale va a mamma Luisa: il tuo cuore e il tuo sostegno sono sempre stati presenti nonostante la distanza. Capisco che una figlia itinerante in questi ultimi sei anni di università sia stato un compito arduo da gestire, ma so che l'avete fatto con amore. Grazie ai "miei papà", che sempre hanno sostenuto ogni mia scelta durante la mia carriera universitaria e nella vita. Papà, spero un giorno di potermi rendere utile ed immergermi nella realtà africana come piace a te.

Grazie alle mie care amiche genovesi di lunghissima data che non potrei mai perdere, mi avete dato un grande appoggio morale sempre. In questi anni all'estero ho capito che la distanza non vale proprio niente, ma allo stesso tempo, è di fondamentale importanza: ho capito che sostenersi a vicenda non è da tutti e che ognuno di voi ha fatto una grande differenza.

Grazie ai miei due amati catalani, senza di voi la mia esperienza non sarebbe stata la stessa. Natalia e David, siamo diventati architetti insieme, tra arduo lavoro e momenti spensierati: vi auguro un futuro che ripaghi gli sforzi di questi ultimi anni. David, grazie per essere stato al mio lato, ma soprattutto, per darmi forza nel sognare un futuro entusiasmante. Sarai un grandissimo architetto e spero un buon compagno di avventure. Grazie anche alla grande famiglia catalana, siete la forza e l'allegria in persona.

In bocca al lupo a tutti i miei compagni di università, amici futuri architetti, chissà, un giorno colleghi per il mondo. Vi auguro il meglio.

Un ultimo importante ringraziamento è rivolto a tutti i professori e professionisti nel settore che mi hanno aiutato durante la mia ricerca a Barcellona.

BIBLIOGRAFIA

- Aimar F., *Nuovi materiali per il building: le strutture*, Wolters Kluwer Italia, Milano, 2017
- Ashby M. F., *Materials and the Environment*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2009
- Baldissara M., *Biomimetica degli spazi. Sperimentazioni digitali di processi biologici in architettura*, Tesi di Dottorato di ricerca in Teorie e Progetto, Dipartimento di Architettura e Progetto della Sapienza di Roma, 2018
- Benyus J., *Biomimicry: innovation inspired by Nature*, Morrow, 1997
- Bertolini L., Carsana M., *Materiali da costruzione (volume primo). Struttura, proprietà e tecnologie di riproduzione*, CittàStudiEdizioni, Torino, 2010
- Boada P., *El Temple de la Sagrada Familia*, Editorial Barcino, Barcelona 1929
- Braungart M., Mc Donough W., *From Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, North Point Press, New York, 2002
- Brebbia C. A., *Design and Nature III: Comparing Design in Nature with Science and Engineering*, Wessex Institute of Technology, Southampton, 2006
- Curtis W. J., *Modern Architecture Since 1900*, Phaidon, London, 2000
- Frampton K., *Storia dell'architettura moderna*, Zanichelli, Bologna, 2008
- Gibson L. J., Ashby M. F., *Cellular solid, Structure and properties*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999
- Gordon J. E., *Strutture sotto sforzo*, Zanichelli, Bologna, 2005
- Graziotti A., *Le cupole geodetiche*, Simmetria Edizioni, Roma, 2012

- Gruber P., *Biomimetics in architecture: architecture of life and buildings*, SpringerWienNewYork, Mörlenbach, 2011
- Holl S., *Parallax*, Princeton Architectural Press, New York, 2000
- Huerta Fernández S., *El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí* in *Miscel·lània*, di Tarragó S., pag- 133-159, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2013
- Le Ricolais R., *La structure dans les arts et les sciences*, Editions de la Connaissance, Bruxelles, 1966
- Manfredini A., *Questioni di progettazione architettonica*, Alinea, Firenze, 2000
- Martinell C., *Conversaciones con Gaudí*, Ediciones Punto Fijo, Barcelona, 1969
- Martinell C., *Gaudí i la Sagrada Família comentada per ell mateix*, Edicions Cossetània, Tarragona, 1999
- Montanari G., Bruno A., *Architettura e città nel Novecento. I movimenti e i protagonisti*, Carrocci, Roma, 2009
- Pagani R., Chiesa G., Tulliani J. M., *Biomimetica e Architettura. Come la natura domina la tecnologia*, Francoangeli, Milano, 2015
- Pallasmaa J., *Animal Architecture*, Suomen Rakennustaitteen Museo, Helsinki, 1995
- Pallasmaa J., *Architecture in miniature*, Museum of Finnish architecture, Helsinki, 1991
- Pawlyn M., *Biomimicry in Architecture*, RIBA Publishing, Londra, 2011
- Peretti G., *Verso l'ecotecnologia in architettura*, BE-MA editrice, Milano, 1997
- Pontello E., *Approccio Parametrico alla Progettazione Architettonica*, Tesi di Laurea Triennale in Scienze dell'Architettura, Università degli Studi di Udine, 2015
- Portales i Pons A., *Analizando la construcción*, Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, Barcellona, 2013

- Richter J. P., *The Notebooks of Leonardo da Vinci (volume 2)*, Dover Fine Art, New York, 1970
- Schaur E., *Ungeplante Siedlungen. Non-planned Settlements. IL 39*, Karl Krämer, Stoccarda, 1992
- Schumacher P., *The Autopoiesis of Architecture, Volume I: A New Framework for Architecture: A Conceptual Framework for Architecture*, John Wiley & Sons Ltd, Hoboken, 2010
- Skinner S., *Geometría Sagrada*, Gaia Ediciones, Madrid, 2007
- Spagnoli L., *Storia dell'urbanistica moderna: 1*, Zanichelli, Bologna, 2008
- Tedeschi A., *AAD Algorithms Aied Design. Parametric Strategies using Grasshopper©*, Le Penseur Publisher, Potenza, 2014
- Thompson D. W., *On growth and form*, Cambridge University Press, Cambridge, 1917
- Torroja E., *La concezione strutturale*, Città Studi, Milano, 1995
- Torroja E., *Razón y Ser de los Tipos Estructurales*, Editorial CSIC, Madrid, 2010
- Tucci F., *Tecnologia e Natura. Gli insegnamenti del mondo naturale per il progetto dell'architettura bioclimatica*, Alinea Editrice, Firenze, 2008

Riviste e articoli online

- Aimar F., *Le tensostrutture di Frei Otto: la copertura dell'Olympiastadio di Monaco*, disponibile su <https://www.teknoring.com/news/ingegneria-strutturale/le-tensostrutture-di-frei-otto-la-copertura-dellolympiastadion-di-monaco/>, ultimo accesso 1 Aprile 2019
- ArchDaily Team, *HygroSkin-Meteorosensitive Pavilion / Achim Menges Architect + Oliver David Krieg + Steffen Reichert*", 09 Sep 2013. ArchDaily, disponibile su <https://www.archdaily.com/424911/hygroskin-meteorosensitive-pavilion-achim-menges-architect-in-collaboration-with-oliver-david-krieg-and-steffen-reichert/> ISSN 0719-8884, ultimo accesso 4 Luglio 2019
- AskNature Team, *Spiral fibers strengthen tree trunk*, disponibile su <https://asknature.org/strategy/spiral-fibers-strengthen-tree-trunk/#.XJOyFURKh0s>, ultimo accesso 20 Marzo 2019
- Atlante di Istologia, Dipartimento di Medicina Sperimentale dell'Università di Genova, disponibile su www.istologia.unige.it, ultimo accesso 30 Marzo 2019
- Bjørn A., Zwicky Hauschild M., *Cradle to cradle and LCA*, ResearchGate, 2018, disponibile su https://www.researchgate.net/publication/319449772_Cradle_to_cradle_and_LCA, ultimo accesso 12 Aprile 2019
- Bonser R.H.C., *Patented Biologically-inspired Technological Innovations: A Twenty Year View*, Journal of Bionic Engineering vol.3, 2006, ultimo accesso 24 Gennaio 2019
- Bor A., Hansen K., Goedkoop M., Rivière A., Alvarado C., Van den Wittenboer W., *Usability of Life Cycle Assessment for Cradle to Cradle purposes*, NL Agency NL Environment and NL Energy and Climate, Utrecht, 2011 disponibile su https://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Position_paper_Usability_of_LCA_for_C2C_purposes-.pdf, ultimo accesso 10 Aprile 2019
- Buhl J., Gautrais J., Kuntz P., Reeves N., Solé R. V., G. Theraulaz, Valverde S., *Topological patterns in street networks of self-organized urban settlements*,

- ResearchGate, Febbraio 2006, disponibile su <https://www.researchgate.net/publication/225755643>, ultimo accesso 20 Giugno 2019
- Cilento K., *Happy Magic Water Park*, ArchDaily, 26 Agosto 2010 disponibile su <https://www.archdaily.com/74902/happy-magic-water-park-forrec/> ISSN 0719-8884, ultimo accesso 17 Gennaio 2019
 - Cilento K., *Al Bahar Towers Responsive Facade / Aedas*, ArchDaily, 2012, disponibile su <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas/> ISSN 0719-8884, ultimo accesso 7 Giugno 2019
 - Carrington D., *Humans just 0.01% of all life but have destroyed 83% of wild mammals*, The Guardian.com, 21 Maggio 2018, disponibile su <https://www.theguardian.com/environment/2018/may/21/human-race-just-001-of-all-life-but-has-destroyed-over-80-of-wild-mammals-study>, ultimo accesso 6 Marzo 2019
 - De Cesco M., Ezechieli C., Morlacchi A., *Architetture biomimetiche: le soluzioni messe a punto dalla natura diventano strategie progettuali*, Rivista ioArch, n° 65, Agosto 2016, disponibile su https://issuu.com/redazioneioarch/docs/ioarch_65_issuu, ultimo accesso 15 Giugno 2016
 - Franco, J. T., *Arquitectura Biomimética: ¿Qué podemos aprender de la Naturaleza?*, Plataforma Arquitectura, Novembre 2013 (pubblicato il 7 Gennaio 2019), disponibile su <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-312614/arquitectura-biomimetica-que-podemos-aprender-de-la-naturaleza>, ultimo accesso 2 Febbraio 2019
 - Fratzl P., Weinkamer R., *Nature's hierarchical materials*, Progress in materials Science, 2007, disponibile su <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S007964250700045X>, ultimo accesso 5 Maggio 2019
 - G. Sala, L. Di Landro, A. Airoidi, P. Bettini, *Tecnologie e materiali aerospaziali (cap.63)*, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale-Politecnico di Milano, disponibile su <https://docplayer.it/26909978-Tecnologie-e-materiali-aerospaziali-ver-01.html>, ultimo accesso 5 Aprile 2019

- Hensel M., Menges A., Weinstock M., *Self-organization and Material Constructions*, Architectural Design Journal AD, Techniques and Technologies in Morphogenetic Design, Wiley Online Library, Marzo/Aprile 2006, ultimo accesso 20 Marzo 2019
- ICD-ITKE University of Stuttgart, ICD-ITKE Research Pavilion 2013-14, Archdaily, 8 Luglio 2014, ultimo accesso 1 Luglio 2019, disponibile su <<https://www.archdaily.com/522408/icd-itke-research-pavilion-2015-icd-itke-university-of-stuttgart/>> ISSN 0719-8884
- López M., *Nuevas fronteras biológicas: hacia una Arquitectura del futuro*, Rivista TRP21, Teoría, N°4, SI.FADU.UBA, Buenos Aires, 2016. Disponibile su: <http://www.trp21.com.ar>, ultimo accesso 16 Ottobre 2018
- Luz G.M., Mano J.F., *Biomimetic design of materials and biomaterials inspired by structure of nacre*, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2009
- Niklas K. J., Spatz H. C., Vincent J. F. V., *Plant Biomechanics: an overview and prospectus*, American Journal of Botany 93(10): 1369–1378, 2006, disponibile su <https://bsapubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.3732/ajb.93.10.1369>, ultimo accesso 20 Novembre 2018
- Rasha Mahmoud Ali El-Zeiny, *Biomimicry as a Problem-Solving Methodology in Interior Architecture*, Procedia: Social and Behavioral Sciences (pg 502-512), 2012, disponibile su www.sciencedirect.com, ultimo accesso 5 Gennaio 2019
- Radaelli C., *Pechino 2008: inaugurato il Water Cube*, Rivista Arquimagazine, 2008, disponibile su <http://www.archimagazine.com/awatercube.htm>, ultimo accesso 27 Novembre 2018
- Rawn E., *Shell Lace Structure: Tonkin Liu's Nature-Inspired Structural Technique*, Archdaily, 24 Sept 2014, disponibile su <<https://www.archdaily.com/551062/shell-lace-structure-tonkin-liu-s-nature-inspired-structural-technique/>> ISSN 0719-8884, ultimo accesso 24 Jun 2019
- Rosenfield K., McConnell A., *Escalera Vertebrae*, Plataforma Arquitectura, 22 feb 2013 disponibile su <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-238959/escalera-vertebrae-andrew-mcconnell> ISSN 0719-8914, ultimo accesso 26 Maggio 2019

- Samper A., Herrera B., *Análisis de comparación fractal de la Sagrada Familia con las Catedrales Góticas*, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, 2015
- Schumacher P., *Parametricism: a new global style for architecture and urban design*, AD Architectural Design – Digital cities, vol. 79, n. 4, Luglio Agosto 2009, disponibile su www.patrikschumacher.com, ultimo accesso 10 Giugno 2019
- Tucci F., *Paradigmi della natura per progettare involucri architettonici*, International Journal of Architecture, Art and Design AGATHÓN 02, 2017, ultimo accesso 10 Novembre 2018
- Winston A., *Frei Otto: a life in projects*, Dezeen, Marzo 2015, disponibile su <https://www.dezeen.com/2015/03/11/frei-otto-a-life-in-projects/>, ultimo accesso 22 Gennaio 2019

SITOGRAFIA

- <https://www.biomimicry.org/>
- <http://www.agathon.it/>
- <http://www.ResearchGate.com/>
- <http://www.deezen.com/>
- <http://www.archidaily.com/>
- <http://www.asknature.org/>
- <https://www.buildlab.it/>
- <https://www.sciencedirect.com/>
- <https://www.pnas.org/>
- <http://www.bioarchitettura-rivista.it/>
- <http://www.green.it/>
- <http://www.perchebio.com>
- <http://www.worldwatch.org/>
- <http://www.wikipedia.org/>
- <https://www.orticolario.it/>
- <https://www.architetturaecosostenibile.it/>
- <http://www.archimagazine.it/>

- <http://www.ecologicstudio.com>
- <https://www.archiportale.com/>
- <http://www.liftarchitects.com/>
- <https://www.zaha-hadid.com/>
- <https://www.patrickschumacher.com/>
- <http://www.archnewsnow.com/>
- <https://www.wyss.harvard.edu/>
- <https://www.es.wikiarquitectura.com/>
- <http://www.stevenholl.com/>
- <http://www.mickpearce.com/>
- <https://www.ornilux.com/>
- <https://www.food4rhino.com/>
- <https://www.karamba3d.com/>
- <http://www.iaacblog.com/>
- <https://www.3dwasp.com/>
- <https://www.aniwaa.com/>
- <http://www.news.mit.edu/>
- <http://www.achimmenges.net/>

- <https://www.dpa.com.sg/>

- Schumacher P., (videoconferenza) *Parametric Urbanism*, AA School of Architecture, pubblicato il 6 Febbraio 2007, disponibile su <https://www.youtube.com/watch?v=V8G0N0r4ixc>, ultimo accesso 12 Giugno 2019

- López M., (videoconferenza), *La biomimética abre el ciclo de nuevas miradas de la arquitectura*, pubblicato il 27 Aprile 2017, disponibile su <https://www.youtube.com/watch?v=39bwJSqgRO8>, ultimo accesso 27 Novembre 2018