

Politecnico di Torino

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione Città

Tesi di Laurea Magistrale

L'ombra sul Pianeta

L'approccio biomimetico nel progetto di architettura in risposta alla crisi climatica



Relatore

prof. Guido Callegari

Correlatore

dott. Guglielmo Ricciardi

Candidata

Linda Carlini

Dicembre 2021

L'ombra sul Pianeta

L'approccio biomimetico nel progetto di architettura in risposta alla crisi climatica

Linda Carlini

ABSTRACT

A più di 100 anni dalla fondazione della “*Casa del costruire*” di Walter Gropius, si torna a considerare la possibilità di un nuovo e rinnovato movimento capace di rivoluzionare l'esperienza dell'abitare quando la Commissione europea promuove il New European Bauhaus.

Alle prese con il cambiamento climatico e il conseguente riscaldamento globale, vengono raccolti gli insegnamenti appresi durante questi ultimi anni di ricerca scientifica, comprendendo la necessità di progettare manufatti la cui funzionalità deve essere identificata anche con l'adattabilità e la possibilità di uno sviluppo costante. Al contempo, non viene dimenticata né tralasciata la componente estetica che, al contrario, alimenta la curiosità verso la ricerca di nuove *forme* per l'architettura.

Se infatti la storia del design architettonico è stata caratterizzata da una crescente separazione istituzionalizzata tra forma, struttura e materiale e una profonda scissione metodologica tra modellazione, analisi e produzione, la generazione dell'iconica *forma* nel tempo è stata guidata esclusivamente da connotati geometrici.

Sotto gli imperativi e il crescente riconoscimento dei fallimenti e responsabilità ambientali di questa eccessiva espressività formale, disattenta alle diverse componenti e caratteri fondamentali della progettazione, l'architettura odierna si sta muovendo verso una progettazione più consapevole e sostenibile dal punto di vista ambientale, economico e sociale.

Ispirato dalle strategie della Natura in cui la generazione della *forma* è guidata dalla massima prestazione con un uso minimo di risorse, la ricerca rivede e studia modelli, processi ed esempi di un approccio innovativo alla progettazione, articolato attraverso uno studio approfondito degli strumenti, teorici e pratici, della disciplina biomimetica.

Il potenziale significato ecologico ed etico è profondo nella sua volontà di affrontare alcune condizioni patologiche alla radice della cultura architettonica, riconsiderando il ruolo del settore a partire dalla generazione della *forma* fino alla fabbricazione e realizzazione dei suoi prodotti.

Relatore: Prof. Guido Callegari

Ringraziamenti

Non ho mai apprezzato le rigide e retoriche formule dei ringraziamenti accademici perché spesso generaliste, cortesi ma vuote. Ho sempre amato invece la consapevolezza sincera e l'abilità di riconoscere il debito verso qualcuno al quale si devono le proprie competenze, le proprie conoscenze, le proprie idee e le occasioni avute.

Desidero quindi rivolgere un ringraziamento al prof. Guido Callegari, non solo per aver guidato questo lavoro, ma per aver contribuito alla mia formazione di architetto e di professionista.

Ringrazio il dott. Guglielmo Ricciardi per avermi seguita durante tutto il processo di scrittura della tesi, gli interessanti spunti, i feedback e le critiche costruttive.

Desidero ringraziare anche le persone con cui ho condiviso gli attimi della mia vita universitaria, colleghi e compagni del Politecnico, tra cui molti amici sinceri, per i preziosi scambi e il sostegno emotivo.

Ringrazio Bianca e Ioana, amiche da sempre, custodi degli attimi più felici e di molti dei momenti più difficili. Voglio ringraziarle per tutto, per la pazienza, la comprensione e l'ascolto. Per aver sopportato i miei continui sbalzi di umore, i miei lunghissimi monologhi e per avermi sempre spronata a rischiare.

Desidero infine rivolgere un sincero ringraziamento alla mia famiglia, consapevole che non potrò mai fare abbastanza per restituire il favore. Ai miei nonni, per la felicità, l'orgoglio e la condivisione per il mio traguardo oltreché per l'affetto e le cure premurose; ai miei genitori, per aver supportato la mia curiosità e voglia di studiare; a mio fratello Manuel, per avermi insegnato l'importanza di mettersi in discussione.

E, soprattutto, un sentito ringraziamento a mia sorella Ambra, di costante incoraggiamento e da sempre un esempio da seguire. Grazie per la genuina generosità nei miei confronti, le parole di conforto durante gli innumerevoli momenti di incertezza e la forza dimostrata nei periodi più difficili.

Indice

1 NOTE INTRODUTTIVE	1
1.1 Crisi della forma.	1
1.1.1 Organizzazione e struttura della tesi.	4
1.1.2 Il Cambiamento Climatico: inquadramento della crisi ambientale	5
1.1.3 La Forma della Natura: fonti e sviluppo di una nuova concezione	6
1.1.4 La Promessa Biologica: approccio biomimetico in un’ottica ecologica ed etica. .7	
1.1.5 Artificio Naturale: esperimenti basati sull’imitazione della Natura	7
1.1.6 Fabbricazione naturale: integrazione e personalizzazione di massa	8
1.1.7 Conclusioni: tra scalpello e gene	8
2 IL CAMBIAMENTO CLIMATICO	17
2.1 Architettura e progresso	17
2.2 La crisi dell’ambiente.	18
2.2.1 Effetto serra e riscaldamento globale	19
2.2.2 Le emissioni di origine antropica	22
2.2.3 Rischi del cambiamento climatico	24
2.2.4 Scenari, proiezioni e previsioni sul cambiamento climatico	25
2.3 Adattamento e mitigazione.	26
2.3.1 Percorsi di mitigazione.	27
2.3.2 Percorsi di adattamento	29
2.4 Strategie politiche.	30
2.4.1 Accordi multilaterali.	30
2.4.2 Politiche dell’UE	32
2.4.2.1 Il Green Deal e il progetto “Fit for 55”	34
2.4.2.2 Strategia di adattamento dell’UE ai cambiamenti climatici.	35
2.4.2.3 Il New European Bauhaus	37
2.4.3 Il Piano nazionale integrato per l’energia e il clima (PNIEC)	38
2.5 Cambiamento climatico e edilizia	39
2.5.1 Responsabilità del settore edile sul cambiamento climatico	39
2.5.2 Effetti del cambiamento climatico sul costruito	41

2.6 Riepilogo	41
3 LA FORMA DELLA NATURA	59
3.1 Sostenibile per Natura	59
3.1.1 Inventario minimo, massima diversità	60
3.1.2 Prestazioni ambientali multicriterio integrate: carico e luce	61
3.1.3 Processi ambientali integrati: crescita, risposta e adattamento.	62
3.2 Ispirato dalla Natura: campi e approcci correlati	63
3.2.1 Biomimetica	65
3.2.1.1 Differenze tra la biomimetica e altri bio-approcci	67
3.2.1.2 Campi di applicazione	68
3.2.1.3 Divulgazione del sapere scientifico	69
3.2.1.4 Metodo e fasi progettuali di Janine Benyus	70
3.2.1.5 Processo biomimetico	71
3.2.1.5.1 Definire (<i>define</i>)	71
3.2.1.5.2 Biologizzare (<i>biologize</i>)	72
3.2.1.5.3 Scoprire (<i>discover</i>)	72
3.2.1.5.3 Astrarre (<i>abstract</i>)	73
3.2.1.5.4 Emulare (<i>emulate</i>)	73
3.2.1.5.4 Valutare (<i>evaluate</i>)	74
3.2.1.6 Strumenti	74
3.2.1.7 Principi di vita	76
3.2.1.7.1 Evolvere per sopravvivere	77
3.2.1.7.2 Adattarsi al cambiamento	78
3.2.1.7.3 Reattività e sintonia locale	79
3.2.1.7.4 Integrare lo sviluppo con la crescita	80
3.2.1.7.5 Efficienza nell'utilizzo delle risorse (materia ed energia) ..	81
3.2.1.7.6 Transizione verso una chimica amica della vita	82
3.3 Riepilogo	83
4 LA PROMESSA BIOLOGICA	93
4.1 Il viaggio di Moi.	93

4.2	Caratteristiche di un sistema alternativo	94
4.2.1	Il ciclo di vita	94
4.2.2	Il concetto di resilienza.	96
4.2.3	Crescita, sviluppo e decrescita	97
4.2.4	Ottimizzazione e personalizzazione	99
4.3	Riepilogo	99
5	ARTIFICIO NATURALE	103
5.1	Verso un design naturale	103
5.2	Materiali	105
5.2.1	Caso studio 1: calcestruzzo ad alte prestazioni ispirato agli habitat marini	105
5.2.2	Caso studio 2: vernice ispirata alla foglia di loto per superfici autopulenti	106
5.2.3	Caso studio 3: materiale da costruzione ispirato alle spugne marine	107
5.2.4	Caso studio 4: cemento stampato in 3D ispirato ai gusci d'aragosta	109
5.3	Prodotti e componenti	110
5.3.1	Caso studio 1: vetro anticollisione ispirato alle ragnatele	110
5.3.2	Caso studio 2: sistemi di giunzione meccanici ispirati ai molluschi	111
5.4	Sistemi strutturali	112
5.4.1	Caso studio 1: conchiglie	112
5.4.2	Caso studio 2: ossa e scheletro	115
5.4.3	Caso studio 3: ragnatela	116
5.5	Sistemi impiantistici	118
5.5.1	Caso studio 1: sistema per la regolazione della temperatura ispirato alla Terra	118
5.5.2	Caso studio 2: algoritmo di efficienza energetica ispirato alle api	119
5.5.3	Caso studio 3: edificio con sistema di ventilazione passivo ispirato ai termitai	120
5.6	L'influenza della biomimetica sull'architettura e sul design	121
5.7	Riepilogo	124
6	FABBRICAZIONE NATURALE	141
6.1	La personalizzazione per un approccio sostenibile	141
6.2	Economia del materiale	142
6.3	Segregazione progettuale e gestione dei rifiuti	143

6.3.1 Verso prodotti sostenibili: multifunzionalità e personalizzazione di massa	144
6.3.2 Verso processi sostenibili: ambienti integrati di modellazione, analisi e fabbricazione	145
6.4 Fabbricazione Digitale	145
6.4.1 FabLab, makers e artigiani digitali	146
6.4.2 Implicazioni generali	147
6.4.2.1 Forme complesse, tolleranze e modelli di business	148
6.4.2.2 Mass Customization e risvolto ecologico	149
6.5 Fabbricazione Biologica.	149
6.5.1 Caso studio: il Silk Pavilion	150
6.5.1.1 Potenziale applicativo	152
6.6 Riepilogo	153
CONCLUSIONI	165
Bibliografia	170
Sitografia	181

Indice delle Figure

1.1 Fotografia di un iceberg in Groenlandia, Annie Sprat.	10
1.2 Tempesta di sabbia di Pechino, Kevin Frayer.	11
1.3 Una giraffa uccisa dalla siccità, <i>Life</i> , Stefano de Luigi.	12
1.4 <i>Orthocarpus Luteus</i> , Rob Kessler e Wolfgang Stuppy	13
1.5 Fiori e foglie di loto, Anne Belmont	14
1.6 Baco da seta del <i>Silk Pavilion</i> , <i>Mediated Matter Group</i>	15
1.7 Una tribù Turkana prende l'acqua da un pozzo, <i>Life</i> , Stefano De Luigi.	16
2.1 Cambiamenti nella temperatura superficiale globale (1850-1900).	43
2.2 Mappa del cambiamento delle precipitazioni (1951-2010)	44
2.3 Anidride carbonica media mensile misurata presso l'Osservatorio di Mauna Loa.	45
2.4 Sintesi degli effetti del cambiamento climatico sulle diverse regioni mondiali	46
2.5 Riscaldamento osservato determinato dalle emissioni delle attività umane.	47
2.6 Rischi rappresentativi per ciascuna regione	48
2.7 Scenari di emissioni future e possibili	49
2.8 Cambiamenti nella temperatura, nelle precipitazioni e nell'umidità del suolo.	50
2.9 Previsione dei cambiamenti in frequenza e intensità	51
2.10 Emissioni cumulative totali di CO ₂ assorbite da terra, oceani e atmosfera.	52
2.11 Principali componenti del sistema climatico.	53
2.12 Relazione tra i rischi derivanti dai cambiamenti climatici	54
2.13 Emissioni suddivise in diversi scenari di riferimento e di mitigazione	55
2.14 Quota globale di energia ed emissioni finali di edifici e costruzioni nel 2019	56
2.15 Consumo energetico finale globale del settore edilizio.	56
2.16 Principali effetti del cambiamento climatico sugli edifici.	57
2.17 Classificazione climatica secondo Köppen-Geiger.	58
3.1 <i>Aristolochia clematitis</i> , Karl Blossfeldt	84
3.2 Immagine ravvicinata dell'osso spugnoso del femore umano	85
3.3 Immagine al microscopio elettronico a scansione del legno.	86
3.4 Otto Neurath con Alvar Aalto e László Moholy-Nagy	87

3.5 Sistema dinamico-costruttivo pubblicato in Moholy-Nagy	88
3.6 Schema progettuale del treno giapponese <i>Shinkansen</i>	89
3.7 Schema sintetico della <i>Biomimicry Design Spiral</i>	90
3.8 Tabella di sintesi della tassonomia biomimetica di Janine Benyus.	91
3.9 Schema sintetico delle <i>Life's Principles</i>	92
4.1 <i>Moi goes to Washington</i> , <i>The New Yorker</i>	100
4.2 Sciamano <i>Yanomami</i> , Sebastião Salgado	101
4.3 Schema di funzionamento del ciclo <i>Cradle to Cradle</i>	102
5.1 Blocchi di cemento ECONcrete®	125
5.2 Vernice da rivestimento esterno Lotus-Effect® della Sto Corp	126
5.3 Immagine ravvicinata della struttura dell' <i>Euplectella aspergillum</i>	127
5.4 Rendering composito dal cestello di Venere verso un reticolo a base di armature. . .	128
5.5 Cemento stampato del Royal Melbourne Institute of Technology	129
5.6 ORNILUX® Bird Protection Glass della Arnold Glas.	130
5.7 <i>Thalamophora</i> , <i>Kunstformen der Natur</i> , Ernst Haeckel.	131
5.8 <i>Stephoidea</i> , <i>Kunstformen der Natur</i> , Ernst Haeckel.	132
5.9 Studio delle cupole geodetiche di Buckminster Fuller	133
5.10 Piano nobile di <i>Casa Batlló</i> , Antoni Gaudí.	134
5.11 Api da miele in una colonia.	135
5.12 Fotografia dell' <i>Eastgate Building</i> , Harare, Mick Pearce	136
5.13 Schemi di funzionamento dell' <i>Eastgate Building</i>	137
5.14 Render del progetto <i>Lilypad</i> , Vincent Callebaut.	138
5.15 Render del progetto <i>Mangal City</i> , Chimera	139
5.16 Render del progetto <i>Four seasons tent tower</i> , OFIS Architeture	140
6.1 Fotografie stroboscopiche e morfologia dell'achenio del tarassaco comune	154
6.2 Tecnica <i>mountain range</i> per la distribuzione di calcio nell'osso	155
6.3 Diversi schemi di ramificazione, Niklas	156
6.4 <i>Monocoque</i> , Neri Oxman.	157
6.5 Tecnica di formatura <i>Smart Dynamic Casting</i> , ETH di Zurigo	158

6.6 Fotografia della <i>Fondation Louis Vuitton</i> , Frank Gehry.	159
6.7 Giunzioni metalliche su misura progettati da Arup.	160
6.8 Esperimento iniziale sulla conformazione del Silk Pavilion, <i>Mediated Matter</i>	161
6.9 Schemi e calcolo digitale del <i>Silk Pavilion</i>	162
6.10 Realizzazione del padiglione Silk Pavilion, <i>Mediated Matter</i>	163
6.11 Fotografia dall'alto del <i>Silk Pavilion</i> al termine dell'esperimento	164
7.1 <i>Lo Schiavo Giovane</i> , Michelangelo	169

CAPITOLO 1

NOTE INTRODUTTIVE

Premessa

“I believe in God, only I spell it Nature.”
– Frank Lloyd Wright

1.1 Crisi della forma

Il 15 ottobre 2020 la Commissione europea presenta una nuova iniziativa: il New European Bauhaus. A più di 100 anni dalla fondazione della “*Casa del costruire*” di Walter Gropius, si torna a considerare la possibilità di un nuovo e rinnovato movimento capace di rivoluzionare l’esperienza dell’abitare.

La conosciutissima Scuola di Gropius, erede delle avanguardie anteguerra, ha, sin dagli esordi, promosso l’arte e l’artigianato, fondendo le pratiche dell’una e dell’altra nella ricerca di artefatti e opere che intrecciavano funzionalità e utilità a bellezza ed estetica. Allo stesso modo, la Nuova Bauhaus riprende gli stessi principi, tramutando o estendendo gli stessi a valori più consoni rispetto al periodo che stiamo vivendo.

Alle prese con il cambiamento climatico e il conseguente riscaldamento globale, la Commissione europea raccoglie gli insegnamenti appresi durante questi ultimi anni di ricerca scientifica, comprendendo la necessità di progettare manufatti la cui funzionalità deve essere identificata anche con l’adattabilità e la possibilità di uno sviluppo costante. Al contempo non dimentica né trascurava la componente estetica, ma piuttosto alimenta la curiosità verso la ricerca di nuove *forme* per l’architettura.

In seguito allo scambio di conoscenze scientifiche, tecniche e artistiche, il New European

Bauhaus cerca di ridefinire concettualmente e radicalmente la città per come la conosciamo, promuovendo e finanziando progetti in linea con il Green Deal. Si parla dunque di progetti sostenibili soprattutto per l'ambiente (che quindi adottano i principi di economia circolare e materiali prestanti ed ecocompatibili), ma che devono necessariamente generare l'inclusione socioeconomica dei cittadini incoraggiando la creatività comunitaria.

Quest'ultimo aspetto è quello che maggiormente colpisce sfogliando le pagine e i siti ufficiali che descrivono l'iniziativa. Rivoluzionare il concetto di ambiente urbano non significa infatti promuovere unicamente la costruzione e l'allestimento di nuovi spazi verdi, ma ridefinire anche spazi culturali polivalenti secondo ottiche che partono dalla sostenibilità ambientale ma che comprendono valori intrinseci comunitari relativi ai diritti umani, garantendo spazi dell'abitare e di condivisione dignitosi e piacevoli per tutti.

Se dunque il punto di arrivo del New European Bauhaus è una co-creazione olistica cittadina portatrice dei principi appena elencati, il presente elaborato si colloca nello stesso scenario, cercando di abbracciare tutti i valori promossi dalla Commissione europea.

Negli ultimi anni si sono sovrapposte diverse problematiche che hanno condotto la tesi a indagare nello specifico solo alcuni dei temi che meriterebbero un approfondimento. La scelta è ricaduta su quello è stato ritenuto, prima dell'attuale pandemia da Covid-19, il più urgente problema da affrontare. Seppur ultimamente il cambiamento climatico sia apparso come una questione secondaria, lasciata dormiente di fronte all'impellenza della pandemia, le conseguenze del fenomeno sono già in corso in modo evidente e incontestabile. Lo sfondo della ricerca, dunque, era fondamentale già stabilito a priori.

Dall'intreccio poi di differenti temi, è nata la curiosità di trovare un metodo sperimentale per affrontare la crisi climatica nel settore delle costruzioni e inglobare gli stessi valori del New European Bauhaus. Per proporre nuovi modi di pensare creativo, al centro dello studio e della ricerca viene posizionata (come avviene spesso in architettura) la *forma*.

Durante il lungo e intenso corso della storia dell'architettura, la progettazione e la produzione sono stati caratterizzati dalla crescente separazione tra la generazione della *forma* e tutte le sue altre fondamenta naturali. In contrasto con la produzione artigianale (Sennett, 2008) in cui *forma*, struttura e materia sono naturalmente e tradizionalmente intrecciati, l'architettura si è evoluta da questa integrazione verso la compartimentalizzazione (Oxman, 2010).

Così, almeno dal Rinascimento, con l'emergere delle prime teorie, la *forma*, ispirata dalla teoria, è diventata un corpo autonomo di conoscenza (Oxman, 2010). Per questo motivo, anche il New European Bauhaus sollecita la ricerca di nuove *forme*, capaci però adesso di fondere componenti divenute ormai autonome per giungere a un'inclusività che guarda al settore delle costruzioni a 360 gradi.

Se infatti la Rivoluzione Industriale ha aperto le porte alla produzione in serie, la creazione della *forma*, a partire dalla seconda metà del Settecento, era concepita e creata dal potere dell'automazione industriale e la funzionalità venne assunta come unico standard e principale ontologia (Jencks, 1984).

Le virtù promosse dagli antichi mestieri furono quindi abbandonate per seguire i valori della produzione di massa. Gli edifici, in questo modo, divennero economici, modulari e ripetitivi, realizzando il sogno di Ford e conducendoci, in larga parte, alla radice dei problemi odierni.

Come affermato in precedenza, oggi, sotto gli imperativi del crescente riconoscimento del fallimento ecologico, la ricerca della *forma* non può più basarsi unicamente su un orientamento puramente geometrico, ma deve comprendere il contesto in cui si colloca. Per questo motivo, la cultura del design e dell'architettura sta assistendo a nuove proposte per il settore, sfociate, naturalmente, in svariate ricerche e iniziative.

Più specificamente, l'intero elaborato cercherà, sviscerando la letteratura disponibile, di fornire alcune risposte possibili rispetto all'iniziativa del New European Bauhaus ponendo però al contempo numerosi altri quesiti.

In particolare, si è deciso di indagare le potenzialità di imitare le strategie naturali nella sintesi di nuovi processi e strutture, ipotesi divenuta solo recentemente di enorme interesse per la comunità scientifica. Infatti, mentre la rete di fonti e risorse di conoscenza si sta ancora sviluppando, la sensibilità e la consapevolezza nei confronti dell'ambiente si è già cristallizzata e quindi intrecciata, fin dagli esordi e dalle premesse, nella stessa ricerca.

Esempio del crescente interesse per le possibilità tecnologiche ed ecologiche dell'utilizzo dei sistemi biologici come fonte di ispirazione, la biomimetica può essere definita come l'apice dell'emergere di un nuovo campo di ricerca in cui interagiscono biologia, scienza dei materiali, ingegneria, architettura e design. Accompagna l'ascesa di quello che potrebbe essere un nuovo modo di progettare e concepire la *forma* in una nuova era del design attenta alle potenziali ripercussioni ecologiche oltreché portatrice di valori sociali ed economici intrinseci.

Con questa premessa, l'assunto della tesi è di condurre uno studio approfondito su una disciplina ancora parzialmente inesplorata non solo per proporre un approccio alternativo alla generazione della *forma* nel design in generale e in architettura in particolare, ma di dimostrare il potenziale di una profonda trasformazione di contenuti e metodi del progetto, seguendo la volontà dell'iniziativa europea.

Infine, la ricerca assume come background i problemi centrali della progettazione, valutando l'implementazione di nuovi strumenti e tecnologie di Fabbricazione Digitale che stimolano e promuovono la personalizzazione dei prodotti e l'integrazione dei processi di modellazione,

analisi e fabbricazione.

Assiomatici rispetto alle proporzioni impressionanti di queste affermazioni sono, ovviamente, i vantaggi reciproci dei potenziali effetti di questo lavoro. Riconoscendo e rinviando ripetutamente in queste pagine a tutti i fenomeni critici legati all'architettura e al design appena citati, la cultura alternativa di questa ricerca promuove il design naturale come antidoto alla crisi ambientale, sociale ed economica.

Il potenziale significato è profondo nella sua volontà di affrontare alcune condizioni patologiche alla radice della cultura architettonica riconsiderando il ruolo del settore a partire dalla generazione della *forma* fino alla fabbricazione e alla realizzazione dei suoi prodotti.

1.1.1 Organizzazione e struttura della tesi

La tesi è strutturata in 8 capitoli. Seguendo il capitolo 1, i capitoli 2, 3, 4 e 5 forniscono le informazioni di base oltreché concetti, idee ed esempi che intrecciano i campi della climatologia, della biologia, della scienza, dell'ingegneria dei materiali e dell'architettura.

Più nello specifico, il capitolo 2 (intitolato: *Il Cambiamento Climatico: inquadramento della crisi ambientale*) fornisce una panoramica generale sul fenomeno del cambiamento climatico, intrecciando il legame con l'architettura, sfondo e causa del dilagare dei fenomeni correlati. Insistendo sul rapporto reciproco tra la questione ambientale e il settore delle costruzioni, il capitolo propone una visione ampia del fenomeno per comprendere la necessità di trovare meccanismi più sani e sostenibili nella progettazione.

Il capitolo 3 (intitolato: *La Forma della Natura: fonti e sviluppo di una nuova visione*) fornisce un approccio teorico e tecnico alla tesi considerando i principi, le prestazioni e i processi in Natura. Reputando le strategie biologiche rilevanti per la ricerca, il capitolo analizza e studia i fenomeni principali della creazione delle forme naturali, acquisendo intuizioni significative per una possibile applicazione in contesti sintetici. Solo successivamente, a partire dalla necessità sociale, politica, economica e ambientale, si delinea un approccio alternativo basato sull'imitazione della Natura, ponendo le basi e fornendo informazioni significative relative alla disciplina biomimetica.

Nel capitolo 4 (intitolato: *La Promessa Biologica: approccio biomimetico in un'ottica ecologica ed etica*) vengono presentati nuovi mezzi con cui considerare, concettualizzare e implementare la ricerca biomimetica all'interno del panorama ecologico attuale. Attraverso i continui parallelismi tra sistemi artificiali e naturali, il capitolo esplora concetti propri della Natura e li traspone in architettura, riconoscendo l'urgenza del problema ambientale.

Il capitolo 5 (intitolato: *Artificio Naturale: esperimenti basati sull'imitazione della Natura*)

presenta una raccolta di esperimenti di materiali, prodotti e componenti, sistemi strutturali e impiantistici e progetti che illustrano l'efficacia e l'efficienza del metodo biomimetico per l'architettura. Gli esempi e i casi studio forniscono unicamente una selezione di materiale illustrativa del potenziale dell'approccio bio-ispirato, applicabile eventualmente a differenti problemi o questioni relative alla progettazione artificiale.

Il capitolo 6 (intitolato: *Fabbricazione naturale: integrazione e personalizzazione di massa*) presenta una riflessione critica ai processi standardizzati propri delle tecnologie dell'uomo, ritenendo le logiche associate come compartecipanti alle problematiche ambientali e architettoniche. Presupponendo che i processi naturali siano sostenibili proprio per il loro carattere altamente personalizzato, adattabile e integrativo, il capitolo suggerisce un approccio alla progettazione in grado di unire e combinare i processi di modellazione, analisi e fabbricazione. Le tecniche di Fabbricazione Digitale, nello specifico, sono considerate una valida opzione se l'obiettivo è ottenere manufatti personalizzati, differenziati e ottimizzati localmente.

Il capitolo 7 (intitolato: *Conclusioni: tra scalpello e gene*) presenta le conclusioni, critiche e personali, dell'intero elaborato.

Complessivamente, la tesi è composta da un capitolo teorico di base sul cambiamento climatico successivo all'introduzione (cap. 2), tre capitoli dedicati alle strategie biologiche e all'approccio biomimetico (cap. 3, 4, 5), un capitolo relativo alle problematiche dei processi di modellazione, analisi e fabbricazione e alla personalizzazione in architettura (cap. 6) e una conclusione (cap. 7).

1.1.2 Il Cambiamento Climatico: inquadramento della crisi ambientale

Il capitolo 2 racconta l'evoluzione del grande tema degli ultimi decenni.

A partire dalla Rivoluzione Industriale, sono stati innescati innumerevoli meccanismi che hanno radicalmente rivoluzionato i sistemi sociali, economici e politici, distruggendo i fragili equilibri della Natura. La sfida attuale, che coinvolge omogeneamente tutti i Paesi, è divenuta centrale nel dibattito pubblico a causa delle conseguenze e delle ripercussioni dei fenomeni correlati al cambiamento climatico (Figure 1.1, 1.2, 1.3).

Per un maggior approfondimento rispetto alla grande tematica oggetto d'indagine, la trattazione analizza gli ultimi report stilati dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), il *Global Status Report For Buildings And Construction* della Global Alliance for Buildings and Construction, diversi documenti tecnici e strumenti politici della Commissione europea e i report nazionali relativi alle strategie di adattamento e mitigazione (tra cui la *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio

e del Mare e lo *UK Climate Impacts Program* dell'Environmental Change Institute).

In particolare, l'ente delle Nazioni Unite che fornisce le valutazioni periodiche sugli impatti e i rischi ambientali ha osservato, all'interno dell'ultimo report di sintesi (AR5), il fenomeno ad ampia scala, suggerendo preziose informazioni e previsioni ed esponendo dettagliatamente i pericoli futuri e attuali. Se è certo, infatti, che l'incremento delle temperature globali rappresenta un fattore di rischio per la salute umana, per i settori produttivi, per gli ecosistemi e per le specie animali e vegetali, gli Stati sono comunque rimasti inermi di fronte al problema per troppo tempo e oggi proteggere l'ambiente e ridurre gli impatti delle attività antropiche sugli equilibri planetari sono divenute prerogative necessarie.

L'impegno attuale delle potenze mondiali risulta evidente nello studio e nell'attuazione di misure correttive e strategiche per la salvaguardia ambientale, raccontate attraverso un excursus strutturato e diviso a più livelli.

L'indagine si muove successivamente verso l'ambito architettonico, riconoscendo le sue responsabilità e la sua esposizione ai fenomeni correlati al cambiamento climatico.

1.1.3 La Forma della Natura: fonti e sviluppo di una nuova concezione

Il capitolo 3 si propone come una spiegazione dell'intima relazione tra forma, struttura e materiale in Natura e dei modi in cui è ottenuta tale integrazione. Principi di forma naturale in funzione delle prestazioni vengono riviste e considerate come potenziali linee guida di progettazione. L'assunto fondamentale è che in Natura le strutture sono estremamente efficienti, efficaci e sostenibili per la loro perfetta integrazione nei processi di sviluppo, crescita, risposta e adattamento (Figura 1.4).

Il principio generale emerso è che, contrariamente a un approccio di progettazione architettonica tradizionale, in Natura la tipica sequenza dei processi è differente, fattore che garantisce proprio le elevate performance dei sistemi biologici.

A questo punto del capitolo ci chiediamo: come può un approccio alternativo basato sulle strategie naturali, che quindi dà priorità alla sostenibilità ambientale, essere trasposto alla progettazione architettonica?

Ed è quindi dalla biomimetica che emergono nuove possibilità e potenziali significati relativi: traducendo i processi naturali in principi di progettazione, il capitolo afferma che questa nuova disciplina è il campo emergente per la risoluzione delle questioni architettoniche (ed etiche) in modo sostenibile e senza sprechi.

1.1.4 La promessa biologica: approccio biomimetico in un'ottica ecologica ed etica

Il capitolo inizia rimarcando che, per il settore delle costruzioni, adottare un processo progettuale che imita le strategie biologiche può rappresentare un valido contributo alla realizzazione di manufatti sostenibili e relazionati al contesto.

Avvicinando quindi sempre di più l'architettura a temi ecologici, vengono esplorate idee e concetti della biologia per descrivere il potenziale di una loro trasposizione nel settore delle costruzioni. Nel diretto confronto tra i sistemi artificiali e naturali, si scoprono le similitudini e le opposizioni oltreché strategie e meccanismi.

Se lo scopo principale del capitolo è introdurre alcuni principi di progettazione nella pratica, al suo termine si comprende la necessità di analizzare alcuni casi studio per comprendere gli effetti della teoria sull'applicazione.

1.1.5 Artificio Naturale: esperimenti basati sull'imitazione della Natura

Il capitolo 5 illustra una serie di esperimenti di progettazione di materiali, prodotti, componenti e sistemi in diverse condizioni, tutte di ispirazione naturale. La gamma sperimentale è ordinata e classificata in base a considerazioni tipologiche, tutte accomunate da volontà ecologiche e prestazionali.

È importante notare che ogni progetto o prodotto può sfruttare un particolare quadro metodologico o una combinazione di più metodi. La ricerca biomimetica è infatti chiaramente sperimentale e le sue logiche possono avere implicazioni e risultati variegati.

Tra i materiali frutto dell'imitazione del mondo naturale vengono esposti un nuovo tipo di calcestruzzo ad alte prestazioni ispirato agli habitat marini, una vernice che cattura l'essenza della strategia della foglia di loto che garantisce superfici autopulenti e antivegetative (Figura 1.5) e un cemento stampato in 3D che emula i gusci d'aragosta. Viene illustrato inoltre un caso studio accademico dell'Università di Harvard per la progettazione di un materiale da costruzione innovativo ispirato alle spugne marine (caso studio 3).

Riconoscendo l'importanza nel settore delle costruzioni di componenti assemblabili, vengono descritti brevemente due interessanti prodotti per l'architettura: il primo, un vetro anticollisione per gli uccelli, studia il principio delle ragnatele mentre il secondo, un nuovo sistema di giunzione meccanica denominato Striplox[®], è ispirato ai molluschi marini.

Nel trattare sistemi più complessi, invece, il capitolo racconta nuovi modi di concepire le strutture e gli impianti attraverso esempi di strategie e organismi biologici come conchiglie, ragnatele, api e termiti.

Il capitolo termina infine con una serie di progetti che spaziano dalla scala urbana a quella dell'edificio per esplorare interessanti ulteriori alternative in architettura e comprendere l'influenza che oggi potrebbe avere una progettazione bio-ispirata.

1.1.6 Fabbricazione naturale: Integrazione e Personalizzazione di massa

Sin dalla loro comparsa negli anni '60, la progettazione assistita da computer (CAD) nelle sue numerose trasformazioni ha offerto al designer e all'architetto una manipolazione quasi senza sforzo della *forma*. I sistemi CAD e BIM sono diventati fondamentali in architettura grazie alla loro capacità di rappresentare e descrivere le proprietà dei manufatti edilizi.

Il capitolo 6 è dedicato quindi alla relazione tra progettazione assistita e produzione, riconoscendo l'importanza dello sviluppo di un ambiente in grado di integrare i processi di modellazione, analisi e fabbricazione. L'obiettivo è consentire un collegamento diretto tra la generazione della *forma* digitalizzata e la materializzazione dell'oggetto architettonico poiché tale connessione, alla base dei processi naturali, garantisce l'efficienza del mondo biologico. Ed inoltre, sulla base della ricerca presentata nei capitoli precedenti, è legittimo sostenere che le strutture naturali siano sostenibili anche grazie all'alta personalizzazione.

Dunque, assecondando queste intuizioni, il capitolo presenta le potenzialità e implicazioni delle tecnologie di Fabbricazione Digitale, ritenute in grado di limitare un'incontrollata produzione e assicurare un'elevata personalizzazione degli oggetti.

Ma se è vero che la Fabbricazione Digitale può supportare facilmente la variazione di componenti e oggetti e la produzione di campioni personalizzati, può anche favorire le logiche di distribuzione di materiale tipiche della Natura. A tal proposito, il capitolo termina con il caso studio del *Silk Pavilion*, una struttura architettonica formulata dal gruppo di ricerca *Mediated Matter* del MIT Media Lab che unisce processi naturali ad artificiali, costruendo le basi di una nuova, innovativa e sostenibile produzione in architettura (Figura 1.6).

1.1.7 Conclusioni: tra scalpello e gene

Il capitolo 7 considera le origini della ricerca, formula una riflessione critica e racconta la genesi della tesi.

Dato che la Natura applica strategie estremamente efficaci ed efficienti oltreché sostenibili, la volontà di imitare i suoi processi non può certamente sorprendere. Le implicazioni più significative celebrate dall'introduzione di un design naturale nella pratica architettonica è la costruzione di un corpo di conoscenza e di una nuova consapevolezza della realtà attuale.

Quello che si considera infatti essere stato un secondo (ma non secondario) esito della tesi è relativo all'analisi del cambiamento climatico che ha generato, durante la ricerca, non poca preoccupazione.

La discussione del fenomeno climatico senza faziosità ed estremismi ideologici è estremamente difficile. L'approfondimento di un tema così complesso, cercando di mantenere un punto di vista distaccato, analitico e privo di giudizi, non è semplice. L'instabilità delle previsioni e la gravità dei rischi ambientali stanno già condizionando la qualità della vita sociale, economica, demografica e politica sul nostro Pianeta (Figura 1.7).

Al termine di questo percorso si valuta quindi il dovere dell'uomo di preservare la Natura poiché, fondamentalmente, non può essere escluso da un sistema di cui è parte integrante.



Figura 1.1: Fotografia di Annie Spratt che raffigura un iceberg in Groenlandia, uno dei territori più colpiti dallo scioglimento dei ghiacciai. Nell'isola danese la massiccia perdita di ghiaccio registrata negli ultimi vent'anni è dovuta principalmente al processo di *undercutting*, un fenomeno che comporta la frattura dei ghiacciai più velocemente dell'usuale. Tra le conseguenze più preoccupanti di questo fenomeno vi è l'aumento del livello dei mari, causa di alluvioni e fenomeni di erosione lungo le regioni costiere. Da Unsplash, 2014. Annie Spratt. [online] *Unsplash.com*. Disponibile su: <unsplash.com/@anniespratt> [Data di accesso: 12 agosto 2021].



Figura 1.2: Nel marzo 2021 il cielo e l'aria di Pechino sono diventati arancioni a causa di quella che, secondo le autorità locali, è stata la più grande tempesta di sabbia degli ultimi dieci anni. Questi eventi trascinano molta polvere, comprese particelle potenzialmente nocive che, a seconda della grandezza, sono in grado di raggiungere i polmoni o, addirittura, penetrare nel sistema circolatorio. La concentrazione di PM_{10} ha superato i novemila microgrammi per metro cubo, con un tasso quasi venti volte superiore rispetto alle raccomandazioni dell'OMS. Fotografia di Kevin Frayer. Da Hermand-Grisel, S., 2020. *Photography and Climate Change Awareness - Part 1*. [online] *All-about-photo.com*. Disponibile su: <www.all-about-photo.com/photo-articles/photo-article/621/photography-and-climate-change-awareness-part-1> [Data di accesso: 15 agosto 2021].



Figura 1.3: Una giraffa uccisa dalla siccità giace nel letto di un fiume in secca a Wajir (nord-est del Kenya). Fotografia di Stefano de Luigi, progetto *Life*. Il Kenya sta affrontando la peggiore siccità dell'ultimo decennio. Mentre gran parte del Paese non viene bagnata dalla pioggia da anni, gli animali selvatici, il bestiame e i raccolti muoiono e l'assenza di risorse causa conflitti inter-tribali, sempre più sanguinosi per il diffondersi delle armi. Con la diminuzione dell'agricoltura, le terre aride si estendono verso le capitali, causando tensioni anche nelle baraccopoli abbandonate. Da De Luigi, S., 2021. *Life*. [online] *Stefanodeluigi.com*. Disponibile su: <www.stefanodeluigi.com/life.html> [Data di accesso: 13 agosto 2021].

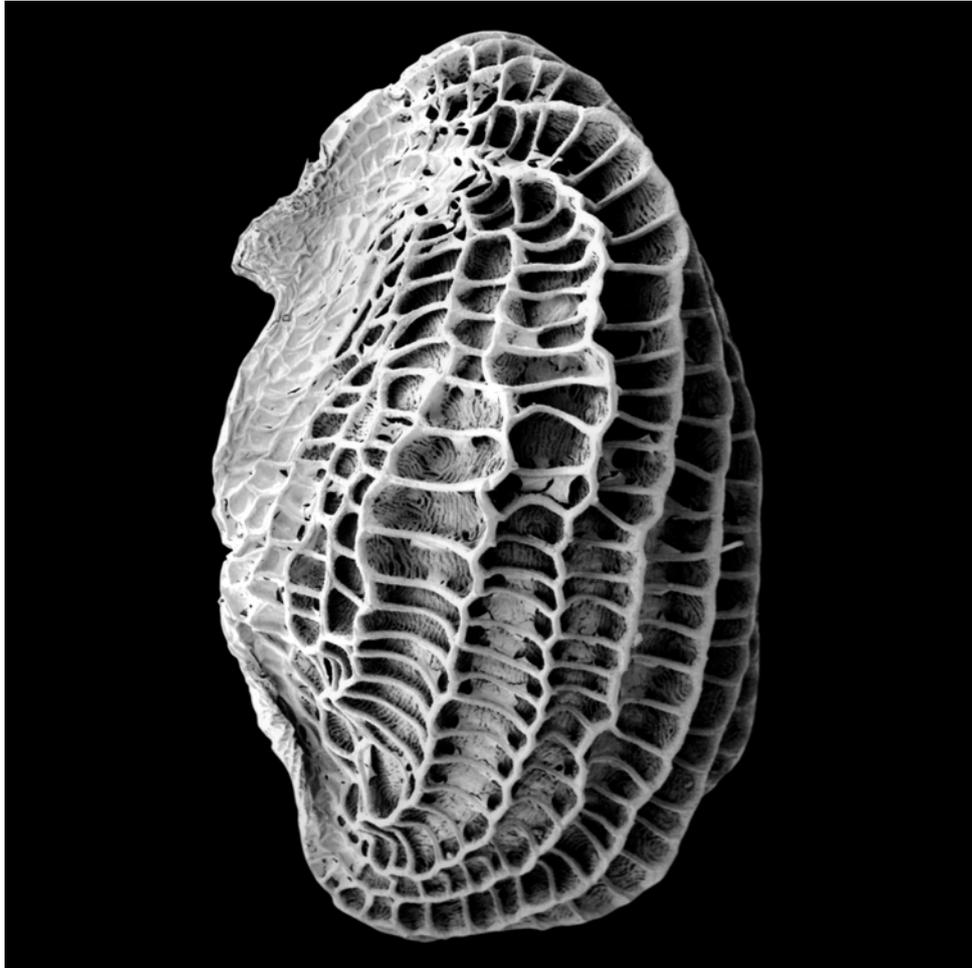


Figura 1.4: *Orthocarpus Luteus* fotografato da Rob Kessler e Wolfgang Stuppy. Come dimostra questa pianta, la Natura sviluppa strategie di generazione formale caratterizzate da alti livelli di personalizzazione. I sistemi biologici presentano una perfetta integrazione tra *forma*, struttura e materia e tale unione è ottenuta assimilando i processi di generazione della *forma*, adattamento e crescita. Nel progetto artificiale, per analogia intuitiva, si studieranno gli ambienti di modellazione, analisi e fabbricazione per proporre strategie alternative che emulano quelli naturali. Da Oxman, N., 2010. *Material-based Design Computation*. Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, Stati Uniti d'America, p. 38.



Figura 1.5: Fiori e foglie di loto fotografate da Anne Belmont. La microstruttura della foglia di loto non permette all'acqua di penetrare e le gocce di liquido si dispongono sulla superficie in forma sferica. Queste sfere d'acqua raccolgono detriti e impurità e, quando rotolano, lasciano la foglia pulita. Da Belmont, A., 2021. Flower Photography. [online] *Anne Belmont*. Disponibile su: <www.annebelmontphotography.com/> [Data di accesso: 5 luglio 2021].



Figura 1.6: Baco da seta immortalato durante l'esperimento del *Silk Pavilion* dal *Mediated Matter Group*. Ispirato dalla capacità del baco da seta di fili di seta con diverse proprietà, il gruppo di ricerca ha creato una struttura architettonica che fonde Fabbricazione Digitale e Biologica. Da MIT Media Lab, 2012. Project Overview, Silk Pavilion - MIT Media Lab. [online] *Media.mit.edu*. Disponibile su: <www.media.mit.edu/projects/silk-pavilion/overview/> [Data di accesso: 23 marzo 2021].



Figura 1.7: Una tribù Turkana prende l'acqua da un pozzo fatto in casa profondo venti metri, a Kaitede, nella provincia della Rift Valley in Kenya. Fotografia di Stefano De Luigi. Da De Luigi, S., 2021. Life. [online] *Stefanodeluigi.com*. Disponibile su: <www.stefanodeluigi.com/life.html> [Data di accesso: 17 novembre 2021].

IL CAMBIAMENTO CLIMATICO Inquadramento della crisi ambientale

“Buildings, too, are children of Earth and Sun.”
– Frank Lloyd Wright

2.1 Architettura e progresso

In fondo l'architettura è essenzialmente ottimista. Ha reso propria l'eterna aspirazione di coniugare un aspetto più propriamente emotivo, legato al benessere del fruitore, a uno più pratico, il servizio svolto o la sua funzione. Questa coppia offre una definizione concisa di quelli che potrebbero essere gli obiettivi finali di ogni opera costruita.

Riflettendoci su, tali propositi sembrano ravvivare un collegamento simbiotico che lega pratica a poetica (o la tecnica all'intuizione) in una qualunque opera materiale dell'ambiente costruito (Fernandez, 2006).

Gli edifici oggi forniscono un servizio affidabile, garantiscono un riparo durevole e necessario per soddisfare i requisiti dell'utenza. È evidente che raggiungere tali obiettivi è stata la forza trainante di gran parte della progettazione architettonica. L'equilibrio tra i due fattori è essenzialmente la manifestazione delle priorità della società e del flusso di capitali economici e sociali.

Nel corso dei secoli, l'architettura si è espressa soprattutto nella ricerca del piacere, un desiderio soggetto a continua evoluzione. L'organizzazione spaziale e volumetrica si rigenera a partire dalla qualità della luce, dal movimento dell'aria, dalla risposta a codici stilistici e ornamentali, dall'importanza suggestiva del giusto materiale (Fernandez, 2006). Migliaia di edifici estendono

così la loro utilità nell'espressione poetica.

Oggi le costruzioni sono pensate per soddisfare le diverse aspirazioni di una società complessa. Quando piacere e servizio si intrecciano indissolubilmente, l'ambiente costruito diventa un mosaico riccamente vario di invenzioni progettuali e creatività ingegneristiche ottenute attraverso l'evoluzione e l'aggiornamento nel tempo. Ci sembra ora naturale vivere in un'epoca di frenetica eterogeneità in cui i codici estetici sono mescolati. È forse proprio questa naturalezza che ha generato ogni tipo di proposta architettonica: la mescolanza, unita alla ricerca e l'innovazione del settore, ha dato origine alle *forme* sorprendenti dell'architettura contemporanea.

La ricerca della *forma* in architettura ha sempre affascinato, ma è necessaria una certa cautela per evitare di elogiare la sola tecnica o la sola poetica. Si tratterebbe di una banalizzazione del valore dell'architettura, del suo significato, del suo colore, del suo materiale e della sua percezione, che condurrebbe inevitabilmente al fallimento spirituale dell'immaginazione.

Come si è già affermato, parallelamente anche la natura dei servizi è cambiata; essa si è evoluta nel tempo modificandosi in particolar modo durante la Rivoluzione Industriale e all'inizio del XIX secolo anche se i nostri bisogni fisiologici non sono essenzialmente cambiati nel tempo (Fernandez, 2006).

Abbiamo dunque sviluppato aspettative maggiori per i livelli di comfort, obbligando il progresso tecnologico a seguire le nostre ambizioni. Ci aspettiamo una costanza e un'affidabilità impeccabile sulle prestazioni strutturali, un controllo perfetto sull'ambiente interno, la prevedibilità dell'integrità dell'involucro edilizio e un livello generale di prestazioni dei sistemi a un livello mai raggiunto prima. Era inevitabile che i cambiamenti e l'evoluzione avvenuti così frettolosamente, cambiando e rivoluzionando radicalmente i sistemi, portassero anche a conseguenze problematiche.

2.2 La crisi dell'ambiente

Il cambiamento climatico è la grande sfida globale che investe tutti i Paesi in modo equivalente e uniforme, centrale oggi nel dibattito pubblico, ma ignorato per troppo tempo.

Nonostante le evidenze scientifiche, si tratta comunque di un argomento controverso che ha scatenato un bizzarro scetticismo, ma fatta eccezione per la paradossale corrente negazionista (che non avrà seguito nella trattazione), il riscaldamento globale e i cambiamenti climatici minacciano i cicli naturali da cui dipendiamo e sono, a tutti gli effetti, la sfida più seria mai affrontata.

L'aumento delle temperature globali rappresenta un fattore di rischio per la salute umana, incentivando e ampliando la diffusione delle malattie. Tali temperature modificano anche

i modelli meteorologici causando un aumento delle condizioni estreme, danneggiando le economie globali, riducendo la produttività di svariati settori e nuocendo gli ecosistemi causando la scomparsa di specie animali e vegetali in tutto il mondo.

Proteggere l'ambiente e ridurre gli impatti delle attività antropiche sugli equilibri planetari sono divenute prerogative che impegnano le potenze mondiali in trattati e convenzioni da decenni, ma sinora non si può dire si siano dimostrati pienamente efficaci.

Le conseguenze di anomali cambiamenti climatici si collocano in tutti i settori e non escludono certamente l'ambiente costruito, divenuto sfondo e causa considerevole di tali processi. Quest'ultima istanza è la ragione per cui il presente elaborato insiste proprio sul rapporto reciproco e biunivoco tra cambiamento climatico e ambiente edile, ritenendo quest'ultimo sia responsabile degli impatti umani sul clima che soluzione parziale al problema.

A partire dalle fondamenta teoriche, scientifiche e politiche sul fenomeno del cambiamento climatico, la trattazione intreccerà in seguito le potenzialità del settore edile nel fornire soluzioni determinanti con un approccio critico e analitico, considerando la possibilità di introdurre un metodo più sostenibile per la progettazione architettonica.

Quasi come naturale rilettura dei valori promossi dall'iniziativa New European Bauhaus della Commissione europea, la tesi abbraccerà in seguito gli stessi principi interdisciplinari su cui venne fondata l'accademia di Weimar per far fronte alla sfide di oggi. Se l'iniziativa è definita come il «*ponte tra il mondo della scienza e della tecnologia e quello dell'arte e della cultura*» dalla presidente Ursula von der Leyen, il metodo che verrà proposta in seguito, basato sull'approccio biomimetico, accoglie questo stesso spirito, basandosi anch'esso sulla sostenibilità, l'accessibilità, il dialogo, il recupero del saper fare e l'inclusività sociale ed economica (Commissione europea, 2021).

2.2.1 Effetto serra e riscaldamento globale

Nel percorso di studi che termina con il presente elaborato vi sono stati continui cenni alle problematiche ambientali, ma per approfondire e comprendere aspetti più teorici e scientifici in modo esaustivo è fondamentale ricorrere a un'attenta lettura degli ultimi rapporti sul cambiamento climatico stilati dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), l'ente delle Nazioni Unite impegnato a fornire valutazioni periodiche sugli impatti e i rischi futuri¹.

¹ L'IPCC (Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico) è il foro scientifico creato da due organismi delle Nazioni Unite, l'Organizzazione meteorologica mondiale (OMM) e il Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP) nel 1988 con il fine di studiare il riscaldamento globale. I rapporti di valutazione periodicamente diffusi dall'IPCC forniscono la base per diversi accordi internazionali (come la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici e il Protocollo di Kyoto che l'attua). Non svolge direttamente attività di ricerca o di raccolta dati, piuttosto fonda le sue valutazioni sulla letteratura scientifica e sui rapporti delle più grandi istituzioni mondiali: l'attività principale è quindi la preparazione di valutazioni periodiche di dati scientifici, tecnici e

L'ultimo report di sintesi (AR5) fornisce una visione integrata del cambiamento climatico, affrontando e osservando il fenomeno, le sue cause, suggerendo previsioni future, rischi, impatti e possibili alternative strategiche. Il rapporto include, inoltre, essenziali informazioni circa l'Articolo 2 della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC)².

L'IPCC definisce i mutamenti climatici come una qualsiasi variazione a livello globale del clima terrestre nel corso del tempo, siano essi attribuibili a cause naturali siano invece imputabili ad attività antropiche. Tali variazioni avvengono a diverse scale spaziali e storico-temporali rispetto a diversi parametri ambientali (IPCC, 2014). Il clima terrestre risulta infatti in costante evoluzione per fattori naturali intrinseci, tuttavia è ormai innegabile che le componenti antropogeniche stiano determinando l'andamento climatico, scatenando una rapida accelerazione e un'inconsueta estremizzazione della sua variabilità.

A causare preoccupazione sono le emissioni di gas a effetto serra e le relative concentrazioni in atmosfera: la comunità scientifica internazionale sostiene infatti che l'immissione di tali gas derivanti dalle attività antropiche abbia incrementato la concentrazione di questi stessi presenti naturalmente in atmosfera. I gas ad effetto serra, che hanno un ruolo fondamentale per il mantenimento del calore terrestre, sono infatti trasparenti alla radiazione solare in entrata sulla Terra, ma riescono a trattenere, in maniera consistente, la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre, dall'atmosfera e dalle nuvole; assorbono ed emettono a specifiche lunghezze d'onda nello spettro della radiazione infrarossa e questa loro proprietà causa il fenomeno noto come effetto serra che consente alla superficie terrestre di trattenere una quantità di calore tale da permettere la vita sulla Terra (Enciclopediaambiente, 2015). Le consistenti concentrazioni in atmosfera di gas serra hanno incrementato considerevolmente l'effetto serra, innescando il riscaldamento globale, a sua volta causa di ulteriori fenomeni concatenati. È necessario notare inoltre che le alterazioni appena citate possono divenire esse stesse agenti di ulteriori emissioni ad effetto serra, provocando un'inversione della causalità e un'estensione dei reciproci impatti: si tratta di un fenomeno retroattivo del sistema (il *feedback climatico*) che, inevitabilmente, influenza la struttura stessa.

socioeconomici rilevanti per la comprensione del fenomeno climatico, compresi i potenziali impatti e le alternative di mitigazione e adattamento. Ad oggi sono stati realizzati cinque rapporti di valutazione e il sesto è previsto per il 2022.

² La Convenzione quadro delle Nazioni Unite per il cambiamento climatico persegue l'obiettivo di stabilizzare la concentrazione di gas a effetto serra in atmosfera a un livello tale da prevenire interferenze dannose antropogeniche. L'Articolo 2 esplicitamente l'obiettivo principale della Convenzione stessa. «*L'obiettivo ultimo della presente Convenzione e di tutti i relativi strumenti giuridici che la Conferenza delle Parti può adottare è di stabilizzare, in conformità delle pertinenti disposizioni della Convenzione, le concentrazioni di gas ad effetto serra nell'atmosfera a un livello tale che sia esclusa qualsiasi pericolosa interferenza delle attività umane sul sistema climatico. Tale livello deve essere raggiunto entro un periodo di tempo sufficiente per permettere agli ecosistemi di adattarsi naturalmente a cambiamenti di clima e per garantire che la produzione alimentare non sia minacciata e lo sviluppo economico possa continuare ad un ritmo sostenibile.*» (Commissione europea, 2021).

L'impatto delle emissioni di gas serra di origine antropica diventa decisivo a partire dalla fine del Novecento, raggiungendo il picco nel primo decennio del Duemila. Le concentrazioni di gas serra diventano tali da non permettere la fuoriuscita della radiazione solare, provocando il riscaldamento globale.

Secondo il primo dei tre contributi (il *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* uscito nell'agosto 2021) che costituirà parte del nuovo AR6 (previsto per il 2022), gli ultimi quattro decenni sono stati progressivamente più caldi di qualsiasi altro precedente il 1850: la temperatura superficiale globale nei primi due decenni del XXI secolo (2001-2020) è stata di 0.99°C superiore a quella tra il 1850 e il 1900 mentre quella tra il 2011 e il 2020 è cresciuta di 1.09°C rispetto allo stesso periodo (Figura 2.1) (IPCC, 2021). Oltre al consistente riscaldamento pluridecennale, la temperatura superficiale media globale mostra una sostanziale variabilità: le registrazioni su brevi periodi risultano dunque sensibili tra la data di inizio e di fine, non riflettendo complessivamente le tendenze climatiche a lungo termine (IPCC, 2014).

Nel periodo dal 1992 al 2011, gli effetti del cambiamento climatico diventano evidenti anche sulle calotte glaciali della Groenlandia e dell'Antartide che hanno notevolmente perso massa, probabilmente a un ritmo maggiore dal 2002 al 2011 (IPCC, 2014). L'estensione media annuale del ghiaccio marino artico è diminuita nel periodo da 1979 al 2012, con un tasso percentuale compreso, probabilmente, tra il 3.5 e il 4.1% per decennio (IPCC, 2014). La sua estensione è diminuita in ogni stagione progressivamente e in ogni decennio successivo dal 1979, tuttavia sussistono ipotesi relative a forti differenze regionali in Antartide, con estensione in aumento in alcune regioni e diminuzione in altre (IPCC, 2014). Più recentemente, tra il 2011 e il 2020, l'IPCC ha stimato che la superficie media annua del ghiaccio marino artico ha raggiunto il livello più basso dal 1850 e la natura globale del ritiro sincrono di tutti ghiacciai non ha precedenti rispetto agli ultimi 2000 anni (IPCC, 2021).

Invece, a partire dall'inizio del Novecento al 2018, il livello medio globale del mare è aumentato di 0.20 m, il più rapido aumento stimato negli ultimi 3000 anni (IPCC, 2021).

L'IPCC ha inoltre evidenziato che, mediamente, sulle aree terrestri a media latitudine dell'emisfero settentrionale, le precipitazioni sono aumentate drasticamente a partire dal 1901 (Figura 2.2) (IPCC, 2014) e, secondo il più recente Rapporto del 2021, il tasso di aumento più rapido risalirebbe agli anni '80 (IPCC, 2021).

Le osservazioni relative alle variazioni di salinità della superficie oceanica forniscono anche prove indirette dei cambiamenti nel ciclo globale dell'acqua sull'oceano: verosimilmente, le regioni ad alta salinità, a causa dell'evaporazione, sono diventate più saline mentre le regioni a bassa salinità, con le precipitazioni, sono diventate più fresche dagli anni '50 (IPCC, 2014).

2.2.2 Le emissioni di origine antropica

Il Mauna Loa Observatory (MLO) delle Hawaii, una stazione di monitoraggio e raccolta dati dal 1950, ha riscontrato un aumento della CO₂ atmosferica di circa 118.29 ppmv (parti per milione in volume)³ dal periodo preindustriale ad oggi (Figura 2.3).

Se ne deduce che il rapido aumento della concentrazione di CO₂ avviene in concomitanza con l'uso dei combustibili fossili, diffuso a partire dall'epoca industriale. L'idea è che sussista quindi una dipendenza incontestabile tra attività antropica, aumento dei gas a effetto serra e incremento della temperatura globale (Merloni, 2017).

Tale ipotesi è stata confermata dal *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*: l'IPCC, per il nuovo Rapporto, ha lavorato per migliorare ulteriormente le stime e le informazioni basate sull'osservazione, fornendo una visione più completa di ogni componente del sistema climatico e dei suoi mutamenti ad oggi. In particolare, sono stati implementate nuove simulazioni di modelli climatici e nuove analisi e metodi combinatori per una maggiore comprensione dell'influenza antropica sulle variazioni climatiche (IPCC, 2021).

Secondo il nuovo contributo dell'IPCC è infatti inequivocabile che le azioni umane siano responsabili del riscaldamento dell'atmosfera, dell'oceano e del suolo terrestre e i cambiamenti diffusi coinvolgono diffusamente e rapidamente l'atmosfera, l'oceano, la criosfera e la biosfera (IPCC, 2021). Inoltre, rispetto all'AR5, nella prima parte del AR6 l'attribuzione di colpa ad attività antropiche rispetto ad alcuni fenomeni connessi al cambiamento climatico si è rafforzata: in particolare, si ritiene che l'evidente aumento di alcuni eventi estremi (ondate di calore, forti precipitazioni, siccità e cicloni tropicali) siano diretta conseguenza dell'azione dell'uomo (Figura 2.4) (IPCC, 2021).

Gli studi condotti hanno dimostrato che le emissioni totali di gas serra antropogeniche siano in costante crescita dal 1970, con un picco tra il 2000 e il 2010, anno in cui hanno raggiunto i 49 ± 4.5 GtCO₂-eq/anno⁴. I processi industriali e l'uso di combustibili fossili sarebbero responsabili, dal 1970 al 2010, del 78% circa di emissioni di CO₂ (IPCC, 2014).

Nello specifico, l'IPCC ha osservato effettivamente che gli aumenti delle concentrazioni di gas a effetto serra dal 1750 sono causati dalle attività umane e, a partire dal 2011, le concentrazioni nell'atmosfera risultano in continuo aumento, raggiungendo medie annue di 410 ppm per l'anidride carbonica (CO₂), 1866 ppb per il metano (CH₄) e 332 ppb per l'ossido di azoto (N₂O) nel 2019 (Figura 2.5) (IPCC, 2021). La superficie terrestre e quella oceanica hanno assorbito costantemente (globalmente circa il 56% all'anno) parte delle emissioni di CO₂ dalle attività

³ Misurata come frazione molare in aria secca.

⁴ Le emissioni di gas serra sono quantificate come emissioni di CO₂ equivalente (GtCO₂-eq) utilizzando ponderazioni basate sui 100 anni del potenziale di riscaldamento globale, utilizzando i valori del rapporto di valutazione IPCC.

umane negli ultimi sei decenni (con gravi differenze regionali) e, secondo stime attendibili, l'aumento totale della temperatura superficiale globale di origine antropica si aggirerebbe attorno a un intervallo compreso tra i 0.8°C e i 1.3°C dal 1850 al 2019 (IPCC, 2021).

Anche rispetto alle precipitazioni medie globali sulla terraferma e la salinità oceanica vicino alla superficie terrestre sussiste una probabile coincidenza tra il loro incremento e l'attività umana, mentre le tracce delle tempeste alle medie latitudini si sono verosimilmente spostate verso i poli a partire dagli anni '80, con una evidente e marcata stagionalità (IPCC, 2021).

In merito al ritiro globale dei ghiacciai e alla diminuzione dell'area del ghiaccio marino artico, l'IPCC ha stabilito che l'influenza umana potrebbe essere il principale motore dagli anni '90 mentre non vi sono fonti attendibili circa la responsabilità antropica per la riduzione dell'area del ghiaccio marino antartico registrata tra il 1979 e il 2020 (IPCC, 2021).

Potenzialmente l'attività dell'uomo avrebbe contribuito significativamente anche alla diminuzione della copertura nevosa primaverile dell'emisfero settentrionale dal 1950 e allo scioglimento superficiale della calotta glaciale della Groenlandia negli ultimi due decenni, ma, rispetto a quest'ultimo fenomeno, le prove risultano limitate e meno attendibili (IPCC, 2021).

Sempre alle emissioni di CO₂ prodotte dall'uomo sono attribuibili le maggiori responsabilità circa il riscaldamento e l'acidificazione degli oceani (in particolar modo dagli anni '70) e la diminuzione dei livelli di ossigeno in diverse regioni oceaniche (IPCC, 2021).

Rispetto a eventi meteorologici estremi, la frequenza e l'intensità di ondate di calore sono cresciute nella maggior parte delle regioni terrestri a partire dagli anni '50 mentre quelle di freddo sono divenute meno frequenti e meno gravi. Le ondate di calore marine sono invece raddoppiate in frequenza dagli anni '80 e si stima che l'influenza umana abbia contribuito, con ogni probabilità, alla maggior parte di esse almeno dal 2006 (IPCC, 2021). È inoltre probabile, secondo le stime dell'IPCC del 2021, che la proporzione globale dei principali cicloni tropicali sia aumentata negli ultimi quattro decenni e la latitudine in cui i cicloni tropicali nel Pacifico settentrionale occidentale raggiungono la loro massima intensità si sia spostata verso nord (IPCC, 2021).

Ed infine, il cambiamento climatico causato dall'uomo ha indotto e incrementato la siccità agricola ed ecologica in alcune regioni a causa dell'aumento dell'evapotraspirazione del suolo (IPCC, 2021).

Indipendentemente dalle cause scatenanti, le proiezioni climatiche mostrano che entro la fine del secolo corrente la temperatura globale superficiale terrestre potrebbe raggiungere 1.5°C oltre il periodo 1850 - 1900 (IPCC, 2014). Complessivamente, è stato stimato che, senza iniziative mirate alla riduzione delle emissioni globali di gas serra, l'aumento della temperatura media globale potrebbe superare i 2°C e arrivare anche oltre i 5°C rispetto al periodo preindustriale

(IPCC, 2021).

Anche se le previsioni risultano ovviamente instabili perché soggette a continue variazioni, il riscaldamento globale rappresenta un problema evidente e, come si è appena affermato, è già causa di alterazioni nella temperatura dell'aria, degli oceani, nel ciclo dell'acqua, nel livello dei mari e nella criosfera oltreché principio di alcuni eventi estremi (IPCC, 2014). Quelli che appaiono infatti come ridotti aumenti delle temperature medie comportano conseguenze catastrofiche per il pianeta.

2.2.3 Rischi del cambiamento climatico

I rischi legati alle variazioni climatiche derivano dalla vulnerabilità e dall'esposizione dei sistemi umani e naturali con i cambiamenti che il fenomeno comporta. Alcuni di questi sono ascrivibili e particolarmente rilevanti per singole regioni mentre altri colpiscono interi sistemi a scala globale (Figura 2.6).

Tra i più urgenti riconosciamo il rischio di estinzione di diverse specie animali e vegetali. La vegetazione è infatti incapace di spostarsi naturalmente in nuove aree geografiche in modo sufficientemente rapido da contrastare le variazioni climatiche mentre la maggior parte dei piccoli mammiferi e dei molluschi d'acqua dolce non saranno in grado di sopravvivere alle future condizioni climatiche. A subire le ripercussioni anche gli organismi marini, costretti ad affrontare livelli di ossigeno progressivamente in calo e un'acidificazione in costante crescita, così come le barriere coralline e gli ecosistemi polari (IPCC, 2014).

Si prevedono anche danni relativi al sistema alimentare. A causa delle previsioni sui cambiamenti climatici, la ridistribuzione globale e la riduzione della biodiversità marina in alcune regioni sensibili e vulnerabili renderanno impossibile la pesca e altri servizi ecosistemici. Grano, riso e mais nelle regioni tropicali e temperate subiranno negativamente l'impatto dell'aumento della temperatura. La maggior parte delle regioni subtropicali aride soffriranno drastiche riduzioni delle risorse idriche superficiali e sotterranee rinnovabili. Queste conseguenze, legate al previsto incremento della domanda alimentare, comporteranno gravi rischi per la sicurezza alimentare a livello globale (IPCC, 2014).

Conseguenze problematiche sono previste anche per la salute umana, in particolare nei Paesi in via di sviluppo a basso reddito: le alte temperature legate all'umidità potrebbero compromettere il regolare svolgimento di attività basilari, tra cui la coltivazione e il lavoro all'aperto. Ulteriori rischi connessi per popolazioni, beni, economie ed ecosistemi, impatteranno maggiormente coloro che non dispongono di infrastrutture e servizi essenziali o che vivono in aree più esposte (IPCC, 2014).

Inoltre, seppur sia complesso stimare gli effetti del cambiamento climatico sull'economia

mondiale, è certo che l'aumento della temperatura condurrà a significative perdite. Il connesso rallentamento della crescita economica renderà più difficile ridurre il divario tra popolazioni ricche e povere, segnando invece la nascita di nuove aree in difficoltà. Le popolazioni che non dispongono delle risorse per una migrazione pianificata saranno costrette a una maggiore esposizione a eventi meteorologici estremi, aumentando indirettamente anche il rischio di conflitti violenti (IPCC, 2014).

2.2.4 Scenari, proiezioni e previsioni sul cambiamento climatico

Secondo il *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, considerando tre differenti scenari in termini di gas a effetto serra prodotti (bassi, intermedi ed elevati), si prevede che la temperatura superficiale globale (in attuale aumento tra l'1.5°C e i 2°C) continuerà a crescere almeno fino alla metà del secolo se non si verificano profonde riduzioni delle emissioni di CO₂ e di altri gas serra (Figura 2.7) (IPCC, 2021).

Rispetto al periodo dal 1850 al 1900, si ritiene probabile che la temperatura superficiale globale media dal 2081 al 2100 sarà superiore di 1.0°C (fino a 1.8°C) pur considerando lo scenario con il minor numero di emissioni di gas serra; in uno scenario intermedio, invece, la temperatura potrebbe salire fino a 3.5°C in più (in un range compreso tra i 2.1 e i 3.5°C) e fino a 5.7°C con emissioni più elevate (in un intervallo compreso tra i 3.3 e i 5.7°C) (IPCC, 2021).

Come diretta conseguenza dell'aumento del riscaldamento globale, molte alterazioni nel sistema climatico si accentueranno maggiormente. Tra questi sono inclusi: l'incremento della frequenza e dell'intensità delle temperature estreme, le ondate di calore marine, le intense precipitazioni, la siccità agricola ed ecologica in alcune regioni, i cicloni tropicali forti, la riduzione del ghiaccio marino artico, del manto nevoso e del permafrost (Figura 2.8) (IPCC, 2021).

Le previsioni riguardano anche l'intensità del ciclo globale dell'acqua: è stato stimato che il continuo riscaldamento globale avrà ripercussioni essenziali sulla sua variabilità, sulle precipitazioni monsoniche globali e sulla gravità degli eventi umidi e secchi (Figura 2.9) (IPCC, 2021).

Infatti, rispetto alle previsioni dell'AR5, vi sono prove evidenti che il ciclo dell'acqua continuerà a intensificarsi in relazione all'aumento delle temperature globali e le precipitazioni medie annue aumenteranno fino al 5% nello scenario con emissioni di GHG molto basse, tra l'1.5 e l'8% in uno scenario con emissioni intermedie e dell'1-13% nella peggiore delle ipotesi considerabili (IPCC, 2021). Le precipitazioni sono destinate ad aumentare anche alle alte latitudini, nel Pacifico equatoriale e in parti delle regioni monsoniche, ma diminuiranno invece sulle regioni subtropicali e in limitate aree tropicali (IPCC, 2021).

Il clima con temperature in rialzo intensificherà anche gli eventi e le stagioni meteorologiche umide e secche, con significative implicazioni per fenomeni come inondazioni o siccità, con effetti variabili in relazione alla posizione (IPCC, 2021).

All'interno del nuovo Rapporto dell'IPCC viene descritta anche, in uno scenario con emissioni crescenti, la futura inefficacia dei pozzi di assorbimento di carbonio oceanici e terrestri nell'accumulo di CO₂ (Figura 2.10) (IPCC, 2021): mentre si prevede che i pozzi naturali assorbano, in termini assoluti, una quantità progressivamente maggiore di CO₂, si stima che diventeranno sempre meno efficienti rispetto alle proporzioni della stessa emessa, incrementando la percentuale trattenuta in atmosfera (IPCC, 2021).

Purtroppo, l'IPCC del 2021 ha dimostrato che molte alterazioni dovute alle emissioni di gas serra passate (e future) si sono rivelate irreversibili, colpendo in modo significativo gli oceani, le calotte glaciali e il livello globale del mare (Figura 2.11) (IPCC, 2021).

2.3 Adattamento e mitigazione

Come già affermato in precedenza, le conseguenze del cambiamento climatico hanno gravi ripercussioni e impatti sull'economia delle attività produttive e sui servizi associati all'ambiente, seppur gli effetti osservati e previsti varino notevolmente a seconda delle aree e in funzione del settore.

Si è reso necessario sviluppare politiche e azioni di mitigazione e adattamento, nell'ottica di formulare e articolare risposte per minimizzare gli impatti negativi ed, eventualmente, incoraggiare nuove possibilità di sviluppo economiche e territoriali. In particolare, secondo quanto stabilito dall'IPCC, l'adattamento e la mitigazione sono «*strategie complementari per ridurre e gestire i rischi del cambiamento climatico*» (IPCC, 2014). Sostanziali riduzioni delle emissioni nei prossimi decenni possono ridurre efficacemente i rischi climatici, inglobando prospettive di adattamento e di mitigazione, capaci di contribuire a scenari resilienti per uno sviluppo sostenibile (IPCC, 2014).

L'adattamento e la mitigazione sono quindi processi di arrangiamento in progresso, risposte ad hoc a fattori climatici e non, che si influenzano reciprocamente su differenti livelli temporali e geografici.

In particolare la mitigazione, i cui risultati sono riscontrabili a breve termine ma perdurano per tutto il secolo, può ridurre sostanzialmente gli impatti dei cambiamenti climatici degli ultimi decenni del XXI secolo e spingersi oltre. Strategie di adattamento, invece, possono già essere applicate per affrontare i rischi attuali e trasformate, ripensate o mantenute in futuro per rischi emergenti.

Senza ulteriori sforzi di mitigazione, e considerando anche l'attuazione di appropriate misure di adattamento, entro la fine del XXI secolo il riscaldamento comporterà rischi e relativi impatti irreversibili a livello globale (Figura 2.12) (IPCC, 2014). Nella maggior parte degli scenari ricostruiti, senza sollecitazioni aggiuntive, è più probabile che il riscaldamento si aggirerà intorno ai 4°C sopra i livelli preindustriali entro il 2100 (IPCC, 2014). Come già detto, i rischi associati a temperature pari o superiori a 4°C includono una sostanziale estinzione delle specie, insicurezza alimentare globale e regionale, vincoli conseguenti alle attività umane comuni e un potenziale di adattamento limitato in alcuni casi. Mentre alcuni rischi del cambiamento climatico, come per sistemi unici e minacciati e quelli associati a eventi meteorologici estremi, si possono considerare da moderati ad alti con temperature da 1°C a 2°C superiori ai livelli preindustriali (IPCC, 2014).

Purtroppo è necessario notare che la vulnerabilità ai cambiamenti climatici, le emissioni di gas serra e la capacità di adottare misure di adattamento e mitigazione sono fortemente condizionate da diversi fattori, come lo stile di vita, il comportamento individuale e la cultura locale: l'efficacia delle politiche è spesso influenzata da come esse incentivano o dipendono da cambiamenti regionali appropriati (IPCC, 2014).

L'adattamento e la mitigazione, per essere efficaci in modo duraturo, devono evolversi seguendo le mutevoli circostanze interne ed esterne e perciò devono essere affrontate come un processo di miglioramento continuo. Il clima e le condizioni socioeconomiche sono infatti soggetti a continui cambiamenti, così come i rischi e/o le avversioni a tali rischi. Pertanto, l'attuabilità di una risposta adattativa e di mitigazione deve essere periodicamente rivalutata alla luce dei diversi cambiamenti, apportando miglioramenti alle misure esistenti o progettandone di aggiuntive o alternative. E inoltre, questo processo di miglioramento continuo, offre l'opportunità di incorporare le lezioni apprese attraverso l'implementazione e la convivenza con precedenti sforzi di adattamento e di mitigazione.

2.3.1 Percorsi di mitigazione

Dunque senza ulteriori sforzi di riduzione delle emissioni di gas serra, la loro crescita è destinata a persistere gravemente. Gli scenari di emissione, che portano a concentrazioni di CO₂ equivalente nel 2100 di circa 450 ppm, sono suscettibili al mantenimento del riscaldamento sotto i 2°C nel corso del XXI secolo rispetto ai livelli preindustriali⁵ (Figura 2.13) (IPCC, 2014).

In accordo con questi scenari, piani di mitigazione ritengono indispensabile una riduzione delle emissioni di gas a effetto serra globali di origine antropogenica dal 40 al 70% entro il 2050

⁵ Per confronto, la concentrazione di CO₂-eq nel 2011 è stimata approssimativamente a 430 ppm (con un intervallo di incertezza racchiusa tra i 340 e i 520 ppm) (IPCC, 2014).

(rispetto al 2010⁶) fino a un livello prossimo allo zero nel 2100.

Gli scenari di mitigazione che raggiungono circa 450 ppm di CO₂ equivalente nel 2100 determinano un superamento temporaneo delle concentrazioni atmosferiche, così come nell'ottica di prospettive che arrivano a circa 500/550 ppm di CO₂ equivalente nel 2100. A seconda del grado di superamento, gli scenari si fondano principalmente sull'accesso e l'impiego di bioenergia con cattura e stoccaggio di anidride carbonica (*Bioenergy with carbon capture and storage*, BECCS) e sull'imboschimento (IPCC, 2014). La disponibilità di queste tecnologie e metodi di rimozione di diossido di carbonio (*Carbon Dioxide Removal*, CDR) sono incerte e, in varia misura, associate a sfide e rischi⁷.

La ricerca dell'IPCC ha dimostrato che gli scenari di mitigazione che raggiungono circa 450 o 500 ppm di CO₂ equivalente entro il 2100 comportano costi relativamente ridotti per raggiungere obiettivi importanti come la qualità dell'aria e la sicurezza energetica, con cospicui benefici per la salute umana, gli influssi sull'ecosistema, la congruità delle risorse e la resilienza del sistema energetico.

A tal proposito, le stime dei costi economici associati alla mitigazione variano ampiamente a seconda delle metodologie e delle ipotesi, ma aumentano con il rigore della strategia. In assenza o con una disponibilità esigua di tecnologie di mitigazione (come bioenergia, cattura e sequestro del diossido di carbonio e la loro combinazione BECCS, nucleare, eolica e solare), i costi possono aumentare sensibilmente a seconda della manovra considerata e in funzione delle tempistiche di attuazione. Infatti, ritardare l'attuazione di strategie simili aumenta enormemente i costi nel medio-lungo periodo, considerando anche che, al momento, molti modelli non sono in grado di limitare la previsione dell'innalzamento dei 2°C stimati se non adottati a breve termine (IPCC, 2014). L'IPCC ritiene comunque che strategie di mitigazione sistemiche e intersettoriali ben progettate si mostrino più convenienti nel ridurre le emissioni rispetto a concentrarsi su singole tecnologie e settori.

Inoltre, in termini di costi, le riduzioni a breve termine della domanda di energia sono un elemento importante di strategia di mitigazione efficace: forniscono maggiore flessibilità per ridurre l'intensità di carbonio nel settore dell'approvvigionamento energetico, proteggono dai rischi e aggirano il vincolo di infrastrutture ad alta intensità di carbonio. Le politiche di

⁶ Questo intervallo differisce da quello previsto per una categoria di concentrazione simile nell'AR4 (inferiore del 50-85% rispetto al 2000 solo per il CO₂). Le ragioni di questa differenza includono che questa relazione ha valutato un numero sostanzialmente maggiore di scenari rispetto alla AR4 e considera tutti i gas a effetto serra. Inoltre, gran parte dei nuovi scenari includono le tecnologie di rimozione del biossido di carbonio (CDR). Altri fattori includono l'uso di 2100 livelli di concentrazione invece di livelli di stabilizzazione e lo spostamento dell'anno di riferimento dal 2000 al 2010 (IPCC, 2014).

⁷ I metodi CDR hanno limiti biogeochimici e tecnologici al loro potenziale su scala globale. Non ci sono conoscenze sufficienti per quantificare quante emissioni di CO₂ potrebbero essere parzialmente compensate da tecnologie di rimozione di biossido di carbonio. I metodi CDR possono avere effetti collaterali e conseguenze a lungo termine su scala mondiale (IPCC, 2014).

mitigazione svaluterebbero dunque le risorse di combustibili fossili e ridurrebbero i ricavi per gli esportatori di questi stessi, seppur con enormi differenze tra regioni.

Per la silvicoltura si possono rivelare interessanti strategie come l'imboschimento, la gestione forestale sostenibile e la riduzione della deforestazione (con grandi differenze relative tra regioni); per l'agricoltura, invece, risultano vincenti una gestione progettata dei terreni coltivati, dei pascoli e il ripristino dei suoli organici (IPCC, 2014).

È facile notare che il comportamento, lo stile di vita e la cultura rappresentano una notevole influenza sull'uso dell'energia e sulle emissioni associate. Le emissioni possono essere sostanzialmente ridotte attraverso una radicale trasformazione dei modelli di consumo, sensibilizzando all'adozione di misure di risparmio energetico, variazioni alimentari e riduzione degli sprechi.

2.3.2 Percorsi di adattamento

Le strategie di adattamento comprendono misure che contrastano il problema nell'immediato con risvolti a breve termine, contribuendo al benessere comune in termini di sicurezza e di servizi a diversa scala, a seconda del luogo e del contesto.

Affinché la pianificazione e l'attuazione di strategie adattive si rivelino efficaci, sono necessarie azioni complementari su più livelli che coinvolgono il singolo individuo come i governi.

A livello nazionale, una coordinazione dinamica degli sforzi di governi locali e subnazionali che sostengono la diversificazione economica e forniscono informazioni rilevanti risulta essere uno strumento valido per ridurre la vulnerabilità agli impatti climatici. È richiesto lo stesso impegno ai settori locali e privati, sempre più essenziali per il progresso proficuo di misure di adattamento dato il loro ruolo nell'adesione comunitaria e nella gestione di informazioni e finanziamenti su eventuali rischi.

Dunque, è incontestabile che la progettazione e la concretizzazione di queste strategie a tutti i livelli di *governance* dipendano strettamente dai valori, dagli obiettivi e dalla percezione del rischio della società (IPCC, 2014). Riconoscere l'esistenza di gradi diversi di interesse, contesti eterogenei, aspettative divergenti, può giovare nella formulazione di processi decisionali: i sistemi e le pratiche locali e tradizionali (compresa la visione olistica della comunità e dell'ambiente da parte delle popolazioni indigene) costituiscono una risorsa notevole per l'adattamento ai cambiamenti climatici, per cui si rivela inevitabile una loro integrazione al fine di rendere le strategie vincenti.

Le conversioni nelle decisioni e azioni economiche, sociali, tecnologiche e politiche possono migliorare l'adattamento e promuovere lo sviluppo sostenibile. La transizione è più incisiva

quando riflette visioni e approcci che mirano a raggiungere uno sviluppo sostenibile in conformità con le circostanze e le priorità della visione locale.

Le strategie di adattamento sono soggette a vincoli che impediscono una loro effettiva pianificazione e implementazione. Tali vincoli possono derivare dalla quantità di risorse umane e finanziarie (spesso troppo limitate), dal livello di integrazione o coordinamento delle *governance*, dalle incertezze sugli impatti previsti, dalle percezioni singolari dei rischi e dei valori concorrenti, dall'assenza di leader e sostenitori chiave o, ancora, dai difetti degli strumenti per monitorare l'efficacia delle strategie. Ulteriori problemi si possono incontrare quando viene concessa un'eccessiva enfasi sui risultati a breve termine: la pianificazione o l'implementazione inadeguata in tal senso può aumentare la vulnerabilità o l'esposizione perché si sottovaluta la complessità di una strategia di adattamento, auspicando ad aspettative del tutto irrealistiche.

I maggiori sforzi di adattamento ai mutamenti climatici sono associati a una crescente complessità delle interazioni, in particolare tra acqua, energia, uso del suolo e biodiversità, ma gli strumenti per abbracciare e gestire queste ultime rimangono modesti (IPCC, 2014). Esempi di azioni con benefici contemplano e includono una migliore efficienza energetica e fonti di energia più pulite, una riduzione del consumo di energia e acqua nelle aree urbane attraverso l'inverdimento delle città e il riciclaggio dell'acqua, un'agricoltura e silvicoltura sostenibili e la protezione degli ecosistemi per lo stoccaggio del carbonio e altri servizi ecosistemici (IPCC, 2014).

2.4 Strategie politiche

Nell'attuazione di misure correttive e di strategie per la salvaguardia ambientale è importante considerare il ruolo della politica. È essenziale riflettere sui possibili strumenti di supporto oltretutto sulle risorse finanziarie disponibili che gli organi governativi sono in grado di smuovere ai fini della risoluzione del cambiamento climatico, a livello internazionale, sovra-nazionale, nazionale e regionale.

Nella presente tesi non sarà trattato il settore privato nonostante si riconosca l'importanza della risposta di alcune specifiche aree (il settore assicurativo, per esempio, con strumenti come le microassicurazioni e i microcrediti per la prevenzione delle catastrofi) nella risposta alla necessità di adattamento al cambiamento climatico.

2.4.1 Accordi multilaterali

Seppur si possa ritenere irrilevante per l'ambiente da dove provenga una maggiore o minore emissione di gas a effetto serra, è richiesta una risposta coordinata e cooperativa a livello

internazionale che non può considerare l'effettiva provenienza delle stesse dinamiche.

La *Prima Conferenza Mondiale sul Clima* è datata 1979 e si tenne a Ginevra, diretta dall'Organizzazione Mondiale per la Meteorologia (*World Meteorological Organization*, WMO). Durante il congresso fu approvata una Dichiarazione che invitava gli organismi governativi di tutto il Mondo a prevedere e prevenire i potenziali cambiamenti frutto dell'azione umana.

La nuova sensibilità venne esplicitata nella Convenzione di Vienna di sei anni più tardi, primo atto tangibile per la protezione d'ozono (Liakopoulos, 2020). Due anni dopo, nel 1987, seguì il Protocollo di Montreal, completamento della Convenzione relativo alle sostanze che contribuiscono alla riduzione della fascia d'ozono e durante il quale vengono assegnate le «responsabilità comuni ma differenziate», ossia la condivisione, tra i diversi Paesi, delle responsabilità circa l'emissione di sostanze inquinanti, definendo impegni diversificati per ciascuno di questi a seconda dei diversi ruoli giocati (Liakopoulos, 2020).

Nel 1988 la World Meteorological Organization e il Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (*United Nations Environment Program*, UNEP) formano il Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento del Clima (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) che, nel 1990, pubblicò a Ginevra, per la *Seconda Conferenza Generale sul Clima*, il *Primo Rapporto di Valutazione*. Lo studio, l'analisi e la ricerca condotta dimostrava concretamente la preoccupazione relativa ai cambiamenti climatici (Liakopoulos, 2020). In seguito il Report costituirà lo strumento base per i successivi negoziati.

Le dinamiche proseguirono a New York il 9 maggio 1992 con l'adozione della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC o FCCC); con l'obiettivo di «raggiungere la stabilizzazione delle concentrazioni dei gas ad effetto serra in atmosfera a un livello tale che escluda qualsiasi pericolosa interferenza antropogenica sul sistema climatico» (UNFCCC, 1992), venne firmata a Rio de Janeiro da più di 160 Paesi (inclusa l'Italia) ed entrò in vigore il 21 marzo 1994.

Da quel momento, i membri che avevano ratificato il documento si sono incontrate annualmente nella *Conferenza delle Parti* (COP) per promuovere l'analisi dei progressi nell'affrontare il fenomeno e controllare l'applicazione della stessa Convenzione.

Durante la terza *Conferenza delle Parti* (COP3), svolta nel dicembre 1997, fu adottato il Protocollo di Kyoto. Tale strumento attuativo coinvolse le Nazioni industrializzate e alcune economie centroeuropee in transizione (i «Paesi dell'Annesso B») nell'intento di ridurre del 7% (rispetto ai livelli del 1990) le emissioni di gas serra tra il 2008 e il 2012.

L'IPCC, dal 1990, ha pubblicato cinque Rapporti di Valutazione ed è atteso il sesto per il 2022. L'ultimo, il Quinto Rapporto (AR5), tra le principali fonti utilizzate per la stesura del capitolo, risale al 2014. Tale documento stimola le potenze mondiali a reagire responsabilmente nella

riduzione delle emissioni di gas serra, attuando misure drastiche per la resilienza del sistema socioeconomico.

Il contenuto del Report venne discusso nel 2015 durante la COP21 a Le Bourget (vicino Parigi). Il negoziato avvenne tra i rappresentanti di 196 Paesi e sottoscritto nel dicembre dello stesso anno. Tre anni dopo, 195 membri dell'UNFCCC firmarono l'Accordo di Parigi e 183 entrarono a farne parte (Nazioni Unite, 2015). In vigore a partire dal 2020, l'obiettivo a lungo termine dell'Accordo prevede di contenere l'aumento della temperatura media globale sotto i 2°C oltre i livelli preindustriali, limitando l'incremento a un massimo di 1.5°C (Commissione europea, 2018).

All'Accordo aderirono diversi Paesi, compresi i grandi inquinatori (Europa, Cina, India e Stati Uniti d'America) e vennero pianificate revisioni quinquennali a partire dal 2023. Inoltre, secondo l'Accordo, dal 2020 i Paesi più sviluppati si impegnarono a erogare cento miliardi l'anno per finanziare alcune nazioni in difficoltà a diffondere tecnologie verdi e a compensare, sotto forma di rimborsi, perdite finanziarie causate dal cambiamento climatico verso i Paesi più fragili. Nel 2019 gli Stati Uniti (il secondo Paese con più emissioni di CO₂ in atmosfera), con la presidenza di Donald Trump, uscì dall'Accordo per rientrarvi ufficialmente con Biden nel febbraio 2021 (Barlaam, 2019).

Dal 3 al 14 dicembre 2018 la Polonia ospitò la XXIV Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici: durante quei giorni furono definite le regole di attuazione dell'Accordo di Parigi del 2015 attraverso il *Rule Book*. Riconoscendo come necessaria una diminuzione del 45% delle emissioni di CO₂ entro il 2030, nel corso della COP24 venne anche stabilito come distribuire le risorse finanziarie per il sostegno dei Paesi meno sviluppati per incentivare l'utilizzo di tecnologie *green* (Liakopoulos, 2020).

L'ultima Conferenza delle Parti dell'UNFCCC, svoltasi nel dicembre 2019 a Madrid, ha rappresentato un vero fallimento: molti Paesi, tra cui Brasile, Australia e USA, hanno apertamente ostacolato l'Accordo, impedendo azioni concrete (Dominelli, 2019). Al termine della COP25, le questioni irrisolte sono state semplicemente rimandate alla futura Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici prevista dall'1 al 12 novembre 2021 a Glasgow nel Regno Unito. Originariamente prevista un anno prima nella stessa sede, l'evento è stato posticipato in seguito alla pandemia da Covid-19, ma è legittima la preoccupazione a causa delle forti reticenze di molte Nazioni influenti ad assumersi nuove responsabilità (Dominelli, 2019).

2.4.2 Politiche dell'UE

La decisione dell'Unione Europea di assegnare grande rilevanza alle politiche ambientali volte a contenere l'impatto del riscaldamento globale e a potenziare le strategie di adattamento si è

manifestata a partire dagli anni Novanta, ma solo nel 2018 si inserisce un vero impegno per la neutralità climatica (da perseguire entro il 2050) (Commissione europea, 2021). L'Europa, infatti, non resta esclusa dalle gravi ripercussioni del mutamento del clima che condizionerebbero la produttività, le infrastrutture, la salute pubblica, la biodiversità, la stabilità politica e i flussi migratori (Le politiche dell'Unione europea per il clima, 2019).

Il cambiamento climatico e le politiche per la mitigazione e l'adattamento sono stati il punto centrale del discorso tenuto dall'attuale presidente della Commissione europea Ursula von der Leyen al Parlamento il 16 luglio 2019. Durante il dibattito, la Presidente ha dichiarato apertamente di voler trasformare l'Europa nel primo continente climaticamente neutro, azzerando le emissioni di gas a effetto serra (Le politiche dell'Unione europea per il clima 2019). *My Agenda for Europe*, le linee guida politiche per le attività della Commissione europea tra il 2019 e il 2024, è lo strumento firmato da Ursula von der Leyen per proporre, nei primi 100 giorni del suo mandato, un Green Deal per l'Europa. Il documento include:

- una legge europea sul clima che sancisce ufficialmente l'obiettivo della neutralità climatica entro il 2050;
- la revisione degli obiettivi dell'UE al 2030 per la riduzione delle emissioni almeno del 50% (fino al 55%);
- l'introduzione di un prezzo per le emissioni di CO₂ in ogni settore;
- l'estensione del sistema ETS (sistema per lo scambio delle quote di emissione) al settore marittimo e la riduzione delle franchigie gratuite concesse nel corso del tempo alle compagnie aeree;
- l'introduzione, in accordo con le regole dell'Organizzazione Mondiale del Commercio, di un'imposta sul carbonio alle frontiere europee (*Carbon Border Tax*) per far fronte all'eventuale rilocalizzazione delle emissioni;
- la revisione della direttiva sulla tassazione dell'energia (2003/96/CE);
- una nuova strategia industriale che maturi obiettivi di decarbonizzazione;
- la creazione di un nuovo *Fondo per la transizione equa (Just Transition Fund)* che supporti le popolazioni nella transizione verso un'economia circolare e sostenibile dal punto di vista ambientale;
- un *Patto per il clima europeo* che impegni regioni, comunità locali, società civile, industria e scuola a promuovere un cambiamento nello stile di vita e nel comportamento, individuale e collettivo, necessario al cambiamento;
- una strategia di finanza ambientale che mobiliti anche investimenti privati, oltreché un Piano di investimenti per un'Europa sostenibile (*Sustainable Europe Investment Plan*);

- la trasformazione di parte degli investimenti della Banca europea in contributi per il clima;
- un nuovo *Piano di azione sull'economia circolare* centrato sull'uso sostenibile delle risorse, in particolare per i settori ad alto impatto o a elevato consumo di risorse;
- una politica focalizzata sul contrasto alla plastica monouso, con l'obiettivo di ripulire gli oceani entro il 2050.

2.4.2.1 Il Green Deal e il progetto “Fit for 55”

Il 14 luglio 2021 la Commissione europea ha adottato il pacchetto climatico *Fit for 55*, tredici proposte legislative sull'energia e il clima per raggiungere gli obiettivi del *Green Deal*, con focus particolari sulla riduzione delle emissioni del 55% rispetto al 1990 e sulla *carbon neutrality* entro il 2050 (Camera dei deputati, 2021).

Se già nel 2008 l'Unione europea proponeva misure all'avanguardia nella lotta al cambiamento climatico e raggiungeva gli obiettivi prefissati nel 2020, quelli più ambiziosi per il 2030 riguardano una riduzione del 40% delle emissioni, un contributo del 32% delle energie rinnovabili e un aumento dell'efficienza energetica del 32.5% (Lombardini, 2021).

Nel dicembre del 2019 la Commissione europea ha proposto il *Green Deal* che puntava a una riduzione delle emissioni del 55% (anziché del 40% come stabilito in precedenza) e, in seguito a un lungo iter legislativo, gli obiettivi sono stati approvati dal Consiglio e dal Parlamento Europeo. Se il *Patto Verde europeo* richiede una revisione essenziale delle politiche energetiche e climatiche dell'Unione europea per ottenere la diminuzione delle emissioni, la Commissione europea ha rielaborato le strategie di attuazione e i contributi principali sono contenuti all'interno del pacchetto *Fit for 55* (il *Green Package*) adottato ufficialmente il 14 luglio 2021 (Lombardini, 2021).

La revisione *Fit for 55* cambia intimamente il modo in cui sfruttiamo (e, in alcuni casi, abusiamo) dell'energia secondo alcuni principi chiave:

- modificare la Direttiva sull'efficienza energetica, reiterando il principio che l'efficienza energetica debba essere la priorità e richiedendo agli Stati membri una riduzione del 39% della energia primaria rispetto al 1990. L'obiettivo si traduce quindi in un consumo non superiore a 1023 milioni di tonnellate equivalenti petrolio per il 2030, conferendo un ruolo fondamentale al settore delle costruzioni;
- revisionare la Direttiva sulle energie rinnovabili, riducendo i costi per la produzione e incrementando gli obiettivi raggiunti nel 2019 con il solare e l'eolico;
- revisionare il sistema di scambio delle emissioni (*Emission Trading System*), riducendo annualmente la percentuale di emissioni;

- attuare nuove proposte per il settore dei trasporti, con una progressiva riduzione delle emissioni di CO₂ dei veicoli per arrivare a quota zero nel 2035, eliminando successivamente e definitivamente la vendita di nuovi automezzi a diesel, benzina e ibridi a partire dallo stesso anno;
- creare un *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM), un'imposta sull'importazione di cemento, ferro, acciaio, alluminio, fertilizzanti ed elettricità nel caso in cui questi stessi non siano prodotti con adeguati standard rispetto alle emissioni;
- revisionare la Direttiva sulla tassazione minima di prodotti energetici e del Regolamento sull'uso dei terreni e delle foreste che possono contribuire e favorire la cattura e il rilascio di CO₂.

È importante considerare che tali proposte risultano ancora in una fase embrionale all'interno di un ciclo di negoziazioni tra Parlamento e Consiglio europeo, con l'auspicio che il risultato finale potrà essere un compromesso che ottimizza e considera le diverse sensibilità degli Stati membri rispetto alla sfida climatica (Lombardini, 2021).

2.4.2.2 Strategia di adattamento dell'UE ai cambiamenti climatici

Durante il *Green Deal* europeo del dicembre del 2019, la Commissione europea annuncia la nuova strategia di adattamento dell'Unione Europea basata sulla valutazione del 2018 della *Strategia di adattamento ai cambiamenti climatici* dell'aprile 2013. Il 24 febbraio 2021 la stessa istituzione ha adottato le nuove misure per migrare verso la resilienza climatica entro il 2050 trattate nella Comunicazione «*Plasmare un'Europa resiliente ai cambiamenti climatici - La nuova strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici*» (Commissione europea, 2021).

La volontà dell'Unione Europea è di compiere progressi costanti per stimolare la capacità di adattamento, rafforzare la resilienza e ridurre la vulnerabilità ai cambiamenti climatici attraverso strategie armoniose che offrono contributi per mutare gli intenti in realtà (Commissione europea, 2021). Data la natura sistemica delle politiche di adattamento, tutte le azioni dovranno essere attuate in modo integrato con altre iniziative del Green Deal europeo, quali «*la strategia sulla biodiversità, l'ondata di ristrutturazioni, la strategia "Dal produttore al consumatore", i piani d'azione per l'economia circolare e per l'inquinamento zero, la strategia forestale, la strategia sul suolo, la strategia per una mobilità sostenibile e intelligente e la strategia rinnovata in materia di finanza sostenibile*» (Commissione Europea, 2021).

Recentemente, l'Unione Europea aveva già mosso i primi passi verso politiche resilienti nell'ambito della precedente strategia di adattamento del 2013 per cui tutti gli Stati membri dispongono attualmente di misure o di un piano nazionale di adattamento. Per questo risulta

evidente che gli Stati membri costituiscano i principali partner nella realizzazione di azioni più ambiziose e proattive a livello dell'UE. Infatti, sebbene le sfide dell'adattamento possano considerarsi locali e specifiche, le soluzioni sono spesso «*ampiamente trasferibili e applicabili su scala regionale, nazionale o transnazionale*» (Commissione europea, 2021). Per questa ragione, la Commissione è intenzionata a lavorare «*a stretto contatto con gli Stati membri per attuare un'efficace strategia adattiva e per allineare le azioni a livello internazionale ed europeo*», con la consapevolezza che la gravità della sfida dell'adattamento richiede «*uno sforzo collettivo di tutte le istanze governative e sociali*» (oltreché del settore privato). La strategia di una nuova Europa per il 2050 resiliente ai cambiamenti climatici è «*più intelligente, più sistemica, più rapida e promotrice di azioni internazionali*» (Commissione europea, 2021).

In altre parole, l'«*adattamento più intelligente*» prevede che la strategia sia concepita a partire da un approfondimento delle conoscenze e dei dati durante tutto il ciclo programmatico. La Commissione promuove quindi l'utilizzo di tecnologie digitali e servizi climatici avanzati a sostegno del processo decisionale: nuovi strumenti, come «*Destination Earth*» e «*gemelli digitali*»⁸, promettono di comprendere in modo esaustivo gli impatti climatici presenti e futuri sia a livello planetario che locale.

Inoltre, se i dati sui rischi legati al clima sono basilari per migliorare la precisione della valutazione del rischio climatico, qualsiasi strategia (e investimento) deve considerare gli aspetti connessi ed essere adatta alle esigenze future. La Commissione promuove quindi norme e specifiche comuni per la registrazione e la raccolta dei dati pubblici e privati, sostenendo la centralizzazione della loro registrazione attraverso il *Risk Data Hub* (la piattaforma dati sul rischio). Tra le piattaforme di conoscenza in materia di clima che promuovono lo scambio, *Climate-ADAPT* è uno strumento di riferimento e una fonte di conoscenze consolidata in progressiva crescita.

Con «*adattamento sistemico*», invece, la Commissione Europea riconosce l'essenzialità di offrire sostegno allo sviluppo di organizzazioni amministrative negli Stati membri per concretizzare politiche di adattamento e promuovere la cooperazione transfrontaliera attraverso quadri di cooperazione delle strategie macroregionali, le strategie per i bacini marini e le altre strategie marittime, i programmi di finanziamento Interreg e le opportunità di cooperazione e collegamento in rete nell'ambito della politica agricola comune.

Per accelerare le azioni di adattamento («*adattamento più rapido*») la Comunicazione segnala: l'attuazione di missioni programmate per l'adattamento (come *Orizzonte Europa*⁹) o ad esso

⁸ *Destination Earth (DestinE)* è uno strumento per lo sviluppo di un modello digitale ad alta precisione della Terra, finalizzato alla simulazione e al monitoraggio delle attività naturali e antropiche. I *gemelli digitali* creati in *DestinE* forniscono agli utenti l'accesso a informazioni, servizi, modelli, scenari, previsioni e visualizzazioni di alta qualità, come modelli climatici, previsioni del tempo ed evoluzione degli uragani.

⁹ *Orizzonte Europa (Horizon Europe)* è un'iniziativa dell'Unione Europea per incentivare la ricerca scientifica. La proposta prevede un investimento di 100 miliardi di euro in ricerca e innovazione suddiviso in un periodo di sette

pertinenti; la programmazione di risposte tempestive alle diverse minacce connesse al clima (con grande rilevanza per la salute); nuove considerazioni rispetto al settore delle costruzioni e rispetto alla gestione di fonti di acqua sostenibile.

In termini finanziari, la Commissione contribuisce all'analisi della penetrazione assicurativa per le catastrofi naturali (invitando l'*EIOPA*¹⁰ a studiare un quadro operativo) e al rafforzamento di pratiche utili per la gestione dei rischi attraverso la collaborazione stretta tra diversi *stakeholders*. L'ultimo capitolo della Comunicazione è dedicato alle azioni internazionali per la resilienza climatica. All'interno, si dichiara l'intenzione dell'Unione Europea di appoggiare il contributo di piani nazionali, regionali e locali oltreché i propositi di includere considerazioni preventive sulla conservazione della biodiversità marina fuori dalle zone di giurisdizione nazionale, incrementare i finanziamenti internazionali e sostenere i paesi partner nella pianificazione di politiche e investimenti.

Nel complesso, la nuova strategia dell'UE guida quindi gli Stati membri all'obiettivo di resilienza climatica stabiliti entro il 2050, intensificando le sinergie con campi strategici (tra cui la biodiversità). Propone fondamentalmente una nuova visione, necessaria per prendere consapevolezza degli impatti del cambiamento climatico e per riconoscere soluzioni efficaci in un contesto ancora molto incerto, ma conferisce un certo grado di autonomia (e quindi di responsabilità) ai piani strategici nazionali.

2.4.2.3 Il New European Bauhaus

Fondamentale per la stesura del presente elaborato e già citato in precedenza, il New European Bauhaus è un progetto culturale annunciato lo scorso ottobre 2020 dalla Commissione europea basato sulla sostenibilità e l'inclusività sociale ed economica (Commissione europea, 2021).

Con un impianto programmatico in divenire, suggerisce i nuovi canoni estetici sinonimi di garanzia di modelli abitativi dignitosi (Capozucca e Gardini, 2021). L'iniziativa europea, infatti, dopo una fase di analisi e diffusione dei saperi complessi dell'architettura, del design, dell'artigianato, delle nuove tecnologie e dello studio delle energie rinnovabili, è riuscita a collegare i propositi del *Green Deal* con gli spazi dell'abitare (Commissione europea, 2021).

Grazie ai fondi stanziati per il *Green Deal* (sommati a ulteriori investimenti pubblici e privati), il New European Bauhaus si delinea come una piattaforma di sperimentazione e collaborazione tra i creativi europei con l'obiettivo di volgere un nuovo sguardo e cambiare prospettiva rispetto al tema della progettazione, con particolare accento alla sostenibilità e alla condivisione.

anni, tra il 2021 e il 2027.

¹⁰ L'*EIOPA* (Autorità europea delle assicurazioni e delle pensioni aziendali e professionali) è un organismo dell'Unione europea che dal 2011 ha il compito di sorvegliare il mercato assicurativo europeo e alla quale partecipano tutte le autorità di vigilanza assicurativa dell'Unione europea.

Il nuovo approccio promosso, che coglie dalle esigenze odierne l'opportunità di innovare l'intero settore delle costruzioni, plasma il mercato degli immobili e l'atteggiamento comunitario per risolvere problemi sociali complessi attraverso tre fasi (*progettazione collettiva, realizzazione e divulgazione*) (Commissione europea, 2021). Mentre queste tre fasi procedono solo parzialmente in parallelo, la Commissione europea sta stabilendo il perimetro entro cui realizzare la fase operativa, in linea con la pianificazione progressiva del quadro finanziario pluriennale (Commissione europea, 2021).

La prima delle tre fasi, la *progettazione collettiva*, plasma l'intero movimento della rivoluzione, raggruppando e unendo esempi contemporanei concreti che esprimono i principi su cui si basa il New European Bauhaus. A tal fine, la Commissione europea ha reso disponibile un *toolkit* per stimolare la discussione e la raccolta di contributi e idee interessanti. Dal bagaglio prodotto gli Stati membri dell'Unione Europea potranno attingervi per attuare proposte concrete e dare vita alla nuova Bauhaus.

Nella *fase realizzativa* verranno quindi eseguiti i nuovi progetti pilota, in seguito monitorati per comprendere potenzialità e criticità. La diffusione genererà una serie di reti di conoscenza che stabiliscono metodi, soluzioni e prototipi applicabili in eventuali nuovi progetti.

A partire da gennaio 2023, invece, si attuerà l'ultima fase, la *divulgazione*. Durante questo step l'accento verrà posto sull'estensione delle idee e delle azioni emerse nelle precedenti parti del programma per coinvolgere maggiormente le comunità europee e mondiali.

Attraverso un dialogo aperto, il New European Bauhaus sosterrà quindi anche nuovi mercati che promuovono stili di vita più inclusivi e sostenibili (Commissione europea, 2021).

2.4.3 Il Piano nazionale integrato per l'energia e il clima (PNIEC)

Nell'ambito di un meccanismo iterativo con strategie a lungo termine, nel dicembre 2018 viene proposto alla Commissione europea il testo del PNIEC italiano. Il documento guarda al 2030, formalizzando l'ambizioso obiettivo di costruire una nuova visione energetica che auspica alla piena sostenibilità ambientale, sociale ed economica nel territorio nazionale e assicura una transizione armoniosa e coordinata.

Realizzato in collaborazione con numerosi enti pubblici (tra cui GSE, RSE, Enea, Ispra, Politecnico di Milano) e frutto di accurate analisi tecniche e scenari evolutivi del settore energetico, si propone come uno strumento fondamentale che segna definitivamente l'inizio di una profonda trasformazione nella politica energetica e ambientale dell'Italia, finalmente rivolta alla decarbonizzazione.

Per addivenire alla stesura del testo definitivo, l'Italia invia, nel gennaio dell'anno successivo, la

nuova proposta alla Commissione europea. L'istituzione si pronuncia con la raccomandazione in giugno e, successivamente all'ottenimento del parere della Conferenza unificata, la versione definitiva viene trasmessa nuovamente alla Commissione. Il testo definitivo del PNIEC italiano viene approvato dalla Commissione europea il 14 ottobre 2020 (Ministero dello sviluppo economico, 2018).

Il Piano si compone di cinque linee d'intervento integrate che partono dalla decarbonizzazione fino allo sviluppo di un mercato interno di energia, basato sulla ricerca, l'innovazione e la competitività, includendo misure relative all'efficienza e alla sicurezza energetica (Camera dei Deputati, 2021). Per ogni obiettivo, il Piano delinea le misure e le strategie attuabili per assicurarne il raggiungimento.

2.5 Cambiamento climatico e edilizia

Il complesso sistema di interazioni tra uomo e Natura, siano esse realizzazioni di strutture, manufatti, città, edifici e infrastrutture, siano esse attività sociali, commerciali ed economiche o che richiedano un qualunque uso artificiale del suolo e delle risorse (produzione, servizi, trasporti, tra i molti) sono all'origine del considerevole aumento delle emissioni di gas a effetto serra.

Nella presente trattazione si limita il campo d'indagine all'ambito architettonico, concentrando l'attenzione in modo specifico sul settore edile che si ritiene abbia instaurato una vera relazione biunivoca con il grande tema d'indagine del capitolo: indubbiamente, infatti, può avere peso decisivo nelle emissioni di gas serra ma ne è anche soggetto esposto. Si tratta di un circolo vizioso in cui, se da un lato l'architettura è causa partecipativa nelle emissioni e nel conseguente riscaldamento globale, dall'altro risulta esposta alle sollecitazioni, risentendo dei problemi stessi che anch'essa provoca e incrementa.

2.5.1 Responsabilità del settore edile sul cambiamento climatico

Il settore edile è gravemente determinante sull'impatto delle alterazioni climatiche. Tra le più considerevoli cause antropogeniche, le costruzioni richiedono enormi quantità di energia per il loro funzionamento e processi realizzativi derivanti dalla combustione di fonti fossili (Figura 2.14).

Per comprendere la responsabilità, stimare i consumi energetici e le emissioni climalteranti del settore, la ricerca si è affidata a un'attenta lettura dell'analisi del *Global Status Report for Buildings and Construction*, un report annuale redatto dalla Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC), dall'International Energy Agency (IEA) e dall'UNEP.

Secondo il Report del 2020, il funzionamento degli edifici e le emissioni legate all'energia del settore edile rappresentano addirittura il 38% delle emissioni globali di CO₂ nel 2019 (GlobalABC, 2020).

L'aumento delle emissioni è intrinsecamente connesso all'utilizzo di carbone, petrolio e gas naturale per il riscaldamento a livello globale, ma è incrementato e combinato, a livello regionale, all'uso di combustibili fossili anche per l'elettricità (Figura 2.15): ne consegue un livello di emissioni dirette costante, ma un notevole incremento di quelle indirette. Notevoli sono anche le emissioni derivanti dalla produzione dei materiali da costruzione (cemento e acciaio soprattutto): la progettazione di alcune tipologie di edifici, in particolare, ha determinato un incremento sostanzioso della domanda¹¹ con conseguente aumento della produzione e dell'utilizzo (GlobalABC, 2020).

Nella quinta edizione del documento sono stati tracciati i progressi del settore edile a livello globale verso il raggiungimento degli obiettivi dell'Accordo di Parigi (con il contributo di oltre 110 membri ed esperti) ed è stato introdotto un nuovo indice (il *Buildings Climate Tracker*, BCT) per monitorare la decarbonizzazione del settore.

Mentre il consumo energetico totale globale rimane invariato rispetto al 2019, le emissioni di CO₂ prodotte degli edifici risultano incrementate del 28% rispetto all'anno precedente (GlobalABC, 2020). Tali emissioni hanno conquistato il livello più alto mai raggiunto, allontanando ulteriormente il settore dal contribuire in modo significativo agli obiettivi dell'Accordo di Parigi.

Il nuovo strumento di controllo BTC, inoltre, traccia gli investimenti incrementali per l'efficienza energetica e la quota di energia rinnovabile applicata agli edifici: i dati dimostrano un considerevole tasso di peggioramento (tra il 2016 e il 2019 è stato registrato un dimezzamento negativo) (GlobalABC, 2020).

Per condurre e progettare un patrimonio edilizio a zero emissioni di carbonio entro il 2050, l'Agenzia internazionale per l'energia (IEA) ha stimato che le emissioni dirette di CO₂ degli edifici dovranno diminuire del 50% e le emissioni indirette del settore edile del 60%: ciò equivale a una riduzione delle emissioni di un totale di 6% all'anno fino al 2030 (GlobalABC, 2020).

A tal proposito, recentemente sono nate una serie di iniziative per ridurre le emissioni nel settore. Tra le tante, precedente alla pandemia da Covid-19, la certificazione *Excellence in Design for Greater Efficiencies* (EDGE) che ha registrato una forte crescita delle case verdi in Messico; il finanziamento per gli edifici verdi con HSBC México e Sabadell México; l'investimento della Corea del Sud nel luglio 2020 di 61 miliardi di dollari nel progetto "*Net-Zero Society*" con l'obiettivo, in soli cinque anni, di convertire le strutture pubbliche e passare

¹¹ A livello globale, il settore delle costruzioni rappresenta circa il 50% della domanda di cemento e il 30% di quella di acciaio (GlobalABC, 2020).

a un'economia alimentata da energia solare, eolica e a idrogeno. In Cina, al contempo, è stata costruita la prima comunità *Net-Zero* a monitoraggio continuo mentre in Europa, nel Galles meridionale in particolare, è stato garantito un finanziamento di 16 milioni di sterline per una rete di riscaldamento rinnovabile per edifici pubblici. Anche Londra ha lanciato svariati progetti *Net-Zero Carbon*. In Danimarca invece sono state intraprese tredici iniziative per eliminare il peso di 2,5 milioni di tonnellate di emissioni di CO₂ all'anno provenienti dal settore (GlobalABC, 2020).

Indubbiamente le analisi riportate risultano allarmanti in vista degli obiettivi da realizzare entro il 2050, ma, seppur al momento i progressi non riescano ad affiancarsi all'esponenziale crescita del settore, sussistono segnali positivi e opportunità interessanti per recuperare il ritardo (GlobalABC 2020).

2.5.2 Effetti del cambiamento climatico sul costruito

Seppur non si ritenga profondamente rilevante ai fini della ricerca, è necessario confermare che le alterazioni sul clima producono effetti negativi significativi sugli edifici.

L'ambiente costruito si configura come vulnerabile ed esposto a una temperatura in costante crescita: gli impatti, alla scala dell'edificio, condizionano il comfort interno e la salute degli utenti oltreché le strutture portanti, l'involucro e gli impianti (Figura 2.16) (GlobalABC 2020). Solo in Europa, il riscaldamento globale sta accelerando il processo di corrosione degli edifici, esponendo edifici e strutture a stress non consueti che minano la sicurezza delle costruzioni.

Gli effetti del cambiamento climatico sono soggetti e variabili rispetto a diversi fattori, tra i quali anche la localizzazione geografica e la morfologia contestuale: sono necessarie precise analisi preliminari per comprendere la natura dell'impatto. Infatti, se effetti come il riscaldamento globale si possono considerare più generali, altri, come alcuni eventi estremi (quali fenomeni atmosferici straordinari), sono invece del tutto localizzati (Figura 2.17).

I primi condizionano, in particolar modo, le prestazioni energetiche degli edifici con variazioni significative relative alle performance e ai costi: in questi casi gli impianti rischiano di divenire inefficienti e le soluzioni costruttive inadeguate. Gli eventi estremi, invece, possono essere di natura completamente differente e quindi gli impatti diversificati: le ondate di calore, per esempio, possono influire sulle prestazioni energetiche, mentre alluvioni, precipitazioni o incendi tendono ad attaccare principalmente elementi tecnici e materiali.

2.6 Riepilogo

I presupposti generali centrali di questo capitolo sono guidati dalla volontà di comprendere

a fondo la questione ambientale e l'impulso alla base di tali considerazioni è alimentato dal desiderio di definire un nuovo approccio al design e all'architettura.

L'assunto iniziale di ricerca si articola attraverso la comprensione di quella che è, a tutti gli effetti, la grande problematica del nostro tempo affinché risulti inevitabile e logico costruire un metodo alternativo per la definizione dell'iconica *forma* in architettura, in netto contrasto con le pratiche contemporanee.

L'approccio che verrà proposto in seguito, conforme ai valori promossi dalla Commissione europea, è orientato specificatamente al settore delle costruzioni, ma può avere valenza più ampia.

Come si è già anticipato, la tesi testa e implementa un nuovo metodo per un design più sostenibile, rivolgendosi alla Natura per questa missione, considerandola potenziale musa e guida per una progettazione più cosciente e consapevole, sia dal punto di vista ecologico che sociale ed economico.

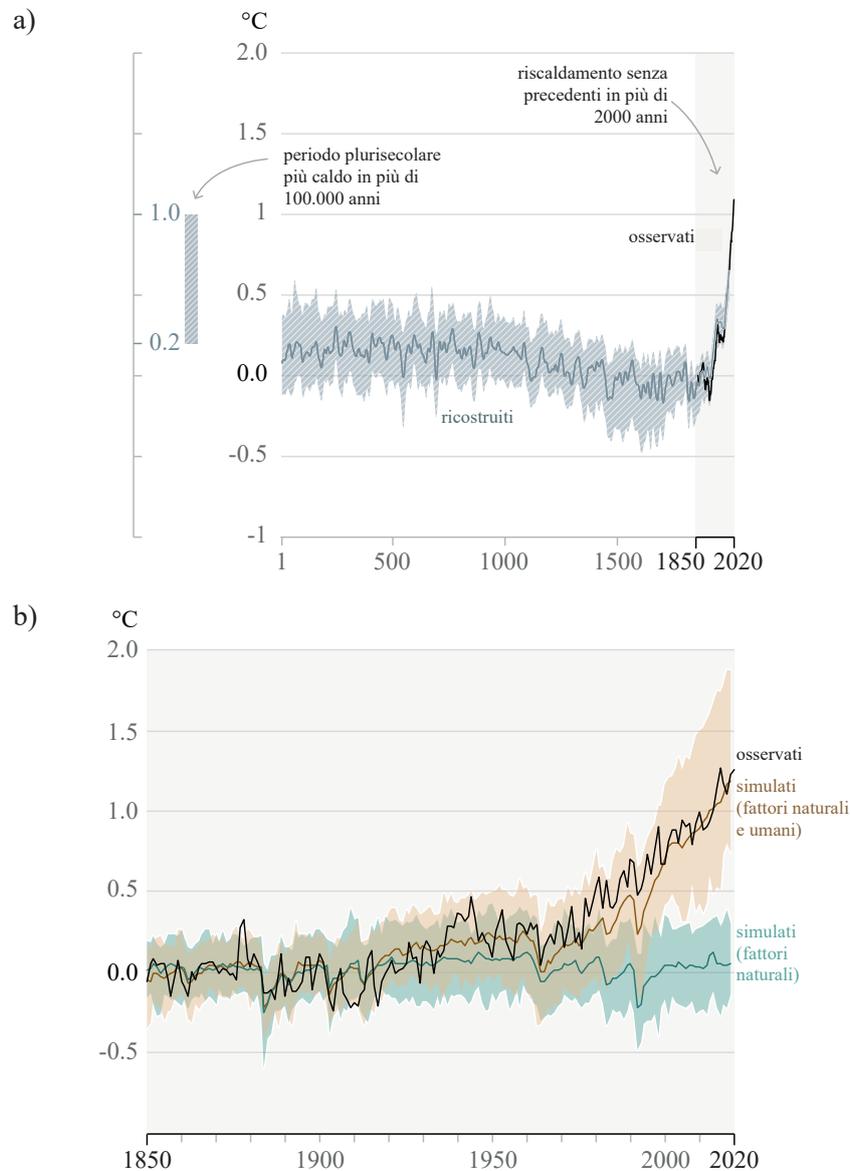


Figura 2.1: Cambiamenti nella temperatura superficiale globale nel periodo dal 1850 al 1900. a) Variazione della temperatura superficiale globale (media decennale) ricostruita (1-2000) e osservata (1850-2020); b) Variazione della temperatura superficiale globale (media annua) dal 1850 al 2020 osservata, simulata comprensiva di fattori umani e naturali e simulata comprensiva dei soli fattori naturali (entrambi 1850-2020). Grafici tradotti. Da Intergovernmental Panel On Climate Change, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 8.

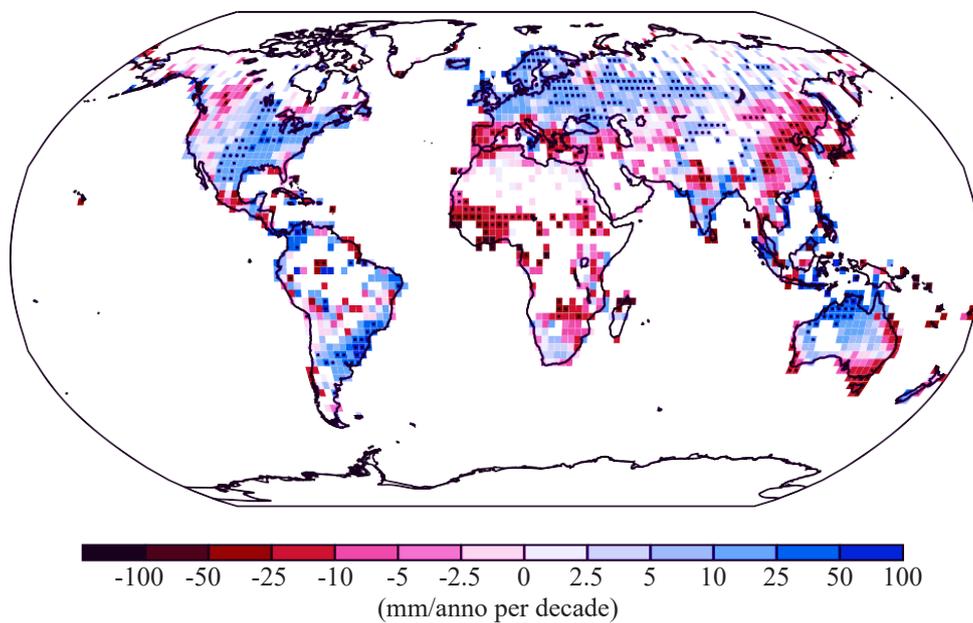


Figura 2.2: Mappa del cambiamento delle precipitazioni osservato dal 1951 al 2010. Grafico tradotto. Da Intergovernmental Panel On Climate Change, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 41.

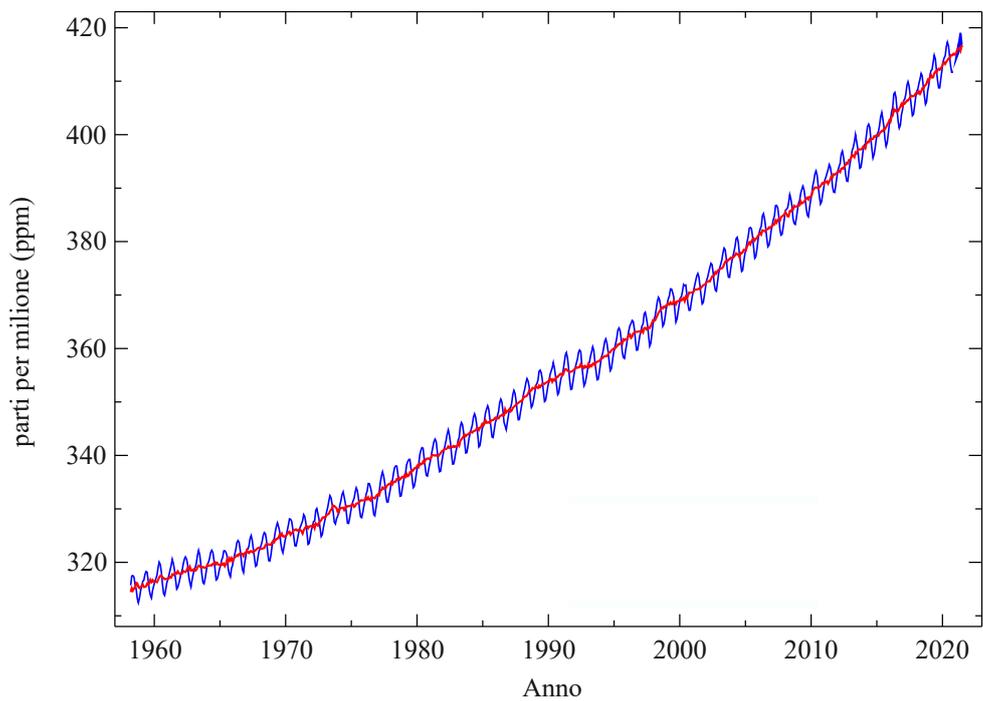
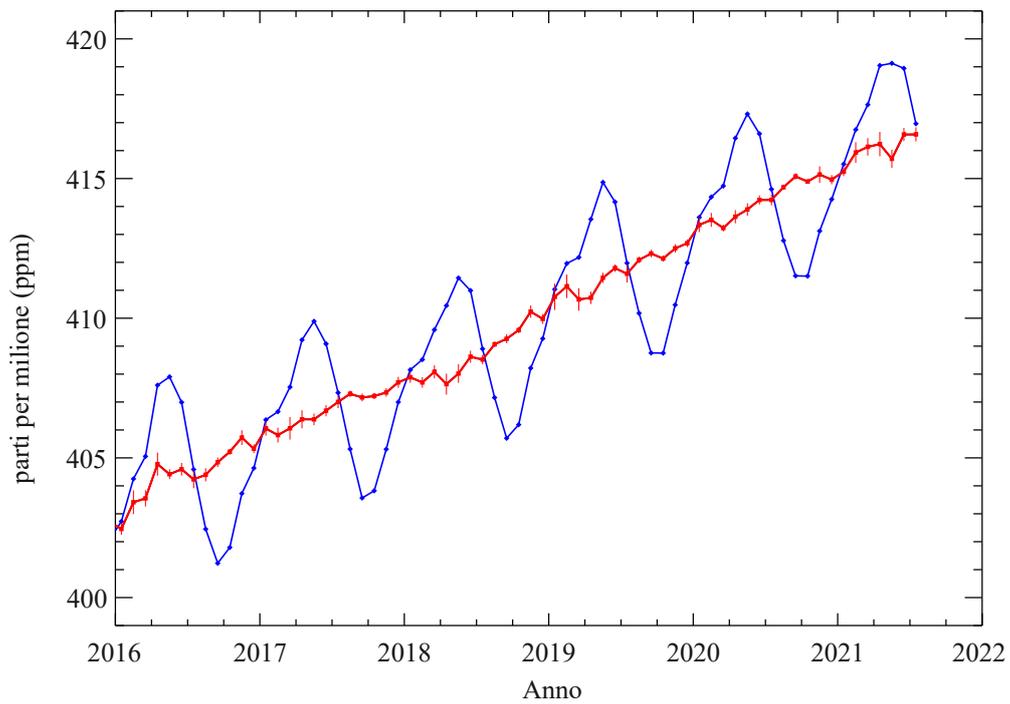
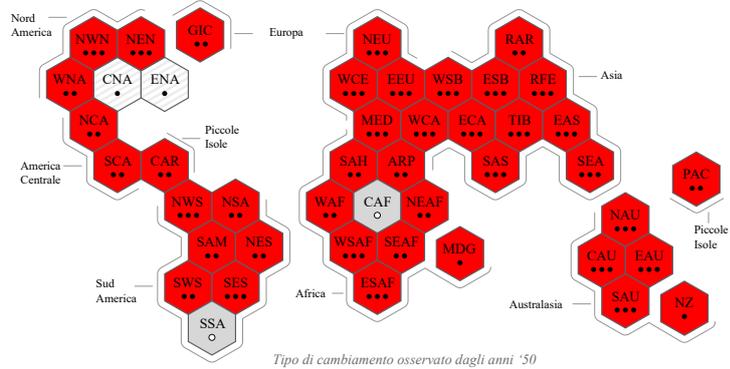


Figura 2.3: Anidride carbonica media mensile misurata presso l'Osservatorio di Mauna Loa, Hawaii. Grafici tradotti. Da US Department of Commerce, NOAA, Global Monitoring Laboratory, 2021. Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases. [online] *Noaa.gov*. Disponibile su: <gml.noaa.gov/ccgg/trends/> [Data di accesso: 4 aprile 2021].

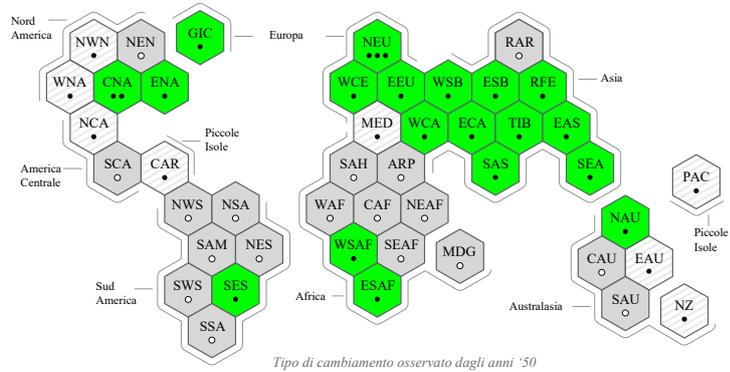
a) Sintesi della valutazione del cambiamento osservato per il **caldo estremo** e contributo antropogenico ai cambiamenti osservati nelle regioni mondiali

- Tipo di cambiamento osservato**
(situazioni di caldo estremo)
- Incremento (41)
 - Decrescita (0)
 - Basso accordo sul tipo di cambiamento (2)
 - Dati e/o letteratura limitati (2)
- Contributo antropogenico**
al cambiamento osservato
- Alto
 - Medio
 - Basso a causa di dati limitati
 - Basso a causa di prove limitate



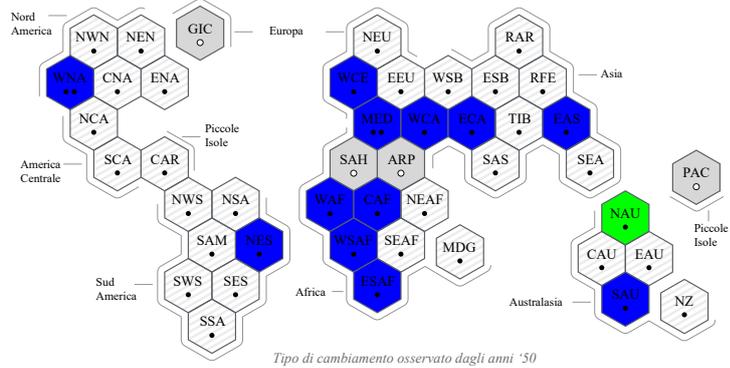
b) Sintesi della valutazione del cambiamento osservato per le **forti precipitazioni** e contributo antropogenico ai cambiamenti osservati nelle regioni mondiali

- Tipo di cambiamento osservato**
forti precipitazioni
- Incremento (19)
 - Decrescita (0)
 - Basso accordo sul tipo di cambiamento (8)
 - Dati e/o letteratura limitati (18)
- Contributo antropogenico**
al cambiamento osservato
- Alto
 - Medio
 - Basso a causa di dati limitati
 - Basso a causa di prove limitate



c) Sintesi della valutazione del cambiamento osservato per le **siccità agricole ed ecologica** e contributo antropogenico ai cambiamenti osservati nelle regioni mondiali

- Tipo di cambiamento osservato**
nella siccità agricola ed ecologica
- Incremento (12)
 - Decrescita (1)
 - Basso accordo sul tipo di cambiamento (28)
 - Dati e/o letteratura limitati (4)
- Contributo antropogenico**
al cambiamento osservato
- Alto
 - Medio
 - Basso a causa di dati limitati
 - Basso a causa di prove limitate



IPCC AR6 WGI regioni: **Nord America:** *NWN* (America Nord-Ovest), *NEN* (America Nord-Est), *WNA* (America Ovest-Nord), *CNA* (America Nord-Centrale); **America Centrale:** *NCA* (America Centro-Nord), *SCA* (America Centro-Sud), *CAR* (Caraibi); **Sudamerica:** *NWS* (Nord-Ovest Sudamerica), *NSA* (Nord Sudamerica), *NES* (Nord-Est Sudamerica), *SAM* (Monzone del Sudamerica), *SWS* (Sud-Ovest Sudamerica), *SES* (Sud-Est Sudamerica), *SSA* (Sud Sudamerica); **Europa:** *GIC* (Groenlandia/Islanda), *NEU* (Nord Europa), *WCE* (Europa Centro-Ovest), *EEU* (Est Europa), *MED* (Mediterraneo); **Africa:** *MED* (Mediterraneo), *SAH* (Sahara), *WAF* (Ovest Africa), *CAF* (Centro Africa), *NEAF* (Nord-Est Africa), *SEAF* (Sud-Est Africa), *WSAF* (Sud-Ovest Africa), *ESAF* (Sud-Est Africa), *MDG* (Madagascar); **Asia:** *RAR* (Russia), *WSB* (Ovest Siberia), *ESB* (Est Siberia), *RFE* (Russian Far East), *WCA* (Centro-Ovest Asia), *ECA* (Centro-Est Asia), *TIB* (Altopiano del Tibet), *EAS* (Est Asia), *ARP* (Arabia), *SAS* (Sud Asia), *SEA* (Sud-Est Asia); **Australasia:** *NAU* (Nord Australia), *CAU* (Centro Australia), *EAU* (Est Australia), *SAU* (Sud Asia), *NZ* (Nuova Zelanda); **Piccole Isole:** *CAR* (Caraibi), *PAC* (Piccole isole del Pacifico).

Figura 2.4: Differenti sintesi degli effetti del cambiamento climatico sulle diverse regioni mondiali. Grafici tradotti. Da Intergovernmental Panel On Climate Change, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 13.

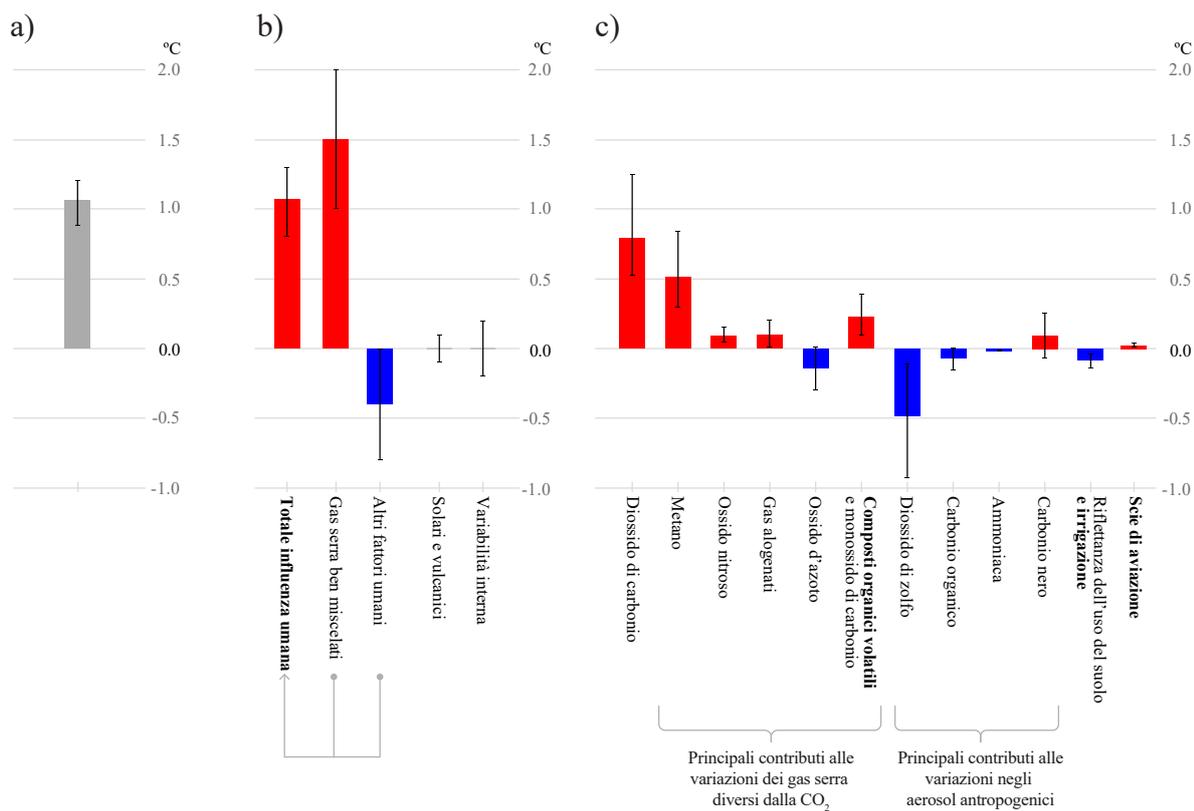


Figura 2.5: Riscaldamento osservato determinato dalle emissioni delle attività umane, con il riscaldamento dei gas serra parzialmente mascherato dal raffreddamento dell'aerosol. a) Riscaldamento osservato tra il 2010 e il 2019 rispetto al periodo 1850-1900; b-c) Contributi al riscaldamento (2010-2019) relativi al periodo 1850-1900. Grafici tradotti. Da Intergovernmental Panel On Climate Change, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 9.

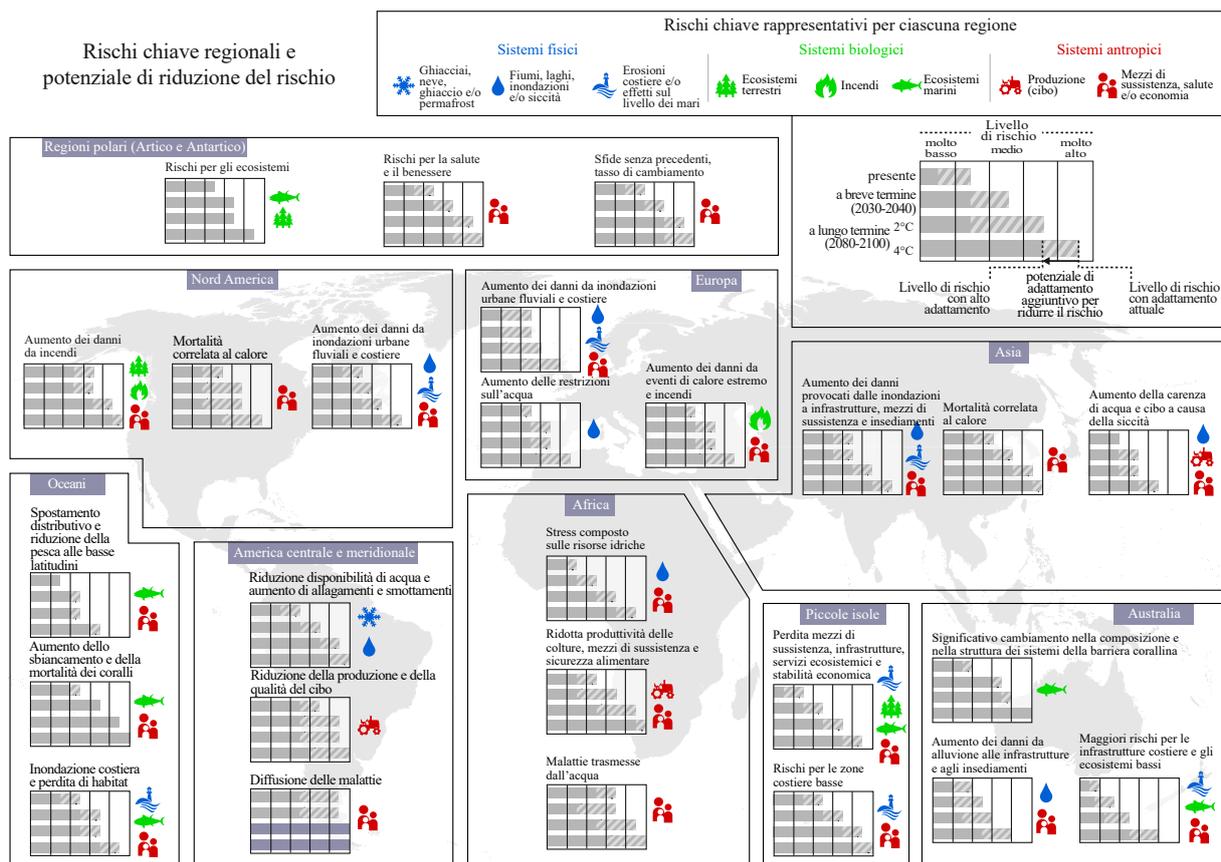
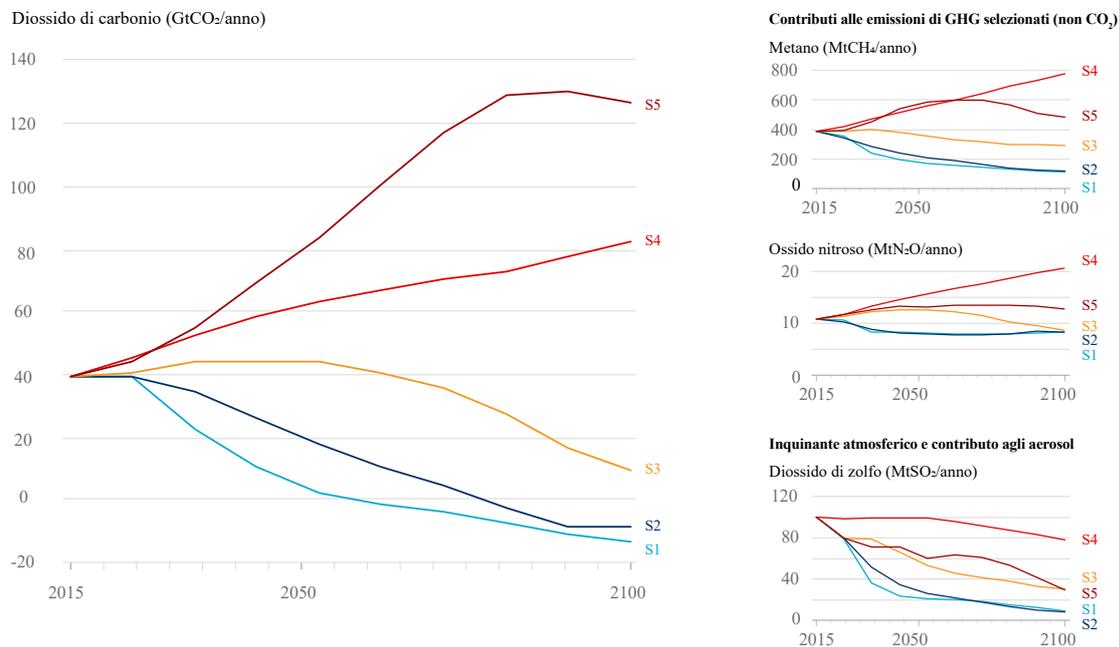


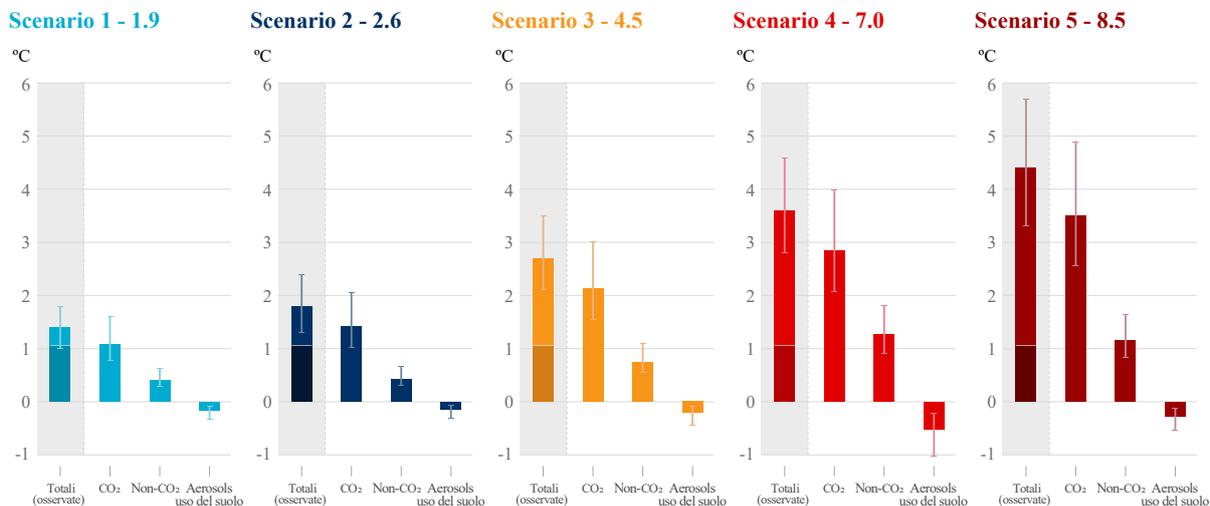
Figura 2.6: Rischi rappresentativi per ciascuna regione. Il grafico mostra anche il potenziale di riduzione del rischio attraverso misure di adattamento e mitigazione, ma anche i limiti all'adattamento. Ogni rischio chiave viene valutato come molto basso, basso, medio, alto o molto alto. I livelli di rischio sono rappresentati per intervalli di tempo: presente, a breve termine (fino al 2030-2040 circa) e a lungo termine (fino al 2080-2100 circa). I livelli di rischio non sono necessariamente comparabili, soprattutto tra le regioni. Rielaborazione grafica e traduzione da Intergovernmental Panel On Climate Change, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 14.

a) Future emissioni annuali di CO₂ (a sinistra) e sottoinsieme di fattori chiave non legati alla CO₂ (a destra), in cinque scenari illustrativi



b) Contributo all'aumento della temperatura superficiale globale da diverse emissioni, con un ruolo dominante di quelle di CO₂

Cambiamento nella temperatura superficiale tra il 2081 e il 2100 rispetto al periodo 1850-1900 (°C)

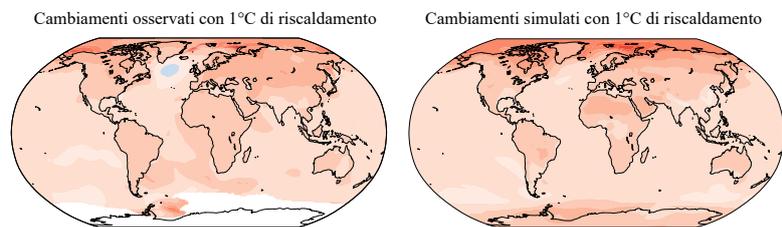


Riscaldamento totale (osservato fino ad oggi con sfumatura più scura), da CO₂, da GHG non-CO₂ e raffreddamento da cambiamenti negli aerosol e nell'uso del suolo

Figura 2.7: Scenari di emissioni future e possibili. Grafici tradotti. Da Intergovernmental Panel On Climate Change, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 17.

a) Variazione media annuale (°C) con 1°C di riscaldamento

Il riscaldamento di 1°C ha effetto su tutti i continenti ed è generalmente maggiore sulla terraferma che sugli oceani, sia nelle osservazioni che nei modelli. Nella maggior parte delle regioni, i modelli osservati e simulati sono coerenti.



b) Variazione media annuale (°C) nel periodo 1850-1900

Attraverso i livelli di riscaldamento, le aree terrestri si riscaldano più degli oceani e l'Artide e l'Antartide si riscaldano più dei Tropici.

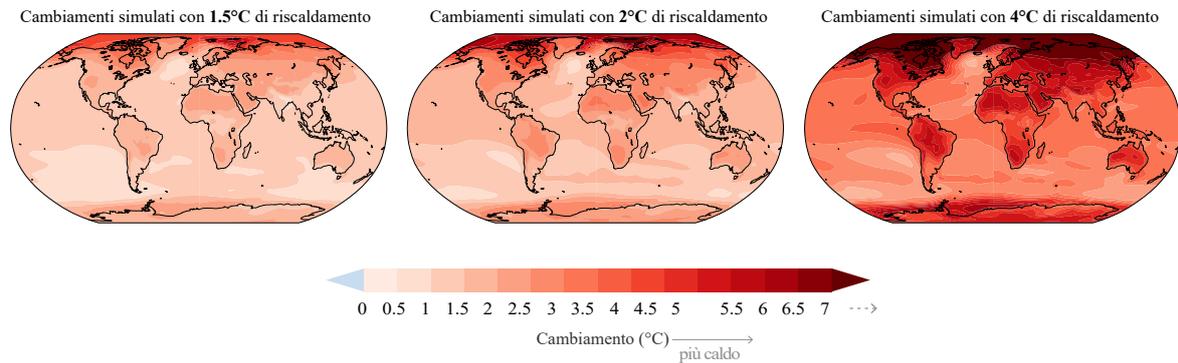
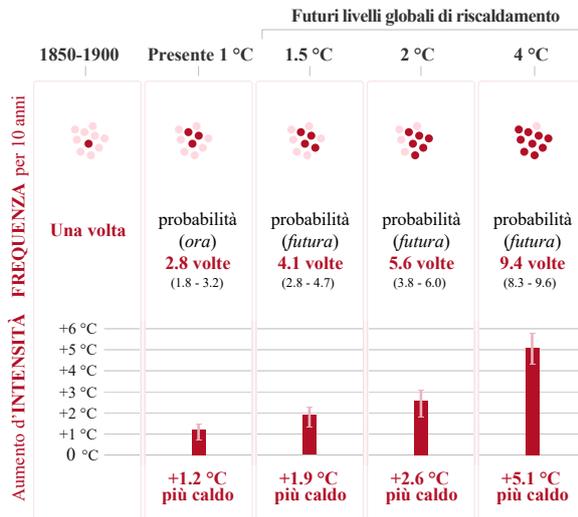


Figura 2.8: Con ogni incremento del riscaldamento globale, i cambiamenti aumentano nella temperatura media regionale, nelle precipitazioni e nell'umidità del suolo. Grafici tradotti. Da Intergovernmental Panel On Climate Change, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 22.

Temperature estreme sul suolo terrestre

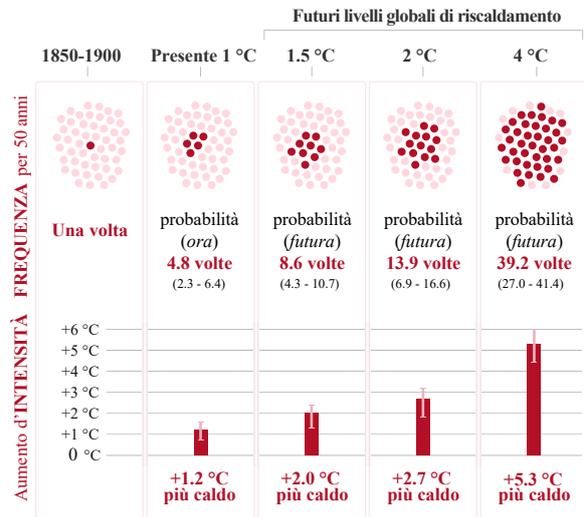
10 anni

Frequenza e aumento dell'intensità di eventi di temperatura estrema che si sono verificati in media una volta ogni 10 anni in un clima senza influenza umana



50 anni

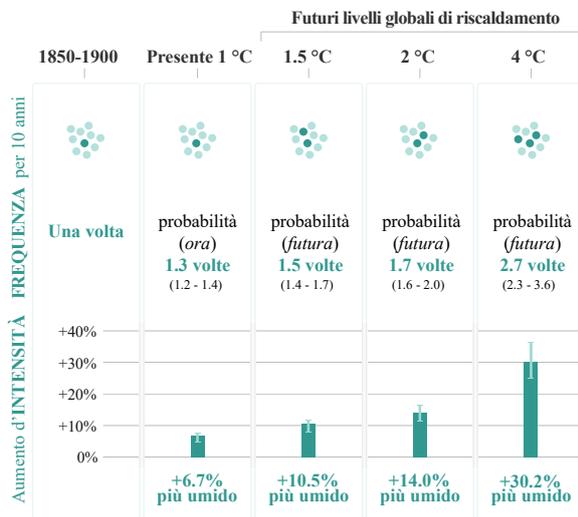
Frequenza e aumento dell'intensità di eventi di temperatura estrema che si sono verificati in media una volta ogni 50 anni in un clima senza influenza umana



Forti precipitazioni sul suolo terrestre

10 anni

Frequenza e aumento dell'intensità di eventi di precipitazioni intense di un giorno che si sono verificati in media una volta ogni 10 anni in un clima senza influenza umana



Siccità agricola ed ecologica nelle regioni aride

10 anni

Frequenza e aumento dell'intensità di un evento di siccità agricola ed ecologica che si è verificato in media una volta ogni 10 anni nelle regioni aride in un clima senza influenza umana

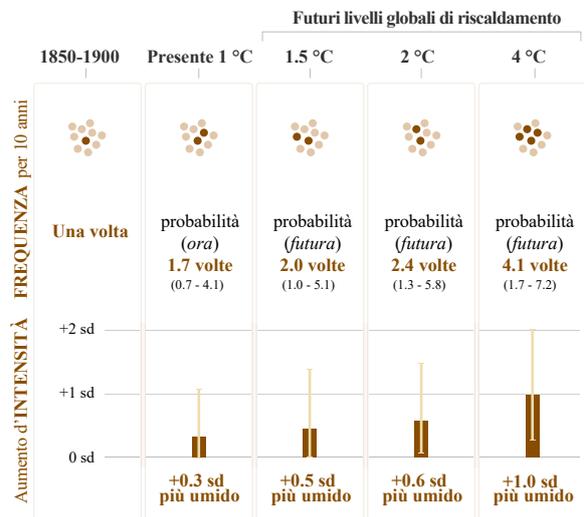


Figura 2.9: I cambiamenti previsti sono maggiori in frequenza e in intensità con ogni incremento probabile di riscaldamento globale. Grafici tradotti. Da Intergovernmental Panel On Climate Change, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 24.

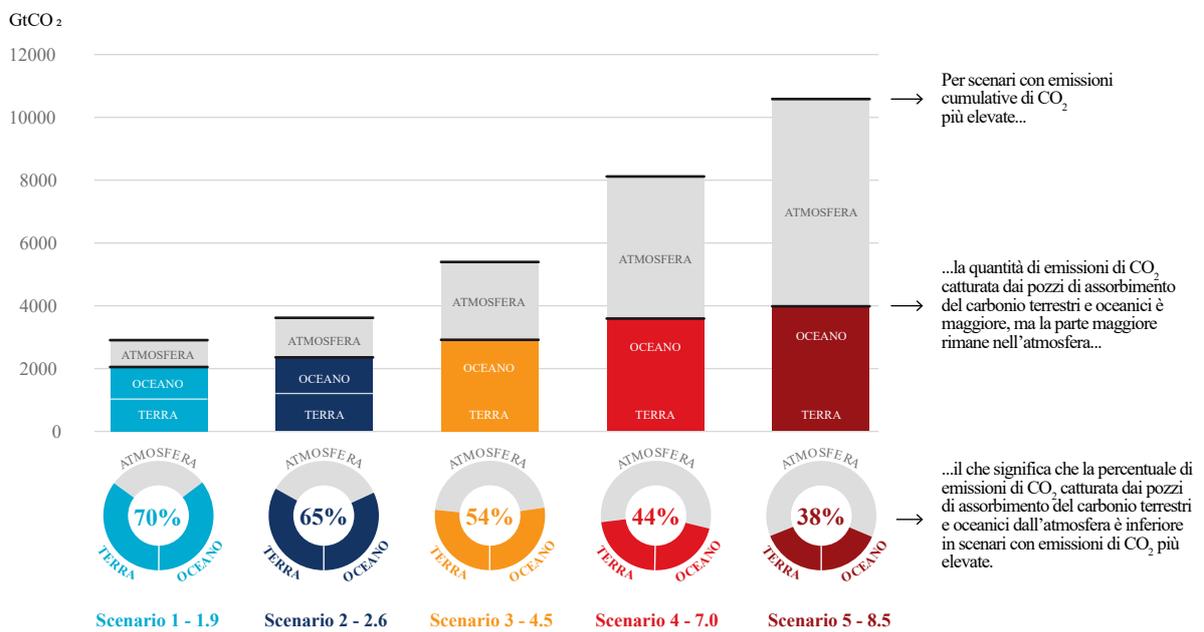


Figura 2.10: Emissioni cumulative totali di CO₂ assorbite da terra e oceani (a colori) e rimanenti nell'atmosfera (in grigio) nei cinque scenari illustrativi dal 1850 al 2100. Grafici tradotti. Da Intergovernmental Panel On Climate Change, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 28.

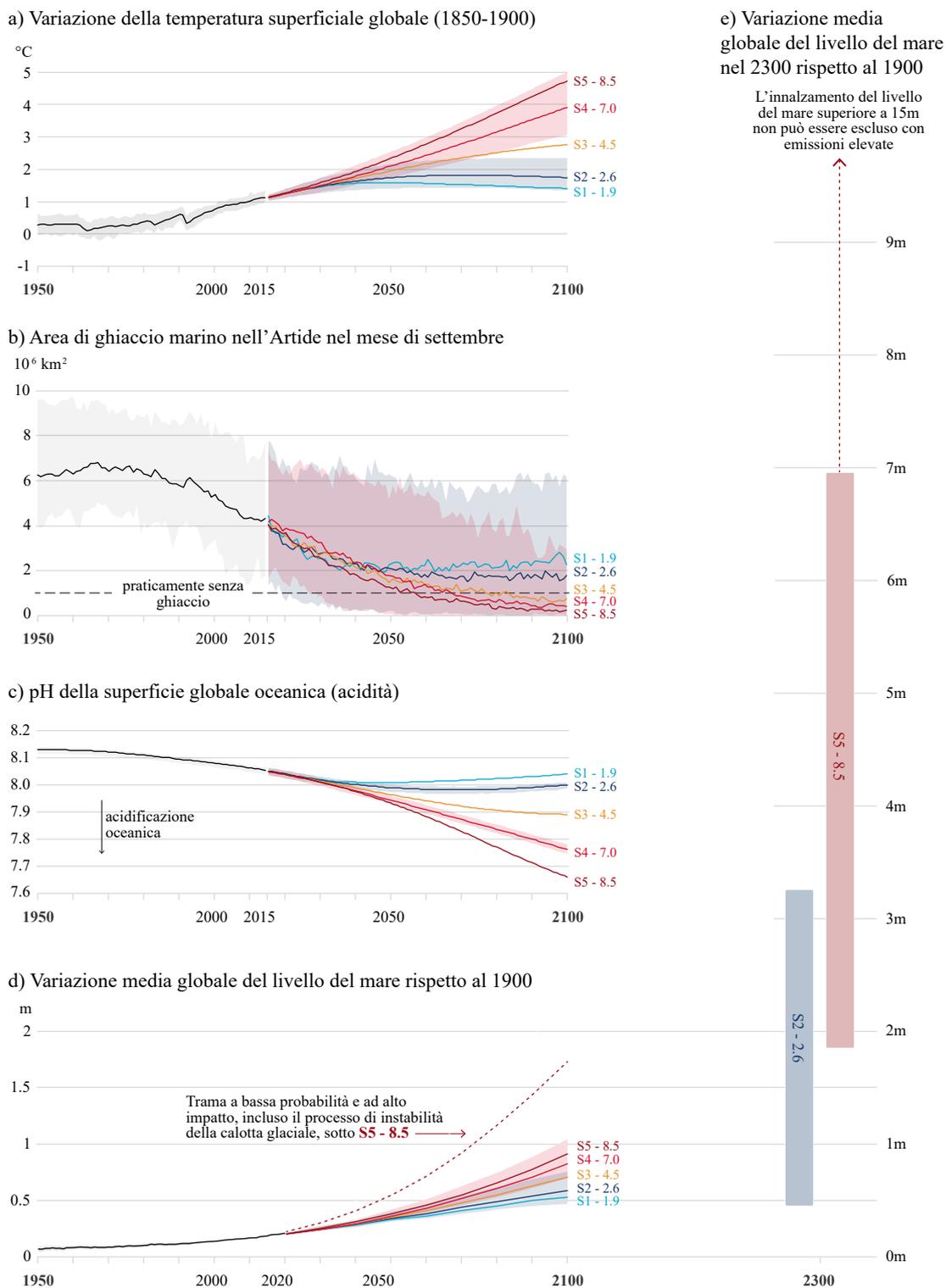


Figura 2.11: Le attività umane colpiscono tutti i principali componenti del sistema climatico, alcuni dei quali rispondono nel corso di decenni e altri nel corso dei secoli. Grafici tradotti. Da Intergovernmental Panel On Climate Change, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 30.

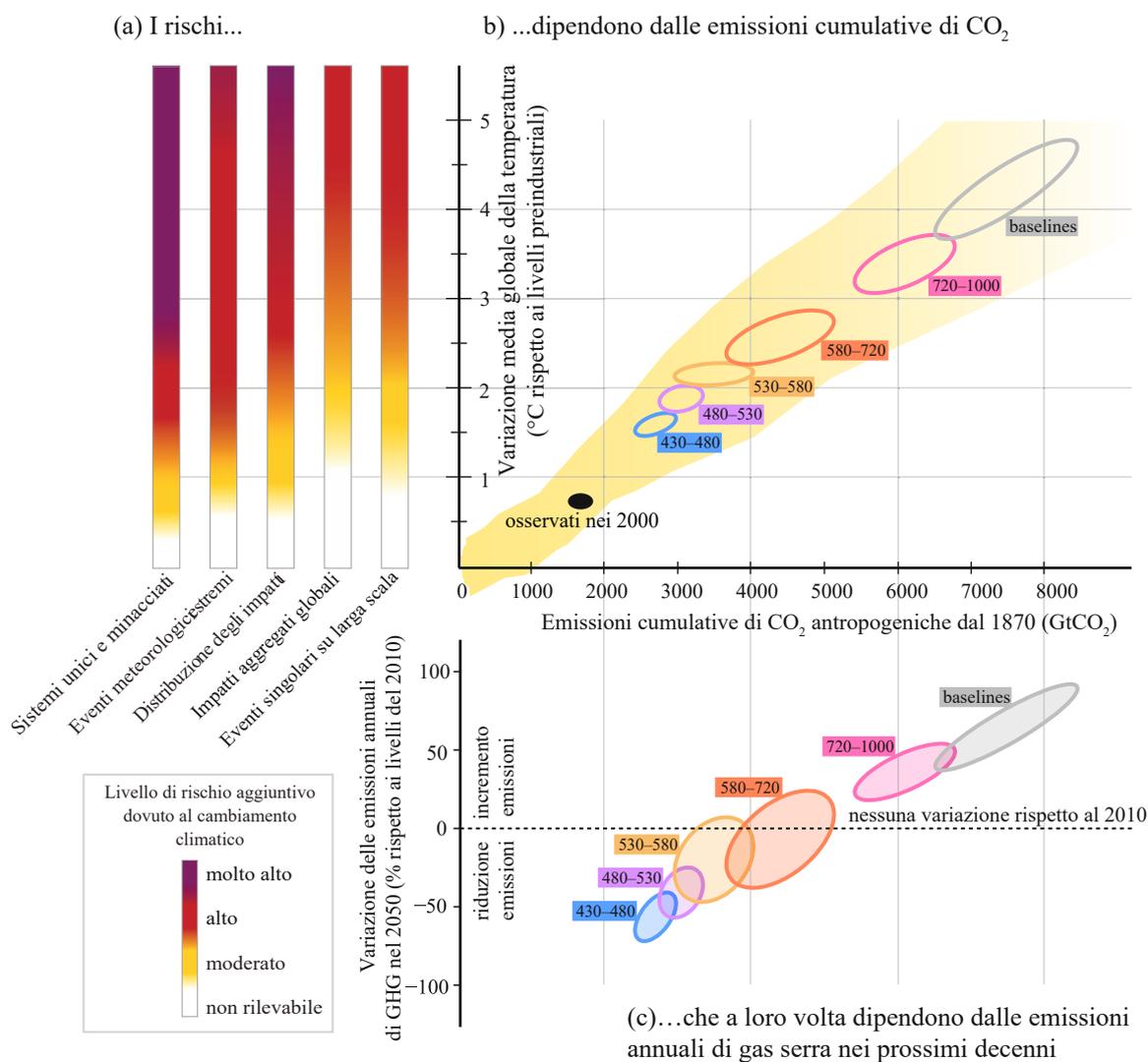


Figura 2.12: La relazione tra i rischi derivanti dai cambiamenti climatici, dalle variazioni di temperatura, dalle emissioni cumulative di anidride carbonica (CO₂) e dai cambiamenti nelle emissioni annuali di gas serra (GHG) entro il 2050. Grafico tradotto e rielaborato. Da Intergovernmental Panel On Climate Change, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 18.

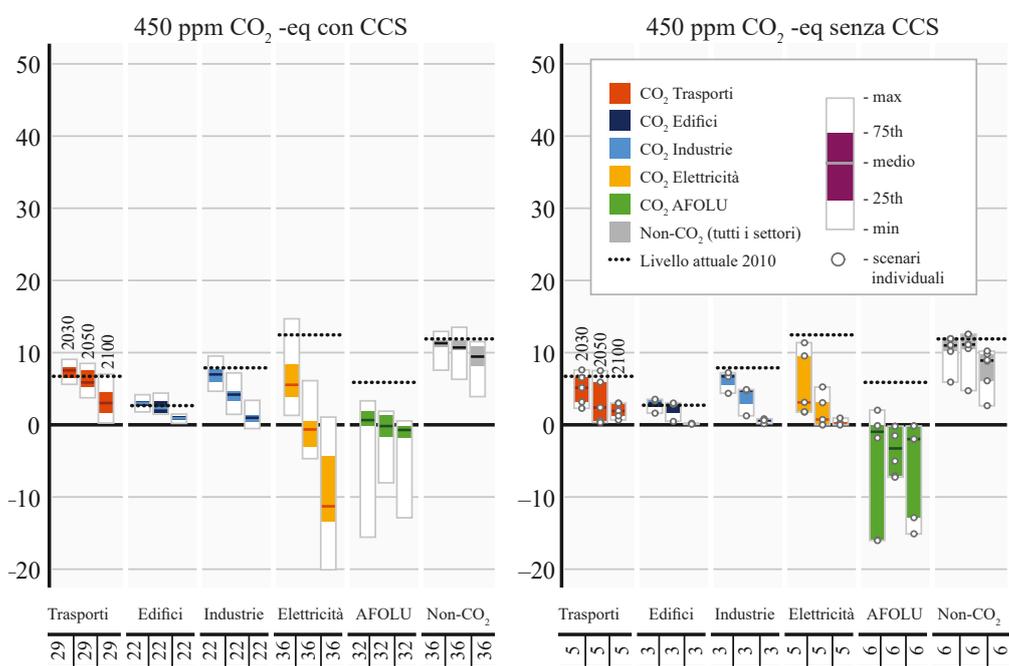
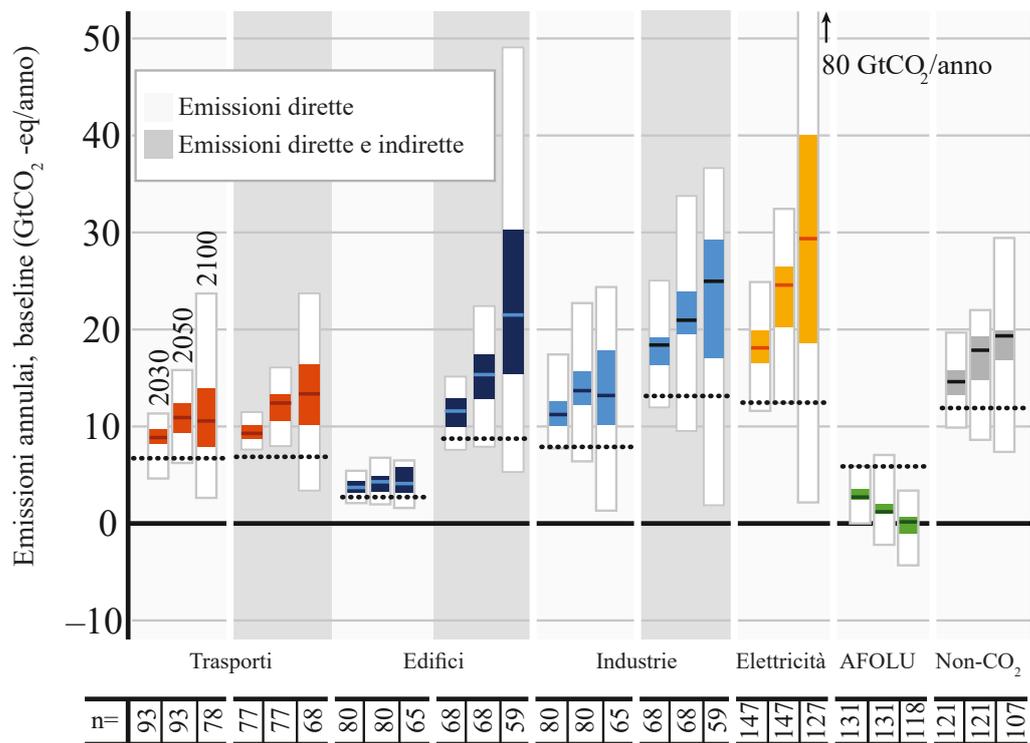


Figura 2.13: Emissioni suddivise per settori di gas a effetto serra negli scenari di riferimento e di mitigazione, con e senza cattura e stoccaggio del diossido di carbonio (CCS). Da Intergovernmental Panel On Climate Change, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 99.

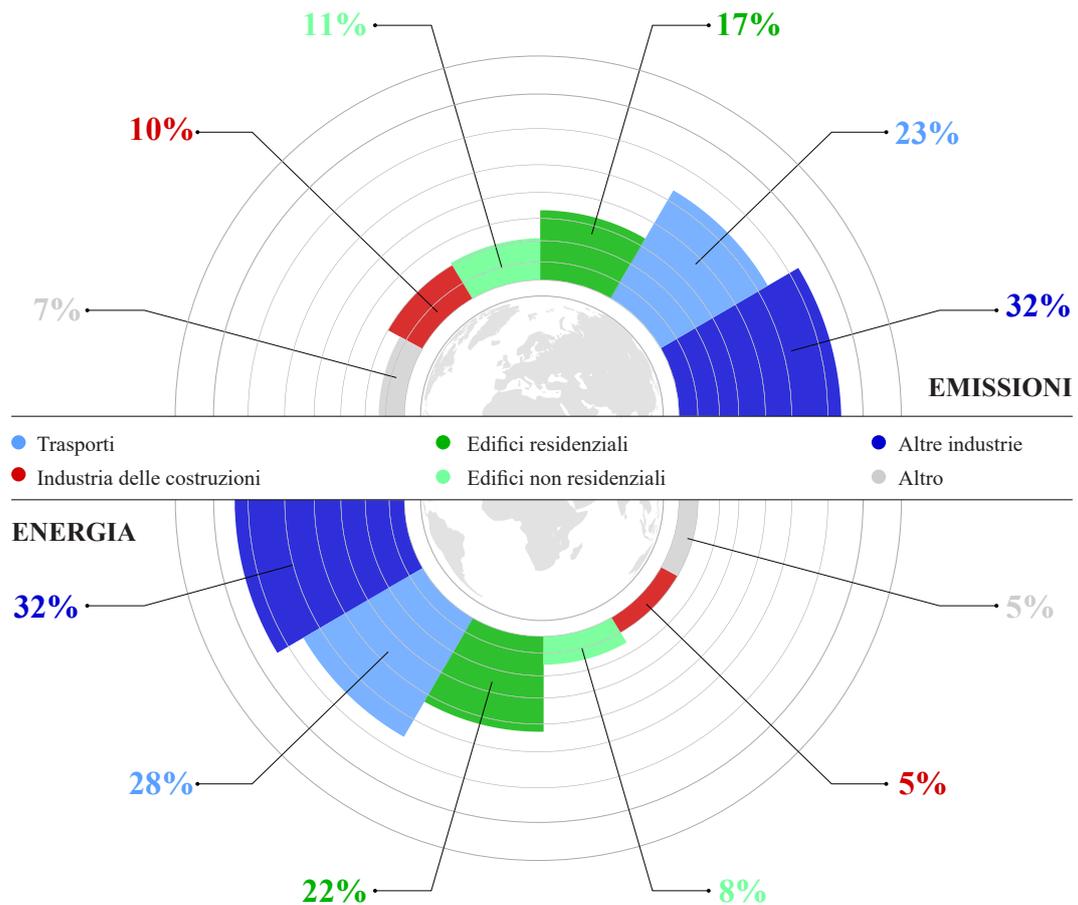


Figura 2.14: Quota globale di energia (a sinistra) ed emissioni finali (a destra) di edifici e costruzioni nel 2019. Le emissioni indirette derivano principalmente dalla produzione di energia per l'elettricità e per i sistemi di riscaldamento e raffreddamento. Grafici tradotti e rielaborati. Da United Nations Environment Programme, 2020. *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*, Nairobi, p. 4.

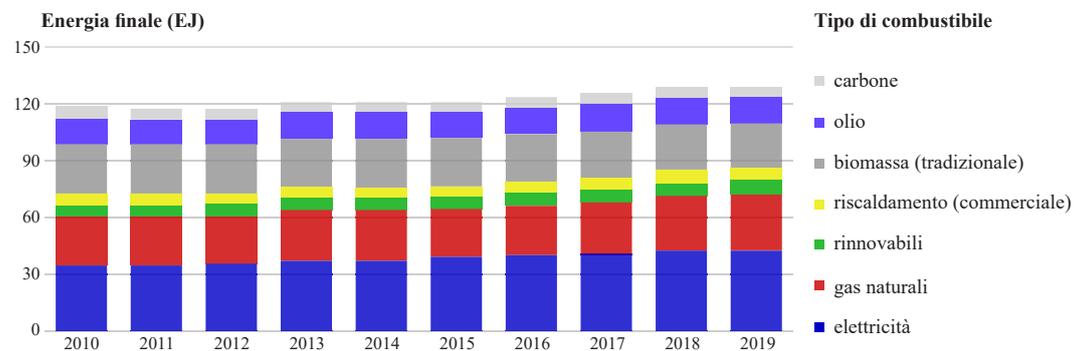


Figura 2.15: Consumo energetico finale globale del settore edilizio per tipologia di combustibile stimati tra il 2010 e il 2019. Grafico tradotto e rielaborato. Da United Nations Environment Programme, 2020. *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*, Nairobi, p. 20.

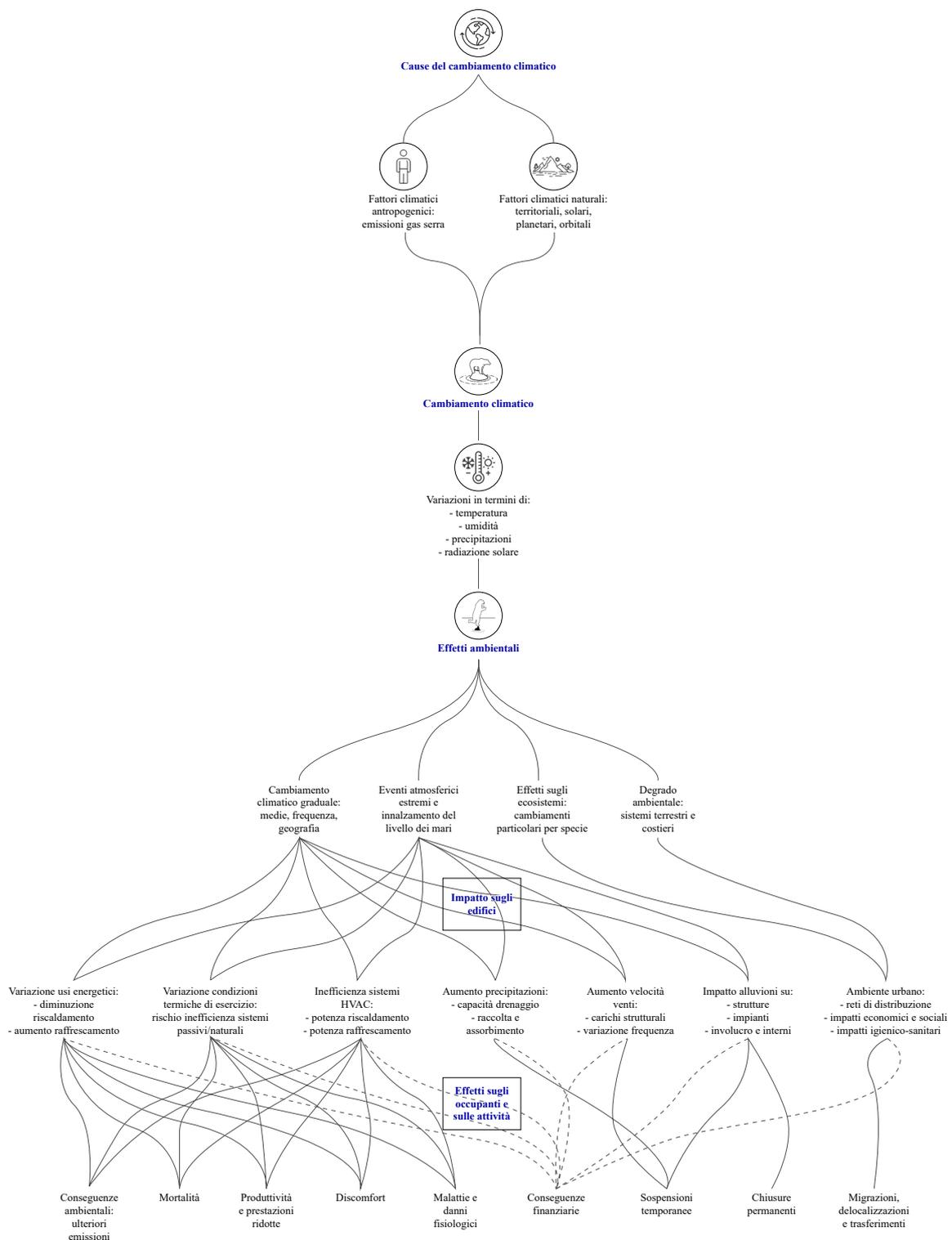


Figura 2.16: Rielaborazione e traduzione dello schema dei principali effetti del cambiamento climatico sugli edifici, sugli occupanti e sulle attività relative connesse. Da De Wilde, P. e Coley, D., 2012. Editorial article: The Implications of a Changing Climate for Buildings. *Building and Environment*, Vol. 56 [doi: 10.1016/j.buildenv.2012.03.014], p. 2.

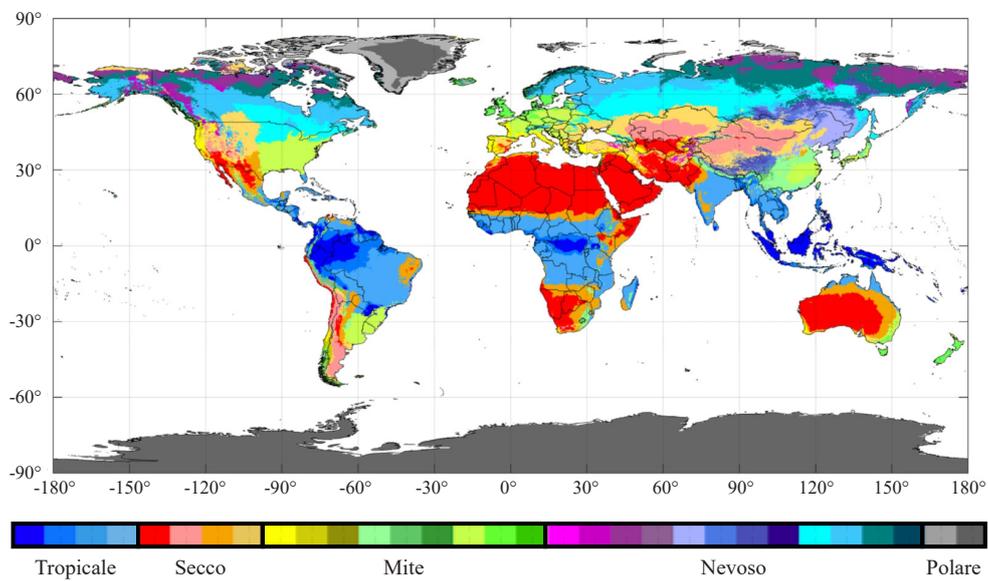


Figura 2.17: Classificazione climatica secondo Köppen-Geiger. Grafico tradotto. Da Peel M. C., Finlayson, B. L. e McMahon, T., 2007. Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 11. p. 1642.

LA FORMA DELLA NATURA

Fonti e sviluppo di una nuova visione

“L’ingegno umano mai troverà invenzione più bella, né più facile né più breve della natura, perché nelle sue invenzioni nulla manca e nulla è superfluo.”
– Leonardo Da Vinci

3.1 Sostenibile per Natura

La Natura è innegabilmente sostenibile. Le sfide alle quali è stata sottoposta sono state risolte nel corso di milioni di anni dando vita a soluzioni durature con prestazioni massime utilizzando risorse minime (Pearce, 1981). Non è sorprendente che le invenzioni della Natura abbiano eternamente ispirato le conquiste umane, conducendo alla creazione di materiali e strutture estremamente efficaci ed efficienti, nonché metodi, strumenti, meccanismi e sistemi con cui progettarli. Le intuizioni acquisite dallo studio delle strategie naturali possono essere significative non solo dal punto di vista scientifico, ma anche nel contesto di una loro applicazione alla progettazione di ambienti sintetici.

Tenendo quindi presente e rinnovando costantemente l’interesse verso un nuovo modo di concepire la *forma* in architettura, più inclusiva e sostenibile secondo gli standard del New European Bauhaus, questo capitolo esamina e discute dapprima le caratteristiche principali delle *forme* della Natura per poi dedicarsi a una lettura puramente teorica di una disciplina bio-ispirata, la biomimetica.

Comprendere le strategie naturali rappresenta indubbiamente una missione gravemente impegnativa se svolta dal punto di vista del design architettonico poiché il solo fenomeno della crescita occuperebbe vaste implicazioni nel considerare le origini della *forma*. Nonostante ciò, la tesi aspira a esaminare le creazioni della Natura e a dimostrare che nelle sue strategie esiste

sempre una relazione diretta tra materia ed energia, tra forma e ambiente e tra organo e funzione, e che, nella sua imitazione, può vivere un design più sostenibile e inclusivo.

3.1.1 Inventario minimo, massima diversità

Structure in nature is a strategy for design di Peter Pearce presenta concetti interessanti utili al fine di chiarire i metodi sostenibili progettati in Natura. I progetti strutturali naturali (le molecole, i cristalli, le cellule e perfino le galassie) rappresentano, secondo l'autore americano, l'unica soluzione efficace alla progettazione delle strutture create dall'uomo (Oxman, 2010). Il motivo che guida tale affermazione risiede nel fatto che la Natura, a ogni livello, costruisce strategie reattive e adattive in grado di conservare risorse materiali ed energetiche attraverso un uso sapiente di componenti modulari (Pearce, 1981).

Rispetto a questa motivazione di fondo, il testo di Pearce conduce il progettista verso un approccio naturale, liberandolo dai limiti di angoli retti in un paesaggio più ricco di *forme* basate su triangoli, esagoni e poliedri. Scrive infatti che è possibile prevedere sistemi che contano un inventario minimo di tipi di componenti, combinabili alternativamente per ottenere una grande diversità di *forme* strutturali efficienti. Tali sistemi, denominati “*inventario minimo/massima diversità*”, forniscono un kit di parti e regole per creare componenti diverse. Nei sistemi di successo, le regole di assemblaggio e i componenti fisici sono visti come organicamente correlati (Oxman, 2010).

In sintesi, a partire da pochi essenziali componenti, la Natura fabbrica e genera una considerevole gamma di compositi strutturati (Oxman, 2010). Si tratta quindi di un generico sistema vincolato da un proprio ristretto inventario in grado di promuovere la massima diversità di forme e strutture.

Una prima parte integrante, base del principio di *inventario minimo/massima diversità*, è il concetto di conservazione delle risorse. Il processo formativo nelle strutture naturali è infatti tipicamente governato da risposte a minima energia (Oxman, 2010).

Per fare un esempio, l'espressione più semplice potrebbe essere l'*impacchettamento compatto* dei cristalli: le particelle (assimilabili a una forma solida sferica) si dispongono efficientemente nello spazio costituendo il reticolo cristallino (Pearce, 1981)¹.

La Natura genera quindi forme e strutture rispondendo a requisiti di energia minima (Thompson, 1942). Reagisce alle forze e ai carichi mentre crea una vastissima varietà di forme partendo da

¹ È interessante notare che la stessa nozione dell'*impacchettamento compatto* è assimilabile al principio statico della *triangolazione* ed è ormai inconfutabile che le strutture triangolate mostrino una stabilità geometrica intrinseca (Thompson, 1942). Rispetto a questo principio, tale proprietà consente di realizzare strutture a telaio senza giunti che resistono meccanicamente a momenti torcenti, assicurando soli carichi assiali: questo, a sua volta, si traduce in strutture che sfruttano quantità minima di energia e alta resistenza per peso (Oxman, 2010).

un inventario minimo di principi, regole e materiali.

Il lavoro di Pearce di cui si è discusso finora segue la tradizione di D'Arcy Wentworth Thompson, pioniere della biologia. La sua opera più celebre, *On Growth and Form* (1917) spianò la strada alla spiegazione scientifica della *morfogenesi*, il processo mediante il quale si formano modelli e strutture nei sistemi naturali.

Nell'opera sopracitata, Thomson afferma che la *forma* di un oggetto è analoga al diagramma delle forze che lo definiscono. Questa si traduce nell'idea che guida l'applicazione del principio del *minimo inventario/massima diversità* alla progettazione del sistema edilizio.

Successivamente la romantica descrizione della bellezza matematica ha stimolato diversi grandi pensatori, a partire da Julian Huxley, Claude Lévi-Strauss, Le Corbusier, Christopher Alexander e Mies van der Rohe.

3.1.2 Prestazioni ambientali multicriterio integrate: carico e luce

Riflettendo sull'uso in Natura della materia, è estremamente difficile riuscire a distinguere tra struttura e rivestimento, poiché molte delle *forme* naturali riescono ad assimilare diverse funzioni grazie a un uso sapiente delle proprietà dei materiali costituenti.

A tal proposito, Neri Oxman, designer, architetto, docente e ricercatrice al MIT Media Lab, ha investito tempo e risorse nello studio di diversi processi biologici e a come, in Natura, il materiale costituisca un riferimento essenziale nella progettazione della *forma*.

Riferisce come esempio evidente la pelle: osservando quella umana, a esempio, è chiaro comprendere che, all'interno di un tessuto continuo, convive una costante negoziazione tra funzioni apparentemente contraddittorie. Essa funge infatti contemporaneamente da barriera e da filtro, possedendo notevoli proprietà strutturali che le consentono di adempiere ai molteplici compiti che deve svolgere. Tra questi si può citare (considerando anche altre specie) la cattura di energia (l'occhio degli insetti per esempio), la generazione del colore (le ali delle farfalle), il trasferimento di calore (le piume del pinguino), il trasferimento della massa, la riduzione della resistenza (la pelle a denticoli dermici dello squalo), l'adesione superficiale (la forza attrattiva delle zampe dei gechi), la repulsione della superficie, il rilevamento, l'attivazione, eccetera.

Neri Oxman osserva che, in tutti questi casi, il comun denominatore è la complessa struttura in fibre.

In effetti, le strutture naturali possiedono una perfetta integrazione e un'armoniosa precisione nello svolgere più funzioni attraverso un progetto capace di generare strutture fibrose complesse a partire da composti organici o inorganici (Benyus, 2020). Combinati a matrici extracellulari, i

biomateriali strutturali formano delle microstrutture ingegnerizzate che si adattano perfettamente a vincoli esterni introdotti durante la crescita o durante il loro ciclo di vita (Vincent, 1982). Tali vincoli generalmente includono combinazioni di differenti criteri di prestazione strutturale, ambientale e corporea (Figura 3.1) (Oxman, 2010).

Dunque, poiché molti materiali biologici sono composti da fibre, la loro multifunzionalità si verifica spesso su scale che vanno dalla nano alla macro e tipicamente ottenute mappando i requisiti di prestazione alle strategie di strutturazione e allocazione dei materiali (Oxman, 2010). La *forma* della materia è quindi direttamente correlata alle influenze delle forze che agiscono su di essa (Oxman, 2010).

Il materiale si concentra in modo coerente rispetto alle esigenze, concentrandosi in regioni ad alta resistenza e disperdendosi in aree in cui è richiesta meno rigidità. In Natura quindi la *forma* è guidata dall'economia del materiale, ma, al contempo, il materiale è economico perché è sagomato e disposto in modo efficace rispetto ai carichi.

La Natura si mostra capace di distribuire gradualmente le proprietà del materiale per ottimizzarne localmente le proprietà secondo specifici stimoli esterni, come la capacità dell'osso di rimodellarsi sotto carichi meccanici (Figure 3.2) o quella del legno di modificare la sua forma attraverso il contenimento dell'umidità (Figura 3.3).

In particolare, rispetto ai due esempi appena citati, il processo conosciuto come “*rimodellamento osseo*” è un naturale meccanismo di adattamento strutturale alle sollecitazioni esterne che avviene per rispondere in modo continuo alle reali necessità biomeccaniche. Il legno, invece, è in grado di modellare, simulare e fabbricare simultaneamente la strutturazione del materiale (Oxman, 2010). È interessante notare che le proprietà strutturali del legno, a esempio, in modo non molto diverso da molti altri materiali biologici, possono variare ampiamente in funzione della direzione considerata: la durezza e resistenza differiscono per un dato campione quando misurate in diversi orientamenti².

3.1.3 Processi ambientali integrati: crescita, risposta e adattamento

Nel corso di milioni di anni, la Natura ha realizzato sistemi efficaci che relazionano correttamente struttura e funzione risolvendo problemi strutturali e meccanici complessi (Oxman, 2010). I sistemi e le strutture naturali modificano proprietà, forme, colori e percorsi di carico per contrastare sollecitazioni e vincoli strutturali e ambientali, nonché per gestire i danni e promuovere la riparazione. La loro sopravvivenza dipende infatti dalla capacità di negoziare tra più funzioni e valutare il loro significato all'interno di un singolo processo che integra i

² Tale proprietà è nota come *anisotropia*. Un materiale è definito *anisotropo* quando le sue caratteristiche dipendono dalla direzione considerata. Generalmente, i materiali da costruzione sono *isotropi*, ovvero le proprietà presentano le stesse caratteristiche fisiche in tutte le direzioni (Oxman, 2010).

meccanismi di crescita, risposta e adattamento (Oxman, 2010).

Risulta infatti che, invece di ottimizzare le proprie risorse per rispondere a una singola funzione, la Natura contratta tra più funzioni per mezzo di un unico sistema. La sopravvivenza di questi sistemi dipende dalla capacità della Natura di gestire e promuovere la redditività economica delle sue costruzioni, oltre a soddisfare una serie di proprietà meccaniche (Oxman, 2010).

Quello che più affascina comunque dei sistemi biologici, oltre alla generazione della *forma*, è la loro caratteristica unica di diagnosticare e riparare i danni localizzati all'interno della struttura. Chiaramente, un tale attributo potrebbe essere prezioso per le creazioni dell'uomo.

Seguendo parallelamente le diverse ricerche di Neri Oxman, è importante tuttavia affermare che i processi naturali sono ben integrati in tutte le loro parti proprio perché possono vantare ampie scale temporali offerte dall'evoluzione.

Sia la *forma* che il materiale di qualsiasi struttura naturale si sono evoluti a lungo per rappresentare un'estrema ottimizzazione rispetto ai carichi, alle sollecitazioni e ai vincoli a cui è soggetta. Per questo motivo, la tesi mirerà, successivamente, a comprendere la relazione tra generazione, analisi e fabbricazione degli elementi naturali al fine di poter speculare e implementare tali approcci all'interno dell'ambiente architettonico.

Dunque, dimostrata brevemente la sostenibilità delle strutture biologiche poiché estremamente efficaci ed efficienti secondo il principio di *inventario minimo/massima diversità* e di perfetta gestione della materia e della struttura, è necessario comprendere e analizzare come le strategie del mondo naturale possano essere implementate nella progettazione architettonica.

3.2 Ispirato dalla Natura: campi e approcci correlati

László Moholy-Nagy, pittore e fotografo ungherese naturalizzato statunitense, ha condiviso con Alvar Aalto, architetto, designer e accademico finlandese, la convinzione che biologia e tecnica fossero intrinsecamente connesse. Entrambi hanno ammirato le *forme* naturali e biologiche, sviluppando una riflessione interessante sulla nozione di standardizzazione.

Il modo di concepire l'osmosi tra tecnologia, Natura e le strutture invisibili che le collegano, non può che essere correlato al loro sforzo di considerare ponderatamente gli aspetti socioeconomici e psicologici che caratterizzano il processo creativo. Al centro dell'insegnamento e della pratica artistica di Moholy-Nagy c'era, da un lato, la credenza nei fini sociobiologici e, dall'altro, la possibilità di concepire ogni aspetto della pratica creativa in modo olistico e unificato (Charitonidou, 2020). Questi caratteri si manifestano in modo evidente nella sua filosofia di insegnamento al New Bauhaus, alla School of Design e all'Illinois Institute of Technology (IIT).

Aalto e Moholy-Nagy studiarono a lungo gli scambi tra Natura e tecnologia, per cogliere l'opportunità di rivalutare il concetto di standardizzazione e costruzione. Ne emerse una concezione originale che sfida la rigida impostazione degli architetti e artisti modernisti più canonici. Il loro lascito costituisce indubbiamente un importante precedente per i principali paradigmi del design industriale, dell'architettura e dell'urbanistica che sfruttano i meccanismi di imitazione della Natura.

All'inizio degli anni Trenta, tra László Moholy-Nagy e Alvar Aalto nacque una profonda amicizia. Un proficuo scambio tra i due artisti avvenne durante il secondo *Congresso Internazionale di Architettura Moderna* (CIAM) del 1929 e, due anni più tardi, durante un viaggio che il pittore, con Ellen Frank, fece in Finlandia nel mese di giugno (Figura 3.4).

Aalto subì il fascino delle idee che Moholy-Nagy elaborò in *Von Material zur Architektur* (Figura 3.5) regalatogli proprio in occasione del viaggio in Scandinavia. L'intenzione del noto architetto finlandese di promuovere un punto di riferimento per la standardizzazione basato sulla biologia e sui meccanismi della Natura può essere assimilabile verosimilmente all'ammirazione del pittore per le *forme* organiche e biologiche (Charitonidou, 2020). Nell'aprile del 1941 in Svizzera, all'interno del ciclo di conferenze *La ricostruzione dell'Europa è il problema chiave per l'architettura del nostro tempo* emerge la complessità della visione biocentrica di Aalto, concentrato a esprimere la sua totale devozione e ammirazione nei confronti della varietà delle strutture generate in Natura.

Parallelamente, Moholy-Nagy trovò in Raoul Heinrich Francé una delle principali fonti di ispirazione. Francé, noto per aver fondato la scienza della bionica, era motivato dalla convinzione che gli esseri umani dovessero imparare a copiare le invenzioni della Natura per sopravvivere sulla Terra³. Moholy-Nagy costruisce la sua teoria sull'idea di Francé che tutte le *forme* tecniche possano essere ricondotte alle *forme* che incontriamo in Natura. Il significato della visione di Francé diventa esplicito in *The New Vision* di Moholy-Nagy, dove esprime evidente ammirazione per l'analisi e la comprensione della Natura del biologo austro-ungarico.

In *The New Vision*, in cui viene lodata l'intuizione dell'utilizzo della Natura «*come modello costruttivo per la tecnica creativa*», Moholy-Nagy richiama le *Grundformen* di Francé, le sette primitive forme che compongono tutte le strutture naturali (cristallo, sfera, cono, lastra, striscia, asta e spirale) (Charitonidou, 2020). Utilizza il termine biotecnologia per descrivere la metodologia formale con la quale si applicano specificatamente le *forme* intuitive al design e all'architettura.

Inoltre, è interessante notare che sia Alvar Aalto che Moholy-Nagy abbiano dedicato molte energie e attenzione alle interconnessioni tra design, aspetti socioeconomici e aspetti psicologici (Charitonidou, 2020).

³ Questa nuova disciplina e area di ricerca è inizialmente chiamata *Biotechnik* (Anker, 2006).

Essenziale è l'eredità dei due professionisti su studenti e colleghi, ormai iniziati a proporre la Natura come modello costruttivo e base nella selezione di prototipi per design e architettura, consapevoli che, con le parole di Moholy-Nagy, «*l'architettura sarà portata alla sua piena realizzazione solo quando sarà disponibile la conoscenza più profonda della vita umana nel tutto biologico*» (Anker, 2006).

3.2.1 Biomimetica

Rispetto alla ragionevole motivazione di tradurre i processi naturali in principi di progettazione, la biomimetica è un campo emergente il cui obiettivo è studiare soluzioni progettuali ai problemi del mondo naturale come potenzialmente rilevanti per il design, l'architettura e l'ingegneria contemporanei (Oxman, 2010).

Secondo Klein, B. M. Katz ha definito questa nuova disciplina come lo studio dei processi naturali e di come possono essere emulati per risolvere i problemi umani in modo rispettoso della vita e senza sprechi (Klein, 2009).

In contrasto con l'ingegneria genetica che muta gli organismi cellulari in fabbriche per la produzione industriale, la biomimetica cerca invece di trasformare le risorse della società in agenti propri del mondo naturale: possiamo dire, dunque, che la Natura è trattata come una biblioteca di idee.

Sebbene lo studio della biomimetica possa essere ricondotto per molti versi al lavoro di Leonardo da Vinci, si ritiene invece che sia stato formulato solo nel 1960 quando l'Ufficio per la ricerca scientifica dell'aeronautica degli Stati Uniti convocò un gruppo di ricercatori per considerare il modo in cui la Natura produce ed elabora materiali unici (Oxman, 2010). Si suppone dunque che la motivazione di fondo della nascita di questa disciplina sia attribuibile all'intenzione di trarre ispirazione da materiali e processi naturali come fonte di potenziali innovazioni nella progettazione dei materiali (Oxman, 2010).

In particolare, gli ingegneri dell'US Air Force studiarono approfonditamente la struttura dell'occhio delle api: l'interesse era rivolto al loro sistema di orientamento (che sfrutta la luce polarizzata) per servirsene in campo aeronautico. In questa occasione, viene coniata da Jack Steele, un medico americano della US Air Force, la parola *bionica*, definita come la scienza che applica metodi e sistemi biologici riscoperti dalla Natura nello studio e nel design di sistemi tecnologici e ingegneristici (Oxman, 2010).

In architettura viene utilizzato preferibilmente il termine biomimetica (o *biomimicry* in inglese) mentre la parola *bionica* sta assumendo sempre più una connotazione esclusivamente medica.

Julian Vincent, professore di biomimetica e tra i massimi esperti della materia, definisce la

disciplina come «*l'astrazione del buon design della Natura*» (Vincent, 1990), ma i processi intellettuali coinvolti sono certamente più complessi di quanto la sola citazione possa lasciare intuire.

Nel 1997 Janine M. Benyus, massima autorità nel campo della biomimetica, pubblica il libro *Biomimicry; innovation inspired by nature*. Al suo interno definisce la disciplina come «*l'emulazione cosciente del genio della vita*» e riporta l'etimologia del termine: la parola deriva dal greco βίος (*bios*, vita) e μίμησις (*mimesis*, imitazione) (Benyus, 2020).

Mentre quindi Vincent discute le idee dalla Natura proponendo il concetto di *Naturale*, la Benyus insiste, nella definizione, sul concetto di *Vita*.

In tal senso, possiamo notare che il concetto di Vincent, che comprende la definizione di *Natura*, risulta più vasto di quello dell'autrice americana. La *Vita* è parte della Natura e dei suoi processi, ma esclude chiaramente il regno minerale e gli oggetti inanimati.

Seguendo le riflessioni della Benyus, e quindi limitandosi a parlare di *Vita*, è possibile datare l'origine nel nostro pianeta a 3,8 miliardi di anni fa (Benyus, 2020). A partire dai primi organismi unicellulari, abbiamo raggiunto una complessità straordinaria tramite continui meccanismi evolutivi. Il cervello umano, in particolare, è oggi il più sofisticato prodotto dell'evoluzione, il primo organismo in grado di decifrare i suoi stessi meccanismi funzionali.

Al contrario della materia inanimata, gli oggetti viventi subiscono variazioni temporali, evoluzioni e innovazioni; la vita si auto-organizza, si auto-genera e partecipa a innumerevoli altri fenomeni unici. Tuttavia, stabilire un reale confine tra *Natura* e *Vita* è labile, per questo la stessa Benyus include, all'interno del titolo del suo principale scritto, il termine *Natura*.

Ricordando dunque l'importanza di entrambi i termini per la disciplina oggetto di studio nel presente elaborato, si parlerà in generale di *Natura*, richiamando solo in contesti specifici l'altro concetto, preferenziale per descrivere alcuni aspetti puntuali.

Per comprendere le ragioni di questa confusione terminologica, spesso commessa con grave leggerezza, è necessario capire che ogni organismo vivente rispetta le leggi della fisica. Tale caratteristica è attribuibile anche agli elementi inanimati. Ciò comporta che si scoprono continuamente soluzioni simili nel mondo vegetale e animale come in quello minerale.

L'esempio più noto, e forse anche il più semplice, è la forma esagonale. Nel mondo animato la ritroviamo negli alveari; in quello inanimato è presente invece nella composizione delle bolle di sapone e in alcune formazioni rocciose vulcaniche create dalla lava in ebollizione. Si tratta di una forma ottimizzata: a parità di resistenza è quella che richiede una minore quantità di materia.

Ne risulta che negli elementi animati la *forma* è la conquista raggiunta tramite un lungo processo

di sperimentazioni, mentre in quello inanimato è la semplice traduzione della reazione a forza che agisce sulla materia (Benyus, 2020).

Quest'ultima osservazione è anche una delle caratteristiche più affascinanti del mondo biologico. Come affermato in precedenza, infatti, il cambiamento avviene gradualmente, con un lento percorso di trasformazioni all'interno del quale vengono progettate le soluzioni più efficienti. Riconosciamo certamente la complessità e la lentezza dei meccanismi evolutivi così come notiamo che il continuo cambiamento è l'unica possibilità di sopravvivenza in contesti mutevoli.

Nonostante il lasso di tempo evolutivo di milioni di anni dei sistemi naturali sia indubbiamente differente da quello dell'ingegneria e dell'architettura contemporanei, si assume che gli obiettivi di progettazione possano essere spesso assimilabili.

Viviamo in tempi straordinari e oggi è possibile studiare come la Natura abbia ottimizzato le sue strutture durante un lungo periodo evolutivo. Nello studio del modo in cui la Natura raggiunge la perfezione possiamo concentrarci su materiali, proprietà strutturali, proprietà meccaniche, integrazione funzionale, sistemi di rilevamento e controllo oltretutto su innumerevoli altri aspetti del design che possono avere rilevanza generale per le invenzioni e le soluzioni contemporanee.

3.2.1.1 Differenze tra la biomimetica e altri bio-approcci

In architettura spesso la biomimetica è confusa con altre discipline. Si incorre nell'equivoco di considerare che questa scienza impieghi organismi viventi nella progettazione, ma l'utilizzo di materiali naturali e del verde, caratteristiche proprie di alcuni rami dell'architettura sostenibile, non è affatto il principio di questa disciplina.

Essa si preoccupa piuttosto di imitare interi processi; non impone l'uso specifico ed esclusivo di materiali naturali né comporta uno smodato utilizzo di elementi vegetali. Molto più spesso, invece, i materiali prodotti in campo biomimetico sono altamente artificiali, frutto di una prima accurata analisi e studio delle strategie e dei processi naturali e di una successiva rielaborazione artefatta. Il meccanismo della vita viene tradotto in un oggetto sintetico, estratto dalla Natura ma coltivato dall'uomo.

Ovvero, con le parole di Janine Benyus: *«La biomimetica ci introduce in un'era basata non su cosa possiamo estrarre dalla natura, ma su cosa possiamo imparare da essa. Spostare l'attenzione dall'imparare a proposito della natura all'imparare dalla natura richiede un nuovo metodo di indagine, un nuovo set di lenti, e soprattutto una nuova umiltà.»* (Benyus, 2020).

Ne osserviamo che il semplice impiego di materiali naturali non costituisce affatto lo scopo della biomimetica. Si tratta sicuramente di un atteggiamento virtuoso e dai nobili propositi

ecologici, ma non include il presupposto fondamentale della disciplina.

3.2.1.2 Campi di applicazione

Contrariamente all'immaginario comune, la biomimetica non progetta semplicemente *forme*. L'imitazione degli organismi viventi di cui si è discusso finora non è limitata alla concezione puramente formale. I campi d'applicazione sono estesi, non pertinenti unicamente architettura e design, ma anche agricoltura, economia e sistema dei trasporti.

Tuttavia, nel contesto di questa ricerca, si cercherà di limitare l'indagine all'architettura e al design.

Innumerevoli sono infatti oggi le innovazioni nel settore delle costruzioni, con specializzazioni sempre maggiori in campo materico, dove si intrecciano sperimentazioni che traggono principi solidi dalla biologia, dalla biochimica e dalla biofisica molecolare.

Appare terreno fertile la scala molecolare o nanometrica per la formulazione di materiali all'avanguardia nel settore delle costruzioni. Le stesse nanotecnologie possono ricondursi, almeno nel principio, proprio all'osservazione della Natura: la simulazione dei meccanismi biologici poi tradotti in strutture artificiali è, verosimilmente, il frutto della tradizione di analisi al microscopio dei sistemi naturali. Proprio le nanotecnologie vantano un campo d'applicazione variamente esteso grazie alla vasta scala applicativa di cui gode la stessa disciplina. Parallelamente, un prodotto nanometrico generato dalla biomimetica è utilizzabile in diversi settori⁴.

Purtroppo, se la progettazione di materiali avanzati raccoglie già i frutti delle applicazioni basate su un approccio biomimetico, l'ambito architettonico, in senso lato, non ha ancora sfruttato appieno il potenziale di un processo progettuale innovativo ispirato alla biologia. La progettazione architettonica non è infatti ancora riuscita a maturare la consapevolezza del potenziale di questo nuovo approccio, seppur siano già presenti alcuni esempi.

Il limite consiste sempre nella compartimentalizzazione, nella totale assenza di un approccio integrativo di tutte le componenti: i prodotti e i materiali avanzati disponibili appaiono come una raccolta grazie alla quale l'architetto, dopo aver selezionato l'opzione più consona alle sue esigenze, assembla il progetto. Sembra dunque che, finora, la biomimetica abbia offerto unicamente un campionario di supporto al progettista, ma non una nuova metodologia progettuale.

Tuttavia è impossibile non valutare i vantaggi che una reale imitazione delle strategie biologiche

⁴ Diverse ricerche, testi scientifici e conferenze internazionali dimostrano una diffusione sempre maggiore della biomimetica in svariati settori a partire dalla seconda metà degli anni '90.

potrebbe offrire all'architettura, rivoluzionando e fornendo un nuovo modello progettuale più elegante e complesso oltretutto più inclusivo e sostenibile.

3.2.1.3 Divulgazione del sapere scientifico

In campo biologico la ricerca è ormai ricca e florida, raggruppata in ambiti specialistici. Vi è un approfondimento continuo e costante, capace di comprendere e conoscere così specificatamente da risultare impensabile per architetti, ingegneri e designer. Quel che si vuole affermare, in altre parole, è che il sapere di un biologo è altamente specialistico, incomprensibile per un qualsiasi altro professionista che legga gli stessi meccanismi per dedurre l'ispirazione per un progetto.

Forse tra le tante, questa potrebbe essere una delle ragioni che hanno sinora limitato l'impiego di un solido metodo: perché la metodologia risulti efficace, infatti, è necessaria una profonda conoscenza delle strategie naturali, raggiungibile solo dopo decenni di analisi, studio, catalogazione e approfondimento.

Oggi, grazie a consolidati studi in biologia, possiamo trarre conclusioni sperimentate efficaci, estendibili anche alla formulazione di una metodologia progettuale.

Si può osservare, però, che non sempre le strategie naturali sono racchiuse in un codice inaccessibile.

Spesso, infatti, sono sufficienti conoscenze basilari di un dato organismo biologico per dedurre soluzioni efficaci traducibili nel settore delle costruzioni. A volte persino una semplice *forma*, la componente che più di tutte mette a proprio agio l'architetto, contiene il segreto di una strategia prestazionale raffinata ed efficiente.

È il caso di Eiji Nakatsu, appassionato birdwatcher e direttore del dipartimento di ricerca e sviluppo della società ferroviaria nipponica, che si ispirò alle proporzioni del becco del martin pescatore per la costruzione della testa del treno giapponese a lievitazione magnetica, lo *shinkansen* (Figura 3.6) (Michielin, 2018).

Fino alla metà degli anni '90, infatti, questi treni potevano superare i 300 chilometri orari, ma emettendo un'onda sonora udibile per centinaia di metri di distanza. La soluzione, per Nakatsu, era a portata di binocolo: egli osservò la tecnica di caccia del martin pescatore, il cui tuffo fulmineo produce unicamente un'invisibile increspatura sulla superficie dell'acqua. L'ingegnere studiò i movimenti dell'uccello per comprendere la soluzione al suo problema: come il martin pescatore si sposta repentinamente dall'aria all'acqua, così lo *Shinkansen* corre dallo spazio aperto a quello chiuso del tunnel con resistenza maggiore.

Quando però la traduzione dei processi biologici deve essere affidata a specialisti, l'imperativo

crescente di riprogettazione dell'universo costruito dall'uomo è, fortunatamente, sostenuto dal potenziale innato di cui disponiamo per creare un mondo armonioso, rigenerativo e che possa assicurare il benessere di tutti gli organismi viventi.

Come affermato in precedenza, infatti, biologia e scienze naturali hanno approfondito ormai da qualche secolo il mondo animale e vegetale, conseguendo risultati dettagliati e scrupolosi e aggiungendo costantemente nuove interessanti scoperte sui meccanismi biologici, chimici e comportamentali che governano i processi vitali. La grande quantità di risorse raccolte è disponibile ora anche per i progettisti grazie a diversi strumenti di divulgazione del sapere biologico.

Tuttavia, prima di illustrare solo alcuni degli esempi che si è ritenuto più significativi durante il lavoro di ricerca, si comprende la necessità di stabilire un punto di partenza solido da cui partire per elaborare il progetto in architettura. È necessario, dunque, enunciare prima un metodo incisivo per l'imitazione del processo biomimetico.

3.2.1.4 Metodo e fasi progettuali di Janine Benyus

Rispetto agli innumerevoli contributi nel campo biomimetico, indubbiamente il tentativo più compiuto per definire un metodo di progettazione per l'architettura lo si deve a Janine M. Benyus.

La biologa statunitense, impegnata da molti anni allo studio di questa disciplina con enorme entusiasmo, è riuscita a coinvolgere diversi ricercatori e studiosi. Proprio il lavoro del suo team ha divulgato i principi biomimetici su cui si basa la tesi, affiancando tra loro svariati preziosi strumenti per la comprensione dei meccanismi vitali.

Per emulare coscientemente il *genio della vita*, quest'ultima deve essere *modello, misura e mentore* (Benyus, 2020).

In altre parole, la biologa concepisce un'ampia diffusione della biomimetica come contributo pratico e teorico ai paradigmi della progettazione ecocompatibile formulato a partire dagli ultimi 30 anni. Componenti essenziali sono il capitalismo naturale, la filosofia della produzione ciclica *Cradle to Cradle (Dalla culla alla culla)*, il design ecologico e la progettazione sostenibile degli edifici (Benyus, 2020).

Alla base della sua teoria vi è la ferma convinzione che l'imitazione della Natura non debba essere un mero esercizio formale. È necessario integrare funzione, processo ed ecosistema: si può affermare, a questo punto, che tale premessa è ciò che ha condotto e spinto la ricerca verso la scoperta della biomimetica come una delle possibili risposte metodologiche alla sfida culturale introdotta dal New European Bauhaus.

La prima fase del metodo consiste proprio nel superare il limite della forma, includendo tutte le componenti progettuali per definire chiaramente un processo biomimetico.

L'emulazione si concretizza successivamente attraverso due ulteriori passaggi: l'imitazione di un processo che giunge a una forma funzionale e l'inserimento delle logiche dell'ecosistema.

Alla fine, il metodo si configura come un sistema aperto, incrementabile attraverso nuovi collegamenti e legato a diversi elementi contestuali.

3.2.1.5 Processo biomimetico

Seguire un processo ben strutturato può essere estremamente utile quando si decide di risolvere una sfida progettuale.

La *Biomimicry Design Spiral* (Figura 3.7), studiata dal Biomimicry Institute⁵, fornisce proprio una sintesi descrittiva degli elementi essenziali di un processo di progettazione che studia e sfrutta i meccanismi della Natura come guida per creare soluzioni artefatte.

La spirale descrive i sei passaggi fondamentali che qualsiasi team di progettazione dovrebbe intraprendere se decide di inglobare soluzioni biomimetiche. Questi step sono in seguito descritti in sequenza; tuttavia è importante notare che, all'interno delle logiche progettuali, il team può doversi muovere con successioni differenti o dover ripetere alcuni passaggi più volte. Ogni tappa, infatti, tende a rivelare nuove informazioni che possono anche mettere in discussione completamente le ipotesi fatte nei passaggi precedenti. La descrizione del processo risulta comunque particolarmente utile per coloro che muovono i primi passi con la disciplina per inglobarla e ancorarla all'interno del proprio metodo progettuale.

3.2.1.5.1 Definire (*define*)

Il primo passo in qualsiasi processo di progettazione consiste nel definire il problema o l'opportunità che si desidera affrontare con il progetto. Una chiara delimitazione della sfida è un atto preparatorio da svolgere prima dell'inizio di un qualsiasi lavoro di progettazione effettivo.

Durante questa fase si esplora, si scopre e si definiscono obiettivi precisi e puntuali, articolando l'impatto e il risultato atteso oltreché criteri e vincoli che possono determinare il successo.

L'obiettivo non è tanto stabilire che cosa verrà realizzato o progettato, bensì comprendere cosa deve fare il progetto, per chi è studiato e in quale contesto si troverà. Seppur spesso si possa essere tentati di affrettare questo step, è importante ricordare che una qualsiasi accelerazione prematura potrebbe dar vita a conclusioni errate o approssimative.

⁵ Un'organizzazione senza scopo di lucro fondata nel 2006 dalla biologa Janine Benyus.

Di fronte a problemi molto complessi, il lavoro di ricerca deve essere il più scrupoloso possibile ed eventualmente si potrà scomporre in sotto-parti. Solo quando si ritiene di aver compreso meticolosamente tutti i fattori problematici del progetto, allora sarà possibile selezionare una sfida concreta e specifica su cui concentrarsi e procedere oltre.

Il Biomimicry Institute elenca inoltre una serie di preziosi ulteriori consigli per migliorare il lavoro di questa fase. Suggerisce, per esempio, di formulare una frase che descriva la sfida in modo interrogativo o di considerare approfonditamente il contesto, consapevoli che esso fornisca specificità e vincoli essenziali per identificare svariate esigenze.

3.2.1.5.2 Biologizzare (*biologize*)

Definita nitidamente la sfida, essa deve essere riformulata in un contesto biologico: questa tappa è chiamata *biologize*. È proprio questo passaggio che rende possibile iniziare a cercare nella Natura le strategie per risolvere problemi di progettazione specifici.

Durante questo step si analizzano le funzioni essenziali e il contesto che circonda la richiesta progettuale. Ci si chiede dunque come la Natura giungerebbe alla soluzione del problema, lasciandoci guidare proprio dai modelli biologici.

Dal punto di vista pratico, è importante descrivere funzioni e contesti in termini biologici, avendo cura di porre i giusti quesiti per avere risposte sensate oltreché inquadrare più alternative relative a metodi e opzioni di ricerca.

Per ampliare la gamma di potenziali soluzioni, si devono considerare anche funzioni opposte o tangenziali, senza affrettare il processo e dedicandovi il corretto tempo necessario affinché siano delineate tutte le opzioni realizzabili.

3.2.1.5.3 Scoprire (*discover*)

La biomimetica dipende dalle informazioni biologiche, quindi sapere dove e come ricercare modelli e strategie è un'abilità essenziale per un biomimetico.

A guidare la progettazione deve essere un'indagine di modelli naturali (organismi ed ecosistemi) che devono affrontare le stesse funzioni e lo stesso contesto della sfida progettuale, identificando le garanzie che supportano sopravvivenza e successo del sistema.

Questo passaggio quindi si concentra nuovamente sulla ricerca e sulla raccolta di informazioni, confrontando più specie, ecosistemi e scale e imparando il possibile sui modi in cui la Natura si è adattata alle funzioni e ai contesti rilevanti per il progetto.

Secondo il Biomimicry Institute uno dei modi più gratificanti per connettersi con ciò che la Natura ha da insegnarci è trascorrere il tempo all'aria aperta. Infatti, sebbene libri e risorse online contengano svariati ottimi spunti, non esiste alcun sostituto equivalente all'osservazione diretta.

Studiare la Natura, attraverso l'osservazione, amplia le conoscenze del progettista e permette di sviluppare una visione sistemica su come gli organismi interagiscano tra loro e con l'ambiente.

Il tempo trascorso all'aria aperta dovrebbe essere sfruttato per realizzare schizzi e prendere appunti. Il Biomimicry Institute raccomanda infatti di dettagliare le esperienze su veri e propri diari, usando il disegno e la scrittura come validi supporti didattici.

3.2.1.5.3 Astrarre (*abstract*)

L'astrazione è l'azione che mira a tradurre le caratteristiche biologiche in strategie di progettazione. Attraverso l'uso di un linguaggio semplificato, è possibile annotare la nostra comprensione del funzionamento di un dato sistema biologico.

Per studiare attentamente le caratteristiche o i meccanismi essenziali che rendono efficaci le strategie biologiche, un valido ausilio è il disegno che, secondo il principale istituto di ricerca biomimetica, garantisce una comprensione accurata.

L'astrazione è uno dei passaggi più difficili della biomimetica e richiede molta costanza e pratica; è richiesta infatti l'abilità di comprendere pienamente la strategia biologica per poterla semplificare in termini non necessariamente specialistici. Questo passaggio agevola una possibile collaborazione interdisciplinare perché esente di un bagaglio terminologico potenzialmente incomprensibile ad alcuni.

In qualsiasi momento di questa fase, si deve considerare la possibilità di consultare un biologo, un naturalista o un esperto per garantire una comprensione accurata di partenza e per certificare di aver riassunto o illustrato fedelmente la strategia di progettazione.

Alcuni strumenti offerti dal Biomimicry Institute, come il sito *AskNature.org* descritto in seguito, il lavoro è molto semplificato: con poche parole chiave appaiono molti possibili alternative che riducono fortemente il compito del progettista che sperimenta in materia biomimetica.

3.2.1.5.4 Emulare (*emulate*)

A partire da questa fase inizia il momento creativo.

Modelli e relazioni analizzati devono essere ora sviluppati attraverso progetti di design: la

fase di emulazione è proprio il cuore pulsione del processo biomimetico. Più che una copia meccanica delle strategie della Natura, l'emulazione consiste in un vero e proprio processo esplorativo che si sforza di ricavare ed estrapolare contenuti riconvertibili.

Durante questa parte del processo, si concilia e sintetizza tutto ciò che è stato appreso negli ultimi quattro passaggi in un progetto coerente e vitale. È importante rimanere di mentalità aperta in questa fase e lasciar andare qualsiasi nozione preconcepita su quale potrebbe essere la soluzione.

Tralasciando ogni qualsivoglia nozione preconcepita infatti, la lezione appresa è riorganizzata in un formato visivo o grafico attraverso tecniche di *brainstorming*, mappe mentali o ulteriori schizzi capaci di stimolare nuove idee.

3.2.1.5.4 Valutare (*evaluate*)

Quando si progettano soluzioni è importante testare le proprie idee e apprendere da ciò che non funziona per migliorare (è infatti molto difficile che il primo tentativo sia pienamente soddisfacente).

Durante la fase *evaluate* si valutano i risultati del progetto per verificare se soddisfano criteri e vincoli della sfida di partenza. Possono entrare in gioco altri parametri rilevanti come la fattibilità economica e tecnica oppure può essere obbligatorio eseguire eventuali perfezionamenti dei passaggi precedenti.

Infatti, sebbene questo passaggio sia illustrato come l'ultimo della spirale, dovrebbe avvenire più volte durante il processo di progettazione e con rigore crescente. All'inizio potrebbero essere sufficienti brevi check per identificare quali concetti hanno il maggior potenziale, ma proseguendo nella progettazione, la valutazione può comportare attività più complesse, come la creazione di modelli, test di collaudo o condivisione di prototipi con utenti o parti interessate per sollecitare un *feedback*.

Realizzare semplici prototipi o altri generi di visualizzazione (disegni, storyboard, ecc.) può essere vincente nel riconoscimento di eventuali problemi o opportunità.

3.2.1.6 Strumenti

L'architetto, a differenza dei ricercatori nei campi dell'ingegneria dei materiali e della chimica, formati a partire da metodi scientifici di osservazione e rielaborazione, non possiedono gli stessi strumenti di conoscenza. Sono necessari quindi specifici strumenti ausiliari.

Il metodo progettato dalla biologa americana dispone di molti validi strumenti. Questi sono offerti in virtù del raggiungimento degli obiettivi prefissati.

Nel 2008, il Biomimicry Institute, in collaborazione con Autodesk, ha lanciato *AskNature.org*, la prima banca dati online liberamente accessibile e completa che ricerca soluzioni e innovazioni dallo studio della Natura.

Questo servizio, totalmente gratuito, raccoglie quasi 1.700 articoli che descrivono come i sistemi biologici si siano adattati per prosperare e sopravvivere di fronte a una miriade di condizioni e sfide. Dispone di un archivio di invenzioni e progetti di ricerca ispirati alla bioedilizia oltretutto di una biblioteca di risorse per i professionisti interessati alla progettazione bio-ispirata.

La piattaforma è in continua evoluzione grazie al contributo che può essere fornito dall'utenza nel segnalare nuove informazioni, ricerche, progetti e risultati. Incoraggia a intraprendere un'esperienza diretta con la Natura, con rispetto e curiosità, guidando il fruitore nella riscoperta di tre elementi essenziali: *(Re)Connect*, *Emula* ed *Ethos*.

(Re)Connect consiste nell'acquisire piena consapevolezza che l'uomo, come individuo e come specie, è parte della Natura. Per onorare questa relazione, deve instaurare una connessione profonda con tutti gli organismi viventi.

Emula, invece, comprende la pratica scientifica, la ricerca e l'innovazione nell'apprendere (e quindi nel replicare) forme, processi ed ecosistemi naturali per una progettazione rigenerativa.

Ethos riguarda la responsabilità dell'uomo di conservare e proteggere le risorse da cui apprende.

Il Biomimicry Institute riconosce quindi che il nostro Pianeta rappresenta l'unica amata patria a disposizione per popoli che troppo spesso vengono sfollati della loro eredità ancestrale e, per questo motivo, si dedica a identificare, apprendere e lavorare con molte culture indigene per preservare e condividere la loro esperienza del mondo naturale in modi autodeterminati e culturalmente appropriati.

La Benyus riconosce l'importanza della conoscenza per una metodologia efficace. Il già citato sito *AskNature.org* è infatti solo il primo punto di partenza per la progettazione, grazie al quale è possibile usufruire di una consistente libreria di dati (sia strategie naturali che casi studio già testati) utilizzabili come esempi.

Per affrontare le sfide dell'innovazione, *AskNature* propone un sistema di classificazione complesso. Nella tassonomia biomimetica (Figura 3.8), sviluppata dal Biomimicry Institute per organizzare i contenuti biologici sul sito web, si nota chiaramente la complessità delle soluzioni che la Natura genera. Il sistema classifica le differenti metodologie attraverso cui gli organismi e i sistemi naturali affrontano le sfide funzionali.

Sul sito web, i modi in cui organismi e sistemi si sono adattati in risposta alle sfide figurano come *strategie*. La tassonomia organizza schematicamente le strategie biologiche per funzione (il ruolo della strategia per l'organismo o il sistema vivente).

Per quanto questa operazioni risulti banale se esplicitata, questa classificazione risulta invece preziosa perché consente, molto più chiaramente, di ricercare potenziali soluzioni ai problemi affrontati dall'uomo secondo analogie o parametri simili.

All'interno della tassonomia, le funzioni sono organizzate in una gerarchia nidificata. Il primo livello, il *gruppo*, rappresenta la prima funzione svolta in Natura; il secondo livello è un ulteriore *sottogruppo* di funzioni secondarie mentre il terzo e ultimo indica una funzione ancora più specifica. Complessivamente, la tassonomia presenta otto gruppi composti da 30 sottogruppi che contengono a loro volta più di 160 funzioni.

Questo strumento è un ausilio primordiale, utile al progettista che si avvicina alla sua sfida per la prima volta. Il sommario deve essere considerato come una database critico a cui porre delle domande per ricevere risposte uniche e innovative.

Così, se si volesse produrre un pigmento non tossico, si potrebbe chiedere alla Natura come genera il colore; se si volesse formare un materiale da costruzione resistente, leggero e forgiato a freddo, si potrebbe chiedere alla Natura come gestire le forze. Sul sito è sufficiente cercare ed esplorare utilizzando la barra di ricerca in homepage.

3.2.1.7 Principi di vita

I *Principi di Vita (Life's Principles)* rappresentano la profonda saggezza del mondo biologico (Figura 3.9). Si tratta dei modelli di cui si servono quasi tutte le specie (organismi ed ecosistemi) per sopravvivere e prosperare sulla Terra. Infatti, basandosi sul riconoscimento che la vita sulla Terra è interconnessa, interdipendente e soggetta allo stesso insieme di condizioni operative, essa ha sviluppato una serie di strategie che si sono protratte per oltre 3,8 miliardi di anni (Benyus, 2020).

La *Vita* integra e ottimizza queste tattiche per generare condizioni favorevoli alla vita stessa. Imparando da queste preziose lezioni di progettazione, è possibile modellare nuovi e ulteriori progetti innovativi, confrontando i risultati rispetto ai parametri iniziali di riferimento e lasciandoci guidare dal genio della Natura.

Che sia ispirato dalle barriere coralline o dai canguri, questo mezzo educativo è in grado di accrescere le capacità di una buona leadership in diversi settori mentre permette di approfondire le conoscenze biologiche.

In seguito vengono riassunti i *Principi di Vita* che dovrebbero guidare una buona progettazione con lo sguardo al mondo rigenerativo e sostenibile biologico.

3.2.1.7.1 Evolvere per sopravvivere

L'unica vera costante della vita è il cambiamento. Viviamo e operiamo in un mondo dinamico e siamo consapevoli che, di fronte a cambiamenti immediati e a breve termine, le organizzazioni, i prodotti e i sistemi debbano essere in grado di adattarsi.

Ma l'ambiente non muta solo in periodi brevi; alcuni sono più lunghi e molto più lenti e perciò richiedono sforzi più profondi nella struttura, nella strategia e nel design, cambiandone talvolta radicalmente il disegno o l'architettura. Questo processo di evoluzione può essere quindi visibile attraverso graduali cambiamenti nel tempo.

In Natura, le specie hanno attivato nel tempo meccanismi di adattamento per rispondere alle pressioni degli ambienti in cui vivono per contrastare l'estinzione e gli organismi hanno riordinato le informazioni disponibili per sopravvivere.

Questo è un principio ormai consolidato in biologia. L'evoluzione è la componente essenziale dei sistemi naturali che, trasformandosi, sono stati in grado di risolvere le sfide più impensabili.

Il riccio è un caso esemplare di successo evolutivo che non si basa sulla forza. La caratteristica più interessante in termini di adattamento di questo piccolo animale sono le sue spine.

In media il riccio presenta circa 5.000 spine: inizialmente quest'ultime erano peli, evolute per sviluppare un meccanismo di difesa unico. La colonna vertebrale del mammifero è composta da tante minuscole camere d'aria separate da piastre: il design e la forma delle spine rendono il peso minimo e aiutano a deviare l'energia ricevuta da eventuali colpi.

Il riccio ha sviluppato simultaneamente due strategie per la difesa che coinvolgono le sue spine. Il primo è l'estrazione di queste stesse, fuoriuscenti finché il pericolo non è stato superato; quando estratte, invece, le spine sporgono a differenti angolazioni sostenendosi vicendevolmente per formare una barriera quasi impenetrabile.

La seconda strategia è il rotolamento: i ricci possiedono infatti più pelle del necessario. L'evoluzione li ha resi in grado di coprire del tutto il loro corpo con una combinazione unica di pelle e muscoli che la controllano in un'azione difensiva straordinaria.

Questo incredibile sistema di difesa funziona contro qualsiasi cosa (o quasi). È il risultato di processi di adattamento ed evoluzione, non di forze.

Per la progettazione, si rende proficuo sfruttare questa caratteristica biologica per garantire

prestazioni più durature e funzionali. Se incorporate e incanalate informazioni utili in modo continuativo e costante, anche i sistemi artificiali possono raggiungere gli stessi standard performativi di quelli biologici.

L'approccio corretto prevede di replicare le strategie consolidate riconosciute come funzionanti, ripetendo i parametri che generano il successo del sistema. Almeno in principio, l'idea di base è piuttosto semplice: se una strategia risulta efficace dovrebbe essere mantenuta.

Ma gli errori spesso accadono. Dobbiamo essere aperti a questa possibilità e riconoscere che non tutti i cambiamenti imprevisi o non intenzionali debbano essere corretti. Si integra dunque l'inaspettato, rivolgendo uno sguardo critico agli errori e incorporandoli per ottenere nuove forme e funzioni e cogliendone, quindi, l'opportunità inattesa.

Altre nuove e sorprendenti opportunità possono infatti emergere quando le informazioni vengono combinate in modi del tutto inaspettati. Rimescolare le informazioni, scambiando e modificando i dati, può sorprenderci con soluzioni insolite o opportunità inaspettate. Sebbene questa tecnica non generi sempre risultati positivi, è una strategia che può guidare fortemente l'innovazione.

3.2.1.7.2 Adattarsi al cambiamento

Secondo i principi biomimetici l'adattamento è una condizione necessaria affinché i sistemi siano in grado di rispondere opportunamente ai contesti dinamici ai quali vengono sottoposti.

Questo principio coinvolge la capacità di prodotti, progetti e sistemi di adattarsi a cambiamenti a breve termine, non attraverso una lunga evoluzione, ma rispetto a un progetto attuale. La risposta deve essere quindi immediata, consentendo un miglioramento funzionale generale istantaneo.

Tra i più conosciuti esempi biologici, il polpo è il campione di adattabilità. Questo mollusco ha imparato a sopravvivere e prosperare in quasi tutti gli ambienti. Con un corpo morbido e sinuoso, molto attraente per i predatori, ha scovato quasi tutti i modi possibili per nascondersi e proteggersi, incluso imparare a raccogliere i gusci di cocco scartati dalle barche turistiche usandoli per creare un'armatura all'interno della quale si muove.

Quando il polpo si avventura, migliaia di cellule specializzate (i cromatofori) sulla superficie della sua pelle percepiscono l'ambiente e si adattano a esso, cambiando costantemente forma e colore. Se per difesa può rendersi quasi invisibile, per attrarre un potenziale compagno, invece, può assumere colori anche molto vivaci.

Il successo dell'adattamento si manifesta attraverso l'integrazione della diversità, colta come

un'opportunità incorporando molteplici varietà di forme, processi o strategie per soddisfare un'esigenza funzionale. Riconoscendo che i sistemi non siano prevedibili, uno sforzo perseverante di inclusione consente di soddisfare i cambiamenti generando una vasta quantità di opzioni.

Si parla qui di diversità di idee, di approcci e di soluzioni oltreché qualunque altra peculiarità che possa agevolare un'evoluzione definitiva a lungo termine.

Questo processo favorisce il concetto di resilienza, la capacità dei sistemi di riprendersi e mantenere le loro funzioni dopo uno shock, un disturbo o una qualunque interruzione.

Secondo Janine Benyus, sono necessarie tre componenti per garantire la resilienza: varietà, ridondanza e decentramento. Ovvero, esigenze o funzioni critiche devono poter essere soddisfatte in diversi modi; le funzioni essenziali non devono essere svolte da una sola persona o un solo elemento del sistema, ma invece risultare ridondanti all'interno del sistema stesso; e, infine, le funzioni chiave devono essere decentralizzate: questo significa che deve avvenire un loro smistamento, evitando situazioni in cui lo stesso elemento si trova nello stesso posto. Le organizzazioni gerarchiche vengono così sostituite da reti agili e decentralizzate che agiscono più come un sistema nervoso che come una fabbrica.

Nella logica di una risposta opportuna all'interno di un contesto dinamico, l'integrità è mantenuta con l'auto-rinnovamento, incrementando energia e materia con costanza per migliorare il sistema.

Siamo pienamente consapevoli infatti che gli oggetti si consumano e si rompono per usura o per vecchiaia. La capacità di riparare o rigenerare prodotti o sistemi che non funzionano o persino di creare qualcosa in grado di non rompersi affatto, è una proprietà indubbiamente interessante per l'architettura o il design.

Immaginare, ricostruire, riorganizzare o rigenerare il nuovo a partire dal vecchio consente invece a prodotti, processi e sistemi di mutare secondo necessità in risposta all'ambiente in cui vivono.

3.2.1.7.3 Reattività e sintonia locale

Un terzo interessantissimo principio, anche rispetto ai valori promossi dal New European Bauhaus, è relativo alla reattività e alla sintonia locale. Si tratta di una proprietà attraverso cui il sistema riesce ad adattarsi e a integrarsi con il contesto e l'ambiente circostante.

Questo principio si attua con l'utilizzo di materiali ed energia di facile reperibilità, sfruttando materiali accessibili e abbonanti a livello locale e riutilizzando l'energia libera disponibile.

Dobbiamo considerare dunque ciò che è disponibile prontamente, valutando opzioni alternative per evitare l'importazione.

L'utilizzo di materiali disponibili sul territorio è certamente una realtà lontana da quella a cui siamo abituati. La pratica commerciale standard di spedizione globale è consolidata e ci offre una vasta gamma di prodotti tutto l'anno. Per questa ragione, un approccio efficace è il frutto di una sapiente rete di relazioni cooperative che riconoscono il valore dell'incisività delle interazioni.

Vanno ricercati metodi di lavoro collaborativi, capaci di fornire vantaggi reciproci in termini di costi e opportunità. Fortunatamente, nonostante le pratiche di concorrenza siano state, fino a oggi, la fonte principale di nuove idee e prodotti, le aziende si stanno rendendo sempre più disponibili a sfruttare i punti di forza dei concorrenti per ottenere benefici attraverso la collaborazione.

È inoltre importante sottolineare il carattere ciclico di questo principio, sia per i processi (è inevitabile comprendere i fenomeni che si ripetono per poter apprendere da essi) sia per le risposte conseguenti: è necessario un impegno tenace nella costruzione di flussi informativi di carattere ciclico per modificare appropriatamente le reazioni (*feedback loops*).

A ogni luogo appartengono caratteri tipici, eventi o schemi che si ripetono nel tempo. Verosimilmente, la prevedibilità di eventi ciclici ci consente di progettare considerando questi fenomeni e persino di sfruttarli a nostro vantaggio. Servirsi dei processi ciclici richiede di conoscere intimamente luoghi e sistemi, identificando e prestando attenzione ai modelli di comportamento ripetuti nel tempo e riuscendo, solo in seguito, a trarre opportunità d'impiego.

3.2.1.7.4 Integrare lo sviluppo con la crescita

Come si è già affermato in precedenza, gli organismi viventi si avvolgono in modo ottimale di strategie che promuovono lo sviluppo e la crescita. Allo stesso modo, anche i sistemi artificiali dovrebbero investire risorse in processi similari che integrano questi aspetti in modo coerente.

La crescita senza lo sviluppo è assimilabile a un accrescimento esponenziale. Per esplicitare questo concetto, potremmo riferirci a una città che si riempie di abitazioni. Più case richiedono una rete di infrastrutture sempre più importante che supporti questa stessa crescita: l'aggiunta di infrastrutture e nuove funzioni è lo sviluppo.

Per permettere un dialogo efficace tra sviluppo e crescita, si possono combinare moduli e componenti nidificati, ovvero installando più unità tra loro in ordine progressivo, accrescendo il grado di complessità (dal semplice al complesso). Mentre il sistema fisico cresce, quindi, diventa sempre più urgente progettare gerarchicamente un ordine di sottosistemi per aiutare

l'organizzazione. Questi sottosistemi potrebbero anche funzionare in gran parte da soli, ma sono collegati tra loro per generare qualcosa di più grande. La logica prevede una costruzione che parte quindi dal basso per muoversi verso l'alto, assemblando i componenti un'unità alla volta.

Durante la crescita o lo sviluppo, per evitare di sprecare materiale e risorse, le aggiunte vengono eseguite singolarmente. È come creare con una stampante 3D piuttosto che scolpendo una scultura nella pietra: entrambi daranno vita a una struttura tridimensionale, ma la stampante poserà uno strato di materiale alla volta e solo dove necessario; nell'intaglio, invece, il principio è la rimozione di materiale a partire da un blocco di risorse extra.

Costruendo dal basso verso l'alto, si realizzano le strutture o i sistemi di cui si necessita realmente. Quando la struttura o il sistema si ingrandiscono, si può aggiungere materiale a supporto.

Inoltre, il principio di integrazione di sviluppo e crescita segue il concetto essenziale di auto-organizzazione: fondamentalmente si devono stabilire le condizioni necessarie affinché i componenti possano interagire e muoversi all'interno di un sistema che si arricchisce. Infatti, i sistemi e le strutture si sviluppano in Natura non perché vi sia un piano progettuale generale predisposto a priori, ma perché esiste un semplice insieme di regole che informa i componenti del sistema rispetto a come essi possano interagire tra loro. Quindi i sistemi e le strutture emergono dall'insieme delle regole mentre gli elementi che ne fanno parte si organizzano intorno a queste.

3.2.1.7.5 Efficienza nell'utilizzo delle risorse (materia ed energia)

Il quinto dei *Life's Principles* esamina in una nuova ottica le risorse sfruttabili.

Ricordando l'importanza dell'uso abile e prudente di risorse e opportunità locali, è preferibile la progettazione di un design multi-funzionale idoneo a soddisfare molteplici esigenze contemporaneamente con un'unica soluzione elegante. In questo caso, la forma viene adattata alla funzione e il progetto prende vita dall'esigenza.

Nella progettazione, si prendono in considerazione principalmente processi a basso consumo energetico per ridurre al minimo l'impiego di energia in termini di temperatura, pressione e tempo di reazione e si conservano tutti i materiali all'interno di un circuito chiuso che guarda al riciclo dei prodotti.

In Natura infatti non esistono rifiuti. Al termine del processo, lo scarto deve essere riconvertito: prodotti, sistemi e materiali devono essere studiati per essere facilmente recuperati nel ciclo biologico o tecnologico dei nutrienti. Il modo in cui i prodotti vengono pensati è gravemente impattante quando la loro vita utile è al termine: la scelta dei giusti materiali deve essere

programmata in modo ben strutturato e pensato, ritenendo questa fase di uguale importanza rispetto alla realizzazione dell'intero progetto.

In altre parole, i progetti dovrebbero utilizzare la minor quantità di materiale ed energia possibile per soddisfare una specifica richiesta. Essere efficienti in termini di risorse implica un certo grado di attenzione nei confronti della disponibilità locale: spesso le risorse sono abbondanti solo in via stagionale o temporanea. L'efficienza si dimostra nel curarsi di sfruttare un dato materiale nel periodo in cui questo è più abbondante, evitando sprechi durante i periodi di scarsità e progettando preventivamente un loro eventuale riuso.

3.2.1.7.6 Transizione verso una chimica amica della vita

I ricercatori della biomimetica amano definire le reazioni chimiche in Natura come “amiche della vita” poiché, all'interno dei processi naturali, i meccanismi conducono al miglioramento dei sistemi viventi senza mai danneggiarli.

Per creare condizioni favorevoli alla vita sul nostro Pianeta, dobbiamo garantire che le reazioni chimiche generate dall'uomo siano idealmente incorporate nei cicli biologici e geologici. La selezione dei composti, delle strutture molecolari e dei reagenti chimici (così come i sottoprodotti), deve essere attenta ai danni che induce.

La maggior parte dei materiali in Natura sono composti da gradienti piuttosto che da mutamenti improvvisi. Solitamente cambiano lentamente, apportando minute modifiche incrementali alla densità, all'orientamento delle fibre o ad altre proprietà. La tendenza prevalente, in Natura, è una graduale transizione e la microstruttura complessa favorisce la multifunzionalità. La Natura è in grado essenzialmente di formare materiali dinamici multifunzionali, assemblando composti in modo specifico e preciso.

I prodotti dovrebbero essere scomposti in costituenti benigni. Non di rado, i composti sono tossici per gli organismi viventi e, a lungo termine, la tossicità è molto problematica. I materiali difficilmente scomponibili in composti non tossici e benigni nel tempo introducono tossine persistenti all'interno dell'ambiente. Perciò, anche se un prodotto è di per sé non tossico, lo studio non si può limitare a questo: dobbiamo analizzare la chimica dei sottoprodotti mentre interagiscono e si degradano nel tempo.

Riconoscendo gli elementi chimici che formano la vita ed escludendo invece quelli che raramente si trovano in Natura, possiamo configurare svariate eleganti soluzioni che, tra l'altro, possiedono migliori capacità energetiche, polari e di legame. Si parla dunque di materiali facilmente disponibili, abbondanti sul Pianeta e, nella maggior parte dei casi, non tossici. La selezione deve essere giudiziosa, ispirata totalmente alle strutture biologiche.

A tal proposito, l'acqua è l'elemento più significativo. Considerata il “*solvente universale*”, la vita sfrutta l'acqua come solvente per le reazioni che avvengono in soluzione.

3.3 Riepilogo

Consapevoli della sostenibilità e inclusività insita delle strutture biologiche e compresi i processi alla base di tale affermazione, la biomimetica sembra dunque essere la disciplina che più si avvicina a un design sostenibile per la formulazione, la generazione e la produzione della *forma* in architettura.

Se questo capitolo ha fornito un presupposto teorico a questa scienza, si rende ora necessario comprendere gli scenari possibili di un'eventuale traduzione dei processi e metodi sull'architettura.

Come si è già affermato, l'obiettivo della ricerca è legato intrinsecamente a ragioni ecologiche ed etiche ed è per questo motivo che, mentre la volontà ci conduce dal mondo dei modelli naturali a quelli artificiali, la trattazione vuole indagare più a fondo le analogie e le similitudini tra Natura e architettura, per delineare un quadro più ampio e coerente.



Figura 3.1: *Aristolochia clematitis* di Karl Blossfeldt (1928), stampato nel 1975 da Jürgen Wilde. La Natura ha raggiunto alti livelli di “personalizzazione ambientale” integrando molteplici criteri prestazionali. Questa condizione è particolarmente evidente nel regno vegetale dove le strutture fibrose sono fisicamente strutturate e organizzate spazialmente per combinare funzioni strutturali e ambientali. Da The Metropolitan Museum of Art, 2012, Karl Blossfeldt | *Aristolochia Clematitis*. [online] *The Metropolitan Museum of Art*. Disponibile su: <www.metmuseum.org/art/collection/search/261934> [Data di accesso: 5 maggio 2021].

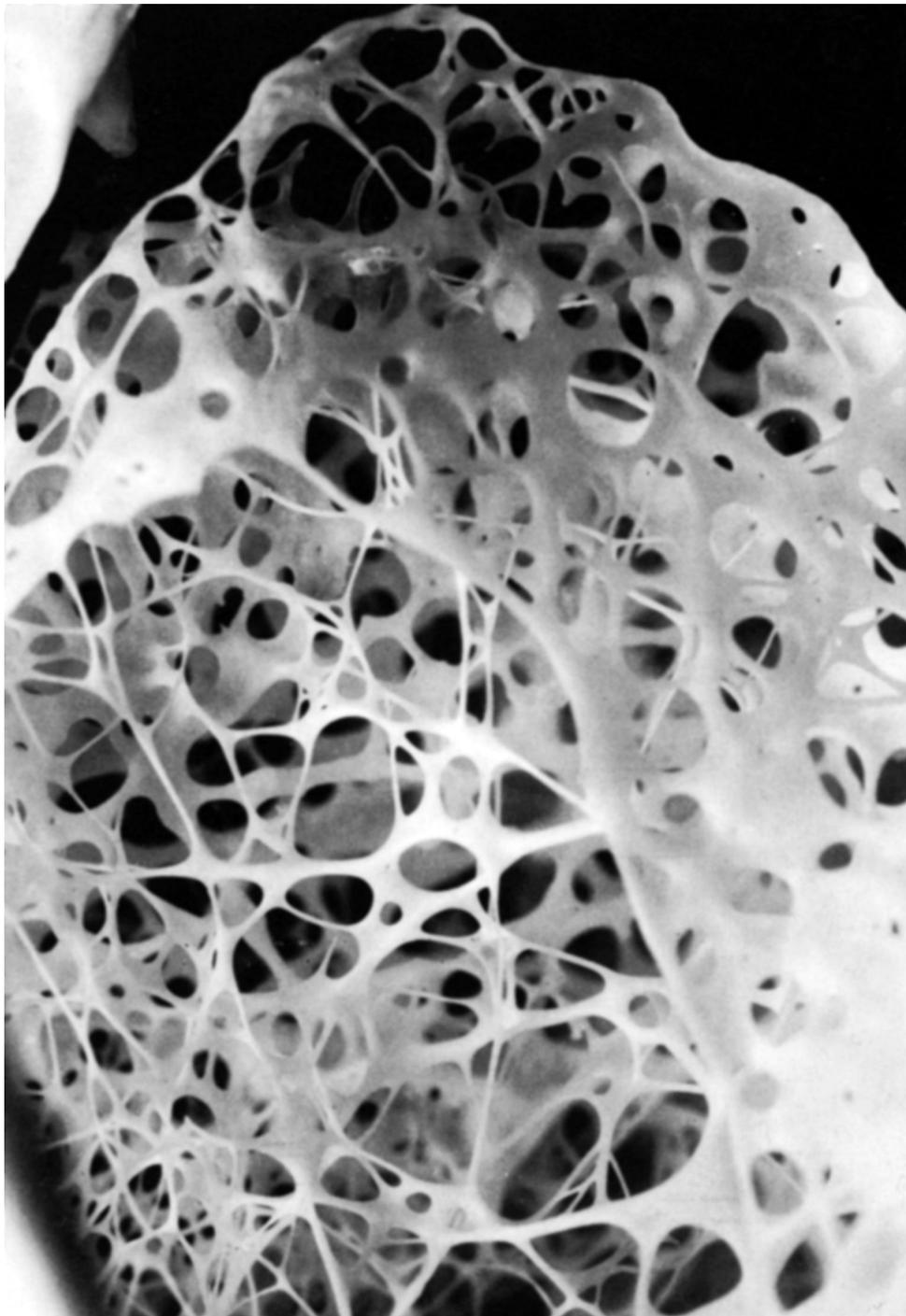


Figura 3.2: Immagine ravvicinata dell'osso spugnoso del femore umano (Oxman, 2010). Il processo di *rimodellamento osseo* è un naturale meccanismo di adattamento strutturale alle sollecitazioni esterne che avviene per rispondere in modo continuo alle reali necessità biomeccaniche. Da Oxman N., 2010, *Material-based Design Computation*. Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, Stati Uniti d'America. p. 58.

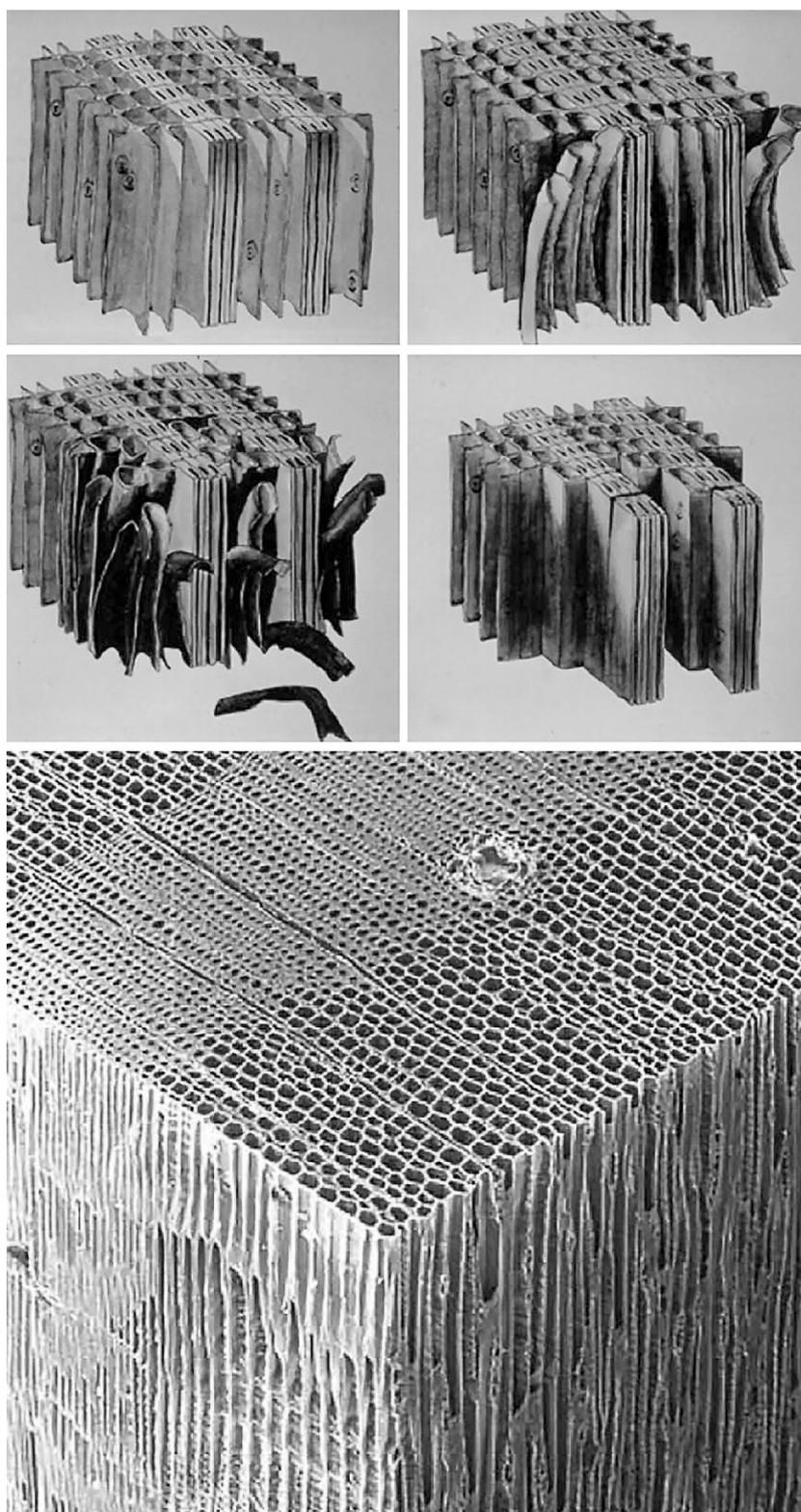


Figura 3.3: Immagini al microscopio elettronico a scansione del legno. La disposizione delle fibre conferisce al materiale proprietà anisotrope. Da Oxman N., 2011, Variable property rapid prototyping, *Virtual and Physical Prototyping*, 6(1), 3-31. [doi: 10.1080/17452759.2011.558588], p. 6.



Figura 3.4: Otto Neurath ha una conversazione con Alvar Aalto (al centro) e László Moholy-Nagy (a destra). Da Charitonidou M., 2020, László Moholy-Nagy and Alvar Aalto's Biocentric Vision of Design and their Admiration for Invisible Structures: "Elastic" Standardization as Biosemiotics. *CARTHA II 2020/2012*, p. 1.

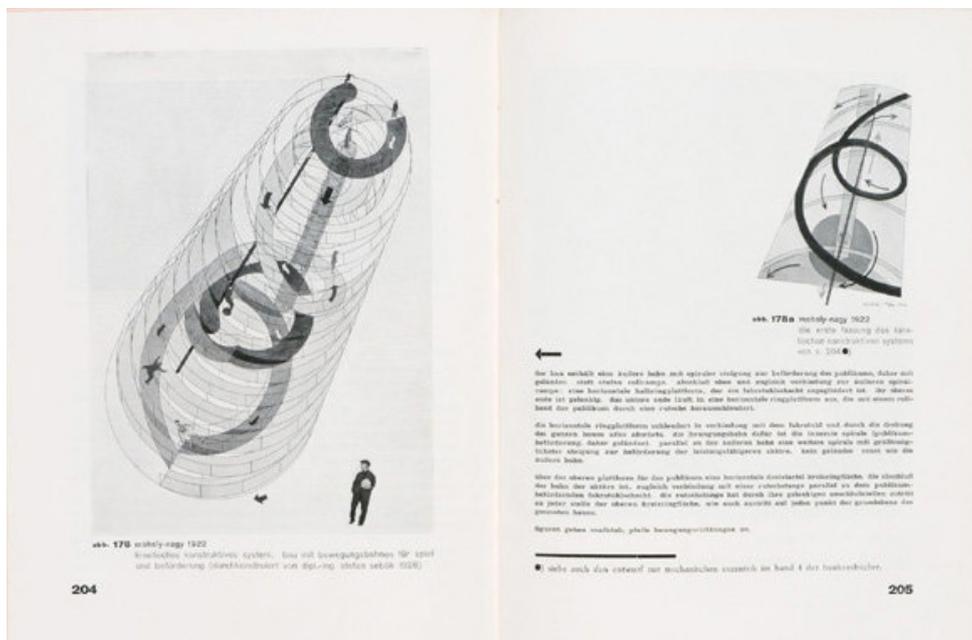


Figura 3.5: Sistema dinamico-costruttivo pubblicato in Moholy-Nagy L., 1929, *Von Material zu Architektur*, pp. 204-205. Da Charitonidou M., 2020, László Moholy-Nagy and Alvar Aalto's Biocentric Vision of Design and their Admiration for Invisible Structures: "Elastic" Standardization as Biosemiotics. *CARTHA II 2020/2012*, p. 2.

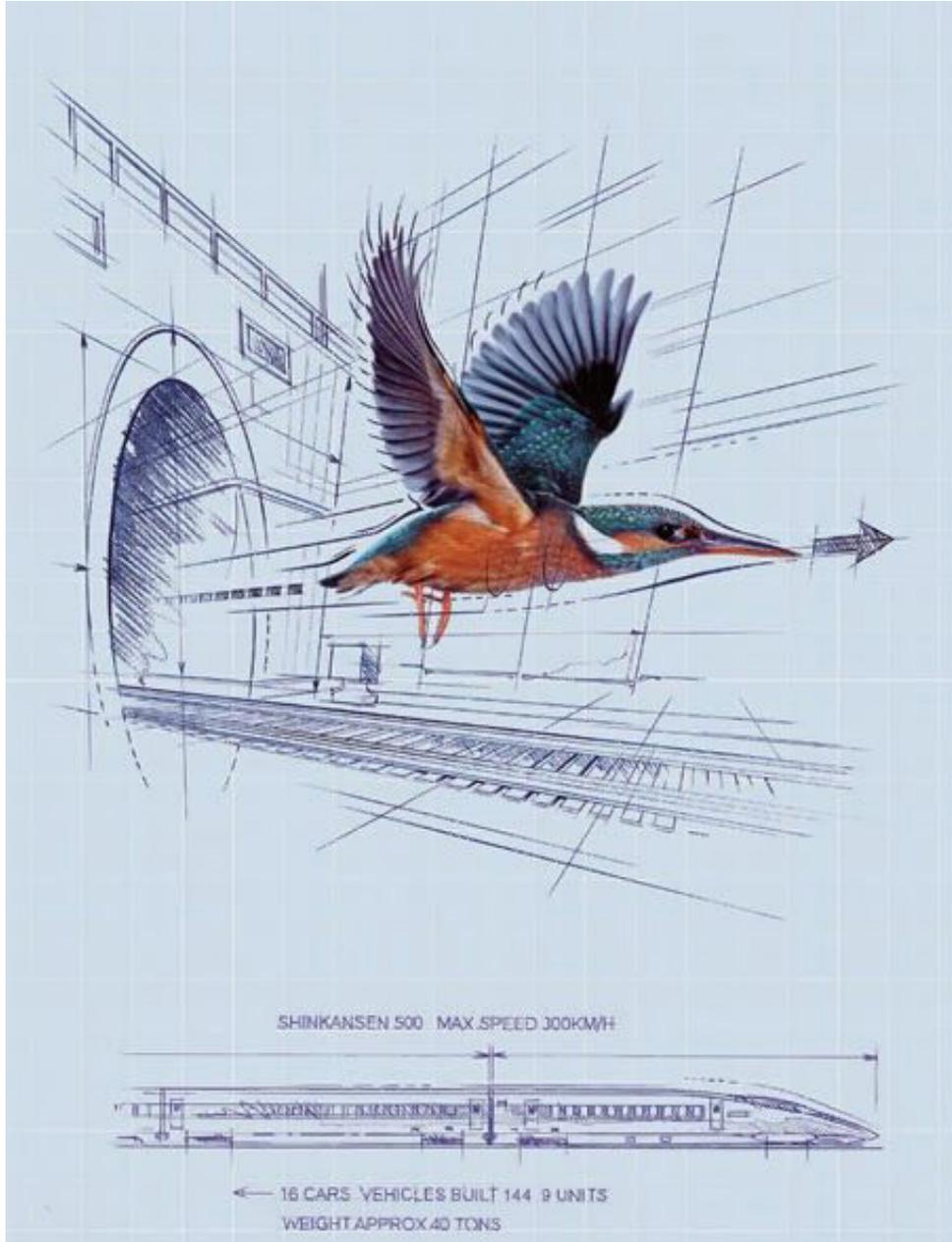


Figura 3.6: Schema progettuale del treno giapponese *Shinkansen*. La forma è ispirata al becco del martin pescatore. Da Biomimetic Summit, 2013. Summit Programme. *Biomimetic Programme*. [online] Disponibile su: <biomimeticssummit.wordpress.com/summit-programme/> [Data di accesso: 21 agosto 2021].

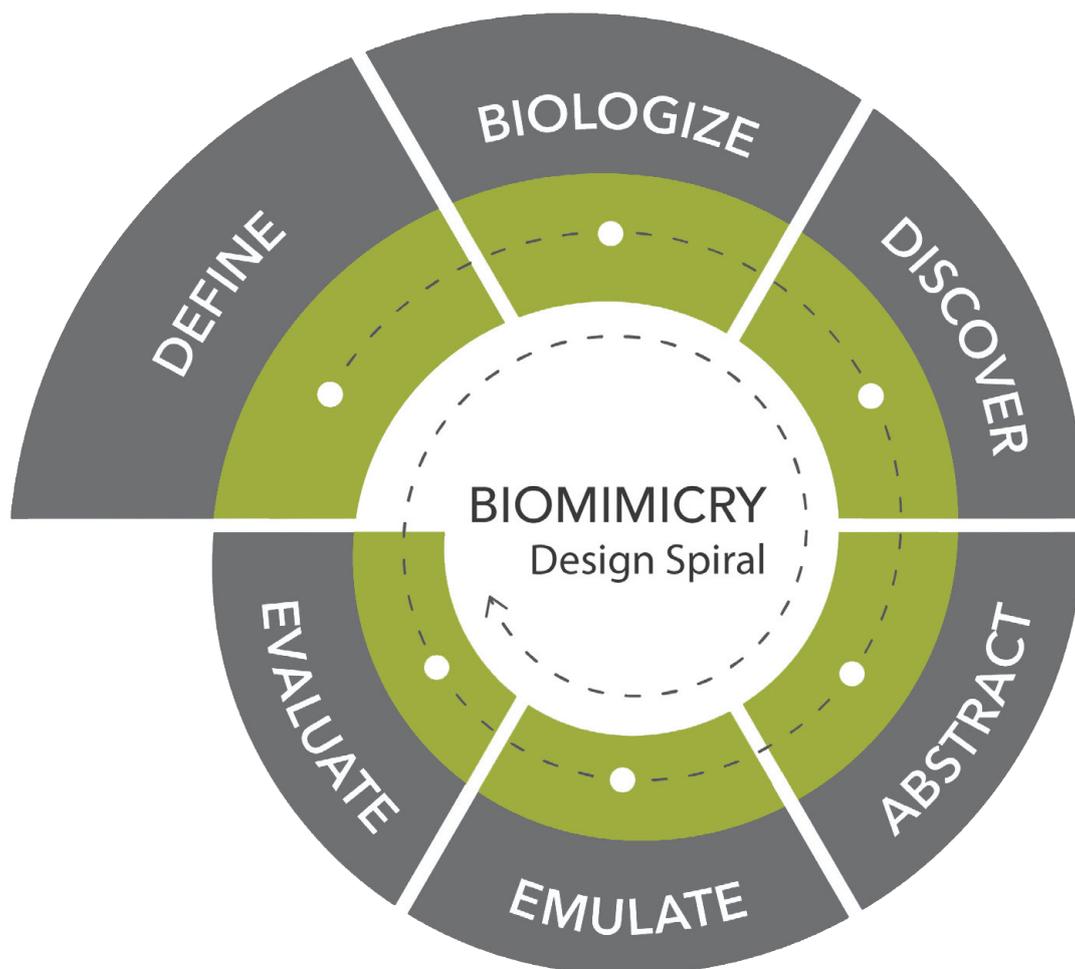


Figura 3.7: Schema sintetico della *Biomimicry Design Spiral*. Da Biomimicry Toolbox, 2017, Biomimicry Design Spiral. [online] *Biomimicry Toolbox*. Disponibile su: <toolbox.biomimicry.org/wp-content/uploads/2017/10/Design.Spiral-Diagram_10.17.pdf> [Data di accesso: 21 agosto 2021].

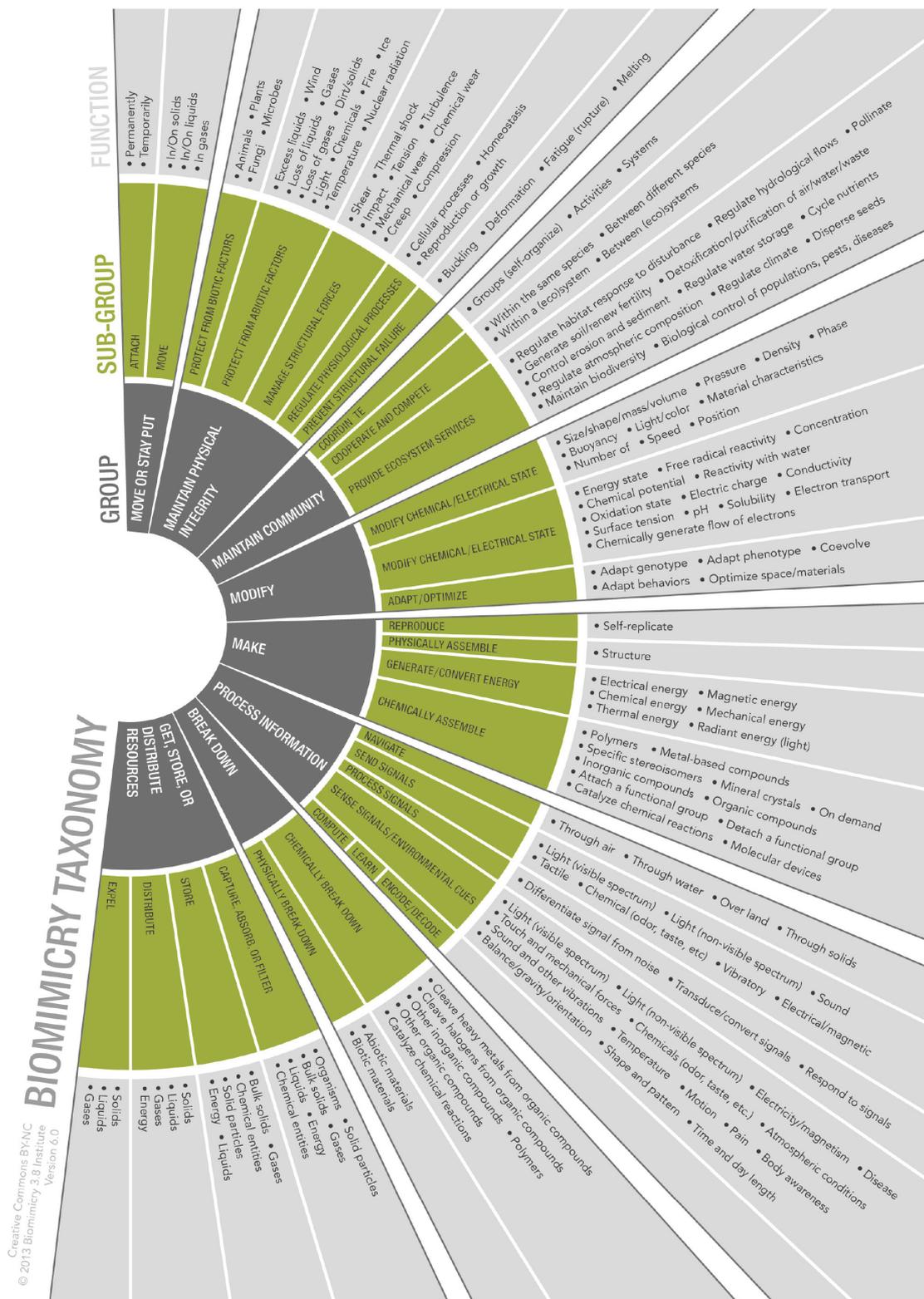


Figura 3.8: Tabella di sintesi della tassonomia biomimetica di Janine Benyus (Biomimicry Toolbox, 2015). Da Biomimicry Toolbox, 2015, Function and Strategy. [online] *Biomimicry Toolbox*. Disponibile su: <toolbox.biomimicry.org/core-concepts/function-and-strategy/> [Data di accesso: 21 agosto 2021].



Figura 3.9: Schema sintetico delle *Life's Principles*. Da Biomimicry 3.8., 2020, DesignLens: Life's Principles. [online] *Biomimicry 3.8*. Disponibile su: <biomimicry.net/the-buzz/resources/designlens-lifes-principles/> [Data di accesso: 21 agosto 2021].

LA PROMESSA BIOLOGICA

Approccio biomimetico in un'ottica ecologica ed etica

“Non c'è realtà permanente ad eccezione della realtà del cambiamento; la permanenza è un'illusione dei sensi.”
– **Eraclito di Efeso**

4.1 Il viaggio di Moi

Durante un caldissimo pomeriggio di sole del 2017, Moi, leader indiano Huaorani, si è recato negli Stati Uniti. Percorreva le strade di Washington D.C. come se si aggirasse in una foresta, con passi lenti e regolari, gli occhi rivolti all'asfalto e le ginocchia piegate. Un passo che descriveva l'abitudine di quest'uomo a percorrere terreni scivolosi.

Indossava indumenti visibilmente nuovi: pantaloni color cachi scuro, una camicia bianca inamidata, una cravatta a righe blu e grigie e scarpe di pelle marroni. A parte gli zigomi insolitamente alti e il taglio leonino dei folti capelli neri dritti sugli occhi e che gli penzolavano per metà schiena e spalle, sembrava un tipico turista, ma con un viaggio unico.

Il suo viaggio era iniziato nel profondo dell'Amazzonia ecuadoriana (in un'area piccola ma pericolosa abitata da cacciatori e raccoglitori semi-nomadi isolati) ed era durato due interminabili settimane fino all'arrivo a Washington tramite canoa, autobus, treni, aerei e lunghe camminate. Da casa si era portato il passaporto, lo spazzolino da denti, una corona di piume d'uccello e una lettera. Moi aveva scritto tre volte, nel suo taccuino da dieci centesimi, la lettera indirizzata al Presidente degli Stati Uniti. All'interno, gli chiedeva di visitare gli Huaorani e di spiegare al popolo perché gli Stati Uniti d'America cercavano di distruggerli.

Infatti, negli ultimi vent'anni, lo sviluppo petrolifero americano in Oriente procedeva

praticamente senza regolamentazione. Con un'autorità morale enorme, era stata lanciata una petizione e Moi proponeva una testimonianza e una richiesta di intervento alla Commissione interamericana sui diritti umani. La sua battaglia (e quella di tutta l'Amazzonia ecuadoriana) finirono in prima pagina e un uomo a torso nudo, con indosso denti di giaguaro e piume di gufo, era diventato simbolo e copertina di tempi straordinari (Figura 4.1).

Secondo Janine Benyus l'*Homo Industrialialis*, dopo aver oltrepassato i limiti della Natura, sta finalmente percependo «*la sua ombra*» sul pianeta, consapevole dell'essenzialità di trovare un altro modo di vivere, più sano, sostenibile ed etico (Figura 4.2) (Benyus, 2020).

Da questa necessità si è spinta alla ricerca delle specie che hanno vissuto sulla Terra molto più a lungo degli umani. Gli altri abitanti del Pianeta hanno infatti pazientemente perfezionato le loro tecniche ben prima di noi, con meccanismi che non consumano combustibili fossili, non inquinano e funzionano efficientemente.

4.2 Caratteristiche di un sistema alternativo

Per il settore delle costruzioni adottare un processo progettuale che imita le strategie biologiche può rappresentare un valido contributo alla realizzazione di progetti coesi e sostenibili con il contesto oltreché con materiali innovativi ed efficienti, in linea con gli obiettivi del New European Bauhaus. Si tratta dunque di un significativo avvicinamento a una progettazione ecosistemica, elaborata a partire da una logica connessa all'ambiente e vicina a temi ecologici.

Dopo aver esplorato alcuni concetti propri del mondo biologico e averli trasposti all'interno di un contesto più ampio, il capitolo descrive l'efficacia e il potenziale della biomimetica per affrontare il cambiamento climatico con soluzioni sostenibili, etiche e inclusive.

4.2.1 Il ciclo di vita

Il concetto di ciclo di vita degli organismi può indubbiamente essere paragonato a quello dei manufatti edilizi o a qualsiasi oggetto di produzione artificiale. È intuitivo ed evidente che le similitudini concettuali non possano però oscurare le differenze significative relative al grado di complessità che i due cicli prevedono: se gli edifici presentano un percorso relativamente lineare, gli organismi invece possiedono connessioni varie e vaste, le cui minute variazioni di percorso comportano gravi ripercussioni sull'equilibrio di un intero ecosistema.

Questa differenza andrebbe forse attribuita alla negligenza dell'uomo sull'effetto e sulle conseguenze delle sue azioni sull'ambiente. La capacità di controllare un progetto complesso, comprensivo di variabili e fattori ecologici e ambientali oltreché materiali, può essere un

importante strumento decisionale nel guidare e valutare eventuali ricadute sul contesto, favorendo solidi e duraturi benefici e limitando invece conseguenze negative.

A questo proposito, William McDonough e Michael Braungart propongono un ciclo *Cradle to Cradle* (C2C, in italiano *Dalla culla alla culla*), un approccio alla progettazione che adatta i sistemi industriali alla Natura, convertendo drasticamente i processi produttivi assimilando i materiali agli elementi naturali, obbligati, in quest'ottica, a essere rigenerativi (Figura 4.3).

L'appellativo risulta una provocante opposizione al paradigma *Cradle to Grave* (*Dalla culla alla tomba*), ovvero tutti quei cicli di vita che includono metodi di analisi (*Life Cycle Assessment*, LCA) di prodotti, beni e servizi che prevedono un percorso che termina con la generazione di un rifiuto. In questo caso, il prodotto di scarto, ovvero il bene o il servizio che ha esaurito la sua vita utile, viene trattato, stoccato e, solo eventualmente, riciclato.

La logica *Cradle to Cradle* invece presuppone, antecedente alla fase di progettazione, analisi e riflessioni relative alla fase finale: respingendo il ricorso standardizzato a metodi LCA, gli sforzi si concentrano a eliminare o ridurre l'ultima tappa della vita dei prodotti e beni.

Alla base della ricerca *Cradle to Cradle* vince il principio olistico di preservazione e valorizzazione industriale di ecosistemi e cicli biologici naturali: i sistemi non devono solo essere efficienti, ma essenzialmente compatibili con l'ambiente.

Negli ecosistemi naturali non esistono rifiuti infatti: quelli che per un organismo sono scarti possono invece essere considerati come una risorsa per un altro. Il *Nutrient Cycle* (o *Ecological Recycling*) rappresenta una delle forme più importanti di riciclaggio nei sistemi viventi che, dopo millenni di evoluzione, dimostrano chiaramente l'efficacia delle strategie sviluppate.

Si può affermare che l'utilizzo di reciproci residui o sottoprodotti (tra cui energia, acqua e materiali) sia un concetto consolidato in Natura. La simbiosi tra due o più organismi che si impegnano in una relazione reciprocamente vantaggiosa a beneficio di tutti i soggetti coinvolti è strettamente necessaria in Natura per il corretto e prospero funzionamento degli ecosistemi (Siani, n.d.).

Quindi, a differenza dei tipici approcci *top-down* che caratterizzano i sistemi creati dall'uomo e propongono la circoscrizione di un problema, gli approcci *bottom-up* emblematici della Natura impostano e affrontano le difficoltà in un modo alternativo: l'abbondanza di un determinato elemento diventa interessante per altri organismi che si adattano per sfruttarlo.

Il ciclo di McDonough e Braungart risulta una sintesi dei processi biologici in un sistema aperto, sempre più connesso con l'esterno. Oggi, con gli strumenti informatici di cui disponiamo, possiamo ambire ad aumentare gradualmente il numero di parametri progettuali, emulando l'ecosistema in un contesto flessibile e adattabile, dalla scala territoriale a quella del singolo

componente.

4.2.2 Il concetto di resilienza

In ecologia e biologia la resilienza è la capacità di un materiale di autoripararsi dopo un danno oppure la capacità di una comunità (o sistema ecologico) di ritornare al suo stato iniziale dopo essere stata sottoposta a una perturbazione che l'ha allontanata da quello stato.

In architettura può essere descritta come una condizione trasversale a diversi ambiti e scale del progetto che esprime la capacità dei sistemi (territoriali, urbani o edilizi) di assorbire i cambiamenti reagendo e adattandosi proattivamente al mutamento (Lucarelli *et al.*, 2018).

L'attualità del concetto rimanda alla sensibilizzazione e constatazione socialmente condivisa di un'acuta e dilagante fragilità delle condizioni di funzionamento dei sistemi antropici ed ecosistemici. Le rinnovate sfide ambientali (cambiamenti climatici, rischio idrogeologico, transizione energetica), sociali ed economiche (aumento della popolazione, urbanesimo e migrazione, accessibilità e inclusione sociale) pongono al centro l'innovazione tecnologica del processo e del prodotto a tutte le scale del progetto (Lucarelli *et al.*, 2018).

Così come nella visione evuzionista la capacità di adattamento alle mutazioni dell'ambiente per un organismo è condizione di sopravvivenza, in architettura (o, più specificatamente, in ambito tecnologico) la capacità di cambiare stato, la sua flessibilità, rappresenta una caratteristica del sistema che ne permette le trasformazioni adattive, incrementandone le qualità prestazionali (Lucarelli *et al.*, 2018).

L'ambiente costruito possiede un'intrinseca capacità di adattamento materiale e immateriale poiché ogni generazione vi riconosce connotati di patrimonio che, più o meno implicitamente, impongono conservazione e trasmissione futura; specialmente nelle zone mediterranee, dove la sedimentazione e la stratificazione rappresenta l'essenza di un luogo, il patrimonio architettonico rispecchia ininterrotti processi di adattamento che evidenziano la dinamicità impattante di azioni rivolte alla conservazione, come una sorta di palinsesto chiaramente volto al mantenimento dell'identità.

Per comprendere con razionalità e consapevolezza le questioni legate alla sfida ambientale causata dagli inarrestabili processi di depauperizzazione delle risorse e dal crescente insorgere di situazioni emergenziali, è necessario il riallineamento delle azioni che intervengono nella trasformazione dell'ambiente antropizzato: a tal proposito, il concetto di resilienza, che apre importanti prospettive disciplinari nella cultura tecnologica e ambientale, presuppone l'abbandono del concetto di causalità lineare per considerare i problemi dell'ambiente in un quadro complessivo e articolato (Lucarelli *et al.*, 2018).

La *governance* ambientale può essere esercitata attraverso l'utilizzo di modelli gestionali, decisionali e progettuali volti all'esaltazione, alla riconversione e alla riqualificazione dei sistemi ecologicamente rilevanti, per la riduzione dei consumi e per la valorizzazione delle risorse culturali, sociali, ambientali, per la responsabilità delle risorse, degli impatti, della qualità ecosistemica, del benessere, del comfort e dell'efficienza.

In altre parole, la pratica resiliente opera con un approccio olistico che comprende la complessità di un sistema in costante cambiamento e lo descrive per ricondurlo a una condizione dinamica, le cui variabili derivano dalla specificità del contesto, dalla tipologia di evento avverso, dalla dimensione temporale in cui si realizza e dalla scala di osservazione (Lucarelli *et al.*, 2018).

Dunque fondamentalmente vi è la convinzione che uomo e Natura vivano in simbiosi, interconnessi e integrati reciprocamente; è richiesta quindi una profonda comprensione di come interagiscono, si adattano e si influenzano.

La resilienza negli organismi naturali è un principio conquistato nel tempo e trasferire questa capacità alle creazioni dell'uomo non è certamente immediato. Un'architettura che imita i processi naturali secondo un approccio resiliente risulta adattabile perché flessibile e soggetta a modificazioni in riferimento al contesto, al clima o a fattori culturali.

Operativamente, un progetto resiliente individua principalmente due tipologie di azioni: una rivolta alla riduzione della sensibilità dei contesti antropizzati, un'altra allo sviluppo di sperimentazioni tecnologiche per implementare opportunità di mitigazione ai fenomeni connessi al cambiamento climatico. Nel primo caso è interessante ipotizzare soluzioni adattive per lo spazio agendo su forme, qualità delle componenti, usi e caratteri immateriali che concorrono all'efficienza prestazionale, mentre nel secondo caso l'attenzione è rivolta alla riduzione del prelievo delle risorse e delle emissioni (Lucarelli *et al.*, 2018).

4.2.3 Crescita, sviluppo e decrescita

La crescita è un processo essenziale nello sviluppo di ogni essere vivente, vegetale o animale; gli organismi sono soggetti a questo fenomeno dalla nascita poiché fondamentale ed essenziale per raggiungere dimensioni e forme consone alla sopravvivenza degli stessi.

Sviluppo e crescita, indissolubilmente legati e relazionati tra loro, sono termini propri della biologia, ma abbiamo imparato a utilizzarli in senso metaforico, appropriandocene per riferirci ai sistemi culturali di nostra invenzione con riferimento diretto alle fasi degli organismi viventi.

Dalla Rivoluzione Industriale, il mondo occidentale vive un periodo di crescita ineguagliabile e, con tali presupposti, l'uomo vi ha basato proiezioni e programmazioni nei settori economici e produttivi. Mentre risulta evidente che il pianeta non possa sostenere un'esponenziale crescita

infinita, l'attenzione dell'opinione pubblica è rivolta a valutare la crescita (o la variazione) dei valori a rilevanza economica, base per l'adozione di eventuali politiche finanziarie o comportamentali delle imprese. Sembra che momentaneamente ci appaia più semplice estremizzare questo stesso modello, rimasto vantaggioso per decenni, piuttosto che convertirlo con uno nuovo e più adeguato al contesto storico.

Promuovere uno sviluppo sostenibile in architettura con sguardo attento simultaneamente ad ambiente, economia e società, significa incoraggiare e stimolare un progressivo contenimento e controllo dei danni derivati da una crescita selvaggia e irrisuolosa degli equilibri ambientali, economici e sociali. Chiaramente un simile approccio considera i limiti delle risorse disponibili sul Pianeta, siano esse materie prime o beni ambientali, riconoscendo che uno sfruttamento non regolato non può non minacciare la sopravvivenza futura delle specie che popolano la Terra.

Dunque, a partire dal concetto di crescita si sviluppa una corrente di pensiero che intreccia politica, economia e società, favorevole e promotrice di una riduzione controllata, selettiva e volontaria della produzione economica oltretutto dei consumi. L'obiettivo finale del concetto di *decrescita*, base di questa teoria, è un profondo equilibrio ecologico tra uomo e Natura: in altre parole, viene incentivato un progresso sostenibile fondato su indici di sviluppo e di equità.

Dalla necessità e urgenza di un cambio paradigmatico e di un'inversione tendenziale rispetto al consolidato modello di crescita di produzione e consumo, Serge Latouche, uno dei principali promotori della corrente, ritiene che si debba immaginare un nuovo tipo di economia e di società, mettendo in discussione le principali istituzioni socioeconomiche (Siani, n.d.). Concependo un nuovo modello compatibile con l'ambiente e favorendo un rapporto armonico tra uomo e Natura, ritiene possibile restituire un avvenire alle generazioni future altrimenti non più possibile.

La concezione di *decrescita* affonda le radici nel pensiero di importanti autori come Ruskin, Thoreau e Tolstoj, ma il termine compare per la prima volta solo nel 1972 con André Gorz. Sul tema sono nati un complesso di approcci sostenuti da movimenti culturali alternativi (*anticonsumisti*, *anticapitalisti* ed *ecologisti*), le cui idee intendono necessariamente proporre nuovi modelli che superano concezioni e principi di consumismo e illimitata crescita economica. Le proposte sono state sviluppate a due livelli: individuale, con la scelta di un diverso stile di vita (la *semplicità volontaria*); e globale, con la ricollocazione delle attività produttive per ridurre l'impronta ecologica, lo spreco, l'impatto ambientale e le disuguaglianze sociali.

Non esente da forti critiche, la concezione di *decrescita* ci permette comunque di supportare un presupposto generale della teoria. Interessante è infatti il contrasto con il senso comune che identifica la crescita del Prodotto Interno Lordo (PIL) con l'aumento della qualità della vita: come ci ricorda l'iniziativa della Commissione europea (il New European Bauhaus), il miglioramento non può essere certamente ottenuto con l'incremento del consumo, ma piuttosto con lo sviluppo del benessere dei rapporti sociali, dei servizi collettivi e della qualità ambientale.

Come si cercherà di dimostrare in seguito, in ambito architettonico la progettazione informatizzata e la Fabbricazione Digitale offrono i presupposti di un innovativo modello produttivo in un momento storico in cui la maggior parte degli squilibri ambientali, economici e sociali sono causati da un'esasperazione del sistema produttivo industriale (Siani, n.d.).

4.2.4 Ottimizzazione e personalizzazione

Come si dimostrerà solo più tardi in modo puntuale, anche l'ottimizzazione e la personalizzazione avvicinano l'architettura, l'ingegneria e la scienza dei materiali alla biologia. In Natura vi è un'intima relazione tra materiale, struttura e forma: il materiale è distribuito in modo eterogeneo per adattarsi alle sue prestazioni strutturali e/o ambientali e, tale eterogeneità strutturale è resa possibile proprio dall'integrazione tra forma, struttura e materiale. In termini ecologici questo principio rappresenta un enorme potenziale: ottimizzare un materiale significa utilizzare una minor quantità per assolvere alle medesime prestazioni.

Rispetto alla Natura, le nostre strategie sembrano comunque essere ancora molto meno efficaci e generalmente abbastanza dispendiose, ma grazie ai progressi dell'ingegneria e dell'architettura la cultura del design sembra pronta per una trasformazione.

Oggi i progettisti dispongono del potenziale per far avanzare le strategie della Natura nella strutturazione della materia progettando materiali multifunzionali sintetici competitivi e adattivi.

Imitando il mondo della Natura, si deduce che i materiali debbano essere progettati per funzioni altamente personalizzate piuttosto che per essere semplicemente selezionati e assegnati a forme pre-concettuali (Oxman, 2010). Questo richiede una vera trasformazione del processo e dell'uso della materia in architettura, dalla cultura della selezione a una del design e della generazione della stessa.

4.3 Riepilogo

La traduzione di termini propri dei sistemi naturali all'interno di campi concettualmente differenti ha reso possibile la dimostrazione del potenziale associativo di un approccio biomimetico all'architettura.

Per avvalorare la tesi, il capitolo successivo esporrà alcuni interessanti casi studio di applicazione biomimetica al settore delle costruzioni, volgendo lo sguardo verso materiali, prodotti e sistemi altamente sostenibili e palesando la volontà espressa sin dagli esordi della ricerca.



Moi, photographed by Richard Avedon in New York City, October 6, 1993

Figura 4.1: *Moi goes to Washington*, *The New Yorker*, 2 maggio 1994, pag. 74. Da Kane, J. e Avedon, R., 1994, *Moi goes to Washington*. *The New Yorker*. [online] Disponibile su: <www.newyorker.com/magazine/1994/05/02/moi-goes-to-washington> [Data di accesso: 4 maggio 2021].



Figura 4.2: Sciamano *Yanomami* dialoga con gli spiriti prima della salita al monte Pico da Neblina, Stato di Amazonas, Brasile, 2014; fotografia di Sebastião Salgado. Il fotografo ha viaggiato per sei anni nell'Amazzonia brasiliana, fotografando foreste, fiumi, montagne e abitanti. La mostra al MAXXI (Roma), dal titolo *Amazônia*, ha messo in evidenza la fragilità di questo ecosistema e invita a vedere, ad ascoltare e a riflettere sulla situazione ecologica e la relazione che gli uomini hanno con la Natura (Salgado, 2021). Da Museo Nazionale delle Arti del XX secolo, 2021. Sebastião Salgado. *MAXXI*. [online] Disponibile su: <www.maxxi.art/events/sebastiao-salgado/> [Data di accesso: 4 maggio 2021].

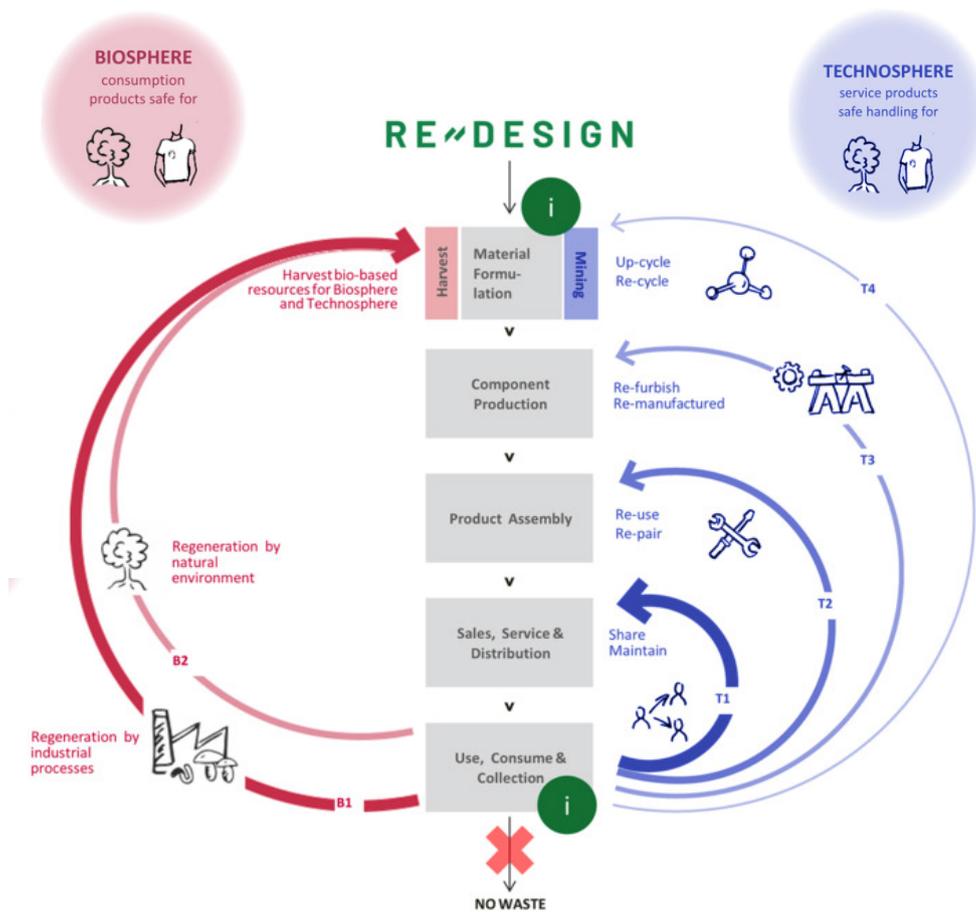


Figura 4.3: Schema di funzionamento del ciclo *Cradle to Cradle* di William McDonough e Michael Braungart. Da EPEA - Part of Drees & Sommer, 2016. *Cradle to Cradle*. EPEA. [online] Disponibile su: <epea.com/en/about-us/cradle-to-cradle> [Data di accesso: 8 maggio 2021].

ARTIFICIO NATURALE

Esperimenti basati sull'imitazione della Natura

“A set is a Many that allows itself to be thought of as a One.”
– Georg Cantor

5.1 Verso un design naturale

La disciplina biomimetica esprime il suo potenziale in numerosi ambiti progettuali che vanno dalla formulazione di nuovi materiali allo sviluppo di moderne relazioni prestazionali con l'ambiente. Si ritiene che le implicazioni progettuali possibili derivanti dallo studio dei processi naturali possano essere significative dal punto di vista dell'architettura, dell'ingegneria e del design nell'ottica di restituire artefatti capaci di includere valori ambientali e sociali altamente positivi.

Pur limitandosi a un intervento con approccio tradizionale alla composizione architettonica, anche il solo uso di materiali avanzati e prodotti derivanti dallo sviluppo biomimetico rappresentano un'opportunità interessante per la qualità del manufatto, sia esso di nuova costruzione sia per un'azione sull'esistente. Senza dunque modificare gravemente l'intero processo progettuale, materiali e prodotti costituiscono un campionario significativo da cui ogni architetto può attingere per la progettazione.

Ovviamente un ulteriore contributo dinamico e più completo alla progettazione lo offrono diverse tecniche biomimetiche, impiegabili dall'architetto per risolvere qualunque tipo di sfida compositiva in modo nuovo e imprevedibile. L'impiego consapevole di specifici sistemi strutturali propri della biologia possono collaborare ad arricchire l'architettura anche in termini processuali.

Dal punto di vista tecnico, le strutture architettoniche sono quelle che, finora, si sono maggiormente ispirate al modello naturale. Staticamente, infatti, le strategie biologiche risultano estremamente efficienti e di facile reinterpretazione nel contesto architettonico (Siani, n.d.). È però importante inglobare, all'interno delle logiche compositive per l'architettura, altri campi di applicazione, come quello termodinamico, illuminotecnico, funzionale ed estetico.

Gli esempi proposti in seguito non costituiscono una visione realmente esaustiva di tutte le alternative possibili ispirate alla biologia, ma piuttosto attribuiscono un significato specifico ai diversi approcci per avere una lettura sintetica dei percorsi affrontati dalla ricerca in quest'ambito.

L'orientamento di questo capitolo cerca di aprire lo sguardo verso una progettazione sostenibile, senza dimenticare l'illimitata possibilità che un nuovo approccio potrebbe avere in svariati altri settori. Secondo quanto affermato finora, è indubbio che i progetti ritenuti più rilevanti siano quelli riferibili a una progettazione completa e integrale, ovvero che sfrutta tecniche sperimentali che comprendono le potenzialità di questo approccio e che rappresentano anche il primo passo verso un'architettura in equilibrio con l'ambiente e fondata su principi ecologici ed etici.

Per raccontare esperimenti e casi studio, ci si avvale di strumenti divulgativi online come *AskNature.org* che, di fatto, costituiscono un'opportunità d'espressione essenziale nell'imitazione della Natura. Come si è affermato in precedenza, infatti, *AskNature.org* offre una fresca visione imprenditoriale per un design innovativo e per la ricerca di soluzioni efficienti per la quotidianità, risvegliando, nella coscienza dell'uomo, la necessità di conservare la biodiversità.

La Natura concepita come *modello, misura e tutor* nella costruzione di idee eleganti oltreché strutture, forme, processi, sistemi e strategie pratiche, è un prezioso ausilio per raggiungere questo fine ed è infatti il riferimento principale nella stesura del presente capitolo. Il team esperto di ricercatori scientifici ha realizzato per *AskNature.org* una raccolta di informazioni e risorse interessanti, utilizzando linguaggio e immagini immediate e semplici che rivelano l'adattamento degli organismi viventi per consentire ad architetti, designer e ingegneri di tradurle in progetti.

Mentre dunque la tesi si sposta dal mondo dei processi naturali a quello dei processi artificiali, nuove *forme* e strategie di progettazione prendono vita, confermando il ruolo della Natura come fonte rivelatrice di ispirazione.

Attraverso la discussione dell'intreccio delle diverse discipline che appoggiano la teoria su cui verte l'intera tesi, si scoprono nuove tecniche, materiali e prodotti ispirati alla Natura, dimostrando che il mondo dell'architettura sta iniziando a risolvere le grandi sfide irrisolte dei nostri giorni sulla strada di un design sempre più naturale.

5.2 Materiali

È importante sottolineare che, nonostante i progressi epocali nella scienza dei materiali, ingegneria e costruzione, il materiale è considerato ancora solo secondario alla *forma* in architettura.

E inoltre, la maggior parte della letteratura nella progettazione architettonica si è concentrata su questioni relative alla selezione dei materiali piuttosto che alla generazione degli stessi. Di conseguenza, i materiali sono tradizionalmente predefiniti e classificati come una biblioteca di proprietà nel processo di materializzazione del progetto. Questa condizione è stata amplificata poi dall'industria delle costruzioni che ha esacerbato la tendenza del progettista a materializzare la *forma* accedendo liberamente ai materiali come una risorsa di potenziale aperto ed eclettico.

Ma la funzione dei materiali all'interno dei processi di progettazione naturali è essenziale e, recentemente, ha acquisito un'autonomia e una rilevanza primaria anche in architettura.

Di seguito vengono illustrati esempi che possano fornire un percorso alternativo relativo soprattutto alla generazione dei materiali da costruzione, in base alla quale l'interazione tra le proprietà, le caratteristiche e l'ambiente è (naturalmente) prioritaria e quindi può precedere e propagare la *forma* risultante.

5.2.1 Caso studio 1: calcestruzzo ad alte prestazioni ispirato agli habitat marini

Nel corso della storia, le popolazioni hanno sviluppato la tendenza a insediarsi vicino alla costa per il commercio e la pesca. Lo sviluppo costiero accelerato¹ ha costretto gli ecosistemi naturali ad affrontare un grave stress. Queste aree naturalmente dinamiche sono infatti colpite frequentemente da fenomeni come tempeste ed erosioni; in combinazione con le crescenti minacce di innalzamento del livello delle acque e di aumento di eventi meteorologici estremi, le coste richiedono opere di manutenzione intensiva.

L'uomo, per proteggersi dai pericoli costieri, ha costruito ogni genere di difesa, spesso aggressiva per l'ambiente. In particolare, l'impiego del cemento garantisce la costruzione di strutture resistenti alle condizioni costiere, ma non è certamente adatto a preservare la biodiversità marina. D'altra parte, la salvaguardia degli ecosistemi marini è essenziale poiché questi contribuiscono a ridurre problemi per l'uomo come l'erosione costiera e le inondazioni.

Studiando gli habitat marini, il team di EConcrete® ha formulato soluzioni eco-ingegnerizzate per proteggere le coste, rispettando sia la vita umana che quella marina (Figura 5.1). EConcrete®, infatti, oltre a offrire soluzioni concrete, innovative e rispettose dell'ambiente, incoraggia lo sviluppo di una vita marina ricca e diversificata come parte integrante nella realizzazione delle

¹ Oggi più del 50% della popolazione si concentra in aree costiere.

infrastrutture.

La tecnologia si basa su tre elementi fondamentali: composizioni di calcestruzzo bio-miglioranti, trame superficiali complesse e design basato sul rapporto sinergico tra ecologia e struttura. Traendo ispirazione da habitat e organismi marini, ECOcrete® imita forme, pattern e proprietà chimiche di formazioni rocciose, scogliere, pozze di marea e altre forme di vita che popolano il mare. La tecnologia supporta processi naturali come la calcificazione e la crescita di ostriche, coralli e creature simili.

Infatti, queste strutture in calcestruzzo non solo si sono rivelate molto meno tossiche per l'ambiente delle miscele tradizionali, ma promuovono la crescita di organismi al loro interno o sulla loro superficie. Il vantaggio di collaborare con la Natura è che rende sempre il favore: la crescita di questi organismi agisce come pozzo di carbonio attivo, compensando parte dell'enorme impronta di carbonio associata al calcestruzzo tradizionale. Dunque, mentre alcune specie si sviluppano in ogni parte della struttura, viene depositato carbonato di calcio che assorbe la CO₂ e rafforza ulteriormente il calcestruzzo nel tempo.

A livello microscopico, la struttura di questo cemento poroso permette all'anidride carbonica di attraversarlo e di reagire con l'idrossido di magnesio per formare carbonato di magnesio. Durante la formazione, il carbonio è intrappolato all'interno del materiale mentre il composto minerale generato conferisce robustezza e rigidità.

Poiché aumenta la resistenza nel tempo, ripristina gli habitat nativi e riduce i requisiti di mitigazione di futuri progetti infrastrutturali, le tecnologie di EConcrete® sono anche molto competitive in termini di costi rispetto ai tradizionali materiali sul mercato.

5.2.2 Caso studio 2: vernice ispirata alla foglia di loto per superfici autopulenti

L'acqua è essenziale per la vita, ma troppa può sopraffare un sistema vivente. I liquidi in eccesso possono, a esempio, ridurre l'accesso di ossigeno da parte di un organismo, promuovere una smisurata proliferazione di batteri o funghi o eliminare suolo e sostanze nutritive.

Per prevenire l'accumulo di sostanze, i sistemi viventi devono controllare il movimento dei liquidi attraverso il perimetro o le superfici. Questo meccanismo si attua con l'utilizzo di materiali o strutture impermeabilizzanti che rallentano il flusso e/o lo facilitano per respingere il liquido.

Quando sostanze inquinanti o indesiderate o altri piccoli solidi aderiscono ai sistemi biologici, possono rallentarli nel movimento, ridurre la loro capacità di svolgere funzioni vitali o causare usura superficiale. A causa delle forze elettrostatiche, è facile che questi corpi estranei aderiscano alle superfici e quindi i sistemi viventi hanno sviluppato diverse strategie per affrontare questo

problema.

Oggi conosciamo oltre 200 piante con caratteristiche in grado di risolvere il problema, organismi vegetali che possiedono proprietà super-idrofobiche capaci di repellere l'acqua e autopulirsi. Il loto (*nelumbo nucifera*) è certamente il più noto, tanto che si parla di «*effetto loto*» per descrivere questa capacità autopulente. Questa pianta è essenzialmente impermeabile e sempre pulita seppur viva in ambiente acquatico e in habitat tipicamente fangosi.

La sua cuticola è costituita da lipidi solubili inglobati in una matrice di poliestere con un grado di idrorepellenza estremo (Pugno, 2013). Se osservata al microscopio, emerge chiaramente una superficie rugosa, costituita da protuberanze di cera di dimensione micrometriche, distanziate tra loro di una decina di micrometri, sulle quali si ergono dei nanotubuli (Pugno, 2013). Questa rugosità gerarchica (tipicamente a due livelli) sembra la chiave dell'*effetto loto*.

Infatti, poiché la tensione superficiale dell'acqua rimane molto alta, essa non riesce a penetrare oltre: la superficie irruvidita crea degli spazi interstiziali che intrappolano l'aria e non consentono il contatto tra liquido e solido.

Finiture superficiali applicabili in forma di vernice ispirate al meccanismo autopulente delle piante di loto e di altri organismi si sono rivelate estremamente utili ai rivestimenti per l'architettura, riducendo la necessità di detergenti chimici e opere di manodopera costosa. La sporcizia delle facciate degli edifici diventa infatti sempre più visibile e ostile nel tempo: sui lati più esposti alle intemperie, in particolare, i microrganismi trovano un ambiente ideale per la colonizzazione a causa dell'umidità e dei nutrienti che si depositano.

La Sto Corp. è un'azienda internazionale che produce vernici e rivestimenti per l'architettura: ispirata all'effetto loto, ha sviluppato la tecnologia *Lotus-Effect*[®], una vernice con una microstruttura super-idrofoba capace di proteggere le facciate da alghe e funghi in modo sostenibile (Figura 5.2).

Attraverso la combinazione di diverse materie prime, la tecnologia imita sinteticamente la struttura biologica del fiore di loto, sfruttando la capacità delle sue foglie di ridurre l'area di contatto tra solido e liquido, generando un'aderenza quasi nulla di eventuali impurità. Oltre a ridurre significativamente la manutenzione all'edificio, e dunque abbattendo i costi relativi, la vernice consente di risparmiare energia di produzione e di eventuali nuove applicazioni, salvaguardando così anche l'ambiente.

5.2.3 Caso studio 3: materiale da costruzione ispirato alle spugne marine

Torri, grattacieli e i ponti sono tipicamente realizzati con strutture portanti in calcestruzzo, acciaio o con entrambi i materiali combinati. Il calcestruzzo, in particolare, detiene da sempre

il primato come materiale da costruzione (63% del totale delle strutture esistenti), l'acciaio portante conta solamente il 5% mentre strutture miste calcestruzzo-acciaio hanno, di recente, avuto un incremento del 32% di utilizzo (Chiorino, 2014). Si tratta di materiali molto rigidi per cui, in presenza di un terremoto o altri disastri naturali, strutture di questo genere, ovvero poco flessibili, possono andare incontro a rottura disastrosa. Danni strutturali possono comportare lavori di manutenzione molto dispendiosa o, in alcuni casi, guasti irreparabili sull'intera costruzione.

Alcuni ricercatori dell'Università di Harvard hanno sperimentato una soluzione ispirata alle spugne marine per produrre materiali adatti alla costruzione di strutture a elevate prestazioni.

L'*Euplectella aspergillum* vive oggi ancorata nel profondo fondale oceanico delle Filippine (Figura 5.3). Questo animale marino ha un'altezza compresa tra i 10 e i 30 cm ed è capace di filtrare minuscole particelle di cibo dall'acqua marina mentre scorrono attraverso il suo corpo. Conosciuta anche come spugna di vetro, il suo scheletro cilindrico è composto di silice, il componente principale del vetro.

Mentre il vetro è normalmente considerato un materiale fragile, lo scheletro di questo animale marino risulta invece duro e stabile grazie alla sua composizione e organizzazione. Lo scheletro è infatti costituito da *spicole*, delle strutture tubolari di strati concentrici di silice idrata amorfa separati da sottili strati organici, responsabili, indirettamente, del notevole aumento di durezza del materiale. L'alternanza dei due strati, silice inorganica e composto organico, permette a ogni spicola di favorire una struttura collaborativa tra elementi con caratteristiche diverse: se infatti la silice è molto rigida, gli strati organici, invece, sono più deboli e in grado di assorbire energia, impedendo a eventuali crepe o fratture superficiali di diffondersi in profondità verso il nucleo.

Osservando più attentamente, gli studi hanno confermato che le spicole sono disposte in modo tale da comporre un reticolo quadrato a forma di tubo. Due reticoli separati ma sovrapposti formano il telaio principale e, poiché questi hanno ancora una certa libertà di movimento, lo scheletro può essere flessibile mentre cresce. I quadrati del reticolo sono rinforzati da componenti che corrono verticalmente, orizzontalmente e diagonalmente, reagendo a sollecitazioni di flessione, taglio e torsione. Creste elicoidali avvolgono la superficie in direzione opposta, incrementando ulteriormente la resistenza a compressione e torsione.

Diverse altre componenti (o il modo in cui esse si trovano disposte nel reticolo) concorrono e contribuiscono alle eccezionali prestazioni meccaniche complessive del cestello di Venere. Il risultato è, complessivamente, una struttura molto articolata, resistente e stabile seppur composta principalmente da un materiale naturalmente fragile.

La ricerca di Harvard ha quindi dato vita a un materiale con struttura scheletrica a reticolo quadrato rinforzata diagonalmente, liberamente ispirata all'*Euplectella aspergillum* (Figura

5.4). Il rinforzo diagonale incrementa considerevolmente la resistenza alla deformazione e alla rottura del materiale se sottoposto a elevati sforzi. La struttura presenta anche un ottimale rapporto resistenza-peso, riuscendo a resistere a sforzi eccessivi con una quantità inferiore di materiale rispetto a una tipica struttura a traliccio.

L'Università americana è riuscita a replicare la perfetta forma architettonica della spugna per confrontarla con strutture a reticolo esistenti: i ricercatori hanno rilevato che le caratteristiche geometrico-spaziali della spugna sono più adatte a sopportare carichi elevati senza subire deformazioni, migliorando la resistenza strutturale complessiva di circa il 20%.

Questa ricerca ha il potenziale per consentire ad architetti e ingegneri di progettare e realizzare edifici più alti e ponti più distesi senza eventuale uso di materiale aggiuntivo.

5.2.4 Caso studio 4: cemento stampato in 3D ispirato ai gusci d'aragosta

La stampa 3D del calcestruzzo è destinata a ridefinire il mondo delle costruzioni: più efficiente, più sostenibile, più economica e vantaggiosa in termini di tempo, quantità di lavoro e materiali. Ma rendere il materiale sufficientemente prestante per strutture complesse e articolate è ancora una sfida: qui entra in gioco la Natura.

La ricerca del Royal Melbourne Institute of Technology ha dimostrato che i modelli ispirati ai gusci di aragosta possono effettivamente rendere più forte il cemento stampato in 3D (Figura 5.5).

Nel corso di milioni di anni, infatti, gli esoscheletri delle aragoste si sono evoluti in strutture ad altissime prestazioni. Sono forti, flessibili e resistenti, costituiti da fibre disposte in una struttura denominata *Bouligand*² che aiuta a distribuire la forza d'impatto o il morso di un predatore su tutta la superficie del guscio, riducendo gli effetti puntuali e distribuendoli su un'area maggiore.

Il calcestruzzo stampato del RMIT riprende i pattern della composizione interna dei gusci di aragosta, generando una struttura complessivamente molto resistente in grado di distribuire le sollecitazioni e direzionare la forza assorbita. Il modello di stampa è elicoidale e torsionale anziché su linee parallele per integrare meglio tra loro gli strati di calcestruzzo.

I ricercatori hanno inoltre sperimentato un modello che combina una speciale miscela di cemento potenziata con piccole fibre di acciaio, originando un materiale molto più resistente del tradizionale che riduce difetti e porosità e asseconda ulteriormente l'aderenza con gli strati successivi.

² Si tratta di un tipo di struttura assimilabile, per forma e organizzazione, a una scala a chiocciola, le cui fibre sono disposte attorno a un modello elicoidale.

5.3 Prodotti e componenti

La costruzione per componenti è ovunque; oggi rappresentano i mezzi prevalenti con cui descrivere e costruire la manifestazione fisica della *forma*: dato che l'uomo non può coltivare il progetto come la Natura, lo assembla.

La logica dell'assemblaggio esiste da molti secoli, tuttavia è stata la Rivoluzione Industriale, alla fine del XVIII secolo, a piantare i semi della componentizzazione come logica per la produzione di massa (Oxman, 2010).

Contemporaneamente allo sviluppo della produzione seriale nascono le grandi idee di design che concepiscono meccanicamente l'habitat umano come una *macchina vivente* (Oxman, 2010). I vantaggi furono da subito evidenti ed economicamente sostenibili: tutte le parti potevano essere replicate, sostituite e riassemblate per adattarle al cambiamento. Purtroppo questa concezione portava con sé alcuni gravi svantaggi che avrebbero presto danneggiato l'ambiente naturale: l'emissione di sostanze tossiche, la ridondanza di materiale e lo spreco esprimono solo in minima parte il problema che ne conseguì.

Con una crescente consapevolezza delle conseguenze sull'ambiente, l'architettura e il design possono ora cercare nella Natura una guida a progettazione più responsabile anche per prodotti e componenti.

5.3.1 Caso studio 1: vetro anticollisione ispirato alle ragnatele

Ogni anno centinaia di milioni di volatili vengano uccisi per collisione contro i vetri delle strutture poiché riflettenti e trasparenti e, perciò, invisibili.

Uno studio del 2005 ha dimostrato che gli uccelli possono vedere alcuni ornamenti e colori. Per questo motivo, gli stessi ricercatori hanno suggerito che questa caratteristica potrebbe essere inglobata nei progetti per evitare gli urti dei volatili contro le superfici vetrate.

Per dimostrare che gli uccelli potevano vedere alcune trame (e, in particolare, le ragnatele), gli scienziati della Macquarie University hanno analizzato l'apparato visivo di alcuni volatili.

Questi animali presentano quattro tipi di fotorecettori, capaci di rilevare le lunghezze d'onda della luce ultravioletta, blu, verde e rossa. Per percepire la distanza degli oggetti utilizzano il contrasto tra colori specifici (oggetti ravvicinati) oppure segnali luminosi (elementi in lontananza).

Per verificare la tesi descritta in seguito, gli entomologi dell'Ohio State University hanno creato una sorta di percorso a ostacoli costituito da una serie di ragnatele, alcune con una trama semplice, altre con tessiture con fili di seta. Alcune specie di ragni, infatti, incorporano fili di

seta che riflettono i raggi UV con l'obiettivo di attirare alcuni insetti e avvertire del pericolo altri animali più grandi. Si tratta di un'operazione dispendiosa per il ragno, ma evita che alcuni volatili troppo grandi vengano intrappolati nella tela, distruggendo temporaneamente la capacità della stessa di catturare le prede.

Gli scienziati hanno dimostrato che gli uccelli attraversano le ragnatele con fili di seta il 45% meno frequentemente di quelle semplici, evidenziando che l'investimento del ragno era ben speso.

ORNILUX® Bird Protection Glass creato da Arnold Glas è un vetro isolante trasparente progettato per ridurre le collisioni degli uccelli. Presenta un rivestimento riflettente UV (simile alle ragnatele) visibile per tutti i volatili, ma praticamente trasparente all'occhio umano (Figura 5.6).

Il vetro è attualmente in commercio per scopi specifici nel settore edile, ma il principio e la strategia imitata è potenzialmente utilizzabile anche per eventuali altri prodotti, come reti da pesca o velivoli senza pilota.

5.3.2 Caso studio 2: sistemi di giunzione meccanici ispirati ai molluschi

Mentre l'uomo ha trascorso decenni a cercare di formare adesivi e collanti utilizzabili sott'acqua, le cozze da centinaia di milioni di anni si legano alle rocce o l'un l'altra attraverso fibre filamentose. Ognuno di questi filamenti presenta, all'estremità, una parte schiumosa contenente una miscela di proteine che conferiscono alle cozze incredibili qualità adesive.

Ciò che rende queste proteine così adesive è l'alta concentrazione di una molecola chiamata *dopa*: questo amminoacido si attacca agevolmente su diverse superfici attraverso catene chimiche che formano con queste legami forti. Recentemente gli scienziati hanno scoperto che le cozze secernono anche una seconda proteina, la *lisina*, che prepara la superficie bagnata per assecondare l'adesione con la *dopa*.

Per l'architettura, l'unione dei materiali è essenziale. I sistemi di giunzione più frequentemente utilizzati sono complicati, esteticamente problematici o involontariamente permanenti. Molto spesso, inoltre, le colle possono essere tossiche per l'uomo e non rispettose dell'ambiente.

Striplox® è un sistema di giunzione formato dall'incastro di due o più parti che presentano uncini interconnessi con terminazione a corona. Questi uncini vengono uniti con una chiave brevettata, la *Joinlox®*, che si piega per sopportare i carichi imposti dalle parti sul giunto.

L'intero design, compresa l'estetica del prodotto, è stato ispirato proprio dalle cozze.

5.4 Sistemi strutturali

L'assunto generale prevalente tra molti architetti e designer è che tutto ciò che è immaginabile sia costruibile. Ci stiamo avvicinando a un'epoca in cui questa ipotesi non è troppo lontana dalla verità. Ma come si è insistito finora, insieme al progresso ci sono molte conseguenze meno entusiasmanti, in particolare se si considera l'ambiente.

Come si è già affermato in precedenza, l'appassionata ricerca della *forma* dell'architetto ha dato in effetti la priorità assoluta all'espressione formale, vittimizzando fortemente la sostenibilità ambientale. Un approccio alla progettazione basato sulla biomimetica, che potenzialmente sostituisca questa sindrome della *forma* con una sensibilità diversa, può avere un impatto significativo nell'attuale clima di crisi ambientale.

La Natura, infatti, esibisce una varietà infinita di strutture e, nella maggior parte dei casi, la *forma* e la qualità ecologica risultano strettamente connesse a un sistema strutturale straordinariamente efficiente. È innegabile infatti che le specie animali, vegetali e i microrganismi siano in grado di assimilare e trasmettere le forze con un bassissimo dispendio energetico e materiale (Bar-Cohen, 2006).

Come si è già sostenuto, struttura e *forma* in Natura sono la diretta conseguenza di un processo di formazione complesso e soggetto a diversi fattori. Per lo più, la forma strutturale si adatta nel tempo variando le sue proprietà o la composizione dei materiali costituenti (Oxman, 2010).

Per la Natura, infatti, l'economicità è spesso direttamente correlata al risparmio di materiale perché la manodopera e la durata sono verosimilmente infinite: questa è la ragione per cui le strutture biologiche enfatizzano la ricerca di una *forma* ottimale (Pérez García e Gómez Martínez, 2009).

La biomimetica presuppone di poter trasporre l'efficienza dei sistemi biologici a quelli artificiali. Perché questo sia possibile, lo sviluppo tecnologico deve essere adeguato e conforme alla produzione di *forme* complesse senza sforzo, altrimenti l'economicità risiede nella ripetizione e nella modularità di *forme* relativamente semplici e geometriche (Pérez García e Gómez Martínez, 2009).

Nelle righe successive, si propongono ed esaminano alcuni prototipi di disposizioni strutturali frequenti in biologia: l'analisi si propone di studiarne i meccanismi strutturali, segnalandone specifiche peculiarità e offrendo quindi solo alcune delle potenzialità di una possibile estrapolazione.

5.4.1 Caso studio 1: conchiglie

Le conchiglie sono tra gli elementi strutturali più comuni ed efficienti in Natura con una

tecnologia a elevata resistenza, un uso di materiale minimo e la possibilità di realizzare anche grandi luci (Arslan e Sorguc, 2004). Presentano una struttura rigida con capacità portante derivante dalla loro configurazione spaziale che lavora principalmente in regime assiale (Pérez García e Gómez Martínez, 2009).

In particolare, sono composte da cristalli di carbonato di calcio e proteine viscoelastiche che, combinati, formano una struttura molto densa e con eccellenti proprietà meccaniche. Costituiscono un'architettura essenzialmente basata su un preciso ordine gerarchico che differisce a seconda delle esigenze di crescita e di formazione del guscio del particolare mollusco.

In Natura vengono distinte in due tipologie: continue (senza fori di alleggerimento) e discontinue (Pérez García e Gómez Martínez, 2009).

I gusci continui proteggono esternamente vari tipi di molluschi, acquatici e terrestri. In generale, sopportano pressioni continue (solitamente più importanti in acqua) e forze di impatto gravi (più significative sul suolo). Solitamente presentano una doppia curvatura costituita da elementi sottili in successione per aumentare la rigidità e guadagnano inerzia tramite la piegatura delle membrane.

Le conchiglie discontinue invece si possono osservare principalmente negli esoscheletri di microrganismi come i radiolari. Il guscio si presenta forato per agevolare lo scambio di sostanze e, pertanto, risultano estremamente alleggeriti e con forme molto differenti tra loro.

L'architettura è stata profondamente influenzata da queste meraviglie naturali: mentre grandi artisti sono stati ispirati nei loro progetti dalla bellezza, dalla diversità e dal design, alcuni ricercatori hanno affrontato lo studio delle *forme* da un punto di vista matematico e geometrico.

Vitale per architetti e ingegneri è stata l'indagine grafica del biologo e filosofo Ernst Haeckel (Figura 5.7, 5.8). Il rapido effetto si tramutò in strutture che applicano sistemi simili ai gusci per coprire grandi luci con strutture anche molto leggere (Pérez García e Gómez Martínez, 2009).

È il caso di Buckminster Fuller (1895-1983) che ha sfruttato geometrie geodetiche per le sue cupole e per sviluppare un'interessante ricerca teorica basata sulle forme triangolari e tetraedriche per raggiungere la sinergia, secondo il principio per cui la qualità di un insieme è più efficiente della somma dell'efficienza delle sue parti (Figura 5.9).

Nello stesso periodo, l'ingegnere Robert Le Ricolais (1894-1977) si è interessato alle strutture composte da elementi opposti che, se accoppiate, creano un insieme molto efficiente. Rimase poi improvvisamente affascinato dalle strutture complesse e complementari dei radiolari: un nucleo compresso protetto da strati successivi con un'impalcatura triangolare (compressa globalmente, ma localmente sia compressa che tesa), collegata da spicole compresse e circondata

da una membrana di superficie minima tesa, secondo uno schema in cui l'energia potenziale è perfettamente in equilibrio (Pérez García e Gómez Martínez, 2009).

Indubbiamente la diffusione del cemento armato ha reso possibile la realizzazione di progetti architettonici quasi impensabili, fortemente ispirati a queste straordinarie strutture. Così negli anni '20 i primi esempi di gusci in cemento armato furono introdotti da Franz Dischinger (1887-1953) e Walther Bauersfeld³ (1879-1959).

Seguirono poi innumerevoli molti altri progetti di Robert Maillart⁴ (1872-1940), Eduardo Torroja Miret⁵ (1899-1961), Eugène Freyssinet⁶ (1879-1962), Pier Luigi Nervi⁷ (1891-1979) e Felix Candela⁸ (1910-1997) che proseguirono la tradizione elaborando eleganti strutture in cemento armato tecnicamente e strutturalmente ispirate ai gusci e alle conchiglie (Arslan e Sorguc, 2004).

³ Nel 1922 l'architetto Dischinger progettò il suo più noto progetto con copertura a guscio: il *Planetario Zeiss* a Jena, in collaborazione con Walther Bauersfeld, utilizzava un tetto di cemento a guscio sottile a forma di emisfero. Il loro sistema fu successivamente brevettato e Dischinger pubblicò un articolo sulla matematica pertinente nel 1928.

⁴ A metà degli anni Trenta, l'ingegnere svizzero Maillart godeva di ampio riconoscimento nel settore per i ponti e le strutture in cemento con i quali dimostrava la sua grande capacità di comprendere e risolvere problemi strutturali complessi con soluzioni funzionali, economiche e visivamente interessanti. L'edificio più innovativo che progettò fu indubbiamente il *Cement Hall*, un involucro curvo in cemento armato di soli 60 mm di spessore progettato in collaborazione con l'architetto Hans Leuzinger. Seppur Maillart non fu il primo a sperimentare strutture a conchiglia di spessore infinitesimale, questa struttura presentava, all'epoca, una forma mai vista prima. La *Cement Hall* fu completata il 1° dicembre 1938, aperta al pubblico il 6 maggio 1939 e testata nel gennaio 1940 per la ricerca scientifica. In particolare, il 26 gennaio 1940, il suo amico e professore associato Mirko Ros (1879-1962) iniziò le prove di carico: il programma previsto doveva essere completato entro la fine del mese, culminando nel crollo della struttura. La struttura cadde solo nel febbraio 1940, dimostrando una resistenza di gran lunga superiore alle aspettative. Quando cadde, il 4 febbraio circa, fu spogliato delle barre di rinforzo poiché l'acciaio era diventato costoso.

⁵ Durante il periodo antecedente lo scoppio della guerra civile spagnola nel 1936, Eduardo Torroja Miret progettò alcune delle sue più note coperture in cemento armato. Ispirate entrambe ai gusci, l'ingegnere spagnolo ottenne fama internazionale per le coperture del *Mercato di Algeciras* (1935) (di soli 9 cm di spessore, sostenuto da otto colonne perimetrali e che copriva 47,62 metri di diametro del cerchio risultante); e l'*Autodromo della Zarzuela* di Madrid (1935), le cui tribune sono coperte da un sottile guscio costituito da una serie di iperboloidi orizzontali di soli 5 cm di spessore al bordo esterno che sbalzano a 12,80 m dai sostegni.

⁶ Tra il 1914 e il 1928, l'architetto francese Eugène Freyssinet, in collaborazione con la Limousin Company, progettò e costruì numerose coperture in cemento armato, alcune delle quali possono essere considerate particolarmente significative nella progettazione delle forme ispirate ai gusci. Freyssinet ha aperto indubbiamente la strada a tipologie innovative di gusci di cemento sottile: quasi ogni nuova costruzione diveniva infatti per l'architetto un'occasione per inventare, e spesso brevettare, una nuova tecnica costruttiva. Tra gli esempi più noti vi sono: il mercato coperto *Halles Boulingrin* e la *Stazione F* di Parigi.

⁷ Le strutture di Pier Luigi Nervi sono spesso guidate dall'economia dei materiali in un'epoca in cui le risorse erano limitate. Legando tecniche differenti, con Nervi si assiste, per la prima volta nello sviluppo di architetture legate alla forma dei gusci, alla fusione tra calcestruzzo prefabbricato e gettato in opera, base per il futuro lavoro dell'ingegnere. Il metodo introdotto da Nervi, in effetti, cambierà totalmente le tecniche di costruzione di strutture a guscio, introducendo l'idea rivoluzionaria che abbraccia velocità ed economia in architettura.

⁸ Felix Candela ha dedicato gran parte della sua vita nella ricerca del potenziale del cemento armato nelle strutture ingegneristiche, concentrandosi principalmente sulle forme a cupola e a conchiglia. Il design della forma a guscio, in particolare, lo condusse a studiare i lavori di Eduardo Torroja e a progettare alcune delle più importanti manifestazioni dell'efficienza di queste tipologie di strutture (il *Parco Oceanografico* di Valencia e *Palazzetto dello Sport* di Città del Messico tra gli innumerevoli esempi).

5.4.2 Caso studio 2: ossa e scheletro

L'uomo si è sempre ispirato allo scheletro in architettura, dal sistema alle analogie terminologiche. Lo scheletro, se considerato come massa alleggerita, ci porta a riflettere e considerarlo a differenti scale, valutandone anche la composizione del tessuto costituente (Pérez García e Gómez Martínez, 2009).

L'osso è formato da un tessuto biologico di notevole durezza e resistenza; nello specifico, il tessuto connettivo di sostegno è composto da cellule disperse all'interno di una matrice extracellulare formata da fibre e da una sostanza amorfa di origine glicoproteica calcificata: proprio la calcificazione di questa sostanza conferisce all'osso le sue elevate proprietà meccaniche.

A livello microscopico, il tessuto osseo si distingue in fibroso (o non lamellare) e lamellare. Se il primo si presenta come una serie di fibre intrecciate nelle tre dimensioni in ordine casuale, quello lamellare ha una struttura molto organizzata con fibre disposte con orientamento parallelo e sovrapposto (*lamelle ossee*). Nell'uomo, raggiunta l'età adulta, tutto il tessuto osseo è di tipo lamellare; il secondo tipo è presente solo durante l'ossificazione o la riparazione delle fratture. A sua volta, il tessuto osseo lamellare si divide in osso spugnoso e in osso compatto: la loro composizione non varia se non per la disposizione tridimensionale, ma è proprio questa diversificazione che consente di ottimizzare peso e ingombro in funzione delle sollecitazioni cui sono sottoposte.

Il tessuto dell'*osso spugnoso* è formato da lamelle incomplete che si associano per formare le *trabecole*⁹. Le sue lamelle risultano più o meno intrecciate e di spessore variabile; la disposizione spaziale garantisce la resistenza a pressioni multidirezionali.

Assimilabile quindi a una griglia tridimensionale tetraivalente, disegna un pattern quasi isostatico, flessibile e rigido al contempo, con un alleggerimento ottimizzato e una forte stabilità a effetti di torsione grazie all'irregolarità della geometria complessiva (Pérez García e Gómez Martínez, 2009). Inoltre, risulta vincente anche la disposizione di materia e forma a livello locale: i nodi vengono rinforzati e ispessiti mentre il resto presenta un design più snello.

Osserviamo che in Natura, anche a livello macroscopico, la colonna vertebrale e le costole partecipano congiuntamente per fornire supporto e protezione all'organismo. Questa concezione è plausibilmente trasponibile anche nella progettazione: in architettura, infatti, i principali elementi strutturali di un edificio devono possedere le medesime caratteristiche.

A tal proposito, durante lo studio sulla notissima *Torre Eiffel* (Parigi, 1887-1889), Maurice Koechlin (1856-1946), assistente dell'ingegnere Gustave Eiffel (1832-1923), eseguiva ricerche sul femore umano, l'osso più leggero e resistente del corpo, di cui ritenne particolarmente

⁹ In istologia la *trabecola* è un'unità di organizzazione del tessuto osseo spugnoso (Treccani, 2010).

interessanti alcune caratteristiche relative alla porosità del materiale.

Antoni Gaudí (1852-1926), invece, in *Casa Batlló* (Barcellona, 1905-1907) disegnava forme inusuali, dall'aspetto naturale e organico, con funzione strutturale essenziale: tali elementi non si configuravano come semplici ornamenti, ma costituivano la struttura portante dell'edificio. Interessantissima fu inoltre la scelta delle originali colonne a forma di osso (Figura 5.10).

In seguito, molti architetti contemporanei hanno studiato, analizzato e imitato le caratteristiche formali, strutturali e materiche delle ossa.

Tra questi Nicholas Grimshaw (1939-) che nel progetto della *Stazione di Waterloo* ingloba la sua analisi della mano umana; e Santiago Calatrava che, da sempre motivato e ispirato alle strutture scheletriche, realizza diversi ponti e opere di grandi dimensioni, dimostrando anche, con innumerevoli esempi, come le strutture artificiali possano, imitando lo scheletro, avere un'elevata capacità portante.

5.4.3 Caso studio 3: ragnatela

I ragni sono ammirabili architetti. Abili maestri costruttori, sono tra i più interessanti ispiratori della biomimetica. Per la disciplina, infatti, risultano estremamente intriganti sia le proprietà dei materiali (e quindi la sequenza proteica) che la geometria delle ragnatele.

Sebbene sia composta da fibre sottili, la ragnatela combina elevata tensione a rottura con elevata tenacità: le fibre risultano estremamente forti, ma al contempo molto elastiche. Il sistema nel suo complesso, adatto al soddisfacimento delle molteplici esigenze dell'animale, ha mostrato sotto indagine proprietà meccaniche superiori a molti materiali utilizzati in architettura (Arslan e Sorguc, 2004).

Grazie a una fruttuosa collaborazione di gruppi di ricerca provenienti dal Massachusetts Institute of Technology e dal Politecnico di Torino abbiamo potuto comprendere, con l'ausilio di simulazioni digitali, il progetto strutturale che permette alla ragnatela di possedere simili prestazioni¹⁰.

I ricercatori hanno dimostrato che quando una qualsiasi parte della ragnatela viene perturbata, avviene una reazione a livello complessivo che permette al ragno di accorgersi della presenza di un eventuale intruso intrappolato.

Tuttavia, i filamenti radiali e quelli a spirale svolgono ruoli differenti nell'attuare il movimento: quando le sollecitazioni sono particolarmente intense, alcuni di questi vengono sacrificati. Questo meccanismo di cedimento selettivo permette all'intero complesso di sopravvivere (Cranford *et al.*, 2012). Gli elementi sacrificali discreti diventano infatti un mezzo per evitare carichi

¹⁰L'intera indagine è stata riassunta in un articolo pubblicato sulla rivista *Nature*.

sistemici potenzialmente pericolosi e rendono possibile una mitigazione dei danni strutturali in modo che, nonostante la riduzione della capacità di carico della ragnatela, la robustezza della struttura complessiva migliori notevolmente (Cranford *et al.*, 2012).

Si tratta di una proprietà particolarmente interessante per l'architettura poiché diverge da qualunque altro principio strutturale comune ai materiali biologici. La ragnatela è organizzata infatti per rispondere efficacemente allo stress in modo non lineare: in questo modo, presenta maggiore resistenza ai difetti strutturali rispetto a quella esibita da materiali con comportamento elastico-lineare o elastico-plastico (Cranford *et al.*, 2012). Nello specifico, il comportamento non lineare permette di sacrificare solo modeste aree locali affinché non venga pregiudicata la funzionalità dell'intera ragnatela, anche se, come si è già affermato, la sua capacità complessiva si riduce.

Inoltre, quando il carico colpisce un filamento radiale, la tela di ragno si deforma maggiormente di quando è interessato un filamento a spirale; tuttavia, quando entrambi i tipi di filamento sono sotto stress, a cedere è uno soltanto (Cranford *et al.*, 2012). Secondo i ricercatori si tratterebbe di una strategia particolarmente ingegnosa se confrontata all'impegno e al dispendio energetico che comporterebbe costruire interamente una nuova ragnatela.

È necessario osservare, comunque, che le eccezionali prestazioni meccaniche della ragnatela si basano sulla perfetta integrazione tra struttura e materiale. Il materiale di cui è costituita la seta di ragno deriva da una serie di proteine che variano a seconda della specie che la produce. Complessivamente, si può affermare che queste mostrino delle differenze (specialmente nella struttura primaria, ovvero la sequenza amminoacidica), ma presentano caratteristiche comuni.

La più analizzata è una tipologia denominata *dragline*; la struttura primaria delle sue proteine (*MaSp1* e *MaSp2*) è caratterizzata da blocchi di alanina alternati a blocchi di glicina; le regioni della catena proteica ricche di alanina della struttura secondaria si contraddistinguono per i domini cristallini formati da foglietti beta raggruppati, mentre quelle ricche di glicina presentano una struttura disordinata con ripiegamenti ed eliche (la matrice amorfa della proteina). La quantità dei blocchi di alanina determina il livello di cristallinità nella fibra, direttamente correlati alla resistenza e alla rigidità, mentre la quantità dei blocchi di glicina contribuisce all'estensibilità e alla flessibilità (Zabatta, 2019).

Comparata al Kevlar (la fibra artificiale più resistente), la seta del ragno ha tensione di rottura inferiore, ma può allungarsi maggiormente e assorbire più energia. Confrontata con l'acciaio a elevata resistenza, invece, presenta una tensione di rottura simile, ma una densità molto inferiore, rendendola quindi, a parità di peso, un materiale con prestazioni meccaniche superiori. È inoltre idrofila (quindi non solubile in acqua) oltreché biodegradabile e biocompatibile.

Ma, a differenza della seta del baco, la seta del ragno non è facilmente ottenibile. I ragni sono

infatti territoriali, aggressivi e producono una quantità di materia non sufficiente a ulteriori scopi oltre gli originali.

Con lo sviluppo biologico molecolare e attraverso l'ingegneria genetica sono stati effettuati diversi tentativi per riprodurre il materiale. Tra i risultati più soddisfacenti vi è il *Biosteel*[®] dell'azienda canadese Nexia Biotechnologies Inc., utilizzato oggi in campo tessile, automobilistico, biomedico e cosmetico.

5.5 Sistemi impiantistici

Come affermato in precedenza, a partire dalla Rivoluzione Industriale la natura dei servizi è notevolmente cambiata nonostante i nostri bisogni fisiologici, come specie, siano rimasti pressoché gli stessi. Abbiamo sviluppato maggiori aspettative per i livelli di comfort e le tecnologie utilizzate per raggiungerli si sono necessariamente evolute: oggi ci aspettiamo una costanza, un'affidabilità e un controllo preciso sull'ambiente interno e, mentre gli edifici si adeguano ai nostri desideri, alcuni cambiamenti si rivelano gravemente nocivi (Fernandez, 2006).

Nella costante negoziazione dell'ambiente costruito tra comfort e ambiente, la missione architettonica si sta muovendo verso una nuova direzione: i progressi tecnologici hanno alterato inevitabilmente il percorso e hanno fornito opportunità nuove e imprevedute per la *forma* architettonica che la biomimetica è stata in grado di cogliere.

Nella profonda convinzione quindi che la Natura possa guidarci nell'affrontare la complessità e l'imprevedibilità delle problematiche attuali, si ritiene che questa recente disciplina abbia il potenziale per mitigare gli effetti del cambiamento climatico applicando misure atte a rendere gli edifici più efficienti energeticamente, generando in modo alternativo l'energia e riducendo le emissioni di gas a effetto serra. L'apprendimento precedente dei processi, dei sistemi e delle strategie in Natura ci consente ora di fornire nuove risposte mitigative e adattative in architettura rispetto ai sistemi impiantistici.

5.5.1 Caso studio 1: sistema per la regolazione della temperatura ispirato alla Terra

Tradizionalmente, le abitazioni presentano sistemi di riscaldamento e raffreddamento che dissipano un'enorme quantità di energia: senza una corretta ottimizzazione delle condizioni esterne, la gestione della temperatura interna risulta assolutamente inadeguata. Il pianeta Terra, al contrario, è in grado di trasferire e immagazzinare l'energia solare attraverso il meccanismo di *inerzia termica*¹¹.

¹¹ In termodinamica l'*inerzia termica* è la capacità di un materiale o di una struttura di variare la propria temperatura

Michael Sykes, fondatore della Enertia Homes, iniziò la sua carriera quarant'anni fa mentre si accingeva a terminare gli studi alla Facoltà di Ingegneria alla North Carolina State University. La sua esperienza nel settore cambiò notevolmente quando, di fronte a una catasta di legno, notò come da essa fosse emesso il calore; la successiva crisi energetica degli anni '70 fu per l'ingegnere una nuova occasione di riflessione.

I suoi esperimenti portarono al brevetto dell'*Enertia® Building System* che imita proprio il mondo in cui la Terra trae energia dal sole e sfrutta la stabilità geotermica dal suolo per generare un clima stabile.

Il sistema utilizza più componenti combinate per riscaldare e raffreddare gli edifici senza l'utilizzo di energia elettrica o di carburanti: le abitazioni sono realizzate interamente con materiali naturali e vengono sapientemente disposte in modo da generare flussi d'aria e/o canali di accesso. Il risultato è simile alla creazione di una biosfera in miniatura.

5.5.2 Caso studio 2: algoritmo di efficienza energetica ispirato alle api

È un fatto singolare, ma gli esseri umani non sono gli unici a votare. All'interno di un alveare, infatti, vivono decine di migliaia di api e, quando l'ambiente diventa sovraffollato e lo spazio limitato, la colonia si divide in due gruppi, uno dei quali lascia l'alveare e si raggruppa all'esterno finché non viene scelto un altro luogo in cui vivere (Figura 5.11).

Per stabilire dove verrà creato il nuovo alveare, alcune api "esploratrici" indagano potenziali siti; al ritorno, ogni esploratrice comunica, attraverso una particolare danza, quanto promettente sia il sito visitato. In una bizzarra danza ondeggiante, l'ape si scuote e vibra in uno schema ripetitivo e ossessivo: più il suo vibrato è forte, più interessante è il sito che ha scovato. L'orientamento dei movimenti dell'ape trasmette la direzione del nuovo alveare proposto mentre il tempo o la distanza su cui l'ape si muove in ogni ciclo trasmette la lontananza. Sulla base del vigore relativo della danza di ogni ape, altri esploratori individuano e valutano i luoghi più raccomandati. Non appena una quindicina di api raggiungono un determinato sito potenziale, il gruppo ritorna nello sciame, vi si diffonde all'interno e segnala la decisione finale di trasferimento in quel dato luogo. Successivamente lo sciame crea il nuovo alveare nella posizione prescelta.

Studiando il sistema di comunicazione delle api e il relativo coordinamento dei comportamenti individuali per assecondare l'organizzazione collettiva, è nato lo *SwarmLogic®*, un algoritmo unico della Encycle Corporation che consente agli apparecchi elettrici di comunicare tra di loro per risparmiare energia.

I sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria presenti nella maggior parte degli edifici possono essere la maggior causa di consumo di energia e, conseguentemente, anche come risposta ad alterazioni esterne o a sorgenti di calore e raffreddamento interno (Treccani, 1996).

il costo più influente nella gestione dell'immobile. Solitamente le apparecchiature operano in modo autonomo le une dalle altre e, poiché non vi è alcun tipo di comunicazione tra queste, il loro funzionamento è contemporaneo e aumenta inutilmente il consumo energetico e i costi.

La tecnologia di efficienza energetica *SwarmLogic*[®] nasce con lo scopo di coordinare le diverse componenti elettriche dell'edificio attraverso l'uso di controller con rete wireless, riducendo drasticamente e istantaneamente i costi relativi agli apparecchi che consumano energia. Utilizzando un algoritmo personalizzato ispirato alla comunicazione delle api, gli apparecchi collegati distribuiscono la domanda di energia tra di loro, rendendo il sistema elettrico più efficiente.

5.5.3 Caso studio 3: edificio con sistema di ventilazione passivo ispirato ai termitai

Come affermato in precedenza, gli edifici sono tra i più grandi consumatori di energia e tra i principali responsabili di emissioni di gas a effetto serra a causa dei sistemi di raffreddamento, riscaldamento e isolamento.

Gli organismi biologici, al contrario, sfruttano metodologie e strategie sostenibili che possono consentire lo svolgimento di pratiche e attività senza l'utilizzo di combustibili fossili. Ritenendo quindi le strategie biologiche significativamente più efficienti dal punto di vista energetico, è possibile utilizzare meno combustibili fossili anche per l'ambiente costruito e, conseguentemente, emettere una minor quantità di gas serra in atmosfera.

Più specificatamente, la Natura sfrutta "energia gratuita" poiché la maggior parte degli ecosistemi esiste e sopravvive attraverso l'utilizzo della luce solare, convertita dal singolo sistema in modo opportuno per il suo funzionamento (Aanuoluwapo e Clinton, 2017).

L'esempio più iconico di progettazione biomimetica sull'efficientamento energetico è il noto Eastgate Center, una struttura commerciale e per uffici progettata da Mick Pearce nel 1996 ad Harare, nello Zimbabwe (Figura 5.12). L'edificio, realizzato in collaborazione con la Arup Engineers, nasce su un progetto ispirato ai termitai delle zone rurali dell'Africa meridionale di cui vennero studiati attentamente i sistemi di ventilazione.

Considerando che il clima di Harare richiede una ventilazione costante durante tutto l'anno, l'architetto ha deciso di immaginare e sfruttare meccanismi di controllo totalmente passivi per evitare il grave dispendio energetico di sistemi più tradizionali. Pearce, ipotizzando di imitare i principi di funzionamento del termitaio, utilizzò materiali da costruzione con elevata capacità termica in grado di immagazzinare e cedere calore e particolari aperture per il flusso d'aria (Figura 5.13).

Il sistema di ventilazione passivo è agevolato dalla scansione di un ciclo programmato per

incrementare l'accumulo di calore durante il giorno e il rilascio durante la notte: il calore generato dagli utenti e dai macchinari all'interno dell'edificio viene disperso verso i grandi spazi aperti nel centro mentre all'esterno la superficie dell'involucro (con elevata capacità termica) assorbe il riscaldamento proveniente dal sole; ulteriore aria calda interna viene rilasciata attraverso i camini collocati sulla copertura e spinta verso l'alto da ventilatori che agevolano il fenomeno naturale di risalita dell'aria calda e la discesa di un flusso più mite. Di notte il processo continua con aria fredda che scorre attraverso le cavità dei pavimenti fino a quando l'edificio raggiunge una temperatura ottimale per riavviare il ciclo il giorno successivo.

Il complesso, costato 35 milioni di dollari, risparmia il 10% sui costi di ventilazione rispetto ai sistemi tradizionali e utilizza il 35% in meno di energia rispetto a edifici simili nella stessa capitale; e inoltre, l'affitto di attività commerciali o uffici all'interno dell'edificio risulta molto meno costoso proprio grazie al risparmio sui costi energetici. Questo edificio bionico dimostra non solo come fornire una soluzione sostenibile per il controllo della temperatura, ma sfrutta anche soluzioni economicamente più vantaggiose per un corretto approccio a contesti difficili.

5.6 L'influenza della biomimetica sull'architettura e sul design

Non è casuale che la tesi si sia avvicinata alla biomimetica per rispondere ai quesiti posti dalla sfida culturale rappresentata dal New European Bauhaus. Considerando infatti che entro il 2050 quasi il 70% della popolazione mondiale vivrà in aree urbane, sottoponendo le comunità e le industrie a nuove sfide e opportunità, sarà necessario, come predetto dalla Commissione europea, rivoluzionare radicalmente gli assetti odierni e innescare un nuovo dibattito sul futuro delle città (Brocka *et al.*, 2019).

Il percorso verso un'architettura sostenibile che si propone nel presente elaborato, ancora parziale e sperimentale, sta cambiando le logiche compositive dell'architettura e, conseguentemente, anche i *players* e le regole del gioco, includendo diverse discipline e aziende attive in mercati totalmente diversi rispetto ai consueti.

Rispetto a quest'ultima affermazione è interessante il caso di Philips, l'azienda multinazionale olandese che nel 2009 ha proposto un nuovo progetto pilota per rivoluzionare il settore architettonico attraverso la fusione di tecnologie all'avanguardia e approccio biomimetico.

La proposta per le megalopoli cinesi (*Off The Grid, Sustainable Habitat 2020*) della società di Amsterdam rappresenta un esempio chiaro di alterazione del paesaggio urbano che riduce l'impronta ecologica degli edifici e trasforma la percezione delle strutture artificiali. L'edificio *Habitat 2020* è concepito come un organismo vivente, il cui esterno può essere assimilato alla pelle umana, attiva, viva, fusa con l'ambiente e funzionante come un ecosistema dinamico e in continua evoluzione (Rao, 2014).

All'interno del nuovo paesaggio urbano che costruiscono, questi edifici si aprono, si chiudono, respirano e si adattano (Rao, 2014). I materiali infatti, non degli inerti destinati unicamente alla costruzione e alla protezione, lavorano come fiori che sbocciano e che, variando l'apertura, coinvolgono l'edificio in continui scambi gassosi e meccanismi di traspirazione. La superficie dell'edificio, così progettata, consente l'ingresso di luce, aria, acqua e calore, modificando la posizione seguendo il sole.

La struttura biomimetica leggera di questo corpo è capace di raccogliere l'acqua piovana, purificarla, filtrarla e riciclarla; di recuperare rifiuti ed energia emessi per convertirli in biogas riutilizzabili per il riscaldamento degli appartamenti; e di incanalare luce naturale e aria attraverso il naturale e automatico movimento del rivestimento rispetto al sole e al vento, riducendo la necessità di riscaldamento e raffreddamento meccanico (Dash, 2018).

Sempre rispetto alla progettazione a livello urbano, in un'ottica di pura inclusione sociale ed economica, merita un approfondimento il *Lilypad* (Figura 5.14) di Vincent Callebaut, un progetto nato per affrontare in modo puntuale l'inevitabile emergenza dell'innalzamento dei livelli del mare causato dal riscaldamento globale (Rao, 2014). Se infatti vi sono attualmente pochissime soluzioni efficienti per questo scenario, quello dell'architetto Callebaut è tra i più spettacolari mai progettati.

Di fronte alla crisi ecologica mondiale, il *Lilypad* si configura essenzialmente come una *Ecopolis* galleggiante con un duplice obiettivo: ampliare in modo sostenibile i territori dei Paesi più sviluppati e garantire un alloggio sicuro ai cittadini sfollati dalla sommersione dei territori da parte delle acque (Callebaut, 2017).

Capace di ospitare 50.000 abitanti, il *Lilypad* è una città metà acquatica e metà terrestre che invita la biodiversità sviluppando una propria fauna e flora intorno a una laguna centrale di acqua dolce che raccoglie e depura le acque piovane (Callebaut, 2017). La laguna artificiale, interamente immersa, permette di vivere nel cuore delle profondità subacquee secondo uno schema gerarchicamente funzionale che divide, con una programmazione multifunzionale, aree destinate allo svago, alle attività lavorative e al commercio; le abitazioni, invece, si trovano su giardini sospesi, attraversati da un tessuto connettivo e da una rete di strade (Callebaut, 2017). L'armonia generata consente una convivenza unica tra uomo e Natura, esplorando nuovi modi di vivere i territori costieri e la comunità in fluidi spazi collettivi.

La struttura galleggiante del *Lilypad* è direttamente ispirata alla grande ninfea sudamericana *Victoria amazonica*, una pianta acquatica con incredibili proprietà plastiche: la sua doppia pelle è costituita da fibre di poliestere ricoperte da uno strato di biossido di titanio che, reagendo ai raggi ultravioletti, assorbe l'inquinamento atmosferico per effetto fotocatalitico¹² (Callebaut,

¹² La fotocatalisi è un'azione in virtù della quale alcuni materiali, in seguito all'esposizione luminosa, danno luogo a reazioni di riduzione o di ossidazione di sostanze indesiderate. La proprietà di materiali simili è variamente

2017). Il sistema emergente ispirato a questa pianta, totalmente autosufficiente, raccoglie le quattro principali sfide lanciate dall'OCSE (l'*Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico*): clima, biodiversità, acqua e salute; raggiunge dunque un bilancio energetico a zero emissioni di carbonio integrando tutte le energie rinnovabili (solare, termica e fotovoltaica, eolica, idraulica, mareomotrice, osmotica e fitodepurativa) (Callebaut, 2017). Vero biotopo interamente riciclabile e sostenibile, questa *Ecopolis* galleggiante produce energia e ricicla CO₂ e rifiuti, purificando e addolcendo biologicamente le acque utilizzate e integrando nicchie ecologiche, campi di acquacoltura e corridoi biotici per soddisfare i bisogni alimentari (Callebaut, 2017).

Per un contesto ben differente ma comunque problematico per l'ambiente e per le comunità in termini di spazi condivisi, il team di progettazione Chimera ha proposto la *Mangal City*¹³, una serie di grattacieli futuristici a spirale per la città di Londra (Figura 5.15) (Dégrue, 2014).

Ispirata ai complessi ecosistemi creati dall'albero di mangrovia¹⁴, la *Mangal City* definisce un ecosistema urbano e sostiene programmi abitativi e culturali attraverso la progettazione di grattacieli flessibili con struttura a traliccio che comprendono capsule modulari che migrano in funzione delle condizioni ambientali e contestuali (Dégrue, 2014).

Simile a un vulcano artificiale, anche il progetto *Four Seasons Tent Tower*, realizzato dallo studio OFIS Architecture in occasione di un concorso pubblico nel 2010, sviluppa una soluzione in verticale (Figura 5.16).

Il concorso, indetto dalla capitale armena Erevan, era stato promosso per creare un nuovo centro commerciale, un museo e un hotel. I progettisti, attenti osservatori del sito, hanno sfruttato la prominente e dominante posizione dell'area per allestire un complesso che potesse favorire il riconoscimento di una nuova identità per la città contemporanea: la forma dell'edificio, infatti, rappresenta simbolicamente il biblico Monte Ararat (OFIS Architecture, 2021).

Partendo da questo concept, il progetto vede protagoniste due torri cilindriche multifunzionali terrazzate e connesse al piano terra. Entrambe le strutture, di altezze differenti, sono alimentate da energia solare e dotate di un rivestimento a rete capace di filtrare la luce solare e regolare la temperatura interna. Particolare attenzione è stata posta proprio all'ottimizzazione delle condizioni ambientali e alla riduzione del fabbisogno energetico: le facciate esterne sono costituite da materiali ad alte prestazioni che integrano dispositivi di schermatura esterni adattabili (Rao, 2014).

utilizzata per proteggere rivestimenti superficiali delle costruzioni che, in questo modo, vengono preservati più a lungo (Treccani, 2021).

¹³ Il progetto, curato da un team composto da Pierandrea Angius, Alkis Diakios, Thomas Jacobsen e Carlos Parraga-Botero, è una proposta di tesi in ambito universitario per il programma *Masters of Architecture in Parametric Urbanism* dell'AASchool of Architecture di Londra.

¹⁴ La mangrovia è una formazione vegetale costituita da piante prevalentemente legnose diffusa sui litorali delle coste marine tropicali.

Inoltre, poiché la città di Erevan è situata in un'area soggetta a terremoti, durante la progettazione il team ha dato priorità allo studio di un sistema strutturale efficace e più sicuro in caso di sismi: la struttura verticale, che resiste alle forze derivanti dall'azione sismica, è stata razionalizzata per rinforzare i nuclei in calcestruzzo (Rao, 2014).

Tutti i progetti, esempi di una volontà crescente di evoluzione della progettazione a favore della sostenibilità e del rispetto della Natura oltreché dell'identità e dell'inclusività culturale e sociale, si confrontano con una realtà ancora acerba e restia al cambiamento. Ma Roma non è stata costruita in un giorno.

5.7 Riepilogo

Gli esperimenti presentati in questo capitolo, ordinati e classificati in base a considerazioni tipologiche, rappresentano prototipi e progetti innovativi e sostenibili ampiamente utilizzabili per rispondere a diversi problemi legati al settore edile.

Se dunque la biomimetica ha dimostrato le sue capacità mitigative e adattive per contrastare le minacce conseguenti il cambiamento climatico in modo efficiente, ecologico e, soprattutto, etico e inclusivo, è ora imperativo provare ad ampliare lo sguardo: si ritiene infatti che un'applicazione olistica delle visioni della biomimetica non possa che culminare nell'innovazione e nello sviluppo di tecnologie che considerano totalmente il modo di agire della Natura.

Nei suoi principi di azione, basandoci sulla ricerca esposta nei capitoli precedenti, la sostenibilità è anche il frutto di un'alta personalizzazione e di una perfetta integrazione tra i processi di crescita, adattamento e manifestazione fisica (Oxman, 2010). Per questa ragione, il capitolo successivo tenta di sciogliere questo nodo, affrontando le problematiche relative alla differenziazione dei processi in architettura e a possibili scenari che promuovono l'integrazione e, conseguentemente, la personalizzazione, l'ottimizzazione e l'efficienza dei manufatti.

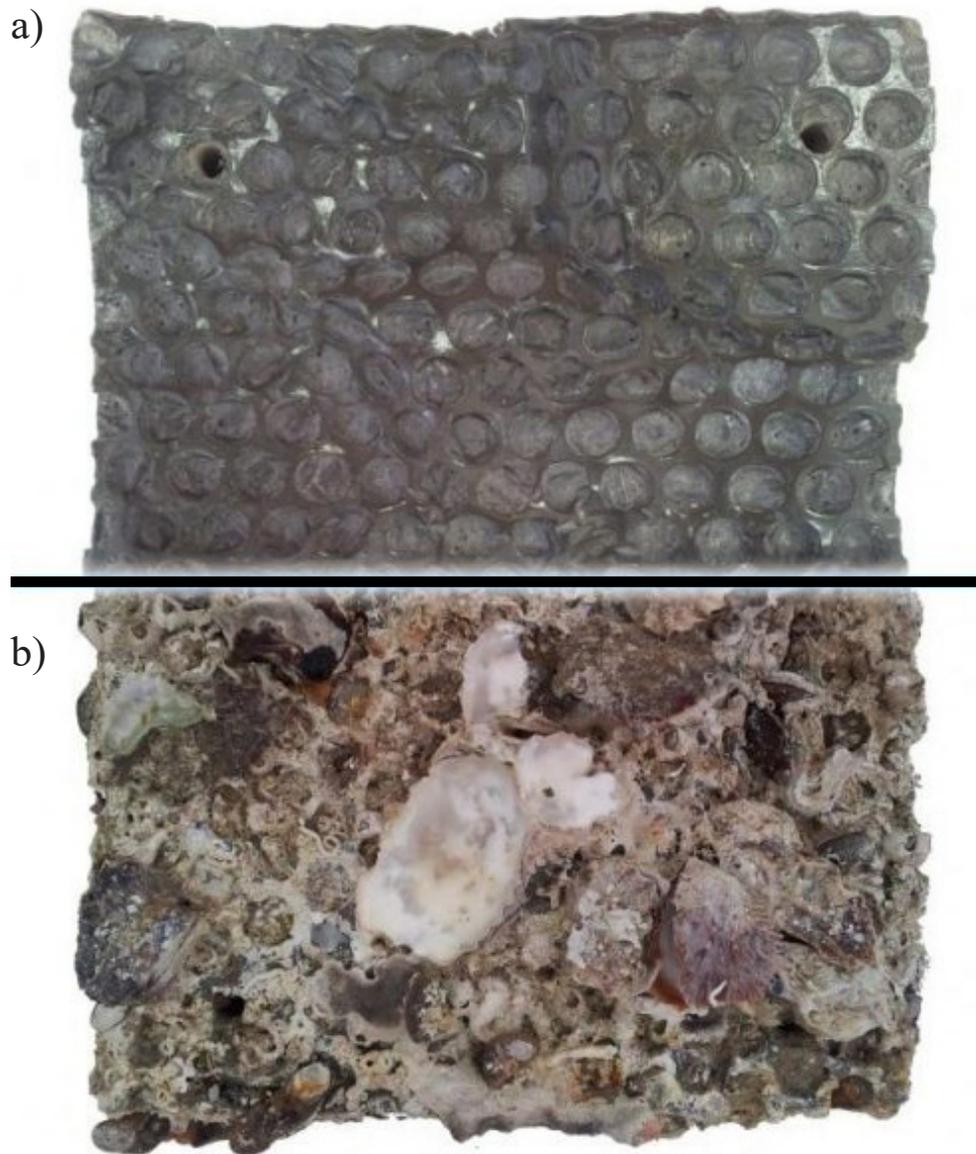


Figura 5.1: Blocchi di cemento EConcrete®. a) prima dell'uso; b) dopo 12 mesi dal getto. Da Shirazi R., Sella I., Perkol-Finkel S., 2019, EConcrete – Reducing the Carbon Footprint. [online] *EConcrete*. Disponibile su: <econcretetech.com/econcrete-reducing-the-carbon-footprint-of-concrete-based-coastal-and-marine-infrastructure/> [Data di accesso: 2 marzo 2021].



Figura 5.2: Funzionamento della vernice da rivestimento esterno super idrorepellente con tecnologia Lotus-Effect® della Sto Corp. Da Sto Corp, 2019, Coatings. [online] *Sto Corp*. Disponibile su: <www.stocorp.com/coatings-us/> [Data di accesso: 8 marzo 2021].



Figura 5.3: Immagine ravvicinata della struttura dell'*Euplectella aspergillum* (cestello di Venere). Da Asknature, 2020, Building Material Inspired by Marine Sponges - Innovation. [online] *AskNature.org*. Disponibile su: <asknature.org/innovation/building-materials-inspired-by-marine-sponges/> [Data di accesso: 5 luglio 2021].

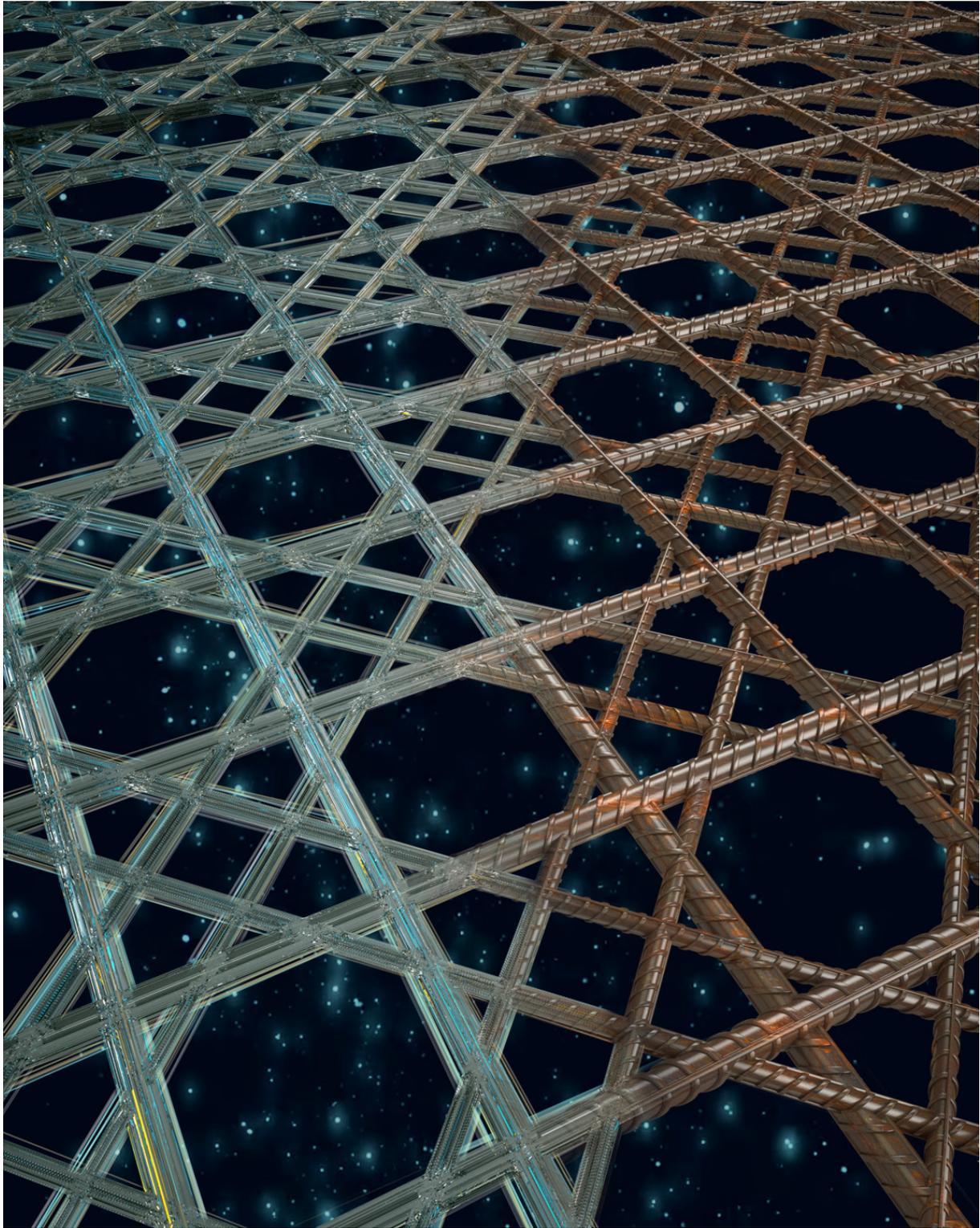


Figura 5.4: Rendering composito: dalla struttura del cestello di Venere (a sinistra) verso un reticolo a base di armature saldate (a destra). Da Burrows L., 2020, Marine sponges inspire the next generation of skyscrapers and bridges. Bioinspired architecture could pave the way for stronger, lighter structures. [online] *Harvard.edu*. Disponibile su: <www.seas.harvard.edu/news/2020/09/marine-sponges-inspire-next-generation-skyscrapers-and-bridges> [Data di accesso: 8 luglio 2021].



Figura 5.5: Sistema di getto del cemento stampato del Royal Melbourne Institute of Technology: il materiale viene depositato seguendo il pattern della corazza delle aragoste. Da Fantasy, 2021, Le aragoste migliorano il cemento da stampare in 3d da RMIT University. [online] *Stampare in 3D*. Disponibile su: <stamparein3d.it/le-aragoste-migliorano-il-cemento-da-stampare-in-3d-da-rmit-university/> [Data di accesso: 14 luglio 2021].



Figura 5.6: ORNILUX® Bird Protection Glass della Arnold Glas. A sinistra la percezione visiva all'occhio umano; a destra il vetro visto da un uccello. La trama del vetro presenta un rivestimento riflettente UV ispirato alle ragnatele. Da Arnold Glas, 2017, ORNILUX® Bird Protection Glass [online] *Arnoldglas.de*. Disponibile su: <www.arnold-glas.de/en/products/pi-isolar-ornilux-704924742> [Data di accesso: 28 luglio 2021].

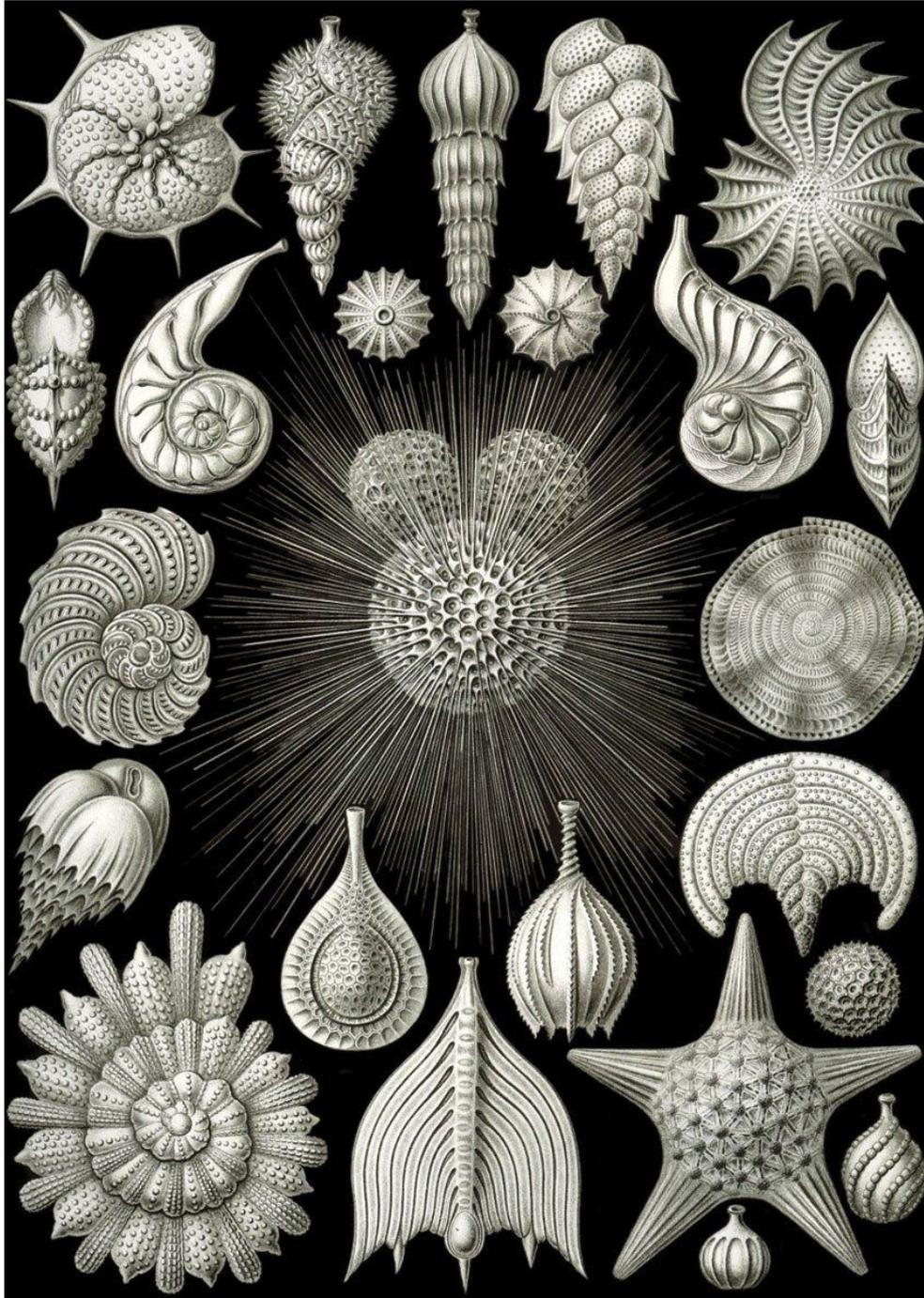


Figura 5.7: Tavola 2 (*Thalamophora*), *Kunstformen der Natur* (*Forme artistiche della natura*), Ernst Haeckel (1899-1904). Studio e rappresentazione geometrica degli scheletri di talamofori per comprendere le diverse risposte alle pressioni dell'evoluzione. Le tavole naturalistiche di Haeckel rappresentano i due significati dell'estetica della Natura della seconda metà dell'Ottocento: il suo rapporto con l'arte (e la manifestazione artistica) e la rappresentazione per la divulgazione scientifica (Canadelli, 2021). Da Canadelli E., 2021, Nota su le *Kunstformen der Natur*. [online] *Università degli Studi di Milano*. Disponibile su: <www.lettere.unimi.it/Spazio_Filosofico/imago/haeckel/elenacnadelli_link11.html> [Data di accesso: 29 luglio 2021].

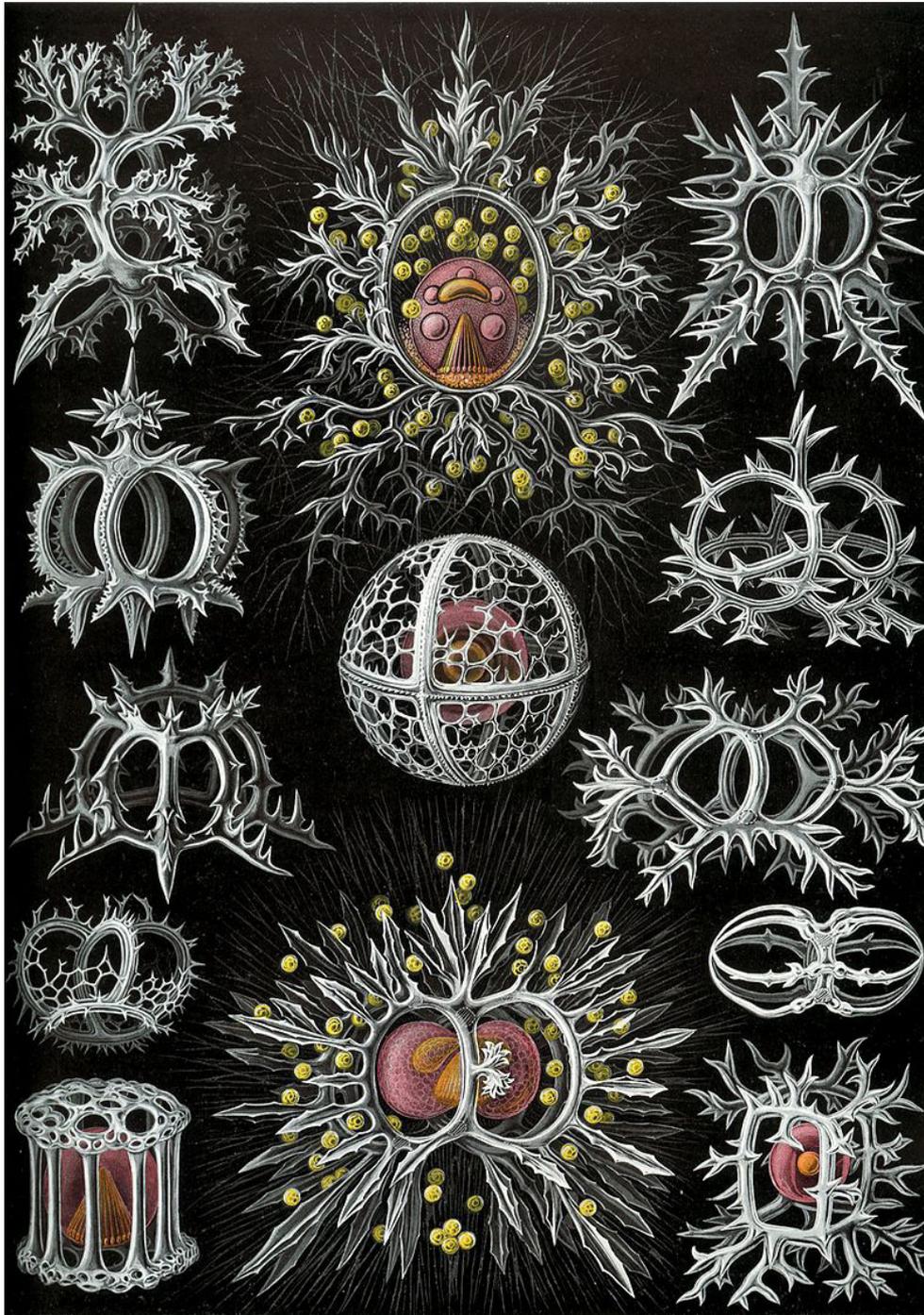


Figura 5.8: Tavola 71 (*Stephoidea*), *Kunstformen der Natur* (*Forme artistiche della natura*), Ernst Haeckel (1899-1904). Illustrazioni di radiolari. Da Canadelli E., 2021, Nota su le *Kunstformen der Natur*. [online] *Università degli Studi di Milano*. Disponibile su: <www.lettere.unimi.it/Spazio_Filosofico/imago/haeckel/elenacnadelli_link11.html> [Data di accesso: 29 luglio 2021].

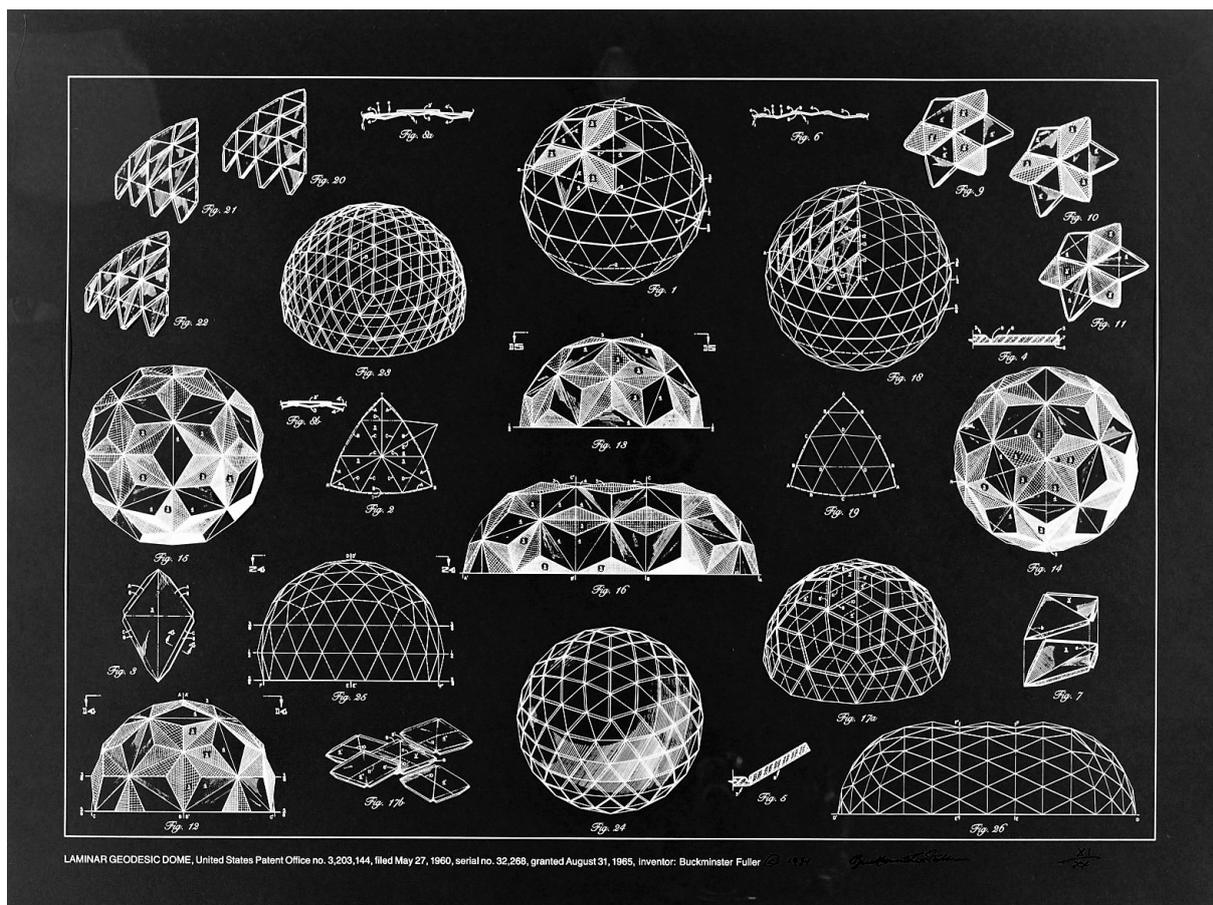


Figura 5.9: Studio delle cupole geodetiche di Buckminster Fuller, *Inventions: Twelve Around One*, 1981. Da Museum of Contemporary Art Chicago, 2019, Buckminster Fuller, *Inventions: Twelve Around One*, 1981. [online] MCA. Disponibile su: <mcachicago.org/Collection/Items/1981/Buckminster-Fuller-Inventions-Twelve-Around-One-1981-21> [Data di accesso: 4 luglio 2021].



Figura 5.10: Piano nobile di *Casa Batlló* (Barcellona, 1905-1907). Il piano includeva un'ampia galleria con spettacolari finestre con la caratteristica forma ovale e colonne di pietra a forma di ossa. Da Omar R., 2013, Antoni Gaudí's Work: Casa Batlló - Barcelona - Spain. [online] *Radwa Omar blog*. Disponibile su: <radwaomar.wordpress.com/2013/09/21/antonio-gaudis-work-part-i-casa-batllo-barcelona-spain/> [Data di accesso: 13 luglio 2021].



Figura 5.11: Le api da miele in una colonia selezionano una nuova posizione dell'alveare tramite votazione. Questo sistema ha ispirato il brevetto della Encycle Corporation, lo SwarmLogic®. Da Asknature, 2020, Quorum Determines New Hive Site - Biological Strategy. [online] *AskNature.org*. Disponibile su: <asknature.org/strategy/quorum-determines-new-hive-site/> [Data di accesso: 5 luglio 2021].



Figura 5.12: Fotografia dell'*Eastgate Building* di Harare di Mick Pearce. Da Pearce M., 2016, *Eastgate Building Harare*. [online] *Mickpearce.com*. Disponibile su: <www.mickpearce.com/Eastgate.html> [Data di accesso: 5 luglio 2021].

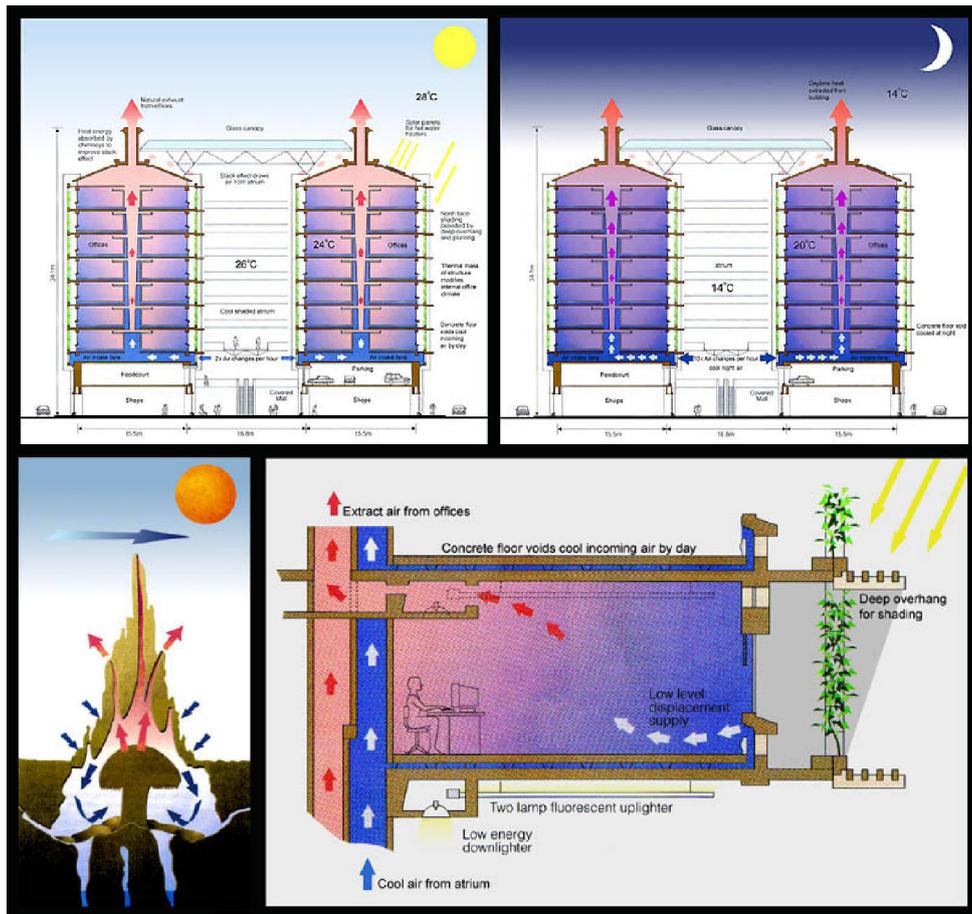


Figura 5.13: Schemi di funzionamento dell'*Eastgate Building* di Harare di Mick Pearce. Da Pearce M., 2016, *Eastgate Building Harare*. [online] *Mickpearce.com*. Disponibile su: <www.mickpearce.com/Eastgate.html> [Data di accesso: 5 luglio 2021].



Figura 5.14: Render del progetto *Lilypad* dello studio d'architettura francese di Vincent Callebaut. Da Callebaut, D., 2021. *Lilypad*. *Vincent Callebaut Architectures*. [online] Disponibile su: <vincent.callebaut.org/zoom/projects/080523_lilypad/lilypad_pl005> [Data di accesso: 10 ottobre 2021].



Figura 5.15: Render di *Mangal City* progettato dal team Chimera. Da Dégruel, P. M., 2017. *Mangal City*. *Cercle*. [online] Disponibile su: <www.cerclemagazine.com/magazine/articles-magazine/mangal-city/> [Data di accesso: 14 ottobre 2021].



Figura 5.16: Render e inserimento nel contesto del progetto *Four seasons tent tower* di OFIS Architeture. Da Gantar, G., 2021. *Four seasons tent tower*. *OFIS Architecture*. [online] Disponibile su: <www.ofis.si/eng/projects/public/four_seasons_tent_tower.html> [Data di accesso: 20 ottobre 2021].

FABBRICAZIONE NATURALE

Integrazione e personalizzazione di massa

“A new language requires a new technique.”
– Philip Glass

6.1 La personalizzazione per un approccio sostenibile

Se vogliamo definire un sistema come sostenibile, una condizione in cui la biodiversità, la rinnovabilità e la produttività delle risorse vengono mantenute nel tempo, la progettazione appare enigmatica, se non paradossale: per sua stessa natura, il design semplicemente non sembra sostenibile e l'ambiente costruito si trova in una costante lotta alla riduzione del suo impatto ambientale.

Dato che sia i nostri prodotti che i nostri processi sembrano ferire un pianeta già piuttosto fragile, l'architettura deve cercare un modello alternativo per la generazione della *forma* non limitato alla sola manifestazione fisica. Questa tesi, fino a ora, si è rivolta alla Natura per la rivelazione.

Sulla base della ricerca presentata nei capitoli precedenti, si può dedurre che gli oggetti naturali siano sostenibili anche per l'alta personalizzazione. Tale attributo, frutto dell'adattamento all'ambiente circostante, favorisce sviluppi più sostenibili perché integrano i processi di modellazione (crescita), analisi (adattamento) e fabbricazione (formazione e risposta) (Oxman, 2010).

Gli obiettivi del capitolo si concentrano dunque sulla ricerca relativa al raggiungimento di un approccio progettuale integrale, più sostenibile grazie alla manifestazione di prodotti e processi

artificiali altamente personalizzati, integrati proficuamente nei tre ambienti processuali di modellazione, analisi e fabbricazione.

6.2 Economia del materiale

Le strutture naturali possiedono il più alto livello di integrazione e precisione con cui svolgono le loro funzioni (Oxman, 2010).

Un tratto distintivo chiave dei progetti della Natura è la capacità di generare strutture complesse partendo da pochi composti organici o inorganici che mostrano contemporaneamente più funzioni (ne sono esempi conchiglie, perle, coralli, ossa, denti, legno, seta, collagene e fibre muscolari) (Benyus, 2020). Combinati con matrici extracellulari, questi biomateriali formano microstrutture ingegnerizzate per adattarsi a vincoli esterni introdotti durante la crescita e/o durante la loro vita (Figura 6.1) (Vincent, 1982).

La risposta a tali vincoli generalmente include la combinazione di prestazioni strutturali e ambientali; e, poiché tutti i materiali biologici sono composti di fibre, la loro multifunzionalità è tipicamente ottenuta mappando i requisiti di prestazione delle regioni e la successiva strutturazione e allocazione della materia (Oxman, 2010).

La *forma* è quindi direttamente collegata alle influenze della forza che agisce su di essa (Figura 6.2). Il materiale risulta concentrato in regioni ad alta resistenza e disperso in aree in cui non è richiesta rigidità: in Natura la *forma* è più economica del materiale, ma il materiale è economico perché sagomato in modo efficace e strutturato in modo efficiente (Oxman, 2010).

Inoltre, i progetti della Natura sono strutturati in modo da adattarsi e rispondere a molteplici funzioni e criteri prestazionali. La forma del ramo di un albero, a esempio, soddisfa le sue esigenze strutturali per autosostenersi sotto forti carichi di vento, ma allo stesso tempo è progettata per consentire il trasferimento di fluido e calore attraverso i suoi tessuti interni ed esterni (Figura 6.3). In altre parole, i tessuti naturali sono sostenibili attraverso la perfetta integrazione funzionale per cui un materiale modula la sua struttura in modo da rispondere contemporaneamente a stimoli sia strutturali che ambientali (Oxman, 2010).

La negoziazione di prestazioni multiple è definita come la capacità di variare localmente le proprietà del materiale di un oggetto in modo che corrisponda accuratamente a svariati vincoli strutturali e ambientali applicati su di esso come parte del processo di progettazione (Oxman, 2010). Se dunque i prodotti dell'uomo fossero progettati come sistemi che integrano proprietà multiple variando e controllando costantemente le loro caratteristiche interne, l'efficacia meccanica potrebbe migliorare notevolmente così come la risposta ambientale: l'oggetto risultante diventerà quindi, nel complesso, più sostenibile.

Questo presupposto, in linea anche con i principi del New European Bauhaus, richiede un nuovo approccio per la generazione e la materializzazione della *forma*, non motivata esclusivamente da requisiti estetici, ma piuttosto stimolata e definita da vincoli ambientali. È importante notare che, quindi, un approccio simile condurrebbe anche alla personalizzazione di qualsiasi prodotto o edificio per adattarlo a particolari esigenze.

6.3 Segregazione progettuale e gestione dei rifiuti

Nell'emulare i metodi della Natura, il design e l'architettura devono prestarsi a nuovi modi di considerare la negoziazione e l'integrazione di funzioni apparentemente in conflitto. Nella progettazione, la tendenza a trattare e risolvere i problemi in modo discreto spesso si traduce nella produzione di rifiuti (materiale, energia, manodopera e così via). L'alternativa di un design ispirato alla Natura è tutt'altro che banale, in quanto richiede di ripensare integralmente le tradizioni consolidate delle professioni progettuali, ma questo potrebbe rivelarsi promettente per il futuro di un'architettura sostenibile. Inutile dire, quindi, che abbracciare la negoziazione tra più funzioni per garantire una migliore performance richiede un ripensamento e una ridefinizione del totale processo di progettazione nel suo complesso.

La segregazione tra processi di sintesi progettuale, spesso guidati dal progettista o dall'architetto, e tra quelli di analisi progettuale, spesso guidati dall'ingegnere strutturale o ambientale, è tipica della pratica contemporanea (Oxman, 2010).

Esiste una chiara gerarchia nel momento nell'applicazione di una qualunque pratica, anche nella disciplina o nella conoscenza del dominio associata a ciascuna di esse: l'ingegnere strutturale utilizzerà programmi analitici per valutare la solidità strutturale di un componente edilizio solo dopo che è stato progettato dall'architetto. In seguito, l'ingegnere ambientale applicherà il suo schema per confermare le prestazioni desiderate sotto i carichi di vento e le condizioni termiche estreme; ed infine il progetto viene consegnato al costruttore e razionalizzato in base al tipo e al metodo con cui egli intende costruire e assemblare le componenti.

È necessario osservare che esiste una certa perdita di informazioni nella traduzione del progetto in oggetto fisico: la sequenza di progettazione convenzionale non considera necessariamente in anticipo quale tecnologia di fabbricazione verrà applicata alla produzione e, di conseguenza, quest'ultima verrà progettata, analizzata e fabbricata utilizzando forme di razionalizzazione che differiscono notevolmente, conducendo inevitabilmente alla perdita di informazioni durante la traduzione (Oxman, 2010).

Seppur la differenziazione dei processi garantisca una maggiore semplicità nell'affrontare il progetto, la vocazione all'integrazione in sostituzione alla tradizione discreta può aprire la strada a nuovi e sostenibili modi per originare la *forma* in architettura.

Non sorprendentemente, pare che la Natura abbia compreso prima di noi questa rivelazione: il mondo biologico, infatti, non ammette la scissione tra processi di generazione (*sintesi*) e di valutazione (*analisi*). Con il desiderio di considerare un approccio alternativo alla creazione di forme e spazi, in contrasto con i metodi di progettazione e costruzione convenzionali, è imperativo provare a generare tecnologie che supportino prodotti e ambienti altamente personalizzati, più efficienti nel soddisfare i loro obiettivi come in Natura.

6.3.1 Verso prodotti sostenibili: multifunzionalità e personalizzazione di massa

Implicito, ma teoricamente alla base della tesi, vi è dunque la convinzione che, alla radice della crisi, si pone il problema della disintegrazione funzionale, ovvero l'idea che ogni vincolo progettuale, sia esso sociale, spaziale, strutturale o ambientale, debba essere soddisfatto da un insieme di parametri a esso discretamente assegnato (Oxman, 2010); tali requisiti di progettazione sono tipicamente suddivisi in termini di materia (il prodotto) e di contenuto metodologico (il processo).

Consideriamo, per esempio, il progetto di una facciata di un edificio. Non diversamente dalla pelle umana o dal tessuto tegumentale di una pianta, la facciata di un fabbricato funge sia da barriera che da filtro, controllando l'impatto e il flusso dell'aria dall'ambiente esterno agli spazi interni (e viceversa).

Nel mondo artificiale, tuttavia, i requisiti associati alle due funzioni citate sono generalmente trattati in modo discreto anziché composti in modo integrato. Più specificamente, agli elementi portanti della facciata (progettati per fornire stabilità) e agli elementi non portanti (progettati per controllare il flusso termico) sono assegnati materiali diversi che richiedono processi di progettazione (quali fabbricazione, costruzione e assemblaggio) separati.

Naturalmente, ci sono numerose ottime ragioni per cui il mondo del design e dell'architettura abbraccia e promuove tali strategie di discrezione funzionale nella progettazione e nella costruzione degli edifici: la modularità e la facilità con cui fabbricare e sostituire i componenti di costruzione potrebbe essere il principale (Oxman, 2010). In effetti, si può sostenere che alcuni metodi, ormai secolari, sono così consolidati proprio per la loro efficienza, ma ora, considerando lo stato di deterioramento delle condizioni ambientali, è forse giunto il momento di considerare approcci alternativi sia alla progettazione che alla costruzione, per quanto radicale possa apparire questa proposta.

6.3.2 Verso processi sostenibili: ambienti integrati di modellazione, analisi e fabbricazione

L'esempio citato in precedenza del rivestimento è indicativo non solo di scissione funzionale,

ma illustra anche la relativa nozione di discrezione metodologica. Vale a dire che la causa (o l'effetto, entrambi ugualmente applicabili in questo caso) per la separazione funzionale, supportata dalle sue controparti materiali, è il risultato della disgregazione tra i vari processi di progettazione (Oxman, 2010).

Non solo utilizziamo processi particolari e specifici per progettare, fabbricare e assemblare, ma tale disintegrazione sembra essere fondamentale e inerente al processo di progettazione stesso: modellazione, simulazione, analisi e fabbricazione sono tutte compartimentalizzate per metodo e per discipline, in quanto gli architetti, gli ingegneri, gli scienziati e qualunque sorta di esperto delle costruzioni, esercitano la propria conoscenza all'interno del proprio dominio praticando una esclusiva routine metodologica (Oxman, 2010).

Chiaramente, la traduzione di un'idea progettuale in una sua manifestazione fisica e concreta comporta sprechi, dal tavolo da disegno (o dallo schermo) fino al cantiere. Non diversamente dai prodotti e dagli edifici che progettiamo, anche i nostri processi sono a malapena sostenibili (Oxman, 2010).

Nell'incorporare le tecnologie di calcolo del design e della Fabbricazione Digitale all'avanguardia come parte del processo progettuale, negli ultimi anni si assiste all'emergere di due approcci fondamentalmente opposti: da un lato il desiderio di esplorare un repertorio formale puramente espressivo, dall'altro, invece, l'aspirazione a ridefinire il settore come sostenibile. Nella pratica contemporanea sembra che i due mondi non si incrociano mai, abbracciando un insieme di valori che appaiono paradossalmente contrastanti: l'espressione formale contro l'attenzione verso l'ambiente.

Se il primo approccio sembra celebrare unicamente i progressi delle tecnologie, il secondo gioisce del costante miglioramento di norme e codici delle costruzioni perché sempre più rispettose dell'ambiente.

Appoggiandoci ad alcune ricerche che comprendono l'importanza dell'integrazione dei processi di generazione, analisi e costruzione in architettura, che abbracciano il progresso tecnologico e si motivano a partire da considerazioni ambientali, il capitolo analizza la legittimità di questa intuizione, indagando, solo successivamente, su eventuali nuovi presupposti metodologici e produttivi (Figura 6.4).

6.4 Fabbricazione Digitale

In Natura ogni esemplare di una specie è unico, una variazione entro *range* caratteristici che lo rende specifico e singolare. Artificialmente un attributo simile risulta particolarmente interessante: produrre un oggetto personalizzato significa attualizzarlo e renderlo diverso dagli

altri, seppur riconducibile a un unico progetto generativo.

Dunque, seppur si tratti unicamente di ipotesi frutto della pura intuizione, la tesi sostiene che la Fabbricazione Digitale potrebbe estendere il suo campo di azione, limitando un'incontrollata produzione di massa e smorzandone gli effetti a livello ambientale.

La *Fabbricazione Digitale* (o *Digital Fabrication*) include tutti quei processi attraverso cui vengono generati oggetti solidi e tridimensionali a partire da un disegno digitale. Il processo, utile anche alla creazione rapida di modelli e prototipi manifatturieri, sfrutta differenti tecniche di produzione *additiva* (la stampa 3D ne è un esempio), *sottrattiva* (tra cui taglio laser e fresatura) e di formatura (Figura 6.5).

In termini temporali, la produzione varia notevolmente a seconda dei macchinari utilizzati per la tecnologia di trasformazione, ma, innegabilmente, si tratta di un tempo intermedio tra quello consueto per la produzione industriale e quello per l'artigianale. Si potrebbe affermare però che la variazione in termini di tempo è compensata dalla qualità del prodotto finale, totalmente personalizzabile.

Inoltre, la produzione di alternative personalizzate attraverso le tecniche di Fabbricazione Digitale non varia essenzialmente i costi: in altre parole, non si sostengono costi di ammortamento legati all'oggetto specifico (ovvero l'importo non è suddiviso tra le copie prodotte) poiché la produzione di eventuali varianti o di uno stesso prodotto ripetuto non cambia effettivamente i costi legati alla fabbricazione (Siani, n.d.).

6.4.1 FabLab, makers e artigiani digitali

Nell'era della *terza Rivoluzione Industriale*, il tema del movimento *maker*, dei nuovi artigiani digitali e del rapporto tra individui, tecnologia e innovazione è essenziale (Toscano, 2019). Questa nuova Rivoluzione, secondo Emanuele Toscano, professore di sociologia all'Università degli Studi Guglielmo Marconi, è legata all'affermarsi di un modello di Fabbricazione Digitale *individuale*, definita tale grazie alla diffusione e all'accessibilità tecnologica, come le stampanti 3D, le frese CNC e i laser cutter. Tali metodi sono stati storicamente e socialmente incorporati, costituendo un sistema socio-tecnico che ha generato una rete di relazioni e connessioni che legano uomo, oggetto e pratica, permettendo inoltre la propagazione di un'espressività creativa altamente soggettiva e personale.

Proprio per questo, il movimento *Maker* è definibile a partire da esigenze espressive di tipo socio-materiali e organizzative, parte di una emergente cultura creativa, innovativa, sperimentale e attenta alla pratica. Con un approccio basato sul *tinkering*¹ e sul *Do It Yourself*, le radici

¹ Il termine *tinkering* (letteralmente *trafficare, armeggiare*) è riferito in letteratura a quelle forme di apprendimento informale derivanti dal *learning by doing* e dalla sperimentazione creativa (Toscano, 2019).

possono essere ricondotte al movimento *hacker* della fine degli anni Ottanta, con cui condivide certamente i modelli di produzione, organizzazione e distribuzione *open source* (Toscano, 2019).

Inoltre, la forte attinenza con la cultura del *fai-da-te*, un fenomeno sociale diffuso soprattutto a partire dalla seconda metà del secolo scorso, è evidente nella valorizzazione e nella centralità attribuita alla dimensione materiale e creativa della pratica, sia rispetto alla prospettiva critica nei confronti della società del consumo che in difesa dei valori di autoproduzione (Toscano, 2019).

La crescita di una cultura *maker* ha richiesto con il tempo la diffusione di spazi comunitari di incontro, condivisione, scambio e realizzazione: nel 2001 nacquero quindi i FabLab, parte integrante di un corso universitario (*How to make (almost) anything*) tenuto dal Professor Neil Gershenfeld presso il *Center for Bits and Atoms* del Massachusetts Institute of Technology. Gershenfeld promosse fondamentalmente il passaggio da una cultura del consumo a una della creazione attraverso l'apprendimento condiviso e l'uso di macchinari di Fabbricazione Digitale, ispirando esperti e non a divenire ideatori e sviluppatori anziché consumatori (Toscano, 2019).

Dopo la diffusione, nacquero diverse tipologie di FabLab, specializzate e differenti per obiettivi, vocazioni, assetti organizzativi e forniture tecnologiche, divisibili in tre tipologie principali a seconda dei finanziamenti e del modello di business che sottendono lo spazio (Toscano, 2019).

A prescindere dalla tassonomia dei FabLab in funzione dalle loro diverse peculiarità e orientamenti, questi spazi forniscono l'infrastruttura tecnologica, relazionale e sociale per nuove forme di partecipazione e collaborazione basate sulla valorizzazione della progettualità e della fantasia, comprendendo e integrando, in un'ottica rivoluzionaria, i valori promossi dal New European Bauhaus.

6.4.2 Implicazioni generali

Le tecniche di progettazione e produzione digitali basate su tecnologie CAD/CAM sono state ampiamente adottate negli ultimi due decenni in molti campi. I settori automobilistici, aerospaziali e navali, così come i prodotti risultanti, sono stati completamente ridiscussi mentre l'impatto in architettura non è stato certamente al pari.

Ma le opportunità per i settori dell'architettura e dell'ingegneria sono evidenti e i benefici si sono già manifestati nei campi correlati: integrare la progettazione, l'analisi, la produzione e l'assemblaggio di edifici attorno alle tecnologie digitali, consente ad architetti, ingegneri e costruttori di reinventare i ruoli professionali e reintegrare discipline attualmente separate, generando spazi di impresa continuativi e collaborativi (Chien *et al.*, 2016).

Colmando il divario tra progettazione e produzione, possono emergere nuove sinergie in architettura, ingegneria e scienza dei materiali che esprimono la necessità di esternalizzare le nuove possibilità dei settori: secondo alcune stime, infatti, vi è la possibilità di costruire edifici con un'efficienza superiore del 28% (fino al 40%) solo attraverso un incremento dell'informazione e del coordinamento digitale (Chien *et al.*, 2016).

La trasformazione digitale delle costruzioni enfatizza in sostanza i principi basilari del design, liberando il processo decisionale dai vincoli intrinseci della fabbricazione tradizionale e generando implicazioni notevoli (Simondetti, 2020).

6.4.2.1 Forme complesse, tolleranze e modelli di business

Il contrasto con l'attuale primato della standardizzazione del settore edile implica, nell'ottica d'utilizzo delle tecniche di Fabbricazione Digitale, la rimozione dei vincoli di produzione consolidati: in questo modo, ai progettisti è consentito abbandonare anche la dipendenza da *forme* geometriche semplici e ortogonali (Chien *et al.*, 2016). Nuovi modelli, in grado di realizzare trasformazioni coerenti, continue e dinamiche, possono sostituire le abituali norme statiche dei processi convenzionali, negando e respingendo relazioni prevedibili tra oggetto o manufatto e relativa rappresentazione. Abbandonando questo legame per favorire una complessità gestita e generata digitalmente, le geometrie topologiche e curvilinee sono prodotte con la stessa facilità delle geometrie euclidee di forma planare e cilindrica, sferica o conica (Figura 6.6). Griglie, ripetizioni e simmetrie perdono la loro passata ragion d'essere poiché la variabilità infinita diventa fattibile quanto la modularità (Chien *et al.*, 2016).

Sempre in termini di fattibilità e semplificazione, il passaggio dall'utilizzo delle competenze umane a quelle tecnologiche e il preciso controllo computerizzato, oltre a garantire un risultato migliore e indipendente dalla cultura locale o dall'area geografica, assicura risvolti dirompenti per il business di un'azienda (o di uno studio) che muove i primi passi verso le tecniche di Fabbricazione Digitale (Simondetti, 2020).

Nel rapporto tra cliente e progettista, infatti, un monitoraggio accurato della costruzione potrebbe richiedere una minore pianificazione preliminare, un avvio più rapido in loco e, anche se può risultare controintuitivo, un maggior margine di tolleranza delle incertezze e delle modifiche tardive senza incrementare i costi o i tempi (Simondetti, 2020).

6.4.2.2 Mass Customization e risvolto ecologico

Come sottolineato da Toscano, è possibile ricondurre il movimento *maker* a molteplici cornici interpretative, di cui, le più interessanti nell'ottica del presente elaborato, inquadrano la

dimensione di innovazione capace di assorbire anche sensibilità e consapevolezza ecologica rispetto a un sistema di produzione più sostenibile e personalizzabile (Toscano, 2019).

Oltre a delinearne il potenziale, è importante sottolineare come alcuni aspetti peculiari di questa cultura del *fare* tipica della Fabbricazione Digitale siano, di fatto, vettori di sviluppo della stessa questione contemporanea sull'ambiente.

Per esempio, l'ampia produzione di rifiuti ad alto contenuto tecnologico (i *technological waste*) degli ultimi decenni ha garantito alla comunità *maker* un'estesa disponibilità di risorse per lo sviluppo progettuale: il libero accesso a materie prime essenziali di scarto ha, in effetti, partecipato alla diffusione di una coscienza ecologica legata al riuso e al recupero di materiali (Toscano, 2019).

Inoltre, la capacità di produrre componenti edili irregolari in serie con la stessa facilità delle parti standardizzate ha introdotto la nozione di personalizzazione di massa nella progettazione e produzione degli edifici (Figura 6.7).

I processi produttivi che consentono la fabbricazione di componenti ripetitivi non standardizzati direttamente da dati digitali hanno inserito nel discorso architettonico nuove “*logiche di serialità*”, rendendo agevoli e rapide variazioni locali e differenziazioni in serie: è possibile produrre «*oggetti fabbricati in serie, matematicamente coerenti ma differenziati, nonché componenti una tantum elaborati, precisi e relativamente economici*» (Kolarevic, 2001).

Come ha osservato Catherine Slessor, scrittrice, critica ed editrice di diverse riviste di architettura, l'idea di un'unicità più economica e semplice da ottenere attraverso le tecniche di Fabbricazione Digitale sfida i presupposti del Modernismo, suggerendo il potenziale di un nuovo paradigma post-industriale basato sulla capacità creativa capace di invertire totalmente il processo dell'estetica modernista (Chien *et al.*, 2016).

E, seppur si ritenga che la maturazione e la conoscenza per apportare benefici significativi al settore edile sia ancora agli albori, alcuni studi e ricerche hanno enfatizzato il potenziale sociale, ambientale ed economico delle logiche di Fabbricazione Digitale, dimostrando che un'attenta personalizzazione, differenziazione e ottimizzazione dei materiali (come avviene in Natura) può essere un contributo essenziale ai fini di una progettazione sostenibile.

6.5 Fabbricazione Biologica

L'ottimizzazione prestazionale dei sistemi biologici è spesso caratterizzata dall'organizzazione materiale secondo condizioni e sollecitazioni provenienti dal contesto esterno (Oxman *et al.*, 2013).

Tra gli esempi già citati, il tessuto osseo altera tra strati più compatti e altri più spugnosi in funzione del carico strutturale e al fabbisogno di circolazione sanguigna mentre i ragni filano sete con proprietà modificate a seconda di specifiche esigenze.

La variazione nella distribuzione del materiale e nelle proprietà fisiche è, in Natura, una condizione tipica di adattamento alle circostanze ambientali e la *forma* dell'intero sistema e delle sue proprietà meccaniche derivano da processi ottimizzati relativi alla conformazione spaziale e al materiale (Oxman *et al.*, 2013).

All'interno delle logiche di ottimizzazione dei sistemi biologici, il mondo naturale produce una serie di combinazioni di proprietà e variazioni morfologiche a livello locale (Benyus, 2020): molte delle *forme* in Natura vengono raggiunte unicamente attraverso processi di ottimizzazione circoscritti poiché l'organizzazione e la composizione dei materiali sono modificati in base a stimoli strutturali e ambientali (Oxman *et al.*, 2013).

Nella progettazione architettonica, data una qualsiasi entità tridimensionale, esiste un'ampia *suite* di tecniche di progettazione computazionale che supporta la generazione di processi di ottimizzazione all'interno di ambienti parametrici (Kolarevic, 2008).

La ricerca sull'uso dei processi biologici come processi di calcolo per la generazione della *forma* architettonica è stato alla base delle sperimentazioni e delle analisi del gruppo *Mediated Matter* del MIT Media Lab. In collaborazione con il Professor Fiorenzo Omenetto (Università Tufts), il Dottor James Weaver (Università di Harvard) e sotto la direzione di Neri Oxman, il risultato è una struttura che combina tecniche di Fabbricazione Digitale e processi biologici e integra i processi di modellazione, analisi e fabbricazione in architettura come avviene in Natura (Gramanzio *et al.*, 2014).

6.5.1 Caso studio: il Silk Pavilion

Inspirato ai processi di ottimizzazione della Natura, il *Silk Pavilion* esplora la relazione tra Fabbricazione Digitale e biologica basandosi sullo studio delle strutture in fibre naturali e utilizzando bachi da seta vivi (Gramazio *et al.*, 2014).

La sua struttura principale è costituita da 26 pannelli poligonali realizzati con fili di seta prodotti da una macchina a controllo numerico (*Computerized Numerical Control Machine, CNC*)² (Oxman *et al.*, 2013). Alla base dell'intero esperimento del *Mediated Matter Group* vi è un approfondito studio relativo alla capacità del baco da seta di generare un bozzolo tridimensionale

² Le macchine a controllo numerico sono strumenti utensili che utilizzano un controllo numerico computerizzato. Se fino agli anni Ottanta erano usate esclusivamente per lavorazioni ad alta precisione, oggi invece vengono impiegate in svariati settori. Tra le più utilizzate vi sono: presse piegatrici, punzonatrici, torni, fresatrici, saldatrici e macchine di taglio lamiera (tra le quali laser, ossitaglio, plasma e a getto d'acqua).

a partire da un singolo filamento di seta che presenta differenti proprietà (Figura 6.8).

Nello specifico, il padiglione è stato progettato e costruito in due fasi distinte: la prima consisteva nella Fabbricazione Digitale di un involucro in fibre di seta, la seconda nel posizionamento di bachi da seta vivi per filare una struttura secondaria dello stesso materiale.

Superando dunque i limiti attuali degli strumenti CAD esistenti³, è stato progettato un ambiente parametrico olistico che semplificava le fasi di progettazione e fabbricazione, consentendo l'iterazione continua tra il rilevamento digitale della *forma* e i processi di fabbricazione fisica: questo strumento di calcolo è stato essenziale per mediare differenti input ambientali, proprietà dei materiali e organizzazione, nonché vincoli di fabbricazione biologica e valutazioni in tempo reale (Gramanzio *et al.*, 2014).

Nel dettaglio, la progettazione digitale include una nuova libreria formulata su RhinoCommon sul plug-in Grasshopper all'interno del software per la modellazione 3D Rhinoceros, una piattaforma commerciale di Robert McNeel che facilita la modellazione di superfici *free-form*. La geometria complessiva del padiglione è stata creata formulando un algoritmo digitale che assegnasse, a un singolo filo continuo, gradienti di densità funzionale (*patch*) a seconda di diversi vincoli ambientali (luce e calore *in primis*) (Gramanzio *et al.*, 2014). La variazione di densità è strutturata grazie al baco da seta *Bombyx mori*⁴, sfruttato come stampante 3D multimateriale e biologica nella creazione della struttura secondaria (Oxman *et al.*, 2013).

Seimilacinquecento bachi da seta vennero posizionati sul bordo della struttura principale costruita tramite la macchina CNC e, mentre si attendeva che gli animali riempissero gli interstizi, vennero tenuti in osservazione e analizzati i comportamenti caratteristici.

Il gruppo di ricerca scoprì che, colpiti da condizioni spaziali e ambientali (come le alterazioni di luce naturale e calore), i bachi da seta migravano verso aree più dense e più scure (Oxman *et al.*, 2013).

Costruito quindi il diagramma che mappava il percorso solare preciso rispetto alla stagione dell'esperimento, vennero determinate traiettorie specifiche che potessero costituire la posizione e le dimensioni di eventuali aperture oltreché la densità di materia all'interno della struttura progettata (Figura 6.9).

Il tracciamento dinamico necessario è stato ottenuto mediante l'applicazione di magnetometri

³ La maggior parte dei vincoli che dovevano essere applicati al progetto era difficile o impossibile da acquisire utilizzando gli attuali strumenti CAD (Gramanzio *et al.* 2014).

⁴ *Bombyx mori* è una specie di falena della famiglia *Bombycidae* originaria dell'Asia centro-orientale. La sua larva, conosciuta come baco da seta, è quella impiegata nella produzione della nota fibra proteica. Nello specifico, si tratta di un artropode con un corpo di circa sei centimetri di lunghezza, dai cui *seritteri* (due aperture ai lati della bocca) il baco estrude il filamento di seta grezza (un unico di lunghezza variabile tra i 300 e i 900 metri) che, guidato da movimenti della testa, si dispone a strati formando un bozzolo. Il baco impiega tipicamente tra i tre e i quattro giorni per generare il bozzolo formato da circa 25 strati concentrici.

che catturavano il movimento dei bachi nel corso dei tre giorni (la durata dell'esperimento) e i dati raccolti convertiti in una nuvola di punti.

Inoltre sono state sviluppate e implementate tecniche di imaging MicroCT (microtomografia) e SEM (microscopio elettronico a scansione) ad alta risoluzione grandangolare per esaminare le proprietà organizzative delle trame su varie scale di lunghezza e specie: le tecniche di imaging SEM, in particolare, hanno consentito l'analisi su microscala della variazione delle proprietà dei materiali nelle sezioni trasversali e longitudinali del bozzolo (Gramanzio *et al.*, 2013).

Dopo la fase di impupamento⁵, i bachi sono stati rimossi e raccolti su un telo al fondo della cupola generata, consentendogli di continuare il loro ciclo di metamorfosi in falena, deposizione delle uova e riproduzione.

6.5.1.1 Potenziale applicativo

Il *Silk Pavilion* esplora la dualità delle strutture fabbricate digitalmente e biologicamente proponendo un approccio innovativo alla costruzione di modelli per la Fabbricazione Digitale a base di fibre, ottimizzando e imitando il processo naturale del filamento della seta (Figure 6.10, 6.11).

Le strutture a base di fibre sono onnipresenti sia nei sistemi architettonici che in quelli biologici. Una solida prestazione strutturale implica necessariamente il bilanciamento delle forze per ottenere morfologie materiali che siano meccanicamente efficienti ed efficaci dal punto di vista ambientale (Oxman, Tsai *et al.*, 2012). Tipicamente questo processo implica un percorso gerarchico e graduale che include la modellazione, l'analisi e, solo infine, la manifestazione fisica. Tuttavia, le strutture a base di fibre biologiche possono unificare le tre fasi: l'assunto generale, in questo caso specifico, è che la capacità del baco da seta di generare strutture a diversi gradi di densità in funzione dell'ambiente possa essere perfezionata dalla pressione evolutiva (Oxman *et al.*, 2013).

A tal proposito, considerando le possibili implicazioni dell'esperimento, si riconosce un potenziale diretto per la fabbricazione biologica combinata con quella digitale, riconoscendo come preziosi i dati sperimentali che affermano la relazione tra morfologia della superficie della struttura principale e organizzazione biologica delle fibre (Gramanzio *et al.*, 2013).

Ulteriori ricerche hanno esplorato svariate tecniche per l'impiego di modelli nella fabbricazione biologica al fine di generare gradienti funzionali altamente controllati e regolabili delle proprietà dei materiali; allo stesso modo, potrebbero essere progettate nuove tipologie di compositi tessili a elevate prestazioni (Gramanzio *et al.*, 2013).

⁵In zoologia, nella metamorfosi degli insetti olometaboli, è la trasformazione dallo stadio di larva a quello di pupa.

Oltre a promuovere un ciclo di raccolta della seta più sostenibile, il progetto del *Silk Pavilion* apre quindi la strada a processi di costruzione decentralizzati che imitano i sistemi naturali, incrementando la ricerca e la collaborazione utili a sviluppi futuri.

6.6 Riepilogo

Nell'emulare le strategie della Natura, il design e l'architettura devono negare la segregazione tradizionale dei processi di modellazione, analisi e fabbricazione e prestarsi a consolidare alternative progettuali integrative. La manifestazione finale di un processo unificato è un prodotto artificiale personalizzato che garantisce prestazioni elevate proprio per questa sua caratteristica. Nell'incorporare le tecnologie di Fabbricazione Digitale come parte del processo progettuale, assistiamo a una pratica innovativa che ha il potenziale per realizzare questa visione.

Se però i processi di Fabbricazione Digitale tradizionali in genere comportano il deposito di strati di materia con proprietà fisiche omogenee e costanti, la maggior parte dei materiali biologici è costituita invece da strutture fibrose allineate localmente e organizzate spazialmente per ottimizzare le prestazioni strutturali e ambientali (Benyus, 2020): combinando Fabbricazione Digitale e strategie biologiche è possibile fornire per l'architettura un approccio alla progettazione olistico e sostenibile (Gramanzio *et al.*, 2013).

Il baco da seta, nel caso studio analizzato, ha generato una struttura altamente sofisticata, una dimora dove compiere essenzialmente la sua metamorfosi: a oggi non esiste alcun tipo di produzione additiva che si avvicini al grado di complessità che questo animale è riuscito a ottenere combinando unicamente due proteine in differenti concentrazioni (una funge da struttura e l'altra da collante tra le fibre) senza l'utilizzo di altri materiali. E seppur si riconoscano i limiti di questo esperimento, il caso studio del *Silk Pavilion* ha dimostrato che il baco da seta può divenire uno strumento biologico di calcolo efficace nella distribuzione della materia all'interno di una struttura architettonica: se la ricerca è ancora acerba, le implicazioni per il settore già riscontrabili possono essere vastissime se si considera la relazione tra Fabbricazione Digitale e biologia (Oxman *et al.*, 2013).

Un curioso parallelismo: mentre la falena fila seta biologica, un braccio robotico tesse quella artificiale. E se, per un futuro sostenibile, l'ultima frontiera della progettazione fosse infondere vita negli oggetti che ci circondano? Allora i designer dovrebbero unire queste due visioni del mondo, conducendoci verso un design ispirato alla Natura e una Natura ispirata al design.

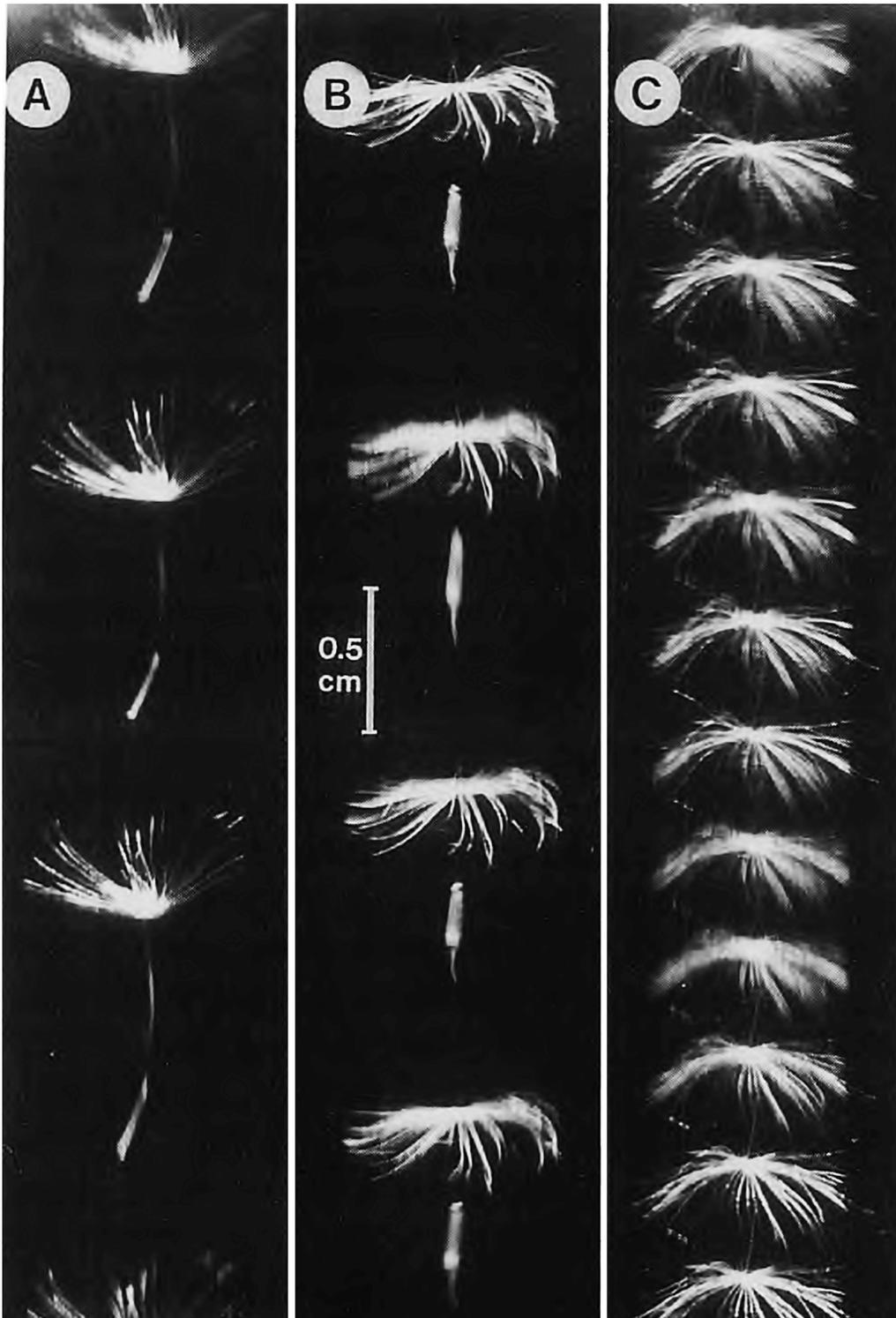


Figura 6.1: Fotografie stroboscopiche (20 cicli al secondo) e morfologia dell'achenio del tarassaco comune (*Taraxacum officinale*). A-B) Discesa verticale dei frutti; C) Discesa verticale di un pappo da cui è stato rimosso il frutto. I delicati filamenti del pappo producono una struttura simile a un paracadute che crea resistenza, riducendo la velocità con cui il frutto cade. Da Niklas, K. J., 1992, *Plant Biomechanics. An Engineering Approach to Plant Form and Function*. Chicago: The University of Chicago Press, p. 460.

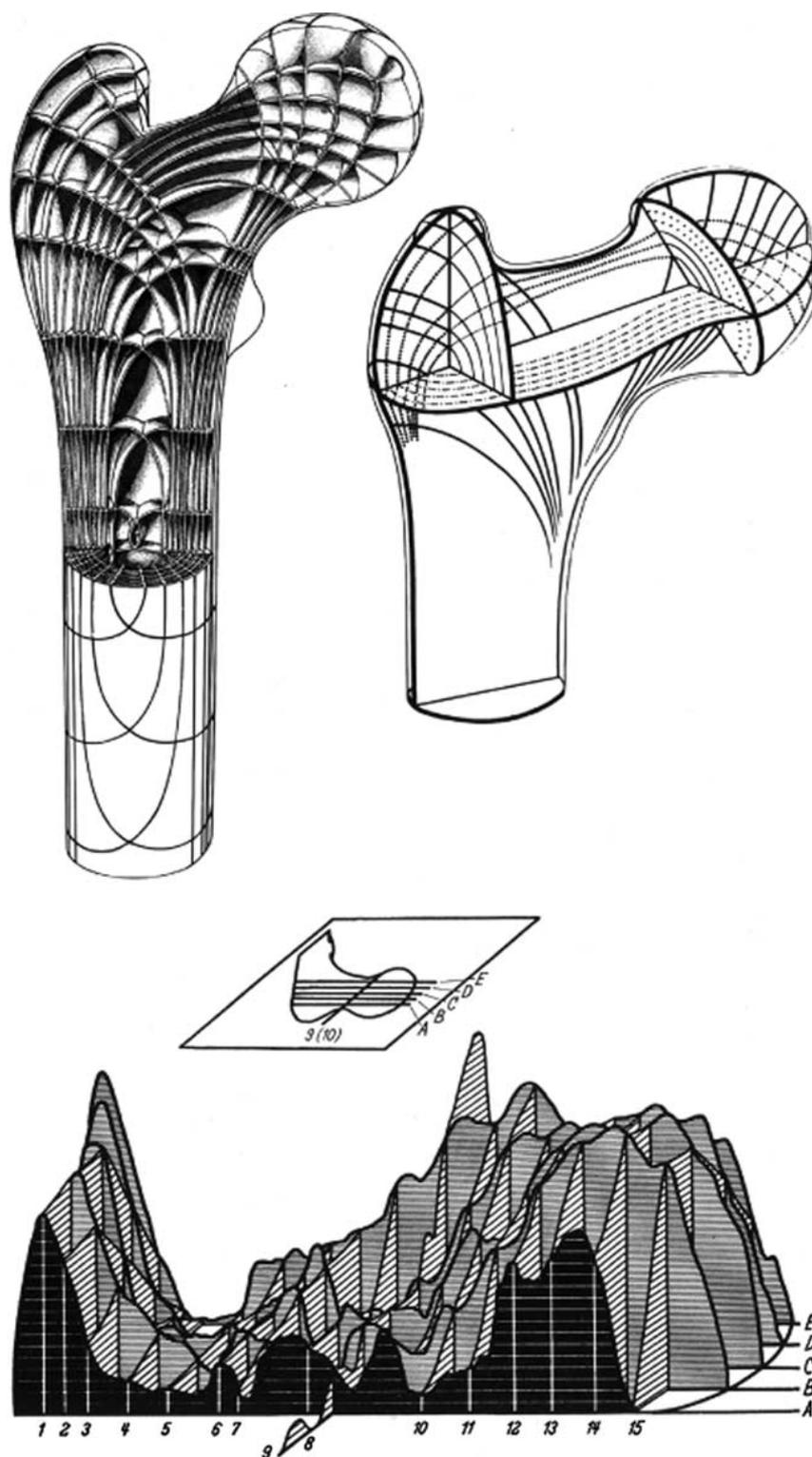


Figura 6.2: Tecnica *mountain range* per illustrare la distribuzione di calcio in funzione del carico applicato nell'osso. In alto) struttura ossea interna e variazioni rispetto alle forze; in basso) distribuzione del materiale rispetto all'anatomia della sezione esaminata (Otto, Herzog *et al.*, 1990). Da Oxman, N., 2011. Variable property rapid prototyping, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 6, Issue 1, pp. 3-31. [doi: 10.1080/17452759.2011.558588], p. 10.

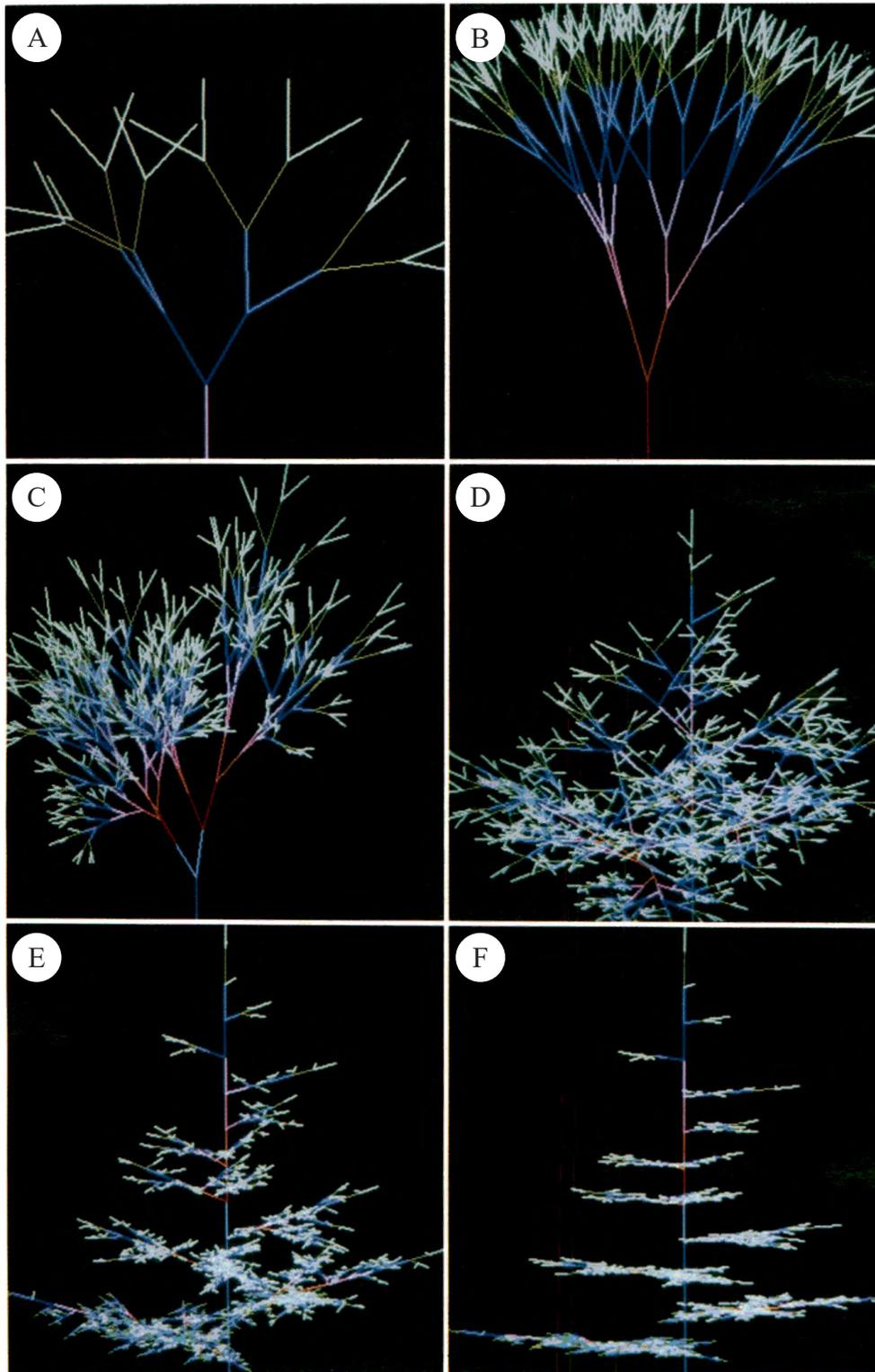


Figura 6.3: Diversi schemi di ramificazione generati digitalmente disposti secondo una sequenza di capacità crescente di intercettare la luce solare e di sostenere carichi meccanici statici dovuti al peso proprio (in ordine A-F). Da Niklas, K. J., 1992. *Plant Biomechanics. An Engineering Approach to Plant Form and Function*. Chicago: The University of Chicago Press, p. 178.



Figura 6.4: *Monocoque* di Neri Oxman, Museum of Modern Art, New York, 2007, collezione permanente. Prototipo che illustra il concetto di “*pelle strutturale*”, un materiale localmente addensato per rispondere agli stimoli ambientali e strutturali basato sul *diagramma di Voronoi*. L’intera collezione applica un’efficiente tecnologia di stampa 3D multi-materiale che deposita contemporaneamente materiali con differenti proprietà. Da Oxman, N., 2011, *Monocoque*. *Oxman.com*. [online] Disponibile su: <oxman.com/projects/monocoque> [Data di accesso: 12 giugno 2021].



Figura 6.5: Tecnica di formatura *Smart Dynamic Casting* sviluppata presso l'ETH di Zurigo, Svizzera. La dott.ssa Ena Lloret-Fritschi dell'Università svizzera ha guidato una ricerca interdisciplinare sviluppando una nuova tecnica di formatura dinamica a scorrimento che, tramite controllo robotico della velocità, permette al materiale di generare strutture con geometria complessa che variano la rigidità. Da Simondetti A. *et al.*, 2020. *Designing with Digital Fabrication*, ARUP, Londra, p. 42.



Figura 6.6: Fotografia della *Fondation Louis Vuitton* (Parigi, 2015) progettata da Frank Gehry. La fabbricazione e la generazione di forme digitali forniscono un processo di progettazione più integrato. La società Gehry Technologies ha sviluppato la propria piattaforma software, la *Digital Project*, per realizzare progetti che utilizzano geometrie complesse. Da Larsen N. M. *et al.*, 2016. *Digital Fabrication in Tomorrow's Architecture*. Copenhagen: Arkitektskolen Forlag, p. 7.



Figura 6.7: Giunzioni metalliche su misura progettati da Arup in collaborazione con Autodesk Within e 3D Systems On Demand. Da Simondetti A. *et al.*, 2020, *Designing with Digital Fabrication*, ARUP, Londra, p. 48.



Figura 6.8: Esperimento iniziale sulla conformazione del bozzolo del baco da seta. Da Mediated Matter Group, 2014, Silk Pavilion. *Mediated Matter*. [online] Disponibile su: <mediatedmattergroup.com/silk-pavilion> [Data di accesso: 18 giugno 2021].

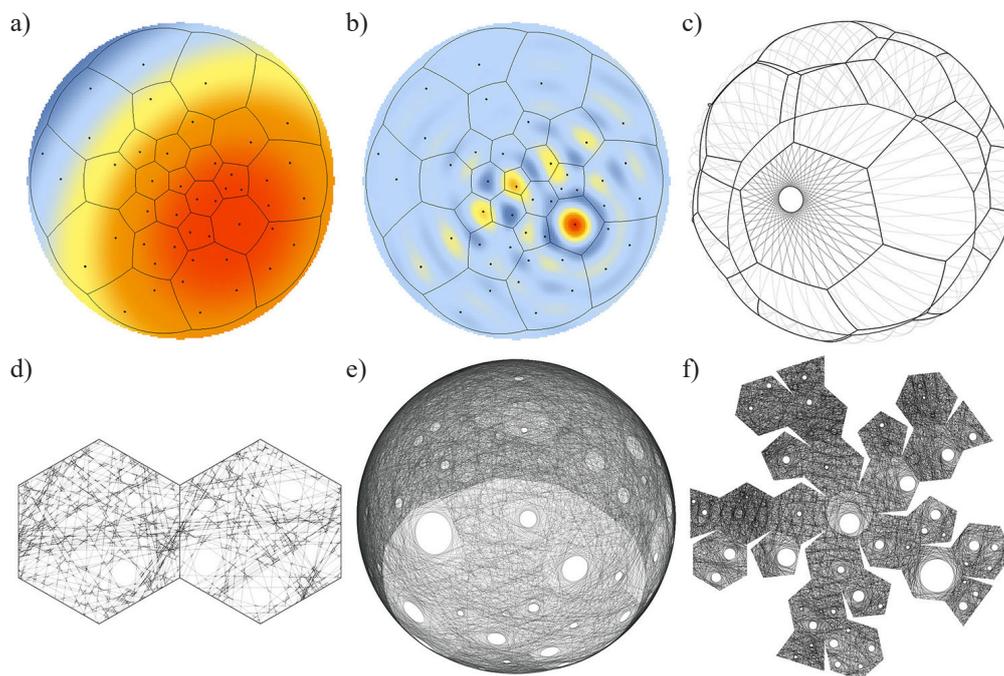


Figura 6.9: Schemi e calcolo digitale del *Silk Pavilion*. a) Proiezione della cupola pannellata e solar mapping; b) Mappatura della distribuzione delle aperture; c) Logiche di generazione della singola apertura; d) Calcolo dell'intervallo di filatura del baco da seta; e) Percorso finale con distribuzione globale delle aperture; f) Disposizione complessiva del pannello pronto per la fabbricazione. Da Gramazio F. *et al.*, 2014. *Fabricate: Negotiating Design & Making*, Fabricate, gta Verlag, Zurigo, pp. 251-253.

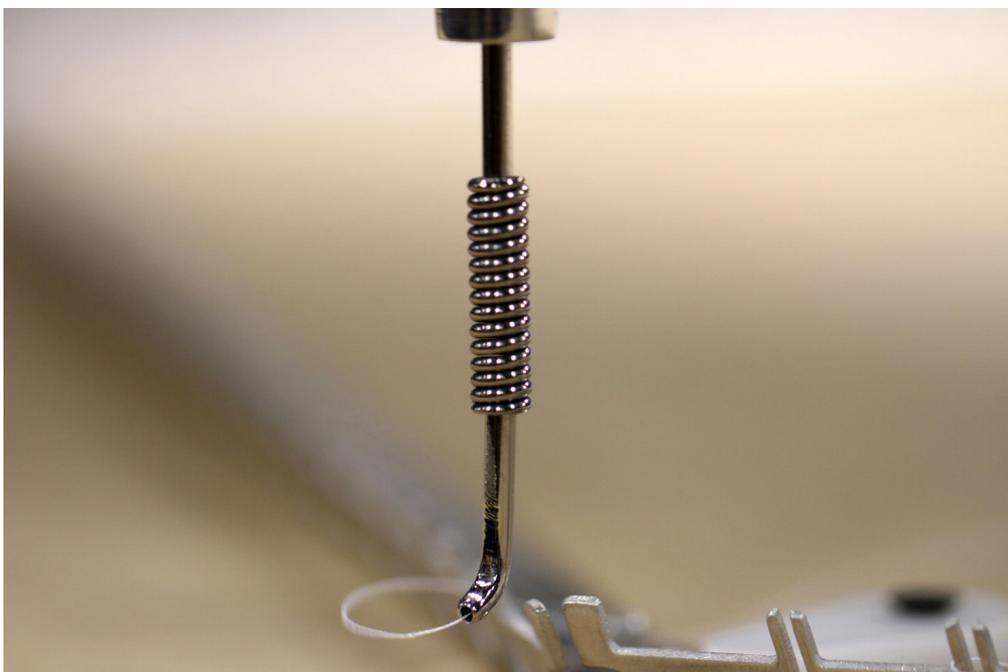


Figura 6.10: Realizzazione del padiglione: sopra) Fotografia dello strumento di filettatura in acciaio; sotto) Fotografia della struttura provvisoria in alluminio. Da Mediated Matter Group, 2014. Silk Pavilion. *Mediated Matter*. [online] Disponibile su: <mediatedmattergroup.com/silk-pavilion> [Data di accesso: 18 giugno 2021].



Figura 6.11: Fotografia dall'alto del *Silk Pavilion* al termine dell'esperimento. Da Mediated Matter Group, 2014. *Silk Pavilion*. *Mediated Matter*. [online] Disponibile su: <mediatedmattergroup.com/silk-pavilion> [Data di accesso: 18 giugno 2021].

CONCLUSIONI

Tra scalpello e gene

“Ogni blocco di pietra ha una statua dentro di sé ed è compito dello scultore scoprirla.”
– Michelangelo

«Desidero che un giovane architetto sia capace di trovare in qualsiasi circostanza la sua strada; desidero che, traendole dalle condizioni tecniche, economiche e sociali nelle quali si trova a operare, egli crei, in piena indipendenza, forme autentiche e genuine». Con questo spirito, Walter Gropius, il fondatore del Bauhaus, ha ispirato, dopo più di cinquant'anni dalla sua morte, la ricerca condotta nel presente elaborato.

Il Movimento di cui fu portavoce e sostenitore ebbe dimensione internazionale, plasmando l'intero pensiero creativo dell'epoca in cui si colloca. L'unione di arte e pratica, scardinata da una rigida impostazione accademica tradizionale, condusse i creativi dell'anteguerra nella difficile transazione che modificava completamente l'assetto della società contemporanea.

Le condizioni di oggi, dopo un secolo dalla celebre Scuola di Weimar, sono totalmente differenti e comprendono sfide nuove e mai affrontate prima. Il cambiamento climatico, l'inquinamento atmosferico, la digitalizzazione e l'incremento demografico sembrano raccontare una crescita economica senza precedenti, totalmente illimitata e priva di ostacoli. Ma è chiaro che tale crescita non possa coincidere né identificarsi con il benessere, né dell'Uomo né tantomeno del Pianeta, comprensivo di tutti i suoi abitanti e delle sue risorse.

In particolare, gli edifici e le infrastrutture, oggetti di interesse per ogni architetto, si sono resi responsabili di gran parte delle emissioni di gas a effetto serra con la produzione di manufatti che sfruttano processi e materiali altamente energivori e inquinanti.

Così, come suggerito da Gropius, anche l'autore ha cercato la sua strada: comprese prima le condizioni tecniche, sociali ed economiche attuali, ha esplorato un nuovo modo di operare.

Consapevole della necessità di portare avanti questa ricerca per ampliare le conoscenze rispetto all'attualità e al futuro che ci aspetta, l'approfondimento del grande tema del cambiamento climatico ha scatenato grave preoccupazione e ha condotto, al termine di questo percorso, a una sola delle possibili alternative in architettura per agire in questo contesto problematico.

Il motivo può ricondursi all'intreccio di diversi fattori che, comunque, hanno alimentato la curiosità alla scoperta di una materia prima sconosciuta che appariva come la naturale prosecuzione di un ragionamento logico.

Si dice infatti che Michelangelo avesse detto che, quando guardava il marmo grezzo, vedeva una figura lottare per essere liberata e lo scalpello era il suo unico attrezzo per farla emergere (Figura 7.1). Gli esseri viventi non possono essere scolpiti, possono crescere piuttosto; e, nelle nostre unità viventi più piccole, le cellule, sono presenti tutte le informazioni necessarie e utili per il nostro corretto funzionamento.

Almeno dalla Rivoluzione Industriale, il mondo del design e dell'architettura è stato dominato dal rigore della manifattura e della produzione in serie. Le catene di montaggio hanno imposto un mondo composto di parti e inquadrato l'immagine di designer e architetti educati a concepire i loro prodotti come assemblaggi di componenti con funzioni distinte. Ma in Natura non esistono strutture simili.

Per questo, la personalità di ogni architetto e designer resta oggi scissa profondamente tra scalpello e gene, tra macchina e organismo, tra montaggio e crescita, tra Henry Ford e Charles Darwin. Queste due visioni del mondo, l'emisfero destro e sinistro, l'analisi e la sintesi, sembrano però più evidenti oggi. Questa ricerca ha cercato di unire le due visioni del mondo, allontanandosi dalle logiche progettuali consolidate per avvicinarsi a un design più sostenibile e consapevole.

Ciò che ha incoraggiato lo studio condotto all'interno della tesi è stata la possibilità tecnologica e la diffusione di risorse e fonti grazie alle quali la confluenza di diversi campi può fornire a designer e architetti gli strumenti che mai prima d'ora avevano avuto a disposizione. Tra questi vi è indubbiamente la biologia, disciplina alla base dell'intero elaborato, essenziale per dedurre nuove funzioni e strategie per l'architettura.

Se ipotizzassimo che la crescita è per la Natura ciò che la fabbricazione è per l'architettura, allora il concetto di modellazione della *forma* arriva a includere più della sua semplice manifestazione; e in Natura essa è consapevole dell'interazione che avviene tra tutte le sue componenti.

Al termine di questo percorso si è dimostrato che i processi naturali possono avere vaste

implicazioni per il loro potenziale contributo alla progettazione in termini di sostenibilità e inclusione: in altre parole, si ritiene possibile imparare dalla Natura mentre viene ridefinito completamente il campo della progettazione e della fabbricazione nell'era del cambiamento climatico.

Con il pretesto dell'iniziativa New European Bauhaus e incoraggiata proprio dalla premessa della Commissione europea rispetto alla stessa, la tesi comprende la necessità di ripensare e riprogrammare l'intero sistema delle costruzioni e, seguendo gli obiettivi del Green Deal, propone un nuovo metodo, strategie complementari e casi studio che dimostrano il potenziale della disciplina biomimetica.

Il movimento che si appoggia è quindi sistemico, sintomo della volontà di un cambiamento paradigmatico rispetto all'immobilità del settore edile nelle problematiche circa l'ambiente, ma non esclude certamente anche la dimensione etica e morale.

La partecipazione di diversi attori nella promozione di questa rivoluzione progettuale, infatti, rafforza un differente concetto di inclusività promosso dalla Commissione europea, ponendo il benessere dei cittadini al centro di questioni rilevanti. L'architettura biomimetica ha il potenziale per risolvere problematiche sociali rilevanti e per promuovere valori morali condivisibili. I casi studio esplicitano chiaramente questa volontà, proponendo soluzioni sostenibili per l'ambiente in generale e puntuali per le aree geografiche più sensibili ai cambiamenti climatici.

A questo punto ci si chiede: ma la Natura è davvero perfetta?

Sarebbe necessario, per rispondere al quesito, porsi di ulteriori. Rileggere il rapporto tra Uomo e Natura, *in primis*, costituisce un elemento essenziale per decostruire alcuni paradossi concettuali parte della mentalità di ogni progettista.

Secondo Selenia Marinelli, autrice di “*Ibridi dalla fine del mondo*” all'interno del libro “*ZombieCity. Strategie urbane di sopravvivenza agli zombie e alla crisi climatica*” di Alessandro Melis, è paradossale ritenere che si possa rimarcare la separazione tra naturale e antropico. Tali binomi non possono certo essere concepiti come termini oppositivi: l'ambiente non è semplicemente un «*altrove metafisico, un semplice sfondo rispetto all'essere umano*» (Melis, 2020).

Anche rispetto all'attuale pandemia da Covid-19, ci rendiamo conto di quanto diventi spontaneo ribaltare la gerarchia figura-sfondo: l'uomo è chiaramente posizionato all'interno di un quadro più ampio e integrato con le componenti biotiche e abiotiche dell'ambiente (Melis, 2020).

La contemporaneità ci suggerisce quindi di adottare una prospettiva in cui l'Uomo non è un osservatore apatico del contesto, ma ne è parte integrante e si assume le responsabilità delle interazioni con la Natura.

Questo concetto si traduce nella possibilità che l’Uomo sviluppi la capacità di agire «“dentro” e “sulla” Natura per innescare meccanismi di co-costruzione e coevoluzione» (Melis, 2020). Quando il contesto non è dunque solo più lo scenario progettuale, è possibile incorporare radicalmente e biologicamente nuove dinamiche relazionali.

Fondamentalmente siamo giunti a una nuova era che ci sta conducendo verso un radicale cambiamento sistemico che sta conducendo il design a ispirarsi alla Natura che, per la prima volta, ci sta chiedendo di farle da *Madre*.



Figura 7.1: *Lo Schiavo Giovane*, Michelangelo, opera incompiuta (marmo, 1530-1534 circa). Da Accademia Gallery, 2016, I Prigionieri o Schiavi di Michelangelo all'Accademia. [online] Accademia.org. Disponibile su: <www.accademia.org/it/esplora-il-museo/le-opere/i-prigioni-schiavi-di-michelangelo/> [Data di accesso: 12 agosto 2021].

Bibliografia

- Aanuoluwapo, O. O. e Clinton Ohisb, A., 2017. Biomimetic strategies for climate change mitigation in the built environment. *Energy Procedia*, 142, pp. 2721-2727. [doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.216].
- Agustí-Juan, I., Habert, G., 2016. An Environmental Perspective on Digital Fabrication in Architecture and Construction. In: Chien, S. F., Choo, S., Schnabel, M. A., Nakapan, W., Kim, M. J. e Roudavski, S., *21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia: Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing*. pp. 797-806. Hong Kong: CAADRIA.
- Ahmeti, F., 2007. *Efficiency of Lightweight Structural Forms: The Case of Treelike Structures - A comparative Structural Analysis*. Tesi di Laurea Magistrale, Università tecnica di Vienna, Austria.
- Albertson, T. L., 2010. *The Integration of Biomimicry into a built environment Design Process model: an alternative approach to Hydro-Infrastructure*. Tesi di Laurea Magistrale, University of Nevada, Las Vegas, Stati Uniti d'America.
- Anker, P., 2006. Bauhaus at the zoo. *Nature*, Vol. 439, p. 916. [doi: 10.1038/43991a].
- Asefi, M. e Zahra, A., 2016. Environmentally Sustainable Architecture: Material-Based Technological Design Approach. *Current World Environment*, Vol. 11, No. 1, pp. 28-38. [doi: 10.12944/CWE.11.1.04]
- Ashby, M. F., Gibson, L. J., Wegst, U. e Olive, R., 1995. The Mechanical Properties of Natural Materials. I. Material Property Charts. *Proceedings of The Royal Society*, Vol. 450, Issue 1938, pp. 123-140. [doi: 10.1098/rspa.1995.0075].
- Ashby, M. F., 2005. *Materials Selection in Mechanical Design*. 3rd edition. Oxford: Elsevier.
- Ariga, K. e Aono, M., 2017. *Supra-materials. Nanoarchitectonics*. Oxford: Elsevier.
- Arslan, S. e Sorguc, A. G., 2004. Similarities between “structures in nature” and “man-made structures”: biomimesis in architecture. *Design and nature II*, Vol. 73. [doi: 10.2495/DN040051].

Athanasopoulou, A., Sousa, M. L., Dimova, S., Rianna, G., Mercogliano, P., Villani, V., Croce, P., Landi, F., Formichi, P., Markova, J., 2020. Thermal design of structures and the changing climate, In: *EUR 30302 EN. Publications Office of the European Union*, Lussemburgo: Publications Office of the European Union. [ISBN 978-92-76-20776-4], [doi:10.2760/128894, JRC121351].

Bar-Cohen, Y., 2006. Biomimetics: biologically inspired technology. In: *II ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*. Lisbona, Portogallo, 18-21 luglio 2005. Lisbona: ECCOMAS:

Bar-Cohen, Y., 2006. Biomimetics - Using nature to inspire human innovation. *Bioinspir Biomim*, 1(1), pp.1-12. [doi: 10.1088/1748-3182/1/1/P01].

Bar-Cohen, Y., 2012. *Biomimetics. Nature-Based Innovation*. Boca Raton: CRC Press.

Baweja, V., 2014. Sustainability and the Architectural History. *Enquiry The ARCC Journal for Architectural Research*, 11(1), p. 12. [doi: 10.17831/enq:arcc.v11i1.207].

Benyus, J. M., 1997. *Biomimicry. Innovation Inspired by Nature*. New York: HarperCollins Publishers.

Biomimicry 3.8, 2013. Life's Principles. Biomimicry DesignLens. [pdf] Disponibile su: <glbiomimicry.org/Education/Lifes_Principles_Handout_FINAL.pdf> [Data di accesso: 5 agosto 2021].

Brakus, J., 1995. *Mechanical Properties of Natural Materials - An Overview*. Tesi di Laurea Magistrale, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, Stati Uniti d'America.

Brodrick, D., 2020. *Natural Genius: Approaches and Challenges to Applying Biomimetic Design Principles in Architecture*. Tesi di Laurea Magistrale, University of Colorado Boulder, Boulder, Colorado, Stati Uniti d'America.

Button, T., 2016. *Biomimicry: a source for architectural innovation in existing buildings*. Tesi di Laurea Magistrale, Rochester Institute of Technology, New York, New York, Stati Uniti d'America.

Caire, M. E., 2007. *Global Warming: is it real?*. Tesi di Laurea Magistrale, Texas State University, San Marcos, Texas, Stati Uniti d'America.

Calia, E., 2015. *La fabbricazione digitale: evoluzione innovativa della manifattura*. [pdf] Disponibile su: <mondodigitale.aicanet.net/2015-1/articoli/01_la_fabbricazione_digitale.pdf> [Data di accesso: 7 maggio 2021].

Camera dei deputati, 2019. *Le politiche dell'Unione europea per il clima*. [pdf] Ufficio Rapporti con l'Unione Europea XVIII Legislatura. [pdf] Disponibile su: <www.camera.it/temiap/documentazione/temi/pdf/1173859.pdf> [Data di accesso: 5 luglio 2021].

Camera dei deputati, 2021. *Cambiamenti climatici*. [pdf] Ufficio Rapporti con l'Unione Europea XVIII Legislatura. [pdf] Disponibile su: <www.camera.it/temiap/documentazione/temi/pdf/1104844.pdf> [Data di accesso: 7 luglio 2021].

Carraro, C. e Mazzai, A. (a cura di), 2017. *Gli impatti dei cambiamenti climatici in Italia. Fotografie del presente per capire il futuro*. Venezia: Edizioni Ca' Foscari. [ISBN 978-88-6969-192-8 (printed edition); 978-88-6969-191-5 (ebook)].

Casalino, E., 2019. *Biomimetica: insegnamenti dalla natura per strutture ottimizzate del futuro*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Torino.

Charitonidou, M., 2020. László Moholy-Nagy and Alvar Aalto's Biocentric Vision of Design and their Admiration for Invisible Structures: "Elastic" Standardization as Biosemiotics. *CARTHA II 2020/2012*, 5(2).

Commissione Europea, Plasmare un'Europa resiliente ai cambiamenti climatici - La nuova strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici. {SEC(2021) 89 final} - {SWD(2021) 25 final} - {SWD(2021) 26 final} 2021/82, 2021. *Official Journal* [online]. Disponibile su: <eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0082&from=IT> [Data di accesso: 12 marzo 2021].

Conti, M. E., 2021. *Le politiche di Adattamento al cambiamento climatico*. Scuola Nazionale dell'Amministrazione (SNA). Disponibile su: <sna.gov.it/fileadmin/files/2020_DIBECS/Pagine/Pagina_Monografica_5.pdf> [Data di accesso: 2 maggio 2021].

Cranford, S. W., Tarakanova, A., Pugno, N. e Buehler, M. J., 2012. Nonlinear material behaviour of spider silk yields robust webs. *Nature*, Vol. 482, pp. 72-76. [doi: 10.1038/nature10739]

Cruz, E., 2017. *World Tour of biomimetics: research project in sustainable architecture*. Tesi di Laurea Magistrale, Ecole Centrale de Lyon, Lione, Francia.

Dash, S. P., 2018. Application of Biomimicry in Building Design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 9(2), pp. 644-660.

Design and Advanced Materials, 2013. Design and Advanced Materials As a Driver of European Innovation. *DAMADEI*. [ISBN: 87-90904-67-2].

D'Arcy Wentworth Thompson, 1945. *On Growth and Form, A New Edition*. Cambridge: Cambridge University Press.

De Castro, L. N., 2007. Fundamentals of natural computing: an overview. *Physics of Life Reviews*, 4(1), pp. 1-36. [doi: 10.1016/j.plrev.2006.10.002].

De Wilde, P. e Coley, D., 2012. Editorial article: The Implications of a Changing Climate for Buildings. *Building and Environment*, Vol. 56, pp. 1-7. [doi: 10.1016/j.buildenv.2012.03.014].

DiBona, D. K., 2008. *Global Warming, Energy Efficiency and the Role of the Built Environment*. Tesi di Laurea Magistrale, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, Stati Uniti d'America.

Dunn, N., 2012. *Digital Fabrication in Architecture*, Londra: Laurence King Publishing Ltd.

El-Zeiny, R. M. A., 2012. Biomimicry as a Problem Solving Methodology in Interior Architecture, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 50, pp. 502-512. [doi: 10.1016/j.sbspro.2012.08.054].

Fernandez, J., 2006. *Material Architecture. Emergent Materials for Innovative Buildings and Ecological Construction*. Oxford: Elsevier.

Ford, N., Parsons, R. e Kua, P., 2017. *Building Evolutionary Architectures. Support Constant Change*. Sebastopol: O'Reilly Media.

Furlan, G., 2019. *Cambiamento climatico: riconoscerlo e affrontarlo. Qualità della vita, rifugiati ambientali e conflitti*. Tesi di Laurea Magistrale, Università Ca' Foscari, Venezia.

George Brown College, 2019. *Impact Report 2019-2020*. [online] Disponibile su: <www.georgebrown.ca/media/5616/view> [Data di accesso: 2 luglio 2021].

Glaeser, L., 1972. *The work of Frei Otto*. New York: The Museum of Modern Art.

Gruber, P. e Benti, D., 2013. Biomimetic strategies for innovation and sustainable development. *Sustainable Building Conference SB13*, Il Cairo, Egitto, 6-7 novembre 2013. Il Cairo: SB13.

Harris, D., 2016. *How can biomimicry be used to enhance the design of an architectural column?*. Ph.D. dissertation, Università Deakin, Geelong, Australia. [doi: 10.13140/RG.2.1.3101.4008].

Hensel, M., Menges, A., 2006. Differentiation and performance: multi-performance architectures and modulated environments. *Architectural Design*, 76(2), pp. 60-69. [doi: 10.1002/ad.241].

Hewitt, E., 2019. *Technology Strategy Patterns. Architecture as Strategy*. Sebastopol: O'Reilly Media.

Hielscher, S. e Smith, A., 2014. Community-Based Digital Fabrication Workshops: A Review of the Research Literature. *SWPS 2014-08*. [doi: 10.2139/ssrn.2742121].

Hu, W. S., 2018. *Engineering Principles in Biotechnology*. Hoboken: Wiley.

Ingold, T., 2012, Toward an Ecology of Materials. *Annual Review of Anthropology*, Vol. 41, pp. 427-442. [doi: 10.1146/annurev-anthro-081309-145920].

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core* (Writing Team, Pachauri R.K., e Meyer, L.A. eds.). Ginevra: IPCC.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O.

Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)). Cambridge: Cambridge University Press.

Jamei, E. e Vrcelj, Z., 2021. Biomimicry and the Built Environment, Learning from Nature's Solutions. *Applied Sciences*, 11(7514). [doi: 10.3390/app11167514].

Jencks, C., 1984. *The language of post-modern architecture*, New York: Rizzoli Intl Pubns.

Keating, S., Leland, J., Cai, L. e Oxman, N., 2017. Towards Site-Specific and Self-Sufficient Robotic Fabrication on Architectural Scales. *Science Robotics*, 2(5).

Khan, Y. e Laurencin, C. T., 2018. *Regenerative Engineering. Advanced Materials Science Principles*, Boca Raton: CRC Press.

Khoshtinat, S., 2015. *Algorithms In Nature & Architecture (Biomimetic Architecture)*. Presentazione al corso di Laurea Magistrale dell'Università degli Studi di Firenze.

Klein, L., 2009. *A Phenomenological interpretation of Biomimicry and its potential value for Sustainable Design*. Tesi di Laurea Magistrale, Kansas State University, Manhattan, Kansas, Stati Uniti d'America.

Kolarevic. B., 2001. Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age. In; *Atti della 21st Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture: Reinventing the Discourse - How Digital Tools Help Bridge and Transform Research, Education and Practice in Architecture*. Buffalo, 11-14 ottobre 2001, pp. 268-277. New York: ACADIA.

Kolarevic, B., Parlac, V. e Johnson, J., 2008. Architecture in the Post-Digital Age: Towards Integrative Design. *International Journal of Architectural Computing*, Vol. 7, Issue 3, pp. 653-658.

Köllner, P., Gross, C., Lerch, J., Nauser, M., 2017. *Studi sull'ambiente n. 1706: Rischi e opportunità legati ai cambiamenti climatici. Sintesi nazionale*. Berna: Ufficio federale dell'ambiente (UFAM).

Kumar, V., Dasgupta, N. e Ranjan, S., 2018. *Environmental Toxicity of Nanomaterials*, Boca Raton: CRC Press.

La Magna, R., Gabler, M., Reichert, S., Schwinn, T., Waimer, F., Menges, A. e Knippers, J., 2013, From Nature to Fabrication: Biomimetic Design Principles for the Production of Complex Spatial Structures. *International Journal of Space Structures*, Vol. 28, No. 1, pp. 27-39. [doi: 10.1260/0266-3511.28.1.27].

Larsen, N. M., Österlund, T., Foged, I. W., Jensen, S. e Christiansen, K., 2016. *Perspectives on Digital Fabrication in Tomorrow's Architecture*, Copenhagen: Arkitektskolens Forlag.

Lin, A.Y.M., Meyers, M.A. e Vecchio, K.S., 2006. Mechanical properties and structure of *Strombus gigas*, *Tridacna gigas*, and *Haliotis rufescens* sea shells: A comparative study. *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 26, Issue 8, pp. 1380-1389. [doi: 10.1016/j.msec.2005.08.016].

Lipholt, N., 2019. *Biomimicry - Where Nature is Changing Innovation*. Tesi di Laurea Magistrale, Università di Twente, Enschede, Paesi Bassi.

Lotfi, N., 2014. *Nature-Inspired Design Processes: The Adaption of various Principles of Biology as the base for a Holistic Approach towards a New Strategy within the Design Process*. Tesi di Laurea Magistrale, German University in Cairo, New Cairo City, Egitto. [doi: 10.13140/RG.2.1.3473.7526].

Lo Turco, M., 2015. *Il BIM e la rappresentazione infografica nel processo edilizio. Dieci anni di ricerche e applicazioni*, Ariccia: Aracne Editrice.

Lucarelli, M. L., Mussinelli, E. e Daglio, L., 2018. *Progettare Resiliente*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli.

Macchiati A., 2021. *Le Politiche contro il cambiamento climatico nell'Unione Europea e in Italia*. [pdf] ASTRID. Disponibile su: <www.astrid-online.it/static/upload/protected/Macc/Macchiati_cambiamento-climatico.pdf> [Data di accesso: 12 maggio 2021].

Magdassi, S. e Kamyshny, A., 2017. *Nanomaterials for 2D and 3D Printing*, Hoboken: Wiley.

Melis, A., 2020. *ZombieCity. Strategie urbane di sopravvivenza agli zombie e alla crisi climatica*, Roma: D editore, pp. 61-83.

Merloni, E., 2017. *La capacità di adattamento delle imprese vitivinicole ai cambiamenti*

climatici: il caso del Sangiovese in Emilia-Romagna. Ph.D. dissertation, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Bologna.

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014. *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici*. Disponibile su: <pdcc.minambiente.it/sites/default/files/allegati/Strategia_nazionale_adattamento_cambiamenti_climatici.pdf> [Data di accesso: 6 maggio 2021].

Mosseri, A., 2004, Structural design in nature and in architecture. *Design and nature II*, Vol. 73, pp. 589-599. [doi: 10.2495/DN040581].

Nessim, M. A., 2016. *Biomimetic Architecture as a new approach for energy efficient buildings*. Ph.D. dissertation, Cairo University, Giza, Egitto.

Niklas, K. J., 1992. *Plant Biomechanics. An Engineering Approach to Plant Form and Function*, Chicago: The University of Chicago Press.

O'Rourke, J. M., 2013. *Environmentally Sustainable Bioinspired Design: Critical Analysis and Trends*. Tesi di Laurea Magistrale, University of Texas at Austin, Austin, Texas, Stati Uniti d'America.

Oxman, N., 2007. Get Real: Towards Performance Driven Computational Geometry. *International Journal of Architectural Computing*, Vol. 4, Issue 5, pp. 663-684.

Oxman, N., 2010. *Material-based Design Computation*. Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, Stati Uniti d'America.

Oxman, N., 2011. Variable Property Rapid Prototyping. *Journal of Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 6, Issue 1, pp. 3-31. [doi: 10.1080/17452759.2011.558588]

Oxman, N., 2013. Towards a Material Ecology. In: *Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, San Francisco, California, 18-21 ottobre 2012, pp. 19-20. San Francisco: ACADIA. [ISBN 978-1-62407-267-3].

Oxman, N., Laucks, J., Kayser, M., Uribe, C. D. G. e Duro-Royo, J., 2013. Biological Computation for Digital Design & Fabrication. In: *Computation and Performance - Proceedings of the 31st eCAADe Conference*, Vol. 1, pp. 585-594. Faculty of Architecture,

Delft University of Technology, 18-20 settembre 2013. Delft: TU Delft.

Oxman, N., Laucks, J., Kayser, M., Duro-Royo, J. e Gonzales-Uribe, C., 2014. Silk Pavilion: A Case Study in Fiber-based Digital Fabrication. *FABRICATE*, pp. 248-255.

Oxman, N., Ortiz, C., Gramazio, F., Kohler M., 2014. Material Ecology. *Computer-Aided Design*, Vol. 60, pp. 1-2. Amsterdam: Elsevier.

Pagani, R., Chiesa, G., Tulliani, J. M., 2015. *Biomimetica e Architettura. Come la natura domina la tecnologia*. Milano: FrancoAngeli.

Pauw, I., Kandachar, P., Karana, E., Peck, D. e Wever, R., 2010. Nature inspired design: Strategies towards sustainability. In: *Knowledge Collaboration & Learning for Sustainable Innovation: 14th European Roundtable on Sustainable Consumption and Production (ERSCP) conference and the 6th Environmental Management for Sustainable Universities (EMSU) conference*, Delft, Paesi Bassi, 25-29 ottobre 2010, Vol. 1, pp. 1-21.

Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T., 2007. Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 11, pp. 1633-1644. [doi: 10.5194/hess-11-1633-2007].

Perez-Garcia, A. e Gómez-Martínez, F., 2009. Natural structures: Strategies for geometric and morphological optimization. In: *Universitat Politècnica de València International Association for Shell and Spatial Structures Symposium*, Valencia, Spagna, 28 settembre - 2 ottobre 2009. Valencia: IASS.

Piana, M., 2012. *Leghe SMA per applicazioni biomimetiche*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Milano, Milano.

Piantanida, P., 2018. Principi di biomimetica e progetto. Esempi e appunti di método. *Arquitecto*, Vol. 65. [doi: 10.30972/arq.0114198].

Pugno, N., 2013, Effetto loto. *Le Scienze*, Vol. 537, pp. 58-63.

Rao, R., 2014. Biomimicry in Architecture. *International Journal of Advanced Research in Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering and Developing*, 1(3), pp. 101–107. [doi: 10.23968/2500-0055-2018-3-4-3-12].

Rust, W. C., 2011. *Blueprints from Nature. Investigating a biomimetic approach to architecture*. Tesi di Laurea Magistrale, University of Cape Town, Città del Capo, Sudafrica.

Sennet, R., 2008, *L'uomo artigiano*, Milano: Feltrinelli.

Shelden, D. R., 2002. *Digital Surface Representation and the Constructibility of Gehry's Architecture*. Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, Stati Uniti d'America.

Siani, R., n.d. *Il Processo Biomimetico Sistemico nel progetto tecnologico di Architettura. Strumenti Metodologici, Informatici e Meccanici*. Ph.D. dissertation, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli.

Simondetti, A., 2020. *Designing with Digital Fabrication*. ARUP, Londra, Regno Unito. Disponibile su: <www.arup.com/perspectives/publications/promotional-materials/section/designing-with-digital-fabrication> [Data di accesso: 27 maggio 2021].

Sousa, M.L., Dimova, S., Athanasopoulou, A., Rianna, G., Mercogliano, P., Villani, V., Nogal, M., Gervasio, H., Neves, L., Bastidas-Arteaga, E., Tsionis, G., 2020. Expected implications of climate change on the corrosion of structures. In: *EUR 30303 EN, Publications Office of the European Union*, Lussemburgo: Publications Office of the European Union. [ISBN 978-92-76-20782-5], [doi:10.2760/05229, JRC121312].

Stach, E., 2010. Structural morphology and self-organization. *Design and Nature V*, Vol. 138, pp. 29-40. [doi: 10.2495/DN100041].

Tang, G., 2012. The Rise and Fall of The Thin Concrete Shell. In: *Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork*, University of Bath, giugno 2012. Bath: Orr, J., Evernden, M., Antony, D. e Ibell, T., pp. 324-333.

Tolve, A., 2020. *Changing buildings for a changing climate. Valutazione degli effetti del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Torino.

Toscano, E., 2019. La dimensione socio-materiale della creatività. FabLab, makers e artigiani digitali. *FormaMente. Supplemento 2019*, Vol. 14, No. 2, pp. 197-208.

Tsai, E., Firstenberg, M., Laucks, J., Lehnert, B., Shterman, Y. e Oxman, N., 2012.

CNSilk: Spider-Silk Inspired Robotic Fabrication. In: Brell-Çokcan, S. e Braumann, J., 2012. *Proceedings of Rob-Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*. Vienna: Springer, pp.161-166. [doi: 10.1007/978-3-7091-1465-0_17]

Von der Leyen U., 2019. A Union that Strives for More: My Agenda for Europe: Political Guidelines for the Next European Commission 2019-2024. Lussemburgo: Publications Office of the European Union. [doi: 10.2775/018127].

UK Climate Impacts Programme, 2018. *Identifying adaptation options*. [pdf] Oxford: UKCIP. Disponibile su: <www.ukcip.org.uk/wp-content/PDFs/ID_Adapt_options.pdf> [Data di accesso: 15 aprile 2021].

United Nations Environment Programme, 2020. *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi: GlobalABC.

Werritty, A., 2010. D'Arcy Thompson's 'On Growth and Form' and the Rediscovery of Geometry within the Geographic Tradition. *Scottish Geographical Journal*, Vol. 126, Issue 4, pp. 231-257. [doi:10.1080/14702541.2010.549344].

Wypych, G., 2017. *Atlas of Material Damage*. 2nd Edition, Toronto: ChemTec Publishing.

Sitografia

Accademia Gallery, 2016. I Prigionieri o Schiavi di Michelangelo all'Accademia. *Accademia.org*. [online] Disponibile su: <www.accademia.org/it/esplora-il-museo/le-opere/i-prigionieri-schiavi-di-michelangelo/> [Data di accesso: 12 agosto 2021].

Agenzia Giornalistica Italia, 2020. Le conseguenze del cambiamento climatico sulle nostre case. *Agì.it*. [online] Disponibile su: <www.agi.it/scienza/news/2020-10-15/conseguenze-cambiamento-climatico-nostre-case-9959611/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Alleanza Italiana per lo Sviluppo Sostenibile, 2021. FOCUS. Biomimetica: l'imitazione della natura ha il potenziale per risolvere le sfide del futuro. *Asvisi.it*. [online] Disponibile su: <asvis.it/goal9/home/425-8587/focusbiomimetica-limitazione-della-natura-ha-il-potenziale-per-risolvere-le-sfide-del-futuro> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Arnold Glas, 2017. ORNILUX® Bird Protection Glass [Arnoldglas.de](http://arnoldglas.de). [online] Disponibile su: <www.arnold-glas.de/en/products/pi-isolar-ornilux-704924742> [Data di accesso: 28 luglio 2021].

Asknature, 2020. Building Material Inspired by Marine Sponges – Innovation. *AskNature.org*. [online] Disponibile su: <asknature.org/innovation/building-materials-inspired-by-marine-sponges/> [Data di accesso: 5 luglio 2021].

Asknature, 2020. Quorum Determines New Hive Site - Biological Strategy. *AskNature.org*. [online] Disponibile su: <asknature.org/strategy/quorum-determines-new-hive-site/> [Data di accesso: 5 luglio 2021].

Autorità europea delle assicurazioni e delle pensioni aziendali e professionali, 2021. *EIOPA*. [online] Disponibile su: <www.eiopa.europa.eu/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Barlaam, R., 2019. Gli Stati Uniti escono dall'accordo sul clima, formalizzato il ritiro. *Il Sole 24 Ore*. [online] Disponibile su: <www.ilsole24ore.com/art/ora-e-ufficiale-stati-uniti-escono-dall-accordo-clima-ACqUNpw?refresh_ce=1> [Data di accesso: 2 giugno 2021].

Barnhorn, A., Caudill, L. e Obbie, K., 2017. 60 Years of CAD Infographic: The History

of CAD since 1957. [online] *CADENAS PARTsolutions*. Disponibile su: <partsolutions.com/60-years-of-cad-infographic-the-history-of-cad-since-1957/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Battisti, C., 2015, You don't know how? Ask Nature!. *Carlobattisti.com*. [online] Disponibile su: <carlobattisti.com/2015/04/15/you-dont-know-how-ask-nature/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Belmont, A., 2021. Flower Photography. *Anne Belmont*. [online] Disponibile su: <www.annebelmontphotography.com/> [Data di accesso: 5 luglio 2021].

Benedusi, S., 2014. Perdono. *Earthdayitalia.org*. [online] Disponibile su: <cambiamoclima.earthdayitalia.org/portfolio.php?page=0> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Biomimicry for Social Innovation, 2014. Life's Principles - Biomimicry for Social Innovation. *Biomimicry for Social Innovation*. [online] Disponibile su: <www.bio-sis.net/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Biomimicry Institute, 2015. *Biomimicry Toolbox*. [online] Disponibile su: <toolbox.biomimicry.org/methods/process/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Biomimicry Institute, 2021. *AskNature.org*. [online] Disponibile su: <www.asknature.org> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Biomimicry Institute, 2021. *Biomimicry.net*. [online] Disponibile su: <biomimicry.net/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Biomimetic Summit, 2013. Summit Programme. *Biomimetic Programme*. [online] Disponibile su: <biomimeticsummit.wordpress.com/summit-programme/> [Data di accesso 21 agosto 2021].

Biomimicry Toolbox, 2013. Nature's Unifying Patterns. *Biomimicry Toolbox*. [online] Disponibile su: <toolbox.biomimicry.org/core-concepts/natures-unifying-patterns/> [Data di accesso: 21 agosto 2021].

Biomimicry Toolbox, 2015. Function and Strategy. *Biomimicry Toolbox*. [online] Disponibile su: <toolbox.biomimicry.org/core-concepts/function-and-strategy/> [Data di accesso: 21 agosto 2021].

Biomimicry Toolbox, 2017. Biomimicry Design Spiral. *Biomimicry Toolbox*. [online] Disponibile su: <toolbox.biomimicry.org/wp-content/uploads/2017/10/Design.Spiral-Diagram_10.17.pdf> [Data di accesso: 21 agosto 2021].

Biomimicry 3.8., 2020. DesignLens: Life's Principles. *Biomimicry 3.8*. [online] Disponibile su: <biomimicry.net/the-buzz/resources/designlens-lifes-principles/> [Data di accesso: 21 agosto 2021].

Bongio, A., 2021. La fabbricazione digitale per architetti e designer. *Faberlab.org*. [online] Disponibile su: <www.faberlab.org/la-fabbricazione-digitale-per-architetti-e-designer/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Burrows, L., 2020. Marine sponges inspire the next generation of skyscrapers and bridges. Bioinspired architecture could pave the way for stronger, lighter structures. *Harvard.edu*. [online]. Disponibile su: <www.seas.harvard.edu/news/2020/09/marine-sponges-inspire-next-generation-skyscrapers-and-bridges> [Data di accesso: 8 luglio 2021].

Callebaut, D., 2021. Lilypad. *Vincent Callebaut Architectures*. [online] Disponibile su: <vincent.callebaut.org/zoom/projects/080523_lilypad/lilypad_pl005> [Data di accesso: 10 ottobre 2021].

Calvert, J., 2011. Enertia. *Uspto.gov*. [online] Disponibile su: <www.uspto.gov/learning-and-resources/newsletter/inventors-eye/enertia> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Camera dei deputati, 2021. Cambiamenti climatici - Ambiente e gestione del territorio - Politica estera e questioni globali. *Documentazione parlamentare*. [online] Disponibile su: <temi.camera.it/leg18/temi/tl18_cambiamenti_climatici.html> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Canadelli, E., 2021. Nota su le Kunstformen der Natur. *Università degli Studi di Milano*. [online] Disponibile su: <www.lettere.unimi.it/Spazio_Filosofico/imago/haeckel/elenacandelli_link11.html> [Data di accesso: 29 luglio 2021].

Capritti, R., 2020. Pniec, pubblicato il testo definitivo. *InfoBuildEnergia.it*. [online] Disponibile su: <www.infobuildenergia.it/pniec-pubblicato-il-testo-definitivo/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Chiorino, M. A., 2014. Torri e grattacieli, quali sono i criteri di costruzione?. *Teknoring*.

Il portale delle professioni tecniche. [online] Disponibile su: <www.teknoring.com/news/infrastrutture/torri-e-grattacieli-quali-sono-i-criteri-di-costruzione/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Commissione europea, 2016. *Ec.europa.eu*. [online] Disponibile su: <ec.europa.eu/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Commissione europea e Agenzia europea dell'ambiente, 2017. Climate-ADAPT. *Climate-ADAPT.eea.europa.eu*. [online] Disponibile su: <climate-adapt.eea.europa.eu/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Consiglio dell'Unione europea, 2021. *Consilium.europa.eu*. [online] Disponibile su: <<https://www.consilium.europa.eu/it/>> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Consiglio dell'Unione europea, 2021. *Europa.eu*. [online] Disponibile su: <www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Coscienza universale, 2016. Tecnologia: Progettato nuovo materiale simile alla tela del ragno. *Coscienza Universale*. [online] Disponibile su: <www.coscienza-universale.com/tecnologia/tecnologia-progettato-nuovo-materiale-simile-alla-tela-del-ragno/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Credi, B., 2014. Biomimetica: a scuola da Madre Natura. *LaStampa.it*. [online] Disponibile su: <web.archive.org/web/20141018140640/http://www.lastampa.it/2014/06/30/scienza/ambiente/green-news/biomimetica-a-scuola-da-madre-natura-TifeLggGxSc7e2mpmpj43J/pagina.html> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Dégruel, P. M., 2017. Mangal City. *Cercle*. [online] Disponibile su: <www.cerclemagazine.com/magazine/articles-magazine/mangal-city/> [Data di accesso: 14 ottobre 2021].

De Luigi, S., 2021, Life. *Stefanodeluigi.com*. [online] Disponibile su: <www.stefanodeluigi.com/life.html> [Data di accesso: 13 agosto 2021].

Diana, M., 2021. Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima 2030 (PNIEC) - ENEA - Dipartimento Unità per l'efficienza energetica. *Enea.it*. [online] Disponibile su: <www.energiaenergetica.enea.it/glossario-efficienza-energetica/lettera-p/piano-nazionale-integrato-per-l-energia-e-il-clima-2030-pniec.html> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Di Salvo, S., 2019. Eastgate Complex: un edificio bionico per la riduzione dei consumi energetici *Architettura resiliente*. [online] Disponibile su: <it.architetturaresiliente.com/eastgate-complex-un-edificio-bionico-per-la-riduzione-dei-consumi-energetici/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Engineering timelines, 2012. Engineering Timelines - Robert Maillart. *Engineering-timelines.com* [online] Disponibile su: <www.engineering-timelines.com/who/Maillart_R/maillartRobert10.asp> [Data di accesso: 4 agosto 2021].

EPEA - Part of Drees & Sommer, 2016. Cradle to Cradle. *EPEA*. [online] Disponibile su: <epea.com/en/about-us/cradle-to-cradle> [Data di accesso: 8 maggio 2021].

European Environment Agency, 2020. *Eea.europa.eu*. [online] Disponibile su: <www.eea.europa.eu/it/themes/climate/policy-context> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Fantasy, 2021, Le aragoste migliorano il cemento da stampare in 3d da RMIT University. *Stampare in 3D*. [online] Disponibile su: <stamparein3d.it/le-aragoste-migliorano-il-cemento-da-stampare-in-3d-da-rmit-university/> [Data di accesso: 14 luglio 2021].

Fondazione Eduardo Torroja, 2015. Biography. *Fundacioneduardotorroja.org*. [online] Disponibile su: <www.fundacioneduardotorroja.org/index.php/en/eduardo-torroja/biografia.html?showall=1&limitstart> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Gantar, G., 2021. Four seasons tent tower. *OFIS Architecture*. [online] Disponibile su: <www.ofis.si/eng/projects/public/four_seasons_tent_tower.html> [Data di accesso: 20 ottobre 2021].

GenitronSviluppo, 2012. AskNature.org: Dalla Biomimesi per Scoprire la Vera Natura delle Cose. [PT.1] Quando Ecodesign, Innovazione Sostenibile e Progettazione Sistemica Diventano un Social Network. *GenitronSviluppo.com*. [online] Disponibile su: <www.genitronsviluppo.com/2009/02/27/asknatureorg-dalla-biomimesi-scoprire-la-vera-natura-delle-cose-pt1-quando-ecodesign-innovazione-sostenibile-progettazione-sistemica-diventano-social-network/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Global Alliance for Buildings and Construction, 2020. *Globalabc.org*. [online] Disponibile su: <globalabc.org/news/launched-2020-global-status-report-buildings-and-construction> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico, 2014. AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 - IPCC. *Ipcc.ch*. [online] Disponibile su: <www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Hermand-Grisel, S., 2020. Photography and Climate Change Awareness - Part 1. *AllAboutPhoto.com*. [online] Disponibile su: <www.all-about-photo.com/photo-articles/photo-article/621/photography-and-climate-change-awareness-part-1> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Hunt, K., 2019. Material Transitions: Towards Life-Friendly Chemistry. IBI Group. [online] Disponibile su: <www.ibigroup.com/ibi-insights/life-friendly-chemistry/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Isle, N. e Leitch, E., 2021. Biomimicry - Life's Principles: Applying the Laws of Nature. *Oregon State Bar Sustainable Future Section*. [online] Disponibile su: <sustainablefuture.osbar.org/section-newsletter/20101spring6isleleitch/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Kane, J. e Avedon, R., 1994. Moi goes to Washington. *The New Yorker*. [online] Disponibile su: <www.newyorker.com/magazine/1994/05/02/moi-goes-to-washington> [Data di accesso: 4 maggio 2021].

Kane, J., 2017. Moi Goes to Washington. *Wildculture.com*. [online] Disponibile su: <www.wildculture.com/article/moi-goes-washington/1658> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Learn2Lean, 2016. Biomimicry in Government Structure. *Mr. Dunn's Government Class*. [online] Disponibile su: <mc2stemgovernment.wordpress.com/2016/09/06/biomimicry-in-government-structure/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Le Scienze, 2012. I segreti ingegneristici della tela del ragno. *Le Scienze*. [online] Disponibile su: <www.lescienze.it/news/2012/02/03/news/ragnatela_seta_resistenza_struttura_cedimenti_localizzati_ingegneria_strutturale-828953/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Liakopoulos, D., 2020. Il regime giuridico dei cambiamenti climatici nell'ambito internazionale e comunitario. *Ambientediritto.it*. [online] Disponibile su: <[www.ambientediritto.it/dottrina/Dottrina_2005/cambiamenti_climatici_Liakopoulos.htm#\(21\)_](http://www.ambientediritto.it/dottrina/Dottrina_2005/cambiamenti_climatici_Liakopoulos.htm#(21)_)> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Medaarch, 2015. BIOlogic | Ricerche e progetti bio-based. *Medaarch.com*. [online] Disponibile su: <www.medaarch.com/biologic> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Mediated Matter Group, 2014. Silk Pavilion. *Mediated Matter*. [online] Disponibile su: <mediatedmattergroup.com/silk-pavilion> [Data di accesso: 18 giugno 2021].

Merotto, A., 2019. Perché il Legno è Anisotropo? Ecco Come Funziona un Albero. *Wood Lab.info*. [online] Disponibile su: <www.woodlab.info/materiale-legno/come-funziona-un-albero-terza-parte-la-resistenza/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Michielin, D., 2018. Imitare la natura. *Il Tascabile*. [online] Disponibile su: <www.iltascabile.com/scienze/biomimesi-imitare-natura/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Ministero della Transizione Ecologica, 2014. *Minambiente.it*. [online] Disponibile su: <www.mite.gov.it/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Ministero dello Sviluppo Economico, 2018. *Mise.gov.it*. [online] Disponibile su: <www.mise.gov.it/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

MIT Media Lab, 2012. Project Overview, Silk Pavilion - MIT Media Lab. *Media.mit.edu*. [online] Disponibile su: <www.media.mit.edu/projects/silk-pavilion/overview/> [Data di accesso: 23 marzo 2021].

Modica, M. V., 2015. Lo straordinario mimetismo del polpo. *Imperial Bulldog*. [online] Disponibile su: <www.imperialbulldog.com/2015/12/30/lo-straordinario-mimetismo-del-polpo/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Museo Nazionale delle Arti del XX secolo, 2021. Sebastião Salgado. *MAXXI*. [online] Disponibile su: <www.maxxi.art/events/sebastiao-salgado/> [Data di accesso: 4 maggio 2021].

Museum of Contemporary Art Chicago, 2019. Buckminster Fuller, Inventions: Twelve Around One, 1981. *MCA*. [online] Disponibile su: <mcachicago.org/Collection/Items/1981/Buckminster-Fuller-Inventions-Twelve-Around-One-1981-21> [Data di accesso: 4 luglio 2021].

Natale, F., 2017. GlobalAbc: settore edilizio responsabile del 39% delle emissioni di CO2. *asvis.it*. [online] Disponibile su: <asvis.it/goal13/home/454-4974/globalabc-

settore-edilizio-responsabile-del-39-delle-emissioni-di-co2-#> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Negishi, M., 2013. Can Spider Web Be Replicated? A Japanese Startup Thinks So. *The Wall Street Journal*. [online] Disponibile su: <www.wsj.com/articles/SB10001424127887324399404578583562603579062> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Omar, R., 2013. Antoni Gaudi's Work: Casa Batlló - Barcelona - Spain. *Radwa Omar blog*. [online] Disponibile su: <radwaomar.wordpress.com/2013/09/21/antonio-gaudis-work-part-i-casa-batllo-barcelona-spain/> [Data di accesso: 13 luglio 2021].

Oxman, N., 2011. Monocoque. *Oxman.com*. [online] Disponibile su: <oxman.com/projects/monocoque> [Data di accesso: 12 giugno 2021].

Pearce, M., 2016. Eastgate Building Harare. *Mickpearce.com*. [online] Disponibile su: <www.mickpearce.com/Eastgate.html> [Data di accesso: 5 luglio 2021].

Pietroni, L., 2011. Biomimesi: Definizione, Principi e Strumenti. *GenitronSviluppo*. [online] Disponibile su: <www.genitronsviluppo.com/2011/10/27/biomimesi-definizione-principi-e-strumenti-3/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Ralph DTE, 2020. Mirabili architetti della Natura: dalle ragnatele verso la Fisica Quantistica. *Ralph DTE*. [online] Disponibile su: <www.ralph-dte.eu/tag/biomimetica-ragnatele/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Redazione FOR, 2018. Biologia e innovazione digitale, la rivoluzione dei Biofablab. *Ottimisti e Razionali*. [online] Disponibile su: <www.ottimistierazionali.it/biologia-e-innovazione-digitale-la-rivoluzione-dei-biofablab/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Regione Piemonte, 2021. Cambiamento climatico. *Regione.piemonte.it*. [online] Disponibile su: <www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/cambiamento-climatico/nuova-strategia-adattamento-dellue> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Royal, D., 2017. How Biomimicry Ensures Enduring Performance. *Azul Seven*. [online] Disponibile su: <azulseven.com/journal_entries/biomimicry-lesson-on-evolve-to-survive/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Princeton University, 2012. Major Works - Evolution of German Shells: Efficiency in

Form. *Princeton.edu*. [online] Disponibile su: <shells.princeton.edu/works.html> [Data di accesso: 6 aprile 2021].

Santulli, C., 2021. Biomimetica e materiali. *Biomimit*. [online] Disponibile su: <biomimit.blogspot.com/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Shirazi R., Sella I., Perkol-Finkel S., 2019. EConcrete – Reducing the Carbon Footprint. *EConcrete*. [online] Disponibile su: <econcretetech.com/econcrete-reducing-the-carbon-footprint-of-concrete-based-coastal-and-marine-infrastructure/> [Data di accesso: 2 marzo 2021].

Sto Corp, 2019. Coatings. *Sto Corp*. [online] Disponibile su: <www.stocorp.com/coatings-us/> [Data di accesso: 8 marzo 2021].

Storti, V., 2018. BIOlogic, il primo BioFabLab del Sud Italia. *Ruralhack*. [online] Disponibile su: <www.ruralhack.org/biologic-il-primo-biofablab-del-sud-italia/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

The Metropolitan Museum of Art, 2012. Karl Blossfeldt | Aristolochia Clematitis. *The Metropolitan Museum of Art*. [online] Disponibile su: <www.metmuseum.org/art/collection/search/261934> [Data di accesso: 5 maggio 2021].

The MIT Press, 2016. Structure in Nature is a Strategy for Design di Peter Pearce. *The MIT Press*. [online] Disponibile su: <mitpress.mit.edu/books/structure-nature-strategy-design> [Data di accesso: 5 aprile 2021].

Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea, 2021. *EUR-Lex.europa.eu*. [online] Disponibile su: <eur-lex.europa.eu/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

UKCIP, 2019. *Ukcip.org.uk*. [online] Disponibile su: <www.ukcip.org.uk/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

Università di Genova, 2013. Tessuto osseo lamellare. *Atlante di Istologia*. [online] Disponibile su: <www.istologia.unige.it/styled-19/page3/page21/page25/styled-3/index.html> [Data di accesso: 6 agosto 2021].

Unsplash, 2014. Annie Spratt. *Unsplash.com*. [online] Disponibile su: <unsplash.com/@anniespratt> [Data di accesso: 12 agosto 2021].

US Department of Commerce (NOAA), 2021. Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases. *Noaa.gov*. [online] Disponibile su: <gml.noaa.gov/ccgg/trends/> [Data di accesso: 4 aprile 2021].

Wood Lab, 2017. La risalita per capillarità e le conseguenze costruttive degli edifici in legno. *WoodLab*. [online] Disponibile su: <www.woodlab.info/materiale-legno/come-funziona-un-albero-quarta-parte-la-risalita-per-capillarita-e-le-conseguenze-costruttive/> [Data di accesso: 6 maggio 2021].

Zabatta, A., 2019. La seta del ragno e la produzione del Biosteel. *BioPills*. [online] Disponibile su: <www.biopills.net/seta-del-ragno-e-produzione-del-biosteel/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

3D Wood, 2019. Stampa 3D ed elaborazione CNC di qualità e precisione. *3DW.it*. [online] Disponibile su: <www.3dw.it/it/> [Data di accesso: 18 agosto 2021].

