



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.A. 2022/2023

Sessione di Laurea Luglio 2023

Tesi di Laurea Magistrale

**Biomimetica: insegnamenti dalla natura per
strutture ottimizzate del futuro**

Relatore:

Prof. Ing. Bernardino Chiaia

Candidato:

Marco Barba

Matricola:

281721

Abstract

Con il termine biomimetica si intende la pratica che apprende e imita le strategie trovate in natura per risolvere le sfide di tutti i giorni. Esistono due tipi di approcci per l'applicazione della biomimetica come modello di progettazione: l'approccio Top-down e l'approccio Bottom-up; nel primo caso i progettisti guardano agli organismi e alla natura come soluzioni, mentre nel secondo si parte da un organismo o ecosistema ispiratore e se ne ricerca un'applicazione innovativa. Dalla descrizione a carattere generale della biomimetica si è poi passati ad analizzare le costruzioni naturali, che proprio come quelle create dall'uomo, svolgono una moltitudine di funzioni, tra le quali il controllo della temperatura, la gestione dell'acqua e lo scambio di gas e ventilazione. Successivamente, da alcune considerazioni di tipo strutturale, si è voluto dare spazio al celebre esempio della Victoria amazonica che, grazie alle proprietà di robustezza e alla nervatura delle sue foglie, fu di ispirazione per l'opera realizzata per ospitare l'Esposizione Universale del 1851, che oggi conosciamo con il nome di Crystal Palace. Nell'elaborato non si parla di strutture in generale, ma si tratta in modo specifico il caso delle tensostrutture, le quali traggono ispirazione dalle ragnatele presenti in natura, come descritto e approfondito dall'architetto e ingegnere tedesco Frei Otto, padre delle tensostrutture moderne. La caratteristica principale di queste opere è quella di avere elementi portanti dotati di sola rigidità assiale, attiva in stato unilaterale di sollecitazione per trazione ($N > 0$). Dopodiché si sono elencate alcune informazioni relative ai sistemi di stabilizzazioni delle funi, ai sistemi spaziali, alle fondazioni e alle membrane di copertura utili a comprendere facilmente il successivo lavoro di tesi riguardante il "caso studio".

Il caso studio si incentra, dapprima sull'analogia tra la struttura leggera e la ragnatela, mettendo a confronto anche i diagrammi sforzo-deformazione dell'acciaio ad alta resistenza e dei fili di seta, e successivamente sulla presentazione di alcune possibili soluzioni ed ottimizzazioni ispirate alla natura, applicabili in ottica futura, effettuate sull'involucro esterno della tensostruttura.

Si parte dalla realizzazione e modellazione della tensostruttura, la cui forma deformata è stata realizzata tramite il caso di carico form-finding, quest'ultimo fondamentale a

minimizzare il quantitativo di materiale e ottimizzare la geometria, la stabilità e la resistenza dell'opera.

A partire dalla tensostruttura descritta, si sono approfonditi tre interventi migliorativi applicabili alla membrana esterna, fornendo sempre dei chiari riferimenti comportamentali con la natura, descritti mediante prove e studi di laboratorio. Si è quindi giunti al concepimento di polimeri autoriparanti ispirati al processo di autoguarigione presenti in alcune piante, di pannelli solari efficienti ispirate alle ali di farfalla e infine di membrane fotoniche flessibili per il raffreddamento passivo efficiente ispirate al coleottero.

L'obbiettivo che si pone la biomimetica, per il futuro, deve essere quello di ispirare ingegneri e architetti nella realizzazione di progetti che siano radicalmente sostenibili e ispirati al mondo naturale.

*A te,
cara nonna Maria
dedico la mia tesi di Laurea*

Indice

Capitolo 1: INTRODUZIONE SULLA BIOMIMETICA.....	13
Biomimetica, che cos'è?.....	13
Approcci biomimetici	15
Approccio Top-Down.....	16
Approccio Bottom-Up	16
Tre livelli di biomimetica	17
Il primo esperimento biomimetico: il volo	18
Biomimetica nelle costruzioni	20
Punto di vista di architetti e ingegneri	20
Origini degli edifici	22
Il peso, il costo e lo scopo	24
Excursus storico.....	24
Scelta dei materiali	25
Alcuni concetti chiave: trazione, compressione e instabilità euleriana.....	25
Architettura animale	28
Scala delle costruzioni animali.....	29
Animali come inventori	30
Caratteristiche delle costruzioni animali	30
Differenti metodi di costruzione nel mondo animale	36
Considerazioni di tipo strutturale	39
Architettura vegetale: La Victoria amazonica	40
Esempi di biomimetica	43
Il successo del velcro	43
Turbina eolica e colibrì.....	44
Gufo ed energia “silenziosa”	44
Il girasole “solare”	45
Esempi di biomimetica infrastrutturale	45
Eastgate building centre.....	45
The Gherkin.....	47
BIQ House: il primo edificio alimentato ad alghe.....	48
Capitolo 2: CENNI SULLE TENSOSTRUTTURE	49
Dalle origini a Frei Otto	49
La tenda	49

Frei otto	50
Dalle strutture pesanti a quelle leggere	52
Considerazioni sulle tensostrutture.....	54
Fune: il rapporto f/L	55
Metodi di stabilizzazione per funi singole.....	56
Metodi di stabilizzazione per sistemi piani di funi.....	57
Sistema piano a collegamenti verticali	57
Sistema piano a collegamenti diagonali	60
Sistemi di copertura tensostrutturale piani.....	61
Strutture di bordo e di ancoraggio	63
Sistemi spaziali	65
Effetti del vento sulle costruzioni leggere	66
Materiali da copertura.....	67
Membrane di fibra di poliestere spalmato PVC	67
Membrana in fibra di vetro spalmata in PTFE	68
Capitolo 3: CASO STUDIO.....	69
Premesse	69
Introduzione al form-finding	71
Form-finding sulla struttura analizzata.....	72
Riferimenti biomimetici	80
Meccanismi di autoguarigione rapida nelle piante e sviluppo di polimeri autoriparanti ispirati alla pianta di <i>Ficus benjamina</i>	88
Cenni.....	88
Introduzione.....	89
Materiali e metodi.....	90
Risultati dell'esperimento.....	91
Riferimento alla tensostruttura	93
Pannelli solari efficienti ispirati alle ali di farfalla	96
Riferimento alla tensostruttura	98
Membrane fotoniche flessibili ispirate al coleottero longicorne <i>Neocerambyx gigas</i> per un raffreddamento passivo efficiente	101
Introduzione.....	101
Descrizione	101
Risultati.....	103
Riferimento alla tensostruttura	105
Capitolo 4: CONCLUSIONI	108

Sitografia e Bibliografia	111
Sitografia	111
Bibliografia.....	112
Ringraziamenti	119

Indice delle figure

Figura 1: Janine Benyus, autrice del libro “Biomimicry: Innovation inspired by Nature”	14
Figura 2: Campi di applicazione della biomimetica.....	15
Figura 3: Approccio Top-down e Bottom-Up	17
Figura 4: Otto Lilienthal in volo.....	18
Figura 5: Brevetto di Otto Lilienthal	19
Figura 6: Haeckel, radiolaria	22
Figura 7: Ingresso esposizione universale di Parigi del 1900 di René Binet	23
Figura 9: Cupola geodetica di Fuller realizzata per l'Esposizione Universale del 1967	23
Figura 8: Planetarium Jena (1924-1925)	23
Figura 10: Instabilità euleriana in funzione del tipo di vincolo.....	26
Figura 11: Tokyo Dome; Tokyo, Giappone, 1998	28
Figura 12: Similitudine tra il funzionamento di una travatura Fink e l'ossatura di un cavallo.....	28
Figura 13: Sezione trasversale di un nido di termiti Apicotermes Iamani. Nell'immagine si possono notare le rampe di collegamento tra un piano e l'altro.....	29
Figura 14: Formiche tessitrici intente alla realizzazione di un ponte vivente durante l'esecuzione del proprio nido di foglie	30
Figura 16: il bordo del nido di termiti è orientato verso il sole di mezzogiorno.....	33
Figura 15: Con la sua particolare forma il termitaio fa defluire efficacemente l'acqua piovana lontana dal nido.....	33
Figura 17: Differenti fasi di costruzione della cupola necessaria al granchio della Malesia per ripararsi dalle alte maree e permettere all'animale di avere aria a sufficienza per tutta la durata dell'evento.....	34
Figura 18: Funzionamento del sistema di ventilazione dei termitai.....	35
Figura 19: Termitaio realizzato con gli escrementi delle termiti. Le cavità presenti sull'involucro esterno garantiscono una corretta ventilazione.....	35
Figura 20: Sequenza di costruzione di una ragnatela	39
Figura 21: Foglie di Victoria amazonica. Le sue foglie possono raggiungere i due metri e mezzo di diametro.....	40
Figura 22: Joseph Paxton in posa con una foglia di Victoria amazonica	41
Figura 23: Crystal Palace.....	42
Figura 24: Lappola	43
Figura 25: Primo piano di George De Mestral con il suo cane	43
Figura 26: Biomimic Wind converter e Colibri.....	44
Figura 27: Gufo	44
Figura 28: Eastgate building centre di Harare, in Zimbabwe.....	45
Figura 29: Tumuli di termiti. Da notare le dimensioni dei termitai rispetto agli alberi. 46	
Figura 30: Principio di funzionamento dell'Eastgate building centre	46
Figura 31: Nella figura a sinistra confronto del flusso del vento tra un normale grattacielo e il Gherkin; in quella di destra dettaglio del flusso del vento sulla superficie esterna.....	47
Figura 32: BIQ House, Amburgo, Germania e Vetrata contenente alghe.....	48
Figura 33: tenda dei nativi nordamericani	49
Figura 34: Frei Otto e Buckminster Fuller	50

Figura 35: Piano cartesiano rappresentante l'andamento iperbolico nel tempo dei Dead Load.....	53
Figura 36: A sinistra è raffigurato l'elemento fune sottoposto a una forza di trazione, a destra lo stesso elemento sottoposto a compressione	55
Figura 37: Rappresentazione di un sistema piano di funi con i suoi componenti principali.....	57
Figura 38: Sistema aperto soggetto a carico esterno	58
Figura 39: Sistema aperto soggetto a depressione del vento	58
Figura 40: Sistema misto soggetto prima a carico esterno e successivamente soggetto a depressione da vento.....	59
Figura 41: Sistema chiuso soggetto a carico esterno e successivamente sistema chiuso soggetto a depressione da vento	59
Figura 42: Sistema piano a collegamenti verticali	60
Figura 43: Schema simmetrico con collegamento in mezzeria tra la fune portante e quella stabilizzante	60
Figura 44: Schema asimmetrico	61
Figura 45: Schema a funi incrociate.....	61
Figura 46: Travi di funi a sistema aperto con collegamenti verticali.....	62
Figura 47: Travi di funi a sistema aperto con collegamenti inclinati	62
Figura 48: Esempio di travi di funi disposte radialmente.....	63
Figura 49: Struttura di ancoraggio a mensola.....	63
Figura 50: Schema rappresentante lo sforzo del tirante in funzione della distanza	64
Figura 51: Sistema spaziale all'aumentare del numero di cavi.....	65
Figura 52: Disposizione ortogonale tra il cavo di stabilizzazione e quello portante con relativa nomenclatura dei piani.....	66
Figura 53: Esempio di membrana di fibra di poliestere spalmata PVC	68
Figura 54: Vista in direzione z della tensostruttura con forma deformata	69
Figura 55: In alto, vista in direzione x della tensostruttura con forma deformata; in basso, vista assonometrica predefinita della tensostruttura con forma deformata	70
Figura 56: Processo di definizione del carico delle aste.....	73
Figura 57: Processo di definizione dei carichi delle superfici.....	73
Figura 58: Vista in direzione z della tensostruttura con forma originaria.....	74
Figura 59: Vista in direzione x della tensostruttura con forma originaria.....	74
Figura 60: Vista assonometrica predefinita della tensostruttura con forma originaria...	75
Figura 61: Vista in direzione z della tensostruttura con forma deformata	75
Figura 62: Vista in direzione x della tensostruttura con forma deformata	76
Figura 63: Vista assonometrica predefinita della tensostruttura con forma deformata..	76
Figura 64: In alto, vista in direzione z degli spostamenti generalizzati globali $ u $ della tensostruttura con CC1-Form-finding prestress; in basso, scala di colori rappresentante in rosso il massimo spostamento e in blu scuro il minimo.....	77
Figura 65: Rappresentazione di una ragnatela in natura con la presenza dell'hub centrale	78
Figura 66: Configurazione geometrica di una ragnatela tipo	78
Figura 67: Rappresentazione dei principali elementi strutturali che compongono la ragnatela.....	80
Figura 68: Diagramma di Sforzo-Deformazione dei fili di seta.....	81

Figura 69: Tabella rappresentante le principali caratteristiche di alcuni materiali, in particolare si sottolinea il confronto tra le proprietà della seta e quelle dell'acciaio ad alta resistenza.....	82
Figura 70: Diagramma Sforzo-Deformazione per gli acciai ad alta resistenza.....	83
Figura 71: Configurazione "funne"	84
Figura 72: Caratteristiche della Funne "PE 15"	84
Figura 73: Configurazione "Trave"	85
Figura 74: Caratteristiche della sezione tubolare "CHS 60.3x4.0"	85
Figura 75: Caratteristiche della sezione tubolare "CHS 114.3x8.0"	86
Figura 76: Caratteristiche della sezione tubolare "CHS 101.6x5.0"	87
Figura 77: Come si presenta in natura la pianta di Ficus benamina.....	89
Figura 78: Capacità di autoriparazione dei polimeri; in alto è rappresentata la frattura dovuta al danno meccanico, mentre in basso il materiale autoriparato	90
Figura 79: Preparazione del campione di corteccia. Nell'immagine di sinistra la corteccia è stata tagliata orizzontalmente con una lama. Nell'immagine al centro, la corteccia è stata tagliata con un bisturi. Nell'immagine di destra il campione è stato rimosso.	91
Figura 80: Coagulazione del lattice di Ficus benamina dopo essere stata ferita.....	92
Figura 81: Diagramma sforzo-deformazione su corteccia non danneggiata, recentemente danneggiata e 30 minuti dopo la lesione. Lo sforzo massimo di trazione è contrassegnato dall'asterisco.....	93
Figura 82: Processo di autoriparazione dei polimeri.....	94
Figura 83: Farfalla nera <i>Pachliopta aristolochiae</i>	96
Figura 84: Confronto tra la disposizione dei buchi presenti in natura nella farfalla nera e la corrispondente disposizione applicata nel film sintetico.....	97
Figura 85: Spettri di assorbimento delle quattro geometrie analizzate sotto incidenza normale per luce non polarizzata (TE+TM/2).....	97
Figura 86: rappresentazione schematica delle 4 lastre analizzate: lastra non modellata, lastra ordinata, lastra perturbata e lastra correlata	97
Figura 87: Pannelli fotovoltaici flessibili integrati in fogli EFTE.....	99
Figura 88: Bioinspired radiative cooling film	101
Figura 89: Coleottero longicorne <i>Neocerambyx gigas</i>	102
Figura 91: Spettri ottici di riflettività emisferica misurati nell'intervallo vis-NIR a incidenza normale.....	103
Figura 90: Lanugine del coleottero al microscopio elettronico.....	103
Figura 92: Immagine al microscopio elettronico delle forme piramidali superficiali del film bio-RC.....	104
Figura 93: Schema concettuale rappresentato dal coleottero, dalla lanugine sulle sue ali e dal film fotonico realizzato	105
Figura 94: Illustrazione schematica del film flessibile bioispirato. Le particelle di ceramica sono incorporate nella matrice PDMS riempita da matrici compatte di micropiramidi	105
Figura 95: Rotolo di film bio-RC	106

Capitolo 1: INTRODUZIONE SULLA BIOMIMETICA

Biomimetica, che cos'è?

“Ogni cosa che puoi immaginare, la natura l’ha già creata”.

Albert Einstein definiva la “natura” come una perfetta opera di ingegneria, fonte di ispirazione per il genio umano, e in grado di animare nel genere umano lo studio e la ricerca della biomimesi. Dal greco bios = vita e mimesis = imitazione, questa espressione è utilizzata per indicare una disciplina che si occupa dello studio e dell’imitazione delle caratteristiche degli organismi viventi, per cercare soluzioni progettuali necessarie al miglioramento delle attività e delle tecnologie.

Ci sono molteplici termini che circolano nel campo dell'architettura e del design che si riferiscono alle scienze naturali. Per studiare la biomimetica è prima necessario differenziarla da altri termini che si riferiscono alla biologia. La bioutilizzazione è l'uso diretto della vita naturale o degli oggetti all'interno degli edifici per scopi benefici. Un esempio comune di ciò è l'uso di tetti e facciate verdi. Il biomorfismo è l'uso di forme trovate in natura con uno scopo estetico o simbolico. La biomimetica, invece, è solo il trasferimento dei principi funzionali presenti in natura a funzioni analoghe in un edificio (*Pawlyn*).

Lo scopo della biomimetica è quello di trarre ispirazione dalla natura per risolvere le sfide più urgenti del mondo e garantire un futuro sostenibile per tutta la vita sulla terra.

Può essere definita come un approccio all'innovazione che cerca soluzioni sostenibili alle sfide umane emulando i modelli e le strategie collaudate della natura. Sebbene l'idea della biomimetica esista indubbiamente da migliaia di anni, non è possibile tracciare esattamente il momento preciso in cui gli esseri umani hanno iniziato a cercare soluzioni nella natura. Tuttavia, ci sono diversi esempi ben noti nel corso della storia. Un significativo esempio di biomimetismo risale al 1480 e riguarda lo studio di Leonardo da Vinci sul volo degli uccelli e la progettazione di macchine volanti. Un'altra traccia di architettura della stessa epoca è la cupola del Duomo di Firenze progettata da Filippo Brunelleschi affidandosi allo studio delle forme dei gusci d'uovo.

Fin dal passato, gli esseri umani hanno preso spunto dal mondo naturale per risolvere problemi. Storicamente, quest'arte risale al 500 a.C., quando i filosofi greci impararono dagli organismi naturali e applicarono i loro meccanismi, forme e funzioni come modello per realizzare l'equilibrio tra le diverse parti del design e creare l'idea classica di bellezza.

Questa disciplina è basata sull'osservazione del nostro pianeta e dei suoi miliardi di anni di evoluzione e sviluppo. Gli organismi biologici (animali, piante, microbi) sono stati in grado di sviluppare strategie per sopravvivere, ottimizzare la loro organizzazione e funzionamento e adattare la loro forma alla loro funzione. Come ha notato la biologa americana Janine Benyus, rinomata specialista in biomimetica: *“La natura ha già*



risolto tutte le sfide che dobbiamo affrontare. I fallimenti sono diventati fossili, e ciò che ci circonda è la chiave per la sopravvivenza”. Benyus è stato il primo scienziato ad aprire la strada alla nozione di biomimetismo alla fine degli anni '90 sviluppando la premessa di base secondo cui gli esseri umani dovrebbero emulare consapevolmente i modi della natura quando cercano soluzioni ai loro problemi, prodotti e politiche.

Figura 1: Janine Benyus, autrice del libro *“Biomimicry: Innovation inspired by Nature”*

La biomimetica è un approccio orientato alla tecnologia incentrato sulla messa in pratica delle lezioni della natura; tale disciplina può essere vista come:

- **Un modello:** Studia i sistemi della natura e li imita, utilizzandoli come ispirazione per progetti o processi con l'obiettivo di risolvere i problemi umani.
- **Una misura:** Utilizza standard ecologici per giudicare la giustezza delle innovazioni umane.
- **Un mentore:** Un modo di osservare, valutare e valorizzare la natura.

Gli studi e i risultati scientifici e tecnologici hanno migliorato la condizione umana, ma hanno anche sconvolto i sistemi terrestri in modi estremi. Di conseguenza, l'attuale generazione di ricercatori, progettisti e scienziati si trova ad affrontare problemi urgenti. Come suggerisce il nome, questa scienza mira a copiare la natura, non a esaurirla. *"La biomimetica riguarda la valutazione della natura per ciò che possiamo imparare, non per ciò che possiamo estrarre, raccogliere o addomesticare"* - Jane Benyus.

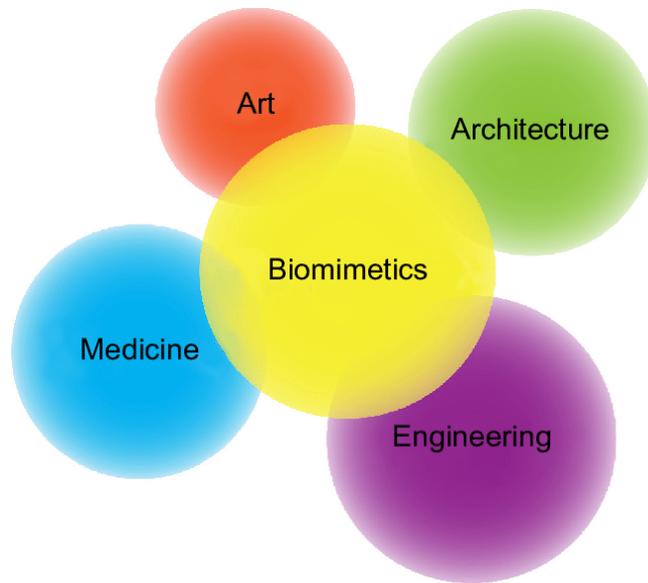


Figura 2: Campi di applicazione della biomimetica

Il concetto si fonda su un'idea chiave, secondo la quale la natura opera seguendo i principi di economia ed efficienza senza generare rifiuti, come disse il famoso chimico francese Antoine Lavoisier *"Nulla si perde, nulla si crea, tutto si trasforma"*. Indipendentemente dal campo di applicazione, la filosofia biomimetica fa parte di una strategia globale di sviluppo responsabile e sostenibile che mira a bilanciare il modo in cui vengono utilizzate le risorse del pianeta. Nella sua forma più semplice si riferisce alla progettazione e la produzione di materiali, strutture e sistemi che sono modellati su entità e processi biologici. Questo concetto deriva dalla consapevolezza che microbi, piante e animali si sono evoluti per far fronte alle sfide ambientali. Il termine è stato ideato dal fisico americano Otto Schmitt. Per lui questa visione della natura rappresentava un approccio biologico all'ingegneria in contrasto con la "biofisica", che descrive un approccio ingegneristico e fisico alla biologia.

Approcci biomimetici

Esistono diversi approcci per l'applicazione della biomimetica come modello di progettazione. Prima di tutto, in letteratura possono essere identificate due strategie di progettazione. Al fine di sviluppare un design innovativo ispirato alla natura, si può

partire da un problema di progettazione o da un bisogno umano e trovare una soluzione in un organismo o ecosistema, definito "approccio Top-Down", o iniziare da un organismo o ecosistema ispiratore e trovare un'applicazione innovativa per le sue proprietà nei disegni umani, denominata "approccio Bottom-Up".

Approccio Top-Down

Il primo approccio incontra diverse terminologie o varianti nello stato dell'arte, in cui l'approccio Top-Down è ulteriormente chiamato "Problem-Driven Biologically Inspired Design" e "Challenge to Biology" dal Biomimicry Institute. Da questa gamma di denominazioni, si può facilmente capire come i progettisti guardano agli organismi e alla natura come soluzioni. Una volta definito un problema tecnico, i progettisti possono identificare organismi o ecosistemi che hanno risolto problemi simili. L'aspetto più importante di questa variante è infatti la conoscenza del ricercatore degli obiettivi e dei punti deboli della progettazione. L'approccio dall'alto verso il basso è uno sviluppo graduale che inizia con una domanda delle scienze ingegneristiche per risolvere una sfida tecnica. Pertanto, l'approccio dall'alto verso il basso è talvolta chiamato anche processo di spinta della tecnologia. L'approccio top-down è definito come un processo di sviluppo biomimetico in cui un prodotto tecnico funzionale esistente viene dotato di funzioni nuove o migliorate attraverso il trasferimento e l'applicazione di principi biologici. Poiché il progetto è avviato da una domanda specifica basata su un'applicazione dell'industria o delle scienze ingegneristiche piuttosto che da una domanda di base orientata alla ricerca, il livello di inventiva e il progresso scientifico sono generalmente inferiori rispetto ai progetti dal basso verso l'alto. Il vantaggio di un progetto top-down risiede nel suo tempo di sviluppo solitamente relativamente breve, tipicamente da 2 a 4 anni, che si adatta bene ai periodi di pianificazione abituali nel settore.

Approccio Bottom-Up

La seconda strategia si basa su un approccio inverso rispetto al primo ed è indicata come "approccio Bottom-Up" o "Biologia che influenza il design". Allo stesso modo, questo approccio presenta una serie di sinonimi nella revisione della letteratura. Di conseguenza,

"Solution-Driven Biologically Inspired Design" e "Biology to Design" sono termini che designano la stessa metodologia. Qui, l'approccio dipende dalla conoscenza precedente della ricerca biologica e delle soluzioni che potrebbero affrontare problemi che devono ancora essere identificati. L'approccio dal basso verso l'alto è anch'esso un processo di sviluppo graduale e sistematico, ma con la differenza che inizia con una domanda posta dalla biologia per comprendere i sistemi biologici. Per questo motivo, l'approccio dal basso verso l'alto è noto anche come processo di spinta biologica.

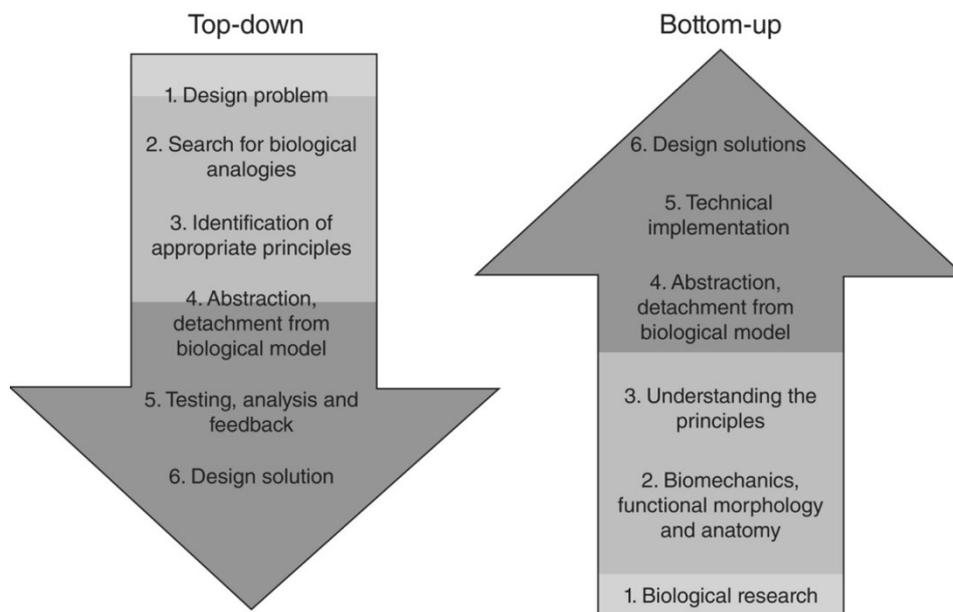


Figura 3: Approccio Top-down e Bottom-Up

Tre livelli di biomimetica

Oltre a questa duplice metodologia per progettare con la natura, tre livelli possono essere identificati al biomimetismo: il livello dell'organismo, il livello di comportamento e il livello dell'ecosistema. In primo luogo, il livello dell'organismo illustra l'imitazione della forma di un organismo o di una parte di questo organismo su un disegno. In secondo luogo, il comportamento o il processo che un organismo adotta per interagire con il suo ambiente può essere riprodotto in un progetto e, infine, il livello più difficile da imitare è il livello dell'ecosistema costituito da complesse interazioni tra processi e organismi. Quando si va più in dettaglio, ogni livello può essere intrapreso in una certa dimensione. Cinque dimensioni definiscono ulteriormente come la natura è stata imitata in un

progetto: dal modo in cui appare (forma), di cosa è fatta (materiale), come è fatta (costruzione), come funziona (processo) e qual è la sua capacità (funzione).

Il primo esperimento biomimetico: il volo

I primi tentativi registrati di biomimetica riguardano il volo. Secondo fonti storiche, il poeta del IX secolo Abbas ibn Firnas e il monaco dell'XI secolo Eilmer di Malmesbury tentarono di volare sbattendo le ali che erano attaccate alle loro braccia. Nel 1485, Leonardo da Vinci iniziò a studiare il volo degli uccelli. Si rese conto che gli umani sono troppo pesanti, e non abbastanza forti, per volare usando le ali provvisorie attaccate alle braccia.

Non c'è traccia di Da Vinci che costruì e testò un tale dispositivo ma, nel 1841, un uomo di nome Manojlo fece proprio questo. Decollò dal tetto di un edificio di Belgrado e sopravvisse fortuitamente mentre atterrava in un mucchio di neve.

Fu Otto Lilienthal la prima persona a fare voli ben documentati, ripetuti e di successo. Pioniere tedesco dell'aviazione, divenne noto come “l'uomo volante”.

Inizialmente cercò, come altri prima di

lui, di volare sbattendo le ali che aveva legato alle braccia. Dopo la formazione come ingegnere, iniziò a studiare il volo degli uccelli, specialmente delle cicogne, e descrisse l'aerodinamica delle loro ali. Sulla base di questa ricerca sul volo degli uccelli, sviluppò un aliante in cui poteva cambiare il centro di gravità spostando il suo corpo. Sfortunatamente, i suoi alianti erano difficili da manovrare e tendevano ad abbassarsi, portando alla perdita del volo. Solo le sue gambe e la parte inferiore del corpo potevano essere spostati e questo limitava la quantità di spostamento di peso che poteva essere raggiunto. Tuttavia, nel 1893 raggiunse distanze di volo fino a 250 m.



Figura 4: Otto Lilienthal in volo

Dall'altra parte dell'Atlantico, i fratelli Orville e Wilbur Wright vennero a conoscenza delle imprese di Otto Lilienthal e dei suoi voli in alianti. In seguito, affermarono che la morte di Lilienthal fu il catalizzatore per il loro lavoro sul volo con equipaggio. Studiarono tutto ciò che potevano trovare sull'aeronautica, incluso il lavoro del "padre dell'aviazione", Sir George Cayley. Cayley identificò le quattro forze che agiscono su un veicolo volante: peso, sollevamento, resistenza e spinta. Il design moderno degli aerei si basa su queste scoperte e sull'importanza di avere una curvatura della superficie superiore delle ali.

Un vantaggio che i fratelli Wright avevano rispetto ai loro predecessori che stavano tentando di volare era la recente invenzione del motore a combustione interna. Nonostante il destino di Lilienthal, i fratelli Wright si esercitarono a

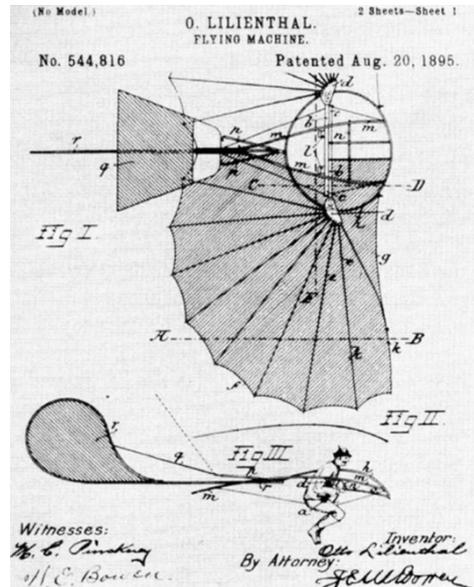


Figura 5: Brevetto di Otto Lilienthal

planare in modo da poter padroneggiare l'arte del controllo prima di tentare il volo a motore. Wilbur, che aveva passato molto tempo ad osservare gli uccelli, notò che questi cambiavano l'angolo delle estremità delle loro ali per far girare i loro corpi a sinistra o a destra. I fratelli rimasero perplessi su come questo potesse essere raggiunto e alla fine escogitarono la deformazione delle ali. Nel luglio 1899 il concetto di deformazione delle ali fu messo alla prova in un aquilone biplano con un'apertura alare di un metro e mezzo. Quando le ali erano attorcigliate in direzioni opposte, il sollevamento ineguale faceva girare l'aquilone nella direzione dell'estremità inferiore.

Ulteriori due modifiche furono apportate ai primi alianti. Per proteggere il pilota da un incidente come quello che uccise Lilienthal, i fratelli Wright montarono un ascensore nella parte anteriore dell'aliante. Spostando l'ascensore, potevano far salire o scendere l'imbarcazione come volevano. Nei primi voli, notarono che la deformazione delle ali creava una resistenza differenziale alle punte delle stesse. Una volta imparato il volo nei loro alianti, i fratelli Wright aggiunsero eliche a motore e fecero il primo volo motorizzato e con equipaggio.

Biomimetica nelle costruzioni

La società odierna orientata al mondo della tecnologia ha scoperto solo di recente la funzionalità e l'estetica delle forme e delle strutture naturali. Tuttavia, le persone hanno già usato intuitivamente i principi di funzionamento della natura: immagazzinare l'acqua nei campi, usare il vento per separare la pula dal grano, o, nelle regioni più calde, il controllo naturale del clima negli spazi abitativi con raffreddamento a corrente. Il successo per attrazione (per esempio i fiori e la loro colorazione, mediante la quale attirano gli insetti per l'impollinazione) dipende da queste funzioni.

Gli sviluppi "tecnologici" della vita sono risposte alle leggi della fisica e della chimica, alle necessità di crescita e riproduzione, alla reazione e all'utilizzo. Gli architetti devono affrontare una moltitudine di richieste paragonabili alla natura e devono far fronte anche alle difficoltà dell'implementazione creativa. I vincoli alla progettazione derivano dai materiali, che possono semplicemente soddisfare uno scopo (struttura o riparo), o anche dai clienti e dagli stessi acquirenti di edifici, le cui richieste a volte limitano ulteriormente il processo. Design integrativo significa gestire un'ampia varietà di requisiti all'interno del progetto con materiali che si comportano in modo intelligente. Per l'architettura, questo processo significa anche soddisfare le sensibilità estetiche come parte del loro dovere pubblico di trovare un design appropriato per l'ambiente urbano collettivo.

Punto di vista di architetti e ingegneri

Il concetto chiave da perseguire è il seguente: tutte le strutture devono soddisfare uno scopo funzionale. Di conseguenza, un dovere sociale è conferito ad ogni struttura.

Per i modernisti classici non si trattava solo dello sviluppo di un nuovo stile architettonico o della tipologia urbana, ma anche della comprensione orientata al futuro del design e in definitiva un nuovo modello per la società. L'approccio della biomimetica aspira allo stesso modo a un nuovo modello sociale: la tecnologia non deve essere usata come fine a sé stessa, ma deve essere integrata in un ciclo, in cui l'efficienza dell'uso dell'energia e dell'applicazione dei materiali è considerata come un dato, come la natura ci insegna. Sarebbe quindi troppo facile mettere semplicemente in relazione i precedenti della natura con le forme delle nostre strutture. La biomimetica non è semplicemente una forma

stilistica in cui si percepisce visivamente un'origine quasi naturale nella forma dell'edificio, spesso rappresentata da forme arrotondate (biomorfe). La biomimetica implica invece la catena strutturale e funzionale precedentemente formulata di astrazione, interpretazione e applicazione delle intuizioni dalla biologia alla tecnologia; solo in questo modo può emergere una forma. Gli esseri umani sono abituati ad adattarsi alle condizioni del loro ambiente. In questo modo non possono differenziarsi completamente dagli altri esseri viventi, come i castori, che possono formare interi laghi con le loro dighe, o termiti, che costruiscono strutture complesse con funzioni di termoregolazione. Ciò che differenzia gli esseri umani da questi organismi è quindi, tra molti altri aspetti, la costruzione deliberata e lo sviluppo continuo dei loro prodotti tecnologici. Un prodotto di spicco della loro capacità creativa è naturalmente la costruzione di case, lo sviluppo dell'architettura. L'uomo ha eretto consapevolmente strutture che devono servire a un'intera varietà di scopi, tra le quali proteggersi dalle intemperie e dai nemici. L'abitazione offre anche, come luogo di comunicazione, spazi per l'incontro e, come luogo di protezione, la possibilità di ritirarsi dalla società. Gli esseri umani hanno adattato le loro abitazioni per ulteriori scopi: ai fini dell'attività comunitaria, ai fini del rigenerarsi, dello stoccaggio delle provviste, della pratica della religione e così via. Il design completo e differenziato di questi spazi è un atto artistico di creatività che solo gli esseri umani possono realizzare. A questo fine usano la loro capacità di sviluppare tecnologie. Le tecnologie e i loro dispositivi sono stati inizialmente sviluppati dagli esseri umani per superare le carenze fisiche: le lance e le asce di pietra erano necessarie per la caccia, poiché non abbastanza veloci, o per difendersi, poiché non abbastanza forti. A causa della mancanza di pellicce efficaci contro il freddo, gli esseri umani in un primo luogo utilizzavano pellicce principalmente cacciate dal regno animale. Più tardi hanno iniziato a produrre il proprio materiale a protezione dal calore e dall'umidità.

Oggi le case che tendono a prendere le distanze dalle condizioni naturali sono ancora in fase di pianificazione e costruzione: invece di una ridotta infiltrazione solare e di una migliore circolazione dell'aria, sono regolate con aria condizionata; e invece di conservare lo stesso calore solare in inverno, vengono riscaldate. Molti possono eseguire solo l'uno o l'altro. Spesso l'edificio deve essere completamente sigillato per funzionare in modo efficiente con il riscaldamento o il raffreddamento. I precedenti strutturali naturali sono in ogni senso più "intelligenti". Combinano diverse funzioni in un unico metodo

strutturale. Per le capacità multifunzione, la biomimetica può fornire molte ispirazioni e precedenti, in modo che in futuro l'involucro esterno delle costruzioni moderne sarà in grado di combinare molte funzioni, ognuna in base a esigenze come protezione, calore e luce. In questo modo, gli involucri degli edifici saranno in grado di produrre e trasmettere energia. I nuovi concetti e modelli devono essere interpretati all'interno della convinzione generale che la tecnologia non deve essere sviluppata solo per il solo progresso "in avanti", ma deve anche avere la capacità di riscoprire la moltitudine di idee preesistenti dalla natura con l'applicazione di idee biomimetiche.

Origini degli edifici

La natura offre un arsenale inesauribile di esempi di "strutture viventi" che ricordano l'architettura nella forma e nella funzione. Queste strutture non hanno solo ispirato gli architetti moderni ma anche quelli dei secoli passati. Brunelleschi (1377-1446), famoso architetto, costruttore e artista del Rinascimento, si ispirò alla forma di un uovo di gallina

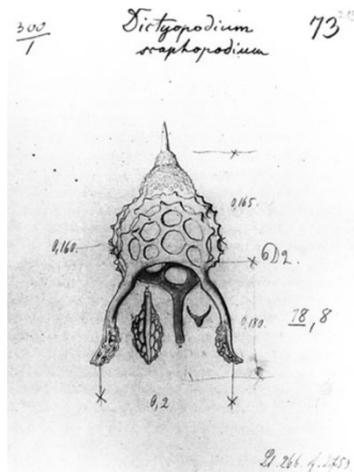


Figura 6: Haeckel, radiolaria

per la progettazione della cupola della Santa Maria del Fiore a Firenze. Si presume anche che Leonardo da Vinci (1452-1519) abbia studiato la natura e raggiunto le sue ispirazioni in questo modo. All'inizio del XX secolo le strutture dell'era Art Nouveau avevano iniziato a imitare la natura con motivi floreali e volumi di edifici curvi. Gli artisti e gli architetti dell'epoca furono ispirati dalle pubblicazioni del biologo Haeckel, il quale aveva intenzione, con i suoi studi e pubblicazioni, di sostenere in modo argomentativo la teoria dell'evoluzione di Darwin. Un esempio per l'applicazione di

forme d'arte "naturali" e l'orientamento all'ornamento è rappresentato dall'ingresso all'Esposizione Mondiale di Parigi del 1900 di René Binet, che si basa su uno scheletro radiolarico.



Figura 7: Ingresso esposizione universale di Parigi del 1900 di René Binet

Gli architetti comprendono sempre più la complessità delle strutture naturali e come possono essere fonti di ispirazione. L'ingegnere americano Buckminster Fuller è uno degli ingegneri più noti, che si era già occupato negli anni '50 dei meccanismi dei sistemi biologici e dei loro effetti. Il marchio più noto di Fuller era la cupola geodetica, una delle quali eresse per l'Esposizione Universale del 1967 a Montreal. Questo tipo di costruzione ricorda anche, con la sua delicata forma, materialmente minimale, scheletri di radiolaria unicellulare, che Haeckel aveva precedentemente studiato. Una cupola precedente, per così dire precursore e ispirazione per le strutture leggere di Fuller, è stata costruita per un edificio per l'azienda di Carl Zeiss nel 1924-1925 nell'ex posto di lavoro di Haeckel a Jena, in Germania. La struttura spaziale tridimensionale è stata successivamente versata con cemento.



Figura 9: Planetarium Jena (1924-1925)



Figura 8: Cupola geodetica di Fuller realizzata per l'Esposizione Universale del 1967

Il peso, il costo e lo scopo

Molte strutture create dall'uomo hanno la possibilità di svolgere uno o più scopi ed allo stesso modo l'ingegnere ha la possibilità di risolvere una struttura in uno o più modi. Per esempio, in una struttura i carichi possono essere supportati tramite forze di compressione o di trazione. Se nel campo dell'ingegneria la scelta è ampia, lo è ancora di più in quello della biologia. Infatti, l'esistenza di molteplici soluzioni riguardanti un problema strutturale è una delle cause per cui animali e vegetali si sono adattati e trasformati. L'obiettivo principale dello studio costruzioni-natura rimane quello di progettare strutture efficienti, che non sempre risulta essere di facile realizzazione. In anni e anni di storia naturale si è visto sviluppare forme imperfette o intermedie e così è stato anche nel mondo attuale delle tecnologie; per questo bisogna sempre allargare i confini, affrontando nuovi approcci non convenzionali, che permetteranno in un futuro non troppo lontano di poter allargare l'orizzonte a nuovi schemi costruttivi efficienti.

Excursus storico

La gran parte dei problemi e dei progressi nella scienza dei materiali è stata di natura concettuale. La Rivoluzione Industriale è stata di fondamentale importanza in quanto ha portato a cambiamenti radicali nell'industria manifatturiera e nelle tecniche di costruzione.

Prima della Rivoluzione Industriale, infatti, la tecnologia si basava su un'ampia gamma di materiali: legno, pietra, cuoio, corde e su tessuti costituiti da fibre naturali. Oltre ai precedenti materiali venivano anche utilizzati anche componenti in ferro e in rame, anche se in quantità limitate. Nel corso dell'Ottocento, però, qualcosa cambiò. Gli ingegneri vedevano un nuovo mondo costituito principalmente da cemento e acciaio, da motori a vapore e a combustione interna. Si aprirono le porte per la produzione di nuovi materiali e la Rivoluzione Industriale fu un punto cardine per l'evoluzione e il progresso.

Durante il progresso, i vegetali e gli animali potevano anche dato anche un enorme contributo, ma gli ingegneri pensavano di non aver nulla da imparare dalle strutture viventi.

Si aprirono le porte a una controrivoluzione, a un ritorno all'artigianato. L'artigianato significava, per l'epoca, un rifiuto dell'analisi scientifica ed un ritorno ad abilità tradizionali, che avrebbe favorito i valori estetici.

Più recentemente invece si è fatto strada un nuovo modo di pensare e un approccio eclettico alla scienza dei materiali che armonizza il passato con metodi scientifici.

Scelta dei materiali

Generalmente gli ingegneri sono abituati ad utilizzare un numero limitato di materiali (metalli, calcestruzzo, ecc...), al contrario della natura, la quale elabora materiali e gerarchie di strutture, sottostrutture e di sotto-sottostrutture molto ricercate. In questi ultimi anni, però, lo sviluppo tecnologico ha permesso la produzione di materiali dotati di strutture sempre più complesse, come le fibre artificiali che sono state concepite a partire da modelli biologici. Grazie a tale evoluzione i materiali a disposizione dell'uomo stanno diventando sempre più numerosi. Anche se i materiali presenti in natura sono diversi da quelli prodotti dall'uomo ed utilizzati in ingegneria, le geometrie strutturali atte a sostenere i carichi sono generalmente le stesse.

Alcuni concetti chiave: trazione, compressione e instabilità euleriana

L'ingegnere durante l'attività di progettazione ha la possibilità di realizzare una struttura in cui i carichi sono sostenuti prevalentemente da forze di trazione oppure di compressione; a volte sostenere un carico tramite trazione risulta più problematico che sostenerlo tramite compressione, ma non sempre è così. Grazie all'evolversi di materiali e forme, nella biologia e nella moderna tecnologia la soluzione in trazione risulta essere la più conveniente dal punto di vista economico, di peso e di sicurezza. D'altro canto, le costruzioni realizzate in muratura antica oppure le capanne in legno, lavorando a compressione, hanno il vantaggio di avere una geometria semplice, ma risultano essere pesanti e massicce. Il più delle volte in natura si lavora in trazione, ma un esempio di strutture che lavorano in compressione può essere identificato nei formicai. Ovviamente i modi di rottura di una struttura soggetta a compressione differiscono da una soggetta a trazione. Se sottoponiamo a trazione un elemento fune, asta d'acciaio o tendine di animale esso assume una forma tanto più rettilinea quanto più intensa è la trazione; la separazione

delle molecole in prossimità della sezione trasversale più debole comporta la rottura dell'elemento teso. Per quanto riguarda gli elementi in compressione, la loro rottura risulta essere dipendente dalla lunghezza; se si analizza un piccolo osso esso può reggere carichi finché non cede a causa di un meccanismo locale di frattura, mentre se si analizza un albero di notevole altezza esso può instabilizzarsi anche se sottoposti a carichi di modesta entità.

Grazie a Eulero siamo in grado di calcolare il carico che fa instabilizzare un'asta quando essa è soggetta a una forza di compressione; il carico di punta P che permette all'asta di instabilizzarsi può essere calcolato come:

$$P = k\pi^2 \frac{EI}{L^2}$$

E= Modulo di Young

I= Momento di inerzia della sezione trasversale dell'asta

L= Lunghezza dell'asta

k= costante dipendente dalle condizioni di vincolo all'estremità, ovvero se quest'ultime sono incastrate o libere di ruotare. Se entrambe le estremità sono incastrate, k vale 4; se un'estremità è fissa e l'altra è libera allora k risulta essere 1/4; mentre se entrambe le estremità sono incernierate, il valore di k è 1.

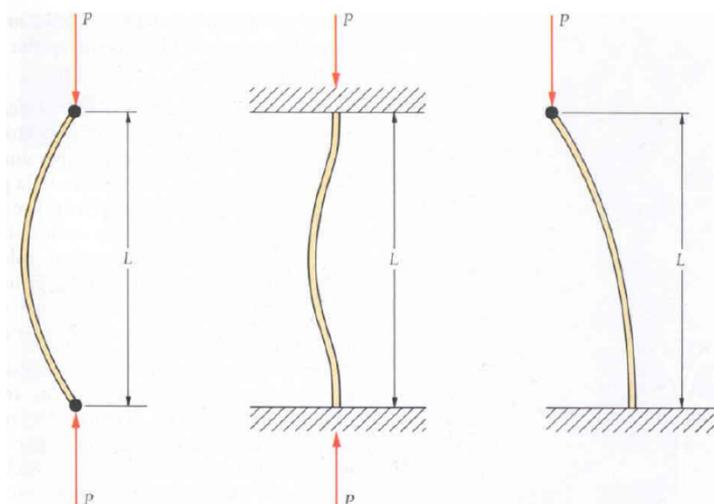


Figura 10: Instabilità euleriana in funzione del tipo di vincolo

Un caratteristico esempio di instabilità euleriana in natura è rappresentato dai fili d'erba; essi essendo lunghi e sottili possono instabilizzarsi come un'asta euleriana quando vengono calpestati, ma essendo il carico critico di entità limitata non si rompono, ma si riprendono immediatamente o dopo un breve intervallo di tempo.

Strutture in trazione

Nel caso in cui un carico debba essere trasmesso per una lunga distanza, la soluzione meno costosa e più leggera consiste nell'utilizzare strutture completamente in trazione. In ogni caso, le forze di trazione devono essere compensate da forze di compressione che siano uguali e opposte. Se analizziamo il comportamento degli animali in natura, noteremo che i ragni possono tessere le loro tele leggere in quanto i carichi di trazione sono controbilanciati dalle corrispondenti reazioni di compressione generati da sostegni preesistenti oppure da un muro. Per molto tempo, le uniche strutture conosciute completamente in trazione furono le reti da pesca, dotate di un'estetica simile proprio alle ragnatele. Altro esempio riscontrabile in tempi ormai passati proviene dai barcaiole dei fiumi Tigre ed Eufrate, i quali usavano pelli di animali gonfiate per la costruzione di zattere utilizzate per il trasporto di merci. Verso la fine del Settecento, fu però ideato, progettato e costruito dai fratelli Montgolfier un nuovo tipo di struttura in trazione costituito da materiale sintetico, la mongolfiera (pallone aerostatico). L'ingegnere inglese Lanchester (1868-1946) ebbe la brillante idea di applicare all'edilizia ciò che era stato precedentemente studiato per il pallone nelle macchine volanti. Infatti, dopo numerosi studi e approfondimenti, Lanchester riuscì a realizzare una copertura consistente in un pallone fissato al suolo, sostenuto da aria pressurizzata, che veniva utilizzato come padiglione temporaneo per fiere ed esibizioni. Questa tipologia di costruzioni si sviluppò prevalentemente negli Stati Uniti d'America dove l'uso di questa tipologia di tetto ha permesso di ridurre drasticamente le spese di stoccaggio. Questi edifici vengono mantenuti in funzione grazie a una ventola che funziona in modo più o meno continuo, ma, nonostante ciò, risultano molto meno costose delle coperture di tipo tradizionale.



Figura 11: Tokyo Dome; Tokyo, Giappone, 1998

Se consideriamo un cavallo, per esempio, esso può essere considerato come funzionamento ad un ponte ben congegnato (travatura Fink): infatti il suo possente corpo permette di portare un considerevole carico aggiuntivo oltre il peso proprio che viene scaricato su elementi sottili in compressione (le quattro gambe) sostenute efficacemente da una serie di elementi in trazione (tendini, muscoli e pelle).

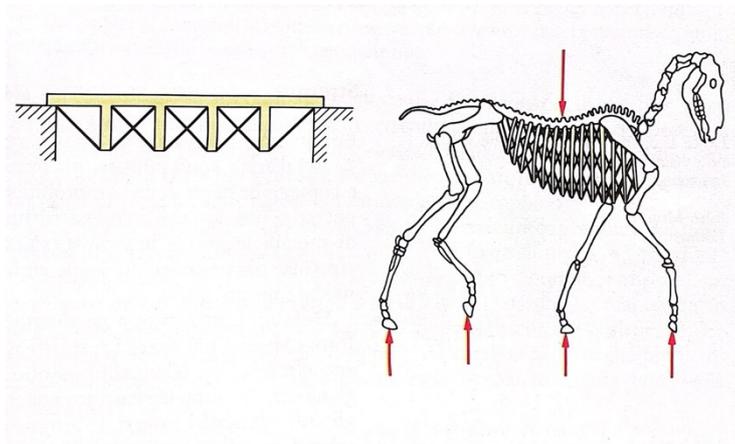


Figura 12: Similitudine tra il funzionamento di una travatura Fink e l'ossatura di un cavallo

Architettura animale

Il termine architettura animale si riferisce a un tema estremamente vasto. Solitamente i materiali e le tecniche utilizzate dagli animali di dimensione sorprendenti risultano meno ingegnose rispetto a quelle degli animali più piccoli. Per esempio, animali come le scimmie costruiscono rifugi disordinati rispetto alle metropoli delle termiti, più

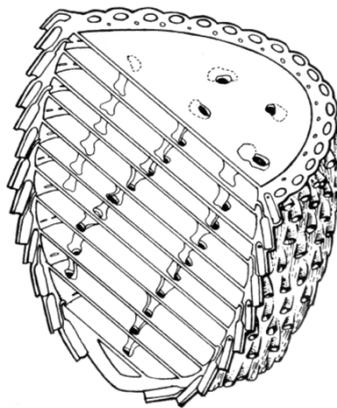
organizzate ed efficienti e nelle quali abitano milioni di “abitanti”. Inoltre, possiamo ammirare in natura fantastiche opere d’arte tra gli uccelli, tra gli insetti e i ragni.

Scala delle costruzioni animali

Di solito si pensa alle costruzioni animali come un qualcosa di ridotto e in linea con le proporzioni dell’animale, ma molte di esse superano questi limiti. Basti pensare al castoro.

La diga costruita da questo piccolo animale è considerata la più grande costruzione animale in termini assoluti ed è in grado di raggiungere i milleduecento metri di lunghezza. Un altro animale altrettanto ingegnoso è il ragno, che con le sue capacità costruttive riesce a tessere ragnatele che possono raggiungere estensioni anche di cento metri, che, se riferiti alla scala umana corrisponderebbero a quasi venti chilometri.

I termitai, per esempio, possono raggiungere i nove metri di altezza e un peso di diverse tonnellate.



*Figura 13: Sezione trasversale di un nido di termiti *Apicotermes lamani*. Nell'immagine si possono notare le rampe di collegamento tra un piano e l'altro.*

Animali come inventori

Con la loro straordinaria intelligenza gli animali hanno perfino fatto invenzioni architettoniche. Molti animali chiudono i propri nidi o celle con tappi ingegnosi ed altre specie sono in grado addirittura di realizzare “porte”. Un esempio significativo è rappresentato dalla *Caulicola velveta* (un tipo di ciliato); con le sue abilità è in grado di costruire un nido di due piani costituito da pietre tenute assieme da fili di seta. Al piano superiore della struttura si può trovare un tunnel avente lo scopo di dirigere l’acqua, ricca di ossigeno, nel nido. La parte esterna della costruzione ha il particolare compito di funzionare come ventosa per far in modo che il complesso



Figura 14: Formiche tessitrici intente alla realizzazione di un ponte vivente durante l’esecuzione del proprio nido di foglie

possa aderire perfettamente al fondale in condizione di correnti. Così facendo l’animale è in grado di raggiungere le alghe presenti al di sotto del nido attraverso due porte pieghevoli posizionate sul pavimento. Alla lista delle invenzioni si potrebbe aggiungere il sistema di sentieri realizzati dalle formiche, le gallerie delle termiti, le scale dell’*Apicotermes*, il pozzo di comunicazione verticale delle vespe *Chartergus* e le finestre della vespa tropicale *Metapolybia pediculata*.

Le formiche tessitrici, per mezzo dell’unione e della coesione tra esse, formano dei ponti viventi per accostare i bordi delle foglie al fine di avvolgere le cavità del nido. Le talpe senza pelo, mettendosi in fila una dietro l’altra, sono in grado di realizzare dei veri e propri nastri trasportatori in grado di rimuovere la terra presente nei tunnel.

Caratteristiche delle costruzioni animali

Le costruzioni animali, proprio come quelle create dall’uomo, svolgono una moltitudine di funzioni. Le principali vengono elencate di seguito:

1. PROTEZIONE DELL’AMBIENTE FISICO

- Controllo della temperatura

- Gestione dell'acqua
- Controllo dell'umidità
- Scambio di gas e ventilazione
- Gestione dei rifiuti

2. PROTEZIONE DAI PREDATORI

- Evitare l'individuazione o il riconoscimento
- Protezione meccanica

3. RACCOLTA DEL CIBO

- Coltivazione
- Alimentazione
- Cattura delle prede
- Conservazione del cibo

4. COMUNICAZIONE

- Strutture per comunicare
- Strutture segnaletiche

5. DECORAZIONE

Per lo scopo dello studio, si analizzerà solamente il punto 1. che è quello più rappresentativo e paragonabile al mondo dell'edilizia.

Il controllo della temperatura è una caratteristica ben conosciuta nel mondo animale e si può riscontrare in numerosi tipi di nidi di uccelli che utilizzano strati di terra, licheni, lana vegetale e piume per creare sia la struttura portante sia l'isolamento termico della costruzione realizzato per strati. Un particolare nido di uccello (*Loxia*) ha qualità isolanti talmente elevate che grazie al calore immagazzinato l'animale è in grado di incubare le uova durante i mesi più freddi.

Il passero repubblicano mantiene, all'interno del nido, una temperatura superiore ai 20 gradi centigradi rispetto alla temperatura esterna del deserto del Kalahari, dove le temperature invernali notturne possono scendere fino al di sotto di dieci gradi centigradi.

La pernice bianca nordica, in Lapponia, realizza delle costruzioni simili agli Igloo con lo scopo, oltre quello di mantenere la temperatura a 7/8 gradi superiore rispetto a quella esterna, di proteggersi dagli uccelli predatori. I nidi monumentali realizzati dagli uccelli Megapodidi sono un vero e proprio esempio di efficienza energetica paragonabile a quello delle comuni abitazioni; infatti, tali uccelli costruiscono un cumulo di compost capace di produrre tramite la fermentazione il calore necessario per lo sviluppo delle uova. Il becco di questo animale funziona come un termostato ed è in grado di controllare in continuazione la temperatura del nido e arieggiarlo in modo da mantenere costantemente i trentaquattro gradi centigradi di temperatura. Il suo becco è in grado di misurare variazioni di temperatura con la precisione di un grado centigrado.

Le termiti australiane costruiscono nidi disposti esattamente in direzione nord-sud con lo scopo di minimizzare il calore di mezzogiorno e massimizzare quello del primo mattino e del tardo pomeriggio. La tipica forma a cuneo di queste costruzioni si pensa possa favorire lo scambio di gas aumentando il rapporto fra superficie e massa. Questi animali sono in grado di orientare i loro edifici grazie al campo magnetico terrestre e non tramite l'utilizzo di particolari teorie o strumenti.

Infine, le formiche rosse del legno formano nidi sulla cui superficie vengono realizzati buchi utilizzati sia come ingressi sia come fori di areazione; di notte queste aperture vengono tappate in modo da mantenere il calore all'interno del rifugio. Gli insetti sono in grado di creare nidi che sfruttano la pendenza beneficiare della massima quantità di calore solare. Inoltre, questi animali assorbono il calore all'interno del loro corpo durante il giorno per poi liberarlo alla sera all'interno dei loro nidi, funzionando così come dei termosifoni viventi.

Altro fattore importante nel regno animale riguarda la gestione dell'acqua. Ad esempio, i nidi delle formiche, di alcuni tipi di uccelli e in particolare delle termiti hanno una particolare forma conica che permette all'acqua piovana di scorrere via e defluire lontano dai nidi. Altri tipi di termitai sono realizzati sollevati da terra per mezzo di colonne tozze e riparati da un tetto sporgente simile a una costruzione a pagoda. Lo scopo di questo sistema è quello di evitare danni causati da piogge tropicali. Non sempre però l'abbondanza d'acqua è un problema, a volte può verificarsi il caso inverso, vale a dire la mancanza d'acqua. Per far fronte a questo tipo di problema, tre specie di coleotteri tenebrionidi, abitanti nell'arida regione costiera



Figura 16: Con la sua particolare forma il termitaio fa defluire efficacemente l'acqua piovana lontana dal nido

del deserto del Namibia, costruiscono cavità poco profonde simili a trincee con lo scopo di intrappolare la rugiada. Questi canali sono realizzati quando c'è nebbia, sono orientati parallelamente alla direzione del vento e dotati di bordi rialzati. Le termiti hanno il compito di mantenere costanti i livelli di temperatura e umidità all'interno del loro habitat; in alcuni di essi il livello di umidità si aggira tra l'ottantanove e novantanove per cento. Sono in grado di scavare talmente in profondità che nelle regioni aride questi animali riescono a raggiungere i quaranta metri sotto il piano campagna raggiungendo il livello della falda acquifera.



Figura 15: il bordo del nido di termiti è orientato verso il sole di mezzogiorno

Non vi sono numerose prove sperimentali riguardanti l'impermeabilizzazione e il

controllo dell'umidità, ma la necessità di sorvegliare il livello di umidità è ovvio.

Il nido del colibrì ha la caratteristica di ricoprirsì di ragnatele e licheni in modo da formare una superficie impermeabile all'acqua. Così come le api mascherate costruiscono le camere di riproduzione all'interno di rami cavi o buchi nel terreno rivestendo le pareti del nido con una carta da parati fatta con una secrezione orale, la quale indurisce formando una pellicola impermeabile che assomiglia al cellofan; questo sistema permette al nettare raccolto di non disperdersi nell'ambiente circostante, tenendo lontana l'umidità e la muffa.

Ovviamente gli animali che vivono in ambienti chiusi devono gestire nel migliore dei modi la ventilazione e lo scambio di gas. Il granchio della Malesia ha dovuto sapersi adattare al fenomeno delle maree. Quando vi è alta marea, l'animale si nasconde al di sotto della sabbia per proteggersi dalle acque agitate e dai predatori e così facendo, costruisce una cupola di sabbia bagnata che contiene al proprio interno un volume d'aria. Dopodiché procedendo con lo scavo in profondità, la sabbia raschiata del fondo l'applica sul soffitto in modo da convogliare l'aria ad un livello inferiore, permettendo all'animale di respirare.

Per fare un paragone con i sistemi di circolazione naturale dell'aria realizzati per le costruzioni in edilizia, il cane della prateria predispone il suo rifugio

sotterraneo con due differenti uscite: la prima uscita è costituita da un tumulo a cupola con una cima arrotondata mentre la seconda da un cratere con un bordo appuntito posto ad altezza doppia rispetto al tumulo a cupola. La differenza di forma e altezza di queste due uscite permette l'aumento della velocità del vento sul cratere, sul quale si forma un flusso d'aria capace di estrarre dalla tana quella viziata.

In natura, però, l'esempio più significativo e sbalorditivo di sistema di ventilazione è rappresentato da alcuni tipi di termiti. Alcuni tipi di termitai, infatti, possono raggiungere

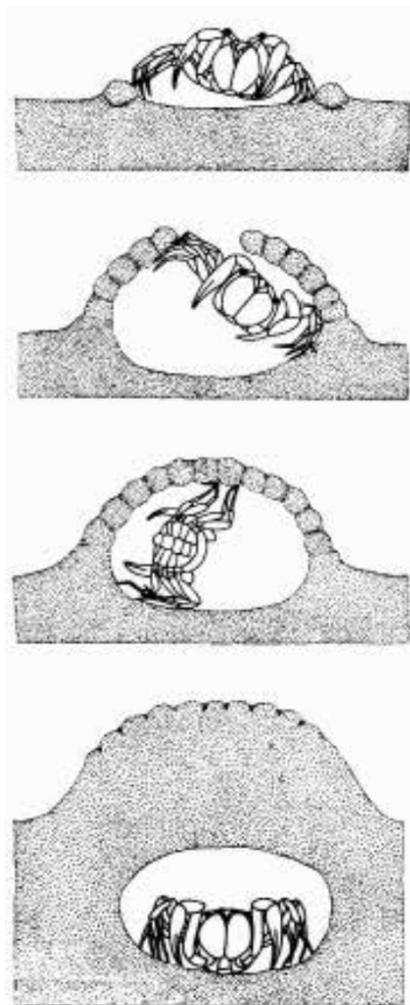


Figura 17: Differenti fasi di costruzione della cupola necessaria al granchio della Malesia per ripararsi dalle alte maree e permettere all'animale di avere aria a sufficienza per tutta la durata dell'evento

altezze significative e all'interno di essi possono vivere, lavorare e respirare più di due milioni di termiti. L'assenza di un adeguato sistema di aria condizionata causerebbe la perdita dell'intera colonia di termiti. Il nido vero e proprio delle termiti risiede nella camera reale posizionata al centro del termitaio. La parte interna è sorretta da colonne coniche mentre la parte esterna è costituita da un involucro estremamente rigato. Il nido è collegato al tumulo esterno tramite dei puntoni laterali.

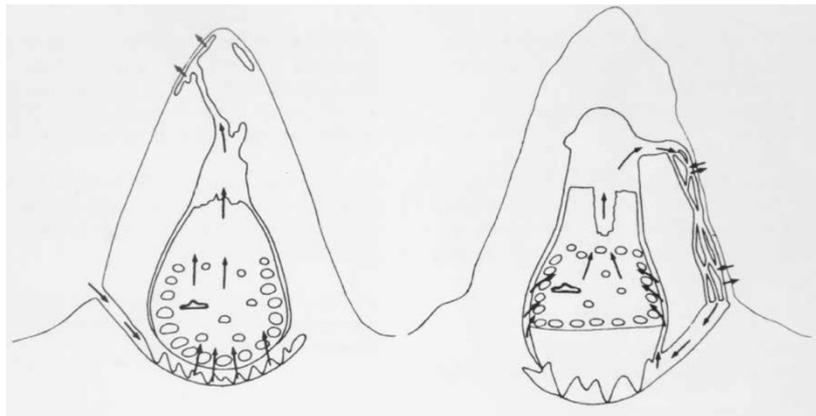


Figura 18: Funzionamento del sistema di ventilazione dei termitai

Si può osservare uno spazio d'aria sopra il nido assimilabile a un camino, mentre le creste o i contrafforti corrono all'esterno dall'alto verso il basso dell'edificio.

L'insieme di tutte queste componenti permette di creare un sistema di ventilazione completamente automatizzato che funziona nel seguente modo: l'aria interna viene generata dai processi di fermentazione e dalla naturale respirazione degli animali stessi; questa aria calda successivamente sale e viene indirizzata nei condotti orizzontali del colmo dalla pressione esercitata dal flusso continuo.

Lo scambio di gas è permesso grazie alla conformazione porosa delle pareti esterne e interne; così facendo l'anidride carbonica fuoriesce dall'interno e lascia spazio all'ossigeno, che penetra dall'esterno tramite i condotti. Le creste hanno la stessa funzione che hanno i polmoni per l'essere umano. Visto che l'aria viene raffreddata durante il passaggio attraverso le creste, l'aria più pesante

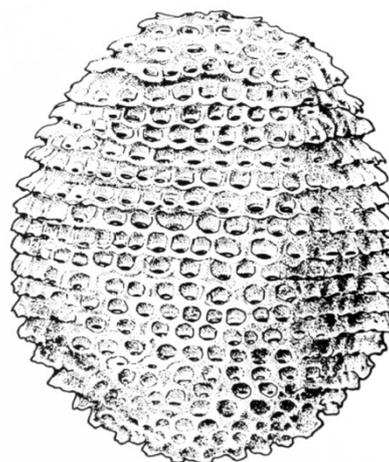


Figura 19: Termitaio realizzato con gli escrementi delle termiti. Le cavità presenti sull'involucro esterno garantiscono una corretta ventilazione.

rigenerata discende nella cantina attraverso l'intercapedine inferiore. Quest'aria ritorna al nido dal basso e sostituisce quella calda che sale.

Ultimo ma non per importanza è il tema della gestione dei rifiuti, estremamente caro al mondo animale. Si possono prendere come esempio le formiche che costituiscono dei depositi per i loro rifiuti, le marmotte che realizzano degli spazi destinati alle loro deiezioni e i tassi che defecano in fosse utilizzate come latrine. Altri animali molto attenti alla pulizia sono i castori che tendono a smaltire tutti gli avanzi dei pasti nell'acqua. Un altro modo efficace per smaltire gli scarti è riciclarli e utilizzarli come "collante" per costruire le tane; infatti, le feci possono essere utilizzati insieme ad altri materiali, ad esempio il fango, per rinforzare le tane. La combinazione di sostanze come fango, sterco animale e paglia è ampiamente impiegato nelle culture costruttive tradizionali dell'uomo.

Differenti metodi di costruzione nel mondo animale

I metodi utilizzati dagli animali nelle costruzioni si suddividono in 7 tipi:

1. Scolpire e scavare
2. Accumulare
3. Plasmare
4. Arrotolare e piegare
5. Incollare
6. Tessere
7. Cucire

Il risultato finale della costruzione dipende dall'unione di due fattori fondamentali: il tipo di materiale e il metodo di fabbricazione adottato. La maggior parte dei materiali impiegati in natura dagli animali corrispondono a quelli impiegati dall'uomo nelle proprie abitazioni e, a causa dei vincoli imposti dai materiali stessi, i metodi di costruzione hanno certe somiglianze con le edificazioni operate dall'uomo.

La scultura è il metodo attraverso il quale il materiale viene gradualmente rimosso dalla massa iniziale. Diversi molluschi scolpiscono le loro tane nella roccia o nel legno. Insetti come le vespe invece sono in grado di scavare dei tunnel nel terreno per realizzare il

proprio nido. Altri animali sfruttano le abilità del picchio per realizzare il proprio rifugio all'interno degli alberi incavati dal becco dello stesso.

Altro metodo analizzato è quello dell'accumulo che consiste in diverse fasi, tra le quali si citano: raccolta del materiale da costruzione, trasporto e collocazione sulla costruzione senza l'utilizzo di alcun tipo di adesivo o legante. Questo metodo di costruzione è molto utilizzato tra i grandi uccelli, per esempio le aquile, i pellicani, le cicogne e i corvi.

Nella maggior parte delle situazioni l'accatastamento di materiale è considerato un metodo di semplice esecuzione, ma in altri casi può essere anche molto complesso e laborioso. Se si analizza il nido del corvo, si può notare che è costituito da cinque differenti strati: da ramoscelli spessi come struttura principale, da ramoscelli sottili all'interno, da muschio e argilla sul fondo e infine da due strati di rivestimento del nido (erba, foglie muschio).

Il terzo metodo (plasmare) è un metodo molto sofisticato che comporta la lavorazione di un materiale duttile in una forma dai tratti distintivi, operazione che comprende sia la sagomatura nella configurazione desiderata sia l'estrusione del materiale da una filiera di precisione, seguita dalla realizzazione di una struttura costituita da fili.

Altro metodo di costruzione, arrotolare e piegare, permette la realizzazione di una struttura tridimensionale arrotolando, per esempio, la foglia di una pianta.

L'adesione tramite incollaggio è un'altra consuetudine nel mondo animale. Per applicare tale metodo però vi è bisogno di due materiali: elementi da costruzione che siano solidi e un collante che fissi insieme le due componenti, proprio come fa il muratore con la malta e il mattone. Gli adesivi più comuni per la realizzazione del materiale appiccicoso sono costituiti da muco e seta. La larva di tricottero costruisce il proprio rifugio con pannelli prefabbricati simili a quelli utilizzati dall'uomo nell'edilizia prefabbricata. Per mezzo delle proprie mandibole ritaglia pannelli con una recisione curva realizzando un'opera avente una struttura regolare.

Tessere è un altro metodo costruttivo di rilevante importanza e in questo ambito sono i ragni a esserne padroni. Queste meravigliose costruzioni costituite da diversi tipi di filo, attacchi, collegamenti e giunti sono state approfonditamente studiate negli anni passati. Gli studi effettuati da Frei Otto hanno rivelato una sorprendente complessità strutturale e logica sviluppata dai ragni durante la loro evoluzione. Le reti di sospensione delle strutture tensili assomigliano proprio come disposizione e schema costruttivo ai dettagli

delle ragnatele dei ragni. Il ragno comune, per esempio, produce cinque tipi differenti di filo per la realizzazione della propria ragnatela:

1. **FILO DI TRASCINAMENTO:** nel movimento il ragno emette un filo prodotto da particolari ghiandole. Questo filo ha il compito di garantire sicurezza al ragno durante l'esecuzione dell'opera.
2. **DISCHI DI ATTACCO:** sempre attraverso le ghiandole, il ragno emette del materiale liquido che successivamente si indurisce formando un filo sottile; l'insieme di questi fili costituisce dischi di attacco molto resistenti per fissare le drag-line alla superficie di materiali solidi.
3. **FILO DI BOZZOLO:** questi particolari fili hanno il compito di conservare le uova dei ragni all'interno del bozzolo e vengono anche utilizzati per realizzare rifugi.
4. **FILO DI AVVOLGIMENTO:** i ragni solitamente avvolgono le prede in un intreccio di seta strettamente intessuta. Questa rete è ingerita insieme alla preda e successivamente riutilizzata dall'organismo per la tessitura di nuove tele.
5. **FILO DI CATTURA:** questi fili sono delle armi mortali capaci di intrappolare tutto ciò che entra in contatto con loro. Questi tipi di fili sono adesivi e appiccicosi in modo da non lasciar scampo alle prede.

Il primo step per la realizzazione di una rete di ragno disposta in direzione verticale è individuato nella posa di una linea di supporto orizzontale (linea ponte) collocata dall'animale mentre si muove oppure facendo volteggiare al vento una linea provvisoria estremamente leggera. Dal momento in cui l'estremità libera viene agganciata al lato opposto, il ragno realizza la linea ponte sostituendo quella provvisoria con una di tipo permanente. La fase successiva consiste nel lasciar cadere una linea verticale che parte dal centro della linea ponte; dopodiché inizia a costruire il telaio poligonale e i fili radiali. Dopo aver realizzato la parte centrale della ragnatela, il ragno procede a spirale dal centro stendendo successivamente un filo di impalcatura sempre a spirale. Infine, comincia il completamento della rete dall'esterno verso il centro, tessendo il filo di cattura appiccicoso e, nello stesso istante, raccogliendo il filo dell'impalcatura temporaneo.

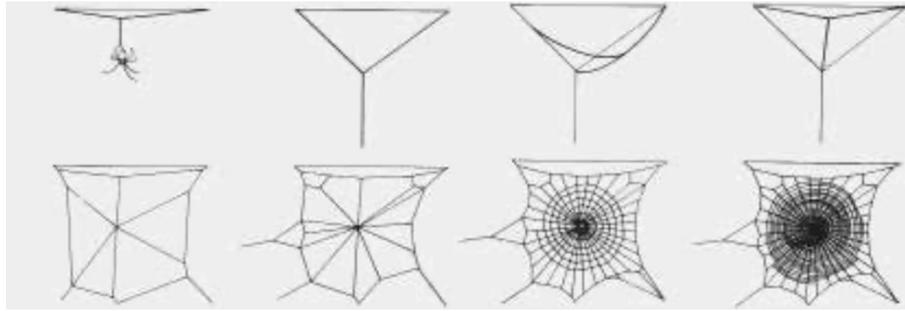


Figura 20: Sequenza di costruzione di una ragnatela

La sostanza viene spalmata sulla superficie del filo di cattura. Il ragno si impadronisce del filo, lo tende e lo rilascia come la corda di uno strumento, e nel vibrare il filo suddivide il liquido in gocce uguali e le dispone alla stessa distanza in funzione dell'onda stazionaria.

Ultima metodologia di costruzione in natura è rappresentata dal cucire. In realtà non vi è una distinzione netta tra questo metodo e il precedente. Con la tecnica vista prima si realizzava la struttura con un intreccio di fili, mentre con la cucitura si realizzano dei punti precisi, trafiggendo un altro materiale. Gli animali che adottano questa tecnica sono prevalentemente gli uccelli.

Considerazioni di tipo strutturale

Alcune considerazioni possono essere fatte anche dal punto di vista dell'ingegneria strutturale. Infatti, gli animali possono costruire strutture che lavorano sia in compressione sia in trazione, tenendo conto delle forze esercitate su di esse. Esempio lampante è il castoro, considerato un vero ingegnere geotecnico e idraulico, capace di costruire dighe di notevoli dimensioni in grado di resistere all'azione dell'acqua. Le ragnatele dei ragni sono costituite da microscopici dispositivi atti ad assorbire l'energia degli impatti così da evitare di rompere l'intelaiatura nella sua interezza. Altri animali estremamente intelligenti sono gli uccelli, che con la loro esperienza nel campo della costruzione di nidi sono stati in grado perfino di calcolare e tenere conto della componente vento. Infatti, quest'ultimi controbilanciano la forza e la spinta del vento zavorrando il nido con il peso della terra o di piccole pietre.

Architettura vegetale: La *Victoria amazonica*

Le prime tracce della *Victoria amazonica* risalgono alla prima metà del 1800 grazie al naturalista, botanico ed esploratore francese Aime Bonpland (1773-1858) che spedì i semi di questa straordinaria pianta in Francia, ma, nonostante ciò, non divulgò la sua scoperta e non diede nome alla specie. Il nome della pianta venne assegnato in onore della regina Vittoria, dando così inizio alla sua gloria botanica. Questa pianta è stata una scoperta eccezionale per tutto il mondo, capace di dare spunti, oltre che ai botanici, anche ad architetti ed ingegneri che sfruttarono le proprietà di robustezza delle sue foglie per scopi strutturali. Grazie alla scoperta di Bonpland, la pianta riscosse un enorme successo e si affermò come una vera e propria icona popolare della fine del XIX secolo. Ma quello che straniva e faceva riflettere gli esperti era come una singola foglia di tale pianta potesse sorreggere fino a quarantacinque chili, senza rompersi o deformarsi. Nacque così la necessità di approfondire gli studi per determinare nel dettaglio le capacità strutturali di questa pianta.



Figura 21: Foglie di *Victoria amazonica*. Le sue foglie possono raggiungere i due metri e mezzo di diametro

Le sue foglie possiedono una forma circolare e possono raggiungere dimensioni eccezionali, misurando fino a due metri e mezzo di diametro. Possiedono bordi rialzati e sono ancorate al fondo da lunghi steli, derivanti da un fusto sotterraneo sepolto nel fango.

La superficie superiore della foglia è ricoperta da uno strato di cera che permette all'acqua di scorrere via, evitando così accumuli. Quella inferiore è costituita da spine utilizzate per proteggersi dai pesci e dai predatori. La foglia riesce a galleggiare grazie all'aria che si infiltra negli spazi tra le nervature.

La vera svolta per la conoscenza di questa pianta, però, la diede nel 1848 Joseph Paxton (1803-1865), che lavorava come capo giardiniere per il sesto duca di Devonshire. Fu in quegli anni che Paxton si appassionò e approfondì gli studi della *Victoria Amazonica*, arrivando al 1851, anno in cui a Londra era in corso la prima Esposizione universale.

Era un evento raro e irripetibile, quindi si pensò di realizzare una costruzione colossale all'interno di Hyde Park, capace di ospitare le delegazioni di tutto il mondo e i milioni di turisti. Per la realizzazione di questo progetto erano stati fissati tre obiettivi da ricercare: la costruzione non doveva essere permanente, quindi, poteva essere montata e smontata a piacere, andava realizzata in tempi brevi e doveva rispondere alle esigenze di funzionalità con la minima spesa. Al concorso per il progetto parteciparono studi architettonici da tutta Europa riuscendo a raccogliere 245 progetti. Nessuno dei 245 progetti presentati fu scelto.

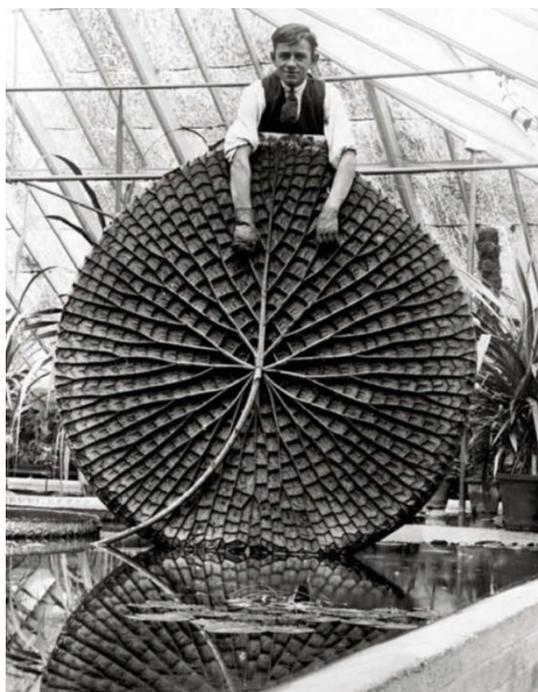


Figura 22: Joseph Paxton in posa con una foglia di Victoria amazonica

Fu in seguito a questo fatto che Paxton ebbe la brillante idea di costruire la struttura in ghisa e vetro utilizzando moduli prefabbricati. L'utilizzo di moduli prefabbricati, infatti, permetteva la realizzazione dell'opera in tempi brevi, proprio come richiesto in fase di progetto. L'edificio copriva oltre 90000 metri quadrati, misurava 564 metri di lunghezza, 124 metri di larghezza e 39 metri di altezza.

Il singolo modulo misurava un quadrato di circa sette metri e mezzo di lato; aggiungendo nuovi elementi la struttura si poteva ampliare a piacere. Inoltre, la prefabbricazione in serie richiese meno tempo e costi inferiori rispetto ad uno stesso edificio costruito in

muratura. L'edificio realizzato andò a ricreare una vera e propria serra vetrata, tant'è che all'interno di essa vennero inglobati gli alberi presenti ad Hyde Park.



Figura 23: Crystal Palace

Per la realizzazione dei grandi archi della volta, Paxton si ispirò alla nervatura delle foglie della *Victoria amazonica*. Grazie alla sua particolare struttura e vetrata, l'enorme costruzione venne chiamata in seguito Crystal Palace.

Dopo la costruzione del Crystal Palace, numerosi architetti e ingegneri si cimentarono nella progettazione di edifici più o meno ispirati alle nervature di questa pianta.

Esempi significativi sono il terminal 5 dell'aeroporto John F. Kennedy di New York e il palazzetto dello sport di Roma, progettato dall'Ingegnere Pier Luigi Nervi e dall'architetto Annibale Vitellozzi nel 1956.

Esempi di biomimetica

Il successo del velcro

Un esempio illuminante è senz'altro quello del **velcro**, inventato nel 1941 dall'ingegnere svizzero George de Mestral, nato imitando il funzionamento dei frutti della Lappola (*Articum lappa* L.), nota anche come Bardana, costituiti da minuscoli uncini utili ad attaccarsi ai tessuti. Si racconta che un giorno, durante la quotidiana passeggiata con il cane, l'Ingegnere notò qualcosa di strano; sopra gli abiti e sul pelo del cane si erano depositati, attaccandosi saldamente, delle palline appiccicose, difficili da rimuovere. Incuriosito del fatto, De Mestral



Figura 24: Lappola

cercò di capire i segreti di quei fiori. In seguito a questo buffo episodio, per mezzo del microscopio si mise a studiare il materiale e iniziò ad osservare il modo con cui le bacche si attaccavano alle superfici.

Quello che notò era un sistema tanto semplice quanto efficace sviluppato dal cardo per diffondere i propri semi. La superficie era ricoperta da “aghi” le cui estremità terminavano con degli uncini, i quali facevano presa sul pelo degli animali o sui tessuti. Seguendo questo principio e dopo numerosi esperimenti e studi, nel 1955 l'ingegnere brevettò il Velcro. Inizialmente il materiale era costituito da due strisce di cotone e solo successivamente si utilizzò nylon, materiale migliore allo scopo e capace di essere cucito ovunque.



Figura 25: Primo piano di George De Mestral con il suo cane

Turbina eolica e colibrì

Biomimic Wind converter, perfetto connubio tra biomimetica ed efficienza energetica, è una turbina eolica che sfrutta l'energia del vento imitando il volo dei colibrì. Questa tecnologia è basata su un sistema di due pale che oscillano disegnando nell'aria un "8", simulando il movimento effettuato dai piccoli uccelli quando stazionano in volo.

Emulando il movimento a forma di infinito delle loro ali, è possibile convertire il moto lineare in rotazione in modo efficace. Inoltre, si è in grado di catturare energia sia nel moto ascendente che in quello discendente.



Figura 26: *Biomimic Wind converter* e Colibrì

Gufo ed energia “silenziosa”

Le pale eoliche producono energia pulita, ma il problema principale risiede nel rumore generato dal movimento delle stesse per mezzo del vento. Un gruppo di ricercatori dell'università di Cambridge ha trovato un modo efficace per risolvere questo problema. La soluzione è stata trovata, sorprendentemente, nei gufi. I Gufi possiedono una ridotta apertura alare che tuttavia risulta



Figura 27: Gufo

ampia rispetto al loro peso totale e una frequenza di battito piuttosto bassa e silenziosa. Questo vantaggio è reso possibile dalla particolare conformazione “a pettine” dell'estremità alari di questi animali. La loro struttura è stata fonte d'ispirazione per gli

ingegneri che in seguito hanno realizzato un prototipo di pala eolica in grado di generare energia in modo silenzioso.

Il girasole “solare”

Questa brillante idea è stata pensata e realizzata da una azienda italiana che ha brevettato un fiore fotovoltaico, costituito da pannelli solari in grado di seguire lo spostamento del sole. Alla base di questo principio vi è proprio l’osservazione del girasole in natura. Questo pannello è un vero e proprio fiore dotato di petali che non solo catturano energia solare, ma seguono il movimento Terra-Sole per assorbire il maggiore quantitativo di energia possibile. Il “*Girasole*” è dotato di una tecnologia avanzata chiamata inseguimento solare dotata di un inseguitore biassiale. Il pannello, di impatto sia estetico che architettonico, nasce dalla ricerca effettuata su speciali pannelli in grado di essere resistenti e durevoli. La potenza di picco è 2,6 KWp e i suoi petali inferiori sono retraibili grazie a un movimento rototraslativo continuo, che li fa sovrapporre a quelli superiori, assicurando così la robustezza necessaria a ridurre a metà la potenza del vento. Può essere utilizzato in qualsiasi ambito, urbano o privato, e spostato in ogni luogo per ogni evenienza e senza alcun tipo di problema logistico.

Esempi di biomimetica infrastrutturale

Eastgate building centre

Un altro esempio affascinante di biomimesi e di architettura green è l’*Eastgate Building Centre di Harare*, in Zimbabwe. L’edificio, centro polifunzionale che ospita uffici ed un immenso centro commerciale, è stato realizzato dall’architetto Mick Pearce.



Figura 28: Eastgate building centre di Harare, in Zimbabwe

L'edificio ospita molti uffici ma non adotta alcun tipo di sistema convenzionale di ventilazione, dettaglio fondamentale date le temperature del luogo. Per realizzarlo si è ricorso ai principi dell'auto raffreddamento e della ventilazione appartenenti alle tane delle termiti africane. I termitai sono strutture complesse costituite da cumuli di terra in grado di mantenere l'aria fresca all'interno ad una temperatura costante, grazie a canali scavati nel sottosuolo che creano un ambiente ventilato.

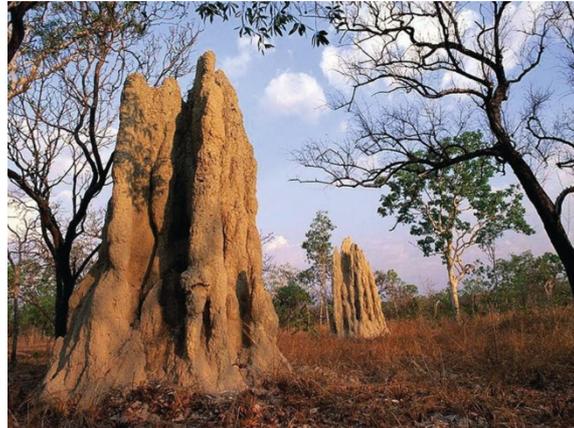


Figura 29: Tumuli di termiti. Da notare le dimensioni dei termitai rispetto agli alberi.

Eastgate è stato il primo edificio al mondo a imitare l'architettura delle termiti nel suo raffreddamento.

L'aria calda viene estratta attraverso caratteristici camini di mattoni sul tetto, tirando l'aria fresca notturna sul fondo. L'aria fresca viene catturata in lacune sotterranee e rilasciata nell'edificio durante il giorno attraverso reti di tubi e tunnel. Questa tecnica evita l'uso dell'aria condizionata e utilizza una frazione dell'energia.

Le termiti non sono l'unica ispirazione dalla natura. Anche l'architetto Mick Pierce ha guardato i cactus. Uno dei modi in cui un cactus può resistere alle alte temperature è che le sue molte rughe, creste e punte aumentano la sua temperatura superficiale. Ciò rende più facile disperdere il suo calore di notte. Anche l'edificio Eastgate prende in prestito questa

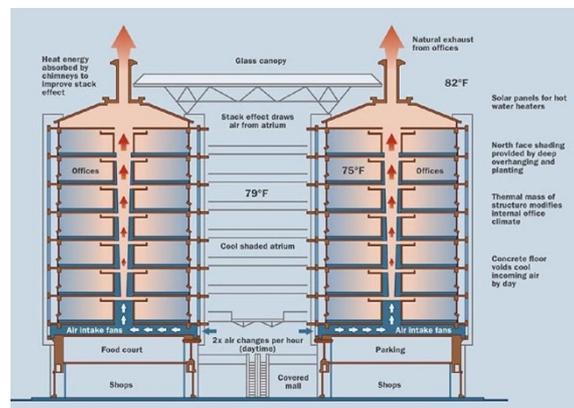


Figura 30: Principio di funzionamento dell'Eastgate building centre

idea, con facciate suddivise da forme e proiezioni in cemento, balconi profondi e piante. Eastgate utilizza il 35% in meno di energia totale rispetto al consumo medio di altri edifici convenzionali.

The Gherkin

The “Gherkin” (cetriolo), così chiamato per la sua forma conica, è costituito da 40 piani per 180 metri di altezza. Possiede una forma aerodinamica fuori dagli schemi, realizzata da Foster in seguito a studi effettuati per risolvere la problematica delle turbolenze d’aria provocate dalle superfici dei grattacieli. L’involucro esterno è realizzato per mezzo di una struttura in acciaio vetrata a spirale che si sviluppa lungo l’edificio e che consente al vento di defluire facilmente intorno all’edificio, evitando così zone di turbolenza e pressioni locali.

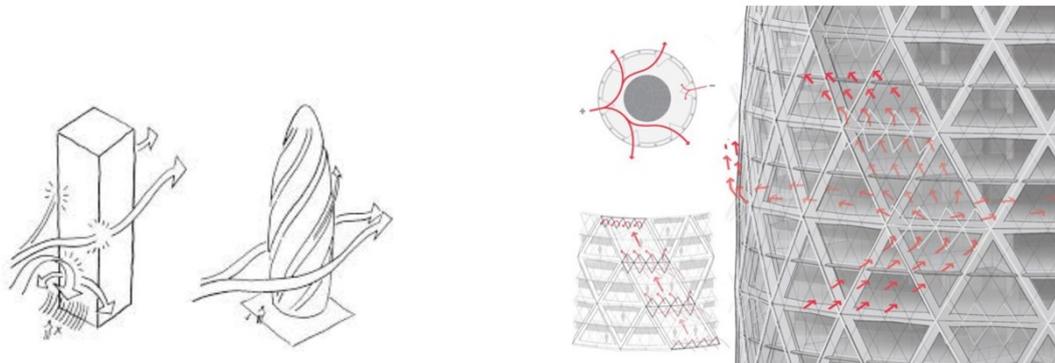


Figura 31: Nella figura a sinistra confronto del flusso del vento tra un normale grattacielo e il Gherkin; in quella di destra dettaglio del flusso del vento sulla superficie esterna

Negli studi di Foster è stato utilizzato un approccio biomimetico, ovvero che trae spunto da elementi naturali e li ripropone in elementi tecnologici. In questo caso l’ispirazione nasce dal mondo marino, in particolare da una spugna marina chiamata “cestello di Venere”, assimilabile anche alla pelle squamata degli squali. La particolare superficie curva della spugna marina e la scanalatura della pelle dello squalo permettono lo scorrimento dell’acqua con conseguente riduzione dell’attrito. Lo studio attraverso modelli parametrici ha portato ad una conformazione a cono bombato con scanalature, che risulta essere la sintesi di questi elementi naturali. Inoltre, si è posta particolare attenzione alla ventilazione, intesa sia come azione esterna che in termini di comfort interno, per il naturale ricircolo d’aria. Infatti, tramite pannelli in vetro triangolari, si è riuscita a riprodurre un’intercapedine ventilata. Relativamente al risparmio energetico, la realizzazione di una superficie ad involucro massimizza l’apporto solare e la ventilazione

naturale, hanno permesso di ridurre del 50% i consumi energetici rispetto ad una struttura tradizionale rettangolare con le stesse dimensioni.

BIQ House: il primo edificio alimentato ad alghe

La BIQ house è il primo esempio di “bio-adaptive façade”, cioè, dotata di una facciata alimentata a microalghe capace di coprire il 100% delle esigenze energetiche dell’edificio. Questo intelligente sistema è in grado di fornire contemporaneamente biomassa ed energia termica, facendo tendere a zero i consumi energetici dell’edificio. La facciata vetrata è composta da una serie di bioreattori contenenti le alghe che innescando il processo di fotosintesi, producono la biomassa e l’energia termica per alimentare l’edificio.

La luce diretta accelera il processo di proliferazione delle alghe che, crescendo, aumentano la quantità di energia prodotta e creano uno strato isolante tra l’interno e l’esterno trasformandosi in un frangisole naturale. Al variare delle condizioni climatiche si modificano le prestazioni dell’edificio, trasformando l’architettura in un vero e proprio organismo vivente.



Figura 32: BIQ House, Amburgo, Germania e Vetrata contenente alghe

Capitolo 2: CENNI SULLE TENSOSTRUTTURE

Dalle origini a Frei Otto

Le tensostrutture sono sinonimo di leggerezza in quanto appartengono ad una classe innovativa e “leggera”. Si tratta di strutture talmente leggere che per evitare un possibile sollevamento devono essere ancorate a terra. Sono architetture flessibili, versatili, smontabili anche retrattili ed immagazzinabili, capaci di configurare spazi di carattere permanente o semipermanente senza operare pesanti modifiche nei luoghi.

La tenda

Come si conosce dai libri di storia le esigenze di mobilità delle popolazioni nomadi hanno trovato accomodamento nelle tende e nelle capanne costituite da rami o da canne, dove grazie a particolari tecniche di intreccio si sono realizzati costruzioni flessibili e leggere.

Si tratta di strutture che sfruttano l’alto rapporto tra peso di rottura e peso proprio in modo da utilizzare un minimo quantitativo di materiale. La tenda rappresentava l’ambiente perfetto sia in termini di logistica che per tempi di costruzione: infatti tale abitazione risultava funzionale ai bisogni dei popoli migratori. Studiando le tende dei popoli nomadi ci si può ricondurre alle forme più moderne e attuali e, analizzandone le relazioni tra le parti componenti e le modalità costruttive, appare evidente come ogni forma del vivere nomade persegua i criteri di leggerezza, reversibilità e adattabilità. Nella tipologia strutturale



Figura 33: tenda dei nativi nordamericani

delle tende arabe si trovano soluzioni sviluppate poi nei circhi equestri e nei grandi “chapiteaux”, fino ad arrivare alle attuali soluzioni in membrana pretesa (tensostrutture). Un’ulteriore origine delle tensostrutture va ricercata negli antichi romani. Sfruttarono la loro abilità nel governare le vele delle imbarcazioni e nell’uso di superfici di tela, dette “velarium”, per coprire le cavee di teatri ed anfiteatri.

Ancora oggi si può riscontrare nei circhi l'impostazione strutturale delle antiche tende nomadi: la copertura flessibile in tessuto viene sorretta da pali ancorati al terreno.

Frei otto

I pionieri dell'architettura leggera nel nostro secolo sono da individuarsi nelle figure di Frei Otto e Buckminster Fuller. Grazie alle loro ricerche, ai loro principi e alle loro sperimentazioni si è capito il funzionamento della gran parte delle strutture a membrana dei nostri giorni.

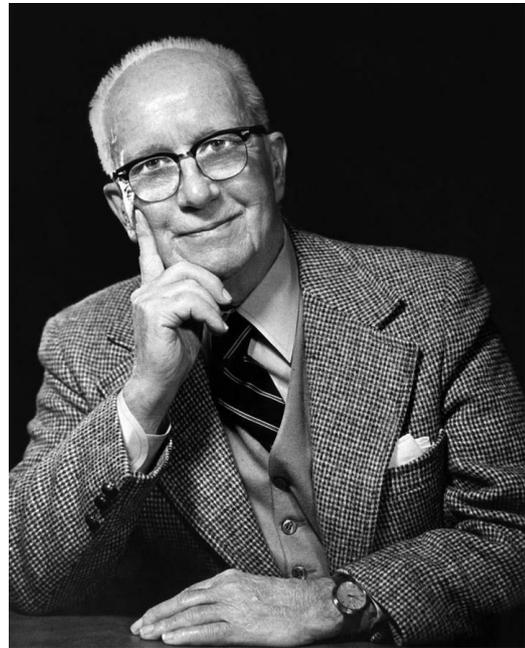
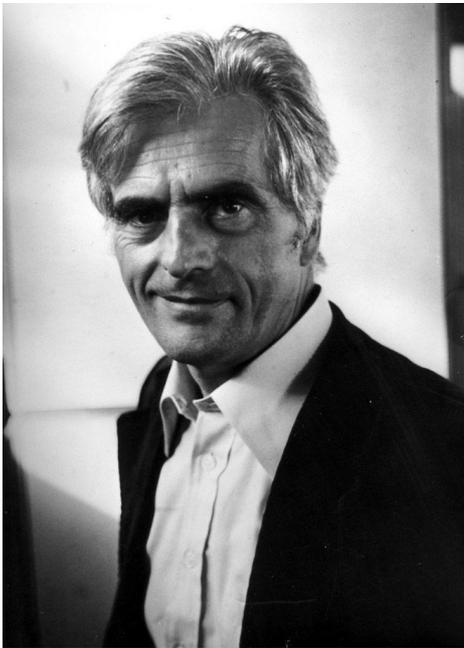


Figura 34: Frei Otto e Buckminster Fuller

Frei Otto fu uno straordinario innovatore la cui influenza è sottolineata sia nell'architettura radicale sia nei progetti di Renzo Piano che, in contatto con Peter Rice (collaboratore di Otto), prendono come modello la leggerezza e l'ottimizzazione degli elementi strutturali.

Egli dichiara di essere alla ricerca dell'essenziale e si avvale della fondamentale collaborazione di biologi per la determinazione dei processi del mondo naturale.

Per le architetture leggere rintraccia nella ragnatela il modello naturale delle tensostrutture. Studiando la conformazione delle ragnatele, Otto individuò lo schema

strutturale delle stesse, le quali avranno una forma di curva a “sella” e saranno mantenute in posizione da una serie di tiranti.

Per le strutture pneumatiche il modello naturale è rintracciato nelle superfici minime delle bolle di sapone.

Per ancorare il progetto a un contesto architettonico e ottenere un'ulteriore comprensione delle costruzioni a trazione, si è studiato nella pratica il lavoro e le teorie dell'architetto Frei Otto. Perseguendo la missione di creare di più con meno, il suo lavoro ha sviluppato le tradizionali strutture di tende e conchiglie trasformandole in edifici moderni. Utilizzando tecnologie considerate innovative durante gli anni '60 e '70, l'ingegner Otto ottimizzò l'uso di materiali come l'acciaio e il tessuto per creare strutture eccezionalmente leggere, ma forti.

Invece di usare i metodi classici per risolvere i problemi di elementi sottoposti a carichi gravitazionali, Otto ha sperimentato i confini dello sforzo a trazione. In edifici che lavorano staticamente, queste indagini non sono necessarie a causa dei materiali che si occupano principalmente di forze di compressione. Tuttavia, quando si lavora con strutture di trazione, il caso viene invertito. I suoi studi hanno permesso di utilizzare forme specifiche per ridurre lo stress di tensione e creare costruzioni più leggere ed efficienti dal punto di vista energetico.

Per riassumere questa particolare teoria, Otto vede l'architetto non come un progettista dello spazio, ma come colui che ha il compito di gestire i processi energetici di una costruzione. I suoi tentativi di creare superfici minime non era solo un metodo per trasmettere le leggi della fisica, ma anche un tentativo di ottimizzare il consumo di energia in tutte le fasi della costruzione. Combinando architettura, ingegneria e curiosità, Otto ha realizzato le sue opere con dettagli eccezionali e un processo di progettazione innovativo. Nel suo libro 'Finding form', co-autore con l'architetto Bodo Rasch, il concetto di architettura minimale è ulteriormente discusso. Essi sostengono che può agire come soluzione ad alcuni dei nostri problemi moderni, al consumo di energia e alla relazione tra ambienti costruiti e naturali.

Continuando l'argomento, Otto e Rasch affermano che costruire è esercitare il potere; quindi, bisogna trovare un modo per rendere questo processo sostenibile e delicato per tutti coloro che sono affetti, compresa la natura. Coesistere con la natura significa essere

adattabili, che è ciò che Otto sostiene sia l'obiettivo con la sua architettura. Gli edifici devono essere naturali e leggeri per essere sostenibili.

Otto guardò anche alla natura per trovare forma e ispirazione per le sue invenzioni architettoniche. Durante una delle sue lezioni all'Università di Stoccarda, ha affermato che tutto ciò che esiste è costruito, sia artificiale che naturale, perché la costruzione è solo mettere insieme le cose. L'importanza di guardare gli elementi della costruzione naturale deriva dalla necessità di coesistere con la natura. Per fare ciò, dobbiamo capire come i progressi biologici si adattano alla natura e provare metodi simili.

Otto chiama i tentativi di usare questa legge "il percorso inverso". L'obiettivo non è copiare la natura, ma comprenderla attraverso l'innovazione e i test tecnologici. Dopo che questi progressi evolutivi sono stati studiati, possono essere applicati alla costruzione per creare una situazione di vita più convivente, tra l'uomo e la natura.

Dalle strutture pesanti a quelle leggere

La riduzione del peso delle strutture e, di regola, la minimizzazione dei costi e dei tempi di costruzione, sono stati i principali obiettivi da raggiungere nell'evoluzione della scienza e tecnologia delle costruzioni. La riduzione dei pesi propri o pesi portanti, detti propriamente anche pesi morti (Dead Load), presentano andamento iperbolico nel tempo, come riportato nella figura 35.

La causa principale degli enormi pesi strutturali utilizzati dagli Assiri, Romani e nel periodo Gotico è da attribuire ai bassi valori di efficienza strutturale e di rapporto resistenza/peso ($K = \sigma/g$) dei materiali utilizzati.

Resistendo a soli sforzi di compressione, i mattoni e i materiali litoidi dovevano essere associati a schemi che si basassero esclusivamente sull'effetto stabilizzante della gravità. Gli archi, le cupole e le volte venivano idealizzati e realizzati con spessori enormi, in modo che la curva delle pressioni originata dal peso proprio della struttura fosse poco influenzata dall'effetto provocato dai carichi accidentali (pesi portati), garantendo stabilità con il centramento della curva stessa all'interno della sezione strutturale.

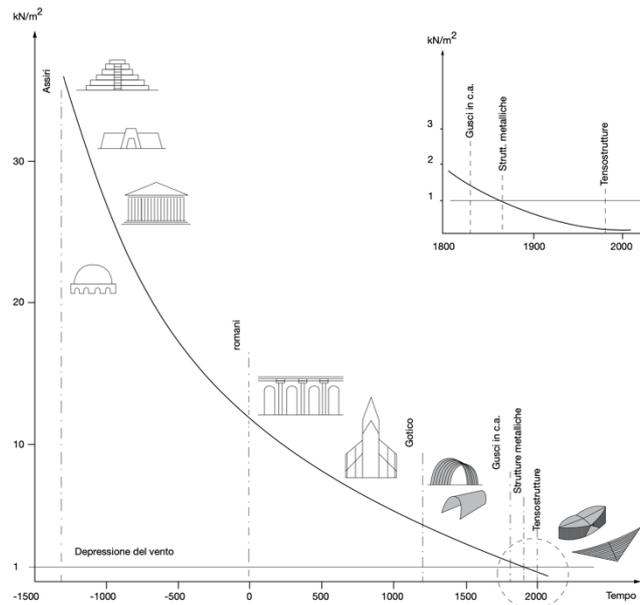


Figura 35: Piano cartesiano rappresentante l'andamento iperbolico nel tempo dei Dead Load

In queste tradizionali e pesanti costruzioni il rapporto tra peso portante e peso portato risulta molto maggiore dell'unità, con conseguente basso rendimento strutturale.

Per schematizzare si possono definire pesanti quel tipo di strutture che rendono valevole il seguente rapporto:

$$\frac{PESO\ PORTANTE}{PESO\ PORTATO} \gg 1$$

PESO PORTANTE= peso proprio (permanente strutturale)

PESO PORTATO= carichi utili o accidentali, così chiamati in quanto portati dalla struttura stessa

Con l'avvento della rivoluzione industriale, grazie all'utilizzo di nuovi materiali da costruzione (acciaio) si ha un notevole abbassamento del precedente rapporto, con conseguenti schemi costruttivi e tipologie strutturali più efficienti.

Il materiale acciaio presenta intrinsecamente un elevato rapporto resistenza-peso, caratteristica essenziale che permette al materiale di abbattere la soglia del rapporto unitario tra peso portante e peso portato. Inoltre, in unione con il calcestruzzo permette la

trasmissione di elevati valori di tensione principali e la possibilità di ottenere configurazioni geometriche complesse.

Gli sforzi di trazione trasmesse dalle barre d'acciaio permettono di ridurre i pesi dell'elemento in acciaio-calcestruzzo. In fase di gettata, la plasticità del calcestruzzo permette di adattare le superfici medie delle strutture portanti in modo da lavorare, almeno per la condizione di carico permanente, in regime membranale.

Grazie alla resistenza a compressione del calcestruzzo e alla resistenza a trazione dell'acciaio si sono adottati schemi strutturali a comportamento meccanico membranale avente come risultato la realizzazione di gusci sottili di copertura con alti valori di luce libera e bassissimi spessori (10-15 cm).

Il progresso tecnologico ha permesso all'acciaio di evolversi fino a costituire acciai ad alta resistenza e con l'avvento delle funi, si è riusciti a sfruttare la massima capacità resistenti, instaurando esclusivamente sforzi di trazione.

Si arriva quindi alla nascita delle tensostrutture.

L'obiettivo principale di queste strutture è la minimizzazione dei pesi propri strutturali. Il peso portante strutturale è ora, circa 100 volte minore rispetto alle costruzioni in calcestruzzo armato e 10 volte minori di quelle in acciaio.

Ovviamente la riduzione del peso strutturale non porta con sé solo benefici, ma introduce nuovi problemi quali il sollevamento delle coperture dovute alla depressione del vento, l'instabilità aeroelastica e il flutter.

Con l'avvento delle tensostrutture, quindi si passa dal concetto delle costruzioni "pesanti" a quello delle costruzioni "leggere", dove il rapporto tra peso portante e peso portato diventa una quantità molto minore dell'unità:

$$\frac{PESO\ PORTANTE}{PESO\ PORTATO} \ll 1$$

Considerazioni sulle tensostrutture

La caratteristica principale delle tensostrutture è quella di avere elementi portanti principali dotati di sola rigidezza assiale, attiva in stato unilaterale di sollecitazione per trazione ($N > 0$). Questo elemento strutturale può essere anche chiamato fune.

L'elemento fune può essere definito ipostatico o a geometria variabile in quanto non essendo dotato di rigidità tagliente e flessionale può trasmettere i carichi agli ancoraggi solo per mezzo di cambiamenti di forma.

In fase elastica, la non linearità è di tipo a incremento di rigidità (hardening), dove:

- il legame carichi-spostamenti cresce più che proporzionalmente;
- il legame carichi-sollecitazioni cresce meno che proporzionalmente

La conoscenza del comportamento meccanico non-lineare dell'elemento fune risulta di fondamentale importanza durante la fase progettuale delle tensostrutture, in modo da definire uno schema strutturale capace di scaricare a terra le forze con la conseguente massimizzazione del rendimento dei materiali impiegati, il minimo ingombro intermedio e il massimo risultato estetico.

Fune: il rapporto f/L

Se consideriamo una fune inestensibile AB essa può essere schematizzata con un sistema articolato semplicemente connesso, in cui il numero delle aste diviene infinito mentre la lunghezza delle stesse diviene infinitesimo. La fune, grazie alla sua flessibilità, ha la capacità di adattarsi secondo una linea geometrica qualsiasi. Assumendo la fune inestensibile, facciamo l'ipotesi che quest'ultima, in un arco compreso tra due punti qualsiasi, mantenga la stessa lunghezza. Grazie a queste semplificazioni si può trattare semplicemente il comportamento statico-cinematico dell'elemento fune.

Lo studio dell'equilibrio dei fili è basato sul seguente postulato: condizione necessaria e sufficiente per l'equilibrio di un tratto AB di un filo flessibile e inestensibile senza peso e sollecitato unicamente da due forze F_A e F_B applicate agli estremi A e B, è che queste siano uguali e opposte e dirette verso l'esterno del tratto di filo considerato: $F_{AB} > 0$.



Figura 36: A sinistra è raffigurato l'elemento fune sottoposto a una forza di trazione, a destra lo stesso elemento sottoposto a compressione

In base alle precedenti ipotesi, la fune di lunghezza AB varierà in funzione delle coordinate dei nodi di ancoraggio e del peso proprio.

Altro parametro fondamentale per acquisire sensibilità nell'ambito della progettazione delle funi, è il rapporto tra i parametri geometrici e lo stato di sollecitazione.

Il rapporto f/L è di fondamentale importanza perché da esso possiamo rilevare le seguenti condizioni:

- per alti valori del rapporto f/L lo stato di sollecitazione è poco influenzato da variazioni di f ;
- per piccoli valori di f/L lo stato di sollecitazione può aumentare notevolmente per piccole variazioni di f ;
- l'intervallo di convenienza economica per il rapporto f/L può essere individuabile nell'intervallo $f/L=0,04\div 0,10$.

Metodi di stabilizzazione per funi singole

Le tensostrutture possono essere divise in due gruppi: strutture in fune a funzionamento discreto e strutture membranali (o continue). Inoltre, le tensostrutture in fune possono essere a loro volta suddivise in tre sottogruppi costituiti da:

- fune singola: struttura monodimensionale soggetta a carichi giacenti essenzialmente su un piano.
- trave di funi, o tensostruttura a funi contrapposte: è un sistema pre-sollecitato formato da segmenti multi-connessi giacenti sullo stesso piano di azione dei carichi.
- rete di funi monostrato: è un sistema pre-sollecitato nel quale la struttura è formata da segmenti multi-connessi, giacenti su una superficie necessariamente a curvatura totale negativa.

Dallo studio del comportamento meccanico si è dedotto, che per usufruire dell'elevate caratteristiche meccaniche del sistema è necessario contenere gli spostamenti cinematici (i quali sono estremamente dannosi) con determinati metodi di stabilizzazione geometrica.

Si possono così ottenere differenti sistemi di stabilizzazione quali:

- stabilizzazione con elementi flessionalmente rigidi come archi o travi;
- stabilizzazione mediante gravità con l'introduzione di pesi permanenti più grandi dei carichi accidentali, in modo da contenere le deformazioni causate da carichi simmetrici;

stabilizzazione mediante cavi secondari con lo scopo di introdurre uno stato di pretensione.

La stabilizzazione si ottiene per contrasto tra le funi portanti e le funi stabilizzanti.

Metodi di stabilizzazione per sistemi piani di funi

Per ridurre la deformazione dell'elemento portante si introduce una rigidità artificiale mediante una pretensione iniziale. Solitamente per creare la pretensione si introduce, in aggiunta alle funi portanti avente curvatura rivolta verso l'alto, altre funi stabilizzanti con curvatura rivolta verso il basso. La pretensione viene appunto generata dal contrasto fra queste due tensioni fra funi. Come sottolinea la parola, nei sistemi piani le funi sono poste nello stesso piano verticale che coincide con il piano dei carichi.

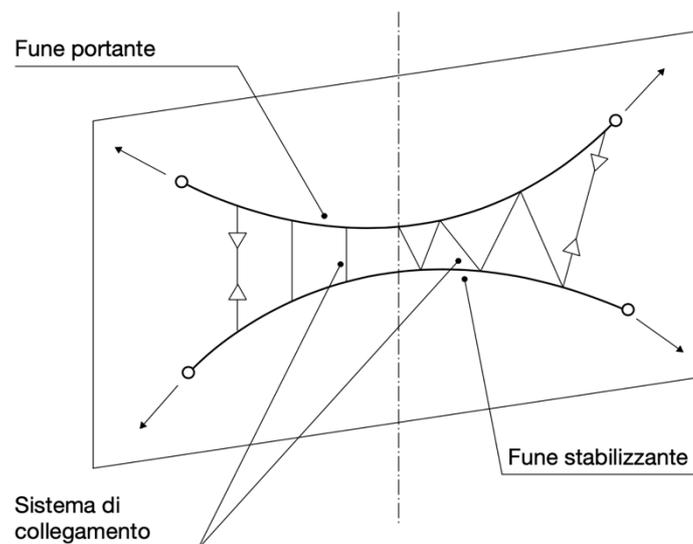


Figura 37: Rappresentazione di un sistema piano di funi con i suoi componenti principali

Sistema piano a collegamenti verticali

I metodi che ne derivano sono sostanzialmente tre:

- sistema aperto: è lo schema più utilizzato. È costituito dalla fune superiore avente funzione portante e quella inferiore con funzione stabilizzante. Tutti i collegamenti tra le funi sono di tipo a trazione. Nel momento in cui si applica il carico esterno si ha una

diminuzione della trazione nella fune stabilizzante con conseguente aumento di sforzo nella fune portante. Come detto precedentemente, bisogna valutare con attenzione la pretensione in modo da garantire, anche nel caso di carichi gravosi, un residuo di tensione nella fune stabilizzante.

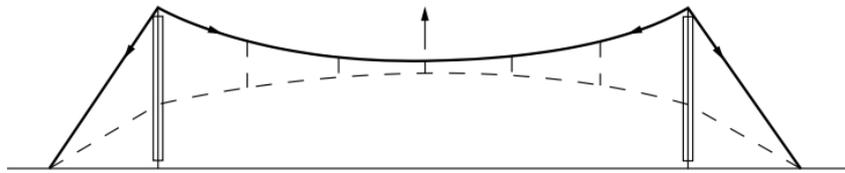


Figura 38: Sistema aperto soggetto a carico esterno

Nel caso si verificasse depressione da vento, le funzioni assunte dalle funi verificano un comportamento contrario al precedente.

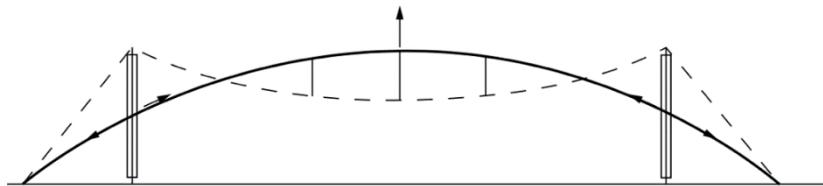


Figura 39: Sistema aperto soggetto a depressione del vento

- sistema misto: nel sistema misto la fune principale e quella secondaria si intersecano. Di conseguenza gli elementi di collegamento sono compressi centralmente mentre rimangono tesi nella parte esterna. La suddetta tipologia, come il sistema chiuso, necessita di un irrigidimento in posizione trasversale con il compito di evitare lo svergolamento della trave di funi, cosa che non si verifica nel caso di sistemi aperti.

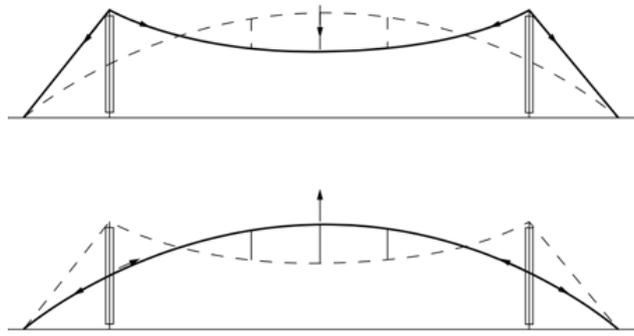


Figura 40: Sistema misto soggetto prima a carico esterno e successivamente soggetto a depressione da vento

- sistema chiuso: in questo sistema gli elementi verticali di collegamento sono racchiusi entro le due funi principali. La fune portante è posizionata in intradosso, mentre la stabilizzante è quella in estradosso. I collegamenti verticali fungono da puntoni, avente funzione di mantenere in tensione i due cavi e di trasferire alla fune portante i carichi agenti sulla copertura. Per far sì che il tutto funzioni correttamente le aste verticali dovranno essere sempre compresse. Il sistema è instabile fuori dal proprio piano e per evitare sbandamento si devono introdurre elementi controventanti trasversali. È un sistema particolarmente vantaggioso ma nella pratica applicazione è di scarso utilizzo. Questo sistema ha come vantaggi principali quelli di diminuire l'altezza dei tamponamenti laterali, smaltire le acque piovane e non richiede particolari strutture di ancoraggio.

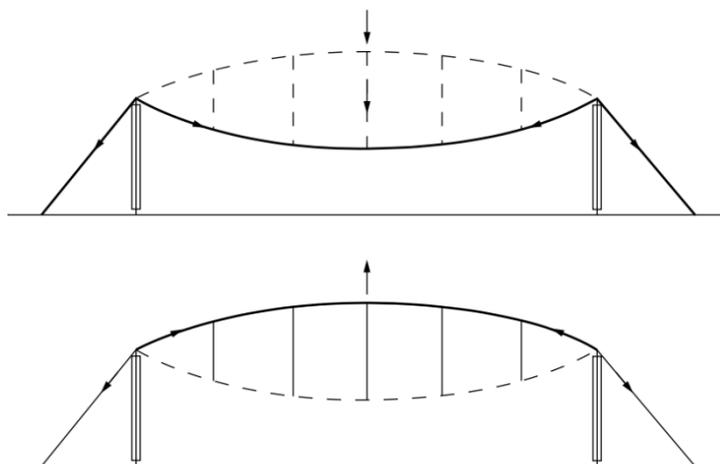


Figura 41: Sistema chiuso soggetto a carico esterno e successivamente sistema chiuso soggetto a depressione da vento

Sistema piano a collegamenti diagonali

Lo schema strutturale a collegamenti verticali è molto apprezzato ma presenta alcuni limiti soprattutto per quanto riguarda l'azione del vento, il quale può provocare deformate asimmetriche che possono creare serie difficoltà nella realizzazione di coperture e dei relativi giunti elastici.

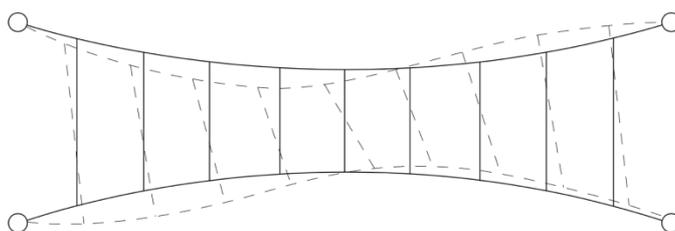


Figura 42: Sistema piano a collegamenti verticali

Questa tipologia di problema è definito David Jawerth, il quale propose e realizzò un nuovo sistema strutturale con collegamenti inclinati.

Questa nuova tipologia di collegamento ha il vantaggio di ostacolare efficacemente gli spostamenti orizzontali e di conferire al complesso strutturale una notevole rigidità anche sotto l'azione di carichi asimmetrici.

Di seguito si riportano alcuni schemi tipo del sistema di collegamento Jawerth:

- schema simmetrico con collegamento in mezzeria tra la fune stabilizzante e quella portante



Figura 43: Schema simmetrico con collegamento in mezzeria tra la fune portante e quella stabilizzante

- schema asimmetrico, con notevole libertà di composizione;

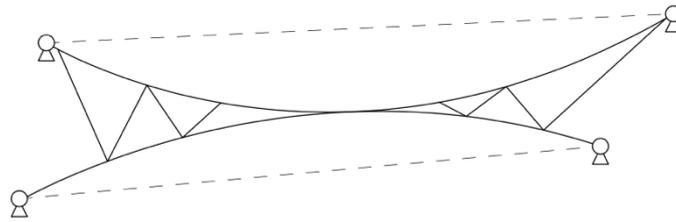


Figura 44: Schema asimmetrico

- schema a funi incrociate, con possibilità di riduzione dell'altezza degli ancoraggi della fune portante.

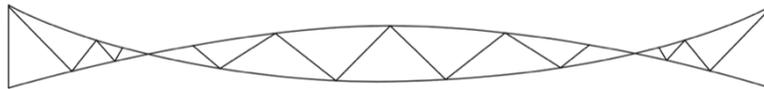


Figura 45: Schema a funi incrociate

Sistemi di copertura tensostrutturali piani

Il progettista, grazie ai vari metodi e tecniche precedentemente elencati, ha la possibilità realizzare coperture di forma qualsiasi per mezzo di schemi disposti in modo ripetitivo (in direzione parallela o radiale). Di seguito si illustra brevemente le due tipologie di travi principali: travi disposte parallelamente e travi disposte radialmente.

- travature disposte parallelamente: si suppone di considerare la tipologia a trave di funi a sistema aperto, con tiranti disposti in posizione verticale oppure inclinati. Se si opera per traslazione dell'elemento principale, si ottiene una superficie di copertura concava a forma cilindrica.

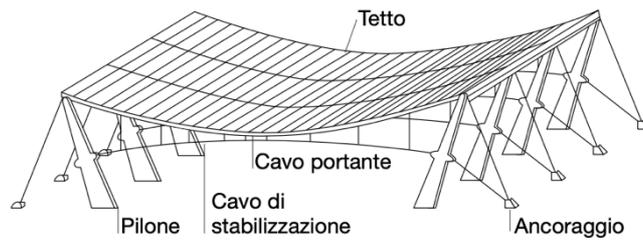


Figura 46: Travi di funi a sistema aperto con collegamenti verticali

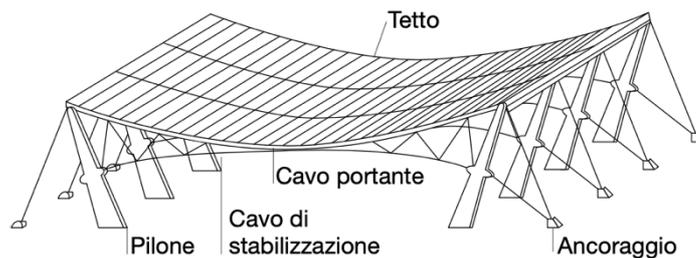


Figura 47: Travi di funi a sistema aperto con collegamenti inclinati

Per le travi di funi, come per quelle a funi singole, si ha la possibilità di realizzare superfici a doppia curvatura, variando semplicemente l'altezza degli ancoraggi delle funi portanti.

- travature disposte radialmente: se al posto di disporre le travature parallelamente si posizionano radialmente si riescono a realizzare le cosiddette tensostrutture a ruota (o radiali). Il funzionamento di questa particolare tipologia è permesso grazie all'utilizzo di una trave anulare piana interna, alla quale devono necessariamente ancorarsi le tensostrutture piane pretese e uscenti a raggiera da un corpo centrale. All'esterno i raggi sono vincolati ad una struttura ad anello, la quale è collegata ad ulteriori strutture di sostegno risultando sollecitata prevalentemente a compressione. I raggi sono realizzati da funi o con sistemi piani di funi. Solitamente l'anello centrale risulta più piccolo del rispettivo anello esterno.

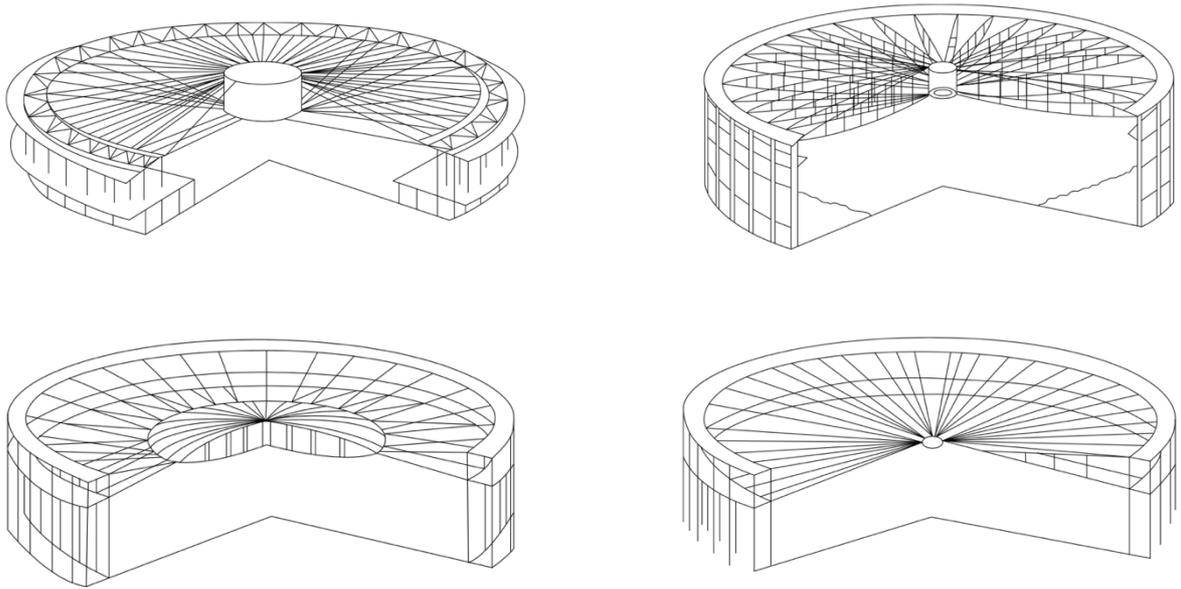


Figura 48: Esempio di travi di funi disposte radialmente

Strutture di bordo e di ancoraggio

La sicurezza nelle tensostrutture è garantita grazie all'eliminazione dei fenomeni di instabilità dell'equilibrio. Per raggiungere tale stabilità, però, le strutture di bordo devono trasmettere in fondazione notevoli forze orizzontali. Di conseguenza le strutture di bordo diventano di fondamentale importanza e la progettazione di quest'ultime deve essere svolta attentamente. Lo schema più semplice in assoluto è rappresentato dalla mensola, la quale risulta però molto costosa.

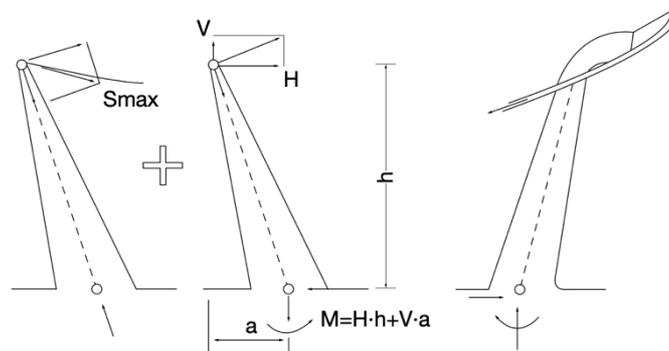


Figura 49: Struttura di ancoraggio a mensola

Un altro sistema molto diffuso è il cosiddetto sistema a cavalletto, il quale è costituito da un puntone verticale o inclinato e un tirante vincolato al terreno. Al di sotto del terreno, lo sforzo di trazione presente nel tirante viene scomposto secondo due direzioni: una verticale e una orizzontale. La componente verticale viene trasmessa da un tirante ancora in profondità, mentre la componente orizzontale è trasportata alle fondazioni per mezzo di un puntone orizzontale.

Le fondazioni verranno dimensionate in funzione del carico più gravoso (carico neve + peso proprio) agente sul cavo superiore portante. I blocchi di fondazioni, però, non sono le uniche possibili soluzioni. Ad esempio si può avere:

- cavi di controventatura ancorati a un'ossatura di costruzioni tradizionali;
- cavi ancorati a un anello circolare o ellittico;
- cavi ancorati alla struttura di tribune, nel caso di stadi o palazzi dello sport.

Elementi fondamentali che influenzano il dimensionamento delle strutture di ancoraggio sono la distanza D e l'angolo α sugli sforzi di trazione del tirante esterno.

Dallo schema sottostante è possibile comprendere come lo sforzo nel tirante diminuisca all'aumentare della distanza D e come risulta di fondamentale importanza distanziare i punti di ancoraggio dal puntone compresso.

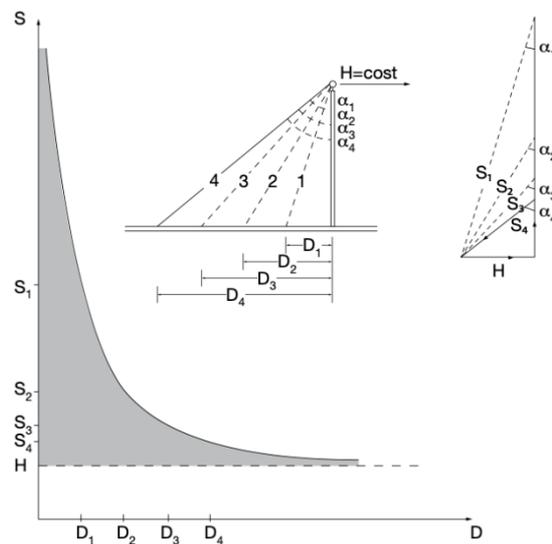


Figura 50: Schema rappresentante lo sforzo del tirante in funzione della distanza

Sistemi spaziali

Questo tipo di sistema di stabilizzazione è una diretta conseguenza di quello piano precedentemente descritto. In questo caso, le funi portanti e stabilizzanti non giacciono sullo stesso piano, ma in piani verticali che risultano essere distinti tra di loro; nella maggior parte dei casi questi piani si intersecano fino a formare un angolo retto.

Il comportamento di un sistema spaziale può essere osservato nelle immagini sottostanti. Se si posiziona un carico concentrato su di un cavo sospeso esso provoca una deformazione nel punto di applicazione della forza stessa (figura 51 a). Nella seconda immagine (figura 51 b) l'insieme di cavi trasversali stabilizza il cavo portante riducendo l'effetto della deformazione. All'aumentare del numero dei cavi, diminuisce la deformazione della struttura (figura 51 c). nel sistema finale i cavi disposti nelle due direzioni partecipano al meccanismo resistente (figura 51 d).

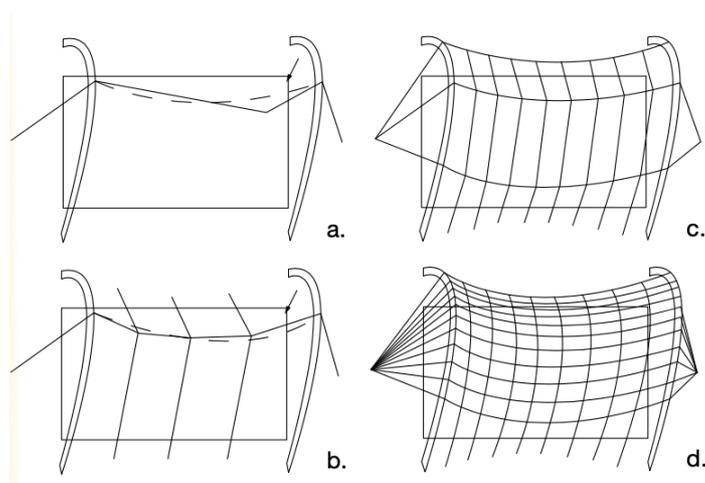


Figura 51: Sistema spaziale all'aumentare del numero di cavi

Il nodo di due funi disposte ortogonalmente tra loro e rappresentato nella seguente figura, dove con i simboli ψ_1 e ψ_2 sono indicati rispettivamente il cavo di stabilizzazione e quello portante. Applicando un carico esterno gravitazionale (diretto verso il basso) si può notare un incremento di tensione nella fune portante, con conseguente diminuzione di tensione nella fune stabilizzante.

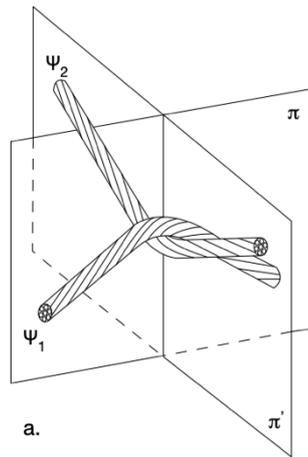


Figura 52: Disposizione ortogonale tra il cavo di stabilizzazione e quello portante con relativa nomenclatura dei piani

Lo schema precedentemente descritto si inverte nel caso che, al posto di una forza di tipo gravitazionale, si presentasse un carico di depressione dovuto all'azione del vento.

Una caratteristica unica nelle tensostrutture con stabilizzazione a rete di funi è rappresentata dalla doppia curvatura negativa.

Effetti del vento sulle costruzioni leggere

Gli effetti del vento su di una costruzione dipendono da diversi fattori quali la velocità del vento, ma anche dalla dimensione, forma e caratteristiche della costruzione.

Gli effetti del vento vengono suddivisi in effetti statici e dinamici. I primi vengono analizzati come pressioni e depressioni agenti sulle superfici esterne e interne della costruzione. Normalmente si considerano solo gli effetti che agiscono normalmente sulla superficie, ma per edifici di grande dimensione l'effetto tangenziale non è del tutto trascurabile. D'altro canto, gli effetti dinamici dell'azione del vento si traducono in fenomeni di vibrazione. Trattando le costruzioni leggere, questi tipi di effetti possono portare a:

- frequenze critiche e formazione di turbolenze, che possono far nascere oscillazioni longitudinali, in relazione alla direzione del vento e in risonanza con la frequenza naturale della costruzione;

- velocità critiche con successiva creazione di oscillazioni trasversali;
- velocità critiche di instabilità aerodinamica che generano, di conseguenza, instabilità aerodinamica flessione-torsionale.

Tutti questi fenomeni possono portare a grandi deformazioni e, nel caso estremo, al crollo della struttura in genere, per evitare questo tipo di problemi, si utilizzano profili di forma tale da evitare fenomeni di instabilità aerodinamica.

Solitamente l'effetto statico del vento viene ottenuto schematizzando lo stesso pressione distribuita sulla superficie della copertura, dipendente da differenti coefficienti aerodinamici che variano da punto a punto. I coefficienti aerodinamici sono proposti da normativa e dipendono dall'esposizione, dalla forma, località e rugosità del terreno della costruzione esaminata.

Materiali da copertura

I materiali tessili impiegati nelle tensostrutture sono principalmente due: il poliestere spalmato PVC e la fibra di vetro spalmata PTFE.

Membrane di fibra di poliestere spalmato PVC

Nel mondo delle membrane tessili per architettura è sicuramente il materiale più diffuso, versatile ed economico. Il tessuto è dotato di elevata resistenza e buona elasticità (lunghezza di rottura circa 20-30%) ed è composto in fibra di poliestere a cui si aggiunge una spalmatura di PVC contenente additivi in grado di garantire la flessibilità del risultato finale, il colore, la resistenza ai funghi, ai raggi UV e alla fiamma. Questi materiali sono solitamente laccati superficialmente da uno strato trasparente in PVDF (polivinilidene fluoruro) che aiuta a mantenere la pulizia della superficie e la durata nel tempo. Questo tipo di materiale è dotato di ottime prestazioni sia per piccole che grandi coperture e le sue caratteristiche e funzionalità sono garantite per oltre 20 anni.



Figura 53: Esempio di membrana di fibra di poliestere spalmata PVC

Membrana in fibra di vetro spalmata in PTFE

Sono le membrane più performanti e durature. La fibra di vetro, molto resistente e stabile alla trazione garantisce eccellenti prestazioni strutturali ad un peso leggero. I prodotti realizzati in PTFE (teflon) mostrano una pulizia e una durata della membrana superiore ai rispettivi in PVC. Il limite principale di questo prodotto risiede nel costo, decisamente più alto rispetto alle membrane in poliestere/PVC, nella più bassa velocità di confezionamento e nella impossibilità di piegare il materiale oltre un certo raggio in fase di trasporto in quanto la fibra di vetro potrebbe rompersi compromettendo le prestazioni meccaniche.

Capitolo 3: CASO STUDIO

Premesse

Per il seguente caso studio si è deciso di ricreare una tensostruttura a membrana, una struttura leggera che si ispirasse al mondo naturale, sia per quanto riguarda il riferimento estetico che quello strutturale. Si è deciso di modellare una struttura semplice, in quanto questa è stata utilizzata per mostrare e spiegare il processo di form-finding, mentre le ottimizzazioni riportate in seguito sono state generalizzate a una qualunque tensostruttura. La tensostruttura modellata presenta le seguenti dimensioni: 19,039 x 6,000 x 21,985 m. Nelle immagini si riportano tre differenti viste della configurazione deformata dell'opera. Il progetto è stato realizzato con un software agli elementi finiti chiamato *Dlubal*, per mezzo del quale si è analizzato il complesso strutturale con il caso di carico form-finding.

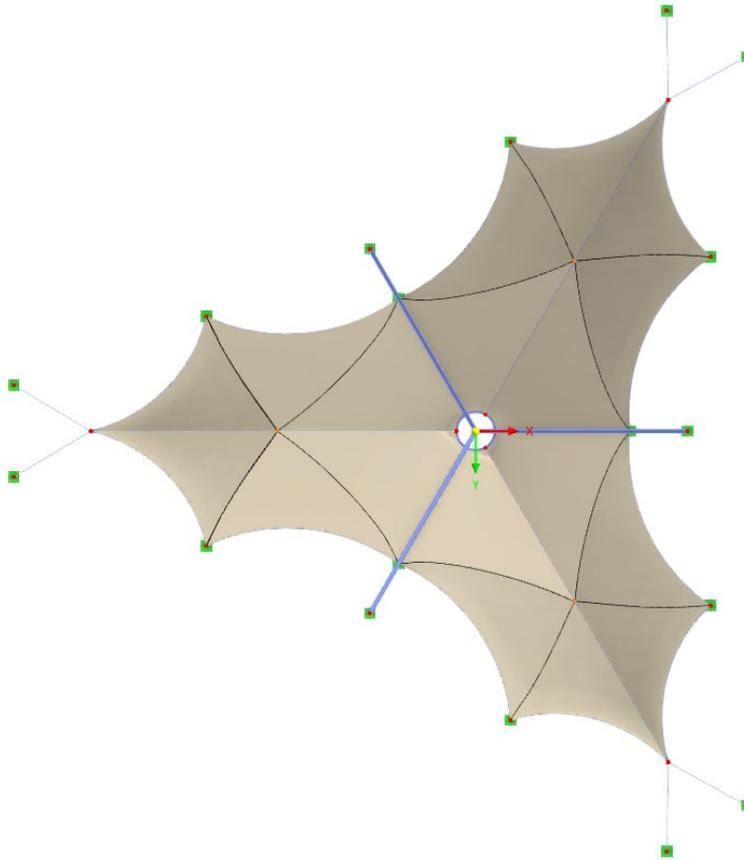


Figura 54: Vista in direzione z della tensostruttura con forma deformata

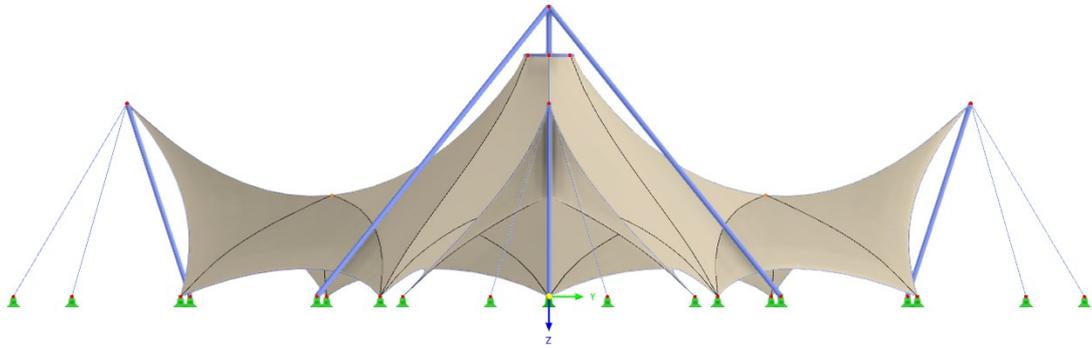
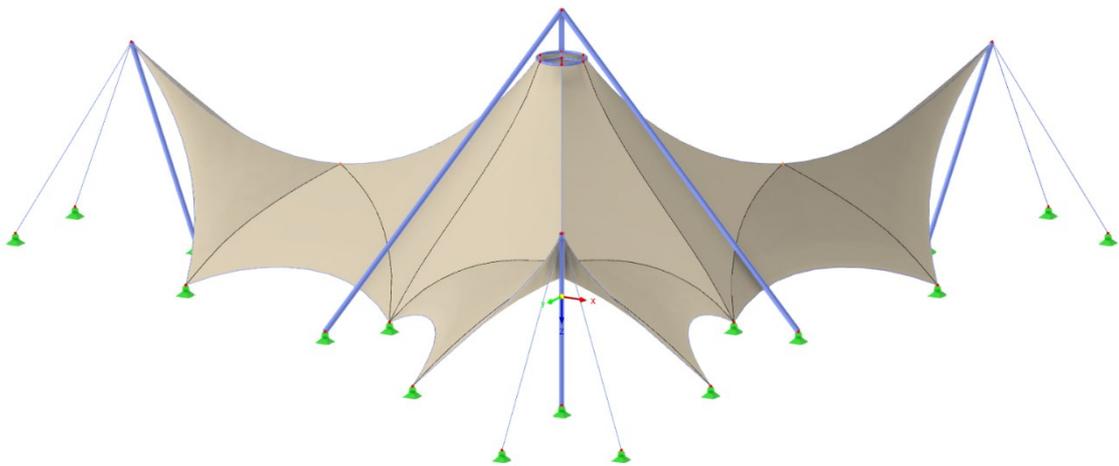


Figura 55: In alto, vista in direzione x della tensostruttura con forma deformata; in basso, vista assonometrica predefinita della tensostruttura con forma deformata



Si riportano i punti essenziali della ricerca effettuata per il caso studio: dapprima si è analizzata l'opera tramite il caso di carico form-finding in modo tale da ottenere una forma ottimale della struttura con lo scopo di ricreare uno stato di equilibrio stabile della stessa, comparandola in natura, con la forma e disposizione perfetta della ragnatela; successivamente si è proceduto con l'analisi di tre differenti ottimizzazioni da applicare alla membrana tesa:

- 1) Meccanismi di auto-guarigione rapida nelle piante e sviluppo di polimeri auto-riparanti ispirati alla pianta di *Ficus benjamina*.

- 2) Pannelli solari ispirati alle ali della farfalla nera *Pachliopta aristolochiae*.
- 3) Membrane fotoniche flessibili ispirate al coleottero longicorne *Neocerambyx gigas* per un raffreddamento passivo efficiente.

Le ottimizzazioni apportate sono state effettuate unicamente sulla membrana di copertura, e non su altre parti strutturali (quali ad esempio pilastri o cavi), in quanto essa rappresenta, in strutture tese, l'involucro e allo stesso tempo la struttura portante.

Introduzione al form-finding

Le strutture costituite da cavi e membrane adottano forme uniche sotto tensione, le quali però non sono note a priori; di solito non possono essere descritte tramite semplici funzioni matematiche, ma richiedono al progettista di essere coinvolto in un processo noto come "form-finding". Questo requisito distingue le tensostrutture da altri tipi di edifici, per esempio da quelli realizzati in acciaio, calcestruzzo e muratura, dove è possibile dettare la forma già dall'inizio del progetto.

Solitamente, il processo di ricerca della forma dovrebbe portare a produrre forme strutturali ottimali, che soddisfino sia i requisiti funzionali e di resistenza ad un minimo costo. In pratica questo processo permette di utilizzare una quantità minima di materiale ottimizzando la forma, la stabilità e la resistenza. Questo processo è stato reso possibile grazie a lavori sperimentali che si sono svolti su piccola scala, con la cooperazione di architetti, biologi ed ingegneri. Il percorso per raggiungere un prodotto estetico non è mai semplice e che il "principio leggero" ha le sue radici nella natura. In generale il processo di form-finding di membrane tese comporta:

- la costruzione di modelli fisici su piccola scala utilizzando le bolle di sapone, del tessuto oppure della carta;
- lo sviluppo di modelli computazionali utilizzando una varietà di tecniche numeriche, per esempio:
 - 1) Force Density Method (FDM): una procedura utilizzata per la progettazione di strutture di cavi;
 - 2) Surface Stress Density Method (SSDM): metodo analogo che considera solo le forme costituite da membrane;

3) Dynamic Relaxation Method (DRM): determina la posizione di equilibrio a partire da una configurazione iniziale attraverso un'analisi pseudo-dinamica.

Form-finding sulla struttura analizzata

I materiali utilizzati per le strutture a membrana sono ideati per resistere unicamente a trazione. Tutti i carichi sono trasferiti esclusivamente tramite trazione. In modo da garantire una sufficiente resistenza e una consistenza della forma per le strutture a membrana, è necessario fornire una adeguata pretensione.

A seguito della rigidità nulla dei materiali, è impossibile separare la disposizione della forma dalla verifica della precompressione in quanto la forma è definita dalla precompressione stessa. Ogni sistema spaziale di equilibrio delle forze (cioè, equilibrio delle forze pretese) determina in modo univoco la forma spaziale di una struttura a membrana. Avendo definito le condizioni al contorno e le forze di precompressione nello stato di equilibrio, si determina la forma attuale della struttura a membrana. La ricerca della forma di una struttura a membrana dipendente dalla pretensione ed è chiamata form-finding.

Per il caso di carico **CC1 – Form finding** si è utilizzata come tipo di analisi **un'analisi statica in grandi spostamenti | Newton-Raphson | 500 | 1**. Questo tipo di analisi è quello predefinito per analisi a grandi spostamenti. Le equazioni di tipo non lineare si risolvono numericamente utilizzando delle approssimazioni iterative alle tangenti. La matrice di rigidità tangenziale è determinata in funzione dello stato di deformazione attuale. Nella maggior parte dei casi, si raggiunge velocemente una convergenza (quadratica). I carichi del form-finding devono essere assegnati solo a un caso di carico con categoria di azioni "Pretensione". In caso contrario, si riceverà un messaggio di errore da parte del software agli elementi finiti.

I carichi di form-finding sono definiti utilizzando i carichi degli oggetti corrispondenti. È possibile definire carichi dell'area e delle aste.

Per la definizione dei carichi delle aste, si è definito come tipo di carico il **form-finding** con una distribuzione dello stesso di tipo **uniforme**. Per i parametri si è scelto il tipo di definizione della **forza media nell'asta** con una grandezza del carico (T_{avg}) corrispondente a 5.0 kN.

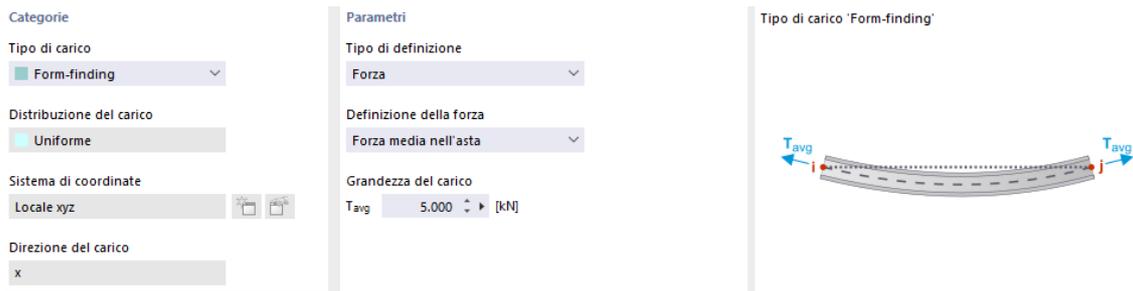


Figura 56: Processo di definizione del carico delle aste

Per la definizione dei carichi delle superfici, si è definito come tipo di carico il **form-finding** con una distribuzione dello stesso di tipo **ortogonale**. È stato utilizzato come metodo di calcolo la **proiezione**. Il metodo di proiezione è definito nel piano XY globale nella posizione attuale della struttura a membrana. Se l'inclinazione della membrana rispetto al piano XY globale è uguale a zero, la pretensione nella membrana corrisponde ai valori specificati. Se l'inclinazione della membrana rispetto al piano XY globale non è uguale a zero, la pretensione aumenta in direzione della linea di caduta, mentre la pretensione diminuisce in direzione della linea di letto.

Questo metodo consente di preservare l'equilibrio preteso nelle direzioni degli assi globali X e Y. Nella procedura di form-finding, il programma individua la disposizione della struttura a membrana nello spazio che prevede una pretensione di equilibrio anche in direzione dell'asse globale Z. Il metodo di proiezione, dove la pretensione di equilibrio è determinata nella proiezione, porta alla definizione della pretensione di equilibrio nello spazio, e quindi a trovare una forma spaziale chiara della struttura a membrana.



Figura 57: Processo di definizione dei carichi delle superfici

Prima di effettuare il calcolo, inteso come l'istante precedente all'applicazione del carico di form-finding, la tensostruttura si presenta con una forma originaria non deformata di questo tipo.

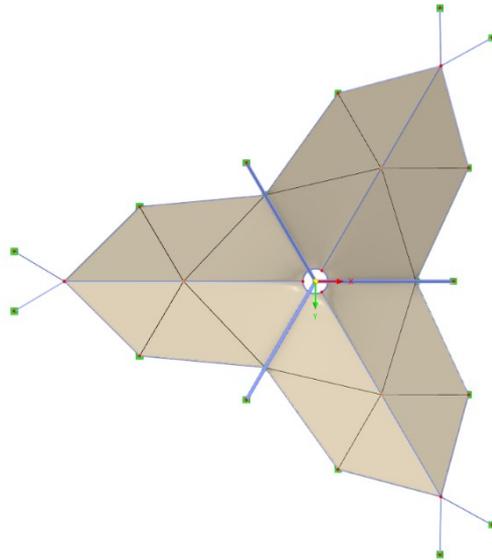


Figura 58: Vista in direzione z della tensostruttura con forma originaria

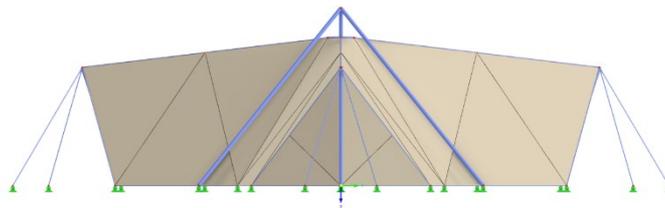


Figura 59: Vista in direzione x della tensostruttura con forma originaria

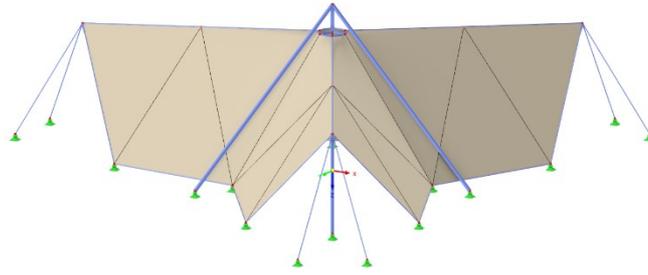


Figura 60: Vista assonometrica predefinita della tensostruttura con forma originaria

Dopo aver eseguito il calcolo, la struttura si presenta con la seguente forma deformata, in funzione dei parametri precedentemente impostati.

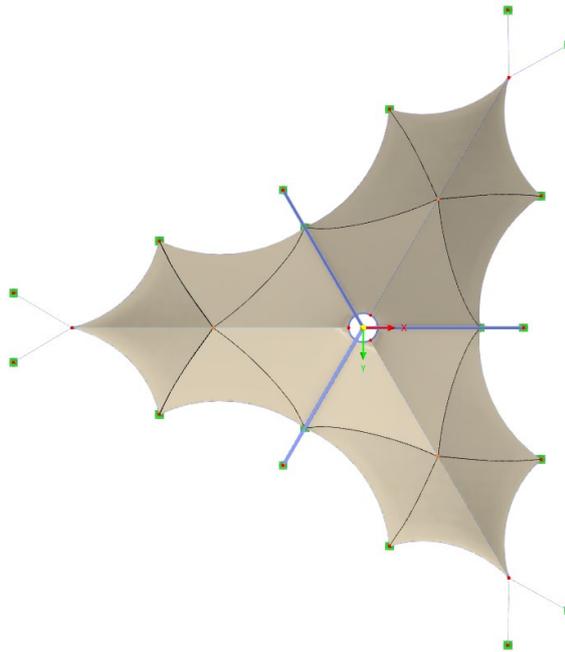


Figura 61: Vista in direzione z della tensostruttura con forma deformata

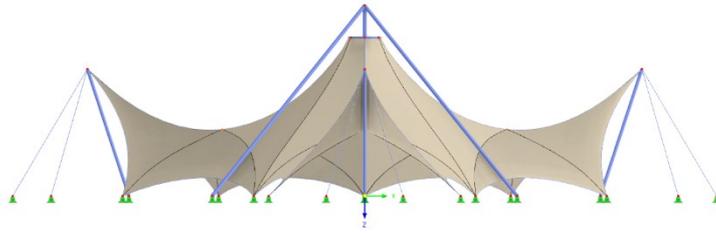


Figura 62: Vista in direzione x della tensostruttura con forma deformata

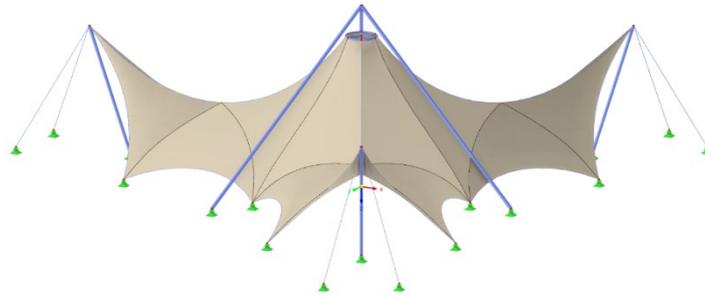
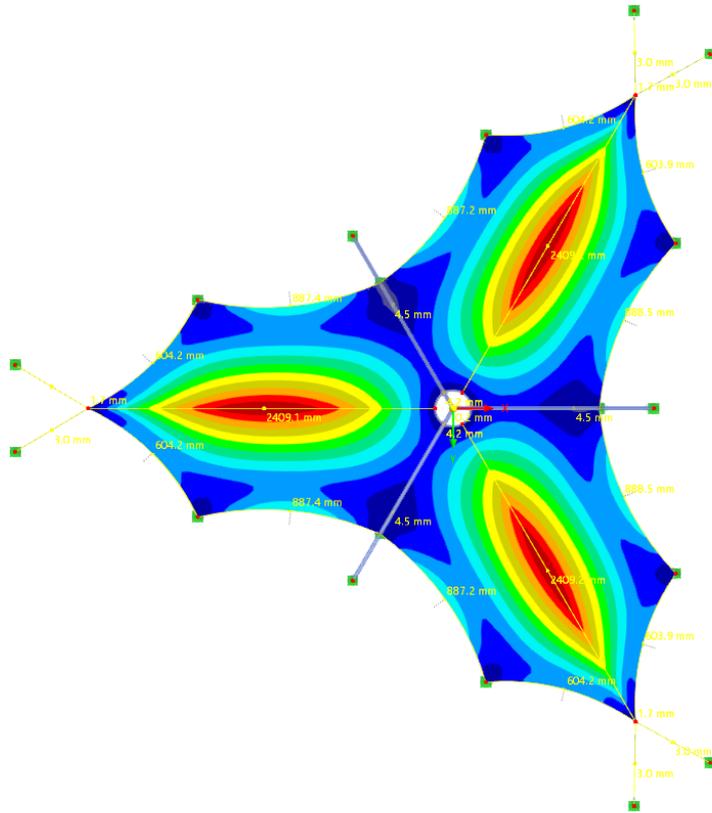


Figura 63: Vista assonometrica predefinita della tensostruttura con forma deformata

Nelle due immagini che seguono, si riportano gli spostamenti generalizzati globali (espressi in mm) per il caso di carico form-finding. Grazie alla scala di colori si può notare immediatamente come si deforma la struttura sotto carico, passando dal colore rosso per la situazione con abbassamento maggiore al colore blu intenso per spostamento nullo.

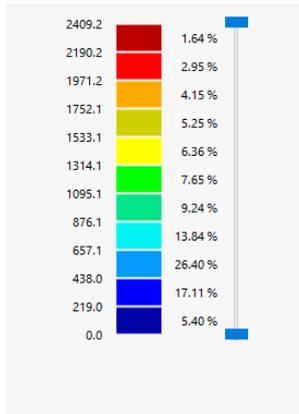
CC1 - Form-Finding Prestress
 Analisi statica
 Spostamenti $|u|$ [mm]



max $|u|$: 2409.2 | min $|u|$: 0.0 mm

Figura 64: In alto, vista in direzione z degli spostamenti generalizzati globali $|u|$ della tensostruttura con CCI-Form-finding prestress; in basso, scala di colori rappresentante in rosso il massimo spostamento e in blu scuro il minimo

Spostamenti generalizzati globali
 $|u|$ [mm]



Abbiamo visto che l'uomo per creare una struttura perfetta deve seguire determinate procedure di form-finding, ma la natura come affronta questo argomento? In che modo le ragnatele vengono progettate?



Le ragnatele sono di per sé un sistema "ottimizzato", il che significa che il design non può essere migliorato.

Figura 65: Rappresentazione di una ragnatela in natura con la presenza dell'hub centrale

Esperimenti mostrano che la natura ottimizza le strutture biologiche in modo del tutto automatico. La costruzione della ragnatela è un'impresa ingegneristica che coinvolge l'adattamento dei materiali, l'ottimizzazione delle interfacce dei materiali e la conservazione delle risorse per promuovere la sopravvivenza del ragno. Il materiale della ragnatela è estremamente ingegnoso; è intrinsecamente molto resistente, duttile con altissima conducibilità termica.

Sotto carichi distribuiti il comportamento rigido della seta sotto piccola deformazione, prima del punto di snervamento, è essenziale per mantenere l'integrità strutturale dell'opera. Le prestazioni della ragnatela non sono quindi dovute semplicemente alla sua eccezionale resistenza e deformazione, ma deriva dalla risposta non lineare dei fili di seta alla deformazione e le loro disposizioni geometriche nella tela.

Il punto di forza della ragnatela è quello di sfruttare il cambiamento delle proprietà meccaniche sotto l'azione del carico, che è una caratteristica curiosa e molto ingegnosa.

Infatti, la seta stessa ha la capacità di ammorbidirsi o irrigidirsi in modo da resistere a diversi tipi di carichi, a differenza di qualsiasi altra fibra naturale o artificiale. Proprio come nelle costruzioni ideate dall'uomo, anche le ragnatele sono composte da elementi e parti costituite da filamenti di seta diversi, prodotti addirittura da ghiandole



Figura 66: Configurazione geometrica di una ragnatela tipo

differenti. Per esempio, la parte concentrica della ragnatela è composta da fili che hanno una struttura ed una composizione chimica diversa dai fili radiali e a loro volta saranno diversi da quelli che hanno la funzione di ancorare la ragnatela al substrato (è diversa la sequenza amminoacidica delle proteine che li costituiscono). I singoli fili sono così costituiti da un numero non uguale di fibre e tutti hanno proprietà meccaniche differenti. In conclusione, con straordinaria maestria questi architetti e ingegneri del mondo naturale riescono a tessere tele dalla geometria perfetta e strutture complesse estremamente resistenti e leggere.

Riferimenti biomimetici

La tensostruttura analizzata si è ispirata a una delle costruzioni animali più belle e articolate in assoluto, la ragnatela. L'analogia tra le due strutture ovviamente non fa riferimento allo scopo a cui esse fungono, estremamente differente (la ragnatela funge da trappola mentre la tensostruttura viene usata come copertura per ambienti), ma richiama l'estetica e il comportamento strutturale che assumono.

Come primo passo si elencano gli elementi strutturali che

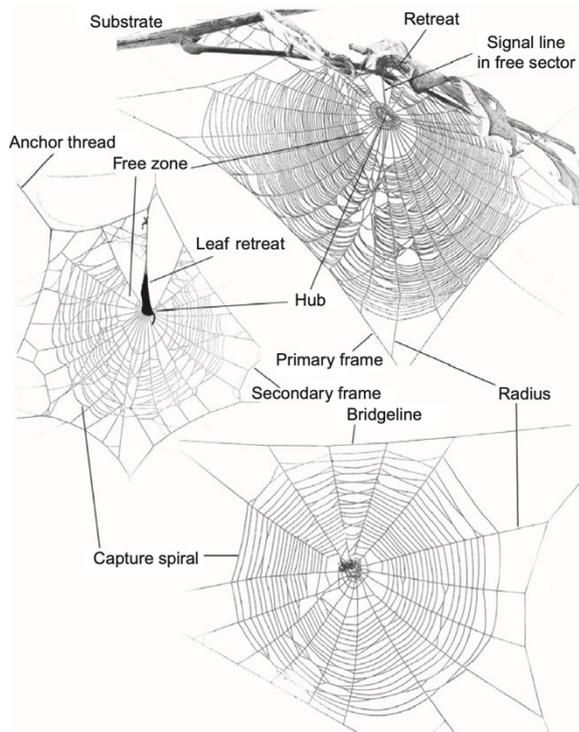


Figura 67: Rappresentazione dei principali elementi strutturali che compongono la ragnatela

compongono la ragnatela. I principali elementi strutturali sono:

1. “the bridge line”, in italiano “linea del ponte”, avente lo scopo di ancorarsi al substrato;
2. “the frame lines”, in italiano “linea del telaio”, le quali possono collegarsi direttamente al substrato o ad altre linee della ragnatela;
3. “the radius lines”, in italiano “linee radiali”, che collegano i telai con l’anello centrale (hub) e il filo di cattura, il quale è un filo continuo che si sviluppa dalla periferia al centro ed è costruito utilizzando sete viscosi.

La meccanica della seta è normalmente descritta in termini di sollecitazione, deformazione e tenacità. Lo stress misura la pressione, semplicemente la quantità di forza applicata a una fibra divisa per l’area della sezione trasversale, per normalizzare il confronto tra fibre di diametro diverso. La deformazione è una misura adimensionale di quanto è stato allungato un materiale: il rapporto tra la lunghezza corrente e la lunghezza originale di una fibra, sempre per normalizzare i confronti tra fibre di lunghezza diversa.

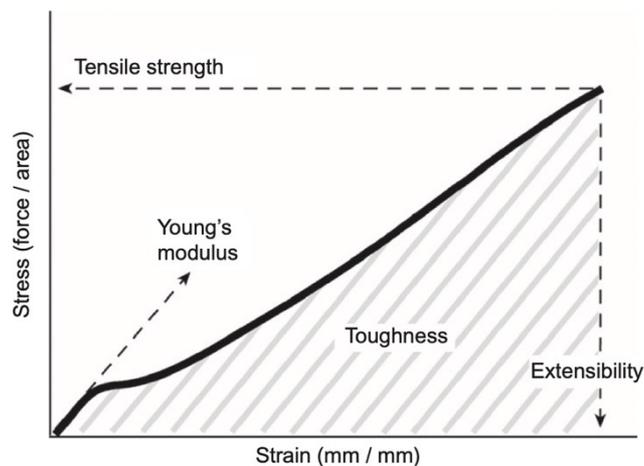


Figura 68: Diagramma di Sforzo-Deformazione dei fili di seta

I valori ingegneristici normalizzano le prestazioni della fibra all'area della sezione trasversale originale (sollecitazione ingegneristica) e la lunghezza (deformazione ingegneristica) mentre i valori "veri" normalizzano le prestazioni all'area della sezione trasversale istantanea (sollecitazione reale) e alla lunghezza (deformazione reale) perché entrambi questi valori cambiano sostanzialmente per materiali tesi come le sete di ragno. Pertanto, la maggior parte delle ricerche attuali sulla meccanica della seta riportano il vero stress di rottura e la vera deformazione di rottura delle fibre.

Infine, la tenacità è una misura della quantità totale di lavoro, o energia, richiesta per allungare una fibra finché non si rompe e viene normalizzata al volume del materiale testato.

Le sete inizialmente si comportano come materiali elastici, deformandosi linearmente in proporzione alla quantità di sollecitazione applicata e poi recuperano la forma originaria quando sono completamente rilassate. Il modulo di Young descrive la pendenza di questa regione elastica. Le sete con modulo di Young più alto sono più rigide e quindi più difficili da allungare.

Materiale	Densità (g/cm ³)	Modulo Elastico ³ (GPa)	Tensione di rottura (GPa)	Allungamento a rottura (%)	Tenacità (MJ/m ³)
Kevlar 49	1,4	130	3,6	3	50
Dragline A. diadematus*	1,3	10	1,1	27	160
Seta Bombyx Mori	1,3	7	0,6	18	70
Acciaio ad alta resistenza	7,8	200	1,5	1	6

Figura 69: Tabella rappresentante le principali caratteristiche di alcuni materiali, in particolare si sottolinea il confronto tra le proprietà della seta e quelle dell'acciaio ad alta resistenza

Un'altra caratteristica molto importante della ragnatela è la sua resistenza alla trazione che è paragonabile a quella dell'acciaio, corrispondente a 1,3-1,5 GPa, anche se la tela è molto meno densa dell'acciaio. Grande capacità elastica, ma anche grande capacità di resistenza, sono le caratteristiche principali che evidenziano proprio la straordinaria capacità di passare da uno stato di estrema flessibilità a uno di maggiore rigidità, a seconda dell'entità delle tensioni applicate.

Invece, nella tensostruttura analizzata, l'analogia con i fili di seta è stata ricreata con l'utilizzo di funi d'acciaio ad alta resistenza. Gli acciai ad alta resistenza sono meno duttili dei corrispondenti acciai dolci, e di seguito si riporta il corrispondente diagramma sforzo-deformazione.

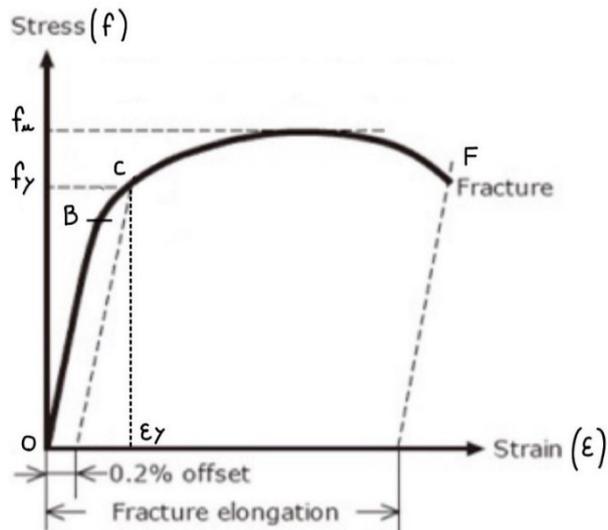


Figura 70: Diagramma Sforzo-Deformazione per gli acciai ad alta resistenza

Il digramma sforzo-deformazione può essere riassunto nei seguenti punti principali:

- B: limite elastico
- C: punto di snervamento; non ben definito per gli acciai ad alta resistenza
- Per gli acciai ad alta resistenza, a differenza degli acciai dolci, non è mostrato il plateau di snervamento
- F: frattura (rottura)
- f_u : sforzo massimo
- f_y : sforzo di snervamento

Per determinare lo sforzo di snervamento (f_y) per gli acciai ad alta resistenza si procede nel seguente modo:

- l'acciaio è stressato al di là del limite elastico, nel momento in cui viene rilassato esso ritorna in campo elastico
- il percorso seguito per raggiungere il punto di sforzo nullo non è il percorso originario, ma è una via avente la stessa pendenza del tratto OB
- lo sforzo di snervamento è definito come lo sforzo al punto di scarico che corrisponde a una deformazione permanente dello 0,002

Dopo aver descritto brevemente il diagramma sforzo-deformazione per l'acciaio, si passa alla presentazione degli elementi in acciaio utilizzati nel progetto.

Gli elementi che lavorano unicamente a trazione, rappresentanti le linee radiali e le linee del telaio nella corrispondente ragnatela, sono stati realizzati con elementi di tipo **"fune"** PE 15 | DIN EN 12385 | Pfeifer aventi le seguenti caratteristiche della sezione trasversale:

Tipo di asta 'Fune'

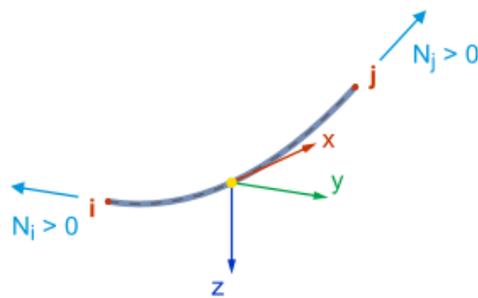


Figura 71: Configurazione "fune"

Fune PE 15

▲ Geometria			
Diametro	d	14.1	mm

▲ Area della sezione			
Area della sezione	A	1.17	cm ²

▲ Altri			
Peso	G	1.2	kg/m
Area superficie per unità di lunghezza	A _m	0.044	m ² /m
Volume	V	117.00	cm ³ /m
Coefficiente della sezione	A _m V	378.602	1/m
Carico di rottura caratteristico (secondo DIN 18800)	Z _{B,k}	141.000	kN
Trazione limite (secondo DIN 18800)	Z _{R,d}	86.000	kN
Trazione minima	Z _{min}	148.000	kN

Fune PE 15

- DIN EN 12385
- Pfeifer

Figura 72: Caratteristiche della Fune "PE 15"

Nel punto in cui si incrociano le tre ali della tensostruttura possiamo individuare un anello tubolare compresso del tipo **CHS 60.3 x 4.0 | EN 10210-2:2006-04** (realizzati nel software agli elementi finiti come **tipo di asta "trave"**), che nella ragnatela possiamo individuare con il nome *hub*, avente le seguenti caratteristiche:

Tipo di asta "Trave"

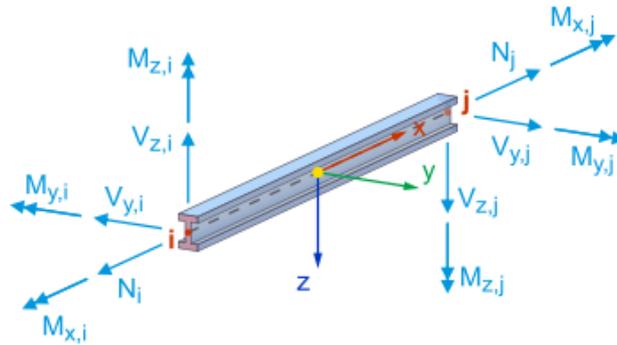


Figura 73: Configurazione "Trave"

CHS 60.3x4.0		
Geometria		
Diametro	d	60.3 mm
Spessore	t	4.0 mm
Area della sezione		
Area della sezione	A	7.07 cm ²
Flessione		
Area moment of inertia about y-axis	I _y	28.20 cm ⁴
Polar area moment of inertia	I _p	56.40 cm ⁴
Raggio di inerzia intorno all'asse y	i _y	20.0 mm
Raggio di inerzia polare	i _p	28.3 mm
Momento statico intorno all'asse y	max S _y	3.11 cm ³
Modulo di resistenza elastico intorno all'asse y	W _y	9.34 cm ³
Taglio		
Area di taglio in direzione y	A _y	3.63 cm ²
Torsione		
Costante torsionale	I _t	56.30 cm ⁴
Costante torsionale (St. Venant)	I _{t,StVen}	0.18 cm ⁴
Costante torsionale (Bredt)	I _{t,Bredt}	56.12 cm ⁴
Modulo di resistenza per torsione	W _t	18.70 cm ³
Plasticità		
Modulo di resistenza plastico intorno all'asse y	W _{pl,y}	12.70 cm ³
Coeff. di forma plastico intorno all'asse y	α _{pl,y}	1.360 --
Area di taglio plastica in direzione y	A _{pl,y}	4.50 cm ²
Forza normale plastica limite	N _{pl}	166.218 kN
Plastic limiting shear force in y-direction	V _{pl,y}	61.109 kN
Plastic limiting bending moment about y-axis	M _{pl,y}	2.98 kNm
Altri		
Peso	G	5.5 kg/m
Area superficiale per unità di lunghezza	A _m	0.189 m ² /m
Volume	V	707.00 cm ³ /m
Coefficiente della sezione	A _m /V	267.327 1/m

CHS 60.3x4.0

• EN 10210-2:2006-04

• --

[mm]

Figura 74: Caratteristiche della sezione tubolare "CHS 60.3x4.0"

Tale anello compresso è sorretto da un elemento fune che va ad ancorarsi al vertice di tre pilastri tubolari compressi inclinati **CHS 114.3 x 8.0 | EN 10210-2:2006-04**, con le seguenti proprietà:

CHS 114.3x8.0			
Geometria			
Diametro	d	114.3	mm
Spessore	t	8.0	mm
Area della sezione			
Area della sezione	A	26.70	cm ²
Flessione			
Area moment of inertia about y-axis	I _y	379.00	cm ⁴
Polar area moment of inertia	I _p	758.00	cm ⁴
Raggio di inerzia intorno all'asse y	I _y	37.7	mm
Raggio di inerzia polare	I _p	53.3	mm
Momento statico intorno all'asse y	max S _y	22.18	cm ³
Modulo di resistenza elastico intorno all'asse y	W _y	66.40	cm ³
Taglio			
Area di taglio in direzione y	A _y	13.65	cm ²
Torsione			
Costante torsionale	I _t	759.00	cm ⁴
Costante torsionale (St. Venant)	I _{t,StVen}	2.42	cm ⁴
Costante torsionale (Bredt)	I _{t,Bredt}	756.58	cm ⁴
Modulo di resistenza per torsione	W _t	133.00	cm ³
Plasticità			
Modulo di resistenza plastico intorno all'asse y	W _{pl,y}	90.60	cm ³
Coeff. di forma plastico intorno all'asse y	α _{pl,y}	1.364	--
Area di taglio plastica in direzione y	A _{pl,y}	17.01	cm ²
Forza normale plastica limite	N _{pl}	627.633	kN
Plastic limiting shear force in y-direction	V _{pl,y}	230.760	kN
Plastic limiting bending moment about y-axis	M _{pl,y}	21.26	kNm
Altri			
Peso	G	21.0	kg/m
Area superficie per unità di lunghezza	A _m	0.359	m ² /m
Volume	V	2670.00	cm ³ /m
Coefficiente della sezione	A _m /V	134.457	1/m
Area cella	A _{cell}	88.75	cm ²

CHS 114.3x8.0

EN 10210-2:2006-04

[mm]

Figura 75: Caratteristiche della sezione tubolare "CHS 114.3x8.0"

Infine, si individuano gli ultimi tre pilastri posti al vertice di ogni ala della struttura, formati anch'essi da elementi tubolari compressi **CHS 101.6 x 5.0 | EN 10210-2:2006-04**, con le seguenti proprietà della sezione trasversale:

CHS 101.6x5			
Geometry			
Diameter	d	101.6	mm
Thickness	t	5.0	mm
Sectional Area			
Sectional area	A	15.17	cm ²
Bending			
Area moment of inertia about y-axis	I_y	177.47	cm ⁴
Polar area moment of inertia	I_p	354.94	cm ⁴
Radius of gyration about y-axis	i_y	34.2	mm
Polar radius of gyration	i_p	48.4	mm
Statical moment of area about y-axis	$\max S_y$	11.52	cm ³
Elastic section modulus about y-axis	W_y	34.93	cm ³
Shear			
Shear area in y-direction	A_y	7.70	cm ²
Torsion			
Torsional constant	I_t	354.94	cm ⁴
Torsional constant (St. Venant)	$I_{t,StVen}$	1.14	cm ⁴
Torsional constant (Bredt)	$I_{t,Bredt}$	353.80	cm ⁴
Section modulus for torsion	W_t	69.87	cm ³
Plasticity			
Plastic section modulus about y-axis	$W_{pl,y}$	46.70	cm ³
Plastic shape factor about y-axis	$\alpha_{pl,y}$	1.337	--
Plastic shear area in y-direction	$A_{pl,y}$	9.66	cm ²
Plastic limiting normal force	N_{pl}	356.656	kN
Plastic limiting shear force in y-direction	$V_{pl,y}$	131.064	kN
Plastic limiting bending moment about y-axis	$M_{pl,y}$	10.97	kNm
Other			
Weight	G	11.9	kg/m
Surface area per unit length	A_m	0.319	m ² /m
Volume	V	1517.39	cm ³ /m
Section factor	A_m/V	210.352	1/m
Cell area	A_{cell}	73.29	cm ²

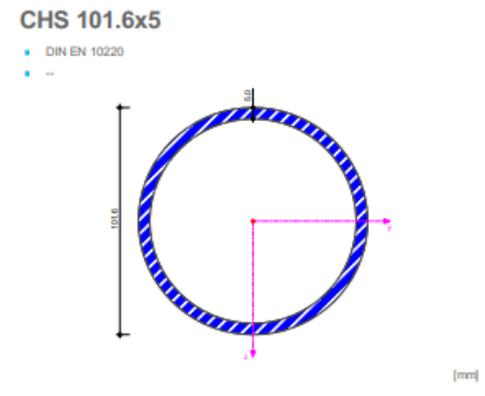


Figura 76: Caratteristiche della sezione tubolare "CHS 101.6x5.0"

Tutti gli elementi tubolari che costituiscono i pilastri nella tensostruttura possono essere visti come i corrispondenti elementi compressi, quali rami o qualsivoglia punto di appoggio, per l'intera ragnatela.

Gli elementi travi e funi sono collegati alla fondazione tramite cerniere.

Possibili ottimizzazioni biomimetiche per la membrana della tensostruttura

Meccanismi di autoguarigione rapida nelle piante e sviluppo di polimeri autoriparanti ispirati alla pianta di *Ficus benjamina*

Cenni

Nella natura vivente, l'autoriparazione avviene naturalmente. Pertanto, si presume che l'osservazione della natura abbia sempre ispirato scienziati e ingegneri nello sviluppo di materiali tecnici e sistemi di materiali autoriparanti. Il recente aumento dell'interesse per i materiali autoriparanti e l'approccio sistematico associato all'implementazione di questa funzione in un'ampia varietà di materiali può essere visto, tra l'altro, dall'aumento degli articoli scientifici su questo argomento. Ad oggi, un numero crescente di scienziati sta lavorando allo sviluppo di materiali autoriparanti. Questi scienziati includono non solo ingegneri e chimici, ma anche botanici e zoologi. Negli ultimi due decenni, numerosi studi

si sono concentrati sull'imitazione dei sistemi biologici per sviluppare materiali autorigeneranti.

La motivazione principale alla base di questi sforzi è prolungare la durata della vita mantenendo funzioni desiderate dei materiali artificiali.

I materiali autoriparanti hanno la particolare caratteristica di recuperare, parzialmente o totalmente, un danno meccanico. I polimeri sono spesso utilizzati in campi di applicazione nei quali sono presenti carichi meccanici elevati. In tal modo, le microfessure, che possono esistere in ogni componente, hanno la possibilità di crescere fino a lunghezze sovracritiche; pertanto, i componenti possono guastarsi anche molto al di sotto del carico critico massimo. Dotare questi componenti di capacità autoriparanti è un modo intelligente per evitare la rottura, poiché la guarigione delle micro-crepe può inibire o almeno decelerare l'espansione delle fratture.

La capacità di autoguarigione è comune in molte specie vegetali. Ad esempio, la resistenza alla trazione della corteccia integra di *Ficus benjamina* viene parzialmente

ripristinata dopo la lesione per autoguarigione dovuta alla secrezione e alla coagulazione del lattice.



Figura 77: Come si presenta in natura la pianta di *Ficus benjamina*

Per evidenziare il comportamento sono stati eseguiti diversi test quali la spettroscopia infrarossa (tecnica spettroscopica di assorbimento normalmente utilizzata nel campo della chimica analitica e della caratterizzazione dei materiali) e le analisi della durata e della dipendenza dalla pressione della coagulazione del lattice, come mostrato in un caso di studio effettuato per la pianta di *Ficus benjamina*.

Lo studio dal quale mi sono ispirato fa parte del progetto "Polimeri autorigeneranti OSIRIS", finanziato dal Ministero federale tedesco dell'Istruzione e della ricerca nell'ambito del programma di finanziamento BIONA.

Introduzione

La capacità di guarire fessure e lesioni senza intervento esterno è ampiamente diffusa tra le piante. Un approccio biomimetico per trasferire una tale capacità di autoriparazione in applicazioni pratiche è stato realizzato con successo sviluppando schiume auto-riparanti per strutture pneumatiche. In questo caso, le strutture vegetali cellulari che sigillano e riparano le fessure causate da processi di crescita interni o lesioni esterne sono servite da modello. Tuttavia, poiché le suddette strategie di autoguarigione non sono abbastanza efficienti o applicabili per tutti i polimeri, è auspicabile un miglioramento di questi sistemi

in modo tale che un giorno possano essere applicati a tutti i tipi di materiali. La ricerca si concentra sui polimeri che vengono utilizzati in applicazioni sottoposte a pesanti carichi meccanici. Le microfrazture, che esistono in quasi tutti i componenti, possono portare al guasto degli stessi anche al di sotto del loro carico critico massimo, poiché crescono fino a lunghezze sovracritiche sotto carico ciclico. Le strategie di autoguarigione trovate in natura possono quindi servire come generatori di modelli per elastomeri autoriparanti biomimetici che fermano o addirittura curano le micro-crepe. Le secrezioni vegetali, come le resine, sono adatte a questo tipo di scopo. In caso di lesione di una pianta costituita da lattice, l'agente curativo viene scaricato dalla stessa e provoca la chiusura della ferita per coagulazione.

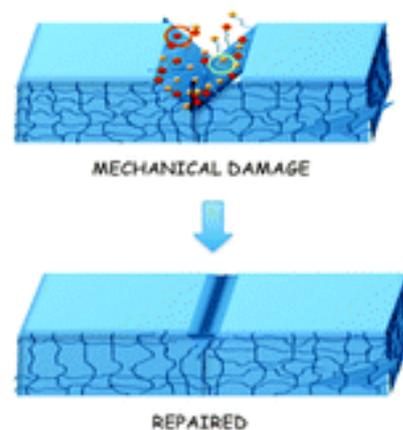


Figura 78: Capacità di autoriparazione dei polimeri; in alto è rappresentata la frattura dovuta al danno meccanico, mentre in basso il materiale autoriparato

Materiali e metodi

Nell'esperimento condotto dai ricercatori della facoltà di biologia dell'università di Friburgo, in Germania, alcune piante di *Ficus benjamina* sono state coltivate in serra in condizioni semi-controllate (a temperatura ≥ 25 °C e annaffiate regolarmente) per un anno. Si sono utilizzate cortecce di segmenti di fusto compresi tra 7,0 e 10,0 mm di larghezza e lese orizzontalmente (ortogonale all'orientamento delle fibre).

I campioni di prova sono stati preparati in tre fasi, come in figura, prima che le prove di trazione fossero condotte in laboratorio. Sono stati eseguiti test di trazione perché le sollecitazioni di trazione rappresentano le sollecitazioni normali predominanti che sono causate nel fusto della pianta durante la flessione (ad esempio causate dalle forze del vento).

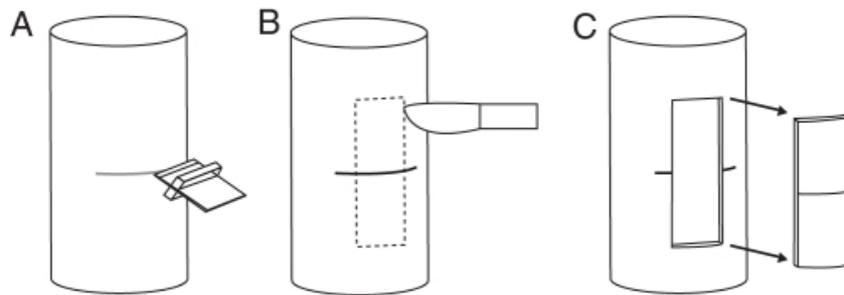


Figura 79: Preparazione del campione di corteccia. Nell'immagine di sinistra la corteccia è stata tagliata orizzontalmente con una lama. Nell'immagine al centro, la corteccia è stata tagliata con un bisturi. Nell'immagine di destra il campione è stato rimosso.

Un ulteriore motivo per eseguire test di tensione è il fatto che è stata osservata la pretensione della corteccia del legno di *F. benjamina*. Pertanto, durante la flessione, le sollecitazioni di compressione sul lato sottovento dello stelo della pianta vengono ridotte a causa della pretensione. Al contrario, le sollecitazioni di trazione sul lato sopravvento dello stelo della pianta sono aumentate a causa delle presollecitazioni. Inoltre, la compressione della corteccia è meno critica in quanto diminuisce le dimensioni delle lesioni, mentre la tensione le espande. Pertanto, le prove di trazione vengono scelte per caratterizzare i carichi meccanici più critici sulla corteccia danneggiata. I campioni di corteccia sono stati testati immediatamente dopo la lesione o in vari tempi di latenza dopo la lesione (da 10 minuti a 24 ore). Come controllo, sono stati testati anche campioni di corteccia illesi. I microtubi (laticiferi) contengono emulsioni con particelle di lattice e vescicole membranose. All'interno dei laticiferi si riscontra una sovrappressione fino a 1,5 MPa. Dopo la lesione, si verifica una caduta di pressione con la conseguenza che le vescicole membranose, esplodendo, permettono la fuoriuscita delle proteine Hevein (è una proteina indotta dalla ferita e coinvolta nella coagulazione del lattice) intrappolate all'interno. Queste proteine Hevein formano (mediate da ioni Ca^{2+} , cioè ioni calcio) dimmer che si legano ai siti di legame proteico sulla superficie delle particelle di gomma in modo che, infine, abbia luogo la coagulazione delle particelle di lattice.

Risultati dell'esperimento

I primi risultati possono essere osservati dopo più di sei minuti. L'esito è stato prodotto da analisi spettroscopiche a infrarossi del lattice durante la fase di coagulazione, la quale

rivela i maggiori cambiamenti negli spettri in una fascia oraria compresa tra 6 e 10 minuti dopo la lacerazione. Grazie ai test di trazione si può verificare che le proprietà biomeccaniche possono essere ripristinate almeno in parte. La resistenza alla trazione dei campioni dopo la lesione aumenta con il tempo, anche se prima dei 35 minuti la resistenza della corteccia ferita non può essere ripristinata nella sua interezza.

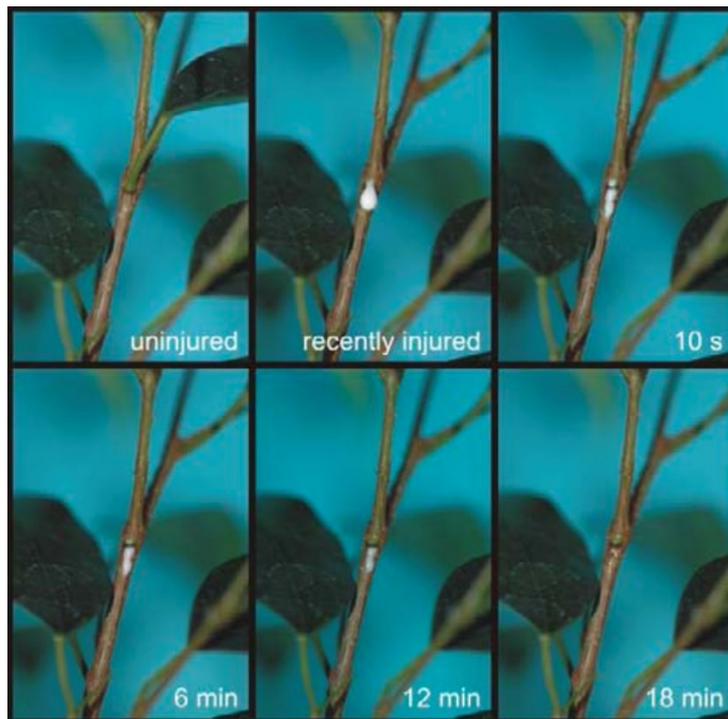


Figura 80: Coagulazione del lattice di Ficus benjamina dopo essere stata ferita

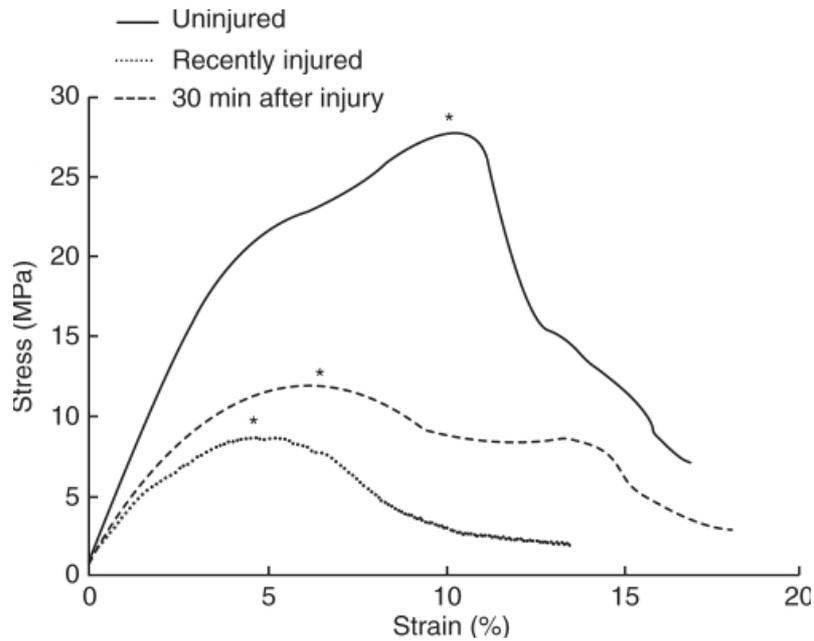


Figura 81: Diagramma sforzo-deformazione su corteccia non danneggiata, recentemente danneggiata e 30 minuti dopo la lesione. Lo sforzo massimo di trazione è contrassegnato dall'asterisco.

La resistenza a trazione e il modulo di Young del lattice coagulato sono molto piccoli rispetto a quelli della corteccia intatta. Il lattice agisce come un agente che blocca la frattura, ostacolando la propagazione della stessa e aumentando così la resistenza a trazione (ma non il modulo di Young). Sebbene l'effetto di riparazione descritto possa ripristinare solo parzialmente le proprietà meccaniche dello stelo della pianta, la coagulazione del lattice sigilla la lesione e riduce la propagazione della fessura sotto il carico di trazione.

Riferimento alla tensostruttura

Negli ultimi anni, l'autoriparazione in diversi tipi di materiali ha guadagnato popolarità ed è continuamente oggetto di approfondite ricerche. I materiali con proprietà self-healing possono rappresentare una rivoluzione in quasi tutti i settori, dall'elettronica alla medicina fino all'ingegneria civile. Ispirato al processo biologico descritto, si è pensato come possibile ottimizzazione l'utilizzo di fluidi incapsulati che si attivano durante la propagazione della crepa con lo scopo di riparare le aree danneggiate.

In questi processi definiti autonomi (non bisognosi di intervento umano), le microcapsule contengono l'agente curativo che viene rilasciato nel polimero quando l'involucro della capsula è danneggiato. Il liquido che fuoriesce dalla capsula, venendo a contatto con i catalizzatori, genera una reazione chimica che favorisce il processo di autoriparazione. In questo modo si ottiene il ripristino delle condizioni iniziali. Le dimensioni della capsula sono estremamente piccole, di dimensioni variabili dai 10 ai 200 micron, quindi facilmente inseribili all'interno della membrana di copertura.

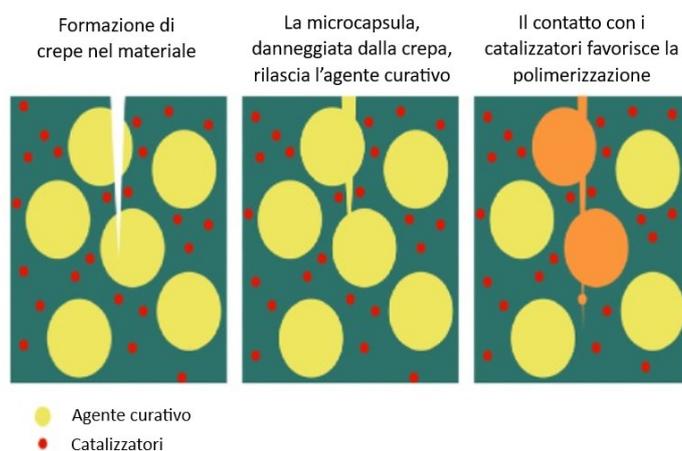


Figura 82: Processo di autoriparazione dei polimeri

Questo tipo di approccio è stato analizzato e discusso perché, in futuro, potrebbe essere applicato al campo dei tessuti utilizzati per le tensostrutture. Infatti, tale tecnica permetterebbe di autoriparare il telo quando lievemente danneggiato e in presenza di micro-spaccature, andando a rigenerare la membrana che generalmente è costituita da fibra di poliestere spalmato PVC oppure in fibra di vetro spalmata in PTFE. Grazie a questa efficace tecnica si potrebbe risparmiare tempo e denaro per la manutenzione dell'involucro tessile, che altrimenti richiederebbe costi sostenuti e continua manutenzione. Si ricorda che affinché un materiale possa definirsi autorigenerante, è necessario che il processo di guarigione avvenga senza intervento umano. Nella maggior parte dei casi i problemi di durabilità dell'involucro tessile derivano dall'azione prolungata negli anni da parte dei raggi UV che possono danneggiare le fibre e da agenti esterni quali umidità e temperatura che compromettono le caratteristiche meccaniche della tela. Di solito, le fratture nel materiale vengono riparate tramite l'intervento dell'uomo, il che è difficile perché le crepe sono spesso difficili da rilevare. Un materiale,

come il polimero, in grado di riparare i danni causati dal normale utilizzo porterebbe a ridurre i costi di produzione e manutenzione di una serie di diversi processi attraverso una maggiore durata delle parti, la riduzione dell'inefficienza nel tempo causata dal degrado, nonché prevenire i costi sostenuti dal fallimento materiale stesso.

Pannelli solari efficienti ispirati alle ali di farfalla

Lo studio delle ali della farfalla ha permesso di creare un nuovo tipo di cella solare in grado di raccogliere la luce in modo più efficiente rispetto ai sistemi tradizionali. I pannelli solari tradizionali sono generalmente costituiti da celle spesse e sono posizionati con un'inclinazione calcolata in modo da ottenere la maggior quantità di luce dal sole. Al contrario, questi innovativi pannelli sono costituiti da celle solari a film sottile, dello spessore del nanometro, con grande potenziale per il futuro. Gli scienziati hanno studiato le ali della farfalla nera *Pachliopta aristolochiae* e da queste si sono ispirate per ideare celle solari sottili ed efficienti. Infatti, questo tipo di celle possono assorbire molta



Figura 83: Farfalla nera *Pachliopta aristolochiae*

luce indipendentemente dall'angolazione e sono anche facili da realizzare. Questo tipo di farfalla è originaria del sud-est asiatico, è un animale a sangue freddo ed ha bisogno della luce solare per volare, per cui le sue ali si sono evolute nel tempo in modo da assorbire molto bene l'energia. Per capire perché queste farfalle sono così efficienti, gli scienziati del California Institute of Technology, hanno osservato le ali al microscopio elettronico e creato un modello delle nanostrutture e delle ali. Le ali sono costituite da minuscole squame ricoperte da fori distanziati in modo casuale. Questi fori sono estremamente piccoli, dell'ordine del milionesimo di metro e aiutano a diffondere la luce e permettono alla farfalla di assorbire il calore.

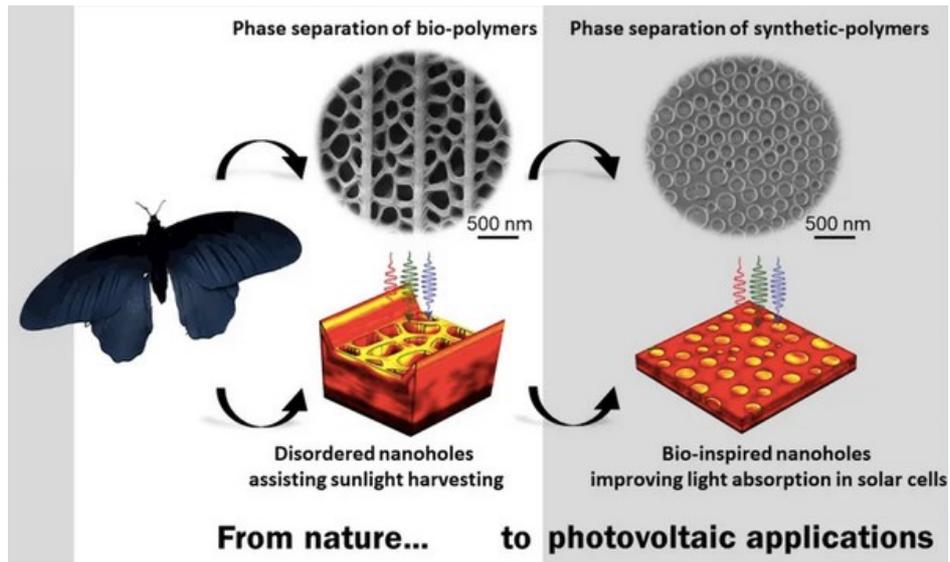


Figura 84: Confronto tra la disposizione dei buchi presenti in natura nella farfalla nera e la corrispondente disposizione applicata nel film sintetico

I buchi sono casuali per dimensioni, distribuzione e forma. Utilizzando modelli computerizzati, il gruppo di ricerca ha capito che la posizione e l'ordine sono i due elementi fondamentali per poter assorbire la luce, mentre la forma non ha importanza. Per l'analisi si sono considerate strutture fotoniche con tre diverse disposizioni dei fori, come mostrato in figura.

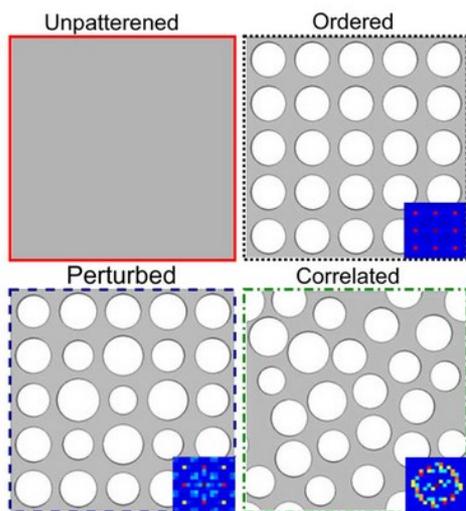


Figura 86: rappresentazione schematica delle 4 lastre analizzate: lastra non modellata, lastra ordinata, lastra perturbata e lastra correlata

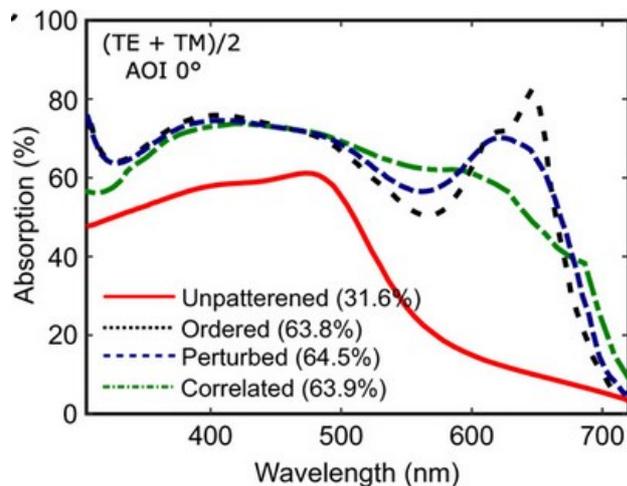


Figura 85: Spettri di assorbimento delle quattro geometrie analizzate sotto incidenza normale per luce non polarizzata (TE+TM/2)

Questi ultimi sono stati perforati in un sottile strato di materiale comunemente usato come assorbitore fotovoltaico a film sottile. Più precisamente, si è utilizzata una disposizione periodica “ordinata” di fori con un unico diametro, una disposizione periodica “perturbata” di fori con diametri variabili, e infine una combinazione “correlata” di disordine di posizione e dimensione del diametro ispirata alle squame della farfalla nera. Una lastra non modellata con uno spessore di 100 nm fungeva da riferimento. Tutti gli strati sono stati simulati con l'aria come mezzo circostante.

L'IA (indice di assorbimento) è stato calcolato per valutare la capacità di raccolta della luce delle quattro diverse strutture fotoniche in esame. Gli spettri di assorbimento simulato risultanti delle quattro configurazioni e il loro corrispondente IA sono stati confrontati in figura 85 per un'onda piana con un normale angolo di incidenza (AOI). Nel caso della lastra di riferimento non modellata, l'IA è solo del 31,6%. D'altra parte, la lastra fotonica con matrice di fori ordinati mostra il 63,8%. Questo risultato è già due volte più grande della lastra nuda. Tuttavia, la struttura perturbata ha un IA aumentato del 64,5%. Introducendo la correlazione sulla posizione dei fori insieme alla dispersione dimensionale, simile alla farfalla nera, si ottiene un IA del 63,9%. Tutte e tre le strutture fotoniche raddoppiano l'IA di un fattore superiore a due rispetto allo strato non strutturato.

Riferimento alla tensostruttura

La maggior parte dei pannelli solari sono posizionati ad angolo, il che significa che generano molta energia per alcune ore e poca per il resto del tempo. L'esposizione solare dell'involucro dell'edificio influenza notevolmente il potenziale rendimento energetico. Parametri come l'altezza, la forma, l'ombreggiatura e le dimensioni possono essere efficaci nella regolazione del guadagno solare degli edifici, oltre a influenzare l'illuminazione interna, che influenza direttamente le prestazioni termiche e di illuminazione.

A differenza dei precedenti, i pannelli solari ispirati alle ali della farfalla nera potrebbero produrre più energia durante il giorno, riuscendo ad assorbire il doppio della luce solare rispetto ad una normale cella solare.

Lo studio condotto dallo scienziato *Radwanul Siddique* potrebbe essere applicato ad un altro studio effettuato dall'Hightex e dall'azienda SolarNext per l'utilizzo di pannelli

fotovoltaici flessibili integrati in strutture a membrana PTFE traslucido e trasparente ETFE. Queste ricerche permetterebbero significativi miglioramenti per la costruzione di strutture leggere con l'utilizzo di materiale a membrana avanzato. Questi pannelli fotovoltaici flessibili vengono applicati su materiale di membrana traslucido o completamente integrati in strutture di lamina trasparente.



Figura 87: Pannelli fotovoltaici flessibili integrati in fogli ETFE

La tecnologia, in fase di sviluppo, è costituita da un fotovoltaico a film sottile di silicio amorfo flessibile. I fogli possono essere utilizzati su tetti o facciate a strato singolo, oppure possono sostituire lo strato superiore nei cuscini pneumatici. Il prodotto è estremamente adattabile, flessibile e leggero.

L'integrazione flessibile di moduli fotovoltaici nelle superfici della membrana è però un processo complesso che coinvolge molti aspetti che devono essere analizzati per ogni singolo progetto come:

- 1) la stima del rendimento del sistema fotovoltaico collegato alle geometrie della membrana le quali sono caratterizzate da singola o doppia curvatura.
- 2) la distribuzione delle sollecitazioni e della deflessione sulla superficie della membrana e il loro impatto sulla disposizione dei moduli fotovoltaici.
- 3) l'orientamento ottimale dei moduli fotovoltaici solari nella zona geografica determinata.
- 4) la durata e la stabilità del pannello fotovoltaico flessibile all'interno della membrana tesa.

Grazie al loro peso e dimensioni ridotte, possono essere applicati a qualsiasi tipo di edificio, al contrario dei pannelli rigidi e solari tradizionali.

Le prime applicazioni di questa particolare tecnologia sono state eseguite con successo, a partire dal 2007, nel sud della Germania e da allora vengono monitorate le relative prestazioni in modo tale che, in un futuro, questo sistema possa diffondersi ed essere alla portata di una clientela sempre maggiore.

Membrane fotoniche flessibili ispirate al coleottero longicorne *Neocerambyx gigas* per un raffreddamento passivo efficiente

Introduzione

Alcune creature biologiche hanno sorprendenti strutture fotoniche per esibire una capacità di regolazione termica. Prendendo ispirazione dai coleotteri longicorni dorati, si analizza un design bioispirato di film fotonici ibridi flessibili per ottenere un raffreddamento radiativo passivo (Il *raffreddamento radiativo* è una tecnologia di raffreddamento passivo che permette di ridurre le temperature con minori consumi elettrici) efficiente.

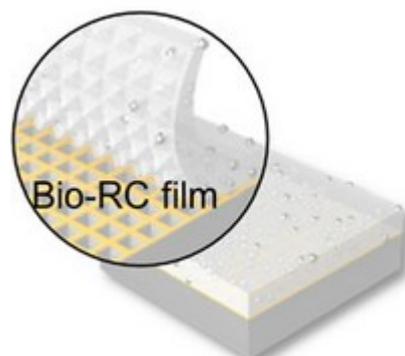


Figura 88: Bioinspired radiative cooling film

Questo lavoro, sostenuto dalla Scuola di Scienza e Ingegneria dei Materiali di Shanghai (Jiao Tong University) apre la strada alla tecnologia di raffreddamento radiativo basata su membrane fotoniche ad alte prestazioni e produzione su larga scala, mostrando un grande potenziale per il risparmio energetico e la generazione efficiente di energia.

Descrizione

La temperatura è un parametro fondamentale per tutte le forme di vita. L'evoluzione naturale ha portato a organismi che hanno eccellenti capacità di termoregolazione in climi estremi. I materiali bioispirati che imitano la soluzione biologica per la termoregolazione si sono dimostrati promettenti per il raffreddamento radiativo passivo. Tuttavia, la produzione di membrane artificiali con strutture complesse, proprietà eccezionali, elevata produttività e basso costo è ancora una sfida. In questo caso si analizzano materiali fotonici di ispirazione biologica per il raffreddamento radiativo passivo, dopo la scoperta dell'eccellente funzione termoregolatrice dei coleotteri longicorni. La lanugine del corpo dell'animale presenta una sezione trasversale triangolare finemente strutturata con due effetti termoregolatori che riflettono efficacemente la luce solare ed emettono radiazioni

termiche, riducendo così la temperatura corporea dei coleotteri. Il materiale, ispirato all'animale, è formato da un film fotonico costituito da una matrice polimerica a forma di micropiramidi con particelle ceramiche casuali. La pellicola riflette circa il 95% dell'irraggiamento solare e mostra un'emissività infrarossa $>0,96$ (capacità di assorbire e di rimettere energia per radiazione; questo valore fisico indica quanta radiazione termica infrarossa emette una superficie rispetto a un corpo ideale chiamato “corpo nero”).

Il materiale presenta un'alta potenza di raffreddamento e registra una diminuzione della temperatura fino a $5,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ sotto la luce solare diretta. Inoltre, il film presenta idrofobicità, flessibilità superiore e forte resistenza meccanica. I dispositivi di raffreddamento convenzionali, come i condizionatori d'aria, consumano una discreta quantità di energia e risorse e al contempo generano calore extra durante il funzionamento, il che provoca l'effetto serra.

Come alternativa innovativa e rispettosa dell'ambiente, i materiali da raffreddamento radiativo passivo recentemente emersi possono essere utilizzati per realizzare edifici ad alta efficienza energetica e nuovi tessuti di raffreddamento. La chiave per ottenere una temperatura inferiore a quella dell'ambiente circostante anche sotto la luce solare diretta è avere un'elevata riflettività per respingere la luce solare in entrata (lunghezza d'onda da $0,3$ a $2,5\text{ }\mu\text{m}$) e un'elevata emissività termica. È necessario trovare un compromesso tra elevate prestazioni ottiche/termiche e produzione a basso costo. La nanoprodotzione scalabile di strutture fotoniche con architetture complesse, selettività di riflessione/assorbimento spettrale controllata e proprietà desiderate rimane una sfida per il futuro.

Il coleottero longicorne *Neocerambyx gigas* dalla brillantezza dorata, appartenente alla sottofamiglia *Cerambycidae*, è altamente adattabile alle zone a clima caldo. I suoi habitat principali sono ampiamente distribuiti nelle regioni tropicali del sud-est asiatico, tra cui Thailandia e Indonesia. Nelle calde giornate estive, le temperature ambientali di questi luoghi salgono solitamente oltre i $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, mentre le temperature del suolo possono superare anche i $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante il periodo caldo, i coleotteri longicorni sono soliti rimanere fermi per



Figura 89: Coleottero longicorne *Neocerambyx gigas*

scaricare il calore in eccesso. Per ridurre in modo efficiente la loro temperatura corporea, hanno sviluppato un modo per ridurre l'assorbimento di calore dall'ambiente esterno e contemporaneamente dissipare il calore in eccesso. La sopravvivenza dei coleotteri in condizioni così estreme suggerisce una possibile capacità di termoregolazione delle loro strutture corporee. Prendendo ispirazione dai coleotteri longicorni brillantemente dorati, si analizza un design bioispirato di film fotonici ibridi flessibili per ottenere un raffreddamento radiativo passivo efficiente. I film sono fabbricati con un semplice metodo di microstamping (sfrutta la tecnica a laser), che è promettente per la produzione su larga scala. Il film di raffreddamento radiativo bioispirato (Bio-RC) è costituito da polidimetilsilossano (PDMS), vale a dire siliconi, a matrice periodica micropiramidale che incapsula particelle ceramiche sferiche distribuite in modo casuale. Il film Bio-RC mostra una riflettanza estremamente elevata per la luce solare e contemporaneamente un'elevata emissività a causa del forte assorbimento di microsferie dielettriche polari.

Risultati

Le ali anteriori dello scarabeo longicorne mostrano un bagliore dorato. Le immagini al microscopio elettronico a scansione (SEM) hanno rivelato che le ali sono coperte da minuscole lanugine con grande intensità.

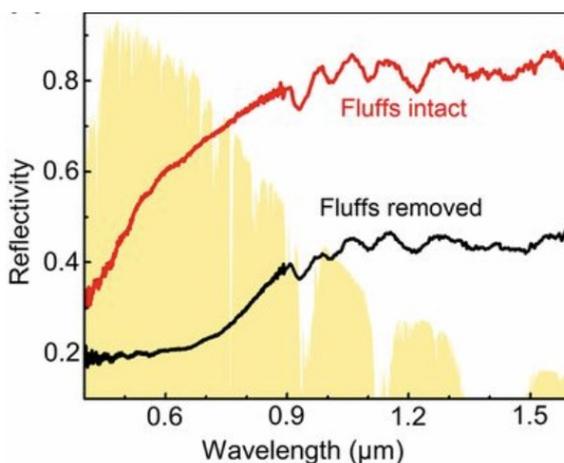


Figura 90: Spettri ottici di riflettività emisferica misurati nell'intervallo vis-NIR a incidenza normale

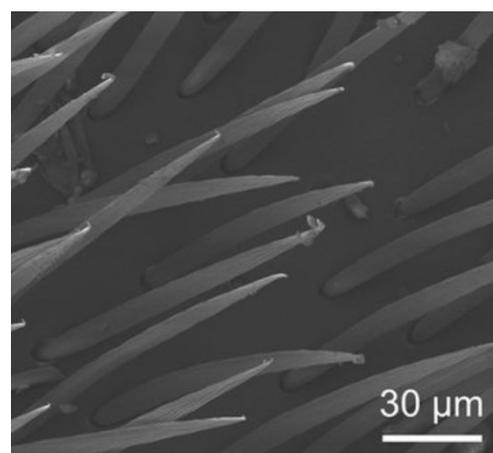


Figura 91: Lanugine del coleottero al microscopio elettronico

Le misurazioni ottiche delle ali anteriori sono state condotte mediante spettroscopia. Gli esperimenti termodinamici sono stati condotti sulla parte anteriore prima e dopo la rimozione della peluria per verificarne il risultato per la dissipazione del calore radiativo. Gli esperimenti contrastanti sono stati condotti nel vuoto e nell'aria ferma dopo che la parte anteriore è stata messa in una camera, illuminata da una lampada allo xeno per simulare la radiazione solare. In entrambi i casi, la parte anteriore ricoperta da lanugine ha sostenuto temperature allo stato stazionario notevolmente inferiori rispetto alla parte anteriore nuda, con una differenza di temperatura di $\sim 3,2$ °C nel vuoto e $\sim 1,5$ °C nell'aria. Si ottiene un aumento della velocità di trasferimento del calore radiativo e verificando il ruolo della lanugine si migliora la dissipazione del calore e conferisce al coleottero longicorne una capacità di raffreddamento radiativo diurno. Tale temperatura corporea inferiore a quella ambientale avvantaggia gli insetti nelle loro attività quotidiane di foraggiamento in un ambiente ad alta temperatura con eccessiva esposizione al sole.

Come rivelato, il modello biologico di *N. gigas* presenta una tipica microstruttura a doppia scala composta da una sezione triangolare con pieghe densamente distribuite sulla sfaccettatura

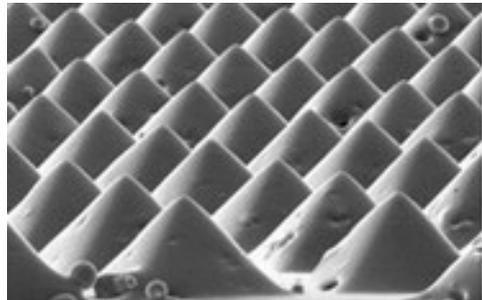


Figura 92: Immagine al microscopio elettronico delle forme piramidali superficiali del film bio-RC

inferiore. In questo modello, le pieghe possono provocare un'elevata riflettività nella regione vis-NIR (radiazioni elettromagnetiche nel campo dell'ultravioletto, visibile e vicino infrarosso) a causa della dispersione. Inoltre, la sezione triangolare è responsabile dell'elevata riflettività vis-NIR a causa della riflessione interna totale, mentre mostra un'elevata emissività nella gamma MIR (medio infrarosso) beneficiando del graduale cambiamento dell'indice di rifrazione. Ispirato al modello biologico, un polimero PDMS con ondulazione superficiale triangolare microstrutturata è stato utilizzato come substrato.

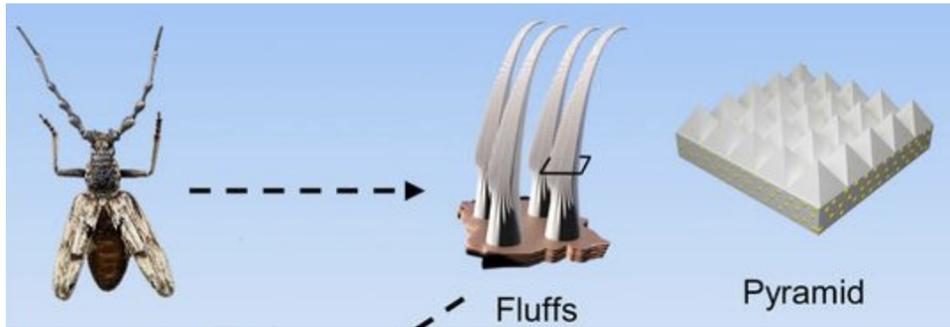


Figura 93: Schema concettuale rappresentato dal coleottero, dalla lanugine sulle sue ali e dal film fotonico realizzato

Essendo un polimero promettente a basso costo, il PDMS ha grandi prospettive nel raffreddamento radiativo passivo grazie alla sua trasparenza nello spettro vis-NIR e alla forte emissività MIR. Le pieghe microdimensionate sulle sfaccettature ondulate nel modello del coleottero sono state sostituite con particelle con un simile effetto di diffusione. Particelle ceramiche sferiche, come le microparticelle Al_2O_3 (ossido di alluminio), sono state incorporate nella matrice per una migliore dispersione e una facile fabbricazione. L'ossido di alluminio ha un assorbimento trascurabile nell'intervallo spettrale vis-NIR e quindi difficilmente genera calore sotto irraggiamento solare diretto.

Riferimento alla tensostruttura

Il film Bio-RC ottimizzato ha una matrice di una struttura piramidale PDMS contenente sfere Al_2O_3 distribuite casualmente.

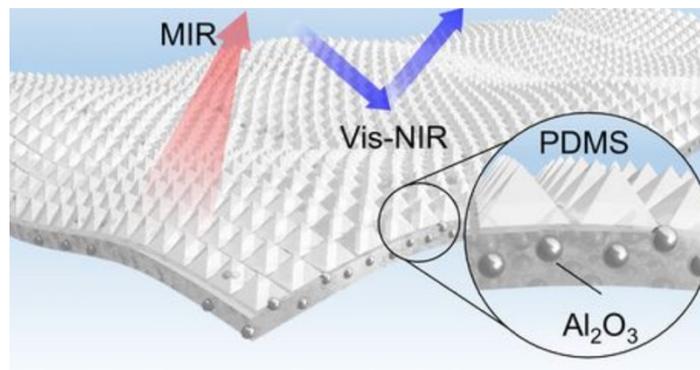


Figura 94: Illustrazione schematica del film flessibile bioispirato. Le particelle di ceramica sono incorporate nella matrice PDMS riempita da matrici compatte di micropiramidi

In particolare, il film Bio-RC è stato opportunamente fabbricato in un unico passaggio mediante spin-coating (in italiano *rivestimento per rotazione* ed è una procedura utilizzata per applicare un film sottile e uniforme ad un substrato solido piano), cioè PDMS con particelle di microsferi Al₂O₃ distribuite in modo casuale sul modello. Lo stampo rivestito è stato indurito termicamente sottovuoto per accelerare il processo di solidificazione. La scalabilità della procedura di fabbricazione la rende promettente per applicazioni pratiche che richiedono pellicole di grandi dimensioni.

Visivamente, tutte le pellicole presentano un aspetto bianco lucido. I risultati indicano che la tecnica di fabbricazione offre diverse possibilità per la produzione di film Bio-RC sia generici che specializzati.

Oltre alle eccellenti prestazioni ottiche, il film dimostra comportamenti superiori in termini di proprietà idrofobiche e meccaniche. Innanzitutto, le superfici bioispirate costituite dalle



Figura 95: Rotolo di film bio-RC

architetture su microscala costituiscono una struttura gerarchica, che porta a una maggiore idrofobicità del film. Facendo gocciolare acqua colorata sul film Bio-RC, si osserva la formazione di goccioline sferiche.

La maggiore idrofobicità del film Bio-RC potrebbe prevedibilmente avere importanti impatti sullo sviluppo di molte potenziali applicazioni pratiche, tra cui l'autopulizia, l'antivegetativa e la prevenzione della corrosione. Inoltre, la membrana Bio-RC presenta eccellenti proprietà meccaniche dopo ripetute deformazioni, come la torsione e lo stiramento per centinaia di volte. L'eccellente flessibilità ed elasticità suggeriscono che i film Bio-RC possono sopportare shock meccanici e deformazioni dinamiche, il che è fondamentale per una maggiore durata e applicazioni più ampie. In pratica, i dispositivi di raffreddamento radiativo possono essere ampiamente applicati in vari sistemi di gestione termica a risparmio energetico, come i sistemi di raffreddamento per edifici e tensostrutture. Nel caso delle tensostrutture tradizionali costituite da tessuti in poliestere/PVC a telo singolo, le scarse proprietà isolanti del materiale di base

(tendenzialmente alto) si sommano al basso spessore dell'elemento membrana (generalmente 1mm) e alla mancanza di isolante (o intercapedini).

Ciò che si ottiene è un involucro avente un'alta dispersione di calore dovuto a valori di trasmittanza eccessivamente alti.

Al contrario, con questa particolare tecnica, si potranno produrre, in futuro, membrane artificiali con strutture complesse, proprietà eccezionali, elevata produttività e basso costo da applicare all'involucro tessile delle strutture leggere. Infatti, basterà utilizzare questo sottile strato di materiale al di sopra dell'involucro tessile tradizionale per far sì che si abbiano i risultati descritti precedentemente, con un maggior confort termico. Infine, si avranno benefici anche dal punto di vista del risparmio energetico, visto che questi sottili film funzionano in modo indipendente, senza la somministrazione di energia dall'esterno.

Capitolo 4: CONCLUSIONI

In conclusione, in questo lavoro di tesi si è voluto dare spazio allo studio e all'analisi della natura fondamentale per capire quali sono i principi e le funzionalità che potranno essere applicate, in futuro, al mondo dell'edilizia, dell'architettura e dell'ingegneria civile, in particolar modo concentrandosi sulle tensostrutture a membrana.

Il fatto che sia stata scelta una tensostruttura non è casuale ma nasce dall'analogia con il mondo naturale e in particolare il voler comparare una struttura leggera progettata dall'uomo con un'altra opera ingegneristica spettacolare, resistente e dalle forme dinamiche rappresentata dalla ragnatela.

Lo studio della forma della ragnatela e della disposizione dei fili di seta, necessaria a realizzare una struttura in equilibrio sotto l'azione dei carichi, è stato di ispirazione per ricreare la configurazione deformata della tensostruttura generata per mezzo dell'applicazione del caso di carico form-finding.

Per le successive ottimizzazioni, apportate esclusivamente all'involucro tessile, si è dato maggior spazio e importanza allo studio e alle ricerche condotte da scienziati, ingegneri, biologi e zoologi su animali e piante permettendo di associare il comportamento della natura a studi, possibili e futuri, circa tecniche e materiali da poter applicare alla struttura oggetto di esame. Da queste analisi approfondite del mondo naturale si è arrivati a illustrare, in primis, lo sviluppo di polimeri autoriparanti ispirati alla pianta di *Ficus benamina*, in secondo luogo pannelli solari efficienti ispirati alle ali della farfalla nera *Pachliopta aristolochiae* ed infine membrane fotoniche flessibili ispirate al coleottero longicorne *Neocerambyx gigas* per un raffreddamento passivo efficiente.

I risultati finali dei prodotti da applicare alla tensostruttura non sono stati analizzati approfonditamente, ma tramite un riferimento teorico, in quanto considerate come possibili ottimizzazioni e soluzioni applicabili in ottica futura, per i quali vi sono sviluppi concreti ma ancora in fase di miglioramento.

Si sono presi in considerazione solo tre tipi possibili di soluzioni biomimetiche per la membrana tesa, anche se la natura ha dimostrato di poterne avere molte altre applicabili ad ogni tipo di settore, in particolar modo a quelli dell'ingegneria civile e dei materiali da costruzione.

L'uomo deve quindi continuare a studiare e approfondire la natura, nelle sue caratteristiche di funzionalità, adattabilità ed economicità in modo da applicarle sempre di più alle tecnologie e al mondo moderno, non trascurando la sostenibilità del prodotto stesso.

Sitografia e Bibliografia

Sitografia

- [1] <https://biomimicry.org/>
- [2] <https://www.sunbell.it/arredamento/biomimetica/>
- [3] <https://www.powerenergia.eu/6-tecnologie-che-imitano-la-natura/>
- [4] <http://greencluster.it/biomimetica-quando-larchitettura-e-il-design-imitano-la-natura/>
- [5] <https://www.wired.it/attualita/2014/04/02/come-nato-il-velcro/>
- [6] <https://www.greenme.it/ambiente/natura/biomimetica/>
- [7] <https://www.mickpearce.com/Eastgate.html>
- [8] <https://earthbound.report/2020/05/15/building-of-the-week-eastgate-zimbabwe/>
- [9] <https://www.focus.it/scienza/energia/la-turbina-eolica-che-vola-come-un-colibri>
- [10] <https://buildingcue.it/il-cetriolo-di-londra-lapproccio-biomimetico-per-contrastare-lazione-del-vento/12210/>
- [11] <https://blog.casanoi.it/frei-otto-architetto-delle-tensostrutture/>
- [12] <https://www.macotechnology.com/blog/tensostrutture/>
- [13] <https://www.teknoring.com/news/progettazione/frei-otto-leredita-del-re-delle-tensostrutture/>

- [14] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1591462/FULLTEXT02.pdf>
- [15] <https://www.find-my-architect.com/uk/en/actualite/buildings-based-on-spider-webs>
- [16] [https://wingswormsandwonder.com/buildings-and-birdskulls/ /](https://wingswormsandwonder.com/buildings-and-birdskulls/)
- [17] <https://buildingcue.it/studying-the-spider-web-to-make-buildings-and-infrastructures/8423/>
- [18] <https://ilbolive.unipd.it/it/news/come-nasce-ragnatela-quanto-resistente>
- [19] <https://www.greenme.it/spazi-verdi/la-ragnatela-prodotto-di-elevata-ingegneria/>
- [20] https://it.wikipedia.org/wiki/Spettroscopia_infrarossa

Bibliografia

- [1] Otto F., Rasch B., *Finding Form*, Germany, *Deutscher Werkbund Bayern*, 1995.
- [2] Zwart H., *What is mimicked by biomimicry?*, *Environmental Values*, Issue 28, 2019.
- [3] Khan A., *Adapt: How We Can Learn from Nature's Strangest Inventions*, London: Atlantic Books, 2017.
- [4] Müller R., Abaid N., Boreyko, J.B. et al., *Biodiversifying bioinspiration. Bioinspiration and Biomimetics*, 2018.
- [5] Whitesides G.M. (2015), “*Bioinspiration: something for everyone*”, DOI:10.1098/rsfs.2015.0031.
- [6] Pohl G., Nachtigall W., *Biomimetics for Architecture & Design*, Springer International Publishing Switzerland; 2015.
- [7] Gordon James E., *Strutture sotto sforzo*, Zanichelli, 1991.

- [8] Beck, Benjamin B., *Animal Tool Behaviour: The Use and Manufacture of Tools by Animals*, New York, Garland STPM Press, 1980.
- [9] Collias, Nicholas E., Elsie C., *Nest Building and Bird Behaviour*, Princeton, Princeton University Press, 1984.
- [10] Ellis, Malcolm, *Animal Specialists: Builders*, London, J.M. Dent and Sons Ud., 1979.
- [11] Frisch, Karl von, *Animal Architecture*, New York, Harcourt Inc., 1974. (*L'architettura degli animali*, Milano, Arnoldo Mondadori Editore, 1975).
- [12] Hancocks, David, *Animals and Architecture*, London, Hugh Evelyn, 1971.
- [13] Hansell, Michael H., *Animal Architecture & Building Behaviour*, London and New York, Longman, 1984.
- [14] D'arcy Thomson W., *On Growth and Form*, Cambridge University Press, 1917.
- [15] *Biomimetics-Terminology, Concepts and Methodology*, Berlin, Germany, Beuth, ISO 18458, 2015.
- [16] *Biomimetics: Biomimetic Materials, Structures and Components*, Berlin, Germany Beuth, VDI 6223, 2013.
- [17] Bauer G., Speck T (2012), “*Restoration of tensile strength in bark samples of Ficus benjamina due to coagulation of latex during fast self-healing of fissures*”, *Ann. Bot.*, 109:807–811, DOI: 10.1093/aob/mcr307.
- [18] Bauer G., Gorb S.N., Klein M.C., Nellesen A., von Tapavicza M., Speck T. (2014), “*Comparative study on plant latex particles and latex coagulation in Ficus benjamina, Campanula glomerata and three Euphorbia species*”, *PLoS ONE*, 9:e113336, DOI: 10.1371/journal.pone.0113336.
- [19] D'Auzac J., Prévot J.C., Jacob J.L. (1995), “*What's new about lutoids? A vacuolar system model from Hevea latex*”, *Plant Physiol, Biochem*, 33:765–777.

- [20] Nellesen A., von Tapavicza M., Bertling J., Schmidt A., Bauer G., Speck T. (2011), “*Reprinted in Self-healing in plants as a model for self-repairing elastomer materials*”, *Polym. Renew. Resour*; 2:149–156.
- [21] Schüssele A.C., Nübling F., Thomann Y., Carstensen O., Bauer G., Speck T., Mülhaupt R. (2012), “*Self-healing rubbers based on NBR blends with hyperbranched polyethylenimines*”, *Macromol. Mater. Eng.*, 297:411–419, DOI: 10.1002/mame.201100162.
- [22] Bauer G., Nellesen A., Speck T. (2010), “*Biological lattices in fast self-repair mechanisms in plants and the development of bio-inspired self-healing polymers*”, *WIT Trans. Ecol. Environ*, 138:453–459, DOI: 10.3390/biomimetics4010026.
- [23] Speck, O., Luchsinger, R., Busch, S., Rüggeberg, M. & Speck, T. (2006), “*Self-repairing membranes for pneumatic structures: transferring nature’s solutions into technical applications*”, *Proceedings of the 5th International Plant Biomechanics Conference Vol. I*, ed. L. Salmen, STFI Packforsk AB: Stockholm, pp. 115–120.
- [24] Trask, R.S., Williams, H.R. & Bond, I.P. (2007), “*Self-healing polymer composites: mimicking nature to enhance performance*”, *Bioinsp. Biomim.*; 2:1–9, DOI: 10.1088/1748-3182/2/1/P01.
- [25] White, S.R., Sottos, N.R., Geubelle, P.H., Moore, J.S., Kessler, M.R., Sriram, S.R., Brown, E.N. & Viswanathan, S. (2001), “*Autonomic healing of polymer composites*”, *Nature*, 409:794-797.
- [26] Pang, J.W.C. & Bond, I.P. (2005), “*Bleeding composite-damage detection and self-repair using a biomimetic approach*”, *Composites A*, 36:183-188.
- [27] Dry C. (1996), “*Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials*”, *Composite Structures*, 35:263-269.
- [28] Cremers J., *Flexible photovoltaics integrated in transparent membrane and pneumatic foil constructions*, In: *Proceedings of the CISBAT 2007 conference*, EPFL Lausanne, 2007.

- [29] Cremers J., *Integration of photovoltaics in membrane structures*, Detail Green, 2009.
- [30] Siddique R. H., Diewald. S., Leuthold J., Hölscher H. (2013), “*Theoretical and experimental analysis of the structural pattern responsible for the iridescence of Morpho butterflies*”, *Opt. Express*, 21:14351-14361.
- [31] Syurik J., Siddique R. H., Dollmann A., Gomard G., Schneider M., Worgull M., Wiegand G., Hölscher H. (2017), “*Bio-inspired, large scale, highly scattering films for nanoparticle-alternative white surfaces*”, *Sci. Rep.*, 7:46637.
- [32] Huang Z., Yang. S., Zhang H., Zhang M., Cao W. (2015), “*Replication of leaf surface structures for light harvesting*”, *Sci. Rep*, 5:14281.
- [33] Li X., Yuan X., Shang W., Guan Y., Deng L., Chen S. (2016), “*Lifetime improvement of organic light-emitting diodes with a butterfly wing’s scale-like nanostructure as a flexible encapsulation layer*”, *Org. Electron*, 37:453-457.
- [34] Zhou D., Biswas R. (2008), “*Photonic crystal enhanced light-trapping in thin film solar cells*”, *Journal of Applied Physics*, 103:093102.
- [35] Hauser H., Tucher N., Tokai K., Schneider P., Wellens C., Volk A. K., Seitz S., Benick J., Barke S., Dimroth F., Müller C, Glinsner. T., Bläsi B. (2015), “*Development of nanoimprint processes for photovoltaic applications*”, *J. Micro Nanolithogr, MEMS and MOEMS*, 14:031210, DOI: 10.1117/1.JMM.14.3.031210.
- [36] Zhao Q., Guo X., Fan T., Ding J., Zhanga D., Guo Q. (2011), “*Art of blackness in butterfly wings as natural solar collector*”, *Soft Matter*; 7:11433–11439.
- [37] Herman A., Vandembem C., Deparis O., Simonis P., Vigneron J. P. (2011), “*Nanoarchitecture in the black wings of Troides magellanus: A natural case of absorption enhancement in photonic materials*”, *Proc. SPIE* 8094.
- [38] Vukusic P., Sambles J.R., Lawrence C. R. (2004), “*Structurally assisted blackness in butterfly scales*”, *Proc. R. Soc.*, DOI: 10.1098/rsbl.2003.0150.

- [39] Zhang W., Zhang D., Fan T., Gu J., Ding J., Wang H., Guo Q., Ogawa H. (2009), “*Novel photoanode structure templated from butterfly wing scales*”, Chem. Mater., 21:33-40.
- [40] Zhao Q., Fan T., Ding J., Zhang D., Guo Q., Kamada M. (2011), “*Super black and ultrathin amorphous carbon film inspired by anti-reflection architecture in butterfly wing*”, Carbon, 49:877-883.
- [41] Gomard G., Drouard E., Letartre X., Meng X., Kaminski A., Fave A., Lemiti M., Garcia-Caurel E., Seassal C. (2010), “*Two-dimensional photonic crystal for absorption enhancement in hydrogenated amorphous silicon thin film solar cells*”, Journal of Applied Physics, 108:123102, DOI:10.1063/1.3506702.
- [42] Lou M., Bao H., Zhao C. (2013), “*Light trapping in thin film disordered nanohole patterns: Effects of oblique incidence and intrinsic absorption*”, arXiv:1312.1425.
- [43] Lin C., Martínez L. J., Povinelli M. L. (2013), “*Experimental broadband absorption enhancement in silicon nanohole structures with optimized complex unit cells*”, Opt. Express, 21:A872-A882.
- [44] Blackledge, T. A. and Hayashi, C. Y. (2006), “*Silken toolkits: biomechanics of silk fibers spun by the orb web spider Argiope argentata*”, J. Exp. Bio, 209:2452-2461, DOI: 10.1242/jeb.02275.
- [45] Guinea G. V., Perez-Rigueiro J., Plaza G. R. and Elices M. (2006), “*Volume constancy during stretching of spider silk*”, Biomacromolecules, 7:2173-7, DOI: 10.1021/bm060138v.
- [46] Zhou H. et al. (2018), “*Bio-inspired photonic materials: Prototypes and structural effect designs for applications in solar energy manipulation*”, Advanced Functional Materials, 28:1705309, DOI:10.1002/adfm.201705309.

- [47] Pérez-de la Fuente R. et al. (2012), “*Early evolution and ecology of camouflage in insects*”, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 109:21414-21419.
- [48] Krishna A. et al. (2020), “*Infrared optical and thermal properties of microstructures in butterfly wings*”, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 117:1566-1572.
- [49] Yi S. et al. (2018), “*Subwavelength angle-sensing photodetectors inspired by directional hearing in small animals*”, Nat. Nanotechnol, 13:1143-1147.
- [50] Hou Y., Yu M., Chen X., Wang Z., Yao S. (2015), “*Recurrent filmwise and dropwise condensation on a beetle mimetic surface*”, ACS Nano, 9:71-81, DOI: 10.1021/nn505716b.
- [51] Zhu M. et al. (2017), “*Tree-inspired design for high-efficiency water extraction*”, Adv. Mater, 29:1704107.
- [52] Shi N. N. et al. (2015), “*Thermal physiology. Keeping cool: Enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants*”, Science, 349:298-301, DOI: 10.1126/science.aab3564.
- [53] Choi S. H. et al. (2018), “*Anderson light localization in biological nanostructures of native silk*”, Nat. Commun., 9:452.
- [54] Xie D. et al. (2019), “*Broadband omnidirectional light reflection and radiative heat dissipation in white beetles Goliathus goliatus*”, Soft Matter, 15:4294-4300.
- [55] Liu X. et al (2019), “*Bright silver brilliancy from irregular microstructures in butterfly Curetis acuta moore*”, Adv. Opt. Mater, 7:1900687.
- [56] Didari A., Mengüç M. P. (2018), “*A biomimicry design for nanoscale radiative cooling applications inspired by Morpho didius butterfly*”, Sci. Rep, 8:16891.

- [57] Miroshnikov A. I., “*The longicorn beetle tribe Cerambycini Latreille*”, 1802 (Coleoptera: Cerambycidae: Cerambycinae) in the fauna of Asia; 2, A new or little-known species of the genus *Neocerambyx*; Thomson J., 1861, Russ. Entomol. J, 27:33-39, 2018.
- [58] Lin D., Fan P., Hasman E., Brongersma M. L. (2014), “*Dielectric gradient metasurface optical elements*”, Science, 345:298-302, DOI: 10.1126/science.1253213.
- [59] Schuller J. A., Taubner T., Brongersma M. L. (2009), “*Optical antenna thermal emitters*”, Nat. Photonics, 3:658-661, DOI:10.1038/NPHOTON.2009.188.
- [60] Srinivasan A., Czapla B., Mayo J., Narayanaswamy A. (2016), “*Infrared dielectric function of polydimethylsiloxane and selective emission behavior*”, Appl. Phys. Lett, 109:61905.
- [61] Fu Y., Yang J., Su Y. S., Du W., Ma Y. G. (2019), “*Daytime passive radiative cooler using porous alumina*”, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 191:50-54.

Ringraziamenti

Un immenso grazie al mio Relatore e Professore Ing. Chiaia Bernardino, per tutti gli insegnamenti tramandati e per il fondamentale supporto in questo percorso di tesi; è opera Sua se sono rimasto affascinato fin dall'inizio dall'argomento affrontato. Grazie per la fiducia e la professionalità mostrata in questi mesi, per me, così importanti e delicati.

Un doveroso ringraziamento alla mia Famiglia; a mio papà Giuseppe, sempre presente, unico e insostituibile, il tuo insegnamento mi ha aiutato a superare gli ostacoli della vita; a mia mamma Marina, per i sacrifici, per avermi spronato e per non avermi mai lasciato solo nonostante le difficoltà e grazie per avermi fatto sentire importante per ogni obiettivo raggiunto, spero di averti resa orgogliosa anche in questo mio percorso; a mia sorella Paola, amica e mamma allo stesso tempo, mi hai reso più belle le giornate, mi hai dato la forza per continuare a sorridere e te ne sarò sempre grato. Questa laurea è nostra!

Ringrazio i miei compagni di corso e soprattutto i miei coinquilini e amici Fitta e Lodus, per gli interminabili viaggi Piacenza-Torino, per le risate, per i progetti svolti e per gli esami preparati insieme, per tutto quello che abbiamo passato e per tutto quello che passeremo, vi auguro il meglio.

Ringrazio tutti i Professori che ho incontrato in questi anni, per l'impegno e le nozioni indispensabili fornite nei vari corsi, se sono arrivato fin qui è grazie anche al Vostro contributo.

Un sincero ringraziamento alla mia compagnia, per la costante presenza e per avermi illuminato i momenti più bui del lockdown; siete i migliori, non vi cambierei per nulla al mondo.

Grazie alla mia Virgi, per la persona che sei; grazie perché sei in grado di ascoltare, consigliare e risolvere ogni mio problema. Sono molto fortunato ad averti con me. Sei speciale.

Infine, grazie alla mia Nonna Anna, che insieme ai miei Angeli Marco, Attilio e Maria mi hanno sempre accompagnato in questo mio viaggio. A Voi dedico tutto.