



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica
A. A. 2020/2021
Sessione di Laurea luglio 2021

***PROGETTAZIONE DI UNA TENDA DA CAMPO
BIOMIMETICA AD USO OSPEDALIERO***

Relatori:

Carmagnola Irene
Chiaia Bernardino
Chiono Valeria

Candidato:

Siccu Martina

ABSCTRACT

Negli ultimi decenni la crescente incidenza delle catastrofi ed emergenze climatiche risulta essere un problema sempre più rilevante per il quale la repentinità e l'efficacia dell'intervento giocano un ruolo importante. E' necessario, in questi momenti, che le organizzazioni presenti nei luoghi di interesse siano dotate di presidi medici e dispositivi per sopperire al servizio sanitario locale nel caso in cui questo sia non fruibile o non sufficiente in caso di emergenza.

L'idea della tesi è quella di analizzare i punti chiave nella progettazione di queste strutture cercando di ottimizzarne le caratteristiche; si è quindi pensato di andare a diminuire il peso del modulo tenda rispetto a quelle utilizzate attualmente in modo da ridurre il materiale impiegato ed il seguente costo e facilità di trasporto. Si è riscontrato, inoltre, che i moduli adoperati fino ad oggi non sono dotati di alcun trattamento che prevenga la formazione e la diffusione di infezioni batteriche.

Negli ultimi anni l'ispirazione biomimetica è risultata di particolare interesse in diversi ambiti dell'ingegneria, quali edilizio, biomedico, ambientale, informatico e molti altri. L'obiettivo di questa tesi è quello sfruttare l'approccio biomimetico per proporre un'alternativa agli attuali presidi medici in uso per realizzare ospedali ed accampamenti tramite l'utilizzo di tende e container adibiti generalmente a ricovero ed abitazione di persone.

E' stato quindi progettato un modulo singolo di tenda in cui la biomimetica ha contribuito in due step fondamentali della progettazione: la progettazione della struttura e il rivestimento antibatterico delle stessa.

In primo luogo, dopo aver valutato i diversi metodi per lo sviluppo di un telaio rigido, è stata selezionata la tecnica dei sistemi *tensegrali*; questi hanno la caratteristica di equilibrare in maniera statica le parti della struttura in compressione e quelle in trazione. Esistono infatti diversi esempi di strutture in natura basate sul concetto di tensegrità che presentano vantaggi per quanto riguarda la leggerezza e la flessibilità.

Il secondo aspetto bioispirato della tesi è quello per la funzionalizzazione superficiale del telo di copertura. Molti organismi esistenti in natura presentano ottime proprietà adesive, chi per la loro morfologia superficiale e chi per la loro composizione chimica. La funzionalizzazione bioispirata risulta innovativa in quanto limita l'utilizzo di componenti chimici utilizzati comunemente nell'industria dedicata ai coating superficiali sostituendoli con composti naturali che hanno un minore impatto ambientale e presentano efficienza

pressoché analoga, se non addirittura migliore.

Le infezioni ospedaliere sono, al giorno d'oggi, una problematica non trascurabile; queste risultano infatti essere la complicanza più frequente nell'ambito dell'assistenza sanitaria. Se si aggiunge inoltre lo sviluppo dell'antibiotico-resistenza che ha avuto luogo nel corso degli anni, si può intuire l'importanza di sviluppare superfici che limitino la crescita di biofilm in ambito sanitario. A tal proposito è stato testato un metodo di coating bioispirato utilizzando una soluzione, con proprietà adesive ed antibatteriche da depositare sulla parte interna della tenda. In particolare, in questo lavoro di tesi è stato sviluppato un metodo ispirato al processo di adesione dei mitili; sono stati utilizzati i seguenti componenti naturali: l'acido tannico, selezionato per l'elevato numero di gruppi fenolici contenuti che consentono una rapida polimerizzazione e conseguente adesione del composto pressoché ad ogni superficie, e l'olio essenziale di Tea Tree, che si lega, sempre grazie alla presenza di gruppi fenolici, alle molecole di acido. La combinazione di questi composti è stata fatta per aumentare le proprietà antibatteriche del coating.

INDICE

1. INTRODUZIONE: COS'E' LA BIOMIMETICA	1
2. BIOMIMETICA E ARCHITETTURA	9
2.1 Background e cenni storici.....	9
2.2 Introduzione alle strutture tensegrali.....	18
2.2.1 Reticoli tridimensionali e configurazione spaziale	23
2.2.2 Teoria e stato dell'arte dei processi di form-finding	28
2.2.2.1 Metodo della densità di forza.....	30
2.2.3 La cupola tensegrale.....	37
3. IPOTESI DI PROGETTO: L'OSPEDALE TENSEGRALE	39
3.1 Introduzione al progetto.....	39
3.2 Strutture ospedaliere campali.....	40
3.3 Ipotesi di progetto.....	45
3.4 Dimensionamento preliminare della struttura.....	46
3.4.1 Sviluppo codice MATLAB.....	47
3.4.2 Elementi strutturali.....	64
3.4.2.1 Telaio.....	65
3.4.2.2 Telo di copertura.....	69
3.4.2.3 Ancoraggi.....	70
3.4.3 Materiali degli elementi strutturali.....	71
4. FUNZIONALIZZAZIONE ANTIBATTERICA DI SUPERFICI	73
4.1 Infezione batterica.....	73
4.2 Sviluppo antibiotico-resistenza.....	75
4.3 Superfici antimicrobiche	77
4.3.1 Metodi di coating bioispirati.....	78
4.3.2 Il meccanismo adesivo delle cozze.....	81
4.4 Sezione sperimentale: realizzazione del rivestimento antibatterico.....	91
4.4.1 Introduzione.....	91
4.4.2 Materiali.....	92
4.4.3 Metodi.....	92

4.4.4 Risultati.....	94
5. CONCLUSION	109

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE: COS'E' LA BIOMIMETICA

La Biomimetica, o Biomimesi, è per definizione la scienza che studia i sistemi biologici naturali emulandone forme, processi, meccanismi d'azione e strategie. Proprio da quest'ultimi ci si ispira per risolvere le sfide che si incontrano ogni giorno, per trovare soluzioni più sostenibili ai problemi progettuali e tecnologici dell'uomo, per replicare i disegni e processi forniti dalla natura in nuove soluzioni per l'industria e la ricerca. La parola *biomimesi* deriva dal greco e significa letteralmente 'imitazione della vita'. Oggi questo termine identifica la disciplina che consiste nell'emulazione della natura sia dal punto di vista formale che da quello sostanziale e si basa sulla consapevolezza che la natura è una banca dati di innovazioni progettuali basate sull'imitazione delle caratteristiche degli esseri viventi e dei progetti biologici come modello di riferimento. Si tratta di un vero e proprio *archivio di brevetti* disponibili immediatamente, un laboratorio di ricerca e sviluppo a nostra disposizione che, tramite un processo di "*trial and error*", si è evoluto fino ad oggi e ci offre un enorme bagaglio di soluzioni da cui imparare.

Un ruolo fondamentale per lo sviluppo e la diffusione di questa scienza è da attribuire alla naturalista Janine Benyus che nel 1997 pubblicò il libro "*Biomimcry: Innovation Inspired by Nature*" in cui, per la prima volta, viene descritta la biomimetica come disciplina emergente che ha come scopo fondamentale quello di contrastare l'impatto negativo sull'ambiente dovuto allo sviluppo della specie umana.

Oggi ingegneri, architetti e designer hanno a disposizione "esperimenti" che l'evoluzione naturale ha perfezionato in milioni di anni fondandosi sul principio del "minimo investimento per il massimo rendimento". Bisognerebbe, in quest'ottica, procedere verso uno studio consapevole dei processi meccanici e biologici della natura, come fonte di ispirazione per migliorare le tecnologie umane basandosi su interdipendenza, interconnessione e cooperazione.

La natura nell'arco di millenni ha saputo selezionare ciò che era più durevole ed efficiente, ha perfezionato forme, tessuti e sostanze che sempre più si comportano davanti ai nostri occhi come importanti fonti di ispirazione. Vigge nel mondo naturale il principio del 'quanto basta'; i prodotti di scarto vengono impiegati come nuove risorse, si evitano gli sprechi e si ha un continuo adattamento all'ambiente circostante. Queste prerogative fin dalla nascita della vita sul pianeta sono state alla base dello sviluppo e dell'evoluzione di tutte

le specie e han fatto che esseri viventi e non potessero convivere in armonia sul nostro pianeta. Successivamente, lo sviluppo dell'umanità è proseguito inarrestabilmente in maniera tanto affascinante quanto invasiva fino ad arrivare ad oggi. La situazione al momento è che l'uomo ha lasciato e continua a lasciare una profonda impronta sul pianeta per quanto riguarda sia lo sfruttamento di risorse, le materie prime usate in grandi quantità infatti stanno per esaurire, sia di sfruttamento del territorio, ad esempio l'invasione di aree precedentemente colonizzate da altre specie che vengono completamente ignorate per creare nuovi insediamenti.

L'insegnamento che dovrebbe essere appreso da discipline come la biomimetica è che il rapporto uomo-natura non è monodirezionale ma dovrebbe al contrario essere circolare dal momento in cui è necessaria la collaborazione di entrambe le parti per procedere verso un futuro migliore e sostenibile e, se la natura fino ad adesso ha fatto la sua parte non si può dire lo stesso dell'uomo. Per questo motivo è fondamentale promuovere queste materie in quanto, grazie allo sviluppo tecnologico, abbiamo la capacità per comprendere e riprodurre i mezzi che la natura ha usato fino ad adesso per sopravvivere così a lungo in maniera efficiente e armoniosa.

Nell'ottica di andare verso uno sviluppo bioispirato si può procedere principalmente in due diversi modi: partendo da un fenomeno biologico si possono poi applicare i meccanismi di funzionamento osservati ad un problema di design che deve essere risolto o migliorato, oppure se si dispone di un'idea di progettazione nata dall'uomo, si può cercare la soluzione nel mondo naturale. Le possibili applicazioni della biomimetica ricoprono pressoché tutti i campi della scienza, da quella medica a quella architettonica, sottolineando così l'enorme potenziale di questa recente disciplina.

L'imitazione della natura non va praticata unicamente da un punto di vista formale, è fondamentale che sia chiaro il significato funzionale di una determinata forma, del perché è stato necessario evolversi in quella direzione e del motivo per cui la natura lo ha fatto. Il precetto rinascimentale del *"dominare la natura attraverso la tecnologia"* si ribalta ora in quello di *"dominare la tecnologia attraverso la natura"* e questo, sia chiaro, non sottintende un passo indietro in ambito tecnologico-scientifico, ma piuttosto un sostanziale ripensamento della contrapposizione naturale-artificiale[1]. Il rapporto uomo-natura non deve più assumere i tratti di una contrapposizione ma di una collaborazione e convivenza armoniosa in cui l'uomo sappia farsi allievo meritevole dei preziosi insegnamenti provenienti dal mondo che ci circonda, che sappia osservare, rielaborare e

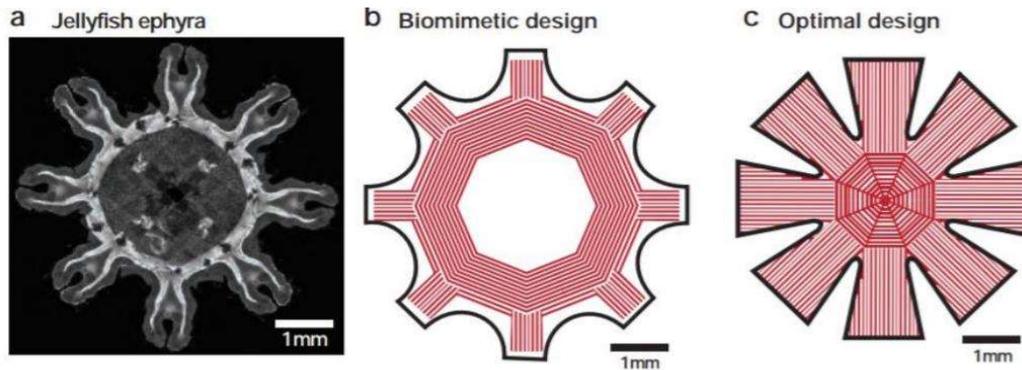


Figura 1. Robot bioartificiale alimentato da cellule viventi. a) medusa osservata al microscopio. b) Rappresentazione della geometria biomimetica. c) rappresentazione della geometria ottimale.

adattare lo sviluppo della nostra specie senza effetti collaterali sul pianeta. Il concetto principale per utilizzare al meglio le risorse offerte da questa disciplina non è quello di imitare in maniera passiva ciò che vediamo ma di capire in motivo che spinge la natura verso quella determinata evoluzione piuttosto che un'altra. Esistono infatti diversi esempi in cui volendo imitare il principio naturale quello che poi si è ottenuto non è stata una copia di un oggetto realmente esistente ma bensì di un sistema che ne imitasse le caratteristiche funzionali. Questa differenza potrebbe essere dovuta alla diversità di risorse di cui dispone l'uomo e di cui dispone, invece, il pianeta. A tal proposito si riporta l'esempio dello sviluppo di alcuni robot bioartificiali che vengono attivati da cellule biomimetiche senza bisogno di altre fonti energetiche [2]; alcuni ricercatori hanno realizzato un medusoide che, formato da cellule artificiali e biologiche, nel caso specifico cardiache, è in grado contraendosi di sviluppare un movimento in ambiente acquoso quanto sottoposto a differenza di tensione. Il design del robot, che si identifica con la disposizione delle cellule cardiache sulla superficie, non è tuttavia biomimetico.

E' stato osservato che con una configurazione ottimizzata si potevano ottenere migliori performances; l'ispirazione deve quindi avvenire in maniera attiva e più efficiente possibile. In Figura 1 è possibile osservare la rappresentazione delle diverse geometrie testate ispirate e quelle di una medusa reale.

Un interessante concetto ricorrente in natura è quello della *tassellazione* delle geometrie. Esempi emblematici sono la tela del ragno e le celle degli alveari che si basano sul principio di ottenere la massima stabilità, resistenza e ottimizzazione spaziale possibile con il minore dispendio energetico. Si è osservato che, ad esempio, anche la composizione strutturale di alcune capsule proteiche che contengono l'acido nucleico dei virus è tassellata, la loro forma rappresenta una geometria geodetica, ovvero hanno disposizioni spaziali in cui gli elementi sono assemblati lungo delle linee che rappresentano nello

spazio il percorso più breve possibile tra due punti. La tassellazione delle geometrie naturali è parte fondamentale della struttura prima del mondo che ci circonda che si è evoluto appunto nell'ottica della massima ottimizzazione.



Figura 2. Rappresentazione della tassellazione di una ragnatela



Figura 3. Rappresentazione della tassellazione degli alveari.

I campi di applicazione della biomimetica sono davvero i più svariati e, tra questi, vi sono dei punti in comune che permettono la connessione tra le diverse discipline insegnandoci a ragionare in maniera più collaborativa con il mondo che ci circonda. Uno dei più interessanti, ed allo stesso tempo apparentemente lontano dalla biomimetica e dal mondo naturale, è quello della computazione. Alcuni processi osservati in natura sono stati studiati per essere ad esempio riprodotti e applicati durante lo sviluppo di programmi di calcolo per l'ottimizzazione di problemi tecnologici attuali. Questi hanno permesso di trovare soluzioni prima impossibili da individuare oppure andando a ridurre in maniera rilevante i tempi di esecuzione permettendo quindi un grande margine di miglioramento per la ricerca scientifica in questi termini. Tra questi citiamo a titolo di esempio gli algoritmi di ottimizzazione genetici e quelli ispirati al comportamento sociale di alcune specie animali, come le formiche. Entrambi si sono sviluppati partendo dalla consapevolezza che l'evoluzione biologica è paragonabile ad un metodo di ricerca che ha un grandissimo bacino di potenziali soluzioni. Gli algoritmi di ottimizzazione citati prima si distinguono per il modo in cui queste soluzioni vengono rappresentate a livello computazionale. I primi, come si può intuire dal nome, descrivono le differenti opzioni del problema come delle sequenze geniche in cui le soluzioni migliori possono essere paragonate agli individui che negli anni si sono modificati e che hanno quindi le migliori caratteristiche per assicurarsi sopravvivenza e riproduzione in un ambiente che è esso stesso in continua evoluzione [3]. Per quanto riguarda invece la seconda tipologia di algoritmi, quello che è emerso dall'osservazione delle colonie di formiche è che queste sfruttano un tipo di comunicazione indiretto chiamato *stigmergico*, ovvero secondo cui le

formiche all'interno di una società sono stimolate tra loro in maniera proporzionale al livello di successo raggiunto. Per chiarire le idee, supponendo di trovarsi davanti al problema della ricerca di cibo, le formiche che ne avranno trovata una quantità maggiore rilasceranno una quantità di una sostanza, il feromone, superiore a quelle che invece ne hanno trovato meno, influenzando così in maniera indiretta la ricerca delle altre formiche che, per indole, seguiranno il percorso maggiormente segnalato dall'ormone. Questo fa sì che ci sarà un maggior numero di insetti che percorrerà quella strada e la quantità di feromone rilasciata continuerà ad aumentare sfruttando quindi un meccanismo a feedback positivo. Su queste basi si è sviluppato un algoritmo che mima questo processo ispirandosi appunto al comportamento sociale di questa specie. Le 'formiche artificiali' lavorano per cercare una soluzione sufficientemente buona al problema di ottimizzazione dato e quando la trovano, non potendo rilasciare realmente ormoni essendo nel sistema virtuale, queste vanno a modificare valori numerici che cambieranno la probabilità che una formica selezioni una determinata soluzione piuttosto che l'altra.

Altre applicazioni biomimetiche importanti sono quelle che hanno fornito dei miglioramenti dal punto di vista dell'impatto ambientale dell'uomo e di sviluppo verso innovazioni sostenibili, ad esempio nell'ambito dell'edilizia di cui si riportano due esempi significativi. Il primo è forse il caso più noto ed emblematico in questo ambito per quanto riguarda l'ispirazione biomimetica, ovvero l'*Eastgate building* di Harare, nello Zimbabwe. L'edificio, affiancato da un termitaio, è attualmente un centro polifunzionale realizzato dall'architetto Mick Pearce in collaborazione con gli ingegneri del gruppo Arup che, osservando il funzionamento dei termitai, hanno realizzato uno tra i primi esempi efficaci di biomimetica. Le termiti hanno sviluppato le loro abitazioni come dei complessi cumuli

di terra che hanno il compito di mantenere il loro interno ad una temperatura fresca costante, tramite dei canali costruiti nel sottosuolo, così da assicurare la crescita e il mantenimento di una particolare specie di fungo, per assicurarsi la sopravvivenza essendo questa la loro principale fonte di nutrimento. L'idea di Pearce è stata quella di ricreare il

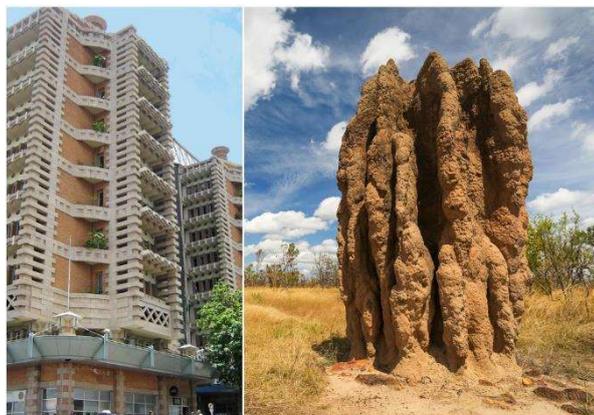


Figura 4. Eastgate building Zimbabwe a sinistra, termitaio a destra

suddetto sistema di ventilazione nell'edificio con dei camini laterali e un tunnel centrale, permettendo così l'ottimizzazione del ricircolo dell'aria. In questo modo si elude il bisogno di un'ulteriore climatizzazione e si abbatte il fabbisogno energetico dell'edificio e ciò ha come vantaggio indiretto, oltre al limitare l'impatto ambientale, quello di abbattere il costo degli affitti rispetto agli edifici circostanti. L'esempio infatti è stato scelto per avvalorare il fatto che l'attitudine di questa disciplina non è quella di copiare passivamente un design esistente ma di capire la motivazione ultima di questo e di



Figura 5. The Gherkin, Londra

sfruttarlo adattandolo alle esigenze della specie umana. Il secondo esempio proveniente dal mondo dell'edilizia è il *30 St Mary Axe*, anche noto come "The Gherkin", situato a Londra e riportato in *Figura 5*. Questo è il primo edificio ecologico alto della capitale inglese e, a partire dalla sua forma che risponde ai vincoli spaziali del sito, rappresenta

l'emblema dell'ottimizzazione del

progetto adattato all'ambiente e non viceversa. Lo studio della sua configurazione spaziale è stato realizzato tramite modelli parametrici computerizzati ottenendo infine geometrie che ricordano quelle naturali. L'edificio è realizzato da un'ossatura rigida con prestazioni meccaniche elevate ma comunque dotata di leggerezza grazie alla geometria triangolare che permette di avere spazi flessibili e senza colonne al suo interno così da massimizzarne l'area fruibile.

Con la sempre maggiore attenzione riposta verso l'architettura biomimetica e sostenibile, sono state tracciate delle linee guida per la progettazione degli edifici. Quest'ultima non può essere imprescindibile dal contesto in cui sono inserite le infrastrutture e occorre inoltre non trascurare le parti riguardanti il fabbisogno energetico dell'edificio e lo smaltimento dei prodotti di scarto ad esempio dovuti alla climatizzazione o alle acque di scarico. Il contesto in cui l'edificio è inserito deve essere il punto di partenza della progettazione ed è definito dalle seguenti voci:

- **Sito:** riguarda le condizioni climatiche del luogo in cui si trova. L'analisi del sito di costruzione è importante per capire come deve essere progettato l'involucro

dell'edificio sia da un punto di vista di protezione che da quello che potrebbe riguardare lo sfruttamento di energia dall'ambiente circostante;

- **Clima:** comprende le condizioni di benessere per l'uomo. Le diverse zone sono divise principalmente in zone a clima freddo, temperato e caldo umido;
- **Territorio:** l'osservazione del territorio potrebbe essere utile per sfruttare caratteristiche locali. In zone vicine a corsi di acqua o costiere avremo ad esempio un clima più temperato grazie al trattenimento di calore attuato dalle acque mentre la terra, al contrario, ha un'escursione termica molto più rapida;
- **Acqua:** questa voce si riferisce a zone molto piovose in cui un elemento da non trascurare durante la progettazione è sicuramente la rete di canalizzazione delle acque che non deve interrompere il loro ciclo naturale;
- **Sole:** è necessario sapere in che modo e per quanto tempo un edificio è esposto alla radiazione solare così da poterla eventualmente sfruttare come fonte di energia. Queste informazioni servono inoltre anche per progettare un ottimale meccanismo di ombreggiamento in caso di necessità.
- **Vento:** per quanto riguarda l'esposizione ai venti, l'analisi è necessaria in quanto questi possono presentare elevate dispersioni energetiche attraverso l'involucro dell'edificio. Ridurre la velocità dei venti in prossimità degli edifici potrebbe risultare efficace anche per ridurre le dispersioni termiche. Il vento naturale inoltre potrebbe essere sfruttato per la purificazione dell'aria e la ventilazione dell'edificio.
- **Conformazione dell'edificio:** è uno degli aspetti che permette di minimizzare la dispersione di energia e massimizzare il rendimento;
- **Infrastrutture e tecnologie:** occorre ricordare che l'edificio non è mai a se stante ma inserito in una rete di infrastrutture che devono essere collegate tra loro, ad esempio, per i sistemi di scarico di acque e rifiuti.

Si tratta di guardare le forme presenti in natura da un punto di vista pratico in cui non si ha un'associazione univoca tra forma geometrica e funzione, potrebbe infatti capitare che due forme uguali corrispondano a differenti risorse strutturali e biologiche mediate dalla *pretensione*. La sollecitazione sotto forma di tensione è la principale responsabile della forma dell'oggetto/essere ed è questa che consente inoltre di mantenerla.

La questione di come la natura si è sviluppata negli anni ha attirato non solo gli studiosi in ambiti scientifici e tecnologici, ma anche nel campo della filosofia; autori come Platone e

Nietzsche hanno infatti mostrato un interesse a provare a spiegare la *'geometria'* dell'essere umano. Questi hanno provato a soffermarsi sull'aspetto corporeo dell'uomo: il corpo ha infatti un ruolo duale in quanto è sia parte di un'unione complessiva di esseri viventi tutti dipendenti tra loro e sia essere imperante e responsabile delle proprie azioni e identificabile come un tutto. La coscienza viene vista come uno *'strumento'*, esattamente come un altro organo, racchiuso all'interno di un guscio che non svolge unicamente la funzione di contenitore ma è parte attiva della nostra esistenza. E' anche interessante osservare come durante gli anni Sessanta e Settanta del secolo scorso, con la nascita e lo sviluppo dei primi movimenti ambientalisti, siano nate molte riflessioni riguardanti proprio il rapporto tra uomo e natura. Secondo alcuni filosofi ambientali, la specie umana deve cercare il suo valore interno nel mondo naturale poiché solo così potrà apprezzare il proprio potenziale; il legame tra queste due entità è imprescindibile ma tuttavia non implica una dipendenza vitale di una dall'altra. Ed è a tal proposito che nasce la riflessione secondo la quale l'ottica con cui si sarebbe bene osservare le cose dovrebbe essere quella di considerare il rapporto uomo-natura come un lavoro armonico tra le due entità siccome in questa collaborazione è vista l'unica speranza di preservare integralmente sia la nostra specie che il nostro pianeta. La biomimetica si inserisce in questo contesto come una disciplina che può fornire degli spunti per trovare questa l'armonia[4][5].

CAPITOLO 2

BIOMIMETICA ED ARCHITETTURA

2.1 Background e cenni storici

Il primo contatto tra biomimetica e architettura avvenne da un punto di vista prevalentemente formale ed estetico. Inizialmente non si era colta la potenzialità di questo nuovo rapporto e gli architetti videro nell'ambiente naturale unicamente una



Figura 6. Analogia tra il tetto di casa Batlló realizzata da Antoni Gaudí situata a Barcellona (a sinistra) e la pigmentazione naturale di un camaleonte (a destra)

fonte di ispirazione per design migliori e *più belli* di quelli che si erano realizzati fino a quel momento. In questo contesto si svilupparono due concetti derivati dalla biomimetica, ovvero il *biomorfismo* e il *bio-utilizzo*. Il primo, come si intuisce dall'etimologia stessa della parola, si riferisce all'utilizzo della natura come spunto di ispirazione per la realizzazione di forme e design non convenzionali mentre il secondo riguarda l'uso fisico della natura come materiale effettivo per il design, ad esempio il coinvolgimento di alberi e piante per migliorare la ventilazione passiva degli edifici.

Grazie alle intuizioni di alcune personalità come Sergio Musmeci e Frei Otto, i materiali

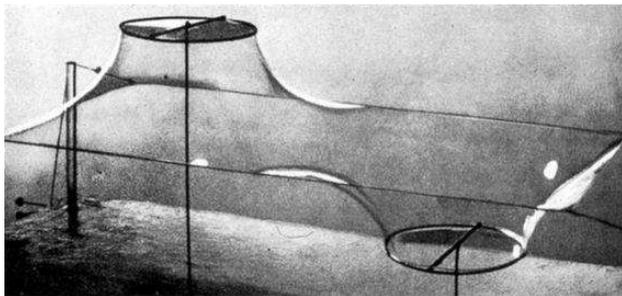


Figura 7. Esperimenti con membrane di acqua saponata

naturali sono stati utilizzati come mezzi non solo costitutivi, ma iniziarono ad essere sfruttati per sviluppare modelli la cui manipolazione permetteva di ottenere regole di funzionamento tramite astrazione e deduzione

dalla natura. Otto, ad esempio, grazie all'osservazione di membrane realizzate con acqua saponata (Figura 7), riuscì a formalizzare le regole di funzionamento delle tensostrutture e del loro comportamento sotto sforzo passando quindi da un metodo di applicazione delle teorie della fisica meccanica all'osservazione di questi modelli detti *analogici-organici*. Il processo di trovare la forma di un edificio avviene quindi in relazione al flusso

di forze a cui è soggetto. Come si è potuto osservare, ad esempio tramite gli esperimenti con le membrane di acqua saponata, è emerso che la minimizzazione energetica è la causa intrinseca che spiega gli aspetti funzionali e costruttivi dell'evoluzione naturale.

Un altro interessante aspetto dal quale l'architettura inizia a prendere spunto è il concetto della struttura come organismo. Quest'ultimo viene realizzato da unità semplici che si ripetono e che possono essere sostituite o modificate singolarmente senza cambiare i connotati della struttura nel suo complesso, ad esempio come avviene per le cellule che compongono tutti gli organismi.

L'imitazione del modello biologico deve avvenire quindi, oltre che dal punto vista formale, anche da quello causale. Si è infatti iniziato a porre l'attenzione anche sul perché la natura assuma una configurazione piuttosto che un'altra. Grazie all'evoluzione tecnologica è oggi possibile elaborare progetti complessi di architettura; il supporto software parametrico permette infatti di tenere in conto molti dati da calcolare per realizzare modelli. In natura le forme sono solo il prodotto dell'ambiente in cui si trovano e della funzione che devono svolgere. Citando l'architetto statunitense Louis Sullivan per esprimere al meglio questo concetto: *“Non c'è cambiamento di forma senza cambiamento di funzione”*.

La biologia ha rappresentato un riferimento fondamentale per l'architettura funzionalista ovvero una corrente sviluppatasi durante il ventesimo secolo in cui l'edificio aveva il compito di rispecchiare anche formalmente lo scopo per cui è stato progettato.

Il concetto sviluppatosi negli anni Novanta di 'analogia ecologica' sottintende la relazione tra sistema e ambiente: l'organismo naturale si è sviluppato in base alle relazioni che instaura con il suo intorno. Il modificarsi per adattarsi all'ambiente circostante è proprio l'ottica con cui sarebbe bene procedere nel momento della progettazione di un edificio. La regola principale che vige in natura, come già accennato, è quella dell'energia minima. Questa si vede concretizzata, ad esempio, nelle conchiglie che hanno una determinata forma poiché obbediscono alle forze ascensionali e alla pressione dell'acqua oppure anche nella forma della foglia che è tale da avere la maggiore esposizione alla radiazione solare.

In questo scenario si introducono bene alcune innovazioni nel campo edilizio come le cupole geodetiche dell'architetto, designer e inventore Richard Buckminster Fuller la cui realizzazione si basa sia sull'osservazione della forma dei radiolari, protozoi che vivono in mare caratterizzati da uno

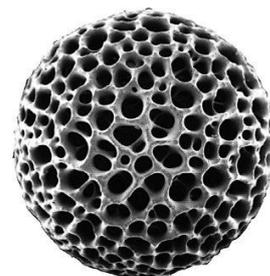


Figura 8. Struttura di una Radiolaria

scheletro siliceo, che sull'estensione di alcuni principi base dei solidi platonici semplici che approssimano superfici sferiche [6]. Queste strutture sono caratterizzate da leggerezza e

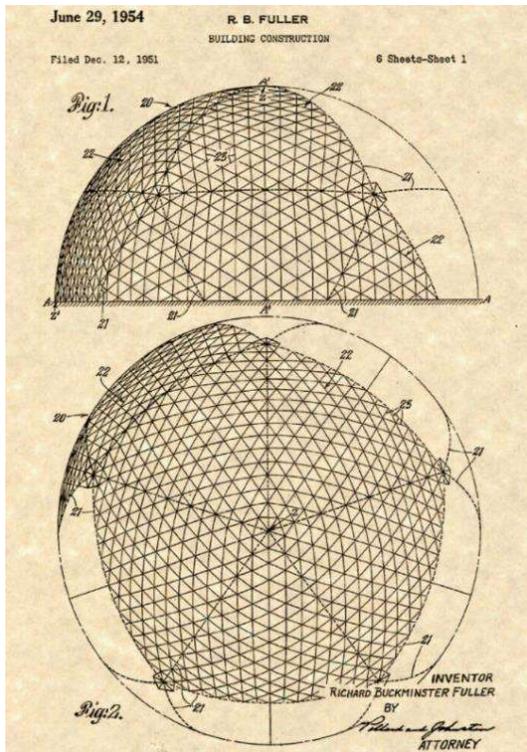


Figura 9. Raffigurazione frontale e laterale della cupola geodetica di R. B. Fuller

stabilità. Le cupole di Fuller sono realizzate suddividendo una superficie sferica in una serie di triangoli uguali che creano quindi una complessa rete in grado di distribuire il peso in maniera uniforme e di rendere questa semplice struttura quindi più forte strutturalmente. La reticolazione, oltre a ricordare il concetto di tassellazione, spesso ricorrente nel mondo naturale, apporta inoltre anche vantaggi dal punto di vista della quantità di materiale utilizzato; per Fuller usare il “meno possibile”, evitare gli sprechi e riciclare materiale di produzione, sono imperativi che da sempre hanno contraddistinto lo sviluppo delle sue opere.

Un'altra personalità di spicco in questo contesto è quella del progettista e costruttore Pier Luigi Nervi. Con lui si entra in un'ottica in cui l'architettura non è solo più estetica ma essa diventa pura funzionalità e staticità. Nervi contribuì allo sviluppo del Paese il secondo dopoguerra, dando all'Italia un'immagine moderna. Al centro della sua attenzione ci fu sempre il rapporto tra forma e struttura e questo diede così vita a configurazioni guidate dalle forze interne a cui le strutture stesse sono soggette. L'architetto ebbe inoltre riguardo per l'ottimizzazione a livello economico che lo portò quindi a sviluppare tecniche sempre diverse e innovative. Poter usufruire delle



Figura 10. Palazzetto dello sport di Roma realizzato da Pier Luigi Nervi

conoscenze biologiche per riprodurre le soluzioni e i processi naturali nella progettazione architettonica apre un ampio scenario all'immaginazione e alla sperimentazione [7]. Al

contrario di quanto si possa immaginare, la biomimetica non si occupa della progettazione di forme, l'imitazione degli organismi biologici può infatti essere intesa in vari modi di cui quello formale è solo una delle possibilità. I campi di applicazione non riguardano unicamente materie come l'architettura e l'ingegneria, che fanno di oggetti concreti gli obiettivi di questa disciplina, ma esistono casi di biomimetica applicati anche in agricoltura, in economia o addirittura a problemi di ottimizzazione del traffico veicolare. Uno dei campi che rappresenta il maggiore numero di progetti biomimetici è sicuramente quello dei materiali[8].



Figura 11. Pelle dello squalo osservata al microscopio

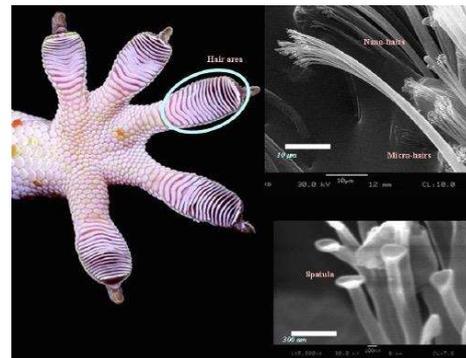


Figura 12. Rappresentazione della nanostutturazione delle zampe del gecko

Negli ultimi anni hanno avuto un grande slancio le così dette *superfici biomimetiche*. Queste espongono una determinata funzionalità caratteristica della cosa/organismo a cui sono ispirate. Tra le più emblematiche, si hanno le superfici *super-aderenti* che si ispirano alla capacità del gecko di aderire a pressoché tutti i substrati grazie alle forze di Van der Waals tra le superfici e la sua pelle. Queste si ottengono riproducendo la nanostrutturazione presente sulle zampe del gecko e possono essere applicate ad esempio nell'ambito del packaging in cui i problemi di assemblaggio e disassemblaggio a secco sono all'ordine del giorno. Esistono, in contrasto alle precedenti, le superfici *antiaderenti* che riproducono la super-idrofobicità, trovata in natura ad esempio sulla foglia di loto. Anch'essa è riproducibile andando a lavorare su scala nanometrica per generare la struttura gerarchica presente sulla sua superficie per poi sfruttarla ad esempio in ambiente sanitario per evitare l'adesione e conseguente riproduzione delle colonie batteriche e assicurare la massima igiene possibile. Si riportano ancora, a titolo di esempio, le superfici *idrocinamiche* che si ispirano alla pelle di squalo composta da dentelli dermici, usate per la produzione di costumi o in ambiente nautico, e le superfici *termo-regolanti* che mimano la capacità delle piante di resistere in maniera efficace agli

agenti atmosferici siccome non hanno la possibilità di spostarsi e quindi ripararsi da pioggia, vento o neve. Sono stati realizzati dei tessuti che, ispirandosi alla dinamica di apertura delle scaglie della pigna, reagiscono all'umidità e alla temperatura della pelle con cui sono a contatto. Questi sono solo alcuni esempi; il panorama che in realtà ci è offerto dalla progettazione biomimetica è assai più ampio.

La modellazione di una forma è il risultato dell'azione di diverse forze; per l'evoluzione, in natura, si parte dal presupposto che non debbano esserci sprechi, siccome il materiale biologico è costoso e le risorse sono limitate e quindi poter fare meglio con lo stesso quantitativo di materiale determina la sopravvivenza o meno di una specie che sia essa animale o vegetale. L'ottimizzazione di una specifica prestazione è una delle strategie impiegate dagli organismi. Affinché questa attitudine sia sempre più conosciuta e impiegata in ambito scientifico-tecnologico, i ricercatori del *Biomimicry Institute* 3.8 hanno sviluppato *AskNature*. Si tratta di un database gratuito e consultabile sul web in cui è possibile trovare esempi di strategie biomimetiche non ancora necessariamente impiegate, ma tuttavia interessanti da consultare durante i processi di progettazione.

Al fine di sfruttare al meglio questi insegnamenti è utile la definizione di un metodo efficace per l'imitazione del processo biomimetico. Nell'ambito architettonico la biomimetica esprime il suo potenziale in diversi modi, tra cui lo sviluppo di materiali innovativi per l'elaborazione di relazioni prestazionali con l'ambiente. L'impiego cosciente di specifici sistemi strutturali propri del mondo naturale come le reti, le cellule, le ramificazioni possono contribuire ad arricchirne l'efficienza.

L'ampio spettro di applicazioni è offerto anche dall'impiego di strumenti computazionali per l'elaborazione delle composizioni presenti in natura; è infatti possibile interpretare il modello biologico con una funzione matematica facilmente implementabile dai calcolatori.

Un aspetto interessante su cui porre attenzione è l'ispirazione dal punto di vista delle relazioni tra diversi elementi che stanno alla base della creazione di organismi sistemici. Valutare vantaggi e svantaggi di questo approccio è fondamentale per introdurre in campo edilizio la sintonia tra il contesto in cui ci si trova e le componenti materiche.

Un nuovo concetto che si è sviluppato nella seconda metà del XIX secolo, poi tramandato in quello successivo ed ancora, fino ad arrivare ai giorni nostri, è quello di *architettura organica*. Nella nostra evoluzione gli organismi di ogni specie sono passati ad essere un semplice insieme di elementi ad una somma delle loro parti e di collegamenti tra esse a

creare un sistema collaborante. Questa visione si oppone al concetto con cui si era sviluppata la maggior parte delle composizioni architettoniche fino a quel momento, ossia quello di avere come fine ultimo principalmente l'estetica; la visione organica si posiziona invece come connessione tra uomo e ambiente. Ciò ha lo scopo di non recare danni a quest'ultimo con l'impatto umano e di utilizzare materiali che siano in armonia con la natura e per provare a rendere le strutture il più autosufficienti possibile dal punto di vista energetico. Il merito della nascita dell'architettura organica è riconosciuto a Frank Lloyd Wright, architetto statunitense nato nel 1867, del quale viene riportata una delle sue realizzazioni più celebri in *Figura 13*, ovvero *casa Kaufmann*.

Con il passare degli anni, un ulteriore passo in avanti venne fatto per rendere l'architettura, oltre che biomimetica, anche sostenibile. Il concetto di *sostenibilità* può essere espresso come *la capacità di mantenere nel futuro biodiversità e produttività, utilizzando le risorse naturali ad un ritmo tale che esse*

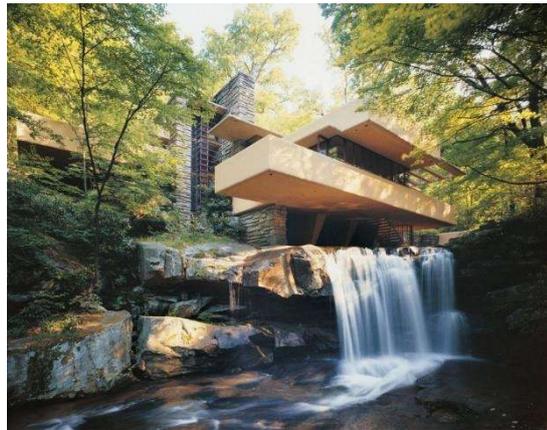


Figura 13. Esempio di architettura organica, casa Kaufmann, Pennsylvania

si possano rigenerare naturalmente. C'è da specificare che l'architettura biomimetica non è necessariamente anche sostenibile. E' possibile raggruppare in un elenco gli aspetti fondamentali di cui si dovrebbe in conto quando si parla di architettura sostenibile:

- ✓ *Aria e acqua:* dotare edifici di sistemi di riciclaggio di acqua potabile, acque reflue e aria pulita già nel momento della progettazione e non come implementazione successiva che comporterebbe solo difficoltà operativa e spreco di tempo;
- ✓ *Energia:* sfruttare sistemi energetici autosufficienti come fotovoltaico, celle solari passive, turbine eoliche, convertitori di energia termica. L'indipendenza energetica presenta, come risaputo, mostra i maggiori vantaggi sul lungo periodo piuttosto che nell'immediato ma apporta un aumento di produttività, senso di benessere e gratificazione;
- ✓ *Materiali:* prediligere l'utilizzo di materiali riciclati quando questo risulta possibile;
- ✓ *Design per la sicurezza:* al giorno d'oggi questo risulta essere un aspetto delicato. Come si è visto nel corso degli anni, nei casi in cui edifici sono stati spazzati via da

calamità naturali quello che si è cercato di fare è riprodurre la struttura in maniera più simile possibile alla precedente invece di andare alla ricerca di una realizzazione più resistente e sicura, si tratterebbe quindi di dover cambiare, oltre che le tecnologie utilizzate, la mentalità con cui vengono approcciate queste situazioni di emergenza;

- ✓ *Minimizzare la richiesta di risorse*: questo punto può andare dall'occupazione del suolo all'ottimizzazione del volume coperto a parità di materiale usato. È sicuramente di fondamentale importanza dal momento che le risorse disponibili sul nostro pianeta non sono certamente infinite;
- ✓ *Conformazione dello spazio*: adattamento dell'edificio al modo in cui l'uomo si muove nello spazio e non viceversa. Al giorno d'oggi la stragrande maggioranza degli edifici è realizzata in maniera da predisporre il movimento in maniera rettilinea quando in realtà gli esseri viventi si spostano in maniera diversa;
- ✓ *Semplificazione*: punto chiave è anche l'eliminazione di tutti quei particolari presenti nell'edificio che risultano essere superflui come i telai delle porte, le cornici delle finestre e molto altro. Al loro posto è possibile utilizzare dei materiali che svolgono funzioni simultanee e sono inoltre idrorepellenti, ignifughi, antisismici, resistenti ai parassiti. Queste accortezze inoltre comportano una riduzione del numero di sequenze di costruzione rendendo quindi il processo più fluido, meno dispendioso e ottimizzato, come ci insegna la natura;
- ✓ *Nuove tecnologie*: è necessario nel momento della progettazione di nuove strutture fare affidamento sulle innovazioni, cercando il più possibile di stare al passo con la ricerca scientifica senza rimanere legati a tecnologie obsolete e tradizionali;
- ✓ *Edificio come organismo vivente*: rendere le strutture non più statiche e passive ma bensì dinamiche e comunicanti con l'ambiente che le circonda in maniera da tale farle interagire all'occorrenza in base ai bisogni climatici;
- ✓ *Defframentazione degli spazi*: il mondo che ci circonda è per sua natura continuo per questo motivo, sempre nell'ottica di ottimizzare l'utilizzo di materie prime, sarebbe interessante iniziare a ragionare in maniera uniforme piuttosto che frammentata.

Il binomio biomimetica-sostenibilità, in campo architettonico, è fondamentale per risolvere alcuni problemi su cui è posta molta attenzione soprattutto durante gli ultimi

anni con l'incalzare della crisi climatica, come il consumo di acqua o il risparmio energetico.

Durante tutto il corso del ventesimo secolo la tendenza è stata quella di scardinare i punti che hanno segnato lo stile architettonico fino a quel momento e procedere in direzione di innovazioni a partire dalla semplice forma degli edifici. Alle solite geometrie rettilinee si opporranno infatti le linee curve che ricordano la conformazione delle cose in natura come l'intrecciarsi delle piante o dei corsi d'acqua.

Se si osserva il procedere dell'evoluzione naturale rispetto allo sviluppo progettuale dell'uomo, si vede che nel primo caso si attuano delle trasformazioni dinamiche continue per conformarsi in maniera ottimizzata all'ambiente in cui si vive sfruttando un meccanismo di adattamento retroattivo. Nel secondo caso si hanno invece strutture ingombranti e pesanti dal punto di vista dell'impatto ambientale sia a livello di energia necessaria per produzione e mantenimento che per quanto riguarda la materia prima. Il mondo che ci circonda ha la prerogativa di mettere a punto un vero e proprio *design del materiale* che mira a trovare la migliore combinazione tra leggerezza e prestazione a livello meccanico, cosa che purtroppo non si può dire riguardo all'operato dell'uomo. Fu durante lo sviluppo dell'architettura gotica verso la metà del XVI secolo, che per la prima volta si iniziò a guardare l'architettura non solo più da un punto di vista decorativo ma anche funzionale e l'architetto in questo senso iniziò a porsi come obiettivo quello di sfidare le leggi della fisica cercando di slanciare gli edifici in direzione opposta a quella della forza di gravità iniziando così ad inoltrarsi verso un dialogo tra la struttura realizzata e le tensioni che agiscono su di essa. Nei secoli successivi, grazie alle ultime ricerche scientifiche, si procede con l'introduzione di una sensibilità spaziale che è in grado di dare una forma all'irrazionalità della natura. Una figura rilevante in questo contesto fu Antoni Gaudì. L'architetto catalano, nato nel 1852, ha basato il suo intero lavoro sulla realizzazione di costruzioni che appaiano in continuo processo evolutivo, analogamente all'attitudine della natura di evolversi per ottimizzare le sue forme. Successivamente, nel corso degli anni Trenta, in ambito scientifico si è iniziato a parlare di *biotecnica*. Il termine venne proposto da Raoul Heinrich Francé per riferirsi principalmente al meccanismo di crescita delle piante[9]. Questa disciplina incominciò a farsi largo quando si iniziarono ad osservare alcune analogie tra i meccanismi presenti in natura e le invenzioni proposte dall'uomo e si realizzò che le prime si sarebbero potute usare come fonti di ispirazione siccome già sufficientemente ottimizzate dal processo evolutivo che segue la *legge di*

economia. Un'altra figura di rilievo si riconosce in Frei Otto, rappresentante più famoso del gruppo tedesco "Biologie un Bauen". Frei nacque nel 1925 e fu pioniere di diverse innovazioni nell'ambito architettonico, tra cui, come anticipato, l'invenzione e l'impiego delle tensostrutture. Da sempre fu interessato ad un approccio architettonico sostenibile che tenesse conto di diversi aspetti nel momento di sviluppo del progetto, spesso infatti collaborò con figure professionali non strettamente collocabili nel settore.

Fondamento nel gruppo era senz'altro la volontà della creazione di un modello trasversale tra architettura e scienze naturali con lo scopo di una migliore comprensione tra biologia, tecnica e architettura. Il gruppo lavorò molto nel campo delle costruzioni e strutture sollecitate dalle forze di trazione. Il gruppo ha inoltre apportato molti miglioramenti in questo settore grazie alla ricerca e allo studio del mondo naturale: l'intuizione più decisiva fu quella che tutti gli oggetti in natura siano basati su un sistema di montaggio fondato su un solo elemento costitutivo che permette di realizzare una grande varietà di architetture diverse e ciò può essere indubbiamente sfruttato anche in architettura, in cui un modulo strutturale, combinato con elementi uguali a se stessi può dare vita a forme e funzionalità molto diverse tra loro. Otto ebbe inoltre il merito di aver introdotto un cambiamento nella visione dell'architettura rispetto al metodo tradizionale basato su forme pesanti ed ingombrati per andare a sostituirle con realizzazioni leggere e aperte alla luce naturale.

Si possono infine fare riflessioni sulla forma da un punto di vista fisico e meccanico. Per quanto non sia una connessione così immediata, la forma degli organismi viene vista come un diagramma di forze e quindi può essere descritta tramite leggi fisiche. Esistono in architettura una categoria di strutture in cui il binomio forma-forza risulta essere più esplicito rispetto a tutte le altre e si tratta delle strutture tensegrali, che saranno sufficientemente approfondite in seguito. La loro composizione prevede un insieme continuo di cavi, responsabili delle forze di tensione, uniti tramite dei puntoni, ad un insieme di aste, responsabili delle forze di compressione. Le forze che entrano in gioco nella definizione della configurazione sono rappresentate con l'espressione fisica che avviene tramite gli elementi concreti che compongono la struttura. Fuller ebbe un ruolo fondamentale, se non fondante, nell'ambito delle tensegrali. Questo partì dal presupposto che tutto l'universo è formato da forze e che queste possano essere rappresentate fisicamente in qualche modo. L'universo stesso, sostiene Fuller, è una struttura che esprime le sue caratteristiche tramite la geometria che assume con il fine di raggiungere un equilibrio compressivo, che si identifica con equazioni che vanno a

definirne la stabilità statica. Di conseguenza, questo principio può essere applicato alle strutture tensegrali per studiarne la configurazione geometrica tale da garantire l'equilibrio.

Nel paragrafo successivo saranno introdotti i principi delle strutture tensegrali e alcuni cenni storici riguardanti la loro nascita e sviluppo nel settore prima artistico e poi architettonico.

2.2 Introduzione alle strutture tensegrali

"Tensegrity is the way the world organizes itself"

così Richard Buckminster Fuller descrive il fondamento su cui si basa questa nuova classe di strutture. Il termine *tensegrale* fu coniato dall'insieme delle parole *tensione* e *integrale* dallo stesso Fuller nel 1921 per identificare quei sistemi

che hanno la caratteristica di equilibrare in maniera statica le parti della struttura in compressione, elementi dissociativi, e quelle in trazione, elementi associativi e coesivi. Si tratta di strutture differenziate in cui le parti in tensione non sono più immobili e continue, come nell'architettura tradizionale, ma sono intervallate da elementi di diversa natura sottoposti ad uno stato di *pretensione*. Il primo esempio concreto di tensegrità risale al

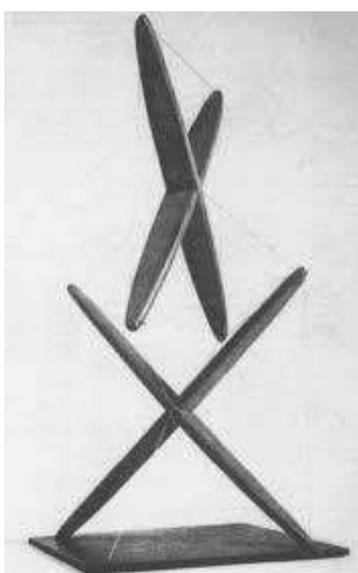


Figura 15. Complesso X, prima struttura tensegrale

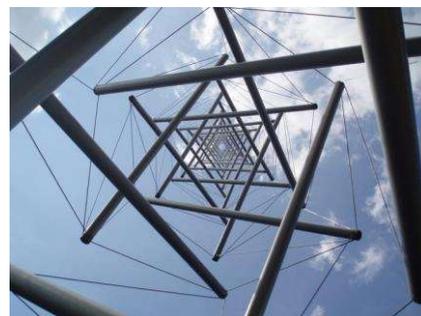


Figura 14. Interno della Needle Tower realizzata da Kenneth Snelson

1948 quando Kenneth Snelson realizzò una scultura formata da una singola unità composta da due aste posizionate a formare una X e quattordici cavi. La struttura si trova in una configurazione di equilibrio rigido senza azioni esterne e con i cavi totalmente in tensione. Snelson definì queste strutture come sistemi chiusi composti da aste di compressione immerse in una rete di cavi in tensione. A quest'ultimo venne commissionata per la prima volta nel 1964, la realizzazione di sculture tensegrali per due eventi che si sarebbero tenuti in quell'anno. L'artista si trovò per la prima volta ad avere la possibilità di realizzare qualcosa in scala maggiore rispetto a ciò che

era solito fare. Snelson decise di realizzare una torre alta circa ventuno metri che sarebbe stata percorsa da un raggio di luce molto intenso lungo il suo asse centrale. La seconda scultura era invece una traslazione del complesso X lungo circa 10 metri, che si sarebbe trovato all'ingresso del padiglione per cui fu richiesto.

Questi lavori furono molto utili per Snelson in quanto gli diedero una grande ed immediata visibilità; pochi giorni dopo l'esposizione delle opere venne infatti contattato ed intervistato dal *New York Times* e una sua fotografia apparì sulla copertina del magazine.



Figura 16. Kenneth Snelson con la sua struttura 'Soft Landing', Denver 1982

In quegli anni l'artista iniziò ad osservare le sue strutture con una valenza che non era solo più estetica ma anche strutturale e spaziale.

La prima esposizione vera e propria dell'artista avvenne nel 1966 e fu forse questo il momento in cui Snelson si rese conto che quello che stava creando rispondeva in maniera affermativa alla domanda *"Is this art?"*. La questione però risultò essere più ampia; negli anni si era sempre cercata di definire la linea di separazione tra quello che rientrava nel mondo dell'arte e quello che rientrava invece nel mondo della scienza. Gli artisti ritenevano le sculture di Snelson troppo ingegneristiche mentre gli ingegneri, al contrario, troppo estetiche. Kenneth si rese tuttavia subito conto che la forza di quello che aveva scoperto stava proprio lì, nell'intersezione tra quelle due grandi discipline, dove è chiaro che il bello e il funzionale possono e devono coesistere in maniera armoniosa e complementare. In questo scenario si inserisce bene il concetto di biomimetica, infatti nonostante Snelson trovi ispirazione prevalentemente dalla matematica e dalla fisica, osservando le sue costruzioni si possono individuare analogie con il mondo naturale. I tubi metallici che l'architetto utilizza si possono identificare con le ossa nel corpo umano che forniscono sostegno e rigidità alle rispettive strutture mentre i cavi si possono associare ai muscoli tesi. Si può vedere anche come a livello biologico vi siano dei materiali che hanno una elevatissima capacità di rispondere agli sforzi di trazione; tra questi indubbiamente vi è la tela del ragno già citata in precedenza per la sua caratteristica

tassellazione. Essa è composta da amminoacidi che grazie alla loro struttura terziaria svolgono diverse funzioni meccaniche. Nel caso specifico le strutture a foglietto-beta si comportano da membri in compressione mentre i fili amorfi che collegano i foglietti si sarebbero i membri tensione creando così una rete di materiale tensile in cui membri in compressione sono isolati[10].

Quello che si è iniziato a chiedersi è se le tensegrali, viste le loro interessanti caratteristiche strutturali, potessero essere sfruttate in ambito diverso rispetto da quello artistico magari apportando anche miglioramenti dal punto di vista tecnologico alle strutture tradizionali come la riduzione della loro massa complessiva[11].

La natura disconnessa delle strutture tensegrali introduce due altri grandi vantaggi: innanzitutto la resistenza meccanica totale supera abbondantemente la sommatoria dei singoli componenti, mantenendo tuttavia una notevole leggerezza intrinseca. In secondo luogo, la conformazione di queste strutture permette una buona capacità di adattamento a fenomeni esterni grazie alla flessibilità che fa sì che le sollecitazioni siano trasmesse all'intera struttura e non assorbite localmente. Il sistema su cui si basano queste strutture, come già precedentemente accennato, ricorda la strutturazione del corpo umano, sia a livello muscolare-scheletrico sia a livello di equilibri intratissutali e intramolecolari. A titolo di esempio si riporta quello delle cellule: queste hanno la capacità di reagire a stimoli esterni di natura meccanica come compressione e stiramento modificando la propria forma e orientamento nello spazio esattamente come un sistema tensegrale. Il responsabile di queste modifiche configurazionali è il citoscheletro che è costituito da tre tipologie di elementi integrati tra loro e ancorati in punti diversi della membrana citoplasmatica. I loro movimenti sono possibili grazie alla capacità di modificare la loro estensione e struttura, tramite polimerizzazione e depolimerizzazione. Tra i diversi tipi di filamenti che compongono la cellula riconosciamo i *microfilamenti* che hanno la proprietà di produrre e propagare forze di tensione attraverso l'intero citoscheletro cellulare, sono costituiti prevalentemente da actina, proteina globulare responsabile del legame con l'ATP.

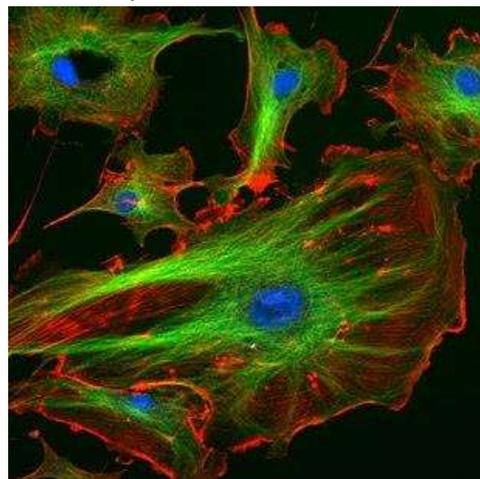


Figura 17. Citoscheletro visto con microscopio confocale con marcatori per la tubulina in verde e per l'actina in rosso

Si hanno poi i *microtubuli* che sono invece resistenti alla compressione e, come i microfilamenti, sono in grado di modificare la loro struttura. Composti da tredici protofilamenti paralleli di tubulina, con la loro azione controbilanciano la tendenza opposta dei filamenti actinici. Si hanno infine i *filamenti intermedi* che costituiscono un reticolato radiale che va dal nucleo verso l'esterno e il loro compito è fondamentalmente quello di dare stabilità alla rete di microtubuli e microfilamenti. Il modo in cui le cellule sono disposte e la loro struttura meccanica è stato appreso grazie proprio alla comprensione del meccanismo tensegrale in cui le componenti resistenti alla trazione segnano il percorso più breve fra elementi adiacenti e questi coincidono per definizione con le linee geodetiche. E' anche per questo che le strutture tensegrali offrono il massimo della resistenza a parità di materiale impiegato per la loro realizzazione e sono un esempio del principio che guida l'evoluzione del mondo naturale come si è visto nel primo paragrafo, ovvero seguendo la legge dell'ottimizzazione delle energie e delle risorse.

Le strutture tensegrali appartengono alla grande famiglia delle tensostrutture introdotte principalmente da Frei Otto. L'utilizzo in campo architettonico di quest'ultime ha preso piede verso la metà del secolo scorso e furono principalmente finalizzate alle grandi coperture realizzate con membrane e/o funi.

Analizzando ora in maniera più approfondita il concetto vero e proprio di struttura tensegrale, si può dire che essa descriva un principio di relazione strutturale nel quale la stabilità della forma della struttura è garantita dai comportamenti tensionali del sistema. Fuller definisce questo tipo di strutture come "*isole di compressione in un oceano di tensione*", tuttavia la definizione ufficialmente riconosciuta fu proposta dal Professore René Motro dell'Università di Montpellier :<< *Si dice tensegrale un sistema in uno stato di auto-equilibrio stabile comprendente una serie discontinua di componenti compressi all'interno di un continuum di componenti tesi*>> [12]. Il concetto fondamentale di stato di *auto-equilibrio stabile* si identifica con uno stato in cui la struttura deve essere presollecitata e garantire la stabilità prima che sia soggetta a qualsiasi tipo di carico esterno, tra cui anche il peso proprio. Questa dimostra di conseguenza una grande flessibilità e capacità di sopportare a grandi spostamenti e ciò fa sì che venga presa in considerazione in applicazioni dinamiche in cui sono richiesti, ad esempio, cambiamenti di configurazione. Motro fu fondamentale per lo sviluppo dei sistemi tensegrali e si occupò sia della parte teorica che di quella sperimentale.

Attualmente, le tecnologie tensegrali vengono impiegate prevalentemente quando si

necessità di parti integrate attive che consentano variazioni di forma. Queste sono spesso costituite da moduli elementari ripetuti che possono essere uniti per formare sistemi più complessi.

Un altro punto fondamentale nell'approccio alle strutture tensegrali è la questione dei materiali. Essendo questi sistemi basati sul concetto di tensione continua, è necessario che siano resistenti alle forze trazione.

Il principio che garantisce l'equilibrio delle costruzioni classiche tradizionali è la legge di gravità; la forza associata al peso proprio della struttura si traduce in componente di compressione sugli elementi verticali che trasmettono il peso della costruzione in fondazione. Nel caso delle strutture tensegrali invece, l'equilibrio è ottenuto dalla creazione di uno stato autonomo di equilibrio attraverso aste e cavi in trazione, non si necessita in questo caso della forza di gravità come stabilizzante. I principali vantaggi di questi sistemi sono:

- Maggiore leggerezza a parità di resistenza;
- Assenza di sforzi di taglio, momento flettente e torcente grazie alla natura reticolare della struttura;
- Sensibilità alle variazioni sotto carichi dinamici;
- Semplicità di assemblaggio e disassemblaggio;
- Progettati per essere uniti generando diverse configurazioni a partire da un'unità elementare.

La capacità di questi sistemi di assorbire bene sollecitazioni del tipo urti o vibrazioni li rendono anche molto interessanti per eventuali applicazioni nel campo delle costruzioni in zone fortemente sismiche. Le tensegrali, tuttavia, presentano alcuni svantaggi; i costi di manodopera sono leggermente più elevati rispetto alle strutture tradizionali ed inoltre si ha una scarsa diffusione di codici di calcolo e strumenti di progettazione adeguati.

In conclusione, con questa parte introduttiva si sono voluti evidenziare i principali tratti che contraddistinguono questa innovativa tecnologia sottolineando i vantaggi di realizzare, ad esempio, delle strutture temporanee tramite i sistemi tensegrali. Grazie alla loro facilità di trasporto, modularità e velocità di montaggio è evidente che risultino adeguati alla progettazione, ad esempio, di una struttura sanitaria da utilizzare in caso di emergenza/calamità naturale in cui si ha la necessità di avere le proprietà appena citate[12][13].

2.2.1 Reticoli tridimensionali e configurazione spaziale

Durante la seconda metà del ventesimo secolo l'attenzione per queste strutture è cresciuta in maniera esponenziale e ha portato molti studiosi ad approfondirne i principi e studiare metodi per progettazioni ottimizzate di cui vengono in seguito riportati alcuni esempi.

Il ricercatore Sergio Pellegrino ha sviluppato nel 1986 un approccio numerico per la ricerca di configurazioni pretensionabili per i telai tensegrali. Il metodo prevede la risoluzione di un problema di minimizzazione vincolato dove il numero dei vincoli dipende direttamente dal numero dei membri che compongono il reticolo. È possibile, in un certo senso, osservare le forze che agiscono in questi sistemi: in corrispondenza delle aste vediamo la componente in compressione mentre nei cavi quella in tensione. Sono inoltre molto sensibili alle vibrazioni poiché riescono a trasferire i carichi a cui sono sottoposte molto rapidamente, rendendole quindi adatte a situazioni in cui è necessario un veloce assorbimento delle vibrazioni come ad esempio in seguito ad un sisma.

Tra i criteri di classificazione che sono presenti in questa categoria di sistemi, le strutture possono essere suddivise in pretensionate e geodetiche. La differenza principale sta nel fatto che le prime si trovano in una condizione di prestabilità poiché si ha una condizione di tensione esistente in precedenza mentre le seconde sono in equilibrio grazie alla triangolazione dei suoi membri strutturali. Inizialmente, il meccanismo secondo cui questi sistemi riuscissero a sostenersi in maniera stabile non fu chiaro ed è per questo che la loro diffusione non ebbe successo immediato; il loro funzionamento, diverso dall'architettura tradizionale, richiede una profonda comprensione per poter essere efficacemente sfruttato[14].

L'oggetto di questa tesi ha come intento quello di sviluppare un progetto per realizzare una copertura che assuma le caratteristiche e la forma di una cupola tensegrale, partendo da una geometria geodetica per garantirne la stabilità, che possa essere utilizzata come telaio di una tenda per l'allestimento di un ospedale da campo.

Per comprendere meglio la meccanica strutturale alla base di questi sistemi si parte prima andando a definire alcuni concetti fondamentali per i reticoli tridimensionali.

La configurazione spaziale di reticoli bi e tridimensionali è stata teorizzata dal matematico scozzese Clerk Maxwell. Questo diede la definizione di telaio come *sistema di linee che connettono punti* e telaio rigido come *un telaio nel quale la distanza tra due punti qualsiasi non può essere alterata senza cambiare la lunghezza di una o più linee che compongono il telaio*. La legge che identifica questa definizione afferma che un reticolo formato da un

numero j di punti avrà bisogno di $3j$ linee per connetterli e $3j - 6$ aste affinché il reticolo sia rigido, escludendo i punti di ancoraggio. Un telaio rigido in senso semplice viene detto staticamente determinato; questo significa che la forza presente in ogni membro della struttura che sostiene un qualsiasi carico esterno è determinata unicamente dalle equazioni di equilibrio.

Esiste tuttavia la possibilità che la rigidità di un reticolo sia ottenuta anche non soddisfacendo la legge di Maxwell, ciò implica però che vengano rispettate altre condizioni. In questo caso la rigidità del telaio si dice essere di ordine inferiore siccome una forza anche di piccola intensità potrebbe causare uno spostamento in finito.

Analizzando dal punto di vista algebrico la relazione di Maxwell si osserva che, definendo con b il numero di elementi nel reticolo, nel caso in cui $b > 3j - 6$ è possibile che vi siano degli stati di *pretensione* mentre se $b < 3j - 6$ è possibile che vi siano dei *meccanismi*. Questi due concetti verranno definiti meglio durante la trattazione seguente.

Una generica rete di funi (o cavi) e aste formata da j nodi e b elementi può essere sottoposta alle seguenti ipotesi:

- Rigidezza flessionale dell'elemento cavo nulla. Questo viene sollecitato unicamente da forze assiali di trazione;
- Comportamento elastico lineare dell'elemento fune. Si ammette che non vi siano fenomeni di allentamento o instabilità o deformazioni plastiche viscosi;
- I punti di giunzione del reticolo, ovvero i nodi, sono schematizzati come cerniere perfette in cui si concentrano i carichi a cui è soggetto il reticolo.

$$\sum_1^i \frac{S_{ij}^0}{l_{ij}^0} \Delta x_{ij}^0 = 0 \quad (= -P_{xi}^0) \quad (1)$$

$$\sum_1^i \frac{S_{ij}^0}{l_{ij}^0} \Delta y_{ij}^0 = 0 \quad (= -P_{yi}^0) \quad (2)$$

$$\sum_1^i \frac{S_{ij}^0}{l_{ij}^0} \Delta z_{ij}^0 = 0 \quad (= -P_{zi}^0) \quad (3)$$

dove S_{ij}^0 è un vettore che indica gli sforzi nel membro che collega il nodo i al nodo j , mentre $\{P\}_i^0$ il vettore che contiene i carichi eventuali agenti nel nodo. La lunghezza dei membri viene definita nel seguente modo:

$$l_{ij}^0 = (\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2 + \Delta z_{ij}^2) \quad (4)$$

dove $\Delta x, \Delta y$ e Δz corrispondono alla differenza tra le coordinate dei nodi i e j nelle tre diverse direzioni. Questa risulta utile nel momento in cui si voglia calcolare lo spostamento del nodo dovuto al cambiamento di lunghezza di un membro soggetto ad una variazione dello sforzo assiale ΔS_{ij} infatti si può scrivere come:

$$\Delta S_{ij} = EA_{ij}\varepsilon_{ij} = EA_{ij} \frac{\Delta l_{ij}}{l_0} = EA_{ij} \left(\frac{l_{ij}^F}{l_{ij}^0} - 1 \right) \quad (5)$$

dove E ed A_{ij} sono rispettivamente il modulo elastico e l'area della sezione trasversale dell'elemento considerato.

Si vuole quindi traslare la trattazione da un singolo nodo al sistema complessivo di nodi che costituiscono la rete. Seguendo la teoria presente in letteratura riguardo ai telai rigidi e tensegrali [15] proposta dall'ingegnere britannico C. R. Calladine, si ipotizzi di avere un reticolo determinato staticamente. L'autore definisce con p il vettore contenente il valore dei carichi che agiscono nei diversi punti di giunzione e, per studiarne l'equilibrio, definisce $3j$ equazioni che mettono in relazione i carichi con la tensione assiale nei diversi membri nel seguente modo:

$$Aq = p \quad (6)$$

dove A è la matrice di equilibrio che ha dimensioni $m(= 3j) \times n(= b + 6)$ e q il vettore delle forze incognite presenti negli elementi e 6 è riferito ai possibili movimenti di corpo libero nello spazio. Nel caso più semplice in cui $m = n$ e il rango di A è uguale ad 1, la matrice A è singolare e può essere invertita per ottenere la relazione $q = A^{-1}p$; il reticolo così definito è stabile. E' chiaro che, essendo lo stato di pretensione definito come stato in cui nonostante il carico esterno nullo esiste una tensione nelle aste, se si è nella condizione di $p = 0$ e $q = 0$ allora non sarà possibile trovare uno stato di pretensione.

Viene definita inoltre la seguente relazione cinematica:

$$Cd = e \quad (7)$$

dove \mathbf{d} corrisponde a \mathbf{p} ed è definito come vettore dei piccoli spostamenti nodali mentre \mathbf{e} , rappresenta l'estensione dei membri sottoposti allo sforzo \mathbf{q} e \mathbf{C} è la matrice di compatibilità ed ha dimensione $n \times m$. Si può dimostrare infine che $\mathbf{C}^T = \mathbf{A}$.

Se adesso si considera lo stesso telaio a cui viene aggiunta una asta tra due giunti non precedentemente collegati quello che otteniamo è una matrice \mathbf{A} di dimensione $n \times n + 1$ che però ha il medesimo rango della precedente e, per il *Teorema delle Dimensioni dell'algebra lineare*, la dimensione dello spazio nullo del vettore di soluzioni \mathbf{q} è 1. Questo implica l'esistenza di una soluzione non banale per il sistema, che coincide con lo stato di pretensione. Se si aggiungono ulteriori aste si ottengono altri stati di pretensione.

Considerando invece il telaio di partenza, in questo caso rimuovendo una delle aste che lo compongono, si otterrà che il rango della matrice \mathbf{A} sarà $n - 1$ e che la dimensione dello spazio nullo di \mathbf{d} è 1. Anche in questo caso abbiamo una soluzione non banale che si identifica questa volta con un *meccanismo*; il telaio così definito risulta pertanto essere non rigido.

Essendo sistemi reticolari gli elementi strutturali coincidono con le linee di forza e la loro stabilità non dipende né dal valore della presollecitazione interna e né dalla loro massa o da carichi esterni.

I sistemi così detti tensegrali hanno la caratteristica di riportare la struttura in condizione di equilibrio se sollecitate da qualche forza esterna. E' possibile chiarire il concetto utilizzando un'analogia con un sistema pneumatico: un pallone gonfio sottoposto ad una pressione interna non nulla, quindi in condizione di pretensione, può essere manovrato senza però modificarne in maniera definitiva la sua configurazione. Le strutture tensegrali hanno la stessa caratteristica con la differenza che la *forza stabilizzante* è imputabile ad accorciamento ed allungamento rispettivamente di cavi e aste e non alla membrana che costituisce il pallone. La definizione dei valori di pretensione è quindi uno dei punti fondamentali nella progettazione della struttura. Sebbene le equazioni di equilibrio siano condizioni necessarie per la rigidità meccanica della costruzione, come anticipato, esistono delle eccezioni. Le strutture tensegrali proposte da Fuller dimostrano come sia possibile ottenere rigidità anche senza soddisfare le equazioni di Maxwell. Questa condizione rappresenta anche la possibilità di avere almeno uno stato di pretensione e ciò fa sì che le tensegrali siano categorizzate come strutture statisticamente e cinematicamente indeterminate dotate di meccanismi infinitesimi. Per *cinematicamente indeterminato* si intende un telaio in cui la posizione dei giunti non è determinata

unicamente dalla lunghezza dei membri o, in altre parole, se le equazioni della cinematica non possono essere risolte per lo spostamento ai nodi solo in termini di allungamento dei membri.

Il termine *meccanismo infinitesimo* si riferisce invece alla possibilità del telaio di cambiare forma in maniera infinitesima senza variazioni nella lunghezza dei membri. Ciò che si constata è che, in generale, l'esistenza di un meccanismo infinitesimo in un telaio che rispetta la legge di Maxwell implica la presenza di uno stato di pretensione e, nel caso in cui questo non fosse presente, il meccanismo ottenuto è detto avere rigidità zero. Lo stato di auto-equilibrio della struttura viene assicurato svolgendo le analisi statiche ai nodi. Ogni

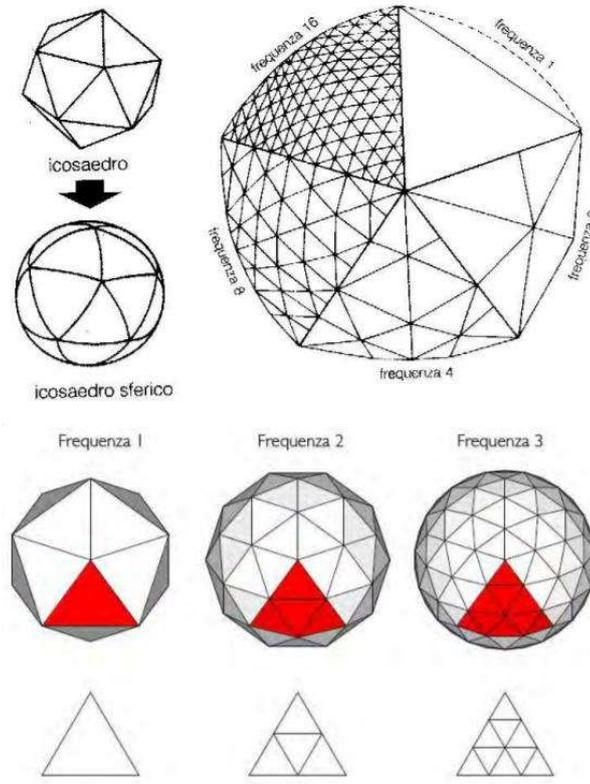


Figura 18. Triangolazione di un icosaedro con diversa frequenza

vertice, come anticipato dalle eq. (1), (2) e (3), deve infatti essere in equilibrio affinché lo sia l'intera struttura. La definizione più semplice ed immediata identifica con *tensegrale* una struttura che si trova in una configurazione in cui le sue aste e i suoi cavi sono in equilibrio.

Per progettare e studiare queste strutture, nel caso in cui non sia nota la configurazione iniziale del reticolo, si parte dal processo di *form-finding*, approfondito nel paragrafo successivo. Questo prevede la determinazione della configurazione iniziale di equilibrio stabile e può fornire la topologia del sistema, così come la lunghezza dei membri e il loro livello di pretensione.

Per quanto riguarda la configurazione iniziale, se si vuole utilizzare una geometria geodetica, il processo più utilizzato prevede l'ottenimento della rete di triangolazione da un icosaedro troncato in cui i pentagoni e gli esagoni vengono suddivisi in triangoli ed in seguito i nodi vengono proiettati su una sfera inscritta nel poliedro. Nella maggior parte

dei casi che si sono consultati in letteratura si è riscontrato che, come topologie iniziali, vengono utilizzate le triangolazioni geodetiche suggerite da Fuller. La configurazione iniziale, nel momento in cui viene definita, non è detto che possieda intrinsecamente uno stato stabile di pretensione ammissibile; questo può essere tuttavia ottenuto accorciando la lunghezza di riposo dei cavi piuttosto che aumentando quella delle aste. La configurazione di pretensione che si ottiene è bene che sia il più uniforme possibile così da poter bilanciare l'azione delle forze esterne nel momento in cui queste agiscono sui cavi con livelli di tensioni molto bassi. Durante questa fase della progettazione si è interessati in maniera particolare alla configurazione geometrica [16][11].

2.2.2 Teoria e stato dell'arte dei processi di form-finding

Nel caso della tesi si è deciso, come anticipato, di partire da una geometria geodetica per ottenere la triangolazione necessaria affinché il sistema sia stabile. In questo paragrafo si riporta per completezza la trattazione matematica di un processo di form-finding così da poter comprendere al meglio la teoria su cui si basano i sistemi tensegrali.

Nel caso cui la configurazione spaziale della struttura non sia determinata a priori, il primo step per la progettazione di un sistema tensegrale si identifica con il trovare una condizione di equilibrio in cui tutti i cavi sono in tensione quando non agiscono forze e/o momenti esterni sulla struttura. I primi tentativi per sviluppare questo processo vennero svolti in maniera analitica e risultarono però essere utilizzabili specialmente per geometrie semplici oppure fortemente simmetriche per le quali era quindi possibile ottenere molte semplificazioni della condizione di pretensione. Per le configurazioni non regolari invece fu necessario introdurre dei metodi numerici e, verso fine degli anni Novanta, vennero proposti diversi approcci grazie alle nuove potenzialità apportate dalla velocità di calcolo computazionale. Fin da subito fu evidente che da quel momento in avanti fu possibile risolvere problemi di dimensioni maggiori.

Uno dei primi metodi sviluppati fu quello noto come *rilassamento dinamico* risalente al 1965, formulato da J.R.H. Otter e A.S. Day. Questo prevedeva l'utilizzo di un metodo iterativo per trovare soluzioni ad un problema non lineare scritto in forma matriciale.

Nel corso degli anni grazie allo sviluppo tecnologico, si è passati da un approccio analogico ad uno digitale che ha permesso di accorciare i tempi di progettazione e di poter applicare modifiche in maniera rapida senza ripetere i calcoli dal principio. Tutto ciò ha fatto sì che

si ottenessero risultati sempre più precisi e ottimizzati dal punto di vista strutturale dando così maggiore visibilità a questi sistemi nel panorama architettonico-ingegneristico. In molti casi si parte da una geometria tridimensionale poliedrica che, durante il processo, è soggetta a modificazioni per ottenere la configurazione di equilibrio.

Si precisa innanzitutto il concetto di *equilibrio auto-tensionale* riportando la definizione di di M. de Guzman e D. Orden [17]:

- Un *reticolo* $G(P)$ in \mathbb{R}^d è un inglobamento di G , dove $G(V, E)$ è un grafico astratto, in una configurazione finita di punti $P := \{p_1, \dots, p_n\}$ in \mathbb{R}^d collegata unicamente da bordi rettilinei;
- Una tensione ω in un reticolo corrisponde all'assegnazione di uno scalare ω_{ij} tra i suoi bordi. Dato che ω_{ij} e ω_{ji} sono riferite al medesimo bordo questi avranno lo stesso modulo;
- ω è chiamata auto-tensione se, oltre a rispettare le proposizioni precedenti, viene soddisfatta la seguente equazione di equilibrio:

$$\forall i, \sum_{ij \text{ edge}} \omega_{ij}(p_i - p_j) = 0 \quad (8)$$

I metodi proposti fino ad ora si dividono principalmente tra quelli *cinematici* e quelli *statici*. Nei primi si parte dall'assunzione che, date due tipologie di elementi costitutivi, la lunghezza di un tipo di elementi può diminuire o aumentare in base a se si tratti rispettivamente di cavi o aste. Non è richiesta, per questi metodi, una condizione di pretensione iniziale. Il primo esempio che riportiamo in questa categoria fu proposto dal ricercatore S. Pellegrino e si tratta di porre la ricerca sotto forma di un problema di minimizzazione vincolata non lineare in cui si parte dall'assunzione che le posizioni dei vertici del poliedro, le cosiddette coordinate nodali, siano note. Si procede poi con l'allungamento di una o più aste fino a che non si è raggiunta la configurazione di equilibrio.

Rientra nei metodi cinematici anche quello del *rilassamento dinamico*, citato in precedenza; esso si basa sull'integrazione di un'equazione dinamica fittizia che mette in relazione la matrice di rigidezza della struttura, la matrice della massa, la matrice dello smorzamento associandole rispettivamente ai vettori dell'accelerazione, velocità e spostamento. Queste quantità vengono poi poste uguali al vettore delle forze esterne.

Entrambi i metodi si sono dimostrati tuttavia poco performanti nel caso in cui si abbia un

numero elevato di nodi e quindi di elementi, limitando la loro applicazione a sistemi di dimensione ridotta.

Per quanto riguarda i metodi statici, essi si basano sull'ottenimento dell'equilibrio tramite la relazione tra una data topologia e la forza presente in ogni membro. Uno dei metodi più utilizzati è quello della *densità di forza* proposto per la prima volta nel 1971 da K. Linkwitz e H. J. Schek. Gli autori pensarono di trasformare le equazioni non lineari riferite ai nodi in un sistema di equazioni lineari. Queste vengono espresse nella forma di una sommatoria che mette in relazione la densità di forza di ogni elemento, ovvero il rapporto tra la forza e la lunghezza dello stesso, con la differenza delle coordinate dei suoi estremi lungo una direzione.

Si ha ancora, tra i metodistatici, quello *energetico* sviluppato da R. Connelly in cui viene inizialmente definito un reticolo tensegrale in cui i collegamenti tra i punti del reticolo sono cavi, aste o barre. Si assume che i cavi possano unicamente accorciarsi, le aste allungarsi e le barre mantenere invece lunghezza costante. Lo stato di auto-tensione viene definito se la sommatoria delle tensioni che agiscono in un nodo moltiplicate per la differenza delle coordinate dei punti di estremo dell'elemento nel reticolo è nulla. La tensione in questo caso coincide con la densità di forza di cui si tratta nel metodo che prende il nome proprio da questa quantità. La condizione non è tuttavia sufficiente e va associata alla minimizzazione dell'energia potenziale totale per garantire la stabilità dell'intera struttura.

Dopo aver consultato lo stato dell'arte dei metodi di form-finding, il metodo della *densità di forza*, siccome il più utilizzato attualmente, è stato selezionato per una trattazione dettagliata, riportata nel paragrafo successivo [18].

2.2.2.1 Metodo della densità di forza

Questo metodo numerico è uno dei primi ad essere stato ideato e nel corso degli anni se ne sono sviluppate versioni differenti per le diverse tipologie di strutture tensegrali. Il metodo selezionato è quello proposto dai ricercatori H. Tran e J. Lee [19] in cui le informazioni necessarie iniziali sono la topologia e il tipo di membro, ad esempio se si tratta di un cavo in tensione o di un'asta in compressione. Si assume inoltre che, nella definizione della configurazione spaziale, la struttura sia inizialmente non sollecitata da alcun carico esterno e che il peso proprio della struttura venga trascurato in questa fase.

Si assumono infine nulle le forze dissipative e i nodi vengono interpretati come dei vincoli a cerniera, in cui in membri che si incontrano nel nodo possono ruotare uno rispetto all'altro.

La trattazione riportata in seguito si limita a strutture tridimensionali, il metodo risulta tuttavia essere applicabile anche del caso di figure planari, in cui la dimensione d sarà pari a 2 invece che 3.

Si inizia con la definizione della topologia della struttura, ovvero la definizione dei collegamenti spaziali dei nodi del reticolo. Si indica con n il numero di nodi liberi, con n_{anc} il numero dei nodi di ancoraggio, o in caso generico quelli fissi in cui sono vincolati tutti i gradi di libertà e con $\mathbf{C}_s (\in \mathbb{R}^{b \times (n+n_{anc})})$ la matrice di connettività. Si supponga che il generico membro k (con $k = 1, 2, \dots, b$) connetta i nodi i e j , con $i < j$; la matrice \mathbf{C}_s viene definita nel seguente modo:

$$\mathbf{C}_{s(k,p)} = \begin{cases} 1 & \text{se } p = i \\ -1 & \text{se } p = j \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (9)$$

Si ipotizzi inoltre che i nodi liberi siano indicizzati dalle prime righe della matrice di connettività mentre quelli fissi dalle ultime potendo quindi scrivere la \mathbf{C}_s come $\mathbf{C}_s = [\mathbf{C} \ \mathbf{C}_{anc}]$, in cui $\mathbf{C} (\in \mathbb{R}^{b \times n})$ e $\mathbf{C}_{anc} (\in \mathbb{R}^{b \times n_{anc}})$ rappresenta le matrici di connettività riferite rispettivamente ai nodi liberi e ai nodi ancorati. Dalla teoria è possibile ricavare le equazioni di equilibrio nel seguente modo:

$$\mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C} \mathbf{x} + \mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}_{anc} \mathbf{x}_{anc} = \mathbf{p}_x \quad (10a)$$

$$\mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C} \mathbf{x} + \mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}_{anc} \mathbf{y}_{anc} = \mathbf{p}_y \quad (10b)$$

$$\mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C} \mathbf{x} + \mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}_{anc} \mathbf{z}_{anc} = \mathbf{p}_z \quad (10c)$$

dove $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{x}_{anc}, \mathbf{y}_{anc}$ e $\mathbf{z}_{anc} (\in \mathbb{R}^n)$ sono, rispettivamente, le coordinate dei nodi liberi e dei nodi ancorati e $\mathbf{p}_x, \mathbf{p}_y$ e $\mathbf{p}_z (\in \mathbb{R}^n)$ è il vettore dei carichi esterni applicati ai nodi liberi nelle diverse direzioni, che sarà posto uguale a zero sulle basi delle ipotesi fatte inizialmente. La matrice \mathbf{Q} è una matrice diagonale definita da $\mathbf{Q} = \text{diag}(\mathbf{q})$ in cui il vettore $\mathbf{q} (\in \mathbb{R}^b)$ definisce la densità di forza agente nei diversi membri. Si parla di *densità di forza* e non di forza poiché ogni membro del vettore è definito dal rapporto tra la forza e la lunghezza dell'elemento considerato $q_i = \frac{f_i}{l_i}$. Trascurando inoltre il peso proprio della struttura, le equazioni (10) vengono riscritte nel seguente modo:

$$\mathbf{D}\mathbf{x} = -\mathbf{D}_{anc}\mathbf{x}_{anc} \quad (11a)$$

$$\mathbf{D}\mathbf{y} = -\mathbf{D}_{anc}\mathbf{y}_{anc} \quad (11b)$$

$$\mathbf{D}\mathbf{z} = -\mathbf{D}_{anc}\mathbf{z}_{anc} \quad (11c)$$

dove $\mathbf{D} = \mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}$ e $\mathbf{D}_{anc} = \mathbf{C}^T \mathbf{Q} \mathbf{C}_{anc}$ ($\in \mathbb{R}^{n \times n}$) e si identifica con la matrice contenete le densità di forza.

Si è constatato che nel caso in cui vengano trascurati i carichi esterni e il peso proprio della struttura, per la definizione della geometria iniziale, non è necessaria la presenza di vincoli poiché questa risulterà unicamente definita dalla posizione relativa dei nodi. Si ottiene quindi

$$\mathbf{D}\mathbf{x} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{D}\mathbf{y} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{D}\mathbf{z} = \mathbf{0} \quad (12a, 12b, 12c)$$

oppure in forma matriciale:

$$\mathbf{D}[\mathbf{x} \ \mathbf{y} \ \mathbf{z}] = [\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}] \quad (13)$$

In generale, la matrice \mathbf{D} è definita dalla seguente formulazione:

$$\mathbf{D}_{(i,j)} = \begin{cases} -q_k & \text{se i nodi } i \text{ e } j \text{ sono connessi dal membro } k \\ \sum_{k \in \Omega} q_k & \text{per } i = j \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (14)$$

dove Ω indica il set di membri che convergono nel nodo i . Da questa definizione si ricava che \mathbf{D} è una matrice quadrata, sempre simmetrica e con uno spazio nullo almeno di 1 dal momento che la somma di tutte le componenti di una riga o di una colonna è pari a zero. Ciò è dovuto alla presenza degli elementi in compressione, ovvero le aste, che ammettono valori della densità di forza negativi in questi membri. Le (10) possono essere anche riscritte come:

$$\mathbf{C}^T \text{diag}(q) \mathbf{C} \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (15a)$$

$$\mathbf{C}^T \text{diag}(q) \mathbf{C} \mathbf{y} = \mathbf{0} \quad (15b)$$

$$\mathbf{C}^T \text{diag}(q) \mathbf{C} \mathbf{z} = \mathbf{0} \quad (15c)$$

o in forma compatta:

$$\mathbf{A} \mathbf{q} = \mathbf{0} \quad (16)$$

dove con $A (\in \mathbb{R}^{3n \times b})$ si indica la matrice di equilibrio:

$$A = \begin{pmatrix} C^T \text{diag}(Cx) \\ C^T \text{diag}(Cy) \\ C^T \text{diag}(Cz) \end{pmatrix} \quad (17)$$

Le equazioni (13) e (16) sono dei sistemi lineari omogenei che mettono in relazione rispettivamente le seguenti grandezze: la densità di forza con le coordinate nodali e la proiezione delle lunghezze dei membri con la densità di forza agente in essi. Le soluzioni del primo sistema si trovano nello spazio nullo della matrice D che ha dimensioni:

$$n_D = n - r_D \quad (18)$$

con r_D rango della matrice D . Affinché l'equazione (13) abbia almeno d (nel caso specifico $d = 3$ poiché siamo nello spazio) soluzioni particolari, diverse quindi dalla soluzione banale che coincide con il vettore identità $\bar{I}_1 = \{\mathbf{1}, \mathbf{1} \dots, \mathbf{1}\}^T (\in \mathbb{R}^{n \times 1})$ dovuto ad una geometria degenera della struttura, la dimensione minima dello spazio nullo di D deve essere:

$$n_D \geq d + 1 \quad (19)$$

In maniera analoga, le soluzioni del sistema omogeneo (16) si trovano nello spazio nullo della matrice A che ha dimensioni $n_A = b - r_A$ con r_A rango della matrice A . La seconda condizione che assicura l'esistenza di almeno uno stato di autotensione s è espressa dalla seguente disuguaglianza:

$$s = n_A \geq 1 \quad (20)$$

Dalla teoria delle strutture reticolari si ricava che il numero dei meccanismi infinitesimi è dato da $m = dn - r_A$. Quest'ultima condizione sulla deficienza di rango assicura che l'equazione (16) abbia almeno una soluzione particolare.

Il processo di form-finding, una volta nota la topologia dei membri e il tipo di sforzo a cui sono sottoposti, può cominciare; si inizia andando a definire il vettore iniziale delle densità di forza nel seguente modo:

$$q^0 = \{+1 + 1 \dots + 1 - 1 - 1 \dots - 1\}^T \quad (21)$$

nel quale vengono assegnati dei valori unitari alla tensione con segno positivo nel caso si tratti di membro in trazione e segno negativo nel caso di membro in compressione e con q^0 viene calcolata la matrice D .

Le coordinate dei nodi $[x \ y \ z]$ vengono selezionate in seguito alla decomposizione agli autovalori di quest'ultima. Tale processo consiste in una fattorizzazione della matrice della densità di forza da cui si ottengono seguenti prodotti:

$$\mathbf{D} = \Phi \Lambda \Phi^T \quad (22)$$

dove Φ è la matrice ortonormale che ha per colonne le basi degli autovettori ϕ_i ($\in \mathbb{R}^n$) della \mathbf{D} mentre Λ ($\in \mathbb{R}^{n \times n}$) è la matrice contenente gli autovalori posizionati in ordine crescente lungo la diagonale. L'autovettore di ϕ_i di Φ corrisponde all'autovalore λ_i di Λ . Viene in seguito calcolato il rango della matrice così da poter valutare se venga soddisfatta o meno la condizione (19), che corrisponde al numero di autovalori di \mathbf{D} che hanno modulo uguale a zero.

Indicando con $n_D^* = d + 1$ e $n_A^* = 1$, si definisce ora con f il numero degli autovalori minori o uguali a zero:

- se $f \leq n_D^*$ i primi n_D^* vettori ortonormali vengono direttamente selezionati come potenziali coordinate nodali:

$$[x \ y \ z] \in \bar{\Phi} = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_{n_D^*}] \quad (23)$$

Con i nuovi valori delle coordinate nodali viene aggiornato il vettore delle densità di forza \mathbf{q} . I suoi valori sono calcolati come i più piccoli valori possibili che possono essere scelti affinché i primi n_D^* autovettori di \mathbf{D} diventino nulli. E' possibile quindi calcolare le lunghezze di tutti i membri b lungo le direzioni definite dai n_D^* vettori nel seguente modo:

$$\mathbf{L} = C\bar{\Phi} = [(C\phi_1)(C\phi_2) \dots (C\phi_{n_D^*})] \quad (24)$$

Questo step risulta necessario al fine di rimuovere uno dei n_D^* autovettori così da ottenere coordinate nodali riferite ad uno spazio tridimensionale. Il vettore ϕ_i (con $i = 1, 2, \dots, n_D^*$) viene rimosso in due casi: a) se $C\phi_i = 0$ significa che c'è una dipendenza lineare tra il vettore ϕ_i e il vettore identità $\bar{\mathbf{I}}_1$ b) se $\det[\mathbf{L}_d(\mathbf{L}_d)^T] = 0$. Il termine \mathbf{L}_d ($\in \mathbb{R}^b$) è definito come:

$$L_d = \sqrt{(C\phi_1)^2 + (C\phi_j)^2 + (C\phi_k)^2} \quad (25)$$

ed è un vettore che contiene le lunghezze di tutti i membri calcolate per ogni combinazione dei primi quattro autovettori della matrice \mathbf{D} . Questa seconda condizione implicherebbe che almeno uno dei b membri della struttura avesse una lunghezza zero il

che significa che quella determinata combinazione di coordinate deve essere rimossa. Nel caso in cui né a) né b) siano soddisfatte, allora vengono selezionati come coordinate nodali i primi tre autovettori di $\bar{\Phi}$.

- se $f > n_D^*$ è possibile forzare la deficienza di rango, ciò nonostante D potrebbe non essere semi definita positiva e risulta quindi necessario fare considerazioni riguardanti la matrice della rigidità tangenziale, definita nel seguente modo:

$$\mathbf{K}_T = \mathbf{K}_E + \mathbf{K}_G \quad (26)$$

in cui si hanno $\mathbf{K}_E = A \text{diag}\left(\frac{EA}{L}\right) A^T$ e $\mathbf{K}_G = \mathbf{I}_3 \otimes \mathbf{D}$, rispettivamente chiamate matrice della rigidità lineare e matrice della rigidità geometrica indotta dallo stato di autotensione, $\mathbf{I}_3 (\in \mathbb{R}^{3 \times 3})$ matrice identità e \otimes il prodotto vettoriale. Se \mathbf{K}_T è definita positiva la struttura è stabile e i movimenti di corpo rigido sono tutti vincolati; questa condizione può essere valutata nei seguenti modi: a) $\mathbf{d}^T(\mathbf{K}_T)\mathbf{d} > \mathbf{0}$ o b) $\text{eig}(\mathbf{K}_T) = [\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{dn-r} > 0 \quad \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_r = 0]$. Il valore di r corrisponde al numero di movimenti di corpo rigido che, nel caso di una struttura definita nello spazio è pari a $r = d(d + 1)/2 = 6$ [20].

Il processo viene iterato al fine di trovare una soluzione che approssimi il più possibile la (13), che può essere riscritta come:

$$\mathbf{D}[x \ y \ z] \approx [\mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}] \quad (27)$$

dopo aver selezionato il nuovo set di coordinate nodali si procede con la computazione della matrice di equilibrio \mathbf{A} tramite la (17) .

Per risolvere il secondo sistema lineare omogeneo si procede con la decomposizione a valore singolo della matrice \mathbf{A} :

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{V}\mathbf{W}^T \quad (28)$$

dove $\mathbf{U} (\in \mathbb{R}^{dn \times dn}) = [\mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2 \ \dots \ \mathbf{u}_{dn}]$ e $\mathbf{W} (\in \mathbb{R}^{3 \times 3}) = [\mathbf{w}_1 \ \mathbf{w}_2 \ \dots \ \mathbf{w}_b]$ sono matrici ortogonali mentre $\mathbf{V} (\in \mathbb{R}^{dn \times b})$ è una matrice diagonale che contiene dei valori singoli non negativi:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_b \geq 0 \quad (29)$$

Si ricorda che il processo di form-finding risulta efficace solo nel caso in cui sia la (19) che

la (20) vengano soddisfatte ed il valore di s , dovrebbe essere $s = n_A^* \geq 1$. Ciò non è sempre verificato ed è possibile trovarsi nelle seguenti condizioni:

- $s = 0$; in questo caso lo spazio nullo di A non esiste. Ciò significa che σ_b non è uguale a zero e di conseguenza non esiste un vettore q non nullo che soddisfi la (16). A questo punto si seleziona l'ultima colonna della matrice W indicata con w_b e la si usa per approssimare il vettore densità di forza. E' possibile che il segno di quest'ultimo non corrisponda con il segno di q^0 e nel caso ciò accada si procede andando a selezionare la penultima colonna di W per valutare se in questo caso si ha meno corrispondenza di segno. La procedura viene iterata fino a che non si trova un vettore w_j (con $j = b, b - 1, \dots, 1$) concorde con il segno di q^0 . Il vettore w_j viene quindi selezionato come valore approssimato di q e il secondo sistema omogeneo può essere riscritto come:

$$Aq \approx 0 \quad (30)$$

- $s = 1$; dall'algebra lineare applicata ai sistemi tensegrali è noto che le basi dello spazio vettoriale delle densità di forza e dei meccanismi di questa tipologia di strutture si trovano nello spazio nullo della matrice di equilibrio. E' possibile riscrivere quindi le matrici U e W nel seguente modo:

$$U = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{r_A} | m_1 \ \dots \ m_{dn-r_A}] \quad (31)$$

$$W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_{b-1} | q_1] \quad (32)$$

i vettori indicati dalla lettera m ($\in \mathbb{R}^{dn}$) indicano gli m ($= dn - r_A$) meccanismi infinitesimi ed il vettore q_1 ($\in \mathbb{R}^b$), il quale segno corrisponde al segno di q^0 , corrisponde al singolo stato di autotensione che soddisfa l'equazione (30).

In conclusione, si può dire che il processo di form-finding sia principalmente basato sulle decomposizioni della matrice di equilibrio e di quella della densità di forza, che sono eseguite in maniera iterativa fino a che non venga trovato un set di coordinate nodali $[x \ y \ z]$ ed un vettore q che soddisfino le condizioni (19) e (20).

In generale, per valutare l'accuratezza del processo, viene definito un vettore delle forze sbilanciate $\varepsilon_f = Aq$ ($\in \mathbb{R}^{dn}$). La norma euclidea di ε_f viene usata per definire l'errore di design:

$$\epsilon = \sqrt{(\epsilon_f(\epsilon_f))^T} \quad (33)$$

quando il valore assunto da questo parametro scende sotto una soglia prestabilita allora il processo viene fermato[21][22].

2.2.3 La cupola tensegrale

Tra le diverse strutture basate sul principio di 'tensione continua-compressione discontinua', le cupole sono state tra le tipologie più studiate data la facilità di ottenere la loro geometria da una sfera o da un poliedro sferico. Per assicurare una maggiore stabilità è preferibile triangolare la struttura, tuttavia alcune cupole sono ottenute da poliedri troncati e in questi casi le aste formano poligoni diversi da triangoli. Questa situazione viene risolta generalmente aggiungendo dei cavi così da connettere altri apici della cupola. Utilizzare il principio tensegrale per la realizzazione di queste strutture da automaticamente loro la caratteristica di resilienza e allo stesso tempo si ha un forte abbattimento dei costi di produzione e di materiale necessario per la realizzazione. Il primo ad aver proposto questo tipo di configurazione fu nuovamente Fuller nel 1964 che però non riuscì a sviluppare i suoi progetti in ambito ingegneristico-architettonico. Per fare ciò intervennero David Geiger ed i suoi collaboratori che, utilizzando e adattando le idee di Fuller ai loro scopi, svilupparono una nuova configurazione strutturale chiamata *cable dome* [23]. Questa fu utilizzata per realizzare la copertura dell'arena di Seoul in occasione dei giochi olimpici del 1986 (*Figura 19*). La struttura, oltre ad essere ottimizzata dal punto di vista dei costi e della leggerezza intrinseca alla sua natura, è stata studiata per essere eretta in maniera molto semplice e veloce; si procede mettendo in tensione i cavi situati sulla diagonale e posizionando i cerchi in compressione nella loro posizione finale partendo dalla periferia fino al centro della struttura.

Durante gli anni successivi queste strutture incominciarono ad attirare sempre più l'attenzione di ingegneri e architetti.

Lo step fondamentale durante la progettazione delle cupole tensegrali, così come negli altri sistemi di questo tipo che si sono presentati, è determinare l'equilibrio geometrico iniziale. Si parte, anche in questo caso, da una configurazione iniziale in cui le coordinate vengono assunte con una distribuzione ideale di forze di pretensione che vengono poi modificate step by step affinché la struttura sia bilanciata[24][25].



Figura 19. Cable Dome costruita per la copertura dell'arena di Seoul

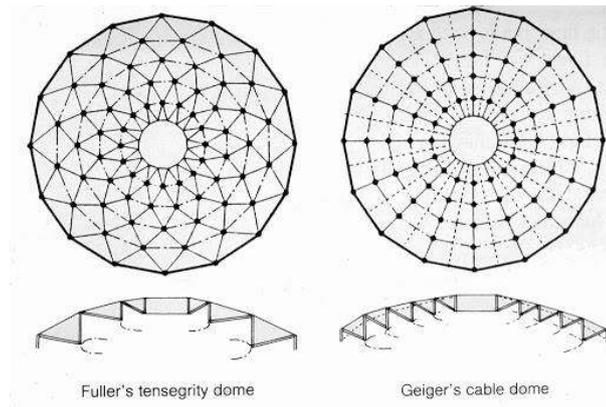


Figura 20. Proiezione frontale e laterale delle geometrie proposte da Fuller e Geiger per le cupole tensegrali

CAPITOTLO 3

IPOTESI DI PROGETTO: L'OSPEDALE TENSEGRALE

3.1 Introduzione al progetto

Con la seguente tesi si vuole proporre una soluzione alternativa alle odierne tipologie di presidi mobili attualmente impiegati in situazioni di maxi-emergenze e catastrofi al fine di fornire soccorso. Il progetto, guidato da un'ispirazione biomimetica, si basa sulla volontà di dimostrare le potenzialità e i vantaggi delle strutture tensegrali in questo campo di applicazione. Logistica e repentinità dell'intervento sono aspetti fondamentali da considerare per ottenere risultati efficaci e limitare il numero di danni in fasi di emergenza. Avere la possibilità di scegliere tra soluzioni che garantiscano queste caratteristiche è importante anche considerando l'incremento dell'incidenza delle calamità naturali negli ultimi anni, rendendo lo scenario emergenziale una problematica piuttosto attuale.

Le strutture tensegrali oltre agli svariati vantaggi prima menzionati, presentano una particolare rilevanza dal punto di vista estetico; questo aspetto, apparentemente superficiale, rappresenta invece una delle componenti che influenza il benessere psicologico delle persone coinvolte nell'emergenza e questo risulterebbe essere un ulteriore motivo di sollievo per le vittime.

Unitamente alla volontà di riportare un esempio di strutture che con la loro caratteristica leggerezza e semplicità ben si mimetizzano nel contesto ambientale, si vuole fornire anche un'alternativa al mondo della medicina di emergenza.

Si è pensato inoltre di funzionalizzare la parte interna della membrana che costituirà la struttura con un trattamento antibatterico che consiste nella deposizione di uno strato di molecole che aderiranno al substrato, con un meccanismo ispirato a quello di adesione delle cozze, a cui è dedicato il capitolo successivo. Ancora una volta, non si può che imparare dalla natura tutto quello che ogni giorno mette davanti ai nostri occhi, per poterlo così applicare nella quotidianità nel modo migliore possibile come il provvedere alla salvaguardia e alla cura della specie umana affinché questo serva da lezione per capire quanto sia prezioso tutto quello che ci circonda e imparare infine a prenderci più cura anche di questo invece che unicamente di noi stessi e della nostra esistenza. Tutto ciò può servire per capire quindi che la nostra sopravvivenza ed il nostro benessere sono dettati da qualcosa di più grande di cui non siamo responsabili e che spesso fornisce soluzioni per

poter assicurare l'evoluzione della specie laddove l'uomo incontra difficoltà. Le superfici antibatteriche sono di rilevante importanza dal momento che con il passare degli anni, le sempre più frequenti terapie antimicrobiche precauzionali, come quelle ad esempio usate negli allevamenti intensivi, hanno portato ad una forte riduzione dell'efficacia delle cure antibiotiche aumentando così il rischio di morti causate da infezioni batteriche, patologie molto comuni in ambito ospedaliero. La funzionalizzazione biomimetica della membrana costituente la struttura si inserisce, per questo motivo, adeguatamente nel contesto per cui è stata ideata l'idea di questa tesi.

3.2 Strutture ospedaliere campali

Le strutture sanitarie campali sono per definizione strutture provvisorie per il soccorso e l'assistenza sanitaria, dotate di autonomia logistica e complete di personale sanitario e tecnico di supporto. Il loro scopo è quello di fare da filtro alle strutture ospedaliere durante i soccorsi, sostituire la struttura stessa nel caso in cui questa fosse danneggiata durante una maxi-emergenza o catastrofe o ancora prestare assistenza dove altrimenti non sarebbe possibile. Questo tipo di eventi colpisce infatti le comunità andando a sovvertire il normale ordine delle cose e gli interventi dal punto di vista sanitario devono essere finalizzati alla costituzione di una "catena di soccorsi" in modo tale da consentire la gestione della catastrofe nel miglior modo possibile. È chiaro che, nell'ottica di una maggiore efficienza e interventi mirati, sono necessari dei piani di emergenza che forniscano indicazioni riguardo a risorse umane e materiali.

In situazioni emergenziali si agisce generalmente allestendo il Posto Medico Avanzato (PMA): si tratta di una struttura di selezione e trattamento sanitario delle vittime generalmente situata ai margini esterni dell'area di sicurezza o in una zona centrale rispetto al fronte dell'evento. La catena sanitaria dei soccorsi deve avere le seguenti caratteristiche:

- essere il più vicino possibile al luogo dell'evento;
- trovarsi in una zona non soggetta a pericoli ambientali o secondari all'evento;
- facilmente accessibile ai mezzi di soccorso sia terrestri che aerei.

In caso in cui fossero disponibili edifici preesistenti è possibile disporre il PMA al loro interno, altrimenti è necessario ricorrere all'allestimento di strutture temporanee mobili.

Quando avviene una catastrofe/emergenza, è auspicabile che ogni regione sia dotata di una o più strutture mobili che possano essere adibite a PMA; esistono due livelli di questo modulo sanitario e la loro classificazione dipende dai parametri coinvolti nell'evento catastrofico. I PMA di primo livello sono strutture di rapidissimo impiego che vengono allestite entro massimo un'ora dalla catastrofe e sono organizzate per poter trattare circa una decina di feriti in codice di gravità giallo-rosso. In questo caso le strutture di soccorso tradizionali sono integre e il PMA ha infatti unicamente il compito di effettuare le operazioni di soccorso per le prime 12 ore successive alla catastrofe. Questo tipo di modulo sanitario non prevede necessariamente una vera e propria struttura ma potrebbe semplicemente essere un'area adibita a trattamento sanitario e selezione delle vittime. I PMA di secondo livello sono veri e propri accampamenti realizzati, in caso di necessità, nel minor tempo possibile dall'allarme (3-4 ore), possono trattare fino a cinquanta pazienti con codice giallo-rosso durante 24 ore per tre giorni e hanno un'autonomia operativa di 72 ore. Rispetto al PMA di primo livello questo deve assicurare interventi salvavita ad un numero maggiore di persone per un tempo prolungato siccome le strutture sanitarie esistenti potrebbero essere state danneggiate o potrebbero non esserci posti letto necessari a coprire il bisogno in situazioni di emergenza. La corretta logistica di queste strutture è fondamentale per realizzare una gestione il più possibile efficace ed organizzata; è quindi necessario tenere in considerazione diversi aspetti durante la loro progettazione come la facilità del trasporto, modularità ecc. Tra le caratteristiche principali che devono avere i PMA ci sono la modularità, la rapidità di assemblamento/disassemblamento, l'adattabilità a diverse condizioni, flessibilità a possibili cambiamenti. Tutte queste possono essere riscontrate nelle strutture tensegrali e se ai loro vantaggi uniamo anche la leggerezza e conseguente riduzione del costo e dell'ingombro dovuto al trasporto si può vedere come queste potrebbero trovare un'efficace applicazione in questo campo e fornire quindi una valida alternativa alle attuali tecnologie utilizzate nella realizzazione di strutture temporanee.

Gli effetti di un evento catastrofico potrebbero richiedere un intervento ulteriore rispetto al semplice allestimento del PMA; in questi casi si procede generalmente con la disposizione di veri e propri *ospedali da campo* utilizzando risorse anche provenienti da ambiti esterni rispetto a quello locale. Di seguito viene riportato un breve riepilogo sullo stato dell'arte delle tipologie di presidi ospedalieri mobili attualmente in commercio.

Da sempre la soluzione maggiormente adottata è la *tenda* (Figura 21): questa presenta

buone qualità in una serie di condizioni climatiche e ambientali abbastanza ampia. Vi sono poi gli *shelter* (Figura 22) che sono strutture rigide e modulari, essendo inoltre molto robuste presentano prestazioni migliori in condizioni ambientali avverse. Si sono inoltre create soluzioni *miste tende-shelter* che cercano di ovviare ai punti di debolezza delle due soluzioni.



Figura 21. Allestimento di un PMA utilizzando tende da campo



Figura 22. Esempio di uno shelter per l'allestimento di ospedali da campo

Esistono alcune linee guida che devono essere rispettate nel momento in cui vengano allestiti questi presidi mobili per ospedali da campo. Si riportano in seguito in via schematica le principali funzionalità richieste.

- *Mobilità*: fondamentale in quanto costituisce la possibilità di rispondere in maniera repentina all'emergenza; i mezzi di trasporto con cui la struttura viene trasportata generalmente sono automobili, treni, camion, elicotteri, barche, aeroplani e trasporto manuale. Il trasporto può avvenire stoccando il carico in pallet, in container oppure direttamente senza imballaggio;
- *Dimensioni di trasporto*: si riferiscono all'ingombro della struttura nella sua configurazione meno voluminosa. Queste hanno una grande influenza sul mezzo di trasporto e conseguentemente sulla velocità di risposta e sui costi;
- *Dimensioni d'uso*: ingombro finale della struttura;
- *Rapporto di impronta a terra*: rapporto tra area occupata durante il trasporto e area coperta durante l'uso attivo della struttura;
- *Peso netto*: peso effettivo della struttura senza valutare l'equipaggiamento, influenza anch'esso il mezzo di trasporto e quindi velocità di risposta e costi;
- *Tempo di schieramento*: tempo impiegato per l'allestimento del presidio. È necessario che questo sia il minimo possibile in quanto si ricorda che si tratta di strutture che vengono usate in situazioni di emergenza;

- *Numero di addetti allo schieramento*: quantità necessaria di persone per rendere operativa la struttura;
- *Modularità*: fattore importante in quanto indica la capacità della struttura di essere connessa con parti singole per creare un complesso di dimensione e forma adattabile alle esigenze;
- *Adattabilità*: questo parametro si rifà alla capacità della struttura di avere risposte simili in condizioni climatiche diverse, terreni diversi ecc. E' chiaro che una struttura risulterà essere migliore di un'altra se sarà più versatile e in grado di non compromettere il servizio sanitario in base al luogo in cui si trova;
- *Sicurezza*: si riferisce alla capacità di fornire protezione a pazienti e personale ed è quindi riconducibile alla robustezza dei materiali con cui è realizzato il presidio e di quanto questo si deteriori nel tempo;
- *Numero di pazienti*: questo valore è una stima di quanti pazienti può potenzialmente contenere il presidio considerando che per ognuno di essi deve avere un'area destinata di 3,5 metri quadrati;
- *Ciclo di vita*: comprende il sia il tempo per cui la struttura viene allestita, sia il numero di volte che questa può essere trasportata e riutilizzata.

Si è dimostrato inoltre che l'utilizzo della tenda abbia ottime caratteristiche di leggerezza, trasportabilità, rapidità di montaggio e destinazione d'uso. A differenza dei containers, tuttavia, queste non presentano molta durabilità sul lungo periodo, non hanno la capacità di adattarsi a condizioni climatiche difficili e non sono adatte a proteggere la strumentazione medica ed è a tal proposito che sono state

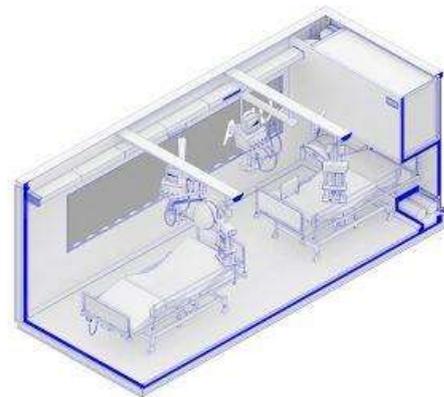


Figura 23. Modello computerizzato di una soluzione prefabbricata per ospedali da campo

appunto sviluppate soluzioni alternative all'utilizzo delle tende. I *containers*, ad esempio, sono trasportabili su terra, mare e aria e ha un ingombro durante il trasporto maggiore rispetto alle tende nonostante i tentativi di rendere la struttura il più possibile richiudibile. Un'ulteriore soluzione per i presidi campali è stata trovata nell'utilizzo di una struttura ibrida in cui i vantaggi delle due tecnologie collaborano tra loro. I due sistemi risultano ancora autonomi ma sono dotati di un collegamento che mette in comunicazione gli spazi

adibiti alle funzioni mediche, ovvero i containers, con quelli di supporto, le tende. Per completare lo stato dell'arte delle strutture sanitarie campali si citano ancora le soluzioni modulari prefabbricate; questo tipo di strutture sono le uniche in grado di assicurare un'ottima qualità combinata ad un impiego pressoché immediato oltre ad avere una riduzione del costo di produzione. La semplicità di utilizzo e montaggio, ogni componente può infatti essere movimentato a mano, la rendono un'alternativa piuttosto competitiva rispetto agli altri presidi. Questa, tuttavia, risulta essere poco compattabile durante il trasposto.

Nel momento del progetto di una nuova struttura sanitaria da campo, la repentinità dell'intervento è sicuramente il fattore sul quale va posta la maggiore rilevanza in quanto queste vengano impiegate sempre in situazioni di emergenza. Sono infatti fissati dal regolamento europeo 2010/481/UE alcuni requisiti temporali:

- Disponibilità del presidio a partire al massimo da 7 giorni dopo la richiesta
- Operatività entro 12 ore dopo l'arrivo sul posto
- Permanenza in autonomia per almeno 15 giorni

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione durante la progettazione è la necessità di avere una struttura architettonica più semplice e regolare possibile in modo da non rallentare le operazioni mediche e di soccorso ed è inoltre consigliato non avere discontinuità interne nella parete superiore della struttura.

Per il dimensionamento delle strutture è necessario analizzare anche il tipo di materiale medico che deve essere manovrato in quegli spazi, infatti la strumentazione ha il proprio ingombro e deve inoltre poter essere movimentata in qualsiasi momento in caso di necessità. Si ricorre inoltre spesso al collegamento di più moduli singoli al fine di ottenere una dimensione maggiore in base alle necessità. La natura compositiva delle strutture campali non è tuttavia precisamente definita. Consultando anche la letteratura non si sono trovate molte informazioni soprattutto per quanto riguarda le soluzioni che coinvolgono i container e le tende. Le conformazioni che si realizzano non hanno una vera e propria logistica determinata a priori e ciò crea spesso dei deficit nel fornire l'assistenza necessaria. La linea guida che generalmente viene adottata è quella di seguire lo schema logico legato al soccorso fornendo il trattamento sanitario necessario alle persone coinvolte. E' bene che la struttura sia modulare in quanto potrebbe essere necessario un adattamento della conformazione della stessa ad eventuali cambiamenti nella gestione

del soccorso. Si ricorda infine che bisogna fare ancora riferimento ad un aspetto che generalmente viene trascurato, ovvero l'aspetto estetico della struttura. Si deve tenere conto dell'impatto psicologico che le grandi catastrofi/emergenze hanno sulle persone che ne sono state coinvolte; per questo motivo non va trascurata la parte di progettazione di queste strutture affinché esse siano il più accoglienti e confortevoli possibile.

3.3 Ipotesi di progetto

L'idea inizialmente prevedeva lo studio di una struttura pneumatica piuttosto che il sistema tensegrale. Come detto in precedenza, entrambe le tipologie appartengono alla famiglia delle tensostrutture ma presentano differenze prevalentemente dal punto di vista dei materiali utilizzati e dei principi meccanici su cui si fondano.

Si è pensato di studiare una tenda a pianta circolare per coprire la maggiore superficie possibile a parità di materiale utilizzato. Questa inizialmente voleva essere realizzata tramite dei cuscini pneumatici di forma triangolare che poi assemblati tra loro potessero creare la copertura formando una geometria geodetica. Questa così pensata sarebbe stata composta da unità semplici che unite formavano una struttura complessa. La modularità avrebbe conferito alla struttura il vantaggio che nel caso di danneggiamento di una delle componenti sarebbe stato sufficiente sostituire unicamente quella interessata dal difetto. La leggerezza caratteristica dei sistemi pneumatici era inoltre un ulteriore aspetto positivo, tuttavia la necessità di piegamento e dispiegamento frequente ha rappresentato un limite importante nella progettazione della struttura. L'unico materiale che risultava avere caratteristiche che si prestassero bene a questa necessità è il politetrafluoroetilene espanso (ePTFE). Si sono quindi contattate alcune delle maggiori aziende che lavorano con questo materiale per chiedere consigli sulla potenziale realizzabilità del progetto proposto.

L'ePTFE è attualmente il più performante tra i prodotti tessili presenti sul mercato, il polimero è infatti non combustibile, chimicamente inerte ed eccezionalmente resistente allo sporco, all'abrasione ed alla rottura. Esso possiede inoltre ottime proprietà di trasparenza, tanto da arrivare anche al 40%, a seconda dello spessore con cui viene impiegato. A differenza del PTFE con fibra di vetro e del vetro/silicone, la sua "morbidezza" e la resistenza al piegamento lo renderebbero idoneo all'impiego in strutture temporanee e trasformabili.

Le aziende che usano questo materiale per la realizzazione di tensostrutture hanno sfortunatamente comunicato che dato il costo elevato e la conseguente poca richiesta sul mercato, da qualche anno non è più in produzione.

Avendo poi contattato altri produttori per valutare se fosse possibile utilizzare un altro polimero per l'applicazione desiderata, si è constatato che la realizzazione di una struttura unicamente pneumatica, quindi senza la necessità di un telaio, non era possibile, siccome il peso specifico dei materiali in commercio, come il PVC, non permetteva di ottenere questo risultato. Vi sono inoltre materiali che nonostante un peso specifico molto basso, e quindi potenzialmente adatti sotto quel punto di vista, non si prestavano all'applicazione pneumatica a causa della loro reticolazione.

Si sono quindi iniziate a valutare altre soluzioni che tuttavia non trascurassero la volontà di realizzare una struttura il più leggera e semplice possibile senza trascurare stabilità e rigidità. Ricercando queste caratteristiche si è finiti quindi, sempre tra le tensostrutture, a selezionare i sistemi tensegrali come i migliori candidati per l'ipotesi di questo progetto. Si è pensato di realizzare il telaio, sempre a forma di cupola, utilizzando il principio tensegrale in maniera da ridurre il più possibile il peso della struttura. Questo sarà poi internamente dotato un telo con funzione di rivestimento e protezione dall'ambiente esterno, le quali caratteristiche sono state selezionate facendo riferimento alle attuali coperture utilizzate per gli allestimenti campali.

3.4 Dimensionamento preliminare della struttura

Si vuole, in questo paragrafo, procedere con la progettazione effettiva della struttura. Per quanto riguarda lo studio della geometria, il calcolo dei carichi applicati alla struttura e le verifiche strutturali della configurazione creata si è sviluppato un codice in MATLAB R2021b riportato in allegato e descritto in dettaglio nei

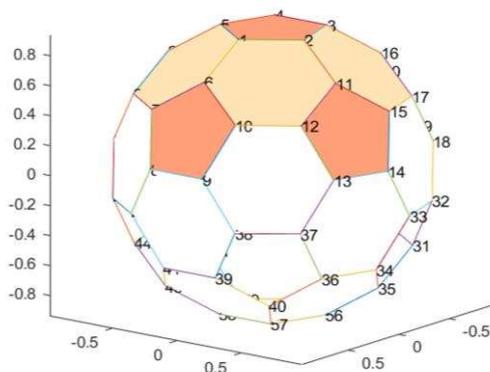


Figura 24. Geometria ottenuta con la funzione *bucky* con poligoni colorati che rappresentano il guscio sferico selezionato per il progetto.

sottoparagrafi successivi. Saranno in seguito definite le caratteristiche geometriche e meccaniche degli elementi strutturali.

3.4.1 Sviluppo codice MATLAB

Il programma realizzato è stato suddiviso in cinque sezioni principali che vengono approfondite singolarmente qui di seguito.

1) Definizione geometria

Nella prima sezione viene creata la geometria desiderata tramite l'utilizzo della funzione *bucky* presente in MATLAB. Questa consente di ottenere le coordinate dei vertici dei poligoni che vengono generati sulla superficie di una sfera, secondo una geometria geodetica, ed una matrice di tipo *sparse* in cui gli unici valori diversi da zero corrispondono agli indici dei punti che identificano gli estremi dei lati di ogni poligono. Si seleziona manualmente solo una porzione della geometria così da ottenere un guscio sferico; l'area selezionata è riportata in *Figura 24* dai poligoni colorati. I lati di quest'ultimi verranno poi presi in considerazione come membri costituenti il telaio della struttura, come mostrato in *Figura 25*.

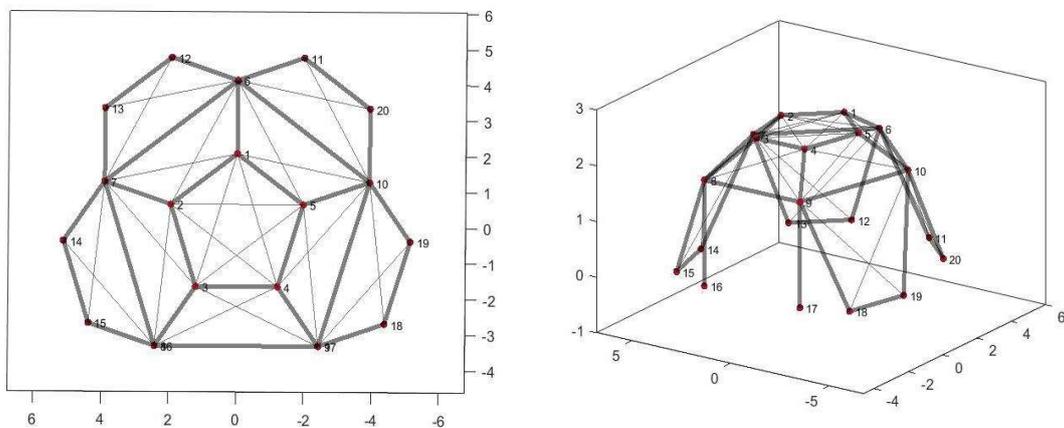


Figura 25. Geometria ultimata rappresentata in visione frontale a sinistra e visione prospettica a destra

Le coordinate dei nodi appartenenti ai poligoni evidenziati vengono selezionate come le estremità delle aste di un telaio al quale sono inoltre state aggiunte ulteriori connessioni tra alcuni vertici così da rendere la struttura triangolata; i membri rappresentati da linee più spesse corrispondono agli elementi di tipo *asta* mentre quelli più sottili rappresentano i *cavi*, soggetti unicamente a sforzi di trazione.

Sono stati in seguito individuati tre piani su cui giacciono i nodi così da poterne modificare la quota per rendere la struttura accessibile al personale e alla strumentazione necessari.

I nodi del piano inferiore, ovvero quelli che rappresenteranno gli ancoraggi, sono posti a quota $z = 0 \text{ m}$, quelli del piano intermedio a $z = 1.9 \text{ m}$ quelli superiori a $z = 2.5 \text{ m}$. Si è assunto infine che le aste in corrispondenza dell'ingresso fossero perpendicolari rispetto al suolo, così da poter consentire un eventuale collegamento con altri moduli in maniera semplice ed ottimizzata.

2) Definizione proprietà geometriche

Nella seconda sezione vengono definite le proprietà geometriche della struttura, la quale risulta essere formata da 20 nodi e 52 elementi. In questa fase viene costruita una struttura, tramite la funzione *GeomProp*, dalla quale è possibile ricavare le informazioni riportate nella *Tabella 1*.

Tabella 1. Tabella proprietà geometriche della struttura

CAMPO	DESCRIZIONE	VALORE
A_GUSCIO_MQ	AREA DELLA SUPERFICIE SFERICA	94 m^2
PESO_TEX_KN_AL_MMQ	FORZA PESO ESERCITATA DALLA MEMBRANA DI COPERTURA FORMATA DA UN TELO INTERNO IN COTONE IGNIFUGO (280 g/m^3) ED UNO ESTERNO DI 50% COTONE E 50% METACRILICO (310 g/m^3), SI ASSUME COME VALORE COMPLESSIVO LA SOMMA DELLE DUE DENSITÀ	$-5,8 \times 10^{-9} \text{ kN}$
PESO_ASTE_KN	FORZA PESO ESERCITATA DALLE ASTE CHE COMPONGONO LA STRUTTURA (RIFERITA AD UNA LUNGHEZZA UNITARIA)	$-3,97 \times 10^{-6} \text{ kN}$
PESO_CAVI_KN	FORZA PESO ESERCITATA DAI CAVI CHE COMPONGONO LA STRUTTURA (RIFERITA AD UNA LUNGHEZZA UNITARIA)	$-5 \times 10^{-7} \text{ kN}$
A_U_MQ	AREA DELLA SUPERFICIE USUFRUIBILE ALL'INTERNO DELLA STRUTTURA CALCOLATA PROIETTANDO A QUOTA $z = 0$ I NODI CHE SI TROVANO A $z = 1.9 \text{ m}$ E RICAVANDO L'AREA DEL PENTAGONO DELINEATO DALLE PROIEZIONI	40 mq
LAMBDA	VETTORE CONTENENTE GLI ANGOLI RISPETTO ALL'ASSE ORIZZONTALE DELLE SUPERFICI DELLA STRUTTURA	
LEN_EL_MM	VETTORE CONTENENTE LE LUNGHEZZE DEI SINGOLI ELEMENTI	
THETA	MATRICE CONTENENTE I COSENI DIRETTORI DEI SINGOLI ELEMENTI	

EDGE	VETTORE CONTENENTE GLI INDICI DEI NODI CHE SI TROVANO ALL'ESTREMITÀ DEI SINGOLI ELEMENTI	
MASSA_TOT_KG	MASSA COMPLESSIVA DELLA STRUTTURA CONSIDERANDO SIA IL TELAIO, COMPOSTO DA ASTE E CAVI, SIA IL TELO DI COPERTURA	93.95 kg
TYPE	VETTORE CONTENETE UN VALORE IDENTIFICATIVO PER LA TIPOLOGIA DEL MEMBRO	
MASSA_TEX	MASSA COMPLESSIVA DEL TELO DI COPERTURA	54.5 kg
MASSA_ASTE_TOT	MASSA COMPLESSIVA DELLE ASTE CHE COMPONGONO LA STRUTTURA	33.59 kg
MASSA_CAVI_TOT	MASSA COMPLESSIVA DEI CAVI CHE COMPONGONO LA STRUTTURA	4.9 kg

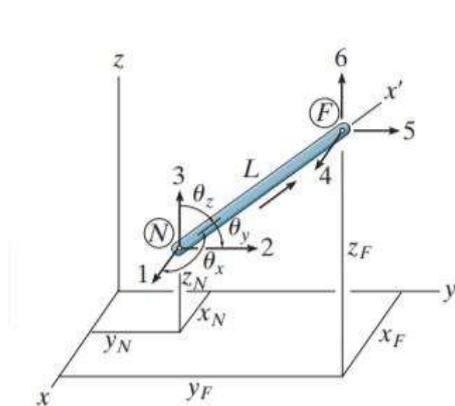


Figura 26. Singolo elemento raffigurato in configurazione spaziale

Per la definizione delle matrici *Lambda* e *K* si sono seguiti i procedimenti riportati in letteratura [26]. La matrice *Lambda* viene costruita a partire dai coseni direttori di ogni membro ottenuti tramite la seguente espressione:

$$\lambda_x = \cos\theta_x = \frac{x_F - x_N}{L} = \frac{x_F - x_N}{\sqrt{(x_F - x_N)^2 + (y_F - y_N)^2 + (z_F - z_N)^2}} \quad (10)$$

$$\lambda_y = \cos\theta_y = \frac{y_F - y_N}{L} = \frac{y_F - y_N}{\sqrt{(x_F - x_N)^2 + (y_F - y_N)^2 + (z_F - z_N)^2}} \quad (11)$$

$$\lambda_z = \cos\theta_z = \frac{z_F - z_N}{L} = \frac{z_F - z_N}{\sqrt{(x_F - x_N)^2 + (y_F - y_N)^2 + (z_F - z_N)^2}} \quad (12)$$

La matrice ottenuta sarà utilizzata in seguito per calcolare la matrice rigidezza k relativa ad ogni membro il cui comportamento viene paragonato a quello di una molla. La matrice k mette infatti in relazione il carico assiale applicato al membro con l'allungamento a cui è soggetto, analogamente all'interpretazione della costante elastica di una molla.

In coordinate globali, ovvero quelle cartesiane definite da x, y e z , gli estremi di ogni membro sono caratterizzati da tre gradi di libertà. Con riferimento alla *Figura 26*, il nodo N è soggetto ad eventuali spostamenti, lungo le tre direzioni, identificati con D_{Nx}, D_{Ny} e D_{Nz} . Considerazioni analoghe possono essere fatte per il nodo F ottenendo anche per questo i vettori spostamento D_{Fx}, D_{Fy} e D_{Fz} . Lo spostamento riferito ad un nodo può essere definito anche utilizzando le coordinate locali, ovvero x', y' e z' . Questo nuovo sistema di riferimento, sempre ortonormale, vede l'asse x' coincidente con l'asse del membro e per questo motivo lo spostamento del nodo, in questo caso per definizione assiale, risulta avvenire unicamente in questa direzione. La trasformazione dell'espressione dello spostamento da coordinate globali a coordinate locali, per i nodi N ed F avviene tramite le seguenti relazioni:

$$d_N = D_{Nx} \cos \theta_x + D_{Ny} \cos \theta_y + D_{Nz} \cos \theta_z = D_{Nx} \lambda_x + D_{Ny} \lambda_y + D_{Nz} \lambda_z \quad (13)$$

$$d_F = D_{Fx} \cos \theta_x + D_{Fy} \cos \theta_y + D_{Fz} \cos \theta_z = D_{Fx} \lambda_x + D_{Fy} \lambda_y + D_{Fz} \lambda_z \quad (14)$$

In forma matriciale si ottiene:

$$\begin{bmatrix} d_N \\ d_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_x & \lambda_y & \lambda_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_x & \lambda_y & \lambda_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{Nx} \\ D_{Ny} \\ D_{Nz} \\ D_{Fx} \\ D_{Fy} \\ D_{Fz} \end{bmatrix} \quad \text{oppure } \mathbf{d} = \mathbf{T}\mathbf{D} \quad (15)$$

Analogamente è possibile scrivere una relazione per passare dalle forze applicate ai nodi usando le coordinate globali, $Q_{Nx}, Q_{Ny}, Q_{Nz}, Q_{Fx}, Q_{Fy}$ e Q_{Fz} , e lo sforzo che agisce assialmente nei nodi, q_N e q_F , nel seguente modo:

$$\begin{aligned} Q_{Nx} &= q_N \cos \theta_x = q_N \lambda_x, & Q_{Ny} &= q_N \cos \theta_y = q_N \lambda_y, \\ Q_{Nz} &= q_N \cos \theta_z = q_N \lambda_z \end{aligned} \quad (16a, 16b, 16c)$$

$$\begin{aligned} Q_{Fx} &= q_F \cos \theta_x = q_F \lambda_x, & Q_{Fy} &= q_F \cos \theta_y = q_F \lambda_y, \\ Q_{Fz} &= q_F \cos \theta_z = q_F \lambda_z \end{aligned} \quad (17a, 17b, 17c)$$

In forma matriciale si ottiene:

$$\begin{bmatrix} Q_{Nx} \\ Q_{Ny} \\ Q_{Nz} \\ Q_{Fx} \\ Q_{Fy} \\ Q_{Fz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 \\ \lambda_y & 0 \\ \lambda_z & 0 \\ 0 & \lambda_x \\ 0 & \lambda_y \\ 0 & \lambda_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_N \\ q_F \end{bmatrix} \text{ oppure } \mathbf{Q} = \mathbf{T}^T \mathbf{q} \quad (18)$$

3) Definizione dei carichi nodali

Tramite la funzione *nodal_forces* si ricavano i differenti carichi a cui la struttura è soggetta. Vengono presentate in seguito le diverse tipologie.

Sovraccarichi permanenti

Nel caso in esame i carichi fissi sono rappresentati dal peso proprio della struttura dato dalla somma degli elementi del telaio e della copertura. Il telo, seguendo lo stato dell'arte attuale delle tende da campo, si ipotizza essere formato da due strati, uno interno ed uno esterno. Per il guscio esterno si utilizza un tessuto 50% cotone e 50% acrilico impermeabile, ignifugo mentre per il guscio interno invece si utilizza un tessuto 100% cotone idrorepellente ed ignifugo.

Per semplificare il calcolo si è considerato un unico telo avente densità $p_{tex} = 0.280 + 0.310 = 0.590 \text{ kg/mq}$. Le proprietà meccaniche del tessuto verranno ripotate nel paragrafo successivo.

Per andare a definire la forza che agisce nei nodi si stima un'area di influenza. In base alle dimensioni della struttura, questa è stata scelta ragionevolmente scelta pari a 3 metri quadrati nel caso dei nodi liberi e ad 1.5 metri quadrati per quelli ancorati, siccome in questo ultimo caso la struttura non presenta superficie al di sotto dei nodi. Viene poi calcolata anche una lunghezza equivalente utilizzando l'approssimazione in cui il peso di un singolo membro venga percepito in ogni nodo come metà del suo peso.

Per il calcolo del peso proprio della struttura agente in ogni nodo si sono considerati quindi i seguenti contributi:

- PESO MEMBRANA DI COPERTURA: $area \text{ di influenza} \times peso \text{ del telo al metro quadrato}$
- PESO TELAIOE: $lunghezza \text{ di influenza} \times peso \text{ dell'asta al metro}$.

Sovraccarichi variabili

Tra i carichi non duraturi, in questo caso viene considerato unicamente quello dovuto all'azione del vento; il carico da neve e quello sismico vengono trascurati a causa principalmente della leggerezza e della flessibilità della struttura in esame.

L'azione del vento sul singolo elemento viene determinata considerando la combinazione più gravosa della pressione agente sulla superficie interna ed esterna della struttura. Quest'azione rientra nella categoria delle forze ed è valutata in termini di azioni statiche equivalenti che vengono applicate alla struttura mediante carichi per unità di superficie, seguendo per il calcolo le indicazioni della normativa NTC18.

L'azione del vento rientra nella categoria dei carichi variabili che provocano in generale effetti dinamici di pressioni e depressioni agenti normalmente alle superfici della struttura. Queste dipendono unicamente dalla superficie esposta. La direzione del vento, nel caso di costruzioni usuali è convenzionalmente assunta orizzontale lungo uno degli assi principali della struttura. Nel caso in esame si è assunto che la forza esercitata agisca ortogonalmente alla superficie della struttura. Essendo quest'ultima inclinata rispetto all'orizzontale, l'azione della forza lungo le coordinate spaziali sarà ricavata dalla scomposizione di quest'ultima lungo le direzioni desiderate tenendo conto dell'angolo rispetto all'orizzontale. Le superfici della struttura, avendo una simmetria radiale, essendo derivata da una geometria sferica, sono tutte inclinate dello stesso angolo rispetto al suolo (anche nel caso del lato dedicato all'ingresso si ipotizza di tendere il telo, tramite appositi ancoraggi, per ottenere la medesima inclinazione delle altre facce). Considerando un lato del guscio sferico, dopo le modifiche delle quote di alcuni nodi avvenute durante la fase iniziale, questo risulta essere formato da due inclinazioni diverse rispetto all'orizzontale: 48° per la parte inferiore dell'esagono e 20° per quella superiore. Per alleggerire il carico computazionale si è assunto il valore dell'inclinazione più gravosa per l'intera costruzione che risulta essere di 48°.

Per la determinazione del carico del vento si sono seguite le *Norme Tecniche per le Costruzioni 2018* [27] in modo da ricavare la forza esercitata dal vento sulla superficie di influenza come $F_w = p_w * AI$. Con p_w si indica la pressione dovuta al vento calcolata come:

$$p_w = q_r c_e c_p c_d \quad (19)$$

Dove q_r è la pressione cinetica di riferimento, c_e il coefficiente di esposizione, c_p il coefficiente di pressione ed infine c_d il coefficiente dinamico. Per stimare i parametri di calcolo, si ipotizza che la struttura venga utilizzata in Piemonte in un centro urbano ad un'altitudine $a_s = 400$ m.s.l.m per cui si avranno i seguenti parametri:

- Velocità di riferimento $v_b = 25$ m/s
- Parametro di altitudine $a_0 = 1000$ m
- Parametro $k_s = 0.4$ 1/s

Facendo riferimento alla UNI13782 è possibile un calcolo semplificato dell'azione del vento qualora la velocità di riferimento nel sito in esame sia inferiore a 28 m/s.

Grazie alla precedente semplificazione è possibile rilevare il valore della pressione del vento direttamente pari a $q_r = 500$ N/m² per strutture temporanee aventi un'altezza fino a 5 metri, in cui rientra quindi il caso che si sta analizzando.

Si definisce ora il secondo parametro che compare nella definizione della pressione del vento, ovvero il coefficiente di esposizione c_e . Questo dipende dall'altezza rispetto al suolo della struttura considerata, dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito in cui sorge la costruzione nel seguente modo:

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \left[7 + c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right] \quad \text{per } z \geq z_{min} \quad (20a)$$

$$c_e(z) = c_e(z_{min}) \quad \text{per } z < z_{min} \quad (20b)$$

Dove k_r, z_0 e z_{min} sono parametri assegnati dalla normativa e sono funzione della categoria di esposizione del sito in cui sorge la costruzione e c_t il coefficiente di topografia che è invece posto uguale ad uno sia per le zone pianeggianti che per quelle ondulate, collinose e montagnose.

Al fine di determinare la categoria di esposizione del terreno viene definita la classe di rugosità. Ipotizzando che la struttura campale venga allestita in aree urbane in seguito ad una catastrofe/emergenza, viene decretata l'appartenenza alla classe B seguendo le indicazioni riportate dalle normative. Tramite i criteri di assegnazione della categoria di esposizione per il caso della struttura progettata, quest'ultima risulta appartenere alla classe IV. I parametri assegnati per quest'ultima sono i seguenti:

- $k_r = 0.22$;
- $z_0 = 0.30$ m;
- $z_{min} = 8$ m.

Considerando che la struttura abbia un'altezza $z = 2.5 \text{ m}$, siamo nella condizione in cui $z < z_{min}$ quindi:

$$c_e(z) = c_e(z_{min}) = k_r^2 c_t \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) \left[7 + c_t \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right)\right] = 1.63 \quad (21)$$

Per la definizione del coefficiente di pressione si utilizza la relazione tra quello di pressione esterna e quello di pressione interna: $c_p = c_{p,e} - c_{p,i}$.

$c_{p,e}$ viene ricavato dalla retta mostrata in *Figura 28* dalla quale, con un angolo $\alpha = 48^\circ$, si ottiene $c_{p,e} = 0.44$ per la faccia sopravento e $c_{p,e} = -0.4$ per quella sottovento.

Il coefficiente di pressione interna invece, assumendola permeabilità del telo di copertura uguale su tutta la superficie, può essere considerato pari a zero in modo tale da mettersi nelle condizioni più gravose per il dimensionamento.

Il coefficiente dinamico c_d è assunto pari ad uno per costruzioni di tipologia ricorrente con forme regolari e altezza minore di 80 metri.

La pressione cinetica di riferimento risulta quindi essere:

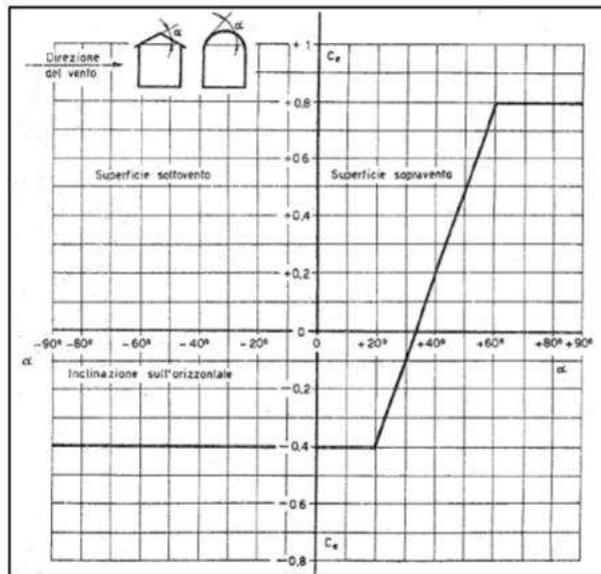


Figura 27. Valori assunti da $c_{p,e}$ al variare di α

$$p = q_r c_e c_p c_d = 500 * 1.63 * 0.44 * 1 = 358.6 \text{ N/m}^2 \quad (22)$$

$$p = q_r c_e c_p c_d = 500 * 1.63 * -0.4 * 1 = -326 \text{ N/m}^2 \quad (23)$$

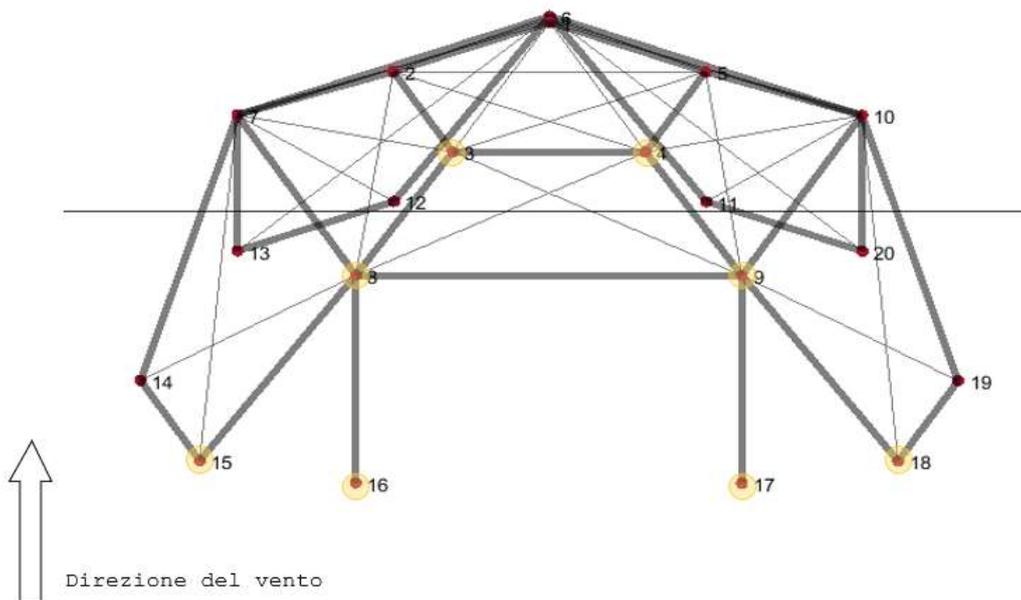


Figura 28. Visione della struttura in cui sono evidenziati i nodi sopravento

Per il calcolo della forza agente sui nodi si moltiplica il valore della pressione appena ricavata per l'area di influenza riferita al singolo nodo. La forza si considera agente perpendicolarmente alla superficie e per cui viene scomposta lungo le direzioni x e z per poter essere applicata come forza agente sui nodi rispetto alle coordinate globali. Quando si scompone la forza, i nodi sopravento risultano essere schiacciati verso terra e per questo motivo alla componente lungo z viene assegnato un valore negativo, essendo questa agente verso il basso.

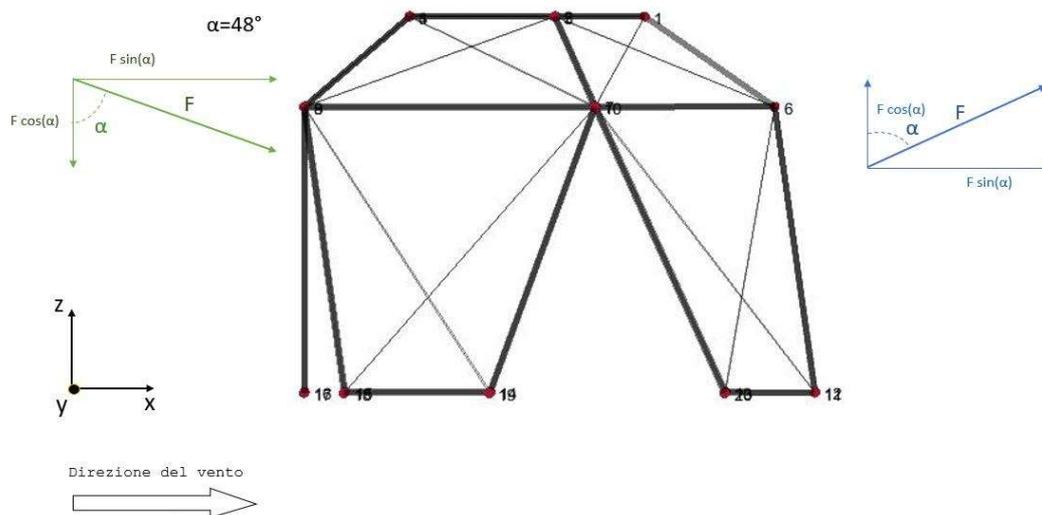


Figura 29. Rappresentazione della forza esercitata dal vento sulla struttura

I nodi sottovento sono invece soggetti ad una forza di 'sollevamento' diretta verso l'esterno della superficie. In questo caso la scomposizione lungo gli assi globali vede la componente z positiva in quanto diretta verso l'alto. Per quanto riguarda la componente orizzontale, sia che si tratti di un nodo sopravvento che di uno sottovento, la direzione è concorde all'asse x positivo.

Combinazione di carichi

Le forze agenti su una struttura in generale possono essere classificate in base alla risposta della stessa come statiche, dinamiche, pseudostatiche oppure con riferimento alla loro evoluzione nel tempo e quindi permanenti, variabili o accidentali.

Quando viene progettata una struttura generalmente si definisce a livello teorico la vita nominale V_n come la durata, espressa in anni, per cui è previsto che l'opera, soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali.

Le verifiche strutturali generalmente vengono fatte per stati limite ovvero rispetto a :

- *Stati limite ultimi* (SLU): definiscono le condizioni di collasso dell'intera struttura o di qualche elemento rilevante.
- *Stati limite di esercizio* (SLE): definiscono le condizioni per le quali viene meno la funzionalità dell'opera senza che ne sia compromessa la stabilità.

Per la verifica agli stati limite ultimi di resistenza può essere applicato il metodo dei coefficienti parziali di sicurezza espresso nel seguente modo:

$$R_d \geq E_d \quad (24)$$

dove R_d è la resistenza di progetto, valutata in base ai valori di progetto della resistenza dei materiali e ai valori nominali delle grandezze geometriche interessate mentre E_d è il valore di progetto dell'effetto delle azioni, valutato in base ai valori di calcolo delle stesse.

In accordo con la UNI13782, le combinazioni di verifica per gli stati limite risultano essere:

- Azioni di calcolo SLU: $F_d = \gamma_G G_k + \sum \gamma_F Q_{ik} \quad (25)$

- Azioni di calcolo SLE: $F_d = G_k + Q_{1k} + \sum \varphi_{0i} Q_{ik} \quad (26)$

Dove:

G_k Valore caratteristico dei carichi permanenti

Q_{1k} Valore caratteristico del carico variabile dominante

Q_{ik} Valore caratteristico del secondo carico variabile

γ_G Coefficiente parziale dei carichi permanenti

γ_F Coefficiente parziale per i carichi variabili

φ_{0i} Coefficiente che tiene conto della ridotta probabilità che due azioni si verifichino contemporaneamente coi valori massimi.

I valori dei coefficienti vengono ricavati dalle NTC 2018 e sono riportati in *Tabella 2*.

Per il caso del progetto si ritiene opportuno considerare le seguenti combinazioni di carico:

1) G_k (SLE)

2) $G_k + Q_{vento}$ (SLE)

3) $\gamma_{G1} G_k + \gamma_{F1} Q_{vento}$ (SLU resistenza)

In cui G_k indica il carico permanente dovuto al peso proprio della struttura e Q_{vento} rappresenta il carico dovuto all'azione del vento.

I coefficienti parziali utilizzati nell'ultima combinazione vengono selezionati dalla *Tabella 2* nel seguente modo: γ_{G1} e γ_{Q1} facendo riferimento alla colonna A1 della tabella. Quest'ultima contiene i valori specificati dalle NTC2018, quindi si ha $\gamma_{G1} = 1.3$ e $\gamma_{F1} = 1.5$.

Tabella 2. Valori dei coefficienti parziali con riferimento alle NTC2018

	COEFF.	EQU	A1	A2
	γ			
CARICHI PERMANENTI FAVOREVOLI	γ_{G1}	0.9	1.0	1.0
CARICHI PERMANENTI SFAVOREVOLI	γ_{G1}	1.1	1.3	1.1
CARICHI PERMANENTI NON STRUTTURALI FAVOREVOLI	γ_{G2}	0.8	0.8	0.8
CARICHI PERMANENTI NON STRUTTURALI SFAVOREVOLI	γ_{G2}	1.5	1.5	1.3
AZIONI VARIABILI FAVOREVOLI	γ_{Fi}	0.0	0.0	0.0
AZIONI VARIABILI SFAVOREVOLI	γ_{Fi}	1.5	1.5	1.3

Nella *Tabella 3* riportata in seguito sono elencate le differenti tipologie di forze che vengono esercitate nei nodi riferite alle specifiche direzioni definite dalle coordinate globali.

Al termine dello svolgimento di questa sezione del programma si ottiene una struttura chiamata *Force_struct* contenente i vettori in cui sono presenti i valori delle differenti combinazioni di carico associate ad ogni nodo.

Tabella 3. Valori delle forze agenti in ogni nodo considerando le diverse condizioni di carico

NODO	Al (m)	CARICO VENTO (kN)		SLE_pp (peso proprio, kN)		SLE (kN)		SLU_r (kN)	
		direzione X	direzione Z	direzione X	direzione Z	direzione X	direzione Z	direzione X	direzione Z
1	3	0,74	0,64	0	-0,031	0,74	0,61	0,74	0,94
2	3	0,74	0,64	0	-0,031	0,74	0,61	0,74	0,94
3	3	0,8	-371	0	-0,031	0,8	-0,74	0,8	-1,1
4	3	0,8	-0,71	0	-0,031	0,8	-0,74	0,8	-1,1
5	3	0,74	364	0	-0,031	0,74	0,61	0,74	0,94
6	3	0,74	0,64	0	-0,031	0,74	0,6	0,74	0,92
7	3	0,74	0,64	0	-0,031	0,74	0,6	0,74	0,92
8	3	0,8	-0,71	0	-0,031	0,8	-0,75	0,8	-1,1
9	3	0,8	-0,71	0	-0,031	0,8	-0,75	0,8	-1,1
10	3	0,74	0,64	0	-0,031	0,74	0,6	0,74	0,92
11	1,5	0,37	0,32	0	-0,017	0,37	0,31	0,37	0,47
12	1,5	0,37	0,32	0	-0,017	0,37	0,31	0,37	0,47
13	1,5	0,37	0,32	0	-0,017	0,37	0,31	0,37	0,47
14	1,5	0,37	0,32	0	-0,017	0,37	0,31	0,37	0,47
15	1,5	0,4	-0,35	0	-0,017	0,4	-0,37	0,4	-0,55
16	1,5	0,4	-0,35	0	-0,017	0,4	-0,37	0,4	-0,55
17	1,5	0,4	-0,35	0	-0,017	0,4	-0,37	0,4	-0,55
18	1,5	0,4	-0,35	0	-0,017	0,4	-0,37	0,4	-0,55
19	1,5	0,37	0,32	0	-0,017	0,37	0,31	0,37	0,47
20	1,5	0,37	0,32	0	-0,017	0,37	0,31	0,37	0,47

4) Definizione degli sforzi assiali

In questa sezione, tramite la funzione *axialforce*, si calcola inizialmente la matrice rigidezza K e il valore delle forze che agiscono assialmente in ogni membro.

Si procede ora con la scrittura della matrice rigidezza riferita agli elementi, mettendo in relazione le forze espresse in coordinate globali Q con gli spostamenti D .

Per quanto riguarda gli elementi rigidi che costituiscono il telaio, è possibile scrivere la relazione tra lo sforzo σ ed il carico q riferiti all'asse centrale di simmetria:

$$\sigma = \frac{q}{A} \quad (26)$$

Dove A rappresenta la sezione trasversale del membro in questione. Dalla meccanica strutturale è noto che è possibile esprimere lo sforzo assiale in funzione del modulo di Young E e della deformazione ε . Quest'ultima grandezza rappresenta il rapporto tra lo spostamento d_N (con riferimento alla *Figura 27*) e la lunghezza dell'asta L tramite la seguente relazione:

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{d}{L} \quad (27)$$

Da questa è possibile esprimere il carico assiale come:

$$q = \frac{AE}{L} d \quad (28)$$

Se si analizzano i nodi singolarmente è possibile scrivere la risultante dello sforzo assiale considerando, per il nodo N verso positivo quello del vettore uscente dalla sezione e negativo quello entrante. Per il nodo F valgono considerazioni analoghe. Si ottiene:

$$q_N = \frac{AE}{L} d_N - \frac{AE}{L} d_F \quad (29)$$

$$q_F = -\frac{AE}{L} d_N + \frac{AE}{L} d_F \quad (30)$$

Utilizzando la notazione matriciale:

$$\begin{bmatrix} q_N \\ q_F \end{bmatrix} = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_N \\ d_F \end{bmatrix} \quad (31)$$

Questa espressione può essere scritta più semplicemente come $\mathbf{q} = \mathbf{k}' \mathbf{d}$, dove \mathbf{k}' si identifica con la matrice rigidezza dell'elemento facendo riferimento alle coordinate locali. Come visto in precedenza, \mathbf{d} può essere trasformato in coordinate globali dalla relazione $\mathbf{d} = \mathbf{T} \mathbf{D}$ consentendo di ottenere la seguente:

$$\mathbf{q} = \mathbf{k}' \mathbf{d} = \mathbf{k}' \mathbf{T} \mathbf{D} \quad (32)$$

L'equazione può essere sostituita in $\mathbf{Q} = \mathbf{T}^T \mathbf{q}$ da cui si ottiene:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{T}^T \mathbf{k}' \mathbf{T} \mathbf{D} \quad (33)$$

La quantità $\mathbf{T}^T \mathbf{k}' \mathbf{T}$ viene rinominata \mathbf{k} e identifica la matrice rigidezza del singolo membro espressa in coordinate globali:

$$\begin{matrix}
& N_x & N_y & N_z & F_x & F_y & F_z \\
k = & \begin{bmatrix}
\lambda_x^2 & \lambda_x \lambda_y & \lambda_x \lambda_z & -\lambda_x^2 & -\lambda_x \lambda_y & -\lambda_x \lambda_z \\
\lambda_x \lambda_y & \lambda_y^2 & \lambda_y \lambda_z & -\lambda_x \lambda_y & -\lambda_y^2 & \lambda_y \lambda_z \\
\lambda_x \lambda_z & \lambda_y \lambda_z & \lambda_z^2 & -\lambda_x \lambda_z & -\lambda_y \lambda_z & -\lambda_z^2 \\
-\lambda_x^2 & -\lambda_x \lambda_y & -\lambda_x \lambda_z & \lambda_x^2 & \lambda_x \lambda_y & \lambda_x \lambda_z \\
-\lambda_x \lambda_y & -\lambda_y^2 & -\lambda_y \lambda_z & \lambda_x \lambda_y & \lambda_y^2 & \lambda_y \lambda_z \\
-\lambda_x \lambda_z & -\lambda_y \lambda_z & -\lambda_z^2 & \lambda_x \lambda_z & \lambda_y \lambda_z & \lambda_z^2
\end{bmatrix} & \begin{matrix}
N_x \\
N_y \\
N_z \\
F_x \\
F_y \\
F_z
\end{matrix}
\end{matrix} \quad (34)$$

I valori N_x, N_y, N_z, F_x, F_y ed F_z sono gli indici relativi ai gradi di libertà (*Degree Of Freedom*) associati ai nodi dell'elemento. Per la mappatura viene inizializzato il vettore *DOF* che contiene i numeri da 1 a 60 ($60 = \text{numero di gradi di libertà per nodo} \times \text{numero di nodi}$) in modo tale da associare ad ogni nodo un gruppo da tre righe ciascuno ordinate in modo crescente e consecutivo. La matrice rigidezza globale K avrà dimensione $N_{DOF} \times N_{DOF}$ (60×60) e verrà costruita iterativamente nel programma man mano che le varie matrici rigidezza dei singoli elementi verranno generate. La matrice K viene quindi riempita andando a inserire i valori contenuti nelle matrici k , nelle posizioni indicate dagli indici che si trovano nel vettore dei gradi di libertà relativi allo specifico membro. Si specifica inoltre che nel caso in cui il membro che si sta analizzando sia un cavo e sia in compressione, il valore della matrice k devono essere portati ad un valore molto piccolo, prossimo allo zero. Questo passaggio è necessario in quanto i cavi soggetti a compressione hanno rigidezza zero in quanto sono molli ma imporre esattamente uguale a zero il valore della matrice k potrebbe generare dei problemi di grandezza durante l'analisi.

E' ovvio che nel caso in cui un indice, ovvero un grado di libertà, sia in comune a due elementi, il valore della rigidezza contenuto in k verrà sommato a quello già eventualmente contenuto in K .

Dopo aver ottenuto la matrice di rigidezza globale è possibile andare ad analizzare la struttura in modo da poter ricavare le grandezze incognite tramite la relazione:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{K}\mathbf{D} \quad (35)$$

E' quindi necessario andare a calcolare il vettore spostamento \mathbf{D} a cui sono soggetti i nodi.

Dalla relazione $\mathbf{Q} = \mathbf{K}\mathbf{D}$ si ricava:

$$[\mathbf{K}]^{-1}\mathbf{Q}_k = \mathbf{D} \quad (36)$$

Nel caso in cui gli indici dei gradi di libertà riferiti ai nodi liberi assumano i valori più piccoli mentre quelli riferiti ai nodi ancorati i valori maggiori, è possibile eseguire la seguente partizione del sistema matriciale:

$$\begin{bmatrix} Q_k \\ - \\ Q_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_k \\ - \\ D_u \end{bmatrix} \quad (37)$$

Dove con il pedice k si indicano le grandezze note mentre con il pedice u quelle ignote. Espandendo la partizione si ottiene:

$$Q_k = K_{11}D_u + K_{12}D_k \quad (38)$$

$$Q_u = K_{21}D_u + K_{22}D_k \quad (39)$$

Nel caso in esame il vettore D_k è posto uguale a zero siccome riferito agli spostamenti dei nodi di ancoraggio, che per definizione risultano essere immobili. Si ottiene quindi l'equazione semplificata:

$$Q_k = K_{11}D_u \rightarrow D_u = [K_{11}]^{-1}Q_k \quad (40)$$

Dove in questo caso Q_k è riferito alle forze applicate nei nodi liberi che sono state calcolate nella sezione precedente.

Al fine di ricondursi a questo modello per utilizzare la semplificazione presentata, la sottomatrice K_{11} è stata generata a partire da K andando a mantenere unicamente le righe e le colonne indicizzate dai gradi di libertà riferiti ai nodi liberi. Si è calcolato infine il vettore D degli spostamenti ai nodi, riferito alle diverse condizioni di carico. In ultima istanza, si sono raggruppati i valori massimi ed i valori minimi dello sforzo per ognuna di

Tabella 4. Valori massimi e minimi dello sforzo assiale riferiti alle diverse combinazioni di carico

COMBINAZIONE DI CARICO	VALORE MAX SFORZO ASSIALE kN (trazione)	VALORE MIN SFORZO ASSIALE kN (compressione)
SLE_pp	0.042	0
SLE	0.86	-0.92
SLU_r	1.28	-1.39
Carico vento	0.84	-0.94

esse; il segno positivo indica uno sforzo di trazione mentre quello negativo di compressione. I valori ottenuti sono riportati in *Tabella 4*.

5) *Valutazione sicurezza struttura*

L'ultima sezione del programma prevede la valutazione della sicurezza della struttura. Dalla tabella ottenuta al punto precedente si è selezionata la condizione di carico più gravosa, ovvero quella riferita agli stati ultimi di resistenza.

Si è quindi calcolato il carico critico a cui sono sottoposti gli elementi per andare a valutare la seguente condizione:

$$N_{cr} > N_{ass} \quad (41)$$

dove con N_{ass} si intende il carico agente assialmente e con N_c il carico critico. Viene riportato in seguito il calcolo di quest'ultimo separatamente per il caso di elemento in compressione e trazione.

Compressione

Come anticipato, l'elemento di tipo cavo risulta avere una rigidezza pressoché nulla nel caso di sforzo di compressione. In questo paragrafo si terrà quindi unicamente conto delle aste.

L'elemento strutturale asta possiede una snellezza caratteristica che, in caso di forze di compressione, può dare vita ad instabilità elastica e conseguente cedimento. Questa, se soggetta a carico assiale di compressione, tende ad incurvarsi generando tensioni interne che potrebbero compromettere l'equilibrio strutturale. Esiste un valore limite del carico oltre al quale l'asta incomincia appunto ad inflettersi chiamato **carico critico di Punta** ed è generalmente inferiore al carico di sicurezza per compressione. Tra i metodi più utilizzati per il dimensionamento delle aste di questo tipo c'è il metodo di Eulero che introduce la seguente espressione del carico critico:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E J_{min}}{l_0^2} \quad (42)$$

dove E è il modulo di elasticità del materiale, in questo caso alluminio, l_0 è la lunghezza libera di inflessione (estensione dell'asta soggetta alla deformazione) e J_{min} è il minimo tra i momenti di inerzia assiali baricentrici della sezione, che nel caso di un'asta con sezione circolare cava si calcola come:

$$J_{min} = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) = \frac{l_0^2}{\pi^2} \frac{kP_{cr}}{E} \quad (43)$$

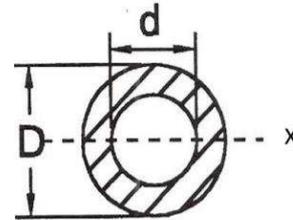


Figura 30. Sezione asta circolare cava

Fissando infatti il rapporto $\frac{d}{D}$ si può ricavare il valore di D per ultimare il dimensionamento. Nel caso del progetto, si sono assunti dei valori iniziali del diametro delle aste e si è calcolato il carico critico; si è poi valutato se questo soddisfacesse o meno la condizione (41). Nel caso in cui quest'ultima non sia rispettata è possibile modificare il diametro iniziale della sezione e fare ripartire il programma con le nuove dimensioni.

Trazione

Per quanto riguarda questa seconda situazione, la verifica di resistenza a trazione viene semplicemente definita andando a limitare la massima tensione al carico di sicurezza del materiale:

$$\sigma_{ass} = \frac{N}{A_{sez}} \quad (44)$$

Dove N è lo sforzo assiale ad A_{sez} è l'area della sezione trasversale dell'elemento.

In questo caso la condizione (41) si può esprimere nel seguente modo:

$$\sigma_{cr} > \sigma_{ass} \quad (45)$$

Dove σ_{cr} rappresenta la tensione caratteristica di snervamento del materiale.

3.4.2 Elementi strutturali

Verranno in seguito descritti singolarmente gli elementi che compongono la struttura.

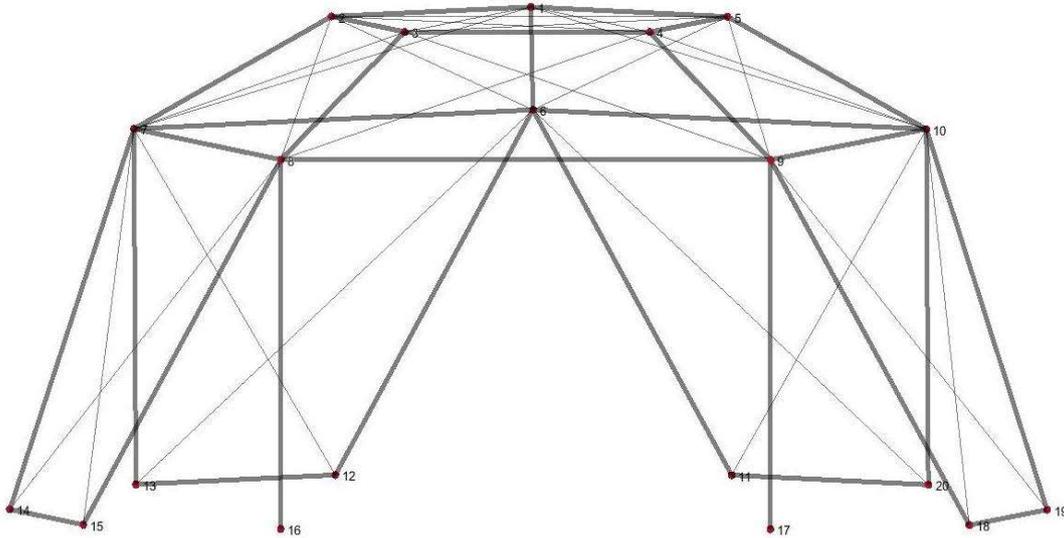


Figura 31. Rappresentazione frontale del telaio ultimato

3.4.2.1 Telaio

Il dimensionamento della struttura procede con riferimento alla geometria ottenuta dal programma presentato nel paragrafo precedente. Come anticipato, gli elementi strutturali sono cavi e aste mentre per la copertura verranno usati due teli di natura differente per realizzare lo strato interno e quello esterno; le proprietà meccaniche di tutti i componenti saranno presentate in dettaglio nel paragrafo successivo mentre in questo ci si sofferma prevalentemente sull'aspetto geometrico e dimensionale della struttura.

Elemento asta

In Figura 32 è possibile osservare la rappresentazione del telaio ottenuto in cui gli elementi più spessi si identificano con le aste, le quali risultano essere 29 in totale. Dal campo *len_el_mm* della

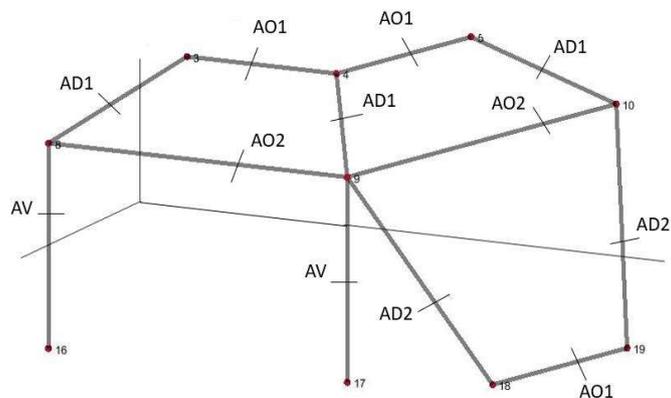


Figura 32. Sezione telaio in cui vengono rappresentate le aste di lunghezza diversa

matrice contenente le proprietà geometriche della struttura è stato possibile ricavare le lunghezze degli elementi. Grazie alla simmetria radiale, è possibile suddividere i membri in cinque gruppi di dimensioni diverse; in figura viene riportata una sezione della struttura in cui sono rappresentate le aste che possiedono lunghezze differenti classificate in *Tabella 5*.

Tabella 5. Classificazione tipologia delle aste

MEMBRO	NODI DI COLLEGAMENTO	LUNGHEZZA (METRI)
ASTA VERTICALE (AV)	8-16 E 9-17	1.90
ASTA ORIZZONTALE TIPO 1 (AO1)	3-4, 4-5 E 18-19	2.42
ASTA ORIZZONTALE TIPO 2 (AO2)	8-9 E 9-10	4.8
ASTA DIAGONALE TIPO 1 (AD1)	3-8, 4-9 E 5-10	2.15
ASTA DIAGONALE TIPO 2 (AD2)	9-18 E 10-19	2.8

Per quanto riguarda il dimensionamento della sezione degli elementi, all'inizio del programma vengono inizializzati i valori dei diametri esterno ed interno dell'asta di alluminio cava. Inizialmente si inseriscono le seguenti misure, $D_{asta} = 10 \text{ mm}$ e $d_{asta} = 5 \text{ mm}$; queste vengono incrementate nel caso in cui venga visualizzato il messaggio comunicante che le condizioni di sicurezza non sono state rispettate. Nel caso in esame, i valori minori per cui queste vengono rispettate risultano essere $D_{asta} = 35 \text{ mm}$ e $d_{asta} = 25 \text{ mm}$. Per le aste cave si ha quindi una sezione di:

$$A_{sez} = \frac{(D_{asta}^2 - d_{asta}^2)\pi^2}{4} = 1.48 \times 10^3 \text{ mm}^2 \quad (46)$$

Il momento di inerzia riferito all'asse principale del membro vale:

$$J_{min} = \frac{\pi}{64} (D_{asta}^4 - d_{asta}^4) = \frac{\pi}{64} (35^4 \text{ mm}^4 - 25^4 \text{ mm}^4) = 5.45 \times 10^4 \text{ mm}^4 \quad (47)$$

Di conseguenza è possibile ricavare il valore del carico critico per la compressione con queste dimensioni. Come anticipato nella (42), questo è inversamente proporzionale ad

l_0 e, siccome la condizione (41) risulta essere più restrittiva tanto più è piccolo il valore di N_{cr} , dal momento che si hanno diverse lunghezze delle aste, la condizione più limitante risulta essere quella in cui l'asta ha lunghezza libera di inflessione maggiore, ovvero $l_0 = 4.8 \text{ m}$. Con questo valore si calcola il carico critico di punta tramite l'equazione di Eulero:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E_{AL} J_{min}}{l_0^2} = \frac{\pi^2 E_{AL} 1.67 \times 10^4 \text{ mm}^4}{(4.8 \times 10^3)^2 \text{ mm}^2} = 1.61 \text{ kN} \quad (48)$$

dove $E_{AL} = 70 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$.

Il carico assiale N_{ass} massimo a cui sono soggetti gli elementi strutturali di questa categoria deve essere minore del carico critico.

Dalla sezione *axialforce1* del programma si è ricavato il valore massimo dello sforzo di compressione assiale. Si riportano in *Tabella 6* i valori massimi e minimi delle forze per le diverse condizioni di carico. La colonna che riporta i segni negativi rappresenta gli sforzi di compressione e il massimo si ha nella riga riferita *Stati Limite Ultimi*, con un valore assoluto pari a $N_{ass} = 1.38 \text{ kN}$.

La condizione (40), con le attuali dimensioni dei membri, $D_{asta} = 35 \text{ mm}$ e $d_{asta} = 25 \text{ mm}$, risulta essere rispettata.

Tabella 6. Valori massimi e minimi degli sforzi di trazione e compressione per le diverse combinazioni di carico

SFORZO DI TRAZIONE MAX (κN)	SFORZO DI COMPRESSIONE MAX (κN)	COMBINAZIONI DI CARICO
0.05	0	SLE_PP
0.86	-0.91	SLE
1.29	-1.38	SLU_R
0.84	-0.94	CARICO VENTO

Elemento cavo

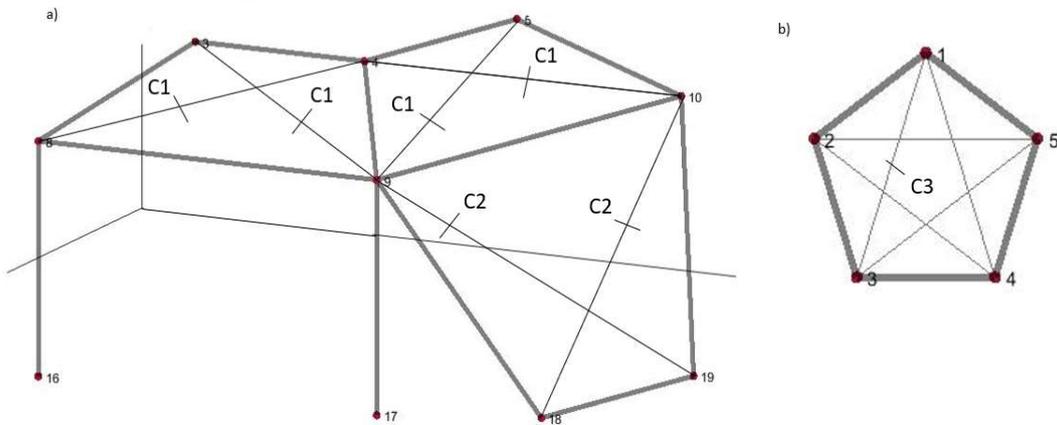


Figura 33. Sezione in prospettiva laterale (a) e del poligono superiore (b) in cui sono rappresentati gli elementi del telaio

Considerazioni analoghe vengono fatte per gli elementi costituiti dai cavi. In *Figura 33* si riportano due sezioni della struttura, in prospettiva laterale a sinistra e dall'alto a destra, in cui vengono rappresentate le diverse lunghezze di cavo che costituiscono la struttura.

Tabella 7. Classificazione tipologia dei cavi

MEMBRO	NODI	LUNGHEZZA (METRI)
CAVO TIPO 1 (C1)	3-9, 4-8, 5-9 E 4-10	4.04
CAVO TIPO 2 (C2)	10-18 E 9-19	4.42
CAVO TIPO 3 (C3)	1-3, 1-4, 2-5, 2-4 E 3-5	3.92

Il diametro iniziale, in questo caso pari a $d_{cavo} = 1 \text{ mm}$, viene incrementato fino ad un valore di $d_{cavo} = 5 \text{ mm}$ per soddisfare la condizione sullo sforzo di trazione; la sua sezione trasversale risulta essere pari a:

$$A_{sez} = \frac{\pi}{4} d_{cavo}^2 = \frac{\pi}{4} 5^2 \text{ mm}^2 = 19.64 \text{ mm}^2 \quad (49)$$

Il carico critico per questo elemento viene espresso dalla (43) e, considerando lo sforzo assiale più gravoso, ricavato anche in questo caso dalla *Tabella 6* nella riga degli *Stati Limite Ultimi*, si ottiene:

$$\sigma_{ass} = \frac{N}{A_{sez}} = \frac{1.28 \text{ kN}}{19.64 \text{ mm}^2} = 0.0652 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \quad (50)$$

Questo valore deve essere minore della tensione caratteristica di snervamento del cavo di acciaio che risulta essere $\sigma_s = 0.235 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$. La condizione (44), con un cavo avente $d_{cavo} = 5 \text{ mm}$, risulta quindi rispettata.

Si riporta infine l'elenco della tipologia di elementi seguiti quantità di pezzi presenti nella struttura.

Tabella 8. Elenco tipologia di membro con quantità di pezzi per ogni tipo

TIPOLOGIA ELEMENTO	NUMERO DI PEZZI
ASTA VERTICALE	2
ASTA ORIZZONTALE TIPO 1	9
ASTA ORIZZONTALE TIPO 2	5
ASTA DIAGONALE TIPO 1	5
ASTA DIAGONALE TIPO 2	8
CAVO TIPO 1	10
CAVO TIPO 2	8
CAVO TIPO 3	5

3.4.2.2 Telo di copertura

Per mantenere la caratteristica praticità e semplicità di montaggio delle tende da campo, il telo di copertura esterno viene posizionato sopra il telaio e ancorato a terra tramite dei picchetti inseriti nei fori appositamente creati in corrispondenza dei nodi di ancoraggio della struttura. Per quanto riguarda il telo interno questo viene legato al telaio, tramite dei nastri con fibbia, posizionati sull'anello pentagonale in corrispondenza colmo della struttura e dell'anello pentagonale posto alla quota intermedia di $z = 1.9 \text{ m}$. Il pavimento della struttura è progettato in PVC ed è posizionato all'interno della struttura in seguito al completamento dell'assemblamento del telaio e la deposizione dei teli di copertura.

In corrispondenza del lato frontale, si progetta una lunga zip al fine di aprire e chiudere in maniera completa o parziale la facciata per consentire l'ingresso e l'uscita di macchinari e personale. Si è inoltre pensato di inserire una zip ulteriore, dal lato opposto della struttura rispetto alla facciata verticale, in corrispondenza di una delle aperture triangolari, così da ricavare un'uscita secondaria. Questa potrebbe essere utilizzata come punto di accesso principale nel caso in cui vengano collegati più moduli assieme. Il collegamento avverrebbe infatti in corrispondenza dei lati frontali delle due tende così da ottenere moduli integrati in maniera semplice.

I teli sono dotati infine di due finestre laterali trasparenti che possono: essere aperte per consentire il ricircolo dell'aria, essere utilizzate come fonte di luce o venire semplicemente oscurate.

3.4.2.3 Ancoraggi

Come anticipato nel paragrafo precedente per la tiratura del telo della tenda vengono inseriti dei picchetti in corrispondenza dei nodi di ancoraggio. Per il telo esterno saranno quindi necessari 10 picchetti.

Per quanto riguarda invece l'ancoraggio dell'intelaiatura, i terminali delle gambe che aderiscono al terreno saranno dotati di una piastra di lamiera, di dimensioni $10 \times 10 \text{ cm}$, con un foro di 3 cm per consentire il passaggio del picchetto; anche in questo caso saranno necessari 10 componenti.

Sono riportate in seguito le caratteristiche riferite a picchetti facilmente reperibili sul mercato:

- **MATERIALE:** acciaio zincato a T di spessore 3.5 mm ;
- **LARGHEZZA ALI:** 20 mm ;
- **LARGHEZZA COSTA:** 16 mm ;
- **LUNGHEZZA:** picchetti corti per telaio 25 cm e picchetti lunghi per telo 35 cm .

Dal campo VR_{max} ricavato dalla struct in uscita dalla funzione *axialforce* si sono ricavate le forze vincolari necessarie che devono essere esercitate dagli ancoraggi affinché la struttura rimanga stabile. Facendo riferimento all'equazione (38) e sapendo, come detto in precedenza, che nel caso si faccia riferimento a nodi di ancoraggio, il vettore

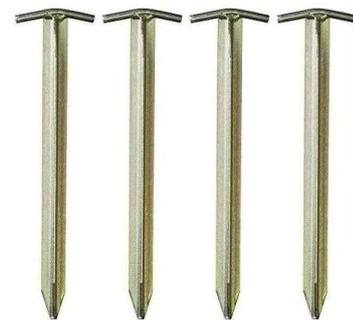


Figura 34. Picchetti in acciaio zincato a sezione a T

spostamento D_k è pari a zero a causa della presenza di un vincolo rigido. Data questa assunzione si ricava:

$$Q_u = K_{21}D_u \quad (51)$$

dove K_{21} è riferita alla partizione di K riportata nell'equazione (37). Si sono calcolate le reazioni vincolari per tutte le combinazioni di carico e si sono valutati i valori massimi per ognuna delle quattro condizioni separatamente lungo le tre direzioni. Tra questi si è riportato infine il valore massimo della forza che viene esercitata dai vincoli.

Tabella 9. Valori massimi delle reazioni vincolari nei nodi ancorati

DIREZIONE	X	Y	Z
VALORE (KN)	8.87	5.78	4.62

Nel caso in cui non fosse possibile inserire picchetti nel terreno per motivi di svariata natura si procede con lo zavorramento delle piastre di ancoraggio.

3.4.3 Materiali degli elementi strutturali

Per la scelta del materiale delle aste, si è optato per l'alluminio dal momento che per il carico critico delle aste compresse, quello più gravoso, dipende prevalentemente dalle caratteristiche geometriche piuttosto che quelle fisico-chimiche del materiale. Per questo motivo è possibile selezionare un materiale che abbia una resistenza specifica minore rispetto, ad esempio, all'acciaio, ma che riduca notevolmente il peso strutturale; nella tabella riportata in seguito vengono riportate le principali caratteristiche chimico-fisiche.

Tabella 10. Caratteristiche meccaniche dell'Alluminio

PROPRIETÀ	VALORE
PESO SPECIFICO [KG/M ³]	2700
TENSIONE CARATTERISTICA A ROTTURA [N/MM ²]	260
MODULO DI ELASTICITÀ [GPA]	70
CARICO DI SNERVAMENTO [MPA]	350

CARICO DI ROTTURA [MPA]	450
ALLUNGAMENTO A ROTTURA %	15
COEFFICIENTE DI POISSON	0.25

Per quanto riguarda i cavi invece sono scelti in acciaio principalmente per la loro resistenza, flessibilità e capacità di torsione. Le loro caratteristiche principali sono riportate in *Tabella 6*.

Tabella 11. Caratteristiche meccaniche dei teli di copertura

PROPRIETÀ	VALORE
PESO SPECIFICO [KG/M ³]	7800
TENSIONE CARATTERISTICA DI SNERVAMENTO [N/MM ²]	235
TENSIONE CARATTERISTICA A ROTTURA [N/MM ²]	360
MODULO DI ELASTICITÀ [GPA]	210
CARICO DI SNERVAMENTO [MPA]	350
CARICO DI ROTTURA [MPA]	450
ALLUNGAMENTO A ROTTURA %	15
COEFFICIENTE DI POISSON	0.3

Per il telo di copertura invece, come anticipato, si hanno due diversi tessuti, le loro caratteristiche sono riportate nella tabella che segue.

Tabella 12. Caratteristiche meccaniche dell'Acciaio

PROPRIETÀ	TELO INTERNO	TELO ESTERNO
PESO [KG/ M ²]	0.31	0.28
RESISTENZA ALLA TRAZIONE SU 5 CM [N]	110 ORDITO E 90 TRAMA	110 ORDITO E 90 TRAMA
IMPERMEABILITÀ DELL'ACQUA [MM]	300	600
SOLIDITÀ DELLE TINTE ALLA LUCE	4/5 SCALA DEI BLU	4/5 SCALA DEI BLU
RESISTENZA AL FUOCO	CSE RF 1/75/A CATEGORIA I	UNI/EN ISO 6941/7 CATEGORIA I

CAPITOLO 4

FUNZIONALIZZAZIONI ANTIBATTERICHE DI SUPERFICI

4.1 Infezione batterica

I batteri sono microorganismi unicellulari che presentano molta variabilità e si trovano pressoché in tutte le parti del mondo. Solo alcune specie

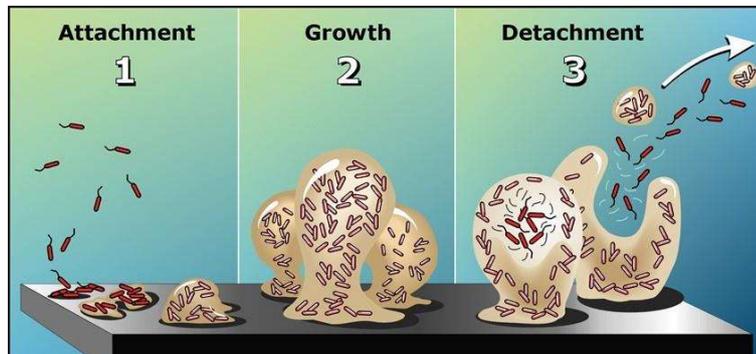


Figura 35. Sviluppo del biofilm batterico

risultano essere maligne e nocive per gli altri organismi e queste vengono chiamate patogeni, ovvero in grado di provocare patologie. Quando il batterio entra in contatto con un corpo estraneo vi interagisce e affinché ci sia adesione tra i due è necessario che il microorganismo *percepisca* di trovarsi in prossimità dell'interfaccia con la superficie. I batteri in forma planctonica, ovvero in forma fluttuante e isolata, hanno la caratteristica di rilasciare radialmente protoni e molecole segnale. Nel caso in cui non vi siano superfici nelle vicinanze, quest'ultimi si allontanano dalla cellula, altrimenti, una volta respinti dalla superficie, vengono ricattati dal batterio che comprende così di trovarsi in prossimità di un'interfaccia. Dopo averla esplorata, il microorganismo incomincia il processo di adesione e formazione del biofilm (fig. 36). Le cellule responsabili dell'attivazione di questo meccanismo regolano la produzione dei geni di adesione specifici non appena la superficie è stata intercettata. Il batterio inizia quindi a produrre la matrice extracellulare formata prevalentemente da esopolisaccaridi (EPS), in modo tale da cementare la sua adesione con la superficie e con le altre cellule batteriche per sviluppare il biofilm. Durante questo processo si passa da una fase reversibile ad una irreversibile di adesione al substrato. Esistono diverse variabili che influenzano l'adesione dei microorganismi alle superfici e la conseguente formazione del biofilm, ma da alcuni studi è emerso che in generale questa avviene più facilmente nel caso in cui le superfici sono scabre e più idrofobiche.

Infezioni batteriche relative a diverse specie patogeni sono state osservate e studiate; si è potuto affermare che l'unità strutturale del biofilm è costituita da micro-colonie, ovvero

da matrici chiuse che contengono delle comunità di cellule batteriche di una o più specie. La sua struttura è universale ed è descrivibile come una 'foresta' di torrette gelatinose fissate ad una superficie. Generalmente queste sono composte per il 10-25% da cellule e per il 75-90% da matrice di EPS. Una caratteristica di queste colonie riguarda il fatto che le cellule all'interno del biofilm non sono soggette a moto. Il biofilm è quindi un aggregato di microorganismi immobili che vivono immersi in una matrice polimerica extracellulare. Quest'ultima viene creata, come già detto in precedenza, nella prima fase della formazione del biofilm e, grazie alle sue proprietà viscoelastiche, dona stabilità meccanica al biofilm. La EPS è prevalentemente composta da proteine e polisaccaridi, ma contiene anche molecole di DNA e RNA, ioni e acqua (97%). I nutrienti e i sali minerali vengono prelevati dall'ambiente circostante.

Il processo di formazione del biofilm può essere schematizzato in step e richiede, come tutti i sistemi, uno scambio di informazioni che avviene tramite il noto meccanismo di quorum sensing.

Gli step possono essere suddivisi nel seguente modo:

I. Contatto iniziale, adesione alla superficie.

Tramite pili e flagelli e/o forze di van der Waal, le cellule microbiche si attaccano alla superficie. Durante la formazione del biofilm si osservano i meccanismi di adesione, tra cellule e substrato, e di coesione, tra cellule microbiche stesse.

II. Formazione delle micro-colonie

Dopo che i microorganismi sono adesi alla superficie, ha inizio un processo di moltiplicazione e divisione delle cellule fino alla formazione di micro-colonie che consistono in tante sottospecie di comunità coordinate tra loro secondo diversi aspetti. La distribuzione di prodotti metabolici importanti e la secrezione dei prodotti finali del metabolismo sono governati da questa coordinazione. Il biofilm fornisce un ambiente completo per lo sviluppo di associazioni sintropiche, che consistono appunto nell'associazione di due o più batteri metabolicamente differenti che dipendono uno dall'altro per l'utilizzo di certi substrati da un punto di vista energetico.

III. Crescita ed architettura

In questa fase le cellule contenute nella matrice polimerica comunicano tra loro tramite i segnali degli auto-induttori. Questo processo è fondamentale per raggiungere la densità cellulare richiesta che porta alla secrezione di molecole segnale, chiamate appunto auto-

induttori, che facilitano il quorum sensing. Alcune espressioni geniche che regolano la formazione di EPS sono espresse durante questa fase, consentendo la maturazione del biofilm nelle tre dimensioni dello spazio e producendo delle zone di vuoto interstiziale. Quest'ultime vengono sfruttate come mezzo per il sistema circolatorio al fine di distribuire i nutrienti e rimuovere i prodotti di scarto tra le diverse cellule contenute nel biofilm.

IV. Distacco e dispersione del biofilm

Durante quest'ultima fase si osserva una rapida moltiplicazione e dispersione delle cellule microbiche affinché esse si convertano dalla forma sessile alla forma mobile. Il distacco del biofilm avviene quindi in maniera naturale. Le cellule in questa fase regolano l'espressione di proteine relative alla formazione di flagelli per facilitare lo spostamento dei batteri, così da diffondere più efficacemente l'infezione.

La caratteristica patogena del biofilm riguarda principalmente il fatto che quest'ultimo, negli anni, è diventato resistente alle cure antibiotiche, portando quindi ad un aumento di infezioni croniche. La diffusione del farmaco all'interno del biofilm è rallentata o del tutto respinta dalla matrice che circonda i microorganismi, inoltre, una volta formatosi il biofilm, i batteri al suo interno sono caratterizzati da una crescita molto lenta. Questo fa sì che anche fossero in presenza di sostanza antimicrobica, ne assumerebbero quantità molto ridotte e quindi non minacciose per la vitalità del batterio.

Un'ulteriore questione da non trascurare è che nel biofilm i nutrienti sono limitati e si ha un accumulo di cataboliti che mettono le micro-colonie in una situazione di stress. Si ha, in questo caso, una sovra-espressione di alcuni geni in grado di aumentare la resistenza del biofilm rendendolo quindi più forte siccome deve sopravvivere in condizioni estreme.

4.2 Sviluppo dell'antibiotico-resistenza

Negli ultimi anni, oltre all'aumento di persone che necessitano di cure mediche, si è osservato anche un aumento relativo all'utilizzo di farmaci antibiotici. L'innalzamento dell'età media della popolazione ha portato inevitabilmente ad un maggior numero di individui che soffrono di malattie croniche e che hanno quindi bisogno di cure mediche continue. Per affrontare questo bisogno spesso si ricorre alla cattiva abitudine dell'*'autocura'* che, essendo spesso elaborata in maniera superficiale e priva di fondamenti adeguati, ha portato ad uno smisurato consumo di farmaci antibiotici in molte occasioni non necessario. Non bisogna trascurare infine lo spropositato utilizzo di antimicrobici con

cui vengono trattati gli animali negli allevamenti, somministrati nella maggior parte dei casi a scopo preventivo. Assumendo questa carne, i microorganismi che possiedono il gene della resistenza agli antibiotici vengono ingeriti, esponendo il consumatore a potenziali infezioni non curabili con i tradizionali trattamenti antibiotici. Tutto ciò ha infatti contribuito a debellare le specie più suscettibili, rendendo però le altre sempre più resistenti e pericolose. Secondo l'organizzazione mondiale della sanità ogni anno 700 mila persone muoiono a causa di un'infezione dovuta a batteri resistenti agli antibiotici.

Fino ad ora la cura antibiotica è stata quella più utilizzata a causa della buona efficacia tenendo in considerazione i costi contenuti, tuttavia ciò che negli anni si è compreso è che il consumo eccessivo e spesso inappropriato di antibiotici ha portato alla crescita irreversibile di questo fenomeno di antibiotico-resistenza, sia nel mondo naturale che in quello animale.

La resistenza può essere intrinseca o acquisita, a seconda del gene che esprime questa caratteristica. Quella intrinseca potrebbe essere generata da una mutazione spontanea di un gene esistente o di un gene esogeno, mentre quella acquisita è dovuta alla ricezione di un gene resistente agli antibiotici a partire da un altro organismo. Per questo secondo caso si parla, in un certo senso, di *globalizzazione di resistenza* riferendosi alla diffusione di alcuni enzimi prodotti da determinati batteri, che vengono diffusi tra le diverse specie e rendono così antibiotico-resistenti una quantità maggiore di agenti microbici allargando così lo spettro delle potenziali minacce.

Il compito di un farmaco antibiotico consiste nell'andare a interrompere alcuni processi che si possono osservare durante la formazione del biofilm, come ad esempio, sintesi della parete cellulare, meccanismo traslazionale e meccanismo di replicazione del DNA. Questo tipo di azioni portano generalmente all'apoptosi della cellula e vengono in un certo senso comprese dai batteri. Nel corso degli anni è avvenuto che, proprio a causa dell'eccessiva somministrazione di farmaci, le colonie hanno incominciato a sviluppare meccanismi per assicurarsi la sopravvivenza combattendo contro l'attacco antibiotico, fino a sviluppare degli efficaci meccanismi di difesa.

È quindi necessario approfondire lo studio di metodi alternativi alla cura antibiotica per ridurre il problema delle infezioni microbiche non trattabili con questi farmaci. Proprio a tal proposito, si sono incominciati a studiare e sviluppare materiali che presentano intrinsecamente la capacità di prevenire l'adesione batterica. Vi sono, ad esempio, polimeri molto sfruttati in campo biomedico soprattutto per applicazioni ad oggetti e/o

strumenti a diretto contatto con il corpo umano, come i dispositivi impiantabili. Questi risultano infatti essere gli strumenti più comuni, in ambito ospedaliero, da cui vengono contratte le infezioni batteriche.

4.3 Superfici antimicrobiche

Si è pensato di funzionalizzare la parte interna della tenda affinché, date le condizioni emergenziali e una ridotta condizione igienica rispetto alle normali strutture ospedaliere, si possa ridurre al minimo il rischio di diffusione di agenti patogeni andando a prevenire la formazione di biofilm che potrebbe inoltre andare danneggiare le superfici su cui si trova.

Il compito delle superfici antimicrobiche è quello di prevenire l'adesione del batterio sia che questo si trovi in forma planctonica sia che si tratti di frammenti di biofilm siccome nel momento in cui questi entrano in contatto con il substrato è molto più complicato rimuoverli a posteriori. L'obiettivo è quindi quello di prevenire lo sviluppo della matrice EPS poiché, come anticipato, questa protegge molto bene i microorganismi al suo interno rendendoli quasi completamente schermati dagli antibiotici.

La caratteristica antibatterica di una superficie può essere conferita in modi differenti, esistono due approcci principalmente adottati per la funzionalizzazione:

- Modifiche superficiali permanenti

Basate sulla funzionalizzazione del substrato tramite l'utilizzo di un biocida attivo capace di penetrare la parete cellulare del batterio e di andare a comprometterne le funzioni vitali fino a causarne la morte. Esempi di polimeri utilizzati per realizzare coating di questo tipo sono il poli(bromuro di vinile) e la poli(etilenimina). Si sfruttano a tale scopo anche copolimeri a blocchi che presentano una natura anfifilica grazie alla quale permettono così di poter realizzare rivestimenti antibatterici anche partendo da sospensioni acquose. In questa categoria rientrano i peptidi antimicrobici (AMP), ovvero piccole molecole proteiche formate da 12-100 amminoacidi, che si sono rivelati efficaci sia per quanto riguarda l'azione biocida, sia come inibitori degli enzimi responsabili della sintesi della membrana cellulare dei batteri. Si citano, infine, gli idrogeli: possono essere formati ad esempio da alginato e chitosano, i quali permettono di esporre determinate funzionalità acquistando la proprietà antibatterica.

- Modifiche superficiali a rilascio continuo di composti bioattivi

In questo caso le tecniche si suddividono in base alla cinetica di rilascio che può essere controllata o triggerata, ovvero solo in corrispondenza di determinate condizioni. Nel primo caso si genera una zona di inibizione esterna e una zona di uccisione interna in cui vengono debellati i batteri in prossimità della superficie. Questo processo ha tuttavia lo svantaggio di non avere una durata permanente, infatti una volta esaurito il biocida immagazzinato sulla superficie è necessario ricaricarlo altrimenti viene persa la caratteristica antibatterica.

Tra gli agenti antimicrobici maggiormente utilizzati a tale scopo si trovano gli ossidi metallici. Questi possono essere applicati sotto forma di sali, nanoparticelle o nanocompositi. Vengono anche utilizzate molecole come i furanoni, il triclosano, lo iodio, i composti quaternari dell'ammonio, ossido nitrico e ipoclorito sia singolarmente che in maniera combinata.

Per quanto riguarda il rilascio triggerato, questo si è sviluppato per poter fornire l'antimicrobico solo nel momento in cui si presenti la domanda. In questo modo si limita lo spreco e si ottimizza la durata del trattamento. Uno dei primi esempi di questa tecnica consiste in una rete polimerica realizzata in alcol vinilico collegato all'antibiotico Gentamicina tramite un peptide degradabile. In presenza di un particolare enzima la rete polimerica si scioglie liberando quindi la particella incapsulata.

E' possibile controllare il rilascio tramite altri parametri come, ad esempio, variazioni di pH, temperatura, concentrazione ionica.

Si riportano in seguito le tecniche utilizzate odieramente per realizzare alcune di queste funzionalizzazioni, limitando, per brevità, l'analisi ai processi che utilizzano antimicrobici bioispirati[28].

4.3.1 Metodi di coating bioispirati

Tra le molteplici tecniche attualmente utilizzate per realizzare delle superfici con la proprietà antibatterica, ci si sofferma appunto su quelle biomimetiche, ovvero ispirate alla natura. Si riportano in seguito schematicamente i diversi approcci attualmente disponibili sul mercato.

Peptidi antimicrobici (AMPs)

Gli AMPs, già citati in precedenza, sono prodotti da numerosi organismi come strumento di difesa da minacce esterne, tra cui quella batterica. Questi vengono suddivisi in quattro classi principali in base alla loro configurazione spaziale e composizione chimica. Il loro meccanismo antibatterico si basa principalmente sulla rottura della membrana cellulare dovuta

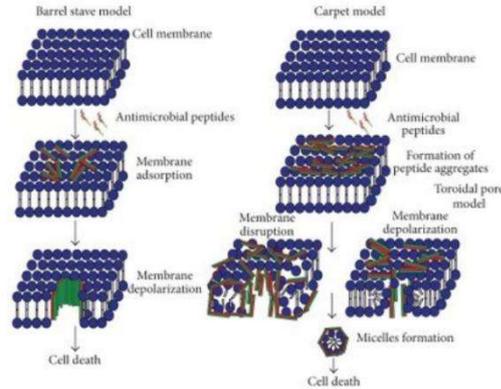


Figura 36. Meccanismo di funzionamento proposto per i peptidi antimicrobici

all'interazione tra i peptidi e i componenti fosfolipidici di quest'ultima.

Per quanto sia una tecnica efficace rispetto a molteplici specie batteriche, rapida e non causa batterio-resistenza, potrebbe tuttavia generare tossicità locale, è sensibile a variazioni di pH ed inoltre presentano costi di sintesi piuttosto elevati. Tutti questi svantaggi hanno fatto sì che per l'applicazione nel progetto di tesi questa tecnica non potesse essere presa in considerazione.

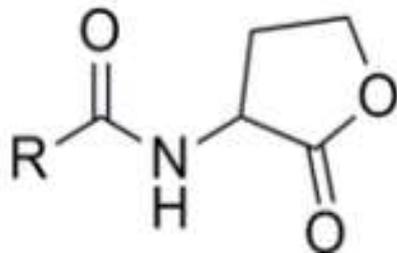


Figura 37. Acyl-HSL

Molecole anti-quorum sensing

Il modo in cui le cellule all'interno del biofilm comunicano, ovvero il quorum-sensing, è mediato da determinati segnali chiamati autoinduttori, prodotti dagli stessi microorganismi. È possibile, tramite ad esempio l'introduzione di molecole esterne,

interferire con questo processo così da inibire la comunicazione all'interno del biofilm ed evitarne o limitarne la crescita. Le molecole che svolgono questo compito vengono chiamate appunto *inibitori* e possono agire andando o a degradare le molecole responsabili della comunicazione, come acyl-omoserina lattone (acyl-HSL), o competendo con quest'ultimo per andare ad occupare i siti attivi ed evitare che si attivino determinate trascrizioni geniche responsabili della virulenza dell'infezione.

Queste molecole sono di particolare interesse siccome non si sono ancora osservati casi in cui i batteri abbiano sviluppato nei loro confronti un meccanismo di resistenza. Questo può essere dovuto al fatto che non generando direttamente la morte cellulare non

vengano percepite come nocive e quindi è come se il batterio morisse non a causa di queste ma per cause “naturali”.

Le molecole che vengono utilizzate per questo scopo si dividono in tre principali categorie: quelle analoghe all'acyl-HSL, 2(5H)-furanoni e composti non strutturalmente simili all'acyl-HSL.

In natura questo approccio si riscontra, ad esempio, in una specie endemica di alghe rosse che ha la caratteristica di secernere furanoni alogenati che vanno ad agire secondo i meccanismi riportati prima nei confronti di minacce batteriche.

La loro applicabilità risulta tuttavia essere in parte limitata in quanto sembrerebbe che alcune di queste molecole abbiano un effetto citotossico.

Oli essenziali (EO)

Sono composti oleosi aromatici che si trovano nello stato liquido a temperatura ambiente e possono essere ricavati da fiori, piante, frutti, semi, etc. e vengono generalmente estratti tramite distillazione a vapore.

Sono insolubili in acqua e solubili in solventi organici.

Gli EO presentano un'efficace risposta antibatterica sia nei confronti di batteri Gram-negativi sia dei Gram-positivi ma a causa della loro complessa composizione non è ancora esaustivamente noto il meccanismo secondo il quale agiscono. Si pensa che la loro idrofobicità faciliti la loro penetrazione nella struttura lipidica della membrana cellulare batterica, ma vi sono sicuramente altri meccanismi che entrano in gioco.

Gli oli possono essere incapsulati in film polimerici, formati ad esempio da alginato o cellulosa, al fine di realizzare coating antibatterici. Questa tecnica viene usata molto nel settore del food packaging poiché questi composti risultano essere anche commestibili.

Enzimi batteriolitici

Sono di grande interesse in quanto sono composti bioattivi, non tossici e antibatterici. A differenza di rivestimenti realizzati, ad esempio, in poli(etilen-glicolo) (PEG), noto polimero biodegradabile, gli enzimi batteriolitici non degradano in condizioni fisiologiche e presentano quindi una maggiore stabilità.

Si sostiene che l'attività antimicrobica di questi enzimi sia dovuta al danno esercitato da parte di quest'ultimi, su alcune proteine e glicoproteine

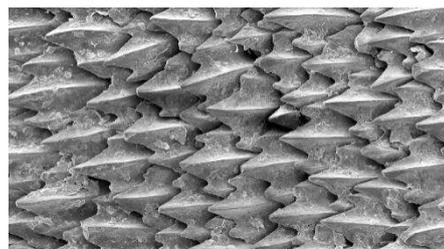


Figura 38. Morfologia a dentelli dermici della pelle dello squalo

usate dai batteri sia durante l'adesione al substrato che durante lo sviluppo del biofilm. Un aspetto interessante è che possono essere gli stessi agenti patogeni a produrre questi enzimi, tuttavia la loro azione batterio-specifica verso alcuni microorganismi ne limita le applicazioni possibili e per il momento sono impiegati prevalentemente nei rivestimenti di strutture immerse in acqua salata.

Morfologia superficiale

Quest'ultimo approccio non prevede, come gli altri, l'utilizzo di agenti esterni aggiuntivi depositati sul substrato, ma si focalizza sulla micro e nano strutturazione superficiale. Si è osservato che in natura esistono dei materiali in cui il valore della ruvidità superficiale può influenzare l'adesione di microorganismi. In alcuni studi è emerso che una superficie più liscia è correlabile con una minore adesione, tuttavia la quantità di variabili che entrano in gioco è elevata quindi non è possibile definire con accuratezza i parametri per conferire alla superficie l'antibattericità.

Un esempio emblematico in questo ambito è la pelle dello squalo, rappresentata in figura 4. L'adesione di microorganismi è ostacolata anche grazie all'interazione dei dentelli dermici e l'acqua che vanno a generare vortici in prossimità dell'interfaccia rendendo meno probabile il contatto [8][29][8].

4.3.2 Il meccanismo adesivo delle cozze

Le cozze sono molluschi che presentano la capacità di aderire pressoché su qualsiasi tipo di substrato nonostante si trovino in ambiente acquoso. Negli anni, con lo sviluppo di tecnologie biomimetiche, si è approfondito lo studio del meccanismo adesivo per poterlo riprodurre e sfruttare laddove altri adesivi sintetici non sono efficaci a causa dell'indebolimento o completa mancanza della formazione del legame con il substrato in alcune condizioni ambientali.

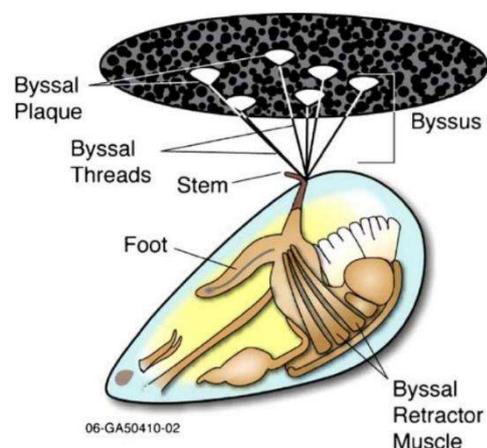


Figura 39. Anatomia bisso cozze

Meccanismo molecolare di adesione

Il meccanismo di adesione della cozza è assicurato dal bisso che risulta essere formato da: radice, stelo, filamento e placca adesiva. Nella porzione prossimale, ovvero quella più prossima al guscio della cozza, questo risulta essere 15-20 volte più estensibile di un tendine, mentre nella porzione distale, ovvero in corrispondenza della superficie di adesione, presenta un'elevata resistenza meccanica e flessibilità.

Per comprendere a fondo il meccanismo vero e proprio è necessaria un'analisi a livello microscopico attraverso la quale è possibile osservare come le proteine contenute nei filamenti del bisso delle cozze interagiscano con i diversi substrati. La forza di adesione dei filamenti delle cozze determina la sopravvivenza dell'animale e questa deve quindi essere tale da resistere ai movimenti irregolari impattanti delle onde.

Dagli studi è emerso che il forte legame che si crea è dovuto alla peculiare composizione dei filamenti che formati da 25-30 proteine differenti ma solo alcune di loro sono contenute nella placca di adesione e sono caratterizzate da una grande quantità di L-3,4-di-idrossi fenil alanina, o meglio conosciuta come DOPA. Questa molecola è presente in natura come derivato della tirosina in seguito alla modifica post transazionale introdotta dall'enzima tirosina-idrossilasi. Un'ulteriore ossidazione, realizzata dalla polifenol ossidasi, permette la formazione del DOPACHINONE, responsabile della reticolazione che consente l'adesione. Questo gruppo risulta essere molto reattivo ed il suo equilibrio con la DOPA è influenzato dal pH marino. La presenza di entrambe queste specie garantisce una maggiore universalità di adesione, infatti la DOPA aderisce bene a superfici inorganiche, tramite legami idrogeno e complessi metallici, mentre il DOPACHINONE è responsabile dell'adesione con superfici organiche tramite legami covalenti.

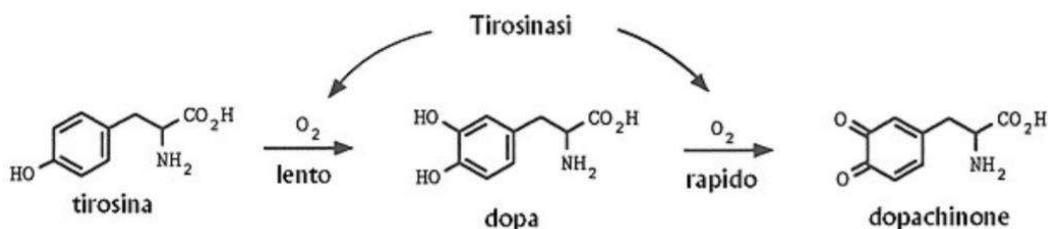


Figura 40. Ossidazione DOPA in DOPACHINONE

La proprietà delle cozze di aderire a substrati di molteplice natura ha reso DOPA e DOPACHINONE al centro dell'attenzione, ad esempio per andare a sostituire materiali, come colle epossidiche, che in condizioni umide non riescono a garantire adesione. La loro

struttura polifenolica contribuisce a conferire alle proteine altre proprietà come la non tossicità, biodegradabilità, basse qualità immunogeniche adattabili quindi ad applicazioni sia in campo industriale che, ad esempio, medico.

Le proteine contenute nelle cozze differiscono da quelle presenti in altri molluschi per l'elevata presenza di gruppi polifenolici e di DOPA. Questi componenti sono anche responsabili del fenomeno del cross-linking tra le catene polimeriche delle proteine individuali che genera la reticolazione caratteristica.

Il meccanismo di produzione della DOPA incomincia dall'idrossilazione di residui di tirosina tramite una polifenol-ossidasi.

Alla fine del filamento si trova una placca polifasica con diametro di circa 2-3 mm nel punto in cui aderisce all'interfaccia. Tra le proteine che la costituiscono (*mussel foot protein*), quella più studiata è la Mfp-1 grazie alla sua velocità di polimerizzazione e gli ottimi valori di forza di adesione ottenuti. La sua massa è di 115 kDa, è idrofilica, presenta una struttura secondaria molto piccola ed è formata per circa il 10-15% da residui di DOPA. Alla base dell'ottima qualità dell'adesione c'è indubbiamente la presenza del gruppo catecolo. Questi sono infatti in grado di ossidarsi facilmente tramite uso di agenti ossidanti, ossidazione enzimatica o in ambiente areato a pH neutro o leggermente alcalino, consentendo di ottenere in alcuni casi materiali reticolati.

La conformazione aperta risulta essere un vantaggio per le interazioni di cross-linking che avvengono con le altre proteine ed in generale con gli altri substrati. Affinché ciò avvenga, è necessario che i residui di tirosina vengano ossidati per generare i residui reattivi di DOPA, richiesti per l'adesione. Tra le diverse applicazioni in ambito tecnologico, la forte capacità adesiva delle mfps risulta essere interessante in quanto può essere sfruttata come step intermedio per la funzionalizzazione di una superficie di interesse. Dato tuttavia il processo di estrazione poco agevole e la grande quantità di molluschi necessari per effettuare studi, non esistono fonti commerciali per il loro acquisto.

Negli anni sono stati sviluppati dei materiali così detti *mussel-inspired* che tramite meccanismi di adesione e coesione mediati dalla DOPA sono in grado di dare vita a superfici che hanno la capacità di autorigenerarsi sfruttando la reversibilità del legame di coordinazione metallo-catecolo, legami idrogeno o interazioni aromatiche. Si è pensato di realizzare dei polimeri che contengano molecole ispirate alla DOPA così da ottenere adesione istantanea oppure fare in modo che questa possa essere ottenuta per via enzimatica da polimeri che contengono i precursori della tirosina.

Le policatecolammine, come polidOPA o polidopamina, sono infatti in grado di creare una membrana, indipendentemente dal substrato su cui vengono depositate. I gruppi funzionali esposti dalle molecole del rivestimento sono poi disponibili per la formazione di legami con altre molecole con cui è possibile conferire al substrato una determinata caratteristica.

Viene riportato in seguito sinteticamente lo stato dell'arte riguardante i metodi bioispirati per sfruttare il meccanismo adesivo presentatoci dalle cozze.

La DOPA presente nelle proteine del bisso (*mussel foot protein*) è ottenuta da una modifica post-traslazionale della tirosina portata dalla sua ossidazione enzimatica. Una successiva ossidazione porta alla comparsa di DOPACHinone in maniera molto rapida ottenendo così una struttura reticolata. L'equilibrio tra queste due specie dipende dal pH marino e le differenti caratteristiche dei due componenti rendono possibile l'adesione su superfici sia organiche che inorganiche. Il tempo richiesto per l'adesione è all'incirca di 3-10 minuti.

Stato dell'arte

1. Coating antibatterico Mussel-inspired

Per quanto riguarda l'obiettivo della tesi si sono cercate in letteratura delle tecniche per il coating che permettessero di realizzare un rivestimento efficace in tempi ridotti ed in condizioni ambientali normali. Si riporta in seguito lo stato dell'arte riguardo il coating ispirato al meccanismo di adesione delle cozze. Schlaich e collaboratori [30] hanno sviluppato una tecnica di coating universale per funzionalizzazioni superficiali, basata sull'utilizzo di polimeri ispirati alle proteine presenti nel bisso delle cozze. Per ricreare questo meccanismo, si sfruttano molecole contenenti i medesimi gruppi funzionali della DOPA, ovvero i gruppi catecolo, come la dopamina. Quest'ultima trova grande applicazione nelle tecniche di dipping. Il processo consiste nell'immersione di un substrato di svariata natura in una soluzione contenete dopamina; a pH leggermente alcalino questa è in grado di autopolimerizzarsi, come la DOPA, creando così una struttura reticolata che si deposita sul substrato. Questo processo viene effettuato in laboratorio e richiedere diverse ore.

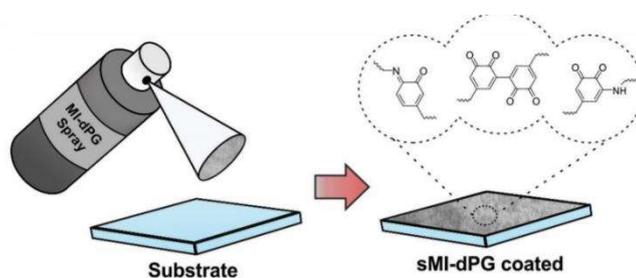


Figura 41. Processo di spray coating

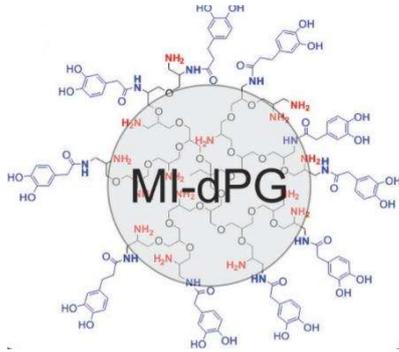


Figura 42. Struttura MI-dPG

il peso molecolare e la struttura. Si tratta di poligliceroli dendritici ispirati alle cozze (*Mussel-inspired dendritic polyglycerol*, MI-dPG) che, a differenza di altri polimeri contenenti gruppi catecolo aventi struttura lineare e a bassa densità di gruppi funzionali, sono caratterizzati da una struttura altamente ramificata. Come mostrato in *figura 5*, si possono distinguere una zona interna ed una esterna sulla quale sono esposti i gruppi funzionali. Questo poliglicerolo dendritico funge da scaffold per i processi di adesione e crosslinking al substrato grazie al lavoro sinergico dei due gruppi funzionali presenti. Il peso medio di un MI-dPG è di 10 kDa che si avvicina molto ai 9 kDa della mfp-5. Grazie a queste caratteristiche si riesce ad ottenere un coating stabile e rapido anche in laboratorio (circa una decina di minuti), che potrebbe quindi essere applicato anche a superfici di grandi dimensioni.

Il rivestimento superficiale di MI-dPG può essere ottenuto, oltre che per dip-coating, anche tramite spraying. Per quest'ultimo caso viene preparata una soluzione di MI-dPG bufferizzata a pH alcalino così da poter essere inserita in uno spray coater. Questo metodo risulta ottimale per le grandi superfici, sia per il metodo di applicazione, che non necessita di recipienti, che per la rapidità dello stesso. La sua efficacia, indipendente dal substrato utilizzato, lo rende adattabile a diverse applicazioni.

Nel caso specifico dell'articolo riportato, la funzionalizzazione superficiale con MI-dPG è stata utilizzata come step intermedio per raggiungere il successivo coating antibatterico. La deposizione di MI-dPG è stata infatti utilizzata come substrato chimicamente attivo per la seconda fase di deposizione. Per avere una post-funzionalizzazione spray efficace è necessario che la reazione tra il substrato e la soluzione sia rapida. Per conferire alla superficie la caratteristica antibatterica, si è realizzato un secondo coating con nanoparticelle di Argento.

L'elevato costo della dopamina e la durata piuttosto lunga del processo di adesione fanno sì che questa tecnica non sia applicabile a superfici di grandi dimensioni.

Al fine di superare questi limiti, i ricercatori hanno studiato e sviluppato delle molecole ispirate alle mfp-1 e 5 che, oltre a contenere gli stessi gruppi funzionali, ovvero gruppo catecolo e gruppo ammino, ne imitano

Caratterizzazione adesione primo coating:

Nello studio vengono analizzati quattro substrati di diversa natura per dimostrare la versatilità e l'efficacia del

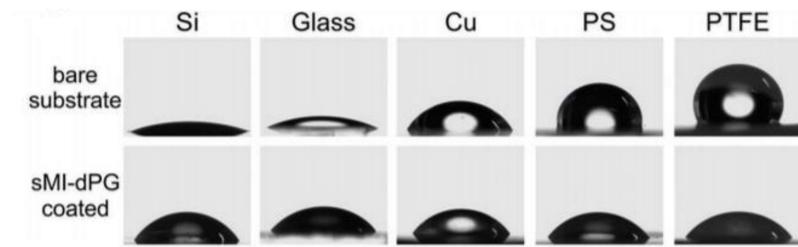


Figura 43. Confronto angolo di contatto prima e dopo coating

processo di spray coating con MI-dPG. Tra questi materiali è stato selezionato il PTFE e come si può osservare in *figura 43*, a dimostrazione dell'avvenuta funzionalizzazione, il film polimerico passa da una condizione di superidrofobicità ad una in cui l'angolo di contatto circa pari a 56° . Bisogna specificare tuttavia che trattandosi di una superficie inizialmente superidrofobica richiede un numero di cicli spray superiore rispetto a quelle idrofiliche siccome in questo caso la superficie viene bagnata da subito in maniera più uniforme rispetto ai polimeri plastici, PS e PTFE. I substrati sono stati inoltre caratterizzati tramite spettroscopia elettronica a raggi X (XPS) per osservarne la composizione superficiale ed è stato monitorato l'andamento dello spessore dei layers sul substrato di silicio a titolo di esempio. I risultati ottenuti sono riportati in *figura 8*.

Caratterizzazione adesione e antibattericità secondo coating:

L'avvenuta deposizione di AgNPs è osservabile visivamente, infatti un coating efficace conferisce al substrato un colore marroncino. Quest'ultimo è stato caratterizzato anche tramite XPS e, dai risultati emersi, si è concluso che circa il 50% degli ioni Argento riesce a ridursi ad AgNPs in 10 minuti. Questo risultato è positivo in quanto conferma la possibilità di effettuare un coating efficace in poco tempo. Si è ritenuto inoltre necessario verificare

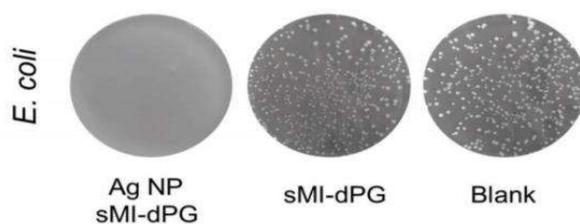


Figura 44. Risultati del test sul piatto di agar per colonie batteriche

se le proprietà antibatteriche delle AgNPs fossero mantenute anche dopo essere state incorporate sulla superficie. Il substrato è stato quindi sottoposto al trattamento con un ceppo batterico dell'*Escherichia coli*. Dopo un

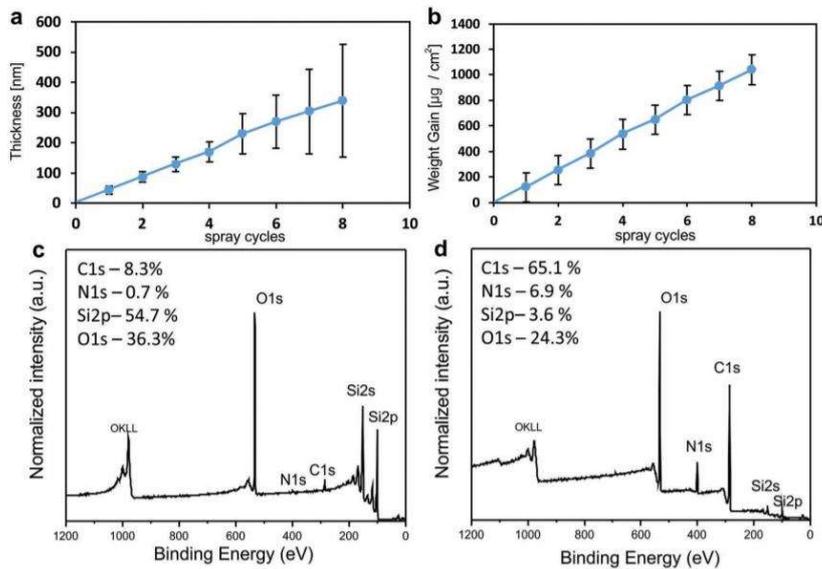


Figura 45. a) spessore del layer in funzione del numero di cicli misurato tramite ellissometria; b) incremento di peso in funzione del numero di cicli misurato tramite ellissometria; c,d) XPS prima e dopo la funzionalizzazione

periodo di incubazione di 24h il substrato presenta proprietà antibatteriche con un'efficienza pari al 99,9%.

Il meccanismo antibatterico prevede che i microorganismi siano attirati sulla superficie dai

rimanenti gruppi amminici liberi e una volta adesi vengano attaccati dal grande quantitativo di agenti presenti. Le NP rilasciano infatti ioni e specie reattive all'ossigeno (ROS) che sono potenti battericidi.

stata inoltre monitorata la cinetica di rilascio degli ioni argento tramite spettroscopia di massa a plasma accoppiato induttivamente. Si osserva in Figura 46 che la quantità rilasciata si stabilizza, dopo una crescita iniziale, a 70 ppm al giorno. Questo testimonia che l'effetto antibatterico è presente anche a lungo termine in maniera stabile.

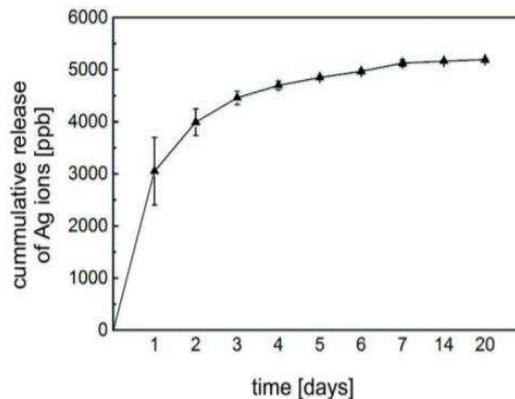


Figura 46. Curva di rilascio degli ioni argento

Nonostante il costo comunque ridotto dei poligliceroli rispetto a quello della dopamina, si sono volute effettuare ulteriori ricerche per valutare se fossero presenti in commercio altre molecole che esponessero i gruppi funzionali necessari per l'adesione ma ancora più reperibili a basso costo sia per quanto riguarda il primo che il secondo layer depositati sul substrato.

A tal proposito sono state esaminate le tecniche per realizzare rivestimenti antibatterici

utilizzate nell'industria del food packaging siccome si è pensato che, data la necessità di una quantità sostanziosa di materiale necessaria in questo settore, i prodotti attualmente sfruttati fossero il giusto compromesso tra una buona qualità ed economicità. Tra i diversi materiali sono stati individuati i composti organici polifenolici, come l'*acido tannico*, che espongono lungo la loro catena principale diversi gruppi catecolo, in analogia con le *mfp* e i poligliceroli visti in precedenza, grazie ai quali sono in grado di sviluppare molto rapidamente il processo di cross-linking per poi depositarsi e aderire potenzialmente anch'essi ad ogni tipo substrato.

I vantaggi principali di questi composti, oltre all'economicità, sono la loro non tossicità e il fatto che la reticolazione, a differenza di quella della dopamina, avviene a pH neutro, rendendo la loro applicazione ancora più semplice.

Per quanto riguarda in particolare l'acido tannico, ogni sua molecola espone diversi gruppi ossidrilici e anelli aromatici multipli che ammettono, rispettivamente, interazioni tramite legame idrogeno e interazioni con molecole idrofobiche rendendolo un composto oltre che economico e non tossico, anche molto versatile [31].

2. Coating antimicrobico con acido tannico

In uno studio di Hun Park e collaboratori [32] viene presentata la capacità di questi composti di creare complessi di coordinazione metallo-organica, chiamati MOC, specialmente con ioni di metalli di transizione o lantanoidi, ed in particolare con il Fe(III). Nell'articolo sono state caratterizzate le superfici funzionalizzate con questi complessi utilizzando sia una deposizione simultanea di Ferro e acido tannico, sia sequenziale tramite la tecnica dello spray coating, come mostrato in figura a lato. L'utilizzo dello ione metallico conferisce una maggiore stabilità al coating e si potrebbe quindi pensare di utilizzare ad esempio gli ioni argento così da conciliare anche la proprietà antibatterica.

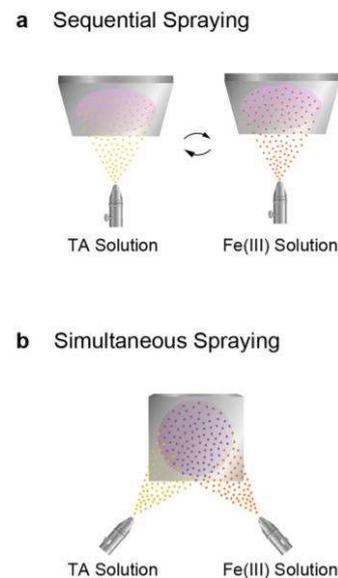
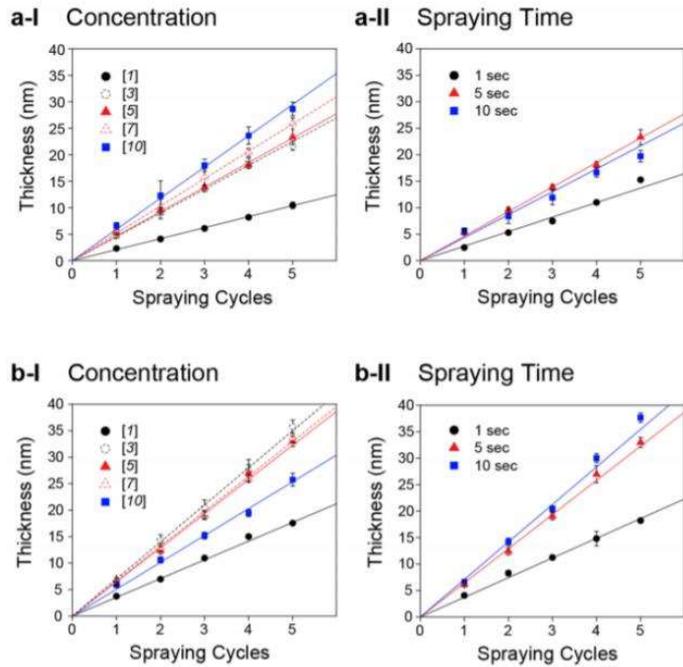


Figura 47. Metodo di coating con deposizione a) sequenziale e b) simultanea

Caratteristiche del coating:



Si è valutato il rivestimento un substrato di silicone ricoperto con oro. La deposizione è stata effettuata con uno spray disponibile in commercio con cicli di 5 secondi ripetute cinque volte.

I risultati dei test ellissometrici mostrano che lo spessore del layer cresce linearmente con il numero dei cicli effettuati, come si può osservare in *Figura 48*.

Figura 48. Spessore ellissometrico dei film ottenuto a diverse concentrazioni della soluzione

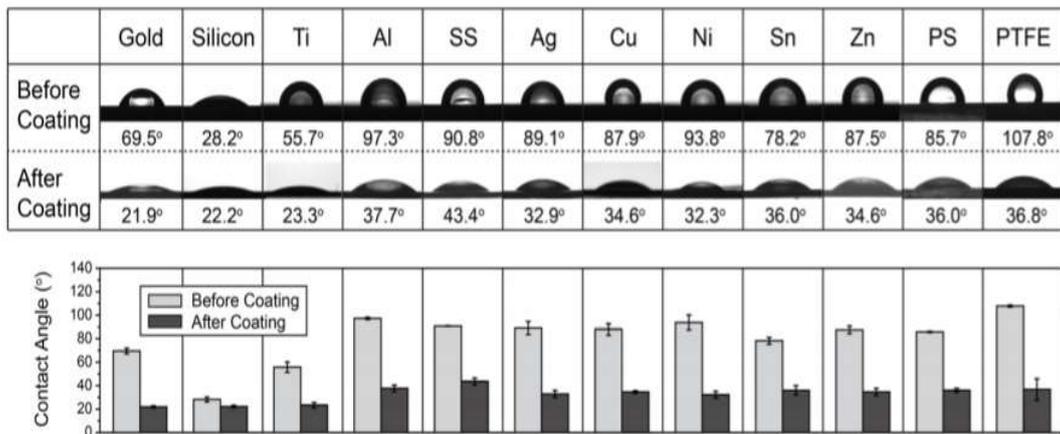


Figura 49. Caratteristiche e proprietà dei rivestimenti di Fe(III)-acido tannico ottenuti per i diversi substrati ottenuti con la tecnica della deposizione simultanea

Nel caso specifico dell'articolo si sono inoltre testati svariati substrati di diversa natura come, oltre all'oro, ossido di titanio, alluminio, argento, polistirene, PTFE e altri ancora. Si osserva che tutti i casi, in seguito al trattamento, i materiali presentino idrofilicità, indipendentemente dalla loro natura di partenza e ciò implica che l'adesione avviene in

maniera indistinta, anche nel caso di materiali come il PTFE che presentano un'energia superficiale molto bassa rendendo più ostiche le eventuali interazioni. I rivestimenti Fe(III)-Acido Tannico MOC, oltre che antimicrobici, si sono dimostrati anche ottimi antinebbia, se depositati su lenti ad esempio di PDMA, e antifungini.

Il complesso metallo-organico, oltre che donare una maggiore stabilità al rivestimento, intensifica le caratteristiche antibatteriche proprie dell'acido tannico. L'utilizzo di ioni metallici è tuttavia stato scartato per il progetto di tesi per motivi prevalentemente economici. Si è voluto tuttavia trovare un prodotto che potesse rafforzare le capacità antibatteriche del coating, che fosse bioispirato e facilmente reperibile a buon mercato per questo motivo, tra le particelle antibatteriche presentate nel paragrafo precedente, si sono selezionati gli oli essenziali[33].

Struttura e proprietà antibatteriche degli Oli Essenziali (OE)

Come anticipato, gli OE si ricavano per distillazione in corrente di vapore da piante, erbe o spezie, presentano un'efficace risposta antibatterica sia nei confronti di batteri Gram-negativi sia dei Gram-positivi, ma a causa della loro complessa composizione non è ancora stato esaurientemente compreso il meccanismo secondo il quale



Figura 50. Distillazione in corrente di vapore di oli essenziali

agiscono. Si sostiene che la loro idrofobicità faciliti la penetrazione nella struttura lipidica della membrana cellulare batterica, ma vi sono sicuramente altri processi che entrano in gioco[34].

L'applicazione di OE è una tecnica che negli ultimi anni ha trovato diverse applicazioni, oltre a quella nel settore del food packaging grazie alla loro commestibilità[35].

La struttura chimica degli oli rende possibile pensare ad una soluzione con l'acido tannico grazie alla presenza dei numerosi gruppi aromatici, così da poter realizzare una deposizione simultanea dei due composti sfruttando le proprietà adesive dell'acido. Tra gli OE presenti in commercio, si è utilizzato quello di Tea Tree puro.

4.3 Sezione sperimentale: realizzazione del rivestimento antibatterico

4.3.1 Introduzione

Per la parte sperimentale della tesi si sono realizzati gli esperimenti nei laboratori di Bioingegneria industriale presso il Politecnico di Torino.

Le ottime proprietà antibatteriche degli oli essenziali, la rapida polimerizzazione e conseguente adesione dell'acido tannico (ATann) e infine la facile reperibilità di entrambe le componenti menzionate, hanno reso possibile ipotizzare la realizzazione di un coating antibatterico applicabile su larga scala. Si è pensato che quest'ultimo possa essere utilizzato per ostacolare l'adesione e la diffusione di agenti patogeni, in condizioni precarie come nel caso di strutture ospedaliere campali. La deposizione del coating potrebbe essere fatta in seguito al montaggio della struttura sulla parte interna del tessuto che costituisce la tenda.

Come substrato modello per l'ottimizzazione della produzione del coating antibatterico sono stati impiegati teli di PVC.

In accordo con i protocolli riportati da Park e collaboratori [17], per la deposizione del rivestimento antibatterico sono stati utilizzati due approcci (*Figura 51*) fatta al fine di valutare la tecnica più efficace e più adatta all'applicazione desiderata: (i) deposizione simultanea di acido tannico e olio essenziale da un'unica soluzione; (ii) deposizione sequenzialmente questo caso con due soluzioni diverse. Per fare ciò si sono andate a valutare, in seguito alla funzionalizzazione, le proprietà del coating tramite diverse caratterizzazioni al fine di constatare la validità e l'efficacia del rivestimento. Sui campioni di PVC si sono effettuate le seguenti analisi:

- Angolo di contatto;
- Spettroscopia Infrarossa in modalità ATR (FTIR-ATR);
- Antibattericità.

Si specifica inoltre che nelle sezioni successive si farà anche riferimento ai primi esperimenti effettuati utilizzando un acido tannico grezzo a base di tannini gallici, che saranno indicati con la sigla TA, usato per la vinificazione. Tale prodotto è stato selezionato poiché, in attesa dell'ATann puro, si potessero iniziare a valutare le caratteristiche della presenza dei gruppi fenolici contenuti in entrambi i composti. I tannini gallici vengono estratti dalle Galle, protuberanze dovute alla risposta immunitaria di alcune specie vegetali agli agenti patogeni e ricche appunto di questi tannini; hanno la

caratteristica di agire con ossigeno molecolare e sono accettori di radicali liberi che possono essere trasformati in gruppi chinone. Queste caratteristiche hanno contribuito alla scelta di questo prodotto per gli studi preliminari.

4.4.2 Materiali

Per la preparazione delle soluzioni si sono utilizzati prodotti facilmente reperibili ad un costo contenuto. L'olio essenziale di Tea Tree (*Tea Tree Oil*, ADEGUA) e l'acido tannico (FARMALABOR, *Farmacisti Associati*) sono stati acquistati in farmacia, mentre i tannini con cui si sono effettuati i primi test si sono acquistati presso un consorzio che fornisce anche prodotti per la vinificazione (*Galla, L'Enotecnica s.r.l.*). L'emulsionante Tween 80 è stato fornito da Sigma-Aldrich (Milano).

Per quanto riguarda la deposizione si è utilizzata una pistola spray reperibile in commercio utilizzata comunemente per la deposizione di vernici e/o solventi alimentata ad aria compressa.

4.4.3 Metodi

1. Preparazione delle soluzioni

Per la deposizione sequenziale si sono realizzate separatamente le soluzioni contenenti OE, TA e ATan per depositarle singolarmente sul substrato. Al fine di osservare la presenza o meno di variazioni nella qualità del coating, si è deciso di realizzare, per tutti i composti, due soluzioni con percentuali di soluto diverse. Le concentrazioni selezionate sono 2 e 6% v/v di OE 2 e al 6% w/v di TA e ATan.

Data la natura oleosa del Tea Tree il Tween 80 è stato utilizzato come emulsionante con una concentrazione di 66,7% rispetto alla massa dell'olio prima di miscelarlo in acqua. Al fine di migliorare l'emulsione la soluzione OE/Tween 80 è stata addizionata all'acqua distillata in gocce utilizzando una micropipetta.

Per la deposizione simultanea si sono utilizzate le medesime concentrazioni sia di ATan (o TA) che di OE. In questo caso il Tween 80 e l'OE, precedentemente miscelati, sono stati gocciolati direttamente nella soluzione di ATan (o TA), sempre utilizzando una micropipetta.

Sia nel caso di soluzione con TA che con ATan, nel momento dell'aggiunta dell'olio si è

creata una deposizione collosa sul fondo del recipiente probabilmente a causa del cambio di solubilità della soluzione. Per ottenere una soluzione più omogenea si è deciso di sottoporre la soluzione ad un processo di centrifuga a 4000 rpm per cinque minuti.

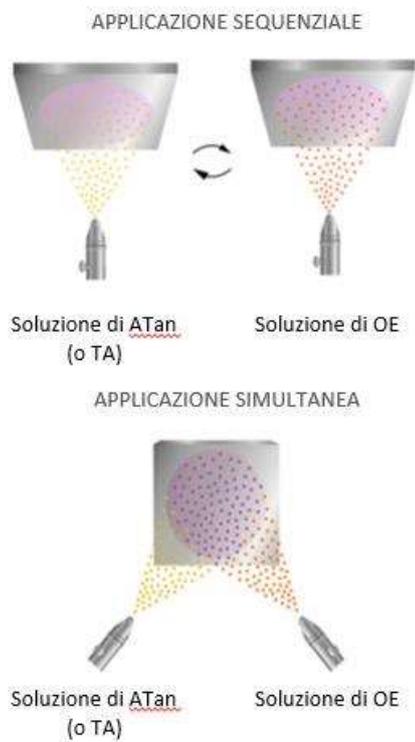


Figura 51. Illustrazione dei diversi metodi di deposizione

2. Deposizione delle soluzioni

Per l'applicazione tramite pistola spray il serbatoio viene riempito manualmente con le diverse soluzioni. La deposizione viene fatta su campioni rettangolari di PVC 12x2 cm. Per le prove si sono realizzati e caratterizzati i campioni a cui si farà riferimento con la seguente notazione:

PVC: CAMPIONE DI CONTROLLO

TA2%: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE CON SOLUZIONE AL 2% DI TA

TA6%: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE CON SOLUZIONE AL 6% DI TA

ATAN2%: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE CON SOLUZIONE AL 2% DI ATAN

ATAN6%: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE CON SOLUZIONE AL 6% DI ATAN

OE2%: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE CON SOLUZIONE AL 2% DI EO

OE6%: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE CON SOLUZIONE AL 6% DI EO

SEQ 2% EO-2% TA: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE SEQUENZIALE CON SOLUZIONE AL 2% DI EO E DI TA

SEQ 6% EO-6% TA: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE SEQUENZIALE CON SOLUZIONE AL 6% DI EO E DI TA

SEQ 2% EO-2% ATAN: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE SEQUENZIALE CON SOLUZIONE AL 6% DI EO E DI ATAN

SEQ 6% EO-6% ATAN: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE SEQUENZIALE CON SOLUZIONE AL 6% DI EO E DI TA

SM 2% EO-ATAN: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE SIMULTANEA CON SOLUZIONE AL 6% DI EO E DI ATAN

SM 6% EO-ATAN: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE SIMULTANEA CON SOLUZIONE AL 6% DI EO E DI ATAN

SM 2% EO-TA: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE SIMULTANEA CON SOLUZIONE AL 6% DI EO E DI TA

SM 6% EO-TA: PVC SOTTOPOSTO A DEPOSIZIONE SIMULTANEA CON SOLUZIONE AL 6% DI EO E DI TA

Ogni campione in seguito ad una deposizione viene lasciato asciugare per qualche minuto a temperatura ambiente e poi sottoposto ad una deposizione successiva. Questo processo viene ripetuto per cinque volte su ogni campione.

3. Caratterizzazione dei campioni

Le caratterizzazioni sono state fatte nei laboratori presso il Politecnico utilizzando le tecniche presentate in seguito.

Per valutare l'idrofobicità della superficie si è utilizzato l'angolo di contatto KRUSS Drop Shape Analyzer Per ogni campione sono state realizzate sei misure, così da poterle mediare in seguito, per ottenere un valore il più possibile veritiero dell'angolo. Ognuna di esse è stata realizzata depositando manualmente sul campione una goccia di acqua distillata con volume di $5 \mu\text{L}$ misurata tramite il software xxxx. I dati sono stati in seguito riportati in Excel al fine di realizzare i grafici riportati nel paragrafo successivo.

Per la valutazione della composizione superficiale si è utilizzata l'analisi FT-IR in modalità ATR con lo strumento xxxxx; questo possiede una risoluzione di 4 cm^{-1} , è dotato di un cristallo in diamante e riporta le lunghezze d'onda comprese tra 6000 e 400 cm^{-1} . Per le prove si sono realizzate 32 scansioni per ogni campione e i dati acquisiti sono stati poi riportati in MATLAB al fine di realizzare i grafici presentati nel paragrafo successivo.

4.4.4 Risultati e discussioni

Per ogni campione si sono realizzate le caratterizzazioni, con angolo di contatto e FT-IR per valutare il successo della deposizione. Si è valutata inoltre anche la stabilità della deposizione tramite la ripetizione delle prove menzionate dopo 15 giorni dalle prime misure. Vengono in seguito riportati i risultati ottenuti

I) Angolo di contatto

Le misure ottenute sono state riportate nel grafico mostrato in *Figura 52*. In tutte le prove effettuate si ha una diminuzione del valore di angolo di contatto rispetto al campione di controllo. Si passa da circa 80° del PVC puro ad un minimo di 32° per il campione funzionalizzato con OE2%. La variazione dell'angolo e può essere ricondotta all'avvenuta deposizione del coating; in tutti i casi, avendo una diminuzione dell'angolo, si è ottenuta una superficie più idrofila rispetto al controllo. Si osserva che dato il metodo di deposizione, volutamente non eccessivamente accurato, il rivestimento potrebbe non essere completamente omogeneo e ciò comporta un valore relativamente ampio della barra di errore riportata nel grafico, eccetto nel caso del campione di controllo.

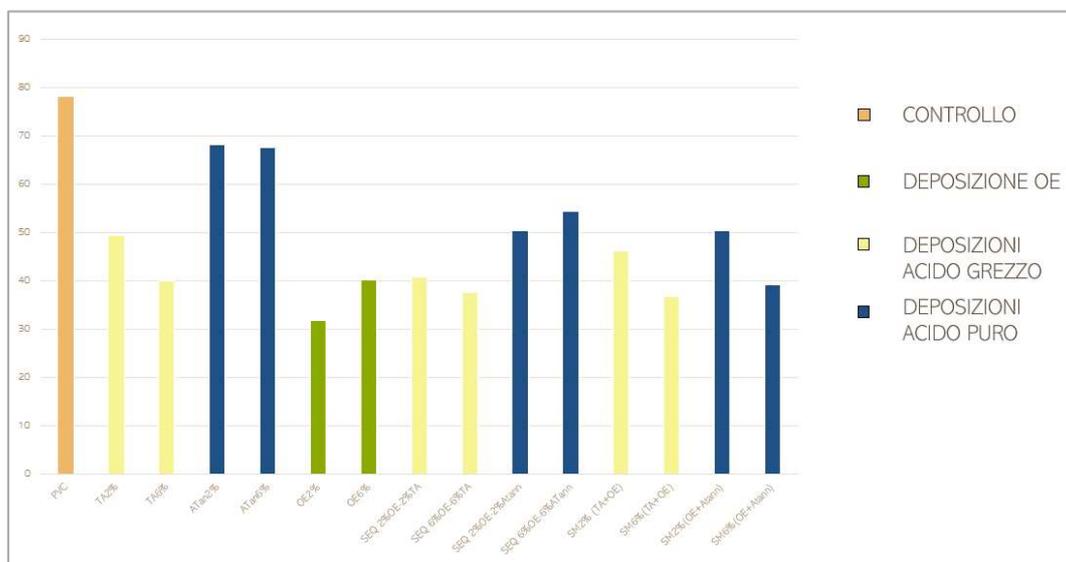


Figura 52. Istogramma angolo di contatto medio calcolato su tutti i campioni

Si osserva inoltre che il valore più simile al campione di controllo si ottiene con ATan. Questo può essere dovuto al fatto che per questa deposizione la componente utilizzata sia più pura generando una soluzione più omogenea che permette di ottenere un coating maggiormente distribuito ed uniforme. Ciò è anche osservabile dalle barre di errore, che in questo caso risultano essere più piccole rispetto agli altri campioni, a dimostrazione della minore variabilità della deposizione realizzata.

II) Spettroscopia FT-IR

Gli spettri sono stati ottenuti in un range di lunghezze d'onda compreso tra 6000 e 400 cm^{-1} . Da tutte le misure è stato sottratto background calcolato, prima di effettuare le

le analisi sui campioni, misurando la trasmittanza dell'aria. Gli spettri ottenuti per i diversi campioni sono stati riportati in MATLAB R2021b. I grafici sono stati sovrapposti e raffigurati insieme al fine di poterne osservare le differenze rispetto al campione di controllo.

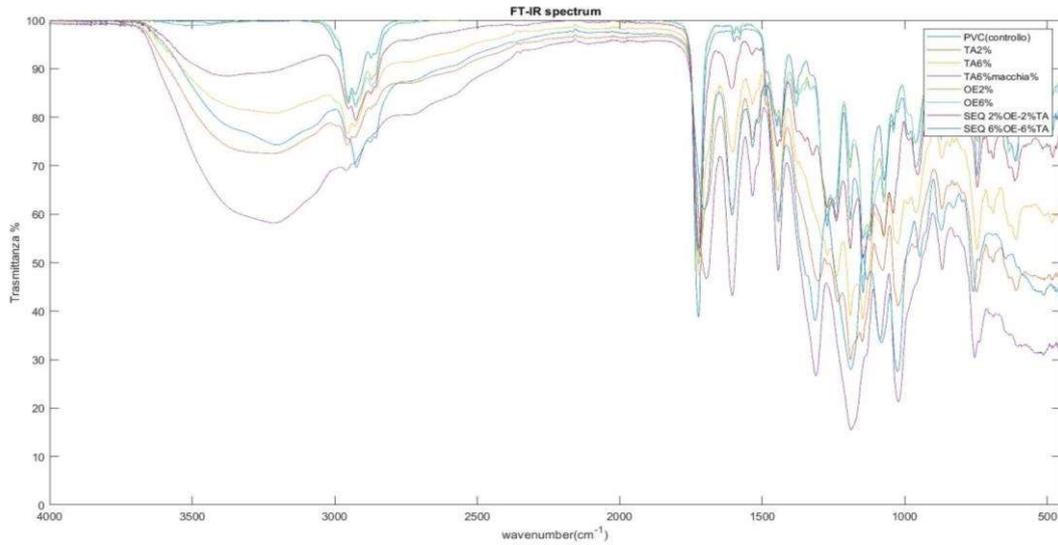


Figura 53. Sovrapposizione degli spettri della superficie dei campioni

Si sono esaminati in letteratura [36][37] articoli per andare attribuire le bande di assorbimento ottenute per i diversi campioni. Vengono in seguito riportati i dettagli riguardanti le deposizioni di soluzioni al 6% di soluto.

- Campioni funzionalizzati con TA

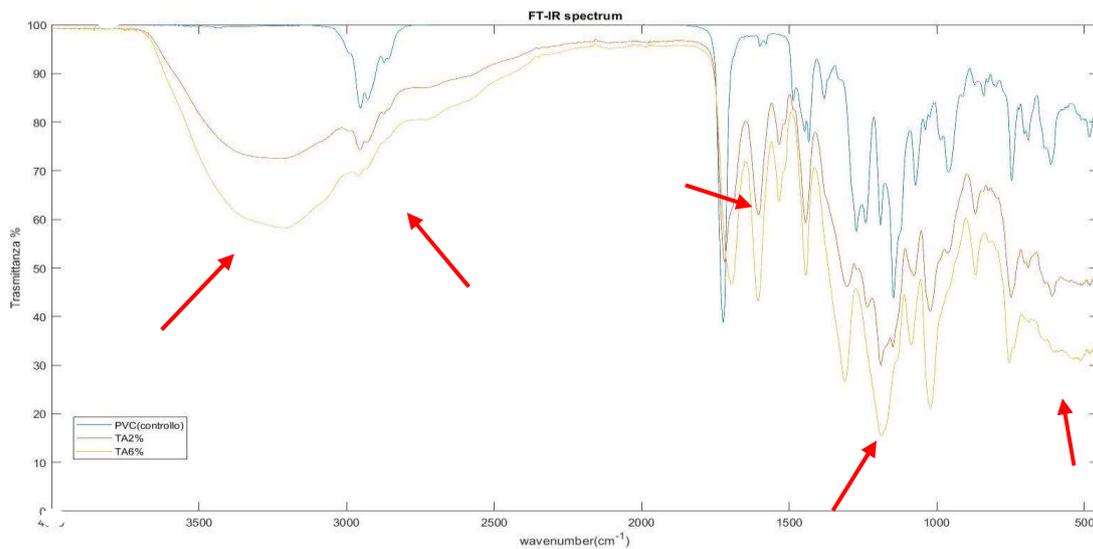


Figura 542. Spettri della superficie dei campioni di controllo e con TA2% e TA6%

Picchi spettro [38]

Tabella 13. Picchi dello FT-IR realizzati sul campione funzionalizzato con TA2% e TA6%

PICCHI	LEGAME CARATTERISTICO
GRANDE ASSORBIMENTO TRA 3700-3000 cm^{-1}	GRUPPI OSSIDRILE -OH VIBRAZIONI DI STRETCHING E LEGAMI IDROGENO TRA I GRUPPI E PRESENZA GRUPPI ALCHILICI;
PICCO ACUTO A 2966 cm^{-1}	VIBRAZIONI SIMMETRICHE E ANTISIMMETRICHE DELLE VIBRAZIONI DI STRETCHING DI CH_2 E CH_3 RISPETTIVAMENTE;
PICCO ACUTO A 2883 cm^{-1}	PRESENZA DEL GRUPPO ALCANO C-H;
PICCO INTORNO A 1700 cm^{-1}	STRETCHING DEL DOPPIO LEGAME C=O DOVUTO ALLA PRESENZA NELL'ACIDO DI ESTERI AROMATICI;
PICCHI TRA 1500-1400 cm^{-1}	VIBRAZIONI DI DEFORMAZIONE DEI LEGAMI C-C;
PICCO INTORNO A 1445 cm^{-1}	VIBRAZIONE DEI GRUPPI CARBONIO-CARBONIO AROMATICO;
PICCO TRA 1300-1100 cm^{-1}	STRETCHING DEL LEGAME C-O;
PICCO A 754 cm^{-1}	VIBRAZIONE DI DISTORSIONE DEL DOPPIO LEGAME TRA GLI ATOMI DI CARBONIO, C=C, PRESENTI NEGLI ANELLI BENZENICI.

- Campioni funzionalizzati con ATan

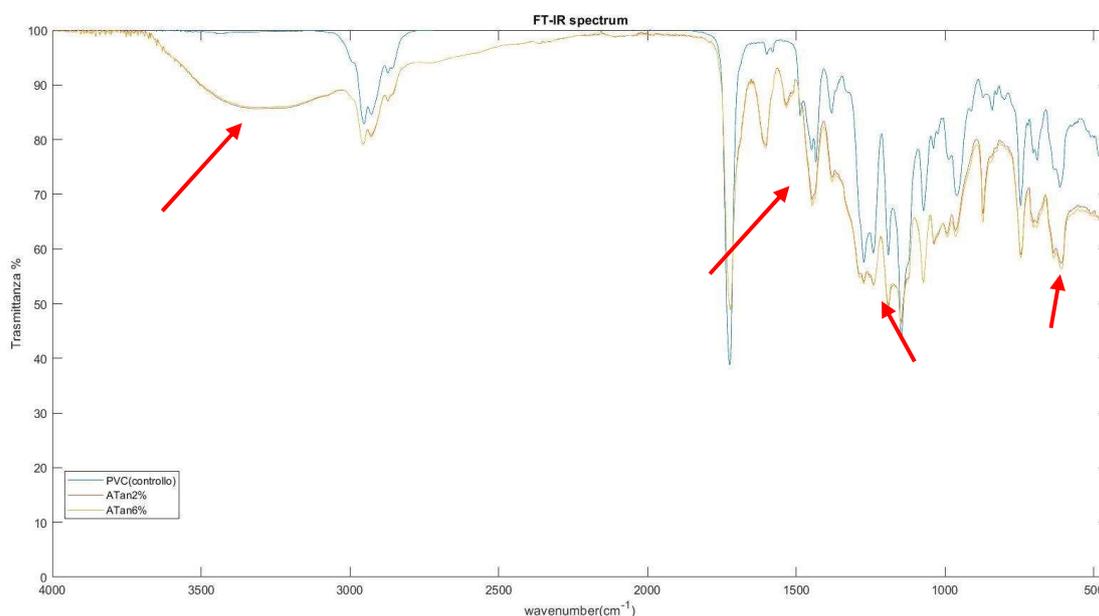


Figura 543. Spettri della superficie dei campioni di controllo e con ATan 2% e ATan 6%

Picchi spettro [38]

Tabella 14. Picchi dello FT-IR realizzati sul campione con ATan 2% e ATan 6%

PICCHI	LEGAME CARATTERISTICO
GRANDE ASSORBIMENTO TRA 3700-3000 cm ⁻¹	GRUPPI OSSIDRILE -OH VIBRAZIONI DI STRETCHING E LEGAMI IDROGENO TRA I GRUPPI E PRESENZA GRUPPI ALCHILICI;
PICCO ACUTO A 2966 cm ⁻¹	VIBRAZIONI SIMMETRICHE E ANTISIMMETRICHE DELLE VIBRAZIONI DI STRETCHING DI CH ₂ E CH ₃ RISPETTIVAMENTE;
PICCO ACUTO A 2883 cm ⁻¹	PRESENZA DEL GRUPPO ALCANO C-H;
PICCO A 1609 cm ⁻¹	STRETCHING DEL DOPPIO LEGAME C=O DOVUTO ALLA PRESENZA NELL'ACIDO DEL GRUPPO AROMATICO;
PICCHI TRA 1500-1400 cm ⁻¹	VIBRAZIONI DI DEFORMAZIONE DEI LEGAMI C-C RICONDUCEBILI AL GRUPPO FENOLO;

PICCO INTORNO A 1445 cm^{-1}	VIBRAZIONE DEI GRUPPI CARBONIO-CARBONIO AROMATICO;
PICCO TRA 1300-1100 cm^{-1}	STRETCHING DEL LEGAME C-O;
PICCO A 754 cm^{-1}	VIBRAZIONE DI DISTORSIONE DEL DOPPIO LEGAME TRA GLI ATOMI DI CARBONIO, C=C, PRESENTI NEGLI ANELLI BENZENICI.

Le analisi FT-IR effettuate sui campioni funzionalizzati con le soluzioni a diversa concentrazione sono pressoché identiche. Ciò indica che in questo caso il risultato della funzionalizzazione è indipendente dalla concentrazione.

Si osserva in conclusione che la funzionalizzazione con TA e con ATan da risultati piuttosto simili per quanto riguarda l'analisi FT-IR, in quanto sono presenti pressoché gli stessi picchi che implicano la presenza dei medesimi componenti. In entrambi i casi risulta quindi un'avvenuta funzionalizzazione del substrato con la soluzione di interesse.

- Campioni funzionalizzati con OE

Nell'immagine a lato si osserva che nel caso di soluzione contenete unicamente olio essenziali, lo spettro del campione funzionalizzato coincide pressoché con quello del campione di controllo. Da questa informazione si deduce che probabilmente il prodotto depositato non ha aderito o è evaporato rapidamente.

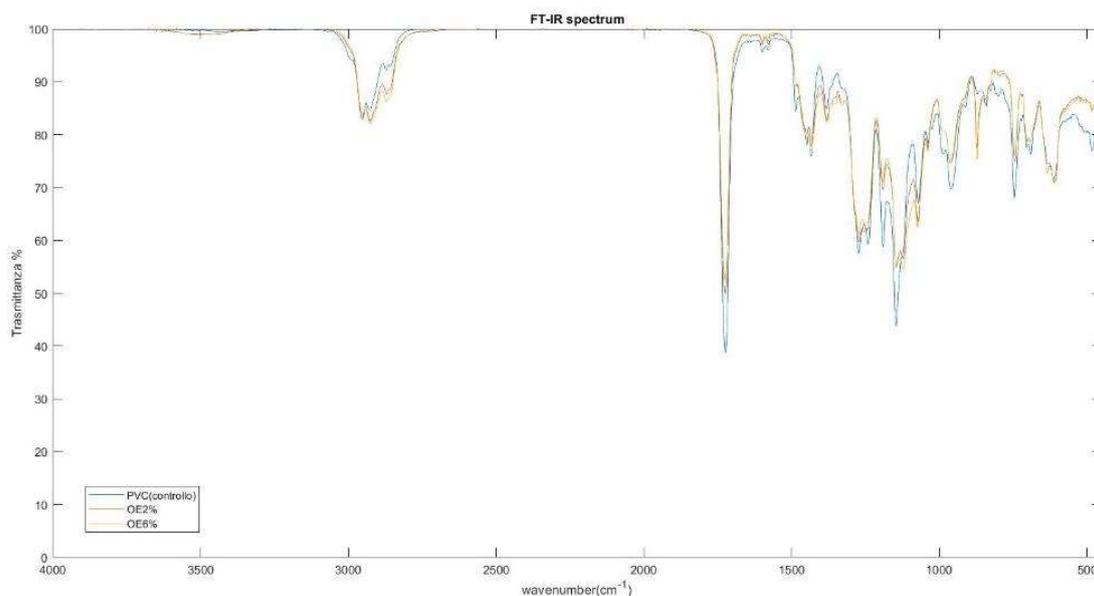


Figura 55. Spettri della superficie dei campioni di controllo e con OE2% e OE6%

- Campioni funzionalizzati con deposizione sequenziale di TA+OE

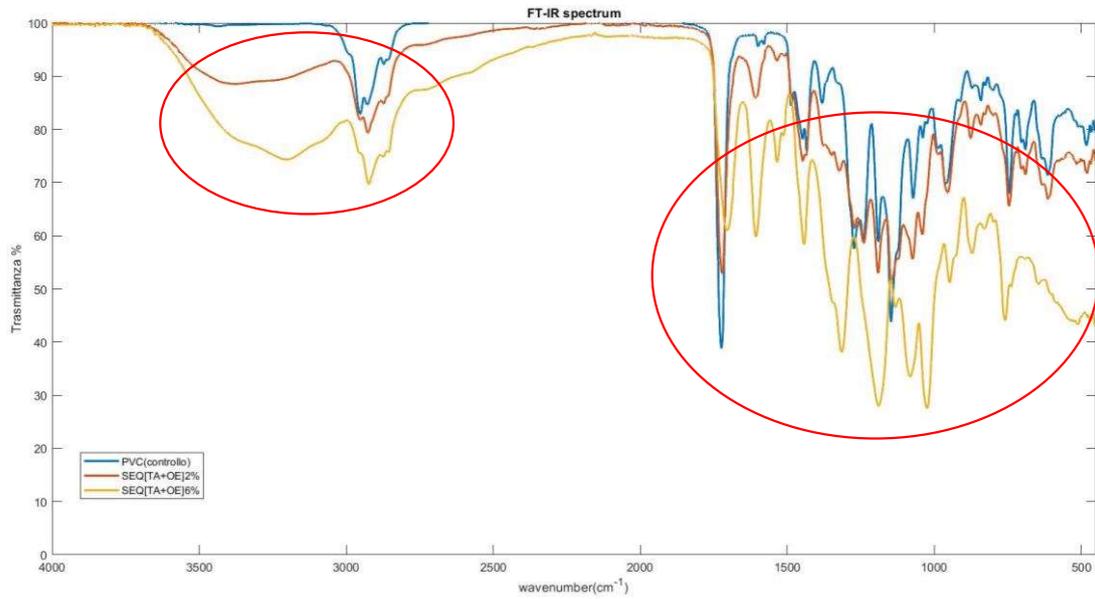


Figura 56. Sovrapposizione degli spettri della superficie dei campioni funzionalizzati con deposizione sequenziale di TA+OE 2% e TA+OE 6%

Picchi spettro [37]

Tabella 15. Picchi dello FT-IR realizzati sui campioni con deposizione sequenziale di TA+EO 2 e 6%

PICCHI	LEGAME CARATTERISTICO
GRANDE ASSORBIMENTO TRA 3700-3000 cm^{-1}	GRUPPI OSSIDRILE -OH VIBRAZIONI DI STRETCHING E LEGAMI IDROGENO TRA I GRUPPI E PRESENZA GRUPPI ALCHILICI;
PICCHI STRETTI TRA 2924 E 2853 cm^{-1}	IL PRIMO PICCO È RIFERITO ALLO STRETCHING DEL LEGAME C-H INSATURO MENTRE QUELLI SUCCESSIVI ALLO STRETCHING DEL LEGAME C-H SATURO;
PICCO ACUTO A 2883 cm^{-1}	PRESENZA DEL GRUPPO ALCANO C-H;
PICCO INTORNO A 1700 cm^{-1}	STRETCHING DEL DOPPIO LEGAME C=O DOVUTO ALLA PRESENZA NELL'ACIDO DI ESTERI AROMATICI;

PICCHI ACCENTUATI NELLA ZONA COMPRESA TRA 1600 E 600 cm^{-1}

I PICCHI INTORNO AL 1600 cm^{-1} SONO DOVUTI ALLA DEFORMAZIONE ASSIALE DEL LEGAME C=C CARATTERISTICO DEI COMPOSTI AROMATICI, I DUE PICCHI TRA 1440 E 1310 cm^{-1} SONO CARATTERISTICI DEL PIEGAMENTO DEL LEGAME C-H, MENTRE VERSO 1300-1200 cm^{-1} SI HA LA DEFORMAZIONE ASSIALE RIFERITA AL GRUPPO C-O. TRA 1000 E 700 cm^{-1} , INFINE SI IDENTIFICANO LE DEFORMAZIONI ANGOLARI DOVUTE ALL'USCITA DAL PIANO DEI GRUPPI DEGLI ANELLI AROMATICI.

Nel caso della deposizione sequenziale è possibile vedere l'avvenuta adesione dell'olio sul PVC funzionalizzati con l'acido tannico; sono infatti presenti picchi in comune con le analisi effettuate sui campioni funzionalizzati con le due soluzioni singole come, ad esempio, la presenza dei picchi accentuati tra 3000 e 2800 cm^{-1} relativi allo stretching del legame C-H, sia saturo che insaturo, caratteristico dell'olio essenziale e la presenza del picco a 1700 cm^{-1} dovuta allo stretching del doppio legame C=O tipico degli esteri aromatici presenti nell'acido.

Fatta eccezione per i campioni funzionalizzati con OE, dall'analisi FT-IR si osserva che nel caso di soluzioni con soluto al 6% i grafici presentano picchi più accentuati, tuttavia dal momento che questo tipo di analisi non è quantitativa ma bensì qualitativa, ci si sofferma in generale sulla presenza o meno di picchi piuttosto che la loro ampiezza.

- Campioni funzionalizzati con deposizione simultanea TA+OE

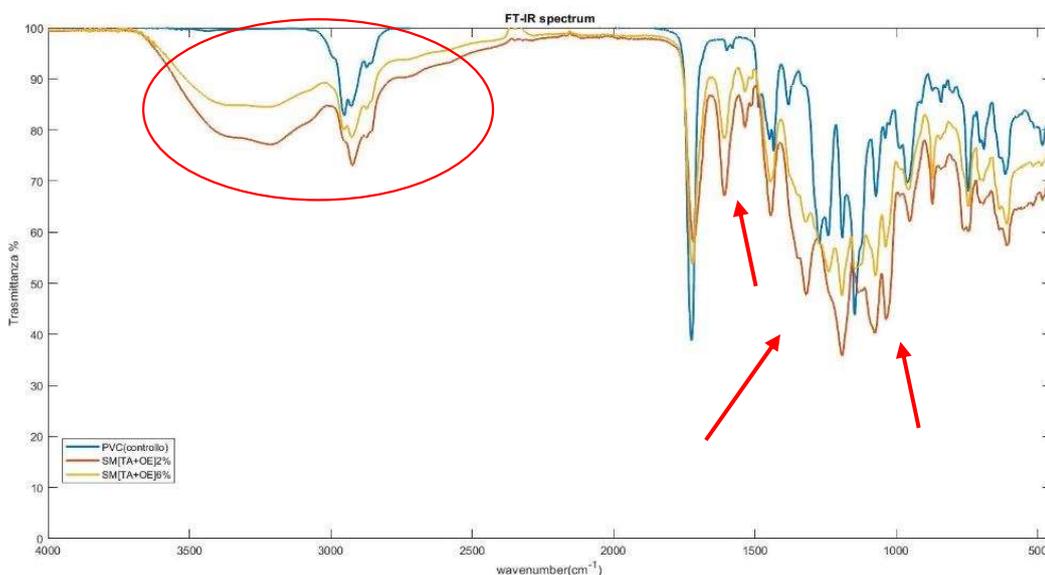


Figura 57. Sovrapposizione degli spettri della superficie dei campioni funzionalizzati con deposizione sequenziale con acido tannico puro e olio essenziale

Picchi spettrometro

Tabella 16 . Picchi dello FT-IR realizzati sui campioni con deposizione simultanea di TA +EO 2 e 6%

PICCHI	LEGAME CARATTERISTICO
GRANDE ASSORBIMENTO TRA 3700-3000 cm^{-1}	GRUPPI OSSIDRILE -OH VIBRAZIONI DI STRETCHING E LEGAMI IDROGENO TRA I GRUPPI E PRESENZA GRUPPI ALCHILICI;
PICCO ACUTO A 2966 cm^{-1} ASSOCIATO	VIBRAZIONI SIMMETRICHE E ANTISIMMETRICHE DELLE VIBRAZIONI DI STRETCHING DI -C-H DI CH ₂ E CH ₃ RISPETTIVAMENTE;
PICCHI STRETTI TRA 2924 E 2853 cm^{-1}	IL PRIMO PICCO È RIFERITO ALLO STRETCHING DEL LEGAME C-H INSATURO MENTRE QUELLI SUCCESSIVI ALLO STRETCHING DEL LEGAME C-H SATURO;
PICCO INTORNO A 1700 cm^{-1}	STRETCHING DEL DOPPIO LEGAME C=O;
PICCHI TRA 1500-1400 cm^{-1}	VIBRAZIONI DI DEFORMAZIONE DEI LEGAMI C-C;

PICCO INTORNO A 1445 cm^{-1}	VIBRAZIONE DEI GRUPPI CARBONIO-CARBONIO AROMATICO;
PICCO TRA 1300-1100 cm^{-1}	STRETCHING DEL LEGAME C-O;
PICCO A 754 cm^{-1}	VIBRAZIONE DI DISTORSIONE DEL DOPPIO LEGAME TRA GLI ATOMI DI CARBONIO, C=C, PRESENTI NEGLI ANELLI BENZENICI.

- Campioni funzionalizzati con deposizione sequenziale di ATan+OE

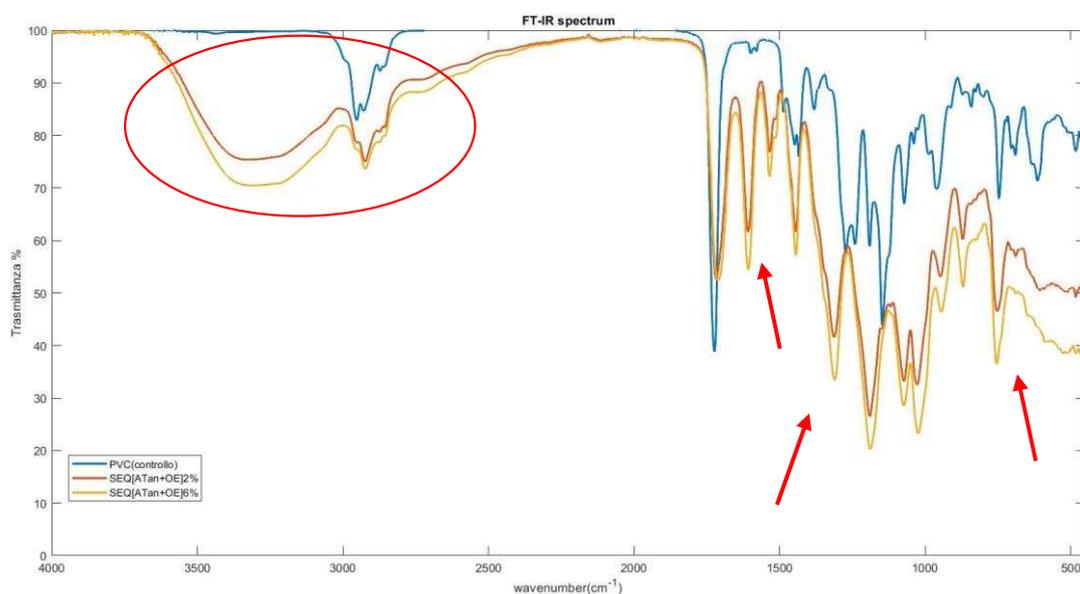


Figura 58. Sovrapposizione degli spettri della superficie dei campioni funzionalizzati con deposizione sequenziale con acido tannico puro e olio essenziale

Picchi spettrometro

Tabella 17. Picchi dello FT-IR realizzati sui campioni con deposizione sequenziale di ATan +EO 2 e 6%

PICCHI	LEGAME CARATTERISTICO
GRANDE ASSORBIMENTO TRA 3700-3000 cm^{-1}	GRUPPI OSSIDRILE -OH VIBRAZIONI DI STRETCHING E LEGAMI IDROGENO TRA I GRUPPI E PRESENZA GRUPPI ALCHILICI;
PICCO ACUTO A 2966 cm^{-1} ASSOCIATO	VIBRAZIONI SIMMETRICHE E ANTISIMMETRICHE DELLE VIBRAZIONI DI STRETCHING DI -C-H DI CH ₂ E CH ₃ RISPETTIVAMENTE;

PICCHI STRETTI TRA 2924 E 2853 cm^{-1}	IL PRIMO PICCO È RIFERITO ALLO STRETCHING DEL LEGAME C-H INSATURO MENTRE QUELLI SUCCESSIVI ALLO STRETCHING DEL LEGAME C-H SATURO;
PICCO INTORNO A 1700 cm^{-1}	STRETCHING DEL DOPPIO LEGAME C=O;
PICCHI TRA 1500-1400 cm^{-1}	VIBRAZIONI DI DEFORMAZIONE DEI LEGAMI C-C;
PICCO INTORNO A 1445 cm^{-1}	VIBRAZIONE DEI GRUPPI CARBONIO-CARBONIO AROMATICO;
PICCO TRA 1300-1100 cm^{-1}	STRETCHING DEL LEGAME C-O;
PICCO A 754 cm^{-1}	VIBRAZIONE DI DISTORSIONE DEL DOPPIO LEGAME TRA GLI ATOMI DI CARBONIO, C=C, PRESENTI NEGLI ANELLI BENZENICI.

- Campioni funzionalizzati con deposizione simultanea di ATan+OE

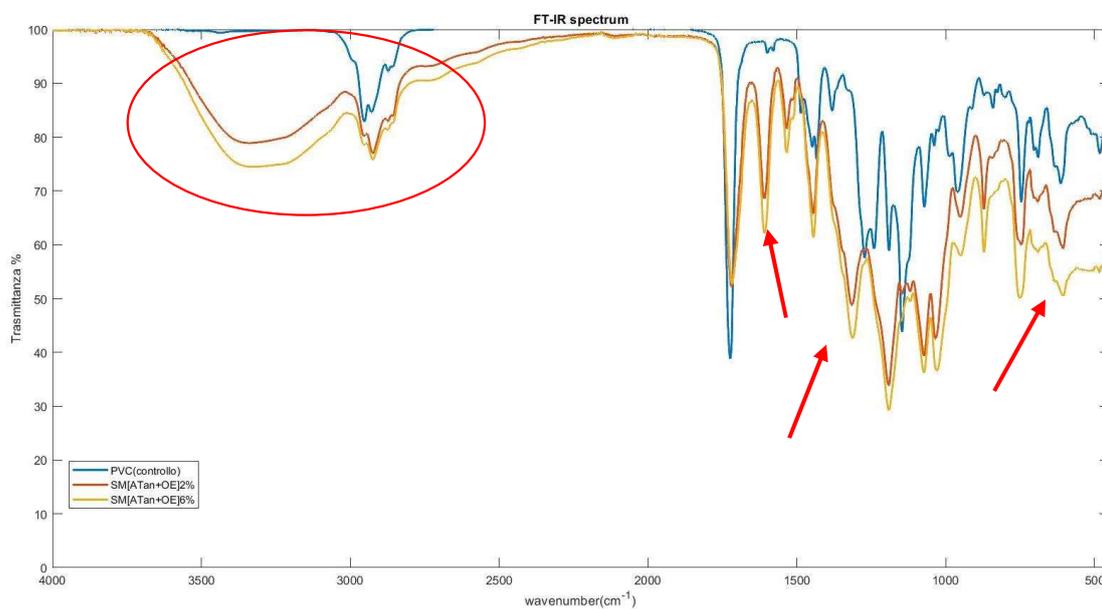


Figura 59. Sovrapposizione degli spettri della superficie dei campioni funzionalizzati con deposizione simultanea ATan+OE 2 e 6%

Picchi spettroscopio

Tabella 18. Picchi dello FT-IR realizzati sul campione con deposizione simultanea ATan+OE al 2 e 6%

PICCHI	LEGAME CARATTERISTICO
GRANDE ASSORBIMENTO TRA 3700-3000 cm^{-1}	GRUPPI OSSIDRILE -OH VIBRAZIONI DI STRETCHING E LEGAMI IDROGENO TRA I GRUPPI E PRESENZA GRUPPI ALCHILICI;
PICCO ACUTO A 2966 cm^{-1} ASSOCIATO	VIBRAZIONI SIMMETRICHE E ANTISIMMETRICHE DELLE VIBRAZIONI DI STRETCHING DI -C-H DI CH ₂ E CH ₃ RISPETTIVAMENTE;
PICCHI STRETTI TRA 2924 E 2853 cm^{-1}	IL PRIMO PICCO È RIFERITO ALLO STRETCHING DEL LEGAME C-H INSATURO MENTRE QUELLI SUCCESSIVI ALLO STRETCHING DEL LEGAME C-H SATURO;
PICCO INTORNO A 1700 cm^{-1}	STRETCHING DEL DOPPIO LEGAME C=O;
PICCHI TRA 1500-1400 cm^{-1}	VIBRAZIONI DI DEFORMAZIONE DEI LEGAMI C-C;
PICCO INTORNO A 1445 cm^{-1}	VIBRAZIONE DEI GRUPPI CARBONIO-CARBONIO AROMATICO;
PICCO TRA 1300-1100 cm^{-1}	STRETCHING DEL LEGAME C-O;
PICCO A 754 cm^{-1}	VIBRAZIONE DI DISTORSIONE DEL DOPPIO LEGAME TRA GLI ATOMI DI CARBONIO, C=C, PRESENTI NEGLI ANELLI BENZENICI.

Ciò che si può dire dai risultati di queste analisi qualitative è che non ci sono differenze rilevanti né i tra i metodi di deposizione né dall'utilizzo di ATan piuttosto che di TA in quanto l'analisi FT-IR nel quattro differenti casi, SEQ[TA+OE], SEQ[ATann+OE], SM[TA+OE] e SM[ATann+OE], risulta pressoché analoga.

Per la scelta della tecnica quindi si seleziona quella simultanea in quanto si riduce il tempo di deposizione andando a diminuire la durata complessiva del processo di deposizione.

III) Stabilità

Per quanto riguarda la stabilità dei coating realizzati si è deciso di ripetere le misure I) e II) a distanza tre settimane per osservare o meno variazioni della qualità del rivestimento. Il periodo di tempo è stato selezionato pari a 21 giorni poiché ritenuto sufficiente in quanto le strutture ospedaliere campali generalmente sono allestite per una durata pari o inferiore a questo periodo temporale. Per quanto riguarda l'angolo di contatto, come si può osservare in *Figura 60* è aumentato in tutti i casi, eccetto che per SM2%[TA+OE], e ciò implica che probabilmente una parte del coating sia evaporato; tuttavia, si nota che nel caso di substrati soggetti alla deposizione sequenziale si ha un aumento ridotto dell'angolo che fa sperare che il rivestimento ottenuto sia in parte rimasto pressoché intatto.

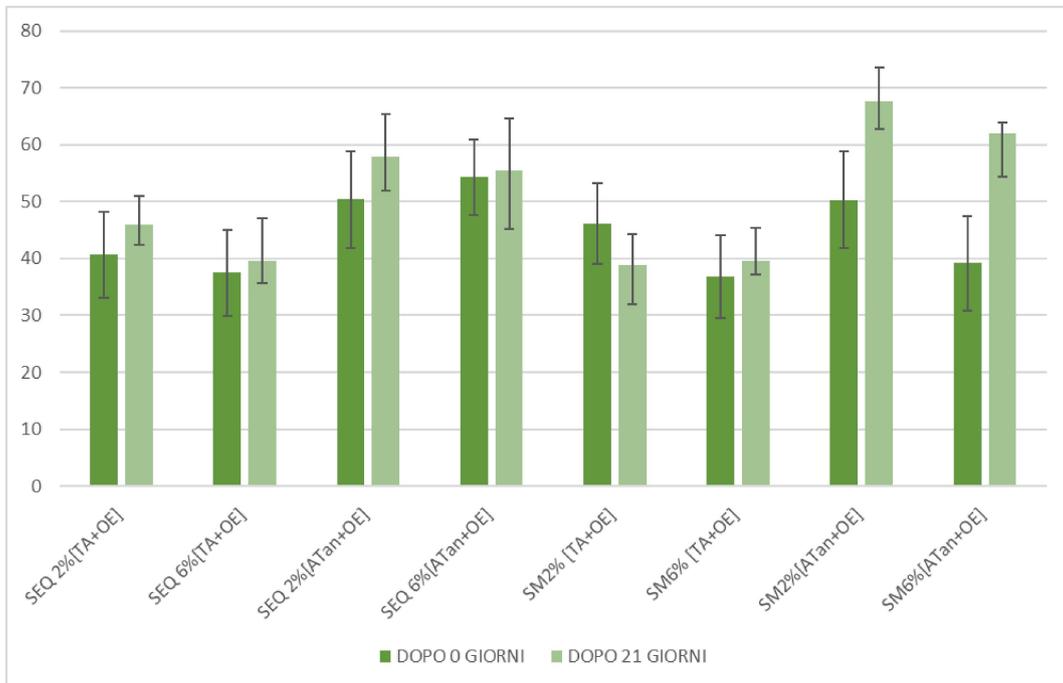


Figura 60. Istogramma degli angoli di contatto medi dopo 0 e 21 giorni dalla deposizione

Si sono quindi effettuate le analisi FT-IR per verificare se anche la composizione chimica superficiale si sia mantenuta intatta. Dai grafici ottenuti è possibile osservare che quest'ultima si è mantenuta pressoché uguale dal momento che i grafici ottenuti e riportati in seguito mostrano i medesimi picchi.

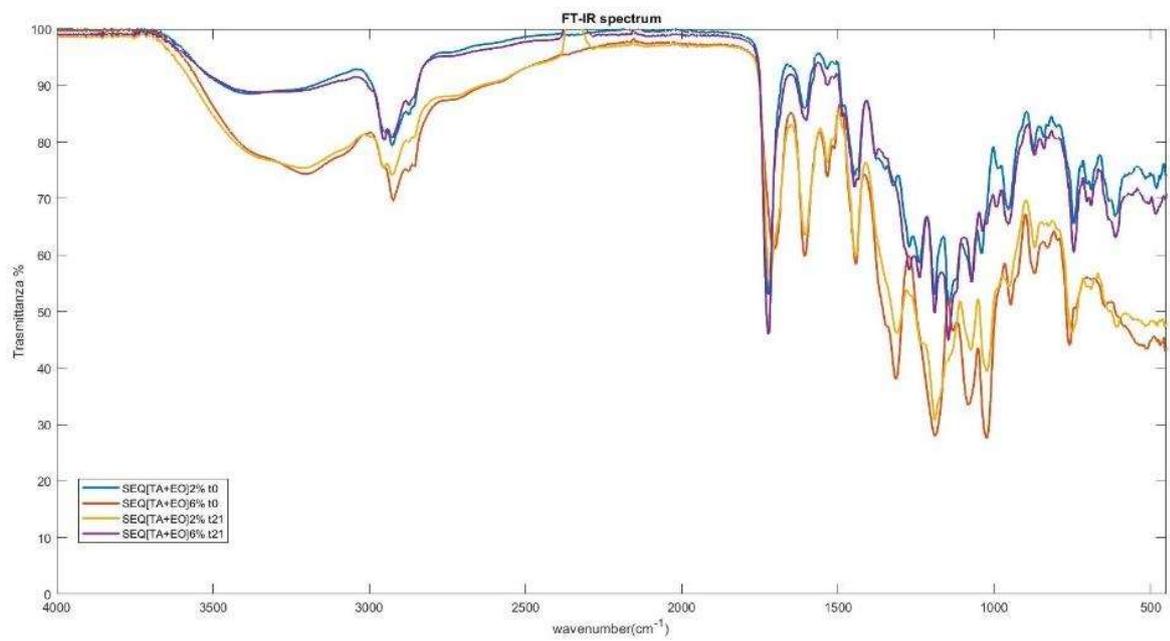


Figura 61. Analisi di stabilità su campioni con deposizione sequenziale di TA+OE

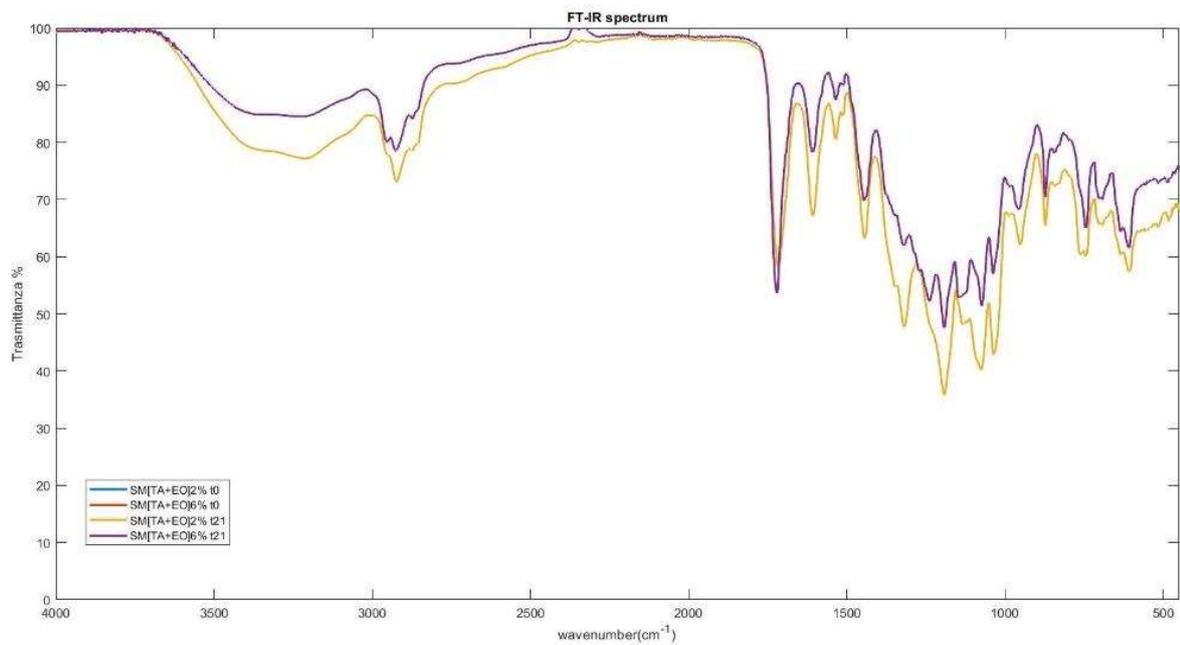


Figura 62. Analisi di stabilità su campioni con deposizione simultanea di TA+OE

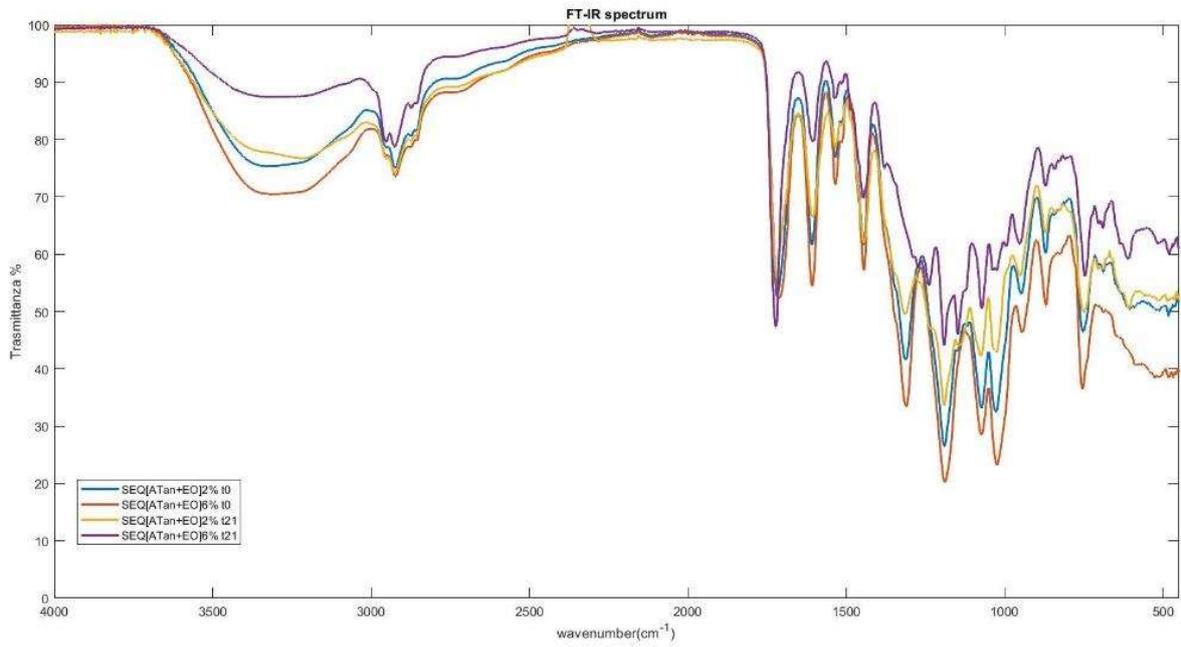


Figura 63. Analisi di stabilità su campioni con deposizione sequenziale di ATan+OE

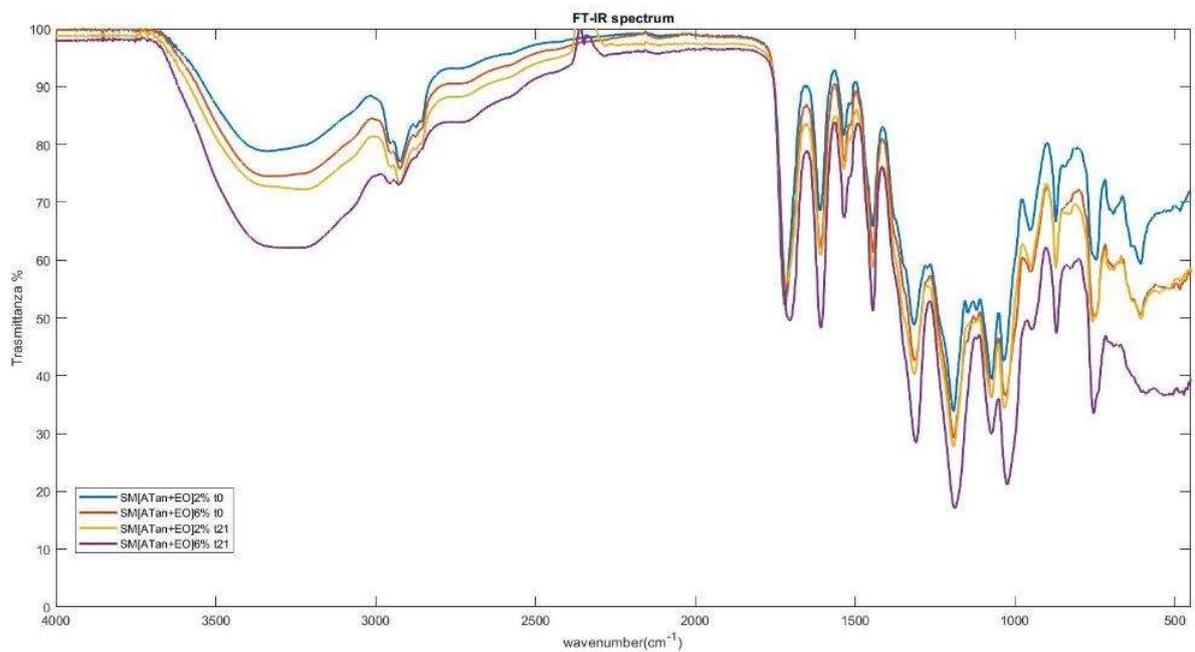


Figura 64. Analisi di stabilità su campioni con deposizione simultanea di ATan+OE

CAPITOLO 5

CONCLUSIONI

Nel corso della tesi si è sviluppata la progettazione per la realizzazione di una tenda tensegrale adibita a cure mediche e ricovero da utilizzare in caso di grandi emergenze. La scelta strutturale dei sistemi tensegrali è stata fatta al fine di ottenere una struttura che, rispetto alle attuali tecnologie utilizzate, andasse a minimizzare il peso proprio della tenda così da diminuirne l'ingombro e il costo di trasporto. Dai dati ottenuti, la struttura presenta un'area utile di 40 mq ed ha un peso complessivo, considerando anche i teli di copertura, di 94 kg. Quest'ultimo è leggermente al di sotto della media dei pesi delle strutture che si sono trovate consultando gli attuali prodotti presenti in commercio, i quali si aggirano intorno a 115/120 kg. Se si pensa inoltre che, nella maggior parte dei casi, i presidi che si realizzano sono formati da più moduli, allora l'ottimizzazione in termini di peso risulta rilevante. La progettazione del telaio della tenda è stata realizzata tramite un programma implementato in MATLAB, in cui si è sviluppata l'analisi strutturale del telaio andando ad imporre vincoli dovuti alla natura differente dei membri che compongono il reticolo, assumendo circa pari a zero la rigidità degli elementi in tensione, siccome questi risultano allentati nel caso in cui si trovino sotto sforzo di compressione.

L'ultima sezione del programma è dedicata alla verifica delle condizioni di sicurezza in maniera separata per le diverse tipologie di elementi; le aste in compressione devono infatti soddisfare la condizione del carico critico di Eulero al fine di evitare l'incurvamento che potrebbe portare alla perdita di equilibrio della struttura. I cavi invece devono rispettare la condizione sulla tensione di snervamento che dipende dalle caratteristiche del materiale di cui sono composti gli elementi.

Sarebbe interessante, come sviluppo futuro, andare a valutare l'applicazione di pannelli solari flessibili sulla membrana esterna della tenda in modo tale da contribuire al fabbisogno energetico necessario per alimentare gli strumenti utilizzati all'interno della stessa.

Dopo aver progettato la struttura, si è passati al secondo punto chiave della tesi. Il problema della resistenza agli antibiotici sviluppata da molte specie batteriche ha costituito l'ispirazione per questa seconda parte del lavoro. Si è pensato che potesse essere utile realizzare una soluzione antibatterica da depositare sulla copertura interna della tenda, nel momento in cui quest'ultima sia stata montata completamente, tramite

il metodo della funzionalizzazione superficiale; questa tecnica è molto utile in ambito ingegneristico in quanto consente di conferire ai substrati la caratteristica desiderata.

Attualmente, si utilizzano principalmente due approcci per rendere i substrati antibatterici: il primo prevede di andare a lavorare sulla micro e nano strutturazione durante la fase di progettazione del substrato. In questo modo si rende la superficie antiadesiva o batterio-repellente al fine di evitare l'adesione del biofilm; si così ottengono le superfici note come *antibiofouling*. Il secondo approccio si basa sulla realizzazione di superfici *battericide* sulle quali i batteri riescono a aderire, tuttavia la presenza dei cosiddetti biocidi da contatto né determina la morte. Questi vengono ancorati al substrato durante la funzionalizzazione e l'azione battericida, che può anche essere dovuta al rilascio di antimicrobici, ha la caratteristica di poter avvenire anche a distanza moderata dall'interfaccia.

Tra queste tecniche si sono analizzate quelle bioispirate che potessero soddisfare i requisiti richiesti dal progetto e che quindi avessero un metodo di realizzazione semplice, applicabile su larga scala, economico ed efficace. Una delle molecole più utilizzate in questo ambito è la DOPA, che si trova in natura nel bisso delle cozze. Questa, grazie principalmente alla presenza di gruppi amminici e catecolici, ha la capacità di dare vita ad una rapida polimerizzazione andando ad aderire al substrato sul quale viene depositata. Questo processo viene spesso realizzato con la tecnica di *dip coating*: il campione da rivestire viene immerso in una soluzione contenente DOPA in condizioni di pH leggermente basico. Il metodo di deposizione, tuttavia, oltre ad essere poco pratico per l'applicazione su grandi superfici, richiede generalmente diverse ore e quindi, anche a causa dell'elevato costo della DOPA, la molecola è stata scartata per lo sviluppo della tesi. Al fine di trovare una componente che potesse sostituire la DOPA, si sono fatte delle ricerche andando a selezionare dei composti che presentassero una struttura ramificata e simile siccome si ritiene che questa caratteristica contribuisca in maniera rilevante alla capacità di polimerizzazione. Tra le molecole trovate si è selezionata quella di acido tannico, forma commerciale del tannino. Quest'ultimo è un polifenolo che si trova in natura generalmente in legni, cortecce e frutti, ed ha un costo contenuto. E' risultato da diversi studi che anch'esso, come la DOPA, ha la capacità di polimerizzarsi in maniera rapida andando a creare un coating superficiale in cui le molecole espongono i loro gruppi funzionali.

Al fine di contrastare l'adesione batterica, si è voluta aggiungere alla soluzione una

componente antimicrobica, che per il caso in esame si è identificata negli oli essenziali. Questi vengono estratti per distillazione a vapore dalla pianta di origine e vengono utilizzati già da diversi anni nell'ambito della cura personale grazie alle loro proprietà benefiche. Tra gli oli essenziali con qualità migliori, si è selezionato quello di Tea Tree. Gli oli sono caratterizzati da una composizione molto varia ed è per questo motivo che è difficile stabilire quale sia la causa responsabile della loro antibattericità; si pensa che il comportamento sia dovuto ad una sinergia di effetti. Questi sono attualmente utilizzati per la realizzazione di rivestimenti antimicrobici, ad esempio incorporati in una matrice polimerica. Il loro immagazzinamento è necessario in quanto gli oli, se presi singolarmente, presentano una stabilità molto bassa, come si è potuto anche osservare durante gli esperimenti. Proprio per questo motivo si è pensato di combinare il loro utilizzo con l'acido tannico, che viene quindi sfruttato come stabilizzante.

Si sono effettuate le prove andando a depositare due composti in soluzione con due approcci diversi: nel primo si sono realizzate due soluzioni contenenti una l'acido tannico e l'altra l'olio essenziale e sono state deposte sul substrato in maniera sequenziale. Nel secondo caso si è invece realizzata un'unica soluzione contenente entrambi i componenti andando quindi a minimizzare la durata del processo.

Tutte le prove si sono effettuate sia utilizzando l'acido tannico puro sia un acido tannico grezzo; quest'ultimo è un composto facilmente reperibile in commercio utilizzato abitualmente per la vinificazione.

Dai risultati ottenuti si è osservato che l'acido tannico ha aderito senza difficoltà quando depositato singolarmente, a differenza dell'olio essenziale che invece essendo maggiormente volatile, nel caso di deposizione singola, evapora pressoché istantaneamente.

Per quanto riguarda invece l'applicazione di entrambe le soluzioni è risultato che le funzionalizzazioni siano avvenute, grazie alle proprietà di adesione dell'acido tannico che è servito da stabilizzante per l'olio essenziale. Non sono state riscontrate particolari differenze né tra l'utilizzo di acido puro e di quello grezzo né tra i metodi di deposizione. Per questo motivo, considerando l'applicazione finale del progetto, si sceglierebbe come migliore il metodo di deposizione simultanea in quanto permetterebbe un processo più rapido, requisito fondamentale in caso di emergenza. La deposizione simultanea, tuttavia risulterebbe meno stabile dopo un periodo di 21 giorni come si è potuto osservare dall'aumento del valore dell'angolo di contatto medio riscontrato su questi campioni. Si

potrebbe andare e valutare la variazione di questo valore in maniera più frequente così da poter definire dei range di utilizzo in cui i rivestimenti risultano stabili.

Per gli sviluppi futuri, oltre ad attendere i risultati dei test antibatterici per valutare l'effettiva caratteristica antibatterica del coating, sarebbe interessante effettuare delle analisi al fine di definire la dipendenza tra il numero di cicli e lo spessore del coating ottenuto così da ottimizzare anche quest'altro parametro ed avere informazioni quantitative sul rivestimento realizzato. Si potrebbero effettuare anche delle prove di stabilità in seguito a cicli di lavaggio del campione al fine di osservare come il rivestimento reagisca se messo a contatto con l'acqua e detersivi impiegati per l'igiene e la pulizia. In conclusione, con la presente tesi si è voluto esporre un progetto bioispirato che unisse settori dell'ingegneria apparentemente distanti ma che hanno potuto svilupparsi insieme con l'unico scopo di riuscire a sfruttare al meglio gli insegnamenti forniti dalla natura. La biomimetica, infine, non deve essere vista come un metodo di approccio alternativo rispetto alle tecnologie attuali, ma piuttosto l'unica strada da percorrere per uno sviluppo ottimizzato, migliore e che ci permetta di convivere in armonia rispettando il mondo che ci circonda.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Pagani, G. Chiesa, and J.-M. Tulliani, *Biomimetica e Architettura Come la natura domina la tecnologia*. 2016.
- [2] J. C. Nawroth, H. Lee, A. W. Feinberg, C. M. Ripplinger, and L. Megan, "Dabiri robojelly," vol. 30, no. 8, pp. 792–797, 2014, doi: 10.1038/nbt.2269.A.
- [3] D. E. Knuth, "Gli algoritmi," pp. 5–8, 1977.
- [4] S. Vogel, *Comparative Biomechanics: Life's Physical World - Second Edition*. 2013.
- [5] L. Q. Ren, Y. Liu, S. R. Yu, Z. W. Han, and H. X. Hu, "Preparation, microstructure and properties of biomimetic nanocomposite coating," in *Design and Nature III*, 2006, pp. 167–184.
- [6] T. MacMahon and J. T. Bonner, *Dimensioni e vita*, Prima ediz. 1990.
- [7] J. Gordon, *Strutture sotto sforzo*. 1991.
- [8] L. Pietroni and J. Mascitti, "Superfici biomimetiche," pp. 0–3, 2016.
- [9] C. Langella, *Hybrid design: progettare tra tecnologia e natura*. 2007.
- [10] R. E. Skelton and K. Nagase, "Tensile Tensegrity Structures," vol. 27, no. 2, pp. 131–137, 2012.
- [11] C. Sultan, *Chapter 2 Tensegrity: 60 Years of Art, Science, and Engineering*, 1st ed., vol. 43, no. C. Elsevier Inc., 2009.
- [12] R. Motro, "Tension Structures in " Fifty years of progress for shell and spatial Structures ", " 2013.
- [13] V. G. Jáuregui, "Tensegrity Structures and their Application to Architecture." p. 241, 2004.
- [14] R. Masiero and D. Zannoner, *Massimo Majowiecki. Strutture*. 2015.
- [15] C. R. Calladine, "Buckminster Fuller's 'Tensegrity' structures and Clerk Maxwell's rules for the construction of stiff frames," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 14, no. 2, pp. 161–172, 1978, doi: 10.1016/0020-7683(78)90052-5.
- [16] W. Whiteley, "Infinitesimally Rigid Polyhedra . I . Statics of Frameworks," no.

January, 2016, doi: 10.1090/S0002-9947-1984-0752486-6.

- [17] M. De Guzm and D. Orden, "From graphs to tensegrity structures: Geometric and symbolic approaches," vol. 57, no. May 2004, pp. 107–122, 2013, doi: 10.5565/PUBLMAT.
- [18] A. G. Tibert and S. Pellegrino, "Review of Form-Finding Methods for Tensegrity Structures," vol. 18, no. 4, pp. 209–223, 2003.
- [19] H. C. Tran and J. Lee, "Advanced form-finding of tensegrity structures," *Comput. Struct.*, vol. 88, no. 3–4, pp. 237–246, 2010, doi: 10.1016/j.compstruc.2009.10.006.
- [20] J. Y. Zhang and M. Ohsaki, "Stability conditions for tensegrity structures," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 44, no. 11–12, pp. 3875–3886, 2007, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2006.10.027.
- [21] M. Schenk, "Statically Balanced Tensegrity Mechanisms," *Mater. Eng.*, no. February, p. 106, 2006, [Online]. Available: http://www.markschenk.com/tensegrity/files/report/MSc_report_public.pdf.
- [22] H. J. Schek, "The force density method for form finding and computation of general networks," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 115–134, 1974, doi: 10.1016/0045-7825(74)90045-0.
- [23] Z. Wang, X. Yuan, and S. Dong, "Simple approach for force finding analysis of circular Geiger domes with consideration of self-weight," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 66, no. 2, pp. 317–322, 2010, doi: 10.1016/j.jcsr.2009.09.010.
- [24] D. Cadoni and A. Micheletti, "Structural Performances of Single-layer Tensegrity Domes," vol. 27, no. 2, 2012, doi: 10.1260/0266-3511.27.2-3.167.
- [25] F. Fu, "Structural behavior and design methods of Tensegrity domes," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 61, no. 1, pp. 23–35, 2005, doi: 10.1016/j.jcsr.2004.06.004.
- [26] R. C. Hibbeler, *Structural Analysis*. 2012.
- [27] M. D. I. E. D. E. I. TRASPORTI, "CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. Istruzioni," pp. 1–14, 2019.

- [28] J. C. Tiller, "Bioactive Surfaces Antimicrobial Surfaces," *Bioact. Surfaces*, vol. 240, no. November 2010, pp. 193–217, 2010, doi: 10.1007/12.
- [29] W. Qiang and H. Rainer, "Universal Polymer Coatings and Their Representative Biomedical Applications."
- [30] Q. Wei *et al.*, "Mussel-Inspired Dendritic Polymers as Universal Multifunctional Coatings," *Angew. Chemie - Int. Ed.* Q. Wei *et al.*, "Mussel-Inspired Dendritic Polym. as Univers. Multifunct. Coatings," *Angew. Chemie - Int. Ed.*, vol. 53, no. 43, pp. 11650–11655, 2014, doi 10.1002/anie.201407113., vol. 53, no. 43, pp. 11650–11655, doi: 10.1002/anie.201407113.
- [31] W. E. Bentley and G. F. Payne, "Nature's other self-assemblers," *Science (80-.)*, vol. 341, no. 6142, pp. 136–137, 2013, doi: 10.1126/science.1241562.
- [32] J. Park *et al.*, "Antimicrobial spray nanocoating of supramolecular Fe(III)-tannic acid metal-organic coordination complex: Applications to shoe insoles and fruits," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 3–9, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-07257-x.
- [33] B. Ouattara, R. E. Simard, R. A. Holley, G. J. P. Piette, and A. Bégin, "Antibacterial activity of selected fatty acids and essential oils against six meat spoilage organisms," *Int. J. Food Microbiol.*, vol. 37, no. 2–3, pp. 155–162, 1997, doi: 10.1016/S0168-1605(97)00070-6.
- [34] B. F. Murbach Teles Andrade, L. Nunes Barbosa, I. Da Silva Probst, and A. Fernandes Júnior, "Antimicrobial activity of essential oils," *J. Essent. Oil Res.*, vol. 26, no. 1, pp. 34–40, 2014, doi: 10.1080/10412905.2013.860409.
- [35] Y. Zhang, X. Liu, Y. Wang, P. Jiang, and S. Y. Quek, "Antibacterial activity and mechanism of cinnamon essential oil against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*," *Food Control*, vol. 59, pp. 282–289, doi: 10.1016/j.foodcont.2015.05.032.
- [36] A. Ul-Hamid, K. Y. Soufi, L. M. Al-Hadhrami, and A. M. Shemsi, "Failure investigation of an underground low voltage XLPE insulated cable," *Anti-Corrosion Methods Mater.*, vol. 62, no. 5, pp. 281–287, 2015, doi: 10.1108/ACMM-02-2014-1352.
- [37] D. Gallart-Mateu, C. D. Largo-Arango, T. Larkman, S. Garrigues, and M. de la

Guardia, "Fast authentication of tea tree oil through spectroscopy," *Talanta*, vol. 189, no. July, pp. 404–410, 2018, doi: 10.1016/j.talanta.2018.07.023.

- [38] R. October and A. February, "Study by infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis of Tannins and Tannic acid," *Rev. Latinoam. química*, vol. 39, no. 3, pp. 107–112, 2011.

RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare tutte le persone che in questi anni accademici mi hanno supportata ed aiutata a costruire il mio percorso universitario.

Un ringraziamento speciale va a coloro che, durante i mesi della stesura della tesi, hanno saputo comprendere e assecondare le necessità di questo periodo particolarmente saturo di emozioni. Tra questi ringrazio senz'altro mia mamma e mia sorella, alle quali non sarò mai abbastanza riconoscente per aver creduto in me molto più di quanto io stessa abbia mai fatto.

Ringrazio ancora il Professore Bernardino Chiaia e la Professoressa Valeria Chiono per avermi guidato nello sviluppo di questo progetto, il Professore Marco Sangermano per la possibilità di usufruire degli strumenti e dei locali necessari per la realizzazione degli esperimenti. In particolare vorrei ringraziare Irene Carmagnola e Giulia Giuntoli per il supporto e l'auto riservatomi negli ultimi mesi. Si ringrazia l'azienda Tende & Teloni di Abbadia (TO), per la donazione del PVC utilizzato per realizzare i campioni.

Vorrei infine ringraziare tutti i miei amici che, anche indirettamente, hanno contribuito al conseguimento di questo traguardo.

A Jessica, Andrea e Giulia, che in modi diversi mi hanno accompagnata durante lo sviluppo di tesi, sostenendomi perfettamente, rivolgo gli ultimi ed infiniti ringraziamenti.

