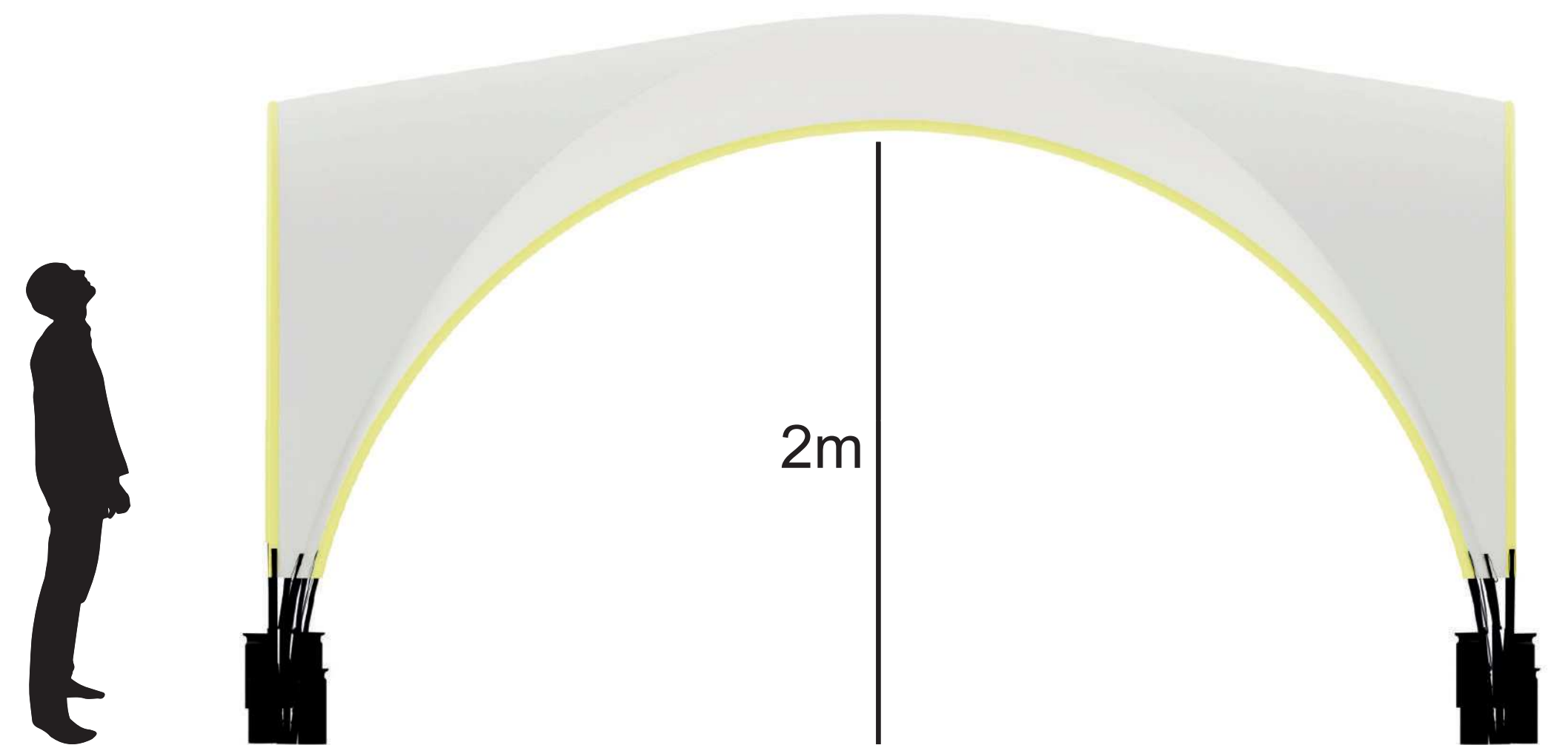
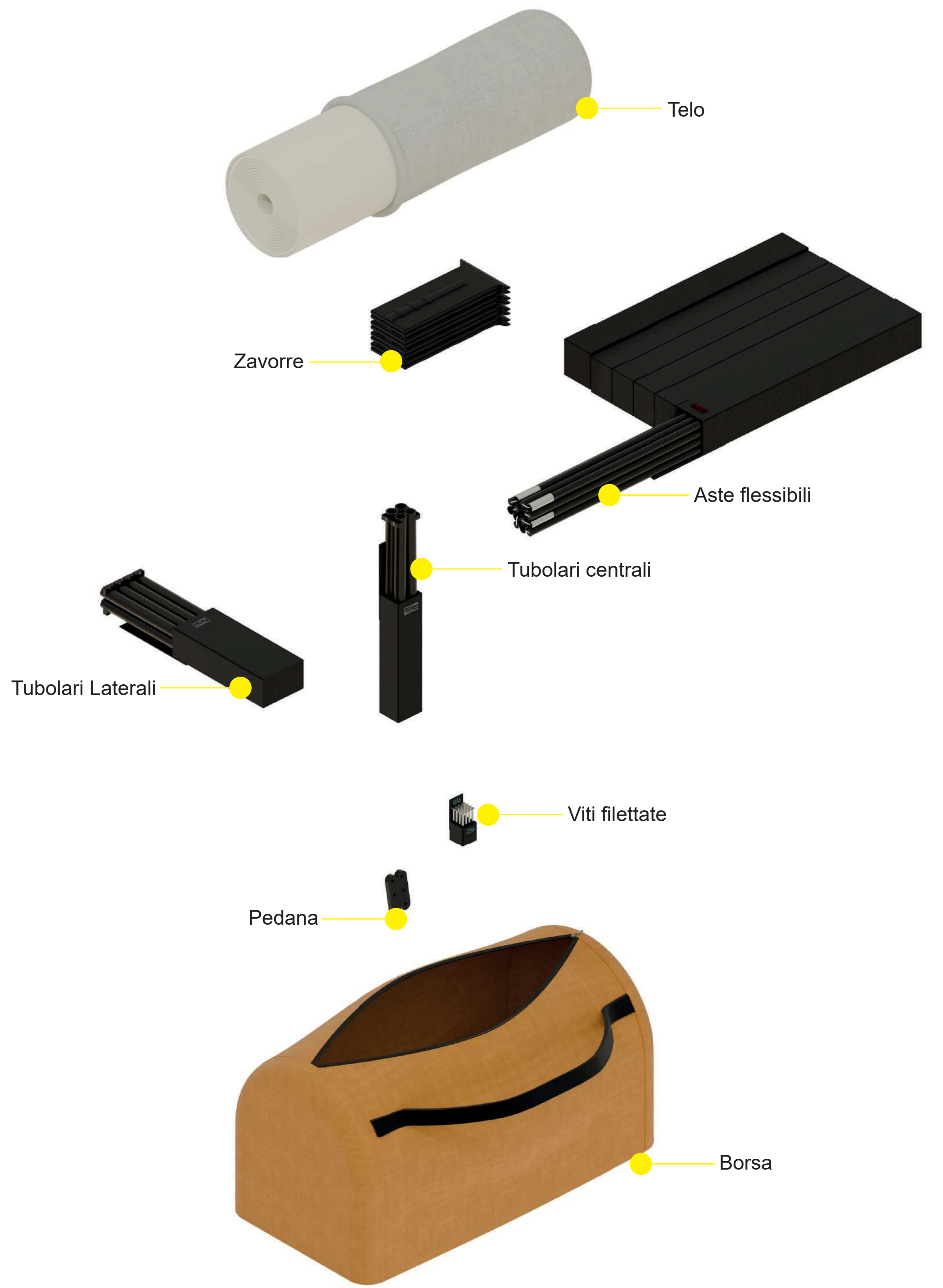
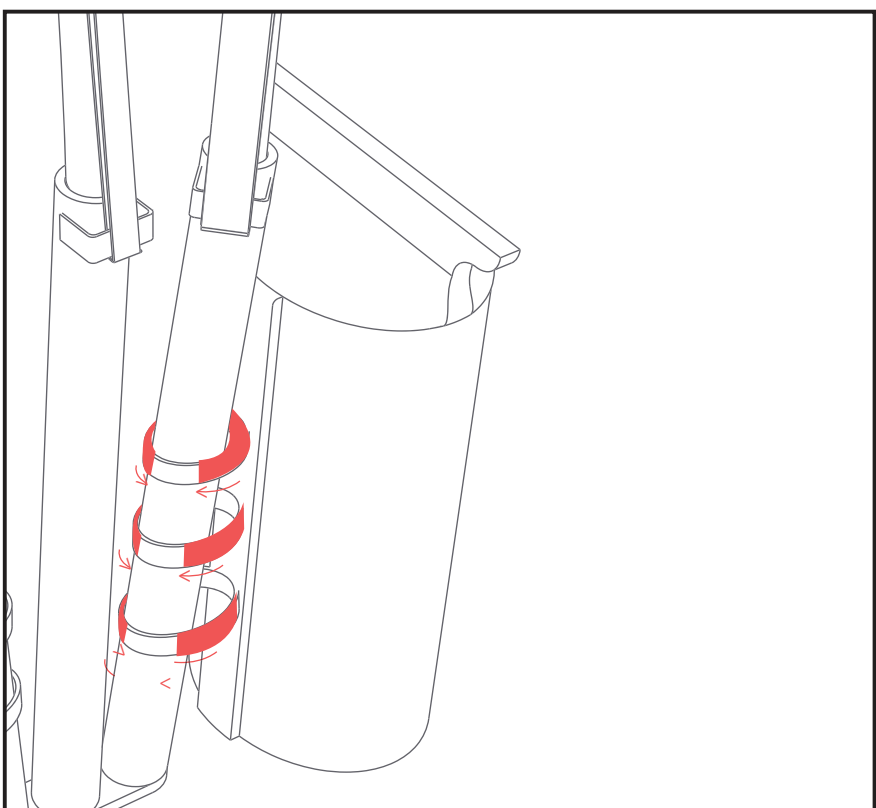
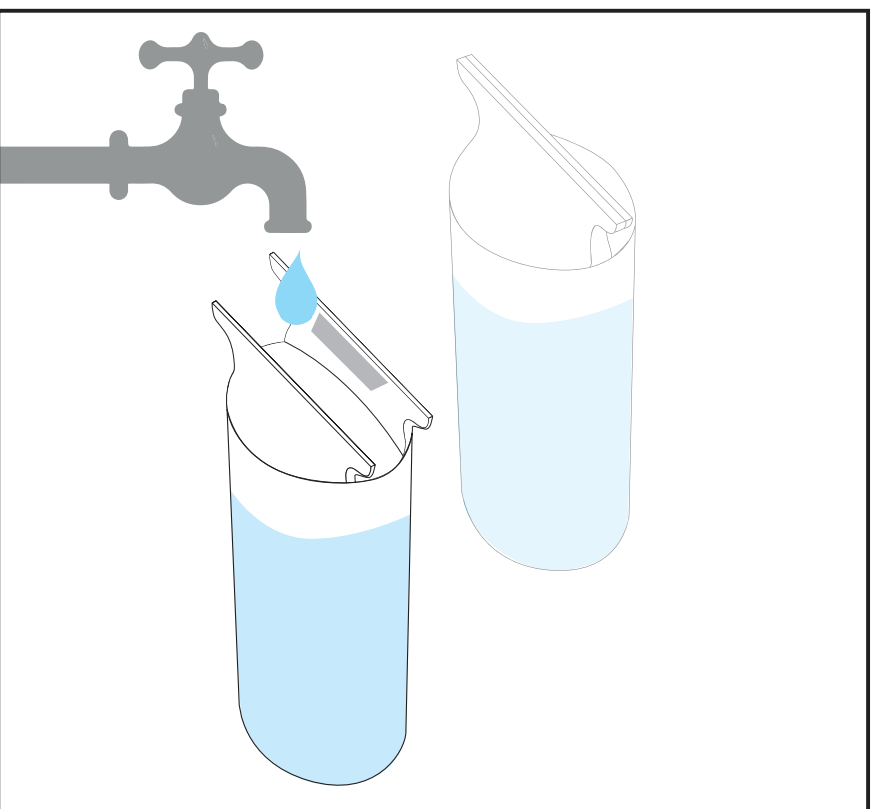
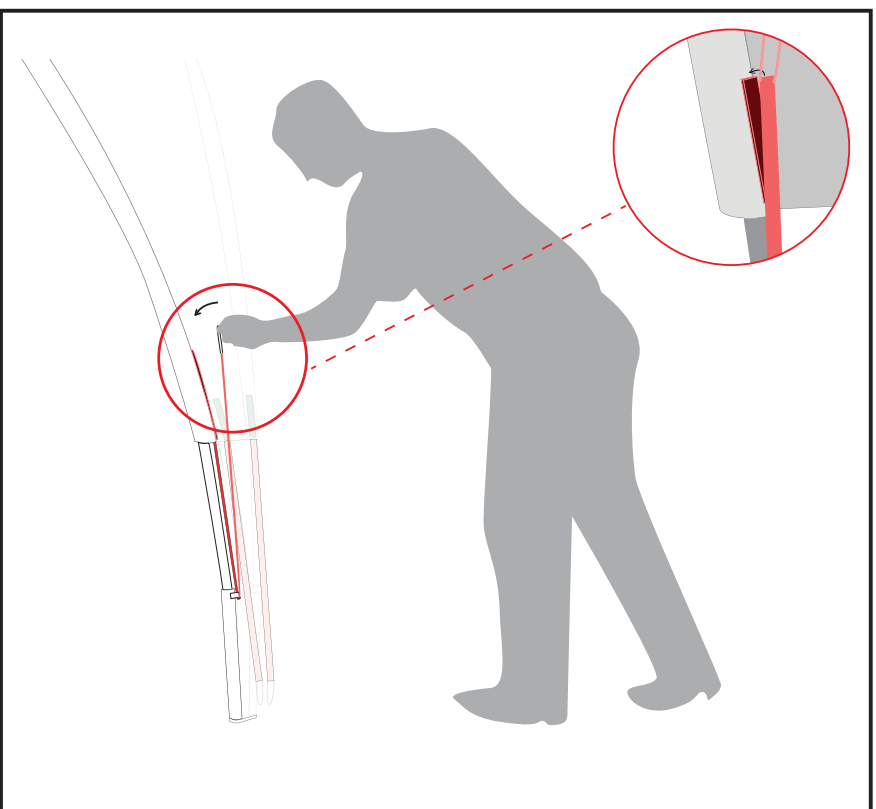
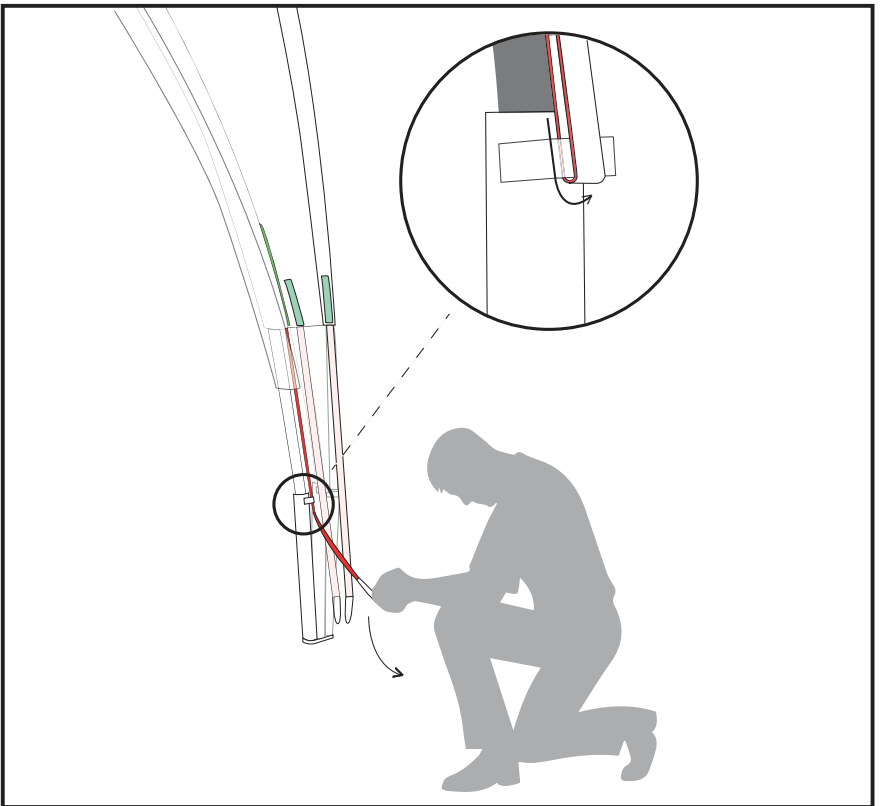
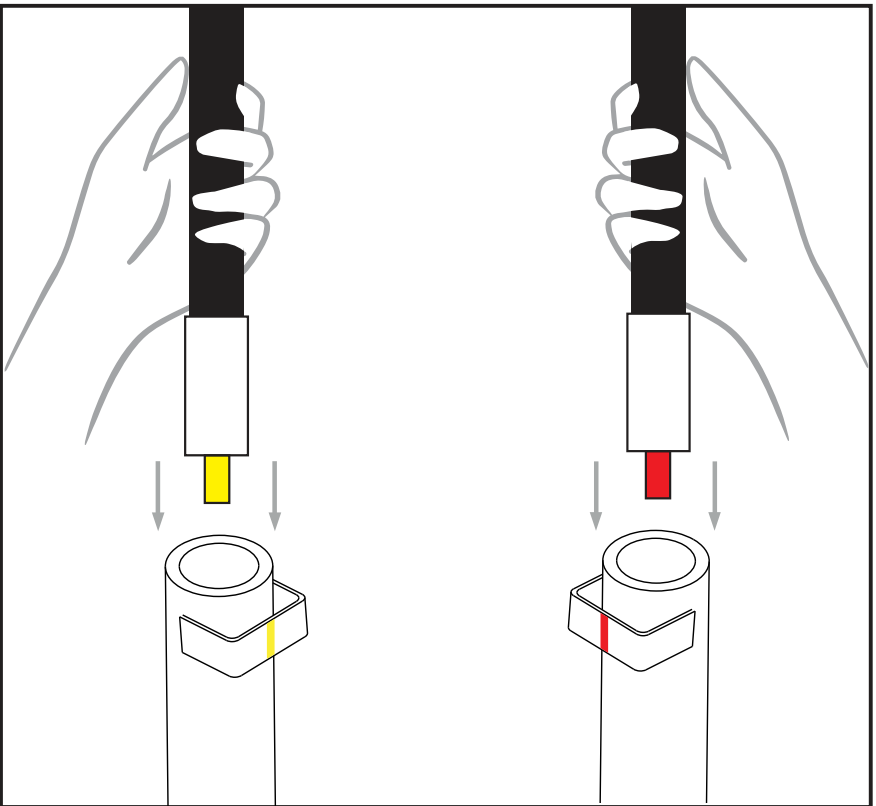
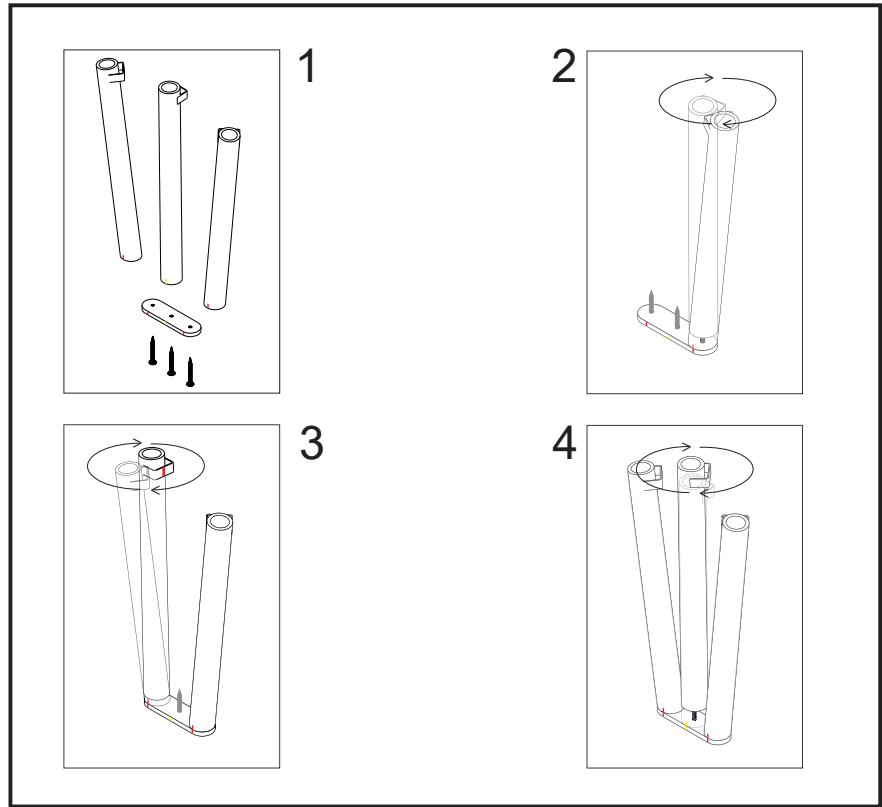
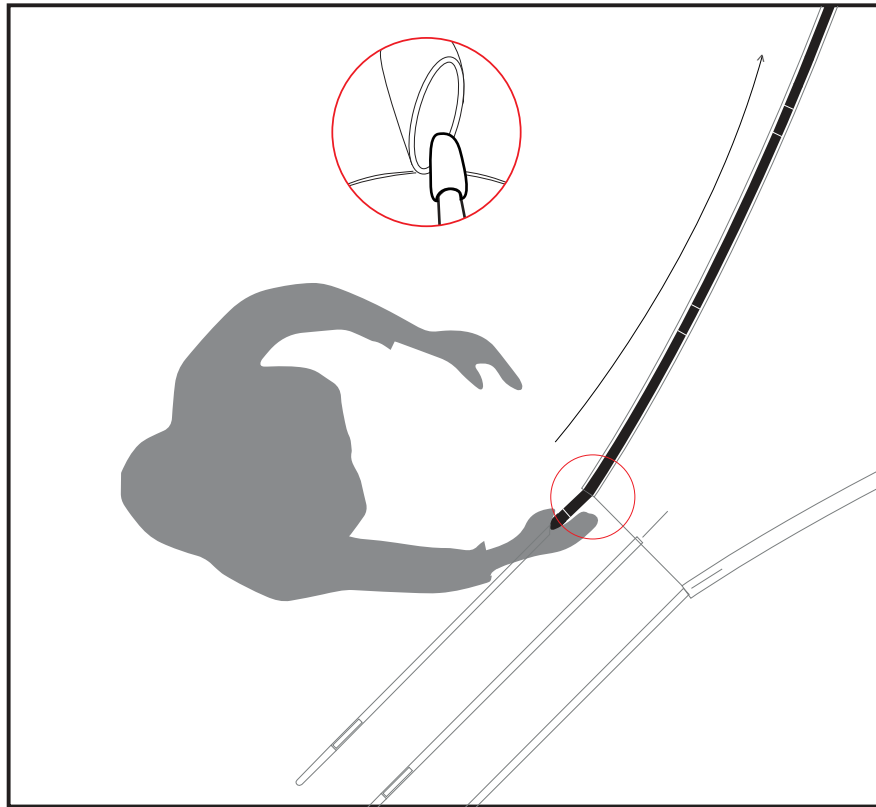
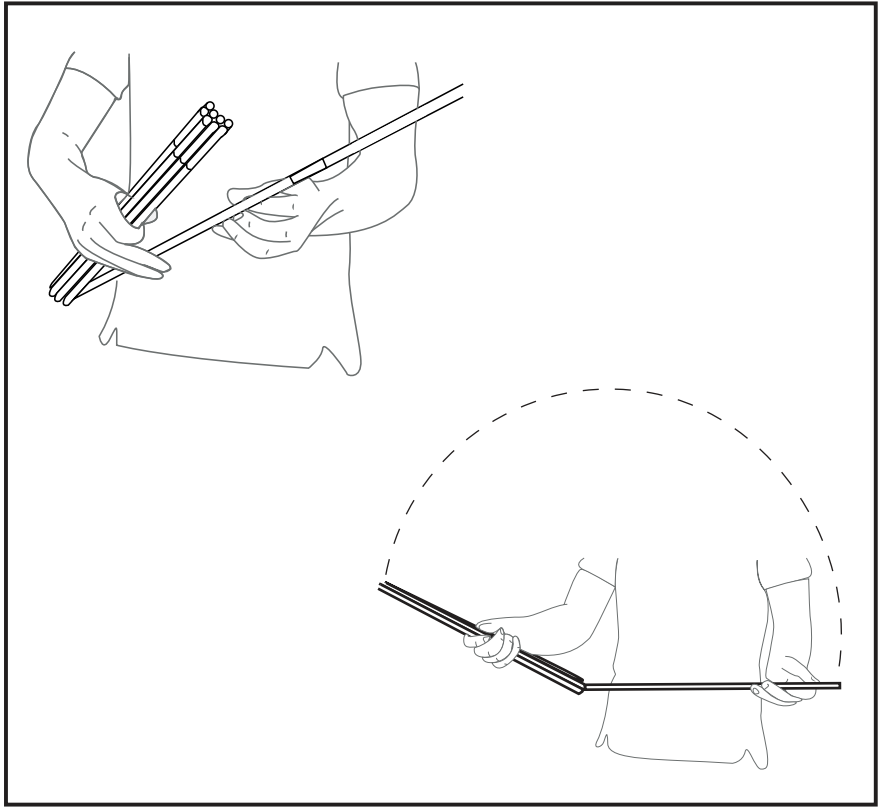
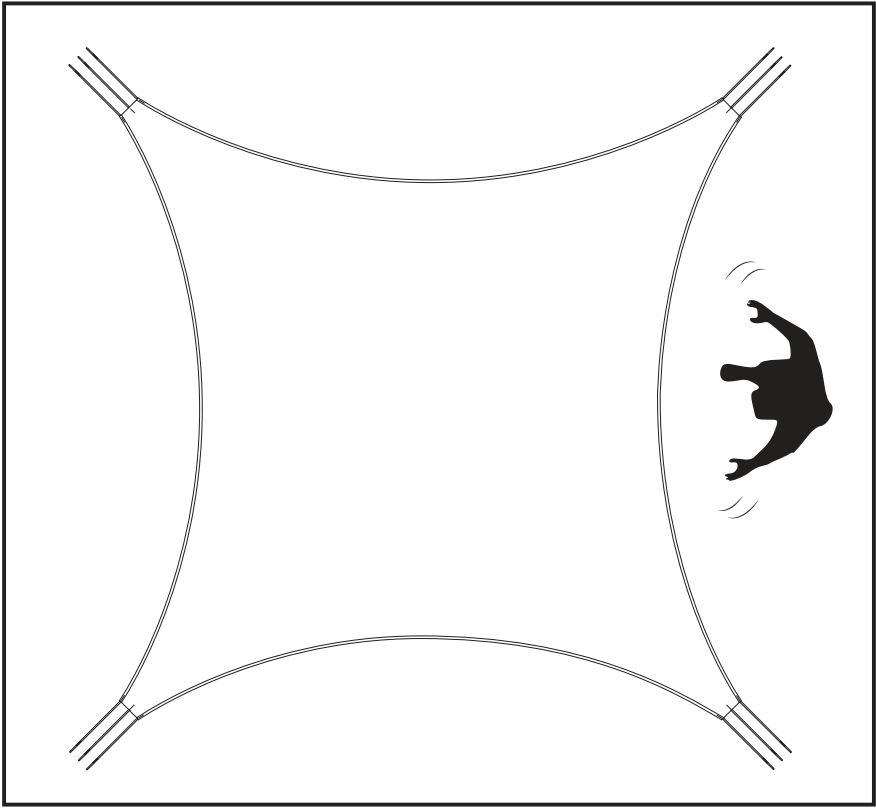
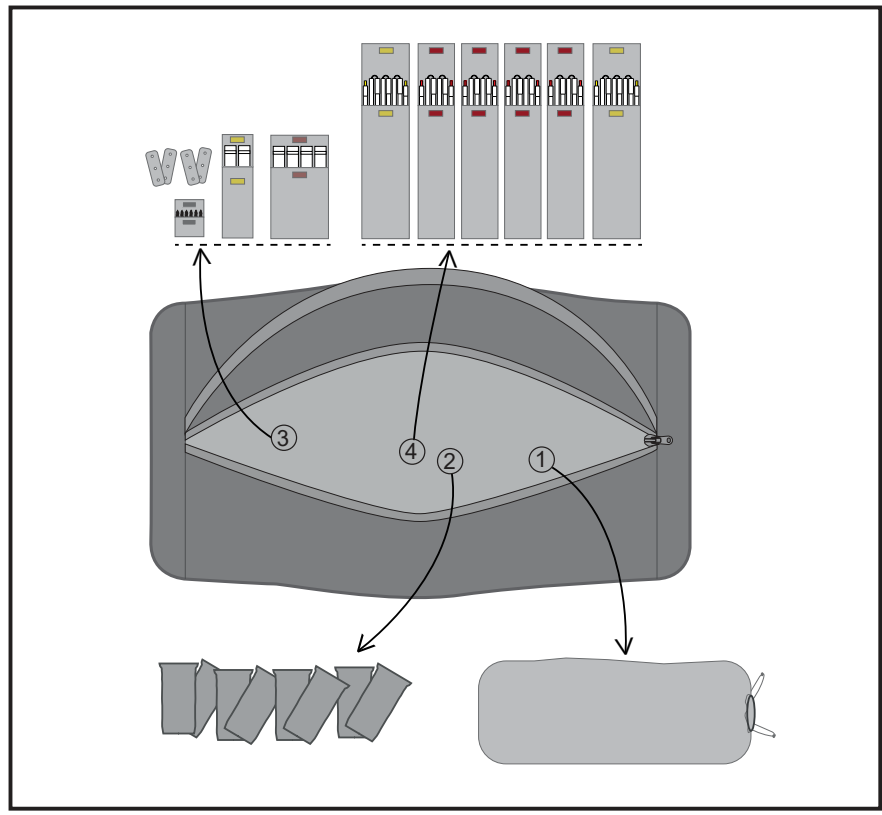
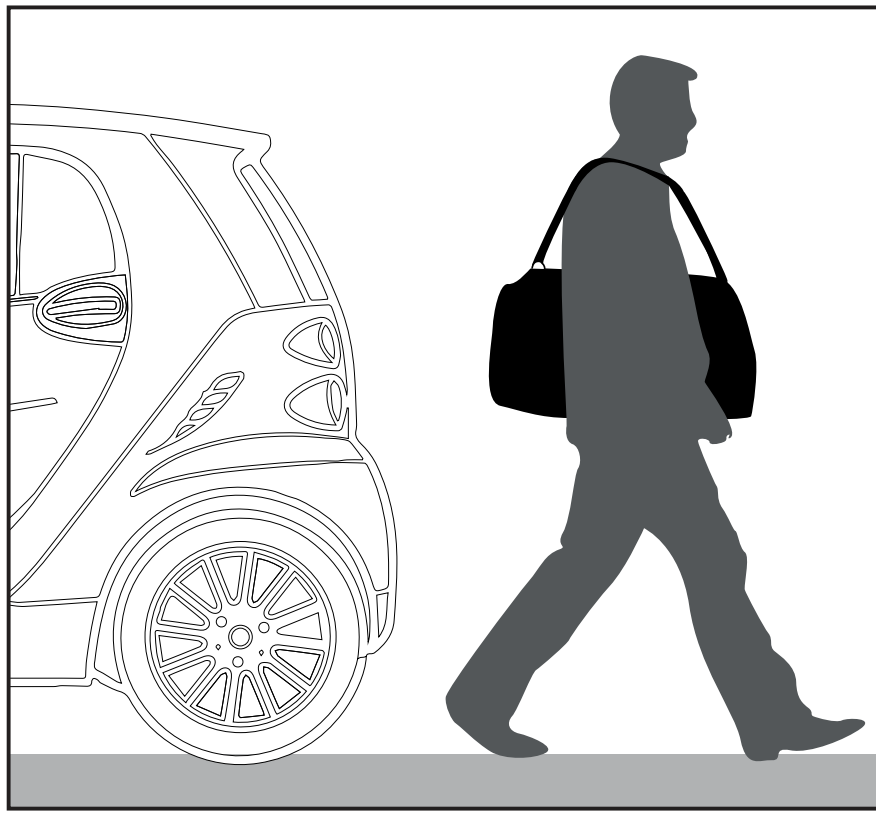


Tensostruttura OUTDOOR





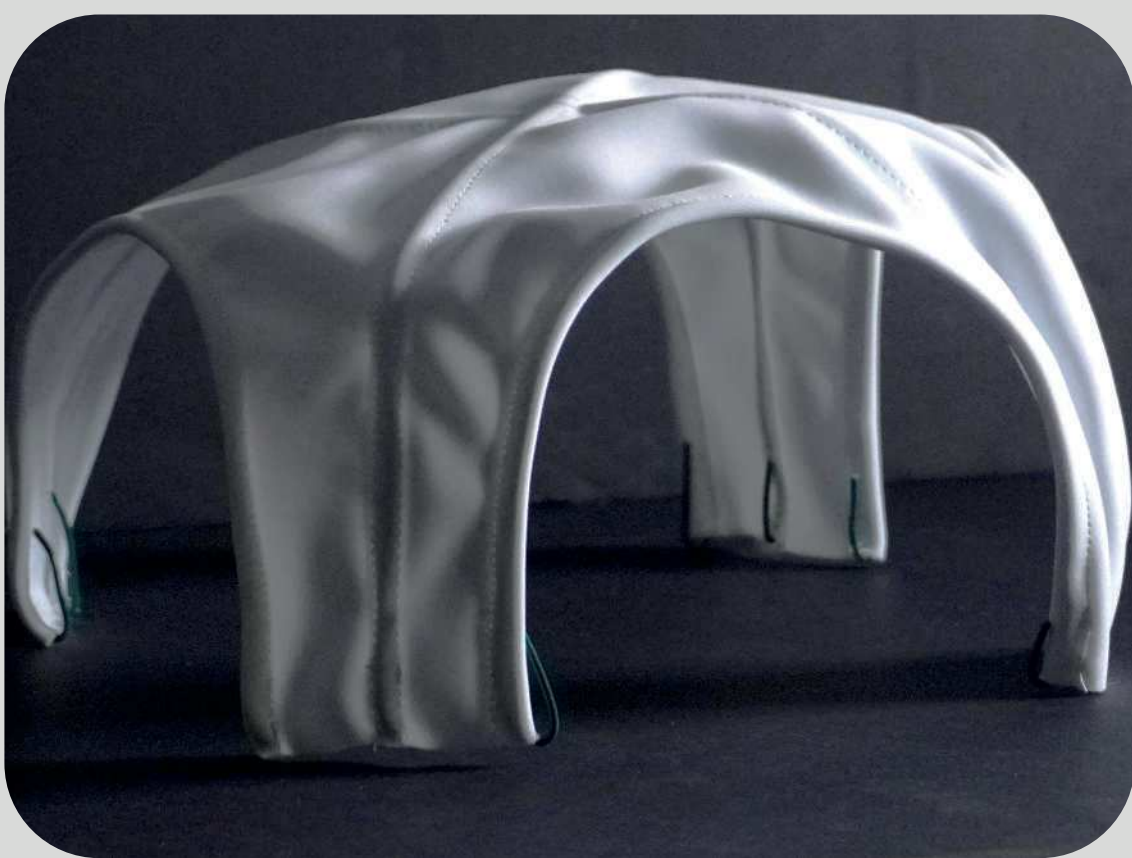


Identificazione del problema

Molte strutture temporanee tradizionali richiedono un ancoraggio complesso o una serie di elementi strutturali connessi tra loro, rendendo difficile il trasporto e il montaggio senza l'ausilio di attrezzature specializzate o manodopera esperta.

Prototipazione

Partendo dalle conoscenze acquisite, è stata fatta una prototipazione preliminare per esplorare diverse configurazioni delle aste e valutare la possibilità di rendere la struttura autoportante, migliorando la stabilità senza compromettere la facilità di montaggio.



Analisi Preliminare

Padiglione temporaneo MOOM, Tokyo, 2011, designer Kazuhiro Kojima. Padiglione temporaneo sperimentale con struttura composta da un tessuto permeabile alla luce e un sistema di aste rigide di supporto.

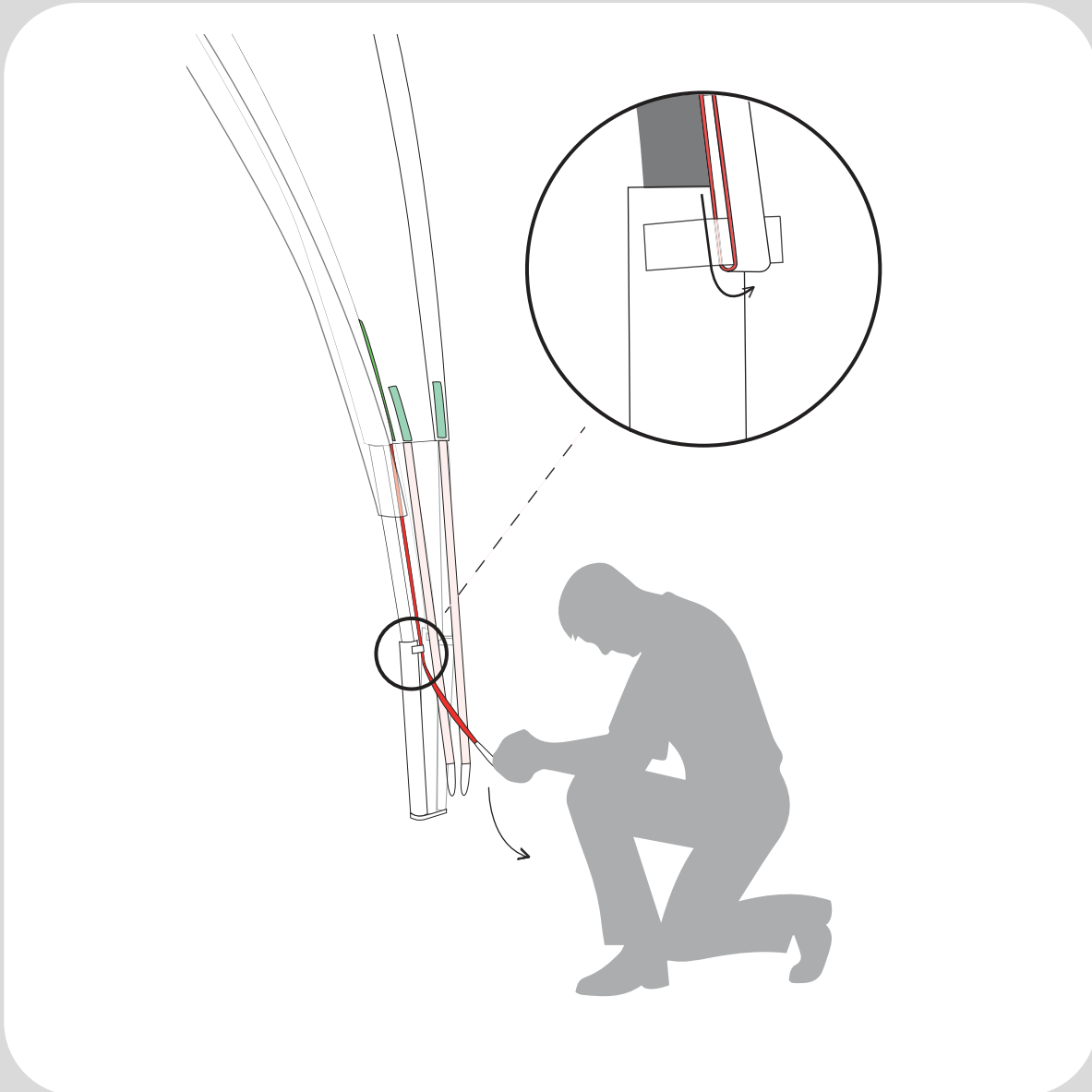


La tenda Ferrino, nota per la sua leggerezza e resistenza, utilizza una struttura a aste flessibili in alluminio e un tessuto tecnico impermeabile. Il suo sistema di montaggio rapido e la stabilità garantita dalla tensione del telo l'hanno resa un riferimento nel settore outdoor, ispirando soluzioni innovative per strutture temporanee.



Sistema di tensionamento

Per mantenere la membrana tesa, è stato adottato un sistema di tiraggio ispirato al tensionamento delle tavole da windsurf. Una cinghia di trazione, fissata a una tasca dedicata, permette di applicare tensione in modo uniforme, garantendo stabilità e facilità di montaggio senza ancoraggi complessi.





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAMERINO

SCUOLA DI ARCHITETTURA E DESIGN “E. VITTORIA”

CORSO DI LAUREA IN

.....Disegno industriale e ambientale (L-4).....

TITOLO DELLA TESI

.....Realizzazione di una tensostruttura per allestimenti temporanei.....
.....outdoor.....
.....

Laureando/a

Nome.....Alessandro Vennitti

Firma.....

Relatore

Nome.....Andrea Lupacchini.....

Firma.....

Se presente eventuale Correlatore indicarne nominativo/i

.....

.....

ANNO ACCADEMICO

.....2023 - 2024.....

TENSOSTRUTTURA TEMPORANEA OUTDOOR

Università degli Studi di Camerino,
Scuola di Ateneo Architettura e Design "Eduardo Vittoria"

Corso di Laurea in Disegno Industriale e Ambientale

Relatore: Prof. Andrea Lupacchini
Studente: Alessandro Vennitti

a.a 2023/2024



S A A D

Scuola di Ateneo
Architettura e Design "Eduardo Vittoria"
Università di Camerino

Indice

00

Introduzione

8

01

L' Exhibition Design

01.0 Introduzione	12
01.1 Origini	14
01.2 Architetture Effimere	20
01.3 La Great Exhibition di Londra	22
01.4 Dal cemento armato alle Tensostrutture	34
01.5 Dalle Tensostrutture al Tensegrity	42

02

Le Tensostrutture

02.0 Introduzione	44
02.1 Principi Base delle Tensostrutture	46
02.2 Tecnologie e materiali	56
02.3 Tensostrutture e Sostenibilità	70
02.4 Autoportanza, dalle Tensostrutture alle Tende Ferrino	74
02.5 Il Tensegrity come Principio Strutturale	80

03 **Casi Studio**

03.0 Introduzione	84
03.1 Padiglione temporaneo MOOM, Tokyo, 2011, designer Kazuhiro Kojima	86
03.2 Tensostruttura a crociera, Brescia, 2023, azienda Maco Technology	90
03.3 Tenda da campeggio, azienda Ferrino, prodotto Tent Force 202	94

04 **Concept**

04.0 Introduzione	98
04.1 Obiettivi del Concept	100
04.2 Sperimentazioni	106
04.3 Il Prodotto	130
04.4 Tavole Tecniche	162

05 **Immaginografia e Sitografia** **180**



00 Introduzione

00.0 Introduzione

L'architettura temporanea e l'allestimento degli spazi espositivi hanno sempre rappresentato un campo di sperimentazione tra tecnica e creatività. Questo dossier esplora l'evoluzione delle strutture leggere, dalle prime forme di riparo dell'uomo fino alle più avanzate soluzioni contemporanee, come le tensostrutture e il tensegrity.

Attraverso un'analisi approfondita, il documento ripercorre le tappe storiche e tecnologiche che hanno portato alla nascita di nuove forme architettoniche, esaminando materiali, principi strutturali e casi studio significativi. Dalla Great Exhibition di Londra al lavoro di pionieri come Frei Otto, fino alle moderne applicazioni nel design espositivo e nella progettazione modulare, il dossier mette in luce le potenzialità di queste strutture in termini di versatilità, efficienza e sostenibilità.

L'obiettivo è offrire una visione chiara e dettagliata delle soluzioni costruttive che hanno rivoluzionato il modo di concepire spazi temporanei, dimostrando come la leggerezza e la resistenza possano coesistere in un equilibrio perfetto tra estetica e funzionalità.



L'esigenza di questo progetto nasce dalla richiesta dell'azienda Stipa di Ascoli Piceno, presso la quale ho svolto il mio tirocinio formativo. Durante questa esperienza, ho avuto modo di analizzare le necessità dell'azienda nel settore delle esposizioni temporanee all'aperto e di comprendere le criticità delle soluzioni attualmente disponibili sul mercato.

L'obiettivo dell'azienda era sviluppare una soluzione innovativa che si differenziasse dai competitor, offrendo una struttura leggera, facilmente trasportabile e di rapido montaggio, senza rinunciare alla stabilità e alla resistenza. Le strutture espositive tradizionali, infatti, spesso presentano problematiche legate alla complessità del montaggio, alla necessità di ancoraggi permanenti o alla difficoltà di trasporto.

Per superare queste criticità, il progetto si basa sullo studio delle tensostrutture e delle tende Ferrino, combinando i principi statici di leggerezza e tensione con la praticità di montaggio tipica delle soluzioni outdoor. L'obiettivo finale è realizzare una struttura autoportante, che grazie all'uso di materiali leggeri e resistenti, possa rappresentare una soluzione efficace e innovativa per eventi temporanei all'aperto.

L'ispirazione progettuale proviene da due riferimenti principali:

- il primo è il MOOM Pavilion di Kazuhiro Kojima;
- il secondo è il modello Tent Force 2 di Ferrino.

Durante la fase sperimentale, sono state testate diverse configurazioni per le aste e la tensione della membrana. Le prime versioni hanno evidenziato la necessità di rinforzi e di un sistema di stabilizzazione per evitare cedimenti sotto carico. L'ottimizzazione finale ha portato a una disposizione delle aste più efficiente e a un sistema di tensionamento migliorato, ottenendo una struttura stabile, resistente e facilmente assemblabile. Inoltre, la scelta di materiali durevoli e riutilizzabili ha reso il progetto sostenibile, riducendo al minimo l'impatto ambientale e promuovendo un nuovo modo di concepire gli allestimenti temporanei.



01

L'Exhibition Design

01.0 Introduzione

L'exhibition design è la disciplina che si concentra sulla comunicazione diretta con l'utente, offrendo feedback attraverso tutti i sensi del nostro corpo creando un'esperienza immersiva. Per un exhibition designer, è fondamentale saper catturare queste emozioni, trasformandole in un'esperienza unica e coinvolgente per l'utente. Oggi l'exhibition design rappresenta una disciplina complessa che racchiude molte delle competenze tipiche di un designer industriale. Integra l'ergonomia dello spazio, fondamentale per garantire comfort e funzionalità, con la comunicazione grafica, essenziale per trasmettere messaggi chiari e immediati. Questa combinazione di elementi rende l'exhibition design una pratica unica, capace di unire tecnica e creatività per realizzare ambienti coinvolgenti e ricchi di significato.

01.1 Origini

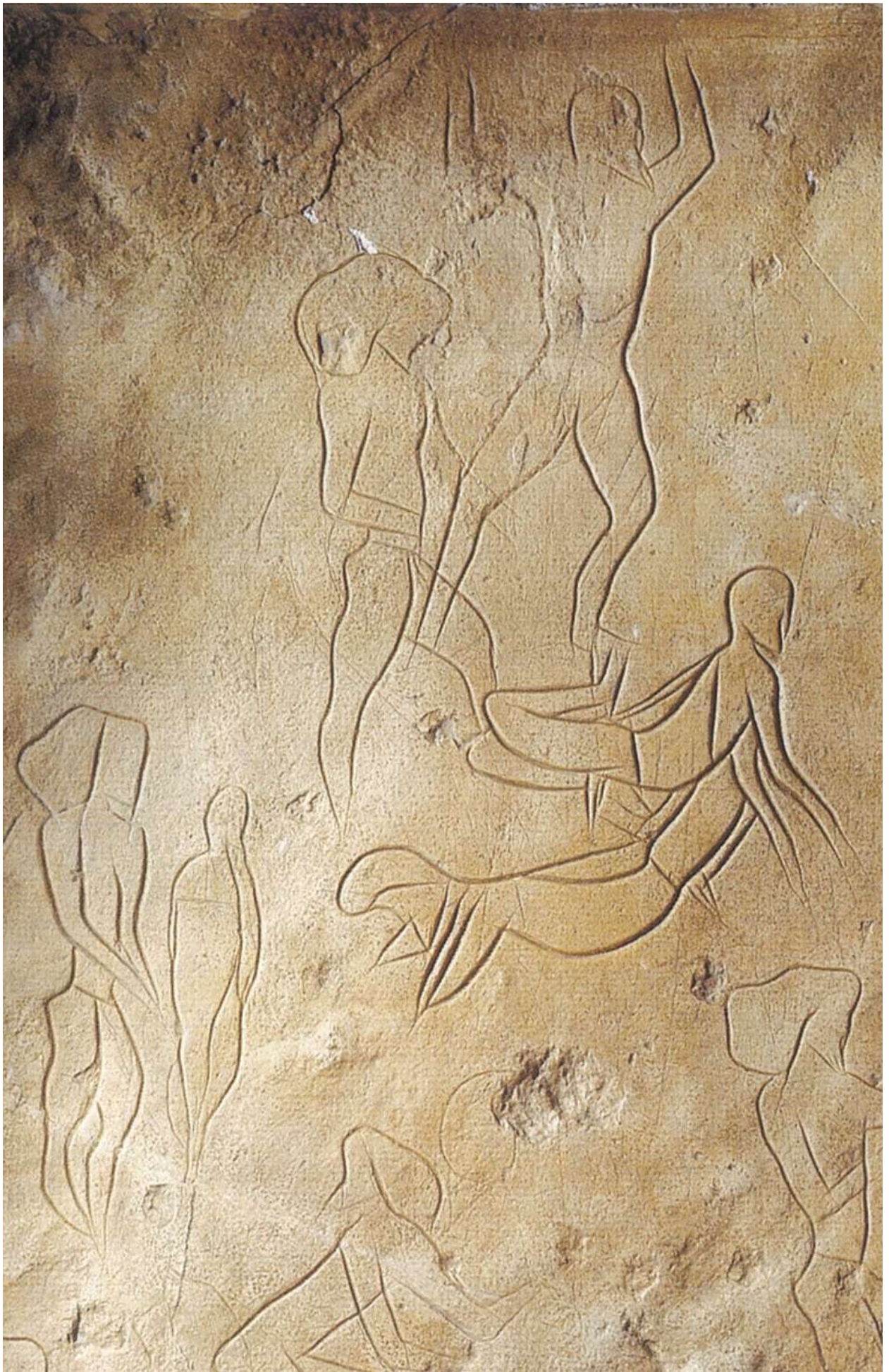
Sin dalla preistoria, l'uomo ha sempre sentito il bisogno primario di protezione e sicurezza. Le prime strutture temporanee utilizzate per il riparo dagli agenti atmosferici risalgono a oltre due milioni di anni fa, segnando l'inizio dell'ingegno umano nell'adattarsi e sopravvivere all'ambiente circostante.

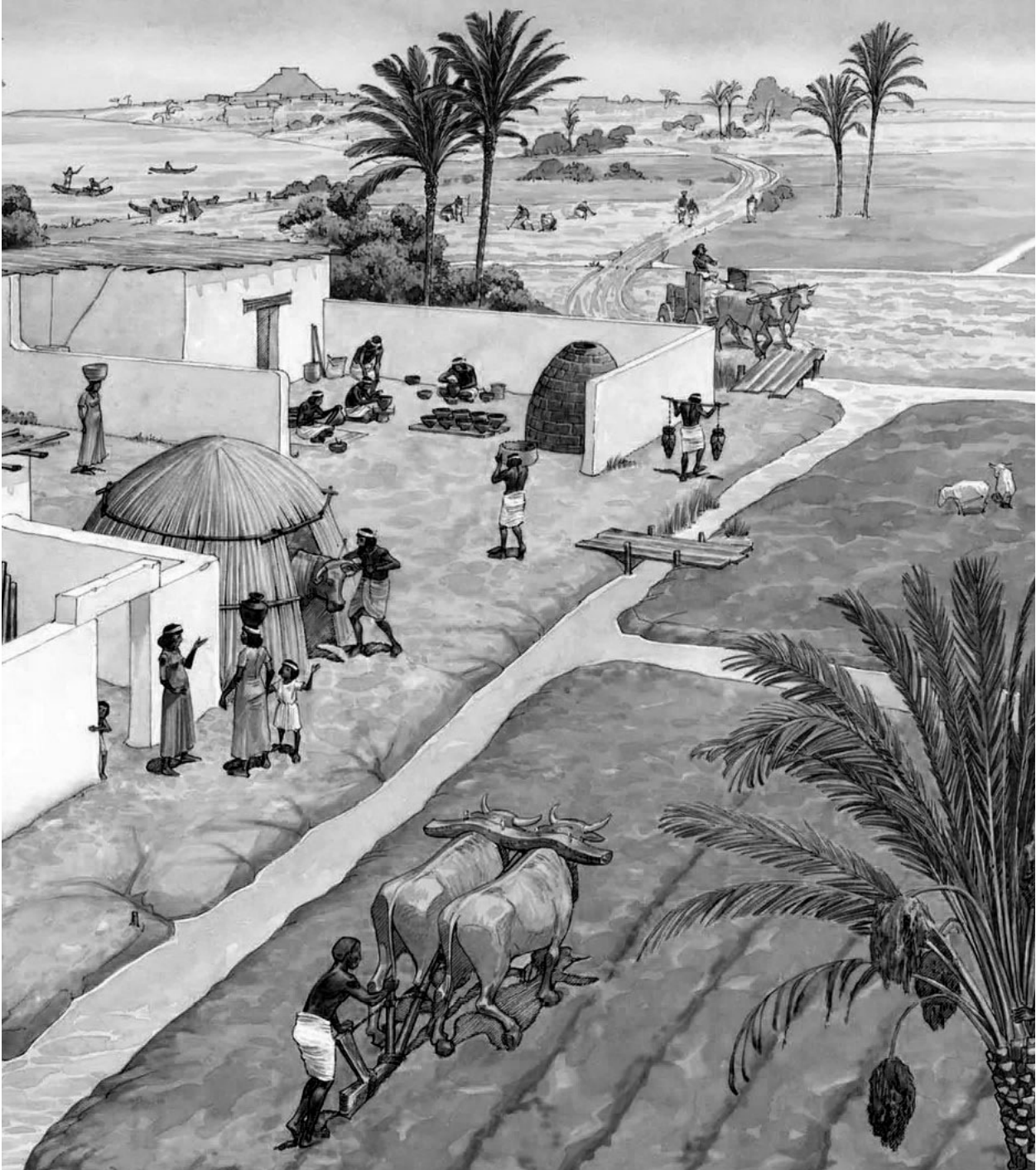
Inizialmente, tali ripari erano semplici capanne costruite con materiali facilmente reperibili come legno, rami intrecciati e foglie. La loro struttura era rudimentale ma efficace, progettata per offrire una protezione temporanea durante gli spostamenti. La leggerezza dei materiali utilizzati e la semplicità costruttiva rendevano queste strutture ideali per la vita nomade, consentendo un montaggio e uno smontaggio rapidi.

Interessante come l'uomo preistorico, seppur non avendo alcuna conoscenza preliminare, è stato il precursore delle soluzioni moderne di oggi come le tende e i gazebo.

Essi incarnano una delle prime manifestazioni della capacità umana di utilizzare le risorse naturali per soddisfare le necessità primarie di riparo e sicurezza.







Antico Egitto

I primi gazebo con scopi decorativi nacquero nell'antico Egitto, dove i membri della famiglia reale li utilizzavano come coperture per proteggere le coltivazioni dal sole. Queste strutture erano spesso arricchite con pietre preziose e decorazioni sinuose, poiché si credeva che i giardini posseduti in vita sarebbero esistiti anche dopo la morte. Per questo motivo, quando un membro della famiglia reale moriva, i giardini venivano raffigurati sulle pareti delle tombe, simboleggiando veri e propri paradisi terrestri da portare con sé oltre la vita.



Giardino proveniente dalla tomba dello scriba Nebamon

La iurta

La iurta fu utilizzata per la prima volta dai nomadi turchi circa 13 secoli fa in Asia Centrale. Questa abitazione tradizionale, progettata per uno stile di vita nomade, era facilmente trasportabile grazie alla sua struttura smontabile. Il rivestimento in feltro di lana di pecora garantiva un ottimo isolamento termico, essenziale per proteggere gli abitanti dalle rigide temperature causate dai venti siberiani.

Lo scheletro della iurta era realizzato con stecche di legno di salice, sfruttando la loro naturale elasticità per facilitare la modellazione senza rischio di rottura. Queste stecche formavano anche il telaio della porta, la cui stabilità era ulteriormente garantita da una corda, fondamentale non solo per il sostegno dell'ingresso, ma anche per l'intera struttura.

Il tetto, caratterizzato da una base circolare che si restringe verso l'alto, contribuiva alla resistenza della iurta contro le intemperie. Nel complesso, la struttura poteva raggiungere un diametro massimo di 10 metri. La sua forma circolare era un elemento chiave per la stabilità, poiché permetteva di distribuire le forze del vento in modo uniforme su tutti i lati, riducendo la formazione di vortici e turbolenze.



La Tenda Nera

La tenda nera ha origini antichissime ed è citata anche nella Bibbia. Da sempre utilizzata dai beduini per agevolare gli spostamenti nel deserto, questa struttura si distingue per la sua semplicità ed estrema efficacia, adattandosi perfettamente alle condizioni climatiche più ostili. Il tessuto è realizzato con strisce di lana di capra, un materiale che garantisce traspirabilità all'interno della tenda e impedisce alla sabbia di penetrare durante le tempeste. Inoltre, offre un ottimo isolamento termico, mantenendo l'ambiente fresco nelle giornate torride e trattenendo il calore nelle fredde notti desertiche. La struttura è sostenuta da pali centrali, che determinano l'altezza massima, e da pali laterali, che stabiliscono l'altezza minima. Solitamente, la tenda non supera i due metri di altezza, una scelta progettuale che ne garantisce la stabilità anche in presenza di venti forti. L'intero sistema è ancorato al terreno mediante corde robuste in fibra naturale, spesso ricavate dalla palma, e fissato con picchetti in legno o metallo. Per il trasporto, i cammelli e gli asini vengono impiegati per suddividere il carico: alcuni trasportano i pali, mentre altri portano il telo piegato, permettendo ai beduini di smontare e rimontare la tenda con facilità durante gli spostamenti.



01.2 Architetture Effimere

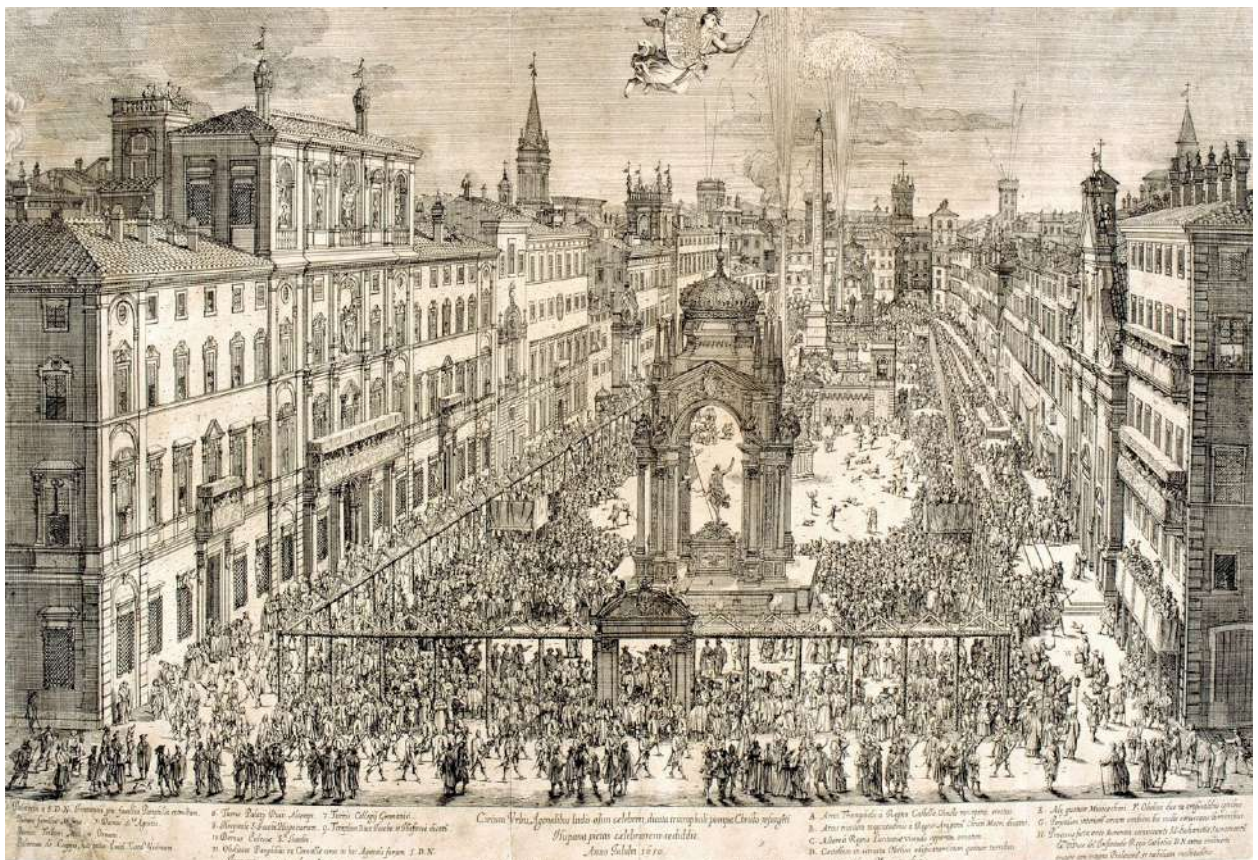
Nel XVII e XVIII secolo, le corti europee organizzavano sontuose feste e celebrazioni, spesso caratterizzate da allestimenti temporanei definiti "effimeri". Un esempio significativo è rappresentato dagli "effimeri barocchi farnesiani" a Parma, Piacenza e Roma tra il 1628 e il 1750. Queste manifestazioni includevano elaborate scenografie e architetture temporanee progettate per occasioni speciali, dove, una volta terminati i festeggiamenti, gli allestimenti venivano smontati e successivamente bruciati o distrutti.



*Arco di trionfo situato in Piazza
Vittorio Emanuele II, 1666, in onore
del passaggio di Margherita Teresa,
figlia di Filippo IV di Spagna.*

Durante le feste, solitamente organizzate per matrimoni, nascite o altri eventi all'interno delle famiglie reali, per pochi giorni la città cambiava volto: le facciate dei palazzi, i cortili e gli interni delle lussuose dimore venivano trasformati e decorati come grandi palcoscenici. Spesso venivano costruite vere e proprie strutture architettoniche in legno o cartapesta.

Dominique Barrière - Festa della Resurrezione in Piazza Navona con gli apparati di Carlo Rainaldi e G.P. Schor (1650) - incisione Museo di Roma.



01.3 La Great Exhibition di Londra

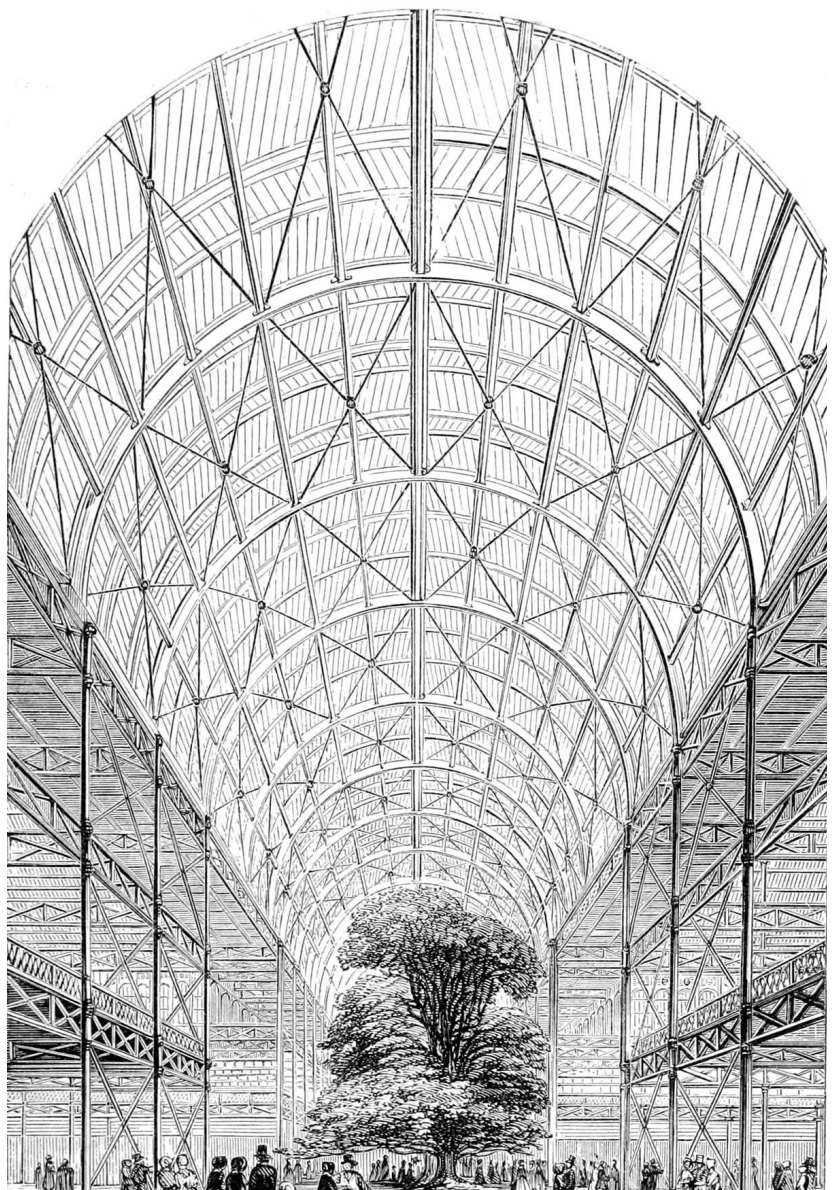
Organizzata per celebrare i progressi dell'industria e del design, l'esposizione fu ospitata nel rivoluzionario Crystal Palace, un'architettura innovativa in ferro e vetro progettata da Joseph Paxton. L'obiettivo era di attirare espositori da tutto il mondo, ma soprattutto di promuovere i prodotti industriali locali, mettendo in mostra il primato tecnologico e commerciale raggiunto dal paese ospitante.



Interno della fiera, 1851

Paxton, fornisce la variante del progetto dall'esecuzione più rapida. La costruzione prevede l'utilizzo di materiale prefabbricato e prodotto in serie, in maniera tale da velocizzare la costruzione dell'edificio, eretto in soli quattro mesi.

Il Crystal Palace era una struttura composta da un fitto intreccio di sottili travi di ferro che sorreggevano ampie superfici di vetro trasparente. Il corpo principale dell'edificio misurava 563 metri di lunghezza e 124 metri di larghezza, con un transetto centrale che raggiungeva un'altezza di 33 metri. La costruzione si estendeva su circa 7 ettari, con una superficie totale di 92.000 metri quadrati. Al suo interno, tra il piano terra e le gallerie superiori, si sviluppavano oltre 13 chilometri di spazi espositivi, destinati ai banconi delle varie esposizioni.



Disegni del Crystal Palace a Hyde Park. Dal libro "The Crystal Palace."

Sebbene la struttura geometrica del palazzo non rappresentasse una novità assoluta, il suo impiego introduceva soluzioni particolarmente innovative. L'uso del ferro come elemento portante eliminava la necessità di massicci pilastri o muri portanti, permettendo così di realizzare ampie pareti in vetro che garantivano un'illuminazione naturale diffusa.

Inoltre, la costruzione si basava su elementi prefabbricati prodotti in serie, un aspetto che semplificava notevolmente sia il montaggio iniziale che un'eventuale ricostruzione futura.



Vista esterna del tetto e delle volte del Crystal Palace dopo il trasferimento a Sydenham.

L'attenzione futura

In conclusione il Crystal Palace, rappresenta uno dei più significativi traguardi nella storia dell'architettura e dell'exhibition design. Non solo una straordinaria innovazione tecnologica, grazie all'uso pionieristico del ferro e del vetro, ma anche un punto di svolta nel modo di concepire gli spazi espositivi. La sua progettazione, che puntava a massimizzare la luce naturale e a creare ambienti ariosi e modulari, segnò l'inizio di un nuovo approccio all'organizzazione delle mostre. L'adozione di una struttura modulare, che permetteva rapidi montaggi e smontaggi, offriva una grande flessibilità e ha posto le basi per l'evoluzione delle esposizioni universali moderne.

Un esempio è l'Expo di Parigi del 1855 dove si vede un'attenzione maggiore all'esposizione e alla modularità in tutte le sue sfaccettature dall'estetica alla funzionalità tenendo fortemente in considerazione la fruizione da parte del pubblico.



Esposizione di Parigi del 1855.

I materiali: ferro

Prima dell'introduzione del ferro, le strutture architettoniche si basavano su materiali tradizionali come pietra e legno, che limitavano la possibilità di creare spazi ampi e leggeri. Il ferro, tuttavia, aveva un vantaggio fondamentale: la sua resistenza alla trazione.

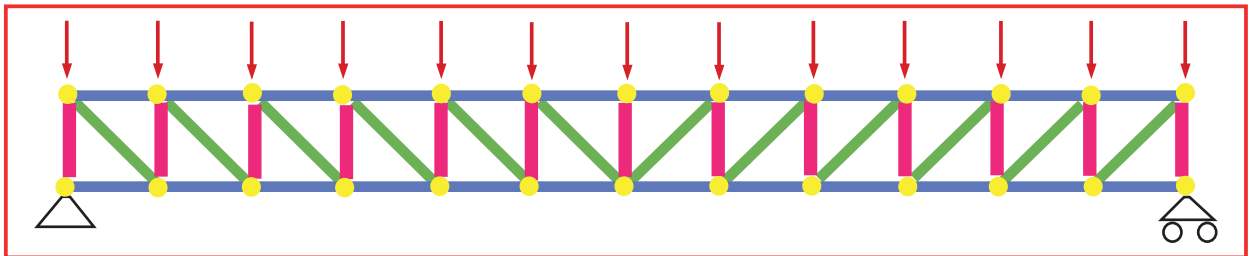


Esempio di aste che vengono utilizzate come elemento di trazione.

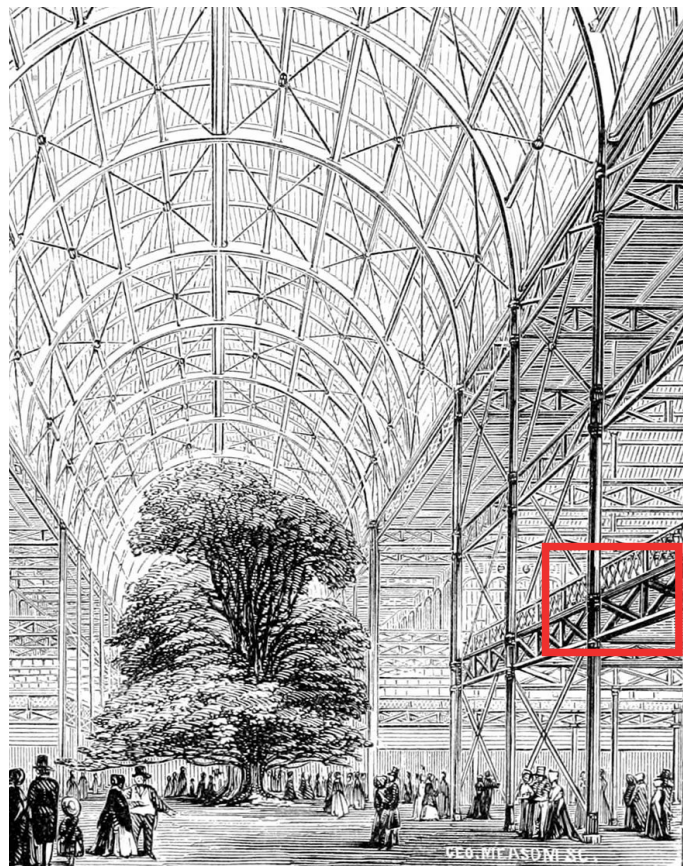
Questo consentiva di costruire strutture più leggere e più alte, senza la necessità di massicci pilastri o muri portanti. Inoltre, la produzione in serie di elementi prefabbricati in ferro rese possibile la realizzazione di edifici complessi in tempi relativamente brevi.

Tuttavia, nelle costruzioni in ferro esistevano anche elementi soggetti a compressione, come le colonne e alcuni elementi strutturali verticali.

In questi casi, il ferro veniva utilizzato in combinazione con altre forme costruttive per garantire la stabilità dell'edificio. Nel Crystal Palace, ad esempio, i pilastri in ferro sostenevano il peso della struttura (compressione), mentre le travi e le arcate contribuivano alla resistenza alle sollecitazioni orizzontali (trazione).



Schema statico delle aste.



I materiali: vetro

Il vetro, utilizzato in combinazione con il ferro, fu un altro materiale che segnò una grande innovazione nell'architettura moderna. Prima dell'industrializzazione, il vetro era costoso e utilizzato solo in piccole quantità. Con l'avanzare della tecnologia, fu possibile produrre lastre di vetro più grandi e resistenti, che divennero fondamentali per l'edilizia industriale.



Galleria Vittorio Emanuele II, Milano.

L'uso del vetro aprì la strada anche alla progettazione di grandi vetrate e facciate completamente trasparenti, che sarebbero diventate caratteristiche di molti edifici moderni, come le gallerie commerciali, i grattacieli e i centri commerciali del XX secolo.

L' Esposizione Universale di Parigi del 1889

Anche le successive Esposizioni Universali, come quella di Parigi nel 1889, riflettono questa tendenza a utilizzare ferro e vetro per creare spazi ampi e luminosi. Questi materiali divennero simbolo di modernità e innovazione, non solo per le strutture espositive, ma anche per i nuovi edifici commerciali e pubblici del periodo.



La Tour Eiffel

Costruita in onore del centenario della Rivoluzione Francese, la Tour Eiffel rappresenta il progresso dell'ingegneria contemporanea.

Realizzata con oltre 18.000 pezzi di ferro battuto, la torre fu progettata per essere leggera ma estremamente resistente, sfruttando la distribuzione delle forze in modo ottimale. Inizialmente criticata per la sua estetica, divenne poi un simbolo di progresso tecnologico e modernità.





Esposizione Universale di Bruxelles, 1935

L'Esposizione Universale di Bruxelles del 1935 fu un evento significativo che celebrò il 50° anniversario della fondazione dello Stato Libero del Congo. L'esposizione attirò circa 20 milioni di visitatori e vide la partecipazione di diversi architetti di spicco.

Le Corbusier, ad esempio, introdusse un approccio innovativo, basato su principi di funzionalità, modularità e razionalità, sfruttando materiali moderni come il cemento armato per creare edifici flessibili e geometricamente puri. Egli vedeva l'architettura non solo come un'arte, ma come una scienza al servizio della società, capace di migliorare il modo di vivere attraverso spazi ben progettati e in armonia con l'ambiente urbano.



Il Palais des Expositions (o Grand Palais) durante l'Esposizione universale di Bruxelles, 1935.



La modularità di Le Corbusier

Le Corbusier ha avuto un ruolo significativo anche nel campo degli allestimenti temporanei, applicando i suoi principi di razionalità e modularità alla progettazione di spazi espositivi. La sua visione dell'architettura non si limitava alla costruzione di edifici permanenti, ma si estendeva anche alla creazione di strutture leggere, flessibili e adatte a un uso temporaneo, caratteristiche fondamentali per gli spazi destinati alle esposizioni.

La visione

L'influenza di Le Corbusier negli allestimenti temporanei si percepisce ancora oggi nelle esposizioni contemporanee, dove i suoi principi di funzionalità, leggerezza e modularità continuano a ispirare architetti e designer. La sua ricerca sull'uso del cemento armato e delle forme geometriche pure ha contribuito a definire un linguaggio architettonico che ha trovato applicazione anche nelle strutture temporanee, anticipando in parte l'evoluzione delle tensostrutture e delle architetture effimere moderne.

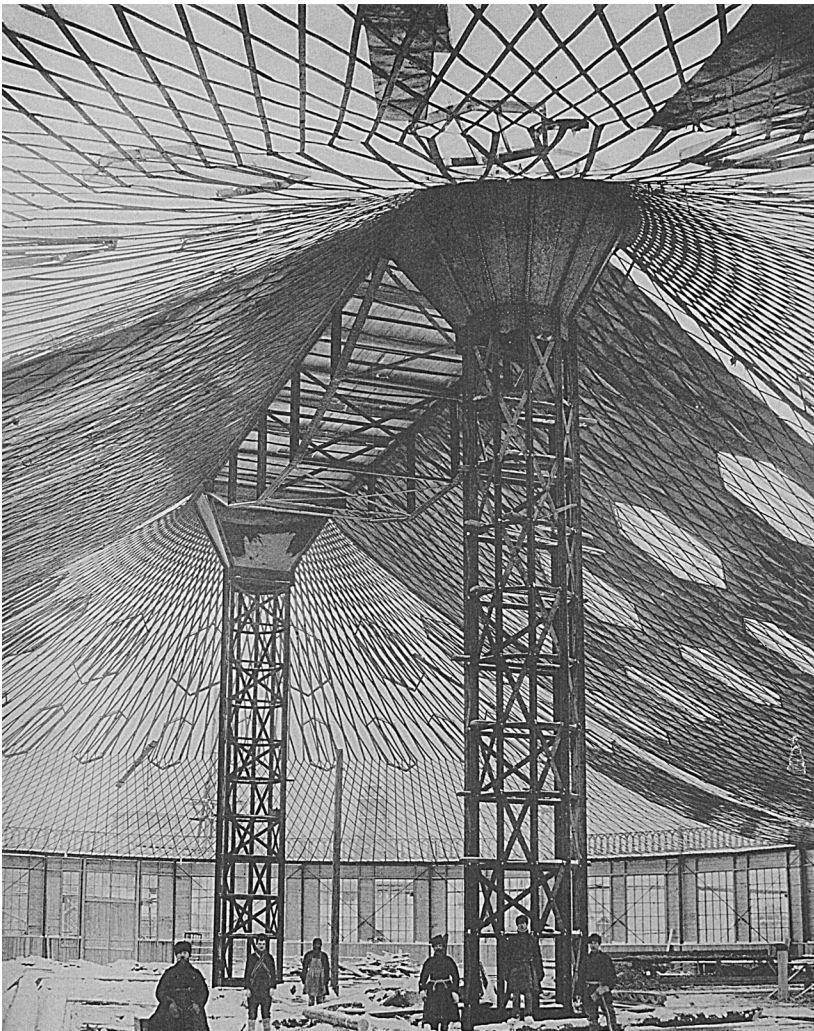


*Padiglione Philips, Le Corbusier,
Bruxelles 1958*

01.4 Dal cemento armato alle Tensostrutture

Le Corbusier sperimentava con l'uso del cemento armato e delle forme geometriche pure, gettando le basi per un'architettura più modulare e adattabile, adatta anche agli allestimenti temporanei.

Le esposizioni precedenti, come quelle di Parigi e Bruxelles, esplorarono nuove possibilità costruttive attraverso il cemento armato, che permise la creazione di edifici più audaci. Tuttavia, la modularità e la facilità di montaggio rimasero limitate rispetto a ciò che sarebbe stato possibile con le tensostrutture.



*Prima tensostruttura ideata da
Vladimir Grigor'evič Šuchov, fiera
Nizhny, 1895.*

Il Dopoguerra e l'innovazione delle tensostrutture

Dopo la Seconda Guerra Mondiale, la necessità di costruzioni più rapide, economiche e versatili portò all'evoluzione delle tensostrutture. Questo nuovo approccio si basava su superfici leggere, spesso sostenute da cavi in tensione piuttosto che da elementi rigidi in compressione.



*Dettaglio tensostruttura,
dell'esposizione mondiale di
Montreal, 1967.*

Frei Otto, pioniere delle tensostrutture contemporanee

Le Corbusier sperimentava con l'uso del cemento armato e delle forme geometriche pure, gettando le basi per un'architettura più modulare e adattabile, adatta anche agli allestimenti temporanei.

Le esposizioni precedenti, come quelle di Parigi e Bruxelles, esplorarono nuove possibilità costruttive attraverso il cemento armato, che permise la creazione di edifici più audaci. Tuttavia, la modularità e la facilità di montaggio rimasero limitate rispetto a ciò che sarebbe stato possibile con le tensostrutture.

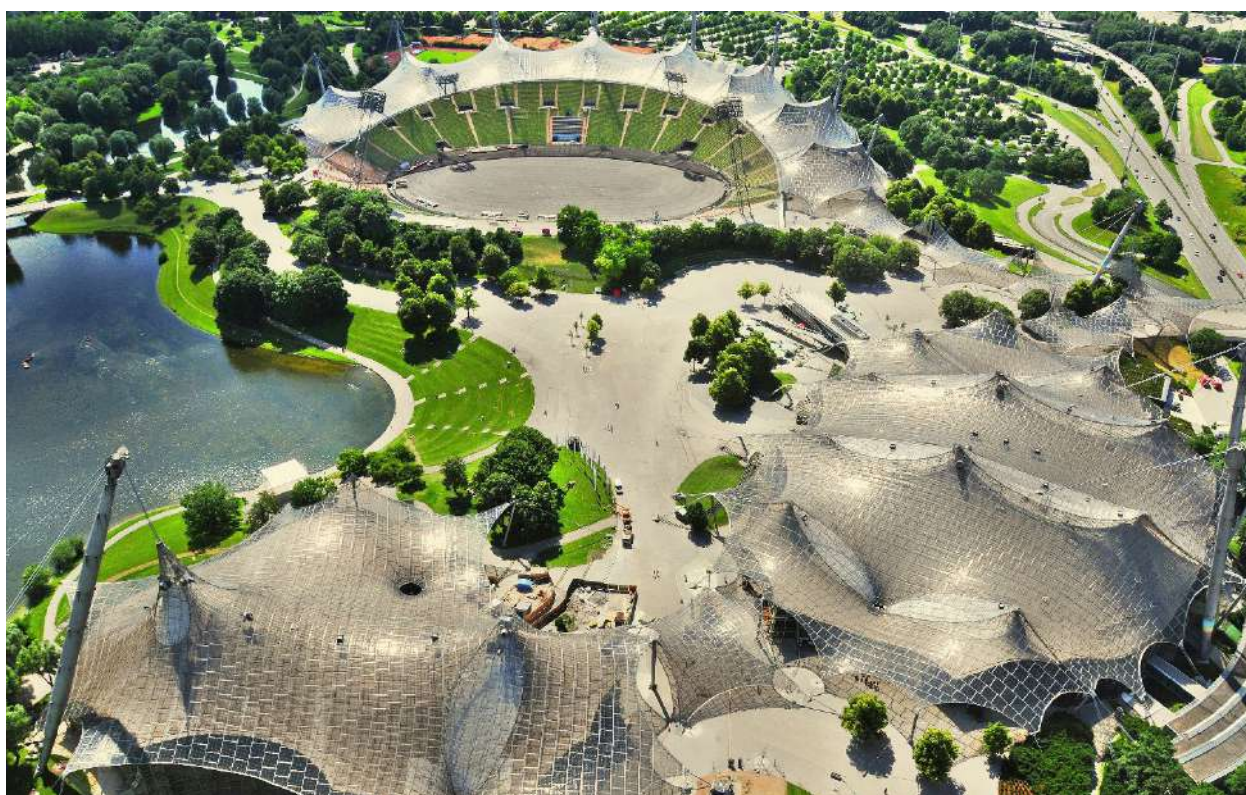


*Il Padiglione Federale Tedesco
all'Expo Mondiale di Montreal,
Canada, 1967*

Uno dei suoi primi progetti significativi fu il tetto in tessuto per il padiglione dell'Expo di Montréal 1967. Questa struttura, realizzata con membrane in tensione, dimostrò che si potevano coprire enormi superfici senza necessità di pilastri interni.



Un altro progetto iconico fu lo Stadio Olimpico di Monaco 1972, dove Frei Otto applicò tensostrutture innovative per creare coperture leggere e trasparenti, offrendo un'alternativa ai tradizionali tetti rigidi.



La rivoluzione delle tensostrutture per l' Exhibition Design

Frei Otto rivoluzionò il concetto di exhibition design portando un cambiamento radicale nella progettazione degli spazi espositivi temporanei. Le sue strutture erano concepite per essere estremamente flessibili e leggere, adattandosi alle esigenze di eventi effimeri come le esposizioni universali.

La sua ricerca sulle forme naturali e sulla tensione strutturale gli permise di sviluppare un nuovo linguaggio architettonico in cui l'uso ridotto di materiali non comprometteva la stabilità e l'efficacia delle coperture.



Uno degli aspetti più innovativi del suo lavoro fu la creazione di padiglioni temporanei che potevano essere facilmente montati e smontati, eliminando la necessità di elementi strutturali pesanti e rigidi. Questo approccio non solo migliorava la sostenibilità ambientale, riducendo lo spreco di risorse, ma favoriva anche una maggiore libertà creativa nell'organizzazione degli spazi.

I suoi progetti dimostravano che le strutture leggere potevano essere altrettanto resistenti ed efficaci delle costruzioni più tradizionali.

L'influenza di Frei Otto

L'approccio di Frei Otto, ridefinì il concetto stesso di spazio espositivo, introducendo un'idea di architettura dinamica e in costante trasformazione. Grazie alla sua influenza, il design delle esposizioni contemporanee abbandonò progressivamente la rigidità dei padiglioni monumentali, avvicinandosi a soluzioni più flessibili, sostenibili ed economiche.

Le sue idee continuano a influenzare l'architettura contemporanea, soprattutto in ambiti legati alla progettazione di eventi temporanei, festival e grandi coperture leggere, rendendo il suo contributo ancora oggi essenziale per il settore dell'exhibition design.



*Arco realizzato da Frei Otto alla
Federal Garden Exhibition, 1957,
Cologne*

Expo 2000, Hannover

Un esempio più recente che riflette l'influenza di Frei Otto è il Padiglione del Giappone all'Expo di Hannover 2000, progettato da Shigeru Ban.

Questa struttura temporanea sfruttava un sistema di archi in carta e una membrana in fibra tessile, dimostrando come fosse possibile realizzare un padiglione leggero, sostenibile e interamente riciclabile. L'uso di materiali innovativi e la logica strutturale ispirata alle tensostrutture di Otto hanno reso questo padiglione un riferimento per l'architettura espositiva moderna.



01.5 Dalle tensostrutture al tensegrity

L'evoluzione delle tensostrutture nell'ambito dell'exhibition design ha portato a soluzioni sempre più leggere, flessibili ed efficienti. Se le sperimentazioni di Frei Otto hanno aperto la strada a nuove modalità costruttive basate sull'uso di membrane e cavi in tensione, il passo successivo è rappresentato dall'applicazione del principio di tensegrity.



Questo concetto, sviluppato da Buckminster Fuller e approfondito da numerosi architetti e ingegneri, ha permesso di realizzare strutture in cui gli elementi rigidi lavorano esclusivamente in compressione, mentre i cavi flessibili trasmettono solo forze di trazione, creando sistemi autoportanti incredibilmente stabili e resistenti. Il tensegrity ha trovato applicazione anche nelle esposizioni temporanee, diventando una tecnologia chiave per la progettazione di padiglioni innovativi, capaci di coniugare estetica e funzionalità.



Padiglione degli Stati Uniti, Expo di Osaka, 1970



02

Le Tensostrutture

02.0 Introduzione

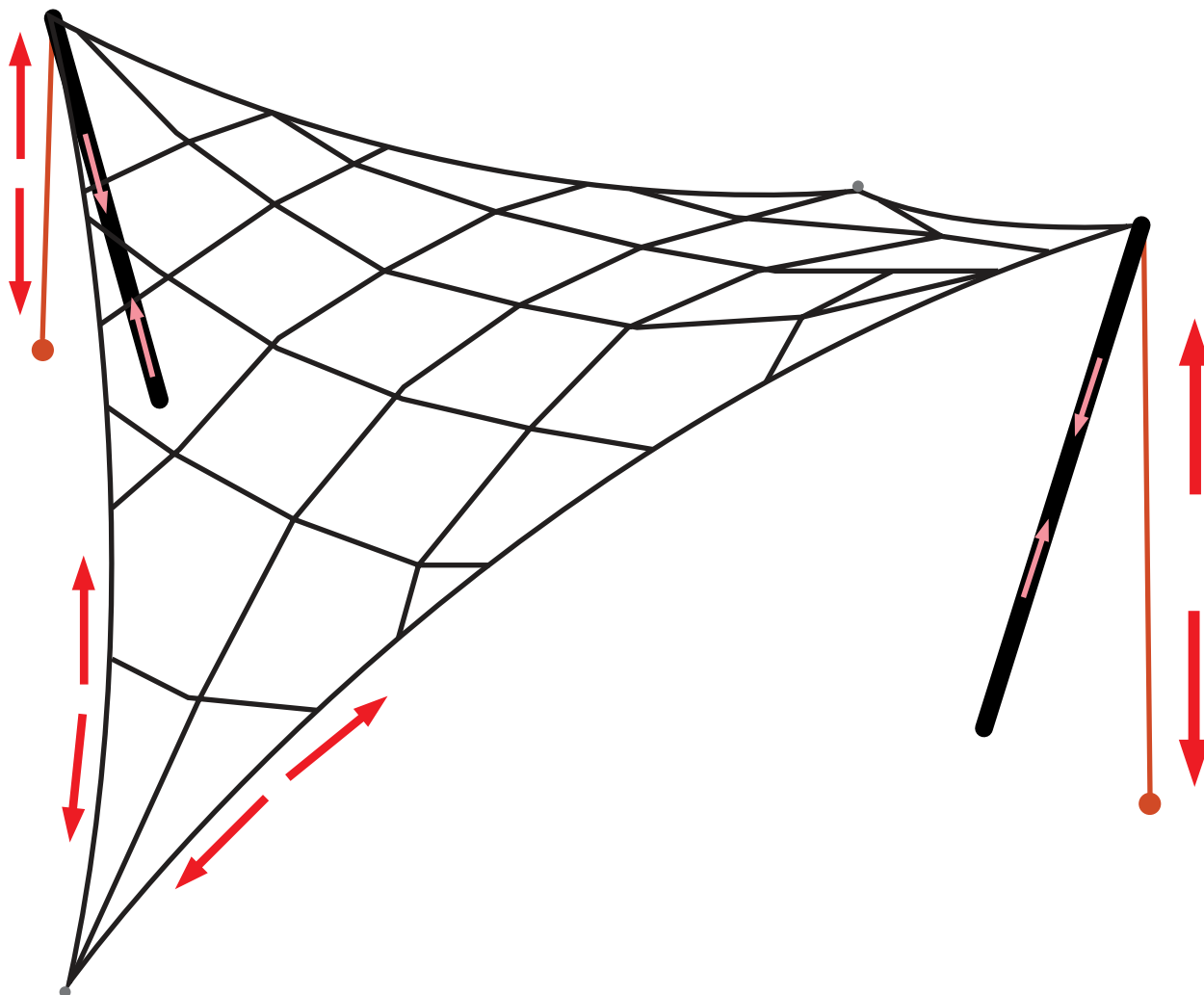
Le tensostrutture rappresentano una delle innovazioni più significative nell'architettura contemporanea, specialmente nell'ambito degli allestimenti temporanei e dell'exhibition design. Caratterizzate da un sistema costruttivo in cui i materiali lavorano principalmente in trazione, queste strutture si distinguono per la loro leggerezza, versatilità e capacità di coprire ampie superfici senza necessità di supporti rigidi massicci.

02.1 Principi Base delle Tensostrutture

Le tensostrutture si basano su un principio statico fondamentale: il trasferimento delle forze attraverso elementi strutturali che lavorano prevalentemente in trazione. A differenza delle costruzioni tradizionali, che si affidano a elementi rigidi (travi, pilastri e muri portanti) per resistere ai carichi attraverso la compressione e la flessione, le tensostrutture sfruttano l'equilibrio tra cavi tesi e elementi di supporto rigidi per distribuire le forze in modo efficiente e leggero.



*Tensostruttura dell'azienda Rasoia,
Milano.*



*Schema statico di una
tensostruttura.*

Dal punto di vista statico, una tensostruttura è costituita principalmente da:

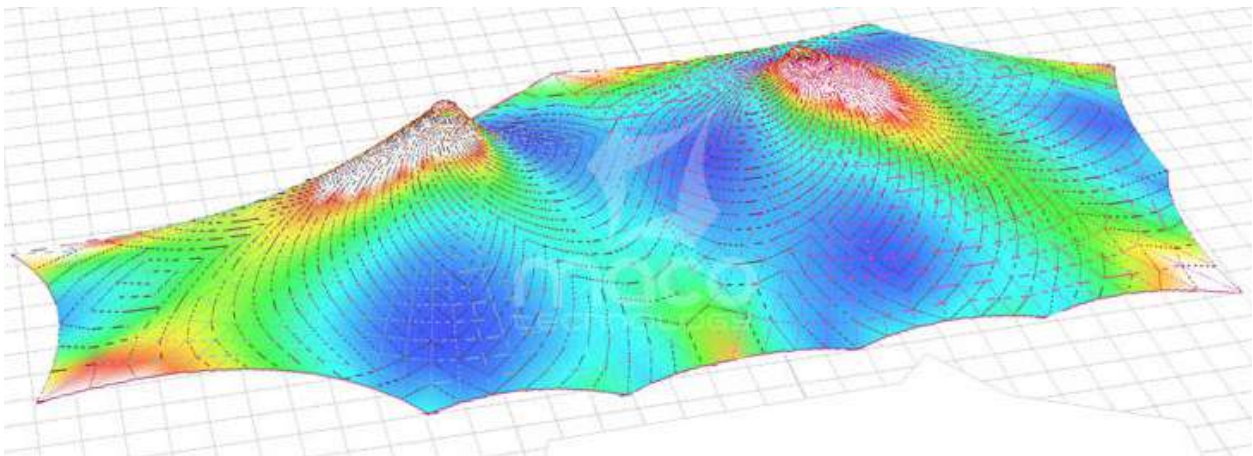
Elementi in trazione: generalmente cavi d'acciaio o membrane tessili, che sopportano le forze di tensione generate dal carico applicato. Questi elementi sono responsabili della stabilità complessiva della struttura.

Elementi in compressione: possono essere pilastri, archi o altri supporti rigidi, che servono a mantenere la struttura in equilibrio e a contrastare la tensione dei cavi.

L'importanza della membrana

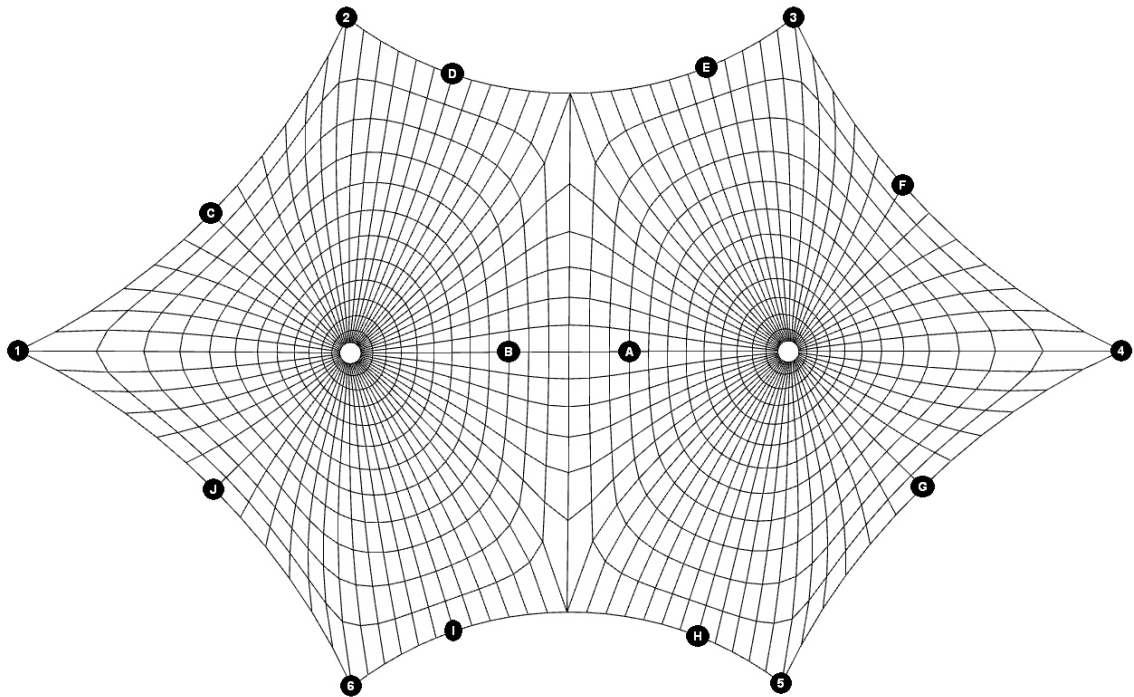
Nell'immagine precedente, la membrana rappresenta l'elemento chiave della tensostruttura, poiché lavora interamente in trazione distribuendo i carichi attraverso la sua superficie.

Grazie alla curvatura controllata e alla tensione esercitata dai cavi, le forze vengono trasferite in modo efficiente ai punti di ancoraggio e ai supporti rigidi, garantendo stabilità e resistenza ai carichi esterni come vento e neve.



La sua forma, contribuisce a mantenere la struttura in equilibrio, evitando deformazioni indesiderate. Questo tipo di configurazione assicura che la membrana rimanga tesa e funzionale senza la necessità di elementi rigidi aggiuntivi, permettendo di coprire ampie superfici con un peso ridotto.

L'uso della membrana rende la struttura leggera ed estremamente efficiente dal punto di vista costruttivo. Rispetto alle coperture tradizionali, richiede un minor numero di supporti, rendendola ideale per installazioni temporanee come padiglioni espositivi, spazi per eventi e fiere. Inoltre, la sua modularità consente di essere facilmente smontata, riadattata e riutilizzata, favorendo un approccio sostenibile all'architettura temporanea.



Le forme delle tensostrutture

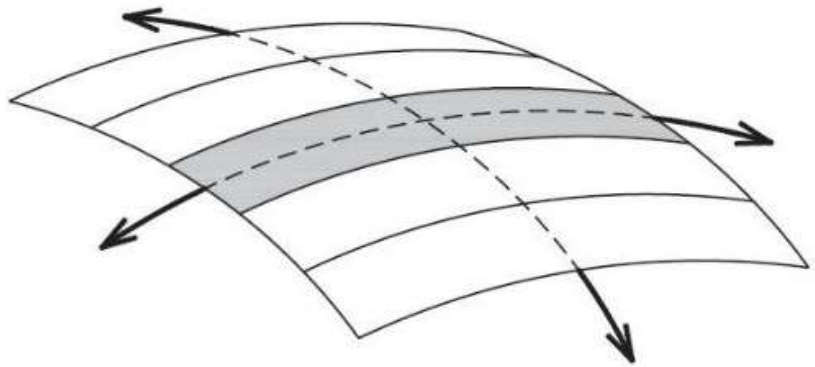
Le tensostrutture presentano superfici caratterizzate da una doppia curvatura, ossia curve in due direzioni diverse. A seconda dell'orientamento di queste curvature, è possibile distinguere due tipologie principali di forme: sinclastiche e anticlastiche.



Tensostrutture sinclastiche

Esse presentano una curvatura che si sviluppa nella stessa direzione in entrambi i sensi, risultando in una forma convessa o a cupola.

Questo tipo di configurazione è tipico delle strutture a pneumatico o a pressione interna, come le coperture gonfiabili, in cui la tensione superficiale si distribuisce uniformemente su tutta la membrana. Grazie alla loro forma, le tensostrutture sinclastiche offrono una maggiore resistenza alla pressione e sono particolarmente adatte per coperture leggere ed espandibili.



Schema tensostruttura sinclastica

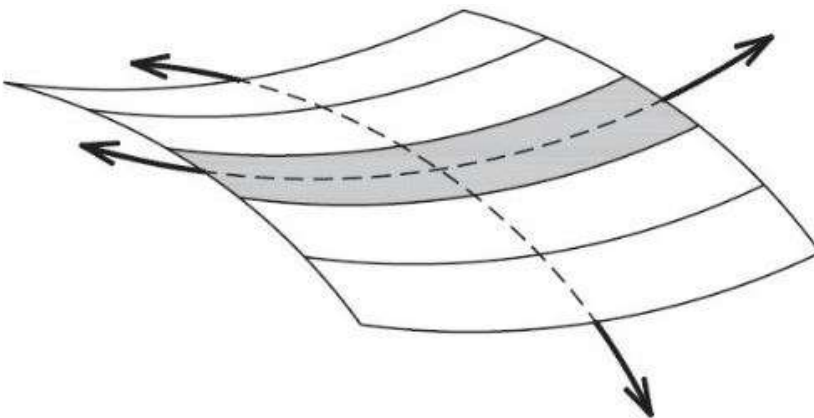


Vista top

Tensostrutture Anticlastiche

Le tensostrutture anticlastiche, invece, si caratterizzano per una doppia curvatura con direzioni opposte, assumendo forme a “sella” o iperboliche.

Questa configurazione consente di ottenere superfici più stabili e rigide senza l'uso di elementi strutturali aggiuntivi. Le tensostrutture anticlastiche sono molto utilizzate per coperture di ampie dimensioni, come tendostrutture per eventi o padiglioni espositivi, poiché permettono una distribuzione efficiente dei carichi e garantiscono un'elevata resistenza a fattori esterni come il vento.



Schema tensostruttura anticlastica



Vista top



Differenza tra tendostruttura e tensostruttura

Precedentemente abbiamo detto che le tensostrutture si basano esclusivamente su elementi in trazione, come cavi e membrane, che lavorano in equilibrio con elementi rigidi in compressione.

Le tendostrutture, invece, sono strutture modulari caratterizzate da una copertura in telo o membrana ancorata a una struttura portante più rigida, solitamente costituita da tubolari in metallo. A differenza delle tensostrutture, le tendostrutture possono avere elementi strutturali più convenzionali, come travi e colonne, e vengono utilizzate prevalentemente per scopi temporanei, come tendoni per eventi, fiere o coperture industriali.



Esempio di tendostruttura

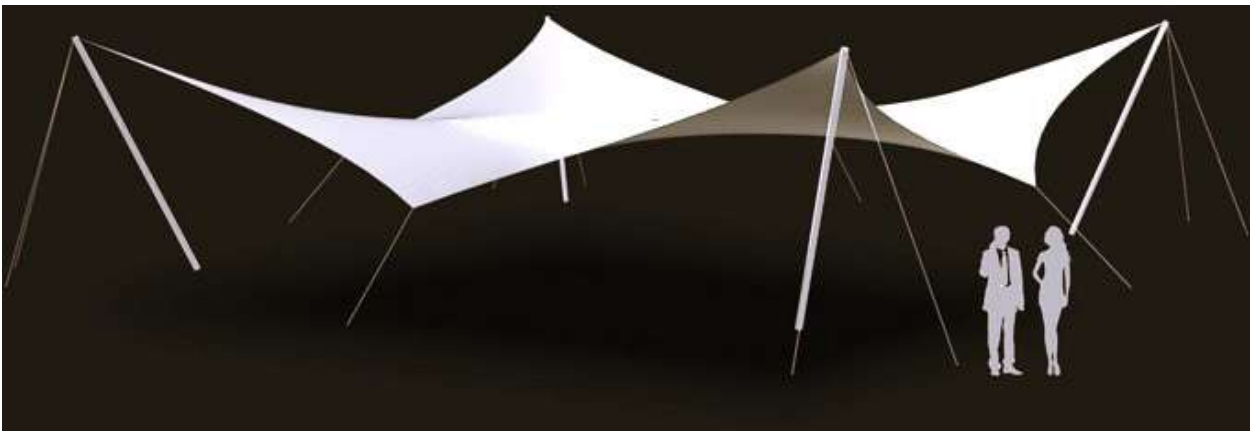
Pur utilizzando membrane o teli di copertura, non si basano sul principio dell'equilibrio tra tensione e compressione, ma piuttosto su una struttura portante rigida che sostiene il telo. Questo le rende più semplici da montare e smontare, ma al tempo stesso meno efficienti dal punto di vista della distribuzione delle forze. Il telo, infatti, ha una funzione prevalentemente protettiva e non strutturale, mentre il peso della copertura e le sollecitazioni vengono assorbite dagli elementi portanti.



02.2 Tecnologie e materiali

Le tensostrutture si distinguono per l'uso di materiali altamente performanti, scelti in base alle loro proprietà di resistenza, leggerezza e durabilità.

Tra i materiali più utilizzati troviamo le membrane tessili, i cavi d'acciaio e i materiali compositi, ognuno con caratteristiche specifiche che contribuiscono all'efficienza della struttura.



Le membrane tessili

sono il cuore delle tensostrutture, poiché costituiscono l'elemento principale di copertura e lavorano interamente in trazione, senza resistere a forze di compressione o flessione. Per garantire l'efficienza strutturale, devono possedere caratteristiche specifiche che le rendano adatte a sopportare i carichi senza compromettere la forma della struttura.

Una delle proprietà fondamentali delle membrane tessili è la loro leggera deformazione elastica, che consente alla struttura di adattarsi ai carichi variabili come vento, neve e dilatazioni termiche, senza subire danni o perdite di stabilità.

Questa elasticità controllata permette alla membrana di distribuire uniformemente le forze e di assorbire gli stress senza compromettere l'integrità della struttura. Se la membrana fosse completamente rigida, non sarebbe in grado di adattarsi alle sollecitazioni esterne, rischiando strappi o cedimenti.

Al contrario, se fosse troppo deformabile, la struttura perderebbe la sua forma ottimale, compromettendo sia l'estetica che la funzionalità.



Materiale della membrana: PVC

I materiali comunemente impiegati per la realizzazione delle membrane tessili includono PVC (policloruro di vinile), PTFE (politetrafluoroetilene) ed ETFE (etilene-tetrafluoroetilene).

Il PVC spalmato, tra i più utilizzati, è una soluzione economica e versatile. Si ottiene attraverso la spalmatura di uno strato di PVC su una base in fibra di poliestere, che funge da supporto strutturale e migliora la resistenza meccanica della membrana.

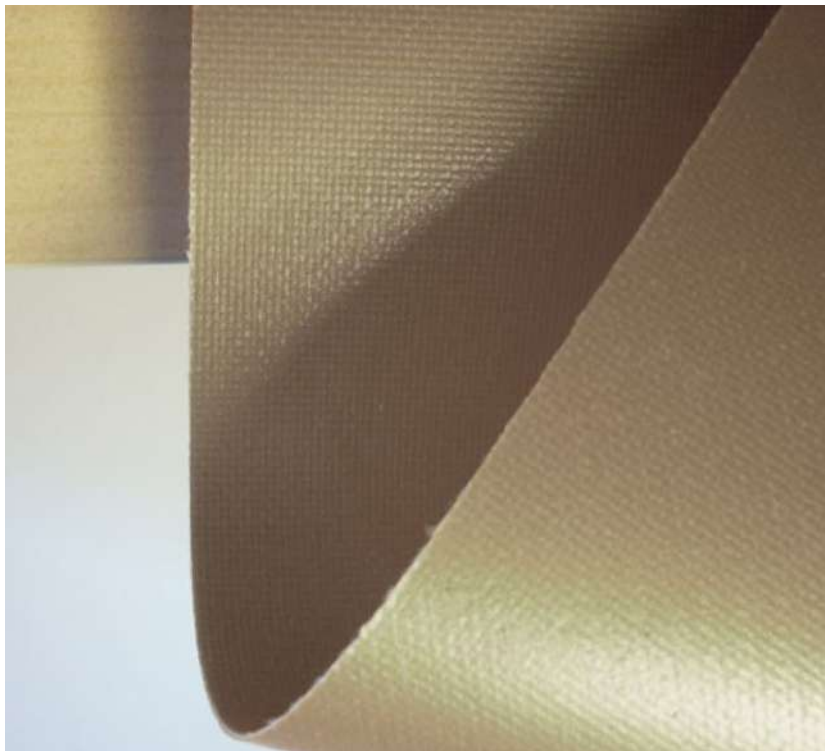
Questa tecnica consente di ottenere un materiale altamente flessibile, impermeabile e resistente ai raggi UV e agli agenti atmosferici, se opportunamente trattato con vernici protettive come il PVDF (fluoruro di polivinilidene).



*Membrana il poliestere con PVC
spalmato*

Il PTFE

Il PTFE (teflon), invece, si distingue per la sua elevata durabilità e resistenza agli agenti atmosferici. Essendo un materiale autopulente e con un'elevata resistenza chimica, mantiene ottime prestazioni meccaniche nel tempo e richiede una manutenzione minima. Per questo motivo, viene spesso impiegato in grandi coperture permanenti, come stadi o strutture sportive.



Membrana in fibra di vetro spalmata con PTFE

L' ETFE

Esso è un materiale innovativo, leggero e altamente trasparente, in grado di garantire un'ottima trasmissione luminosa. Viene spesso utilizzato per realizzare coperture modulari a cuscini gonfiati con aria, ideali per strutture avveniristiche come musei, serre e padiglioni espositivi.

Tecnologie di produzione della membrana

La produzione delle membrane tessili per le tensostrutture è un processo altamente tecnologico che combina materiali avanzati e tecniche di lavorazione specifiche per garantire resistenza, flessibilità e durabilità.

Il processo di produzione inizia con la selezione del tessuto di base, generalmente costituito da fibre sintetiche ad alta resistenza come il poliestere o il vetroresina, che forniscono alla membrana un supporto strutturale capace di sopportare sollecitazioni meccaniche e ambientali.



Produzione tessuto in poliestere,
azienda Girofil, Milano.

Spalmatura del polimero

Successivamente, il tessuto viene sottoposto a un trattamento di spalmatura, in cui viene ricoperto con materiali plastici come il PVC (policloruro di vinile), il PTFE (politetrafluoroetilene) o il silicone.

La spalmatura avviene attraverso diversi metodi, tra cui il calandraggio, in cui il materiale plastico viene fuso e pressato sul tessuto tramite rulli riscaldati, oppure la spalmatura per immersione, in cui il tessuto viene immerso in un bagno di polimero liquido e successivamente asciugato.



Calandratura del poliestere,
azienda Texcene, Bergamo.

Stabilizzazione dimensionale

Dopo la spalmatura, la membrana tessile viene sottoposta a un processo di stabilizzazione dimensionale, in cui viene riscaldata e tensionata per eliminare eventuali deformazioni e garantire che il materiale mantenga la sua forma sotto carico. Questo passaggio è cruciale per evitare il rilassamento del tessuto una volta installato nella struttura.



Stabilizzazione dimensionale,
azienda Texcene, Bergamo.

Termosaldatura

Un altro aspetto fondamentale nella produzione delle membrane tessili è l'assemblaggio dei pannelli, che avviene attraverso tecniche di saldatura ad alta frequenza o termosaldatura. Questi processi consentono di unire i vari elementi senza compromettere la resistenza del materiale, creando giunzioni perfettamente sigillate che impediscono infiltrazioni d'acqua e garantiscono la continuità strutturale della copertura.



Termosaldatura, di un tessuto non definito, azienda Arrow, Vicenza.

Cavi di tensionamento

I cavi d'acciaio svolgono un ruolo fondamentale nelle tensostrutture, poiché costituiscono l'elemento strutturale che permette alla membrana di mantenere la sua forma e di distribuire i carichi in modo efficace. Lavorano esclusivamente in trazione, assorbendo e ridistribuendo le forze senza opporre resistenza alla compressione o alla flessione.



Uno degli aspetti più importanti dei cavi d'acciaio è la loro elevata resistenza alla trazione, che consente di realizzare strutture leggere ma al tempo stesso capaci di sopportare carichi significativi. Grazie alla loro capacità di assorbire le sollecitazioni, permettono di ridurre la necessità di elementi rigidi, come pilastri e travi, contribuendo alla caratteristica leggerezza e dinamicità delle tensostrutture.



Materiale dei cavi

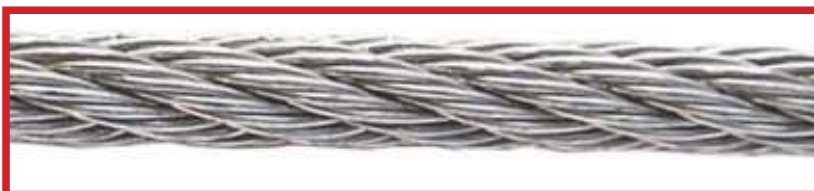
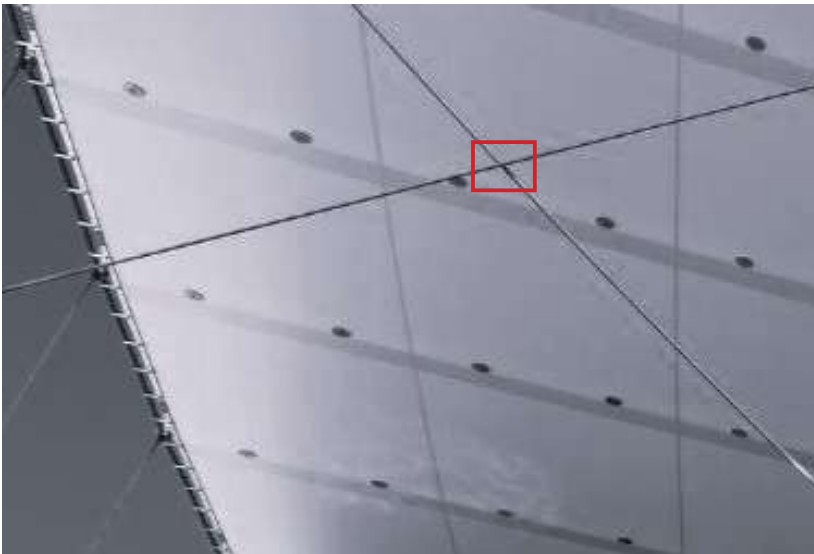
Il materiale più comunemente utilizzato per i cavi di tensionamento nelle tensostrutture è l'acciaio ad alta resistenza, spesso sotto forma di trefoli o funi intrecciate. L'acciaio è preferito per la sua elevata capacità di resistere a sforzi di trazione senza subire deformazioni permanenti.

Le tipologie di acciaio più utilizzate sono:

Acciaio zincato: trattato con uno strato di zinco per proteggerlo dalla corrosione, è una delle soluzioni più economiche e diffuse.

Acciaio inossidabile: più resistente alla corrosione rispetto allo zincato, particolarmente adatto per ambienti umidi o marini dove l'esposizione agli agenti atmosferici è elevata.

Acciaio armonico: caratterizzato da un'elevata elasticità e resistenza alla fatica, viene impiegato in applicazioni dove il cavo è soggetto a sollecitazioni ripetute.



Cavi applicati su una tensostruttura

Ulteriori trattamenti

Per garantire una maggiore durabilità, i cavi di tensionamento vengono spesso trattati con rivestimenti protettivi. Oltre alla zincatura per l'acciaio, possono essere rivestiti con materiali come PVC o PTFE, che migliorano la resistenza agli agenti atmosferici e riducono l'usura da attrito.



In alcuni casi, i cavi vengono pretesi prima dell'installazione per ridurre al minimo eventuali allungamenti indesiderati nel tempo e migliorare la stabilità della tensostruttura. Questa fase è cruciale per garantire il corretto funzionamento della struttura nel lungo periodo.

Grazie alla combinazione di materiali avanzati e trattamenti specifici, i cavi di tensionamento assicurano prestazioni elevate, contribuendo alla realizzazione di tensostrutture leggere, resistenti e adatte a una vasta gamma di applicazioni architettoniche.

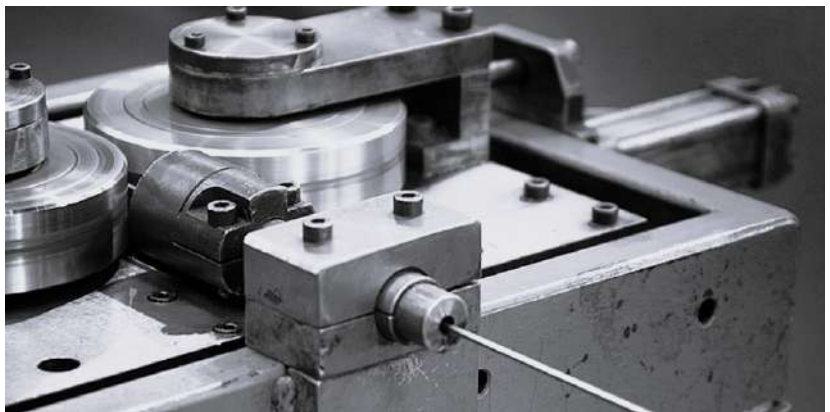
Tecnologie di produzione dei cavi

La produzione inizia con la scelta dell'acciaio ad alta resistenza, generalmente a basso contenuto di carbonio o legato con elementi come cromo, nichel o molibdeno per migliorarne le proprietà meccaniche. La qualità dell'acciaio influisce direttamente sulla resistenza del cavo alla trazione e alla fatica.



Trafilatura

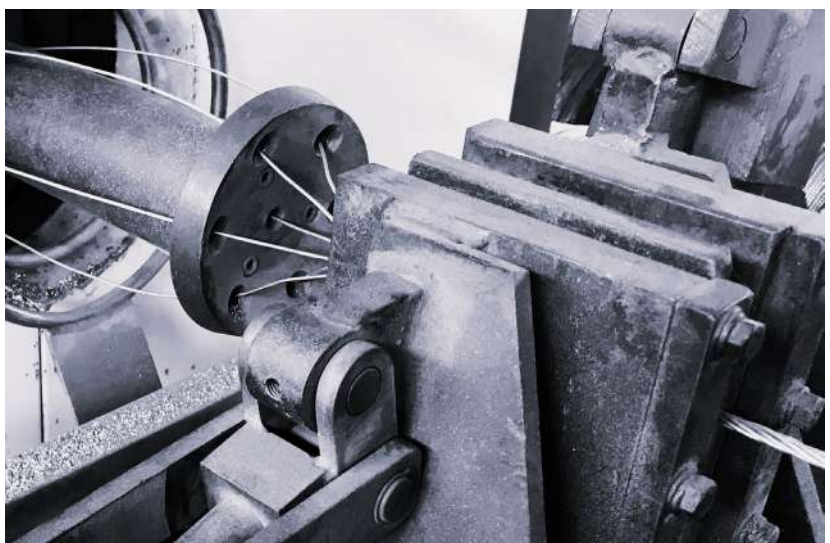
I cavi in acciaio sono composti da più fili sottili intrecciati. La produzione inizia con il processo di trafilatura, in cui barre o vergelle d'acciaio vengono fatte passare attraverso matrici di riduzione fino a ottenere fili di diametro inferiore (solitamente tra 0,5 mm e 5 mm). Questo processo aumenta la resistenza del materiale per effetto dell'indurimento plastico.



Trafilatura di una barra in acciaio, azienda Trafilspec, Como.

Cordatura

Una volta ottenuti i fili d'acciaio, si procede alla cordatura, che consiste nell'intrecciare più fili per formare i trefoli, che a loro volta vengono poi avvolti intorno a un'anima centrale per creare il cavo finale.



Cordatura dei fili in acciaio, azienda Eurofuni, Ascoli Piceno.

02.3 Tensostrutture e Sostenibilità

Un altro aspetto fondamentale è la modularità, che consente di adattare le tensostrutture a diverse esigenze progettuali e di riconfigurarle facilmente.

Questo è particolarmente vantaggioso negli allestimenti temporanei, come fiere ed esposizioni, dove la necessità di montaggio e smontaggio rapidi è essenziale. Inoltre, la prefabbricazione degli elementi costruttivi riduce i tempi di realizzazione e minimizza gli sprechi di materiale.



*Tensostrutture a crociera, azienda
Maco Technology, Brescia.*

L'efficienza energetica è un altro vantaggio significativo: le membrane semitrasparenti utilizzate nelle tensostrutture permettono un'ottima illuminazione naturale, riducendo il bisogno di luce artificiale e abbattendo i consumi energetici. Inoltre, la forma aerodinamica delle coperture aiuta a ottimizzare la ventilazione naturale, migliorando il comfort termico interno senza la necessità di impianti di climatizzazione ad alto consumo.



Aeroporto Internazionale di Denver.

Prefabbricazione e Logistica sostenibile

Le tensostrutture si distinguono per l'uso di elementi prefabbricati, progettati e realizzati in stabilimento prima di essere trasportati e assemblati direttamente sul sito di installazione. Questo approccio porta con sé diversi vantaggi in termini di sostenibilità, efficienza e riduzione dell'impatto ambientale, rispetto ai metodi costruttivi tradizionali.



*Montaggio struttura autoportante
FuoriSalone Milano 2024, Amazon.*

Il processo inizia con la progettazione dettagliata dei singoli componenti, che devono rispondere a specifiche esigenze strutturali e funzionali. I materiali impiegati variano a seconda delle necessità dell'opera, ma includono generalmente cavi in acciaio, membrane tessili ad alte prestazioni e giunti specializzati per la connessione degli elementi.

La produzione degli elementi prefabbricati avviene in ambienti controllati, dove è possibile garantire un alto standard qualitativo e ridurre gli sprechi: le membrane vengono tagliate con precisione millimetrica e trattate per aumentare la loro resistenza agli agenti atmosferici e ai carichi di tensione. I cavi di tensionamento vengono preassemblati con ancoraggi e sistemi di connessione specifici, per facilitare il montaggio in cantiere.

Il trasporto e l'assemblaggio rappresentano una delle principali caratteristiche vantaggiose della prefabbricazione. Gli elementi vengono spediti in moduli compatti, riducendo l'ingombro e i costi logistici. Una volta giunti sul luogo di installazione, i componenti vengono rapidamente assemblati grazie a sistemi di aggancio predefiniti, minimizzando i tempi di montaggio e l'impatto ambientale della costruzione.



Le tensostrutture prefabbricate presentano inoltre una notevole flessibilità, in quanto possono essere smontate e riutilizzate in nuovi contesti. Questo aspetto le rende particolarmente adatte per eventi temporanei, esposizioni e strutture modulari, contribuendo alla riduzione dei rifiuti da demolizione e favorendo un approccio più sostenibile all'architettura.

02.4 Autoportanza, dalle Tensostrutture alle Tende Ferrino.

Le tensostrutture e le tende tecniche, come quelle prodotte da Ferrino, condividono lo stesso principio di funzionamento: la gestione delle forze attraverso elementi in trazione e compressione. Le grandi coperture tensili impiegano cavi e membrane per creare strutture leggere ma resistenti, sfruttando la tensione come principale forza portante.

Allo stesso modo, le tende Ferrino utilizzano palerie flessibili (elementi in compressione) e il tessuto teso (elemento in trazione) per garantire stabilità e resistenza agli agenti atmosferici.



Pur essendo su scala ridotta, adottano un principio simile, la loro struttura combina elementi flessibili in compressione, come le palerie in fibra di vetro o alluminio, con il tessuto teso, che lavora in trazione per mantenere la stabilità complessiva. Questo consente di resistere a sollecitazioni dinamiche come il vento, la neve o le deformazioni dovute a un terreno irregolare.



Un aspetto chiave è la forma pre-tensionata delle coperture. Nelle tensostrutture, le membrane vengono modellate per rispondere in modo efficiente alle sollecitazioni ambientali, spesso con superfici curve che distribuiscono i carichi in modo ottimale. Nelle tende da campeggio, la curvatura delle palerie e la tensione del telo contribuiscono a creare una struttura autoportante e resistente.

Fissaggio

Il fissaggio è un elemento essenziale per garantire stabilità e resistenza sia nelle tensostrutture architettoniche che nelle tende da campeggio, ma il metodo e i materiali utilizzati variano in base alla scala, all'uso e alle sollecitazioni previste.

Le tende da campeggio, pur basandosi sugli stessi principi di tensione e compressione delle tensostrutture, adottano sistemi di fissaggio più semplici e facilmente removibili. Il metodo più comune prevede l'uso di picchetti e tiranti, dove i punti di ancoraggio al suolo vengono realizzati con picchetti metallici o in plastica, inseriti nel terreno e collegati a cavi o fettucce che mantengono la struttura in tensione.



Un altro sistema di fissaggio fondamentale è costituito dai pali flessibili, generalmente realizzati in fibra di vetro, alluminio o materiali compositi, che si deformano elasticamente per creare l'ossatura della tenda e garantirne la stabilità. Inoltre, il telo della tenda viene collegato alla struttura portante attraverso ganci e occhielli, facilitando il montaggio e lo smontaggio rapido.



Le tende sinonimo di leggerezza

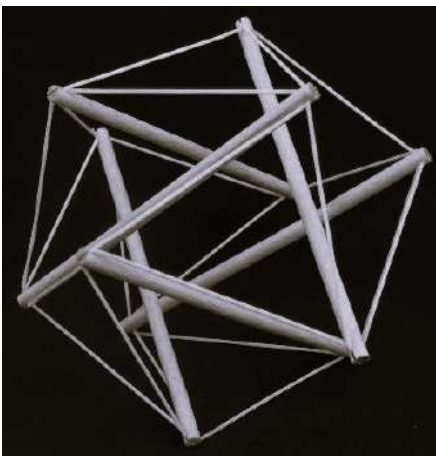
In conclusione, le tende rappresentano una delle applicazioni più semplici e versatili del concetto di tensostruttura, con il loro design che sfrutta la tensione del materiale per creare una struttura stabile senza bisogno di supporti rigidi esterni. Sebbene le tende siano spesso associate a strutture temporanee o leggere, il principio della autoportanza e la capacità di resistere a forze esterne, come vento e pioggia, dimostrano come anche le strutture leggere possano offrire solidità e sicurezza.





02.5 Il Tensegrity come Principio Strutturale

Il concetto di tensegrity rappresenta un'innovazione fondamentale nell'ambito delle strutture leggere, combinando elementi rigidi e flessibili in un equilibrio di forze che garantisce stabilità ed efficienza. Questo principio, sviluppato e teorizzato da Richard Buckminster Fuller e Kenneth Snelson nel XX secolo, si basa sulla capacità di un sistema di distribuire i carichi attraverso un'interazione tra elementi in trazione e compressione, senza che questi si tocchino direttamente.

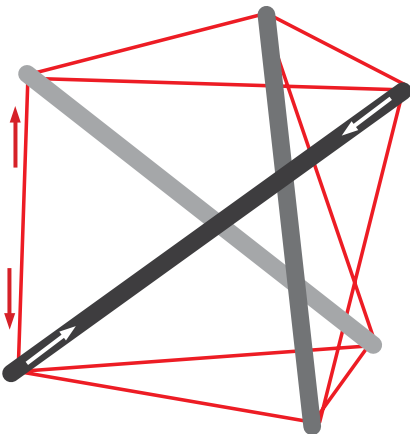


Equilibrio tra trazione e compressione

In una struttura tensegrale, le aste rigide lavorano in compressione sono circondate e mantenute in posizione da un sistema continuo di cavi che lavorano in trazione.

L'interazione tra questi due tipi di elementi permette di ottenere una stabilità intrinseca senza necessità di ancoraggi o supporti fissi.

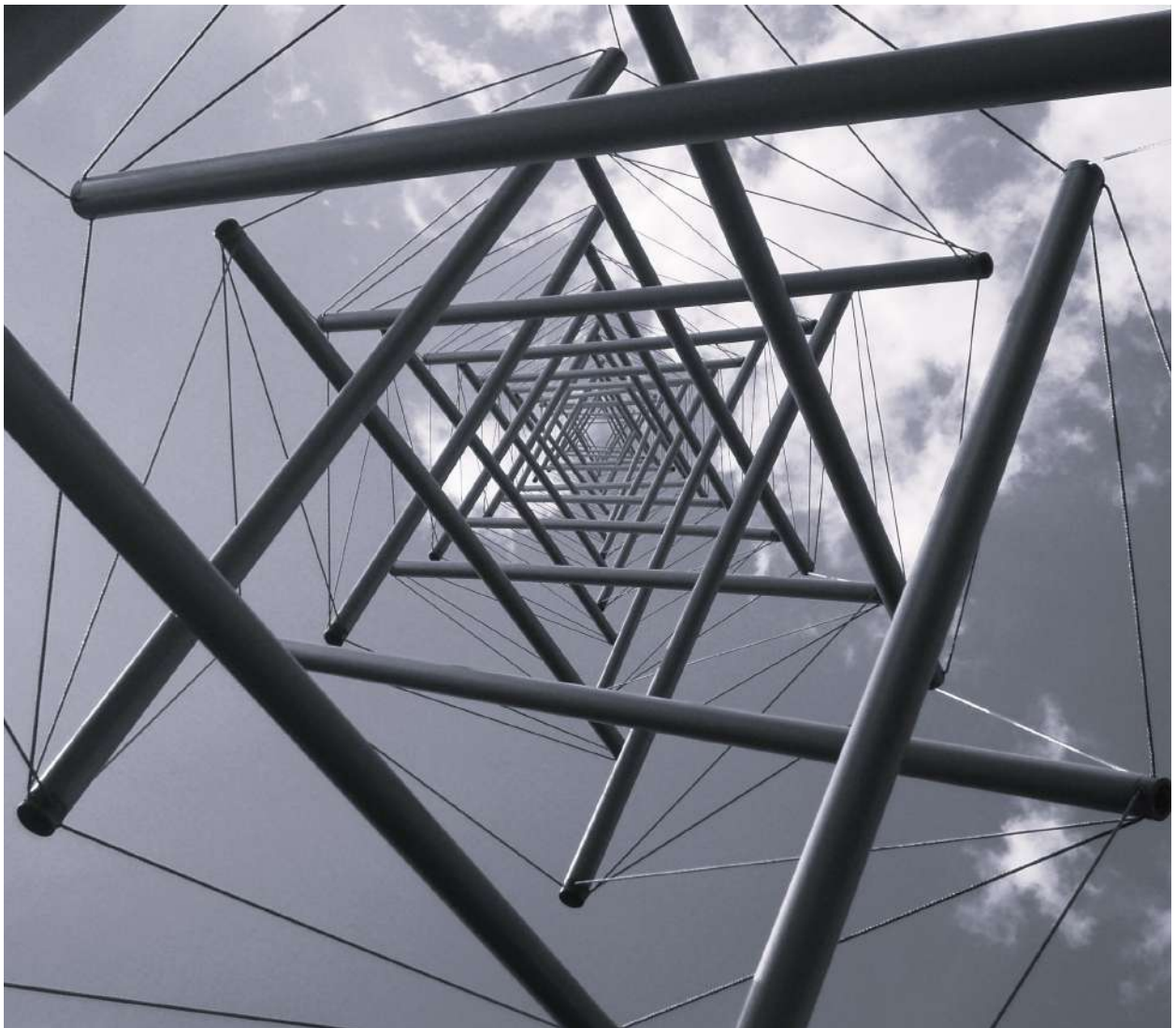
L'elemento chiave è che ogni elemento compresso è stabilizzato dalla tensione distribuita lungo i cavi, evitando instabilità e collasso.



Distribuzione delle forze

Nel tensegrity le forze si propagano in modo più uniforme attraverso l'intero sistema. Questo significa che la struttura non è soggetta a punti di concentrazione di sforzo che potrebbero causare rotture o cedimenti locali.

Ogni cavo è sottoposto a sforzi di trazione, che impediscono il movimento e la deformazione delle aste compresse. Le aste rigide, a loro volta, resistono alla compressione trasmessa dai cavi, mantenendo la struttura aperta e tridimensionale. Il risultato è un sistema strutturalmente efficiente, in cui il materiale viene impiegato nella maniera più ottimale possibile.



Tensegrity e sostenibilità

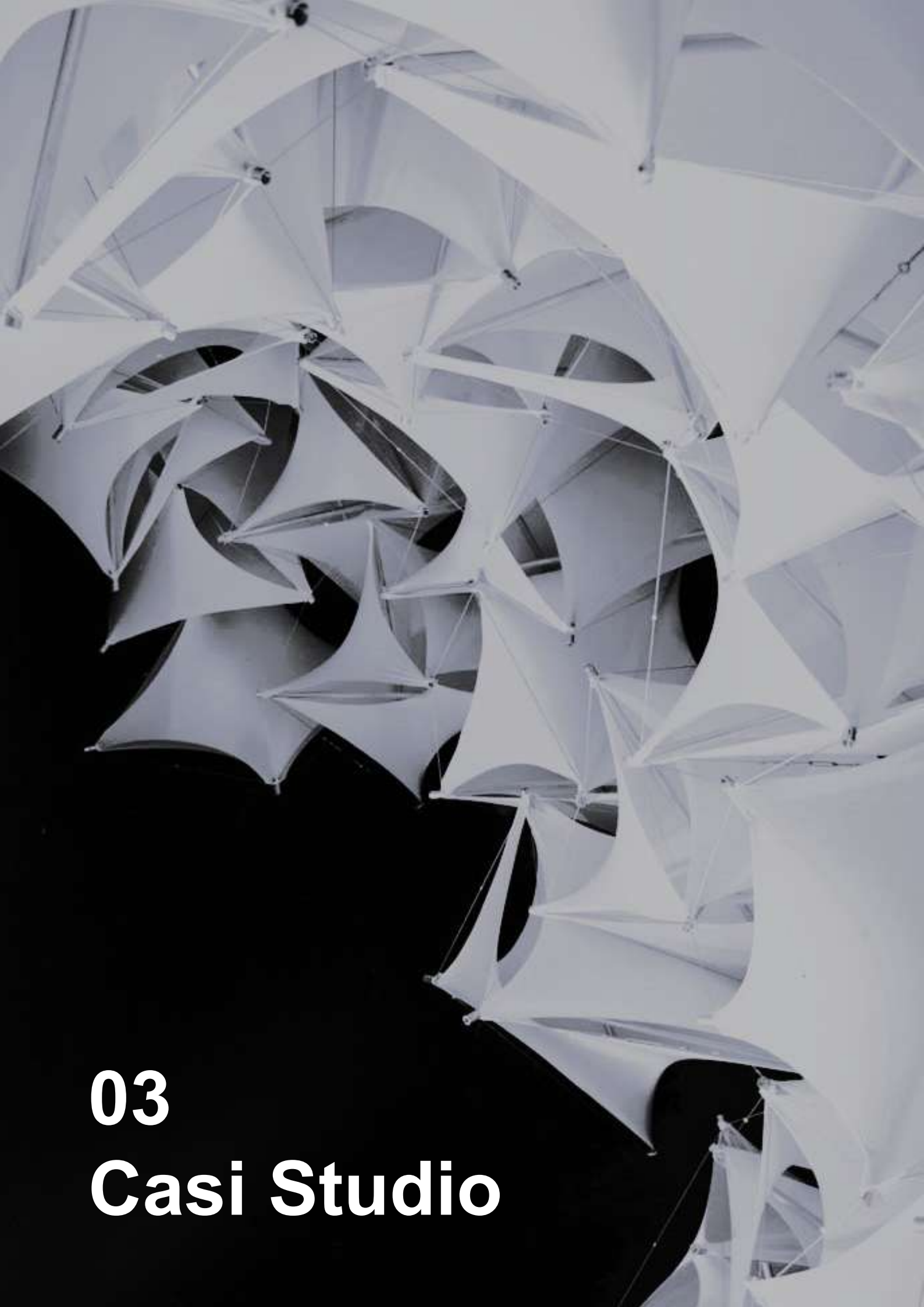
Il concetto di tensegrity non rappresenta solo un'innovazione strutturale, ma anche una soluzione particolarmente sostenibile per l'architettura contemporanea. Grazie alla sua configurazione, che combina elementi compressi separati tra loro e connessi da cavi in trazione, le strutture tensegrali ottimizzano la distribuzione delle forze e riducono al minimo l'impiego di materiale, garantendo un'elevata resistenza con un peso ridotto.



Un altro aspetto rilevante è la modularità e la facilità di smontaggio delle strutture tensegrali. Grazie alla loro configurazione, queste strutture possono essere assemblate, trasportate e riutilizzate più volte senza perdere le loro proprietà meccaniche, minimizzando la produzione di rifiuti da demolizione. Questo le rende particolarmente adatte per installazioni temporanee, esposizioni, tendostrutture e progetti di architettura mobile, dove la sostenibilità e la flessibilità sono fattori determinanti.

Inoltre, il tensegrity può essere facilmente combinato con materiali innovativi ed ecologici, come cavi in fibra di carbonio, membrane tessili riciclabili e componenti prefabbricati ad alte prestazioni. L'integrazione di questi elementi non solo migliora le caratteristiche strutturali, ma contribuisce anche a ridurre l'impronta ecologica dell'intero processo costruttivo.





03

Casi Studio

03.0 Introduzione

Per sviluppare una tensostruttura efficiente e funzionale, è stato fondamentale analizzare una serie di casi studio che hanno influenzato il concept progettuale.

L'obiettivo di questa sezione è quello di esplorare esempi significativi di strutture leggere, modulari e facilmente assemblabili, mettendo in evidenza le soluzioni tecniche e i principi costruttivi che hanno ispirato il progetto. Dallo studio del tensegrity, che offre un equilibrio tra elementi in trazione e compressione, fino all'analisi delle tende Ferrino, note per la loro stabilità ed efficienza strutturale, questi riferimenti sono stati essenziali per comprendere come rendere la mia tensostruttura resistente, pratica e sostenibile.

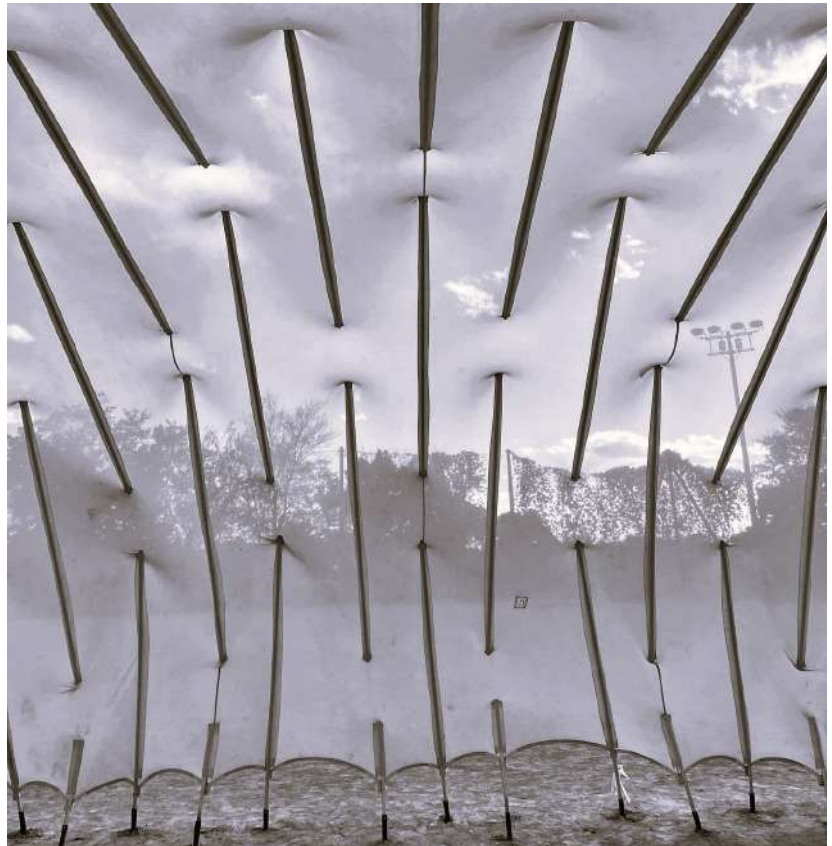
03.1 Padiglione temporaneo MOOM, Tokyo, 2011, designer Kazuhiro Kojima

Il MOOM è un padiglione temporaneo sperimentale progettato utilizzando soltanto due elementi essenziali per la sua struttura. Il primo è un singolo strato di tessuto che avvolge lo spazio interno, separandolo dall'ambiente esterno, pur lasciando filtrare la luce naturale. Il secondo è un sistema di aste rigide che sostengono il tessuto e ne determinano la forma complessiva.

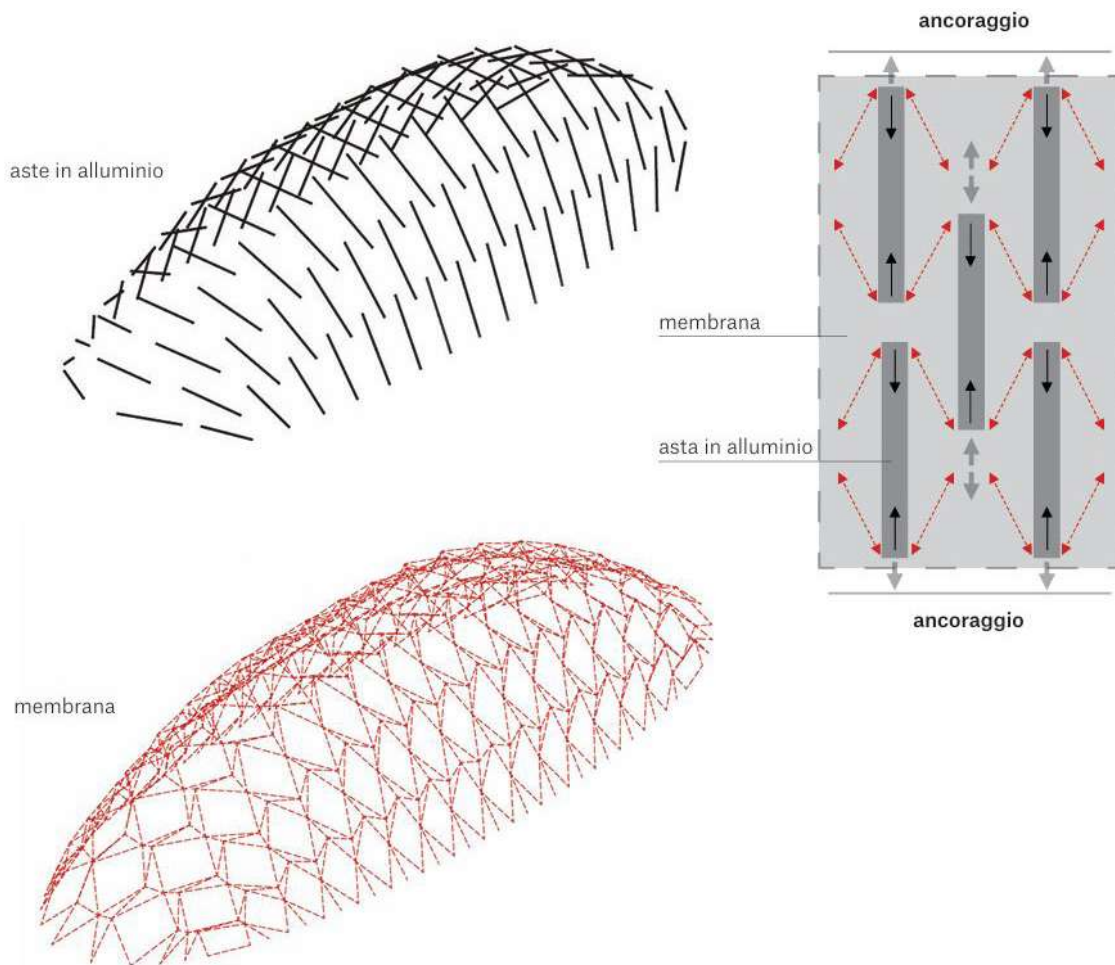


A differenza delle tradizionali strutture a telaio, in cui gli elementi portanti sono connessi per distribuire il carico, nel MOOM i bastoni di sostegno sono totalmente indipendenti l'uno dall'altro. Questa caratteristica conferisce al padiglione una leggerezza e una resistenza superiori, basandosi su un equilibrio tra elementi compressi e componenti elastici in tensione.

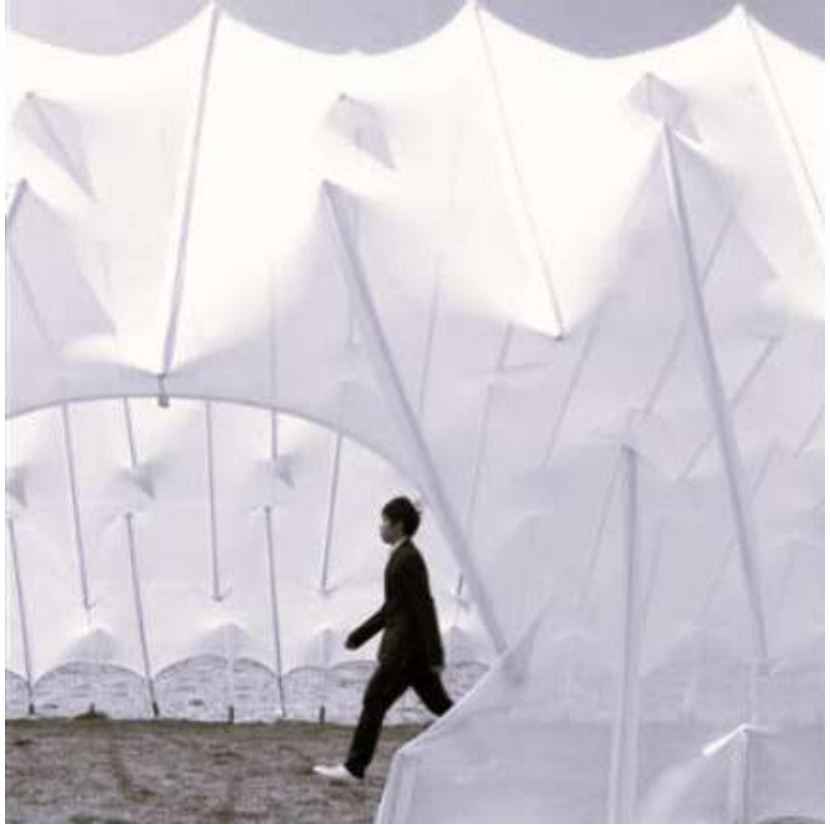
Le aste, realizzate in alluminio, e la membrana polimerica lavorano insieme per bilanciare le forze, permettendo alla struttura di deformarsi e stabilizzarsi autonomamente fino a raggiungere un equilibrio statico.



Il principio tensegrale è chiaramente visibile nelle linee di tensione che attraversano la membrana: il tessuto si comporta come un sistema continuo di forze in tensione, sostituendo di fatto i cavi che si trovano normalmente in altre strutture tensegrali.



Schematizzazione della struttura ripresa dalla tesi di Laura Veccia, titolo "Tensegrity: 60 anni di esperienze e prospettive per il Design", anno 2020/2021, Università degli Studi di Camerino.



Nel sistema tensegrale, le principali linee di tensione si manifestano nelle pieghe del tessuto tra gli elementi di compressione, mantenendo un andamento quasi lineare. A differenza di una tradizionale tensostruttura, in cui i cavi svolgono il ruolo principale nella distribuzione delle forze di tensione, qui è la membrana elastica a sostituire i cavi, funzionando come un sistema continuo di tensione. Questo aspetto distingue il tensegrity dalle tensostrutture convenzionali, in cui la membrana ha principalmente un ruolo di copertura, mentre nel sistema tensegrale essa partecipa attivamente alla stabilità strutturale.

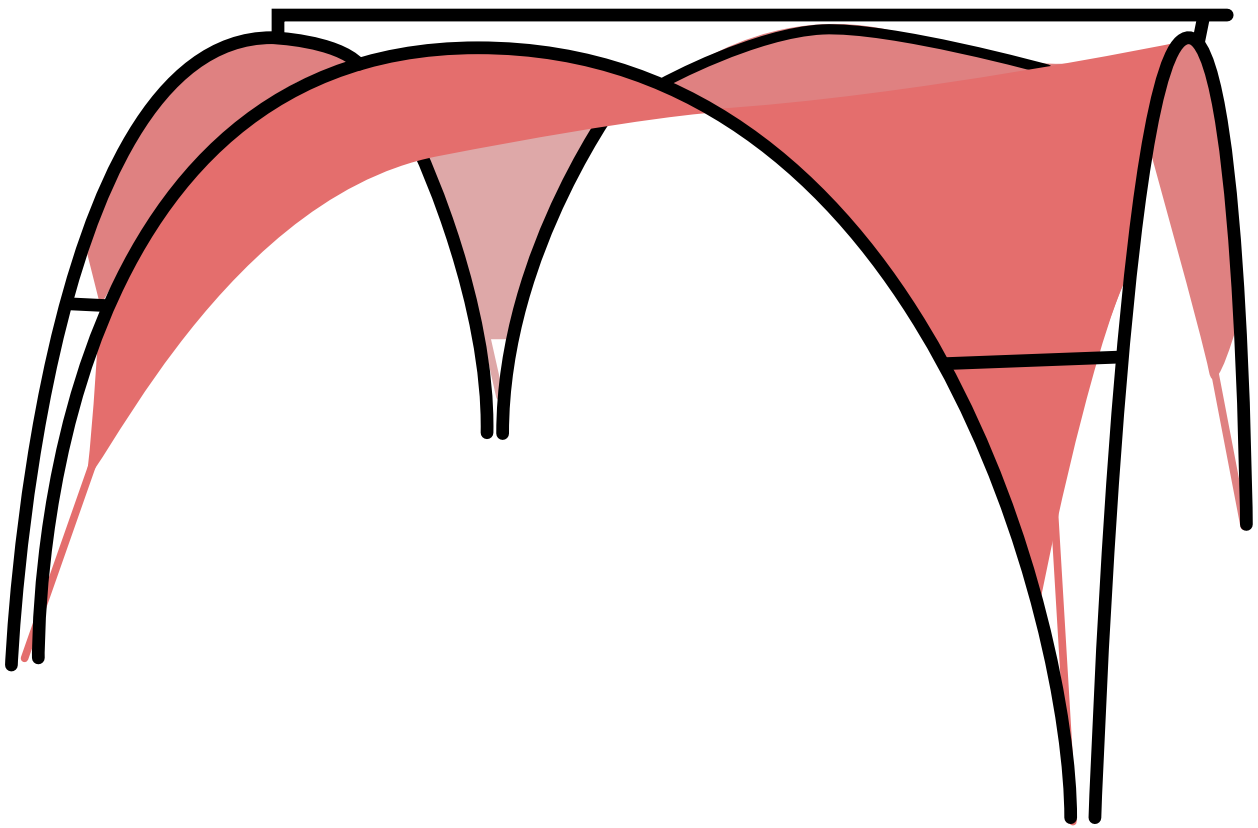
03.2 Tensostruttura a crociera, Brescia, 2023, azienda Maco Technology

Questa tensostruttura a crociera è un esempio significativo di architettura tessile, caratterizzata dall'impiego di una membrana flessibile e da un sistema portante rigido. La sua configurazione strutturale si basa su quattro punti d'appoggio per ciascun modulo, i quali sostengono la membrana pre-tesa, creando un effetto di doppia curvatura che conferisce stabilità alla copertura.



La forma a crociera deriva dall'intersezione di due superfici iperboliche, rendendo la struttura non solo esteticamente dinamica ma anche estremamente efficiente dal punto di vista statico. Questo tipo di configurazione sfrutta il principio della tensione superficiale, in cui la membrana lavora interamente in trazione, mentre gli elementi portanti rigidi, presumibilmente realizzati in acciaio, assorbono le forze di compressione.

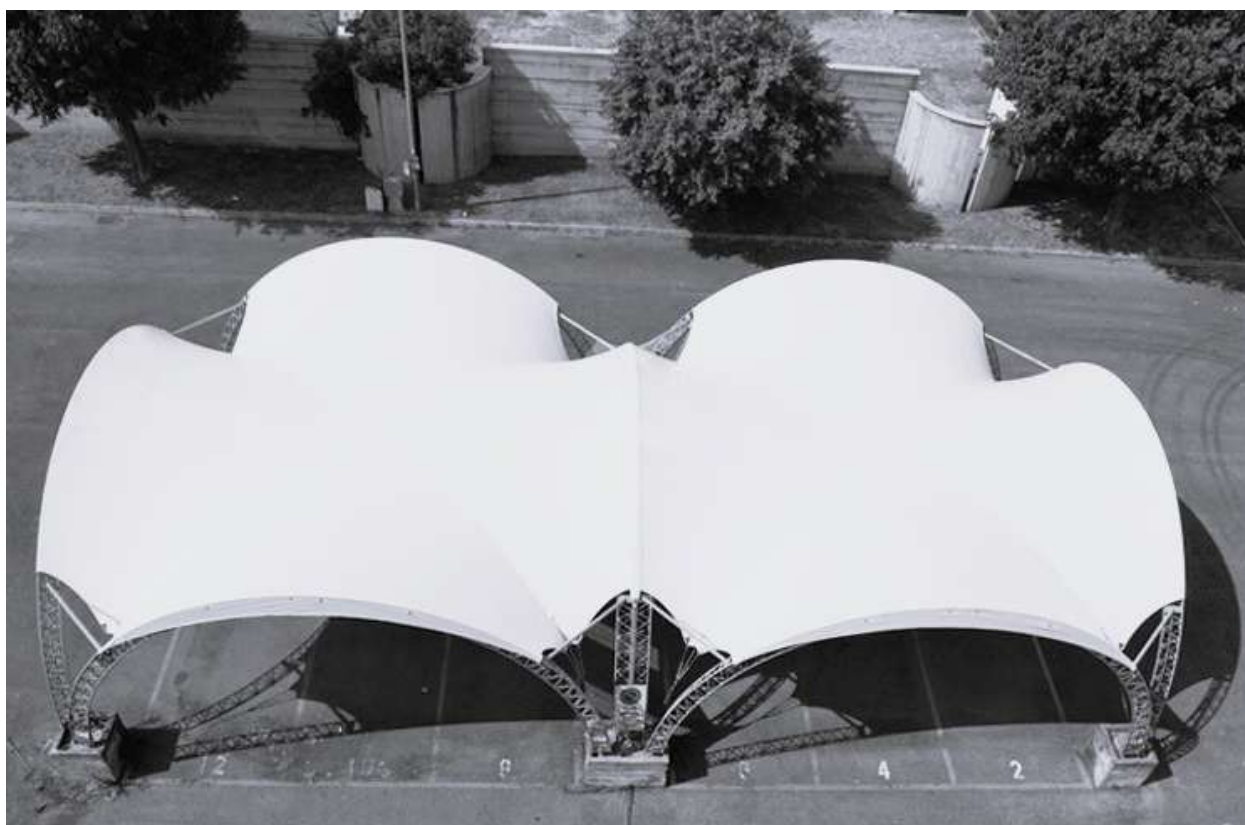
Nello schema possiamo osservare la distinzione tra elementi in compressione (nero) ed elementi in trazione (rosso), evidenziando il principio statico della tensostruttura. Gli elementi rigidi in compressione, come la struttura portante, assorbono e ridistribuiscono le forze, garantendo stabilità. La membrana tessile lavora in trazione, trasmettendo le sollecitazioni e mantenendo la forma grazie all'equilibrio tra tensione e compressione. Questo principio consente una struttura leggera, resistente ed efficiente nell'uso dei materiali.



Lo schema evidenzia chiaramente la distinzione tra gli elementi strutturali che lavorano in compressione (in nero) e quelli che lavorano in trazione (in rosso), illustrando il principio statico alla base della tensostruttura.

Modularità

Un elemento chiave della struttura è la modularità: ogni unità può essere affiancata ad altre, permettendo una copertura estendibile e adattabile a diverse esigenze di spazio. La scelta di una membrana in PVC spalmato su fibra di poliestere, garantisce leggerezza, resistenza agli agenti atmosferici e facilità di manutenzione.



Montaggio

Nonostante la tensostruttura a crociera sia progettata per un montaggio relativamente rapido, l'installazione richiede comunque un numero significativo di operai specializzati.

Il processo implica il sollevamento e l'ancoraggio della membrana alla struttura portante, che deve essere tensionata in modo progressivo e uniforme per garantire stabilità e sicurezza. La gestione delle forze in gioco, l'allineamento preciso degli elementi e la necessità di strumenti specifici rendono il montaggio un'operazione che, pur essendo efficiente, richiede una pianificazione accurata e una squadra di lavoro ben coordinata.



03.3 Tenda da campeggio, azienda Ferrino, prodotto Tent Force 2

Le tende Ferrino rappresentano un'evoluzione delle strutture leggere per il campeggio e l'outdoor, esse si basano su principi di tensione e compressione che le rendono resistenti, leggere e facili da montare. A differenza delle tensostrutture architettoniche, progettate per coprire ampie superfici, le tende Ferrino si distinguono per la loro compattezza, modularità e capacità di adattarsi a condizioni ambientali avverse.



Tent Force 2

Durante il montaggio, le aste vengono inserite nelle apposite guaine della membrana e sottoposte a una leggera flessione, creando un sistema autoportante che sfrutta la tensione del tessuto per mantenere la stabilità. A differenza delle tensostrutture architettoniche, che necessitano di cavi d'acciaio e ancoraggi al suolo per garantire la resistenza strutturale, le tende Ferrino si basano su picchetti e tiranti elastici che controbilanciano le forze di sollevamento e spinta laterale.

Nello schema possiamo osservare chiaramente la distinzione tra gli elementi strutturali della tenda. Le aste, rappresentate come componenti rigide, fungono da elementi in compressione, fornendo la forma e la stabilità alla struttura. Il tessuto, invece, lavora prevalentemente in trazione, mantenendo la copertura ben tesa e contribuendo alla resistenza complessiva della tenda. Questa configurazione permette di ottenere una struttura leggera ma resistente, capace di distribuire le forze in modo efficiente e garantire stabilità anche in condizioni meteorologiche avverse.



Caratteristiche strutturali

La struttura della Ferrino Force 2 si basa su un sistema di aste in alluminio che forniscono un ottimo equilibrio tra leggerezza e resistenza. Le aste sono collegate alla membrana attraverso ganci esterni, consentendo un montaggio rapido e semplificato. L'architettura prevede un design a cupola, che offre una buona aerodinamicità contro il vento e una distribuzione uniforme dei carichi.

Materiali e resistenza

Le tende Ferrino rappresentano un'evoluzione delle strutture leggere per il campeggio e l'outdoor, esse si basano su principi di tensione e compressione che le rendono resistenti, leggere e facili da montare. A differenza delle tensostrutture architettoniche, progettate per coprire ampie superfici, le tende Ferrino si distinguono per la loro compattezza, modularità e capacità di adattarsi a condizioni ambientali avverse.

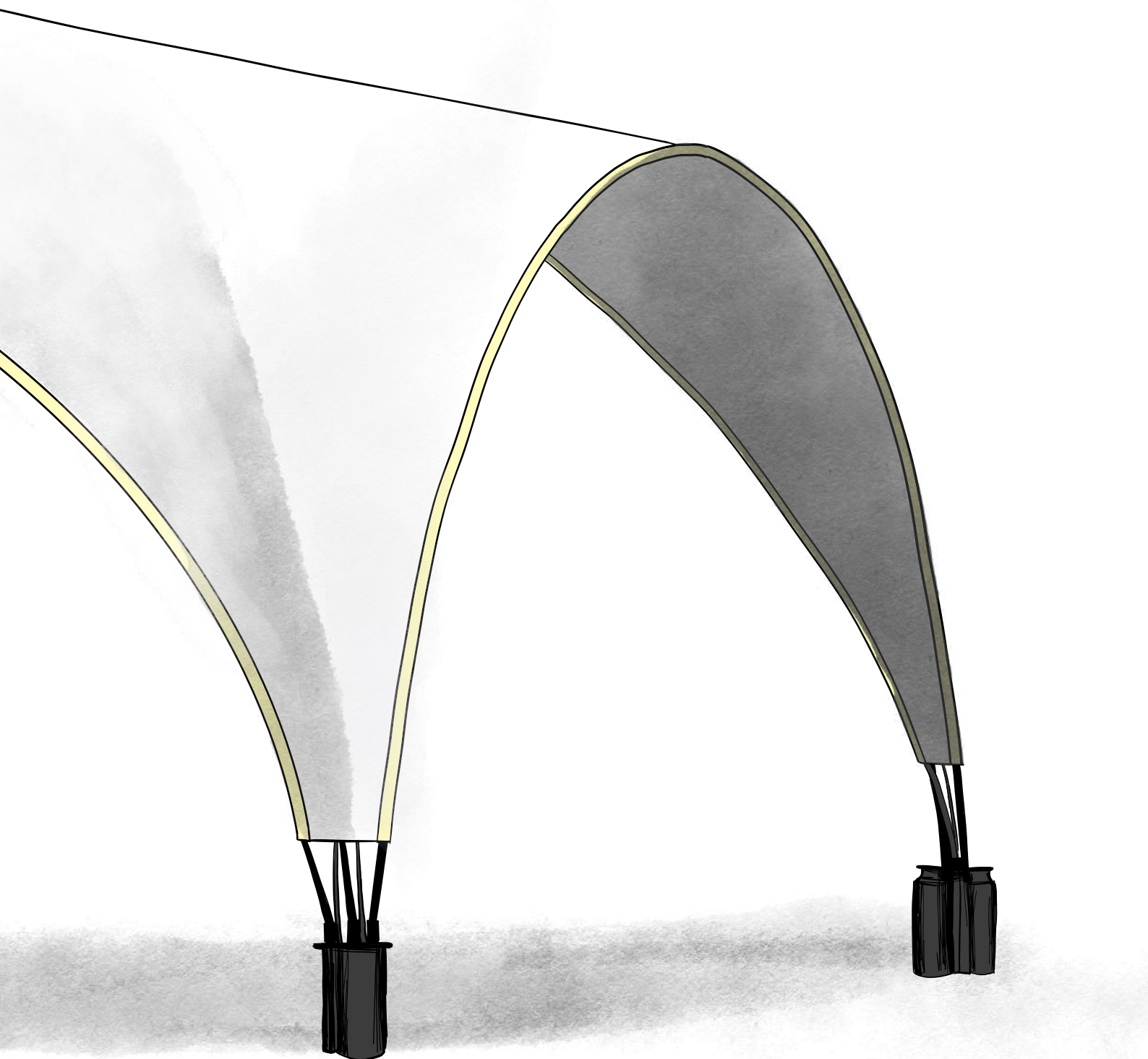


Montaggio e stabilità

La tenda utilizza tensionatori e picchetti per fissare la struttura al terreno, mentre corde di tensione assicurano maggiore stabilità in caso di vento forte. Questo sistema la rende molto più veloce da montare rispetto alle tensostrutture architettoniche, richiedendo solo pochi minuti e una persona per l'installazione.



Il sistema strutturale di questa tenda si basa su un insieme di aste in alluminio flessibili che vengono incurvate e inserite negli appositi passanti o ganci esterni del telo. Questo incurvamento genera una forza di compressione nelle aste, che permette alla struttura di mantenere la sua forma e di sostenere il telo esterno.



04
Concept

04.0 Introduzione

L'idea alla base del concept nasce dallo studio del sistema tensegrale, un principio strutturale in cui elementi rigidi in compressione e cavi in tensione collaborano per creare una configurazione stabile ed equilibrata. L'interesse per questa logica costruttiva ha guidato la ricerca verso soluzioni leggere, efficienti e facilmente assemblabili.

Successivamente, l'attenzione si è spostata sullo studio delle tende Ferrino, analizzando il modo in cui queste strutture riescono a garantire stabilità attraverso un sistema di aste flessibili e tessuti in tensione. Le tende, grazie all'integrazione tra membrana e aste, offrono un esempio di struttura autoportante leggera, capace di adattarsi al terreno senza necessità di fondazioni invasive.

Partendo da questi riferimenti, il concept si sviluppa come una tensostruttura autoportante, che combina i principi della tensegrità con la logica costruttiva delle tende, utilizzando tasche integrate per il passaggio delle aste e un sistema di zavorre per l'ancoraggio a terra.

04.1 Obiettivi del concept

Leggerezza e trasportabilità

La tensostruttura è progettata per essere facilmente montata e smontata, consentendone un utilizzo pratico e intuitivo.

Tutti i componenti sono smontabili e riponibili all'interno di un borsone compatto, con apposite sacche separate per ciascun elemento, facilitandone l'identificazione. Grazie al suo design compatto, può essere comodamente trasportata in un'auto, rendendola ideale per un utilizzo versatile in diversi contesti.



Facilità di montaggio

Grazie a un sistema modulare, basato su aste flessibili e tasche integrate nel tessuto, l'assemblaggio risulta semplice e immediato.



Autoportanza e stabilità

La struttura si sostiene autonomamente senza la necessità di ancoraggi fissi al suolo, grazie a un sistema di tensionamento ottimizzato che sfrutta l'equilibrio tra forze di trazione e compressione.

L'impiego di zavorre strategicamente posizionate assicura la stabilità complessiva, permettendo alla tensostruttura di adattarsi a diverse superfici senza comprometterne la resistenza.



Parasole ferrino

Protezione

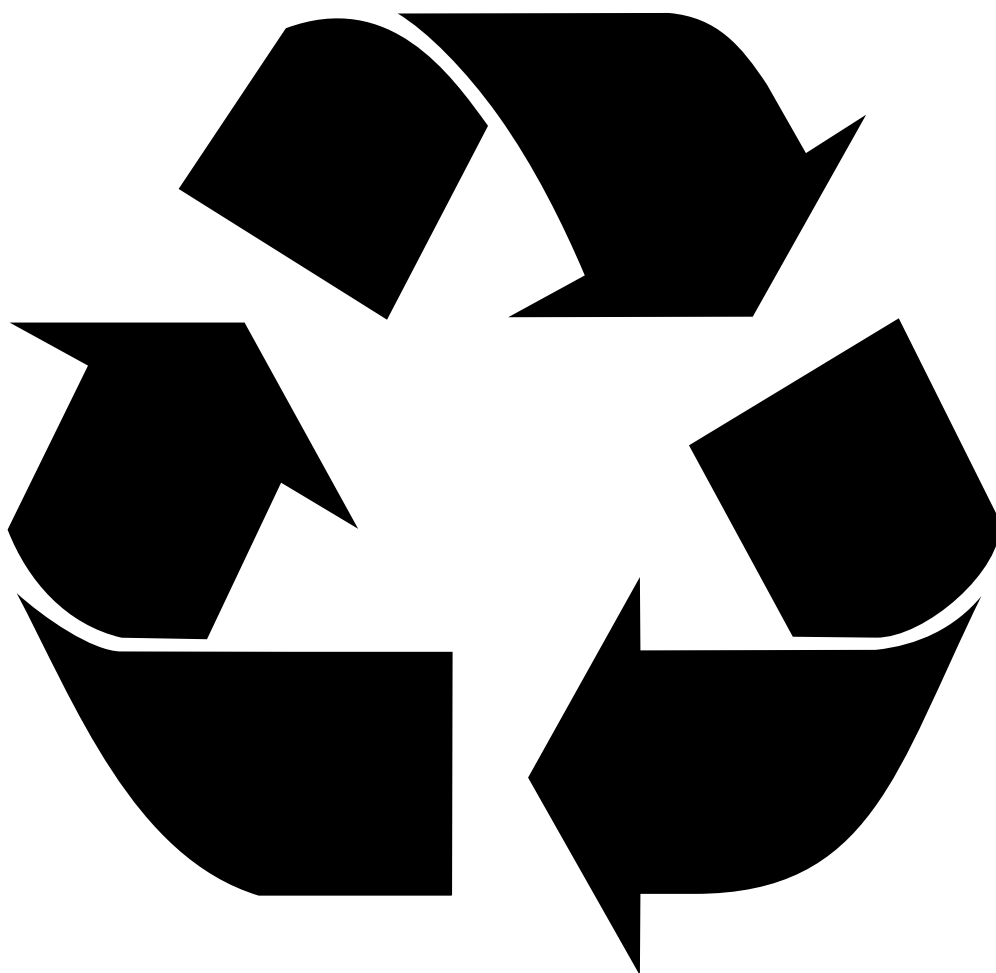
La stabilità e la leggerezza della tensostruttura sono ottenute anche grazie alla scelta del materiale, il poliestere Ripstop, un tessuto caratterizzato da un'elevata resistenza alla trazione e agli strappi.

Oltre alla resistenza meccanica, il poliestere Ripstop assicura una protezione efficace dagli agenti atmosferici, essendo impermeabile e resistente ai raggi UV. Questa caratteristica lo rende particolarmente adatto per un utilizzo prolungato all'aperto, senza che le condizioni climatiche ne compromettano la funzionalità.



Sostenibilità

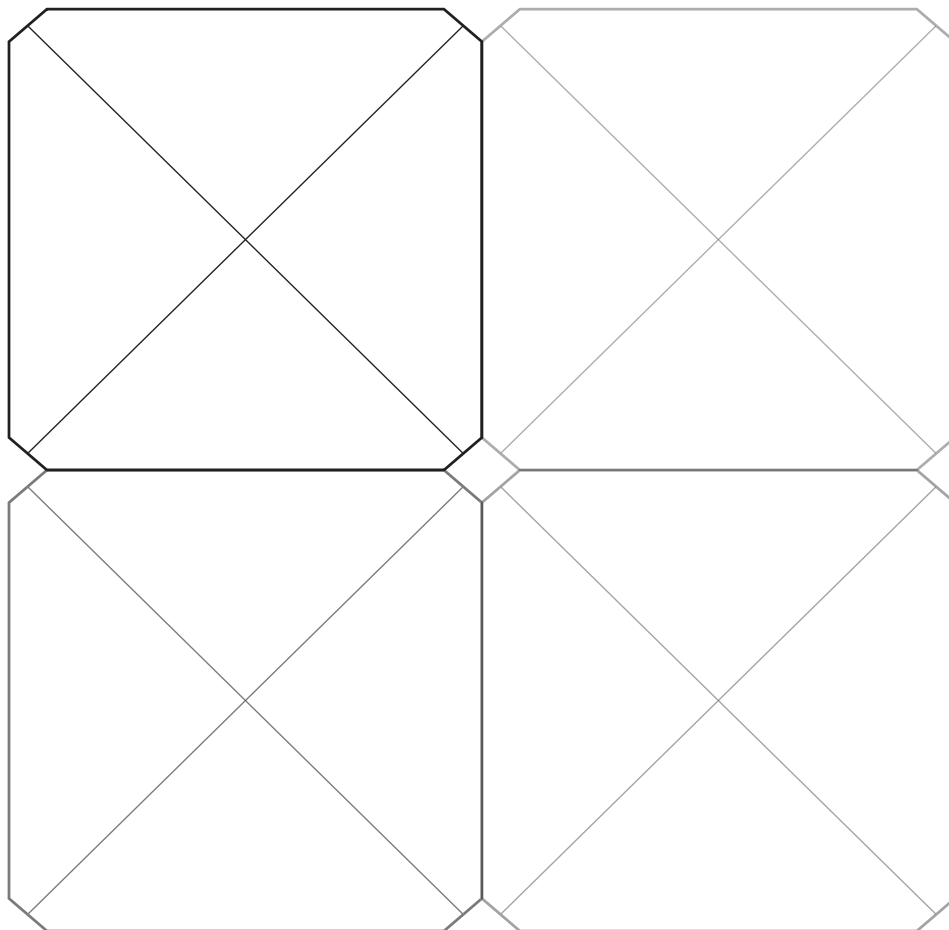
L'impatto ambientale della tensostruttura è determinato dall'impiego di materiali leggeri e durevoli, che permettono di ridurre il consumo di risorse sia in fase di produzione che di trasporto. La scelta di componenti resistenti nel tempo, come il poliestere Ripstop e le aste in alluminio, garantisce una lunga durata del prodotto, limitando la necessità di sostituzione e minimizzando gli scarti.



Adattabilità e modularità

La tensostruttura è progettata per adattarsi a una vasta gamma di contesti, sia urbani che naturali, rispondendo a diverse esigenze funzionali. La sua versatilità la rende ideale per eventi temporanei, offrendo un riparo pratico e facilmente assemblabile per fiere, mercati, manifestazioni culturali o sportive.

Un altro aspetto fondamentale del progetto è la sua modularità. Le singole strutture possono essere accostate e collegate tra loro, permettendo la creazione di spazi più ampi e configurazioni diverse a seconda delle necessità. Questa caratteristica rende la tensostruttura estremamente versatile, adattabile sia a piccole installazioni individuali che a grandi coperture composte da più moduli.



04.2 Sperimentazioni

Prima sperimentazione

Nel processo di sviluppo della tensostruttura, la fase di sperimentazione attraverso prototipi preliminari ha giocato un ruolo fondamentale. Partendo dall'analisi del tensegrity e delle strutture leggere, sono stati realizzati diversi modelli fisici per testare le possibilità formali, strutturali e di assemblaggio.

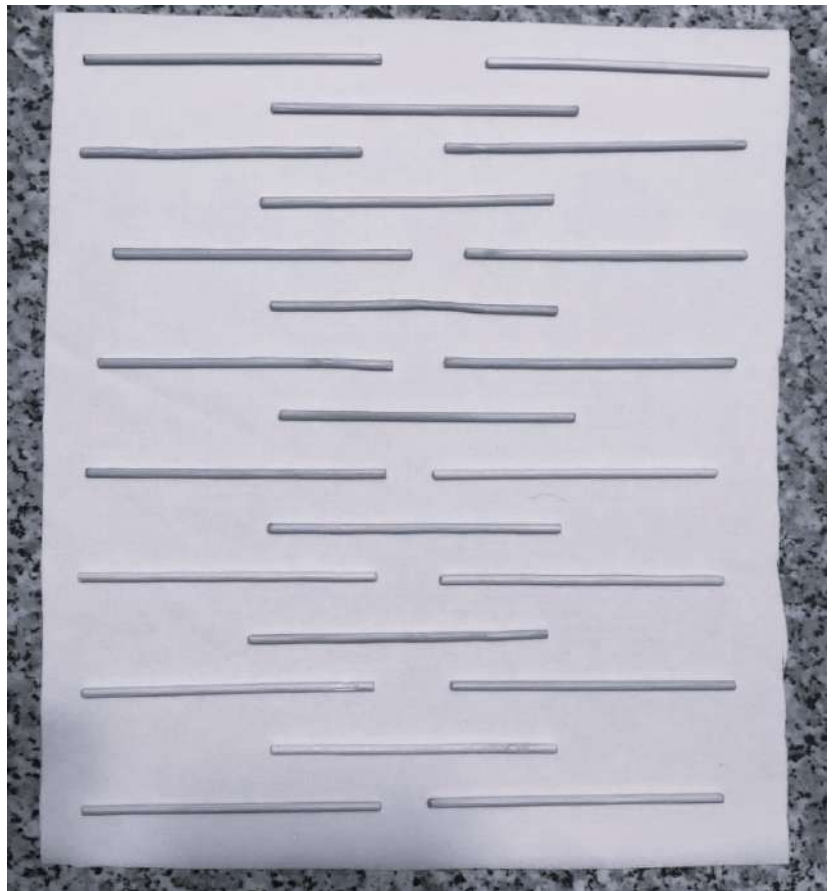


Nel processo di sviluppo della tensostruttura, ho iniziato approfondendo la struttura del MOOM, già analizzata in precedenza, per comprenderne i principi costruttivi e le logiche di equilibrio tra elementi in tensione e compressione.

Da questo studio iniziale, ho iniziato a sperimentare la disposizione delle aste, cercando di replicarne il comportamento strutturale ma con un obiettivo più ambizioso: rendere la struttura completamente autoportante. La sfida principale è stata trovare un sistema che mantenesse leggerezza e stabilità senza necessitare di ancoraggi fissi al suolo, permettendo un montaggio rapido e una maggiore versatilità d'uso.

Studio della disposizione delle aste

Ho iniziato a studiare una posizione delle aste da posizionare sul prototipo in modo tale che fosse soddisfacente nel sorreggere la membrana. Ho analizzato attentamente le forze in gioco e la distribuzione del carico per determinare la posizione ottimale delle aste, assicurandomi che fossero in grado di supportare adeguatamente la membrana senza compromettere la stabilità globale.



La fase successiva ha visto la cucitura delle tasche destinate al fissaggio delle aste.

Queste tasche sono state progettate per mantenere le aste in posizione, garantendo così la stabilità del sistema durante le prove. Al loro interno, sono stati inseriti dei bastoncini rigidi, che hanno simulato la funzione strutturale delle aste, permettendo di osservare la distribuzione delle forze di compressione.

Prototipo completato

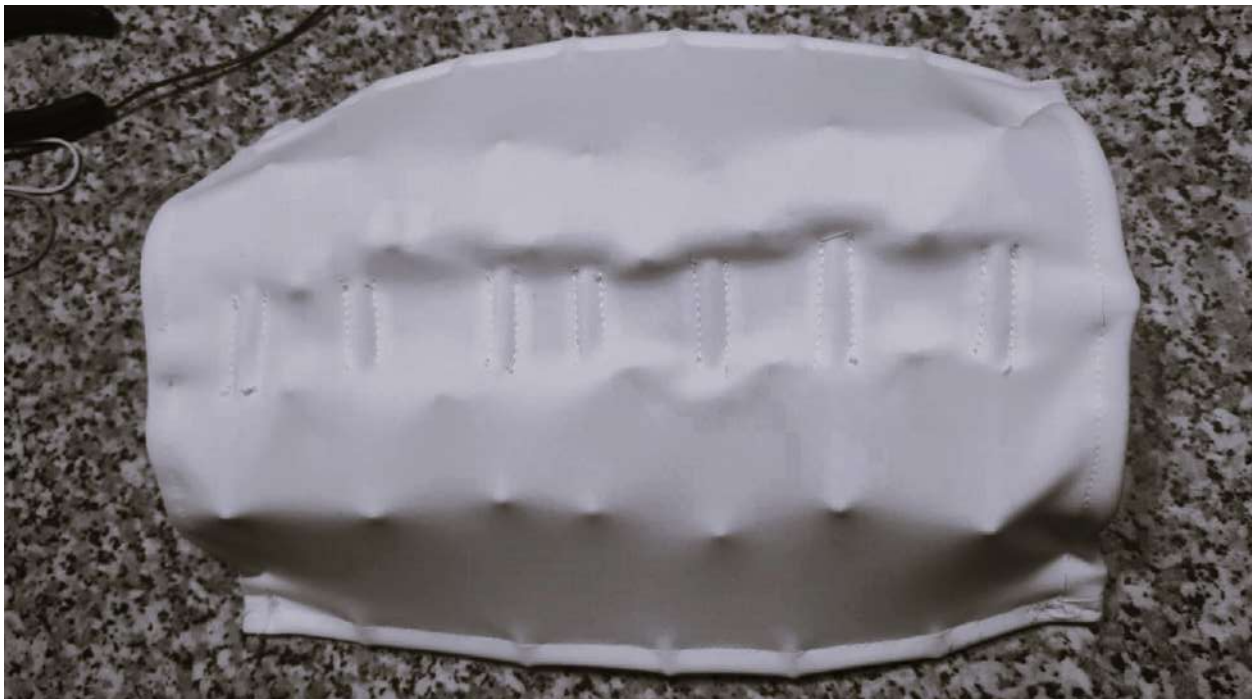
Per simulare il comportamento della membrana, ho utilizzato un materiale anelastico. Questo materiale ha permesso di riprodurre le caratteristiche fisiche della membrana senza deformazioni permanenti, rendendo i prototipi più aderenti alla realtà di una tensostruttura. La combinazione di aste rigide e una membrana con proprietà anelastiche ha reso possibile analizzare le forze di compressione e trazione.



Osservazioni

Durante le sperimentazioni, la forma assunta dalla membrana si è rivelata corretta e coerente con le aspettative teoriche, rispecchiando il comportamento desiderato sotto le forze applicate. Tuttavia, al momento di applicare una piccola pressione, la struttura ha ceduto. La causa principale di questo cedimento è stata la mancanza di ancoraggio alla base e l'assenza di zavorre, che non consentivano alla struttura di rimanere stabile sotto carico. Questo ha evidenziato l'importanza di un ancoraggio solido al suolo o di un sistema a zavorra per garantire che la tensostruttura possa resistere alle forze senza compromettere la sua stabilità.

Inoltre, sebbene le aste fossero posizionate in modo strategico per formare una rete di compressione, non sono riuscite a sostenere la membrana senza un supporto adeguato alla base. Questo risultato offre indicazioni preziose per affinare il progetto, dimostrando che il mantenimento dell'equilibrio dipende non solo dalla disposizione dei componenti portanti, ma anche dall'adozione di una fondazione sufficientemente robusta.





Dopo aver analizzato i problemi di stabilità, ho integrato delle aste posizionate strategicamente sopra il tetto e lungo le estremità della struttura. Questi elementi sono stati pensati per mantenere la tensione e garantire l'equilibrio complessivo, contribuendo a rinforzare la resistenza alle sollecitazioni applicate.

Questi elementi rigidi trasferiscono le forze dovute a pressioni e carichi applicati, distribuendole lungo l'intera struttura. Invece di concentrare la forza in un punto critico, le aste agiscono come canali che smorzano e distribuiscono efficacemente le sollecitazioni verso tutto il perimetro della base. In questo modo, si riduce il rischio di deformazioni e si migliora la resistenza complessiva.

Criticità individuate

Assenza di zavorra: L'assenza di un sistema di zavorra alla base ha ulteriormente compromesso la stabilità della struttura. Senza una zavorra sufficiente, la tensostruttura non ha potuto contrastare efficacemente le forze di trazione, portando a deformazioni e cedimenti.

Complessità nella gestione delle forze di compressione e trazione: Sebbene le aste siano state disposte correttamente per creare una rete di compressione, la struttura ha dimostrato una certa vulnerabilità a causa della mancanza di supporto alla base. Questo ha evidenziato che, oltre alla distribuzione delle aste, anche il corretto bilanciamento tra le forze di trazione (membrana) e compressione (aste) dipende dalla stabilità complessiva della base.

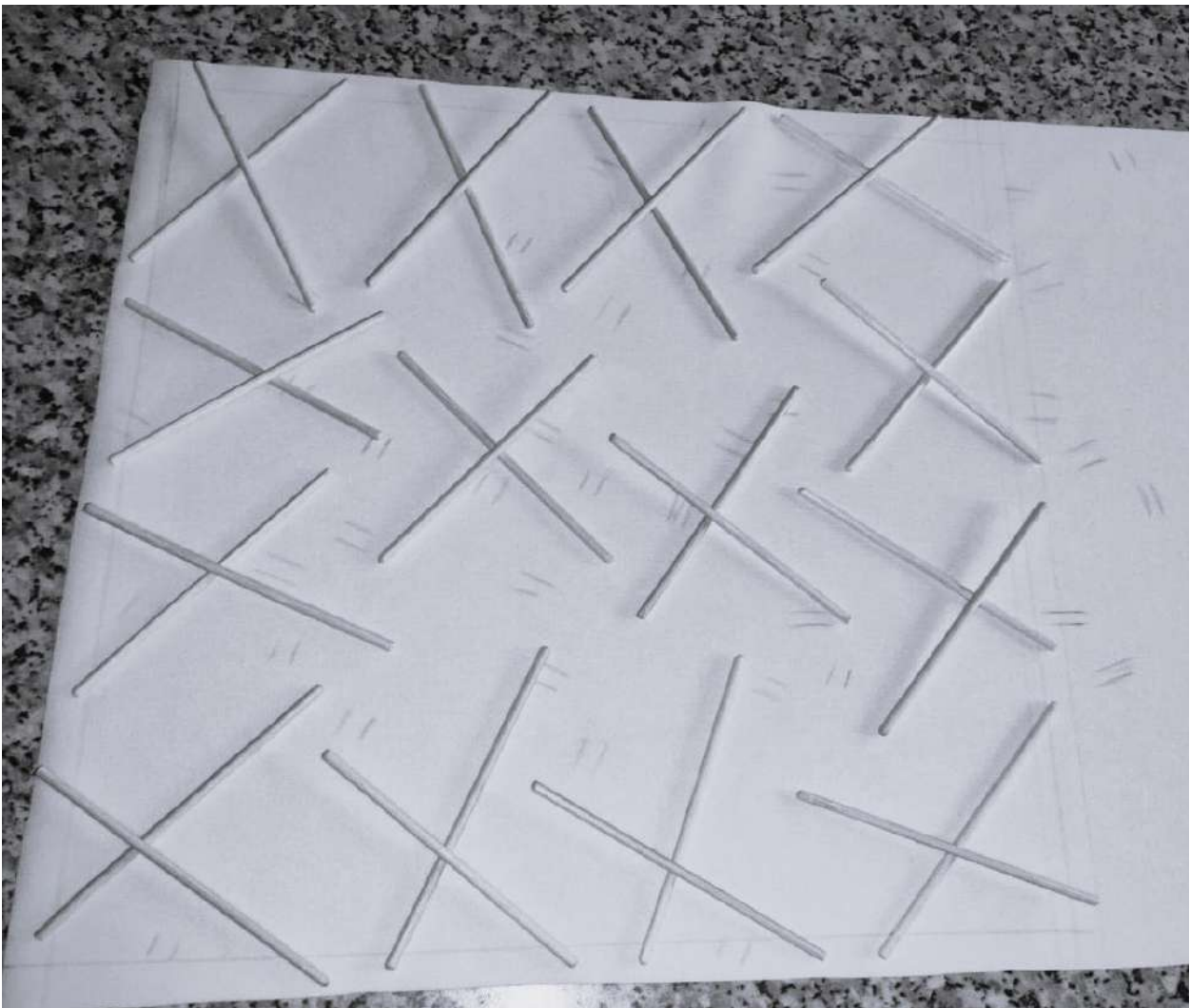
Materiale anelastico per la membrana: Sebbene il materiale anelastico abbia simulato bene il comportamento della membrana, le prove hanno mostrato che potrebbe esserci stata una reazione imprevista alla sollecitazione, come piccole deformazioni che hanno influenzato la stabilità complessiva della struttura. Sebbene non si tratti di una critica principale, potrebbe essere necessario esplorare altri materiali o tecniche di fissaggio per ottenere una simulazione ancora più realistica.

Necessità di ottimizzazione della geometria e delle connessioni: La struttura fisica, ha dimostrato che alcune modifiche alla geometria delle aste o alla loro connessione alla membrana potrebbero migliorare la resistenza della struttura. Ciò implica una continua iterazione nel progettare e testare, fino a trovare la configurazione ideale che ottimizzi le forze di compressione e trazione.

Seconda sperimentazione

Dopo le criticità emerse nel primo prototipo, in particolare la mancanza di stabilità sotto carico, ho deciso di modificare la disposizione delle aste. In questa nuova configurazione, le stecche sono state disposte a "X" intorno a tutta la membrana, creando un incrocio che genera tensione nella parte centrale della struttura.

Questo cambiamento ha avuto un impatto significativo sulla rigidità complessiva della tensostruttura, migliorandone la capacità di resistere alle sollecitazioni.

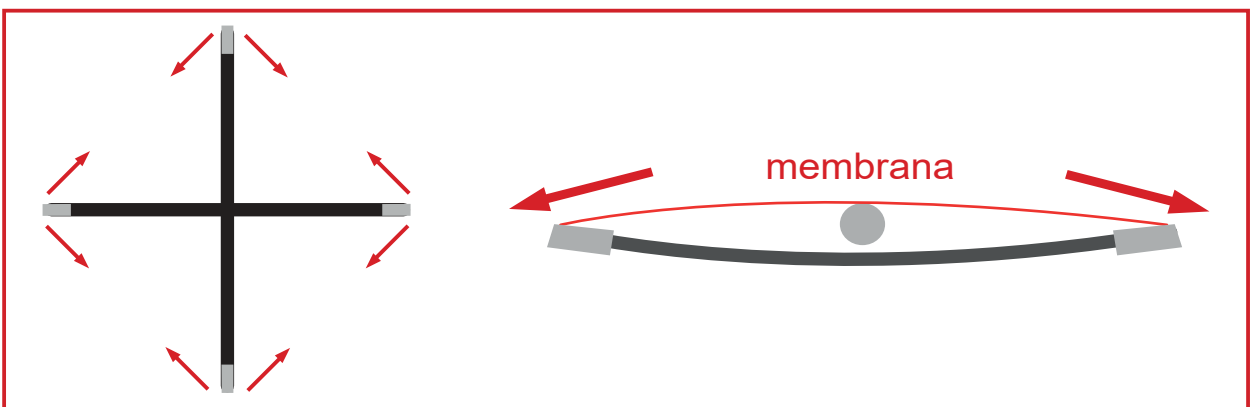
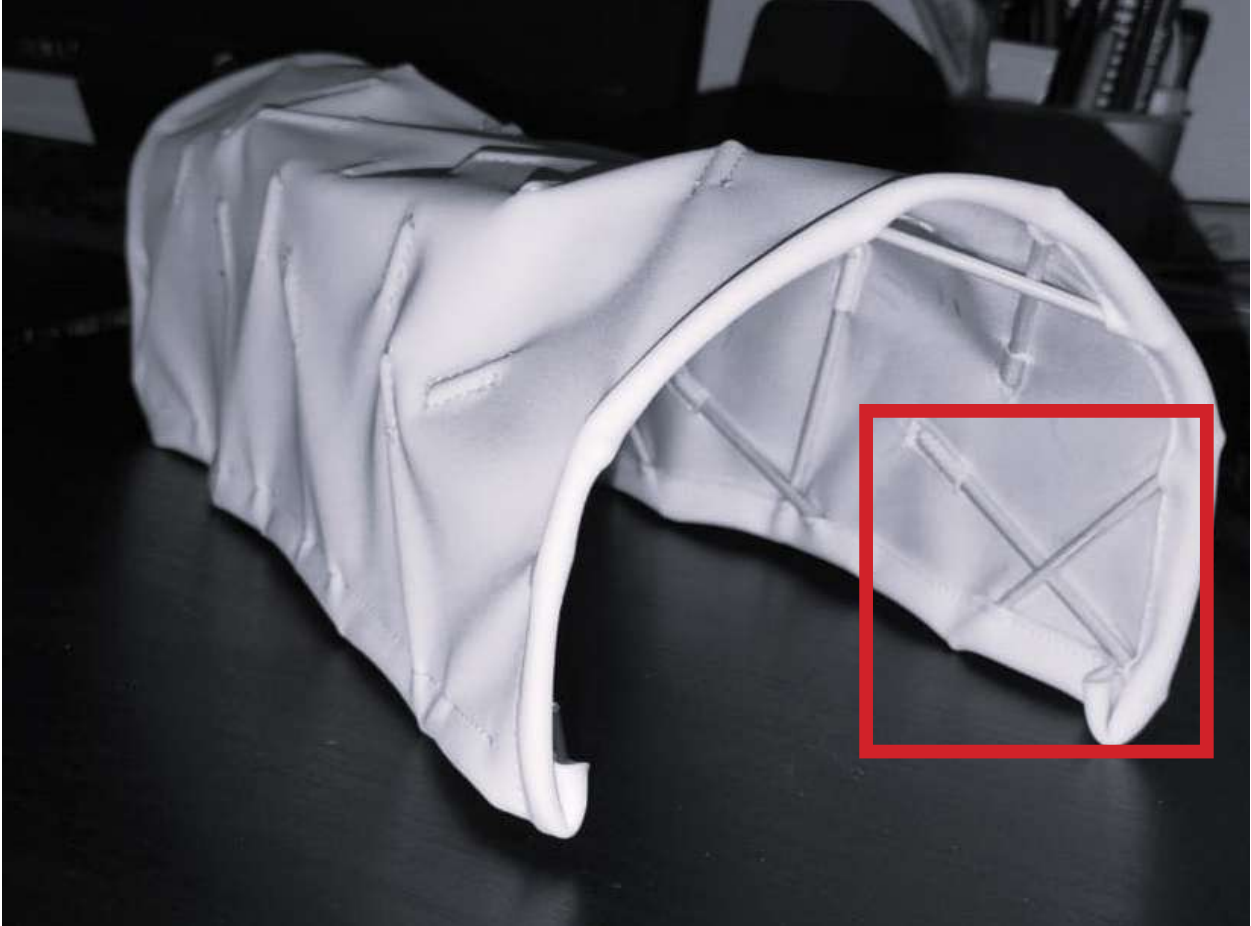


Prototipo completato

Come nel primo esperimento, ho cucito le tasche lungo il perimetro della membrana, ma questa volta con un'attenzione particolare alla disposizione delle aste incrociate.

A differenza del primo prototipo, dove le aste erano disposte in modo lineare e non garantivano una tensione uniforme, la disposizione incrociata ha permesso di bilanciare meglio compressione e trazione, migliorando la stabilità complessiva.





Schema del funzionamento delle aste incrociate

Osservazioni

Inserendo le aste nei passaggi predefiniti e incrociandole tra loro per ottenere la configurazione a "X", ha permesso di mantenere la membrana in tensione già durante l'assemblaggio.

Una volta completato il prototipo, ho testato la sua capacità di resistere a piccole sollecitazioni, osservando il comportamento della struttura sotto carico.

I risultati hanno mostrato un miglioramento significativo rispetto alla prima versione: la membrana era più rigida e la struttura riusciva a mantenere la sua forma meglio rispetto al precedente prototipo, senza cedere immediatamente sotto pressione.

Le aste, tradizionalmente concepite come elementi strutturali in grado di resistere alla compressione, hanno assunto un ruolo più sofisticato. Non si limitano a sostenere carichi in modo passivo, ma interagiscono dinamicamente tra loro. Questa interazione genera un fenomeno di auto-bloccaggio, un meccanismo intrinseco che conferisce maggiore stabilità alla struttura.





Criticità individuate

Nonostante i miglioramenti ottenuti, il secondo prototipo ha presentato alcune criticità:

Miglioramento della stabilità, ma ancora senza ancoraggio, sebbene la disposizione a "X" abbia migliorato la rigidità della struttura, la mancanza di un sistema di ancoraggio alla base ha continuato a essere un problema. La struttura, pur essendo più resistente, non era ancora in grado di contrastare completamente spinte laterali o carichi più elevati.

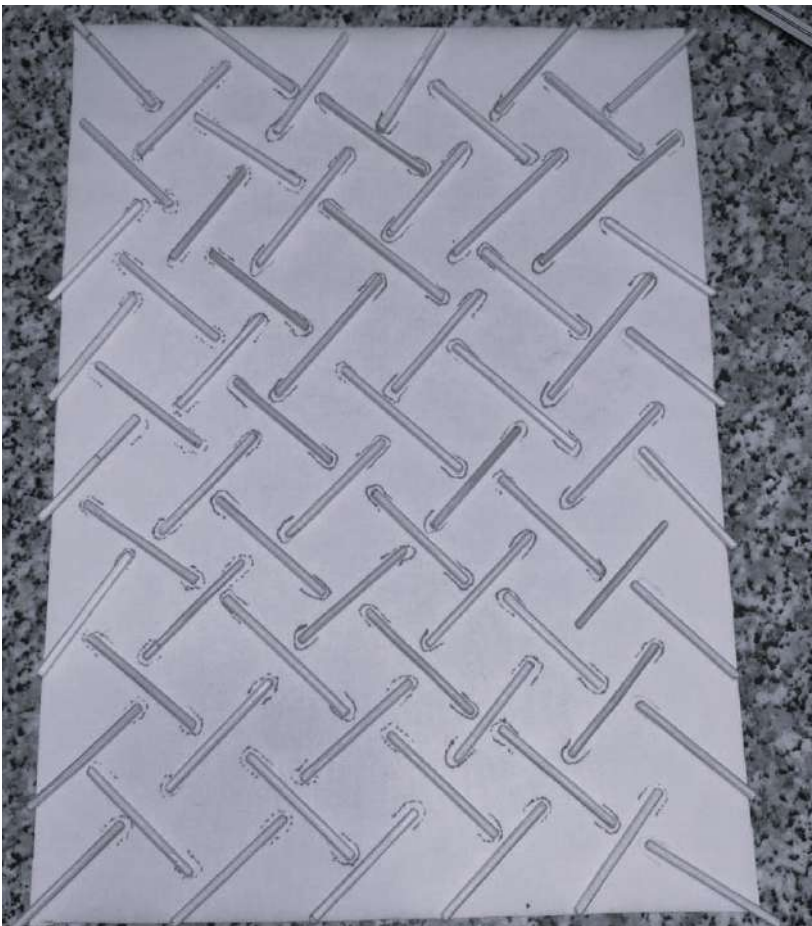
Difficoltà nel fissaggio delle aste, l'incrocio delle aste ha reso più complesso il loro inserimento e fissaggio nelle tasche della membrana. In alcuni punti, le aste tendevano a spostarsi o a deformare leggermente la membrana in modo non uniforme.

Distribuzione delle forze non completamente omogenea, sebbene la tensione fosse migliorata rispetto al primo prototipo, in alcune zone della membrana si sono formate punti di tensione più elevata rispetto ad altre, indicando la necessità di ottimizzare ulteriormente la disposizione delle aste.

Terza sperimentazione

Dopo aver analizzato i limiti del terzo prototipo, ho sviluppato una nuova soluzione basata su una forma modulare con quattro archi e una nuova disposizione delle aste. L'obiettivo era migliorare ulteriormente la rigidità della membrana e la stabilità della struttura, ottimizzando la distribuzione delle forze.

L'introduzione di quattro archi ha rappresentato un cambiamento significativo nella progettazione, permettendo di creare una struttura più equilibrata e resistente. Inoltre, le aste sono state posizionate in modo perpendicolare tra loro senza toccarsi, evitando punti critici di concentrazione delle forze e garantendo una migliore tensione della membrana.

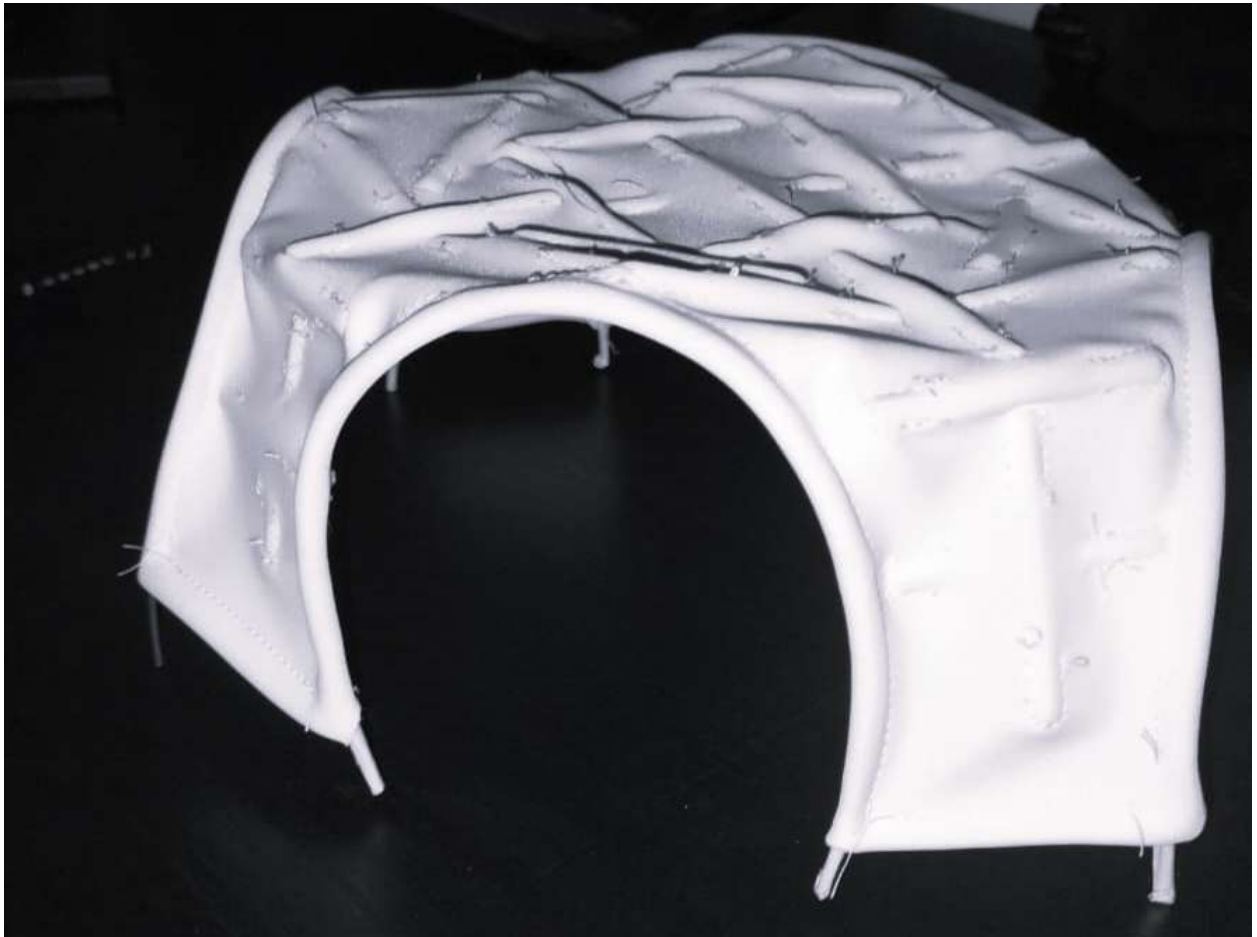


Prototipo completato

I quattro archi hanno permesso di ottenere una struttura più stabile rispetto alle configurazioni precedenti, creando un sistema in cui la membrana risultava più tesa e meno soggetta a deformazioni indesiderate.

La forma modulare consente una migliore distribuzione del peso e delle sollecitazioni, rendendo la tensostruttura più adattabile a diverse condizioni di carico.

Inoltre le aste sono state posizionate in modo da non toccarsi tra loro, evitando il rischio di interferenze strutturali e mantenendo un assetto più pulito e funzionale.





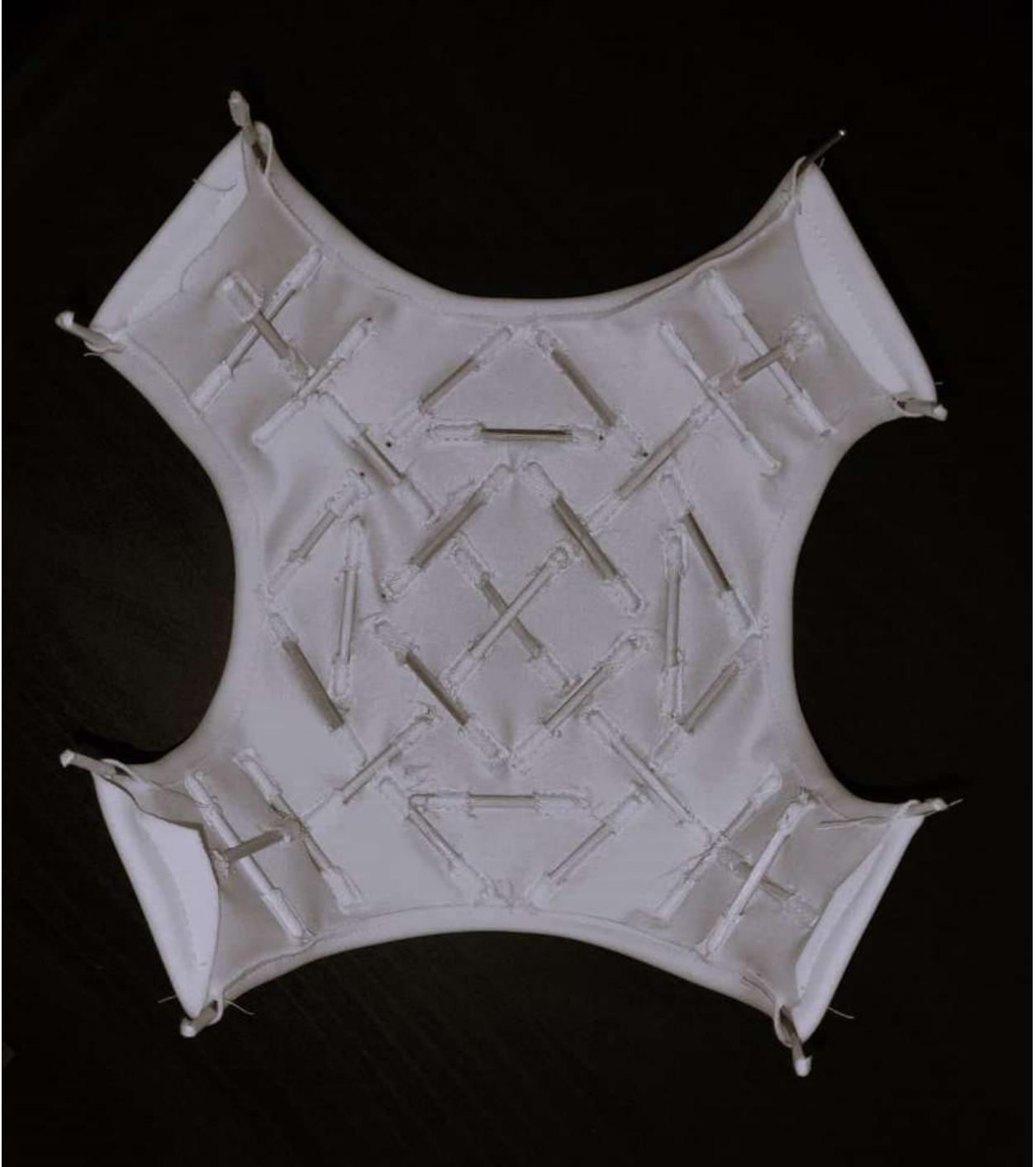
Osservazioni

Terminato il prototipo, ho osservato una serie di miglioramenti rispetto alle versioni precedenti:

Maggiore rigidità della membrana, grazie alla disposizione delle aste e alla forma modulare, la membrana risultava più rigida e meno soggetta a cedimenti.

Struttura più equilibrata, la presenza dei quattro archi ha permesso di distribuire meglio le forze, evitando sbilanciamenti e punti deboli. Migliore comportamento sotto carico.

A differenza del primo e del secondo prototipo, questa configurazione ha mostrato una maggiore resistenza alla pressione applicata, mantenendo la sua forma senza cedimenti immediati.



Criticità individuate

Necessità di un fissaggio più efficace: anche se la nuova disposizione ha migliorato la rigidità della struttura, la connessione tra membrana e aste potrebbe essere ulteriormente ottimizzata per evitare spostamenti indesiderati.

Base ancora senza ancoraggio: nonostante i progressi nella rigidità, la struttura non era ancora completamente stabile senza un fissaggio al suolo o un sistema di zavorra.

Tensione della membrana da affinare: la disposizione perpendicolare delle aste ha creato una tensione abbastanza uniforme, ma in alcune zone si sono osservate leggere variazioni di tensione che potrebbero essere migliorate con un ulteriore affinamento della geometria.

Quarta sperimentazione

Dopo l'analisi dei prototipi precedenti, ho sviluppato un quarto prototipo che richiama le strutture delle tende Ferrino. Pur mantenendo la stessa forma modulare con quattro archi del terzo modellino, questa nuova configurazione introduce due arcate centrali che attraversano la struttura e quattro arcate aggiuntive che passano sugli archi principali.

Questa soluzione ha permesso di migliorare la rigidità complessiva della tensostruttura, raggiungendo un livello di stabilità soddisfacente.



Studio della Nuova Disposizione delle Aste

L'ispirazione alle tende Ferrino è derivata dalla necessità di ottenere una struttura più stabile e autoportante, evitando i cedimenti osservati nei prototipi precedenti.

La configurazione adottata si basa su:

Due arcate centrali che attraversano la struttura in direzione ortogonale rispetto agli archi principali, creando un elemento di irrigidimento interno.



Quattro arcate aggiuntive sugli archi principali, che, posizionate lungo gli archi esterni, queste aste contribuiscono a migliorare la distribuzione delle forze e a bilanciare la tensione della membrana.





Osservazioni

L'assemblaggio del quarto prototipo ha seguito le stesse fasi di costruzione dei precedenti, con la differenza che l'aggiunta delle arcate centrali e superiori ha reso la struttura più rigida e stabile sin dalla fase di montaggio.

I test condotti sulla struttura hanno evidenziato miglioramenti significativi:

Stabilità soddisfacente, la struttura ha resistito bene alla pressione applicata, mantenendo la forma senza cedimenti evidenti.

Maggiore rigidità della membrana, la combinazione delle arcate ha contribuito a migliorare la tensione della membrana, evitando aree di flessione o allentamenti.

Distribuzione più omogenea delle forze, rispetto ai prototipi precedenti, la forza era più bilanciata su tutta la struttura, senza punti di concentrazione del carico.



Criticità residue

Necessità di ottimizzare il fissaggio delle arcate centrali: pur essendo efficace, la connessione delle arcate interne potrebbe essere migliorata per evitare movimenti indesiderati.

Leggera flessione in alcune zone: sebbene la struttura abbia retto bene, in alcuni punti la membrana potrebbe essere ulteriormente tesa per ottimizzare la rigidità.

Possibile introduzione di ancoraggi o tensionatori: per garantire un comportamento ancora più affidabile in condizioni reali, si potrebbe valutare l'aggiunta di ancoraggi o tensionatori supplementari.

Soluzioni applicabili

Sistema di fissaggio delle aste alla base con possibilità di integrare delle zavorre: per migliorare la stabilità della tensostruttura ed evitare eventuali spostamenti o cedimenti, è necessario progettare un sistema di ancoraggio alla base.

Applicazione di tiraggi per mantenere tesa la membrana: per garantire una tensione uniforme e continua della membrana, si possono applicare sistemi di tiraggio simili a quelli utilizzati per armare la vela da windsurf.

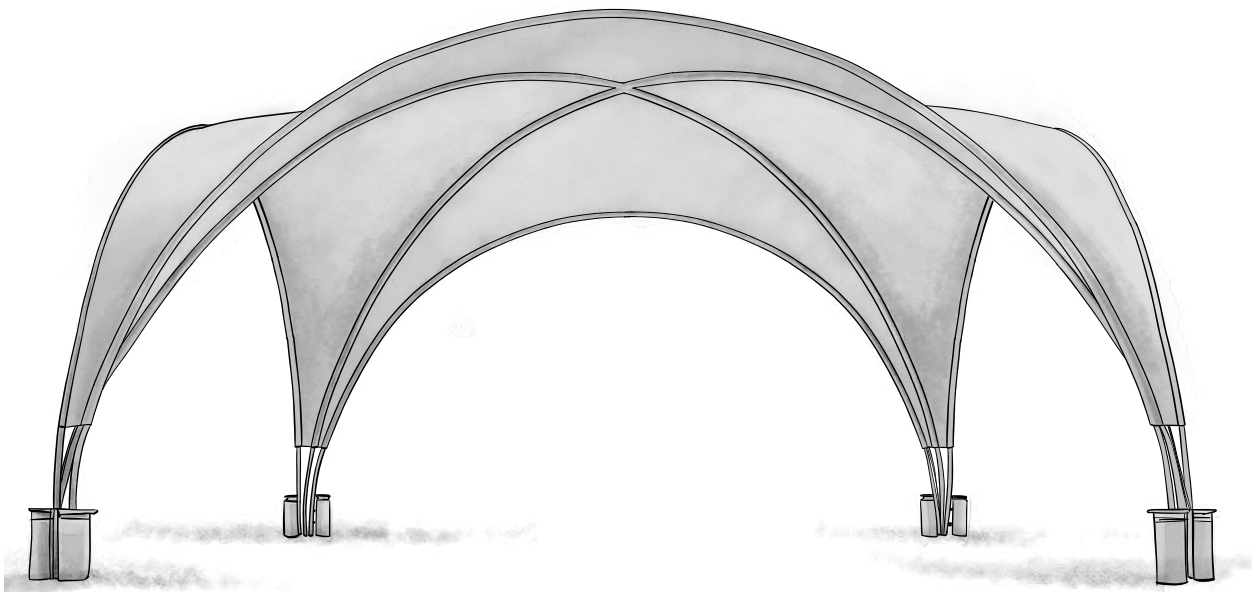
Possibile introduzione di ancoraggi o tensionatori: questo sistema potrebbe prevedere attacchi fissi o regolabili, con la possibilità di inserire delle zavorre che aumentino il peso e impediscano movimenti indesiderati..

04.3 Il prodotto

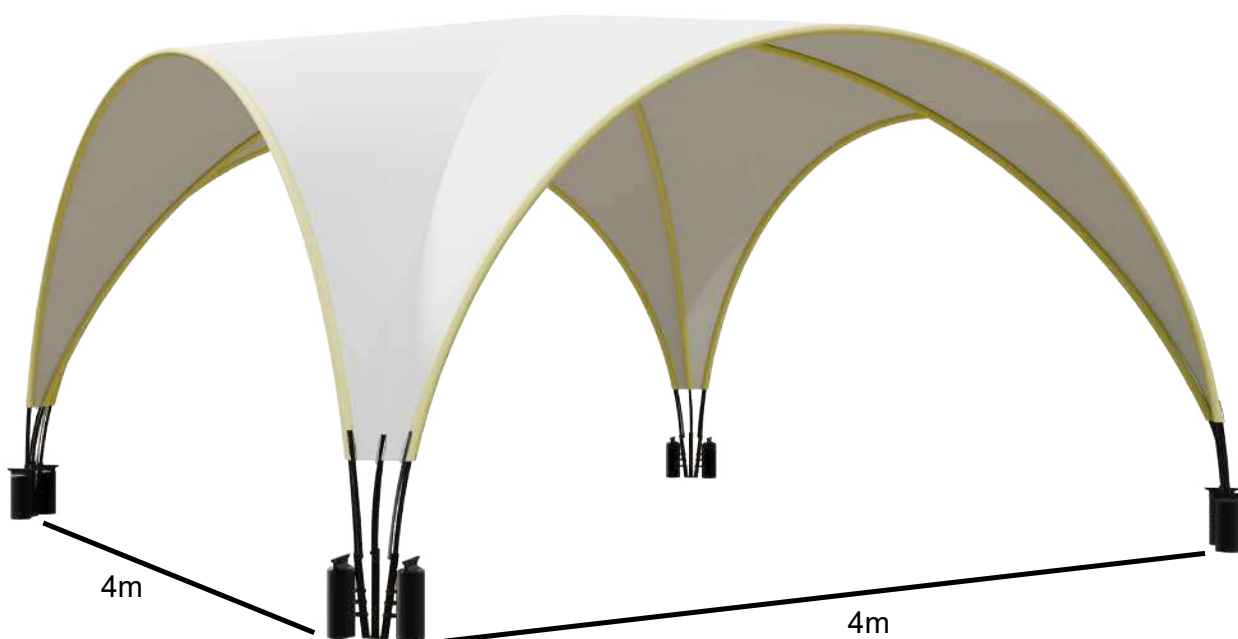
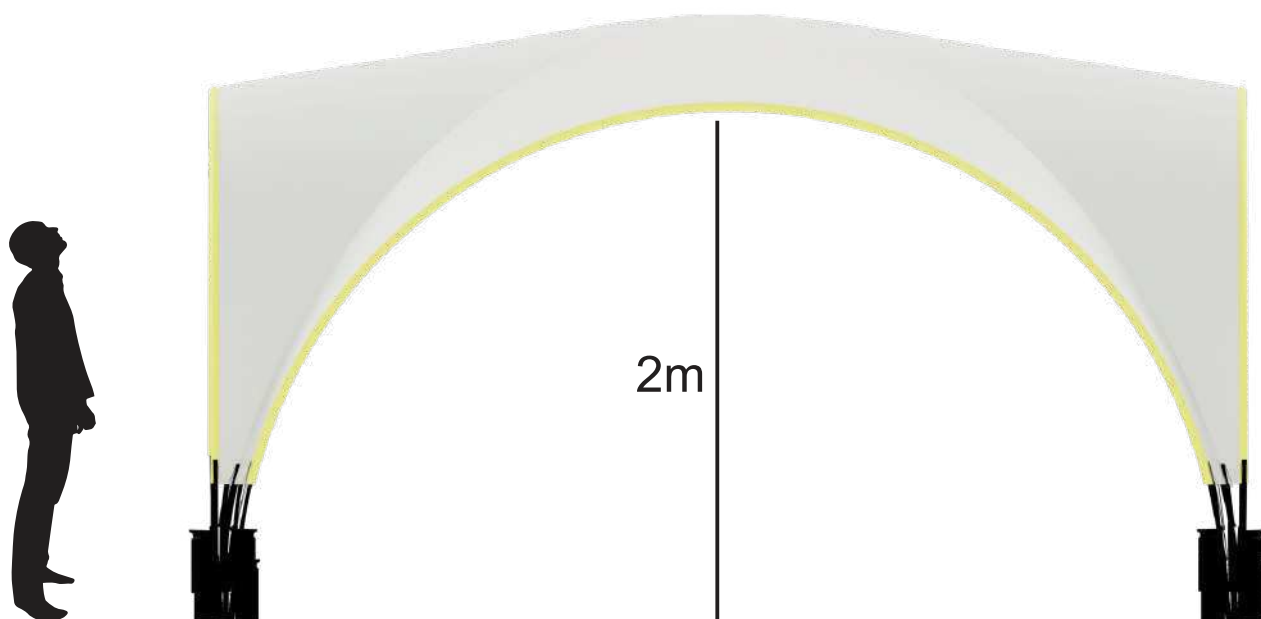
Tensostruttura autoportante

Il concept finale rappresenta l'evoluzione del prototipo precedente, riuscendo a raggiungere gli obiettivi prefissati in termini di autoportanza, leggerezza e facilità di montaggio. Attraverso l'integrazione dei principi del tensegrity e l'ispirazione tratta dalle tende da campeggio, la struttura è stata progettata per garantire stabilità senza l'ausilio di elementi portanti rigidi.

Le aste flessibili si inseriscono nelle apposite tasche della membrana tessile, mantenendo la tensione necessaria per la stabilità complessiva. Il sistema di tiraggio, ispirato alla tecnologia delle tavole da windsurf, consente un ancoraggio saldo e regolabile al suolo, migliorando la resistenza della struttura alle sollecitazioni esterne. Inoltre, la scelta di materiali leggeri e durevoli come il poliestere ripstop ha permesso di ottimizzare trasportabilità e resistenza. Grazie alla modularità del design, più unità possono essere affiancate per creare spazi versatili e adattabili a diverse necessità.







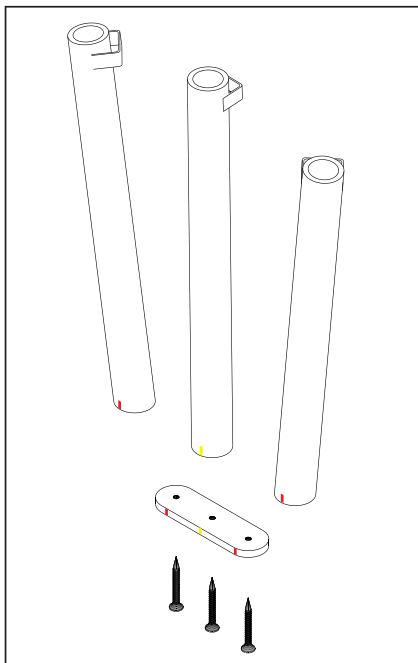


Analisi delle componenti: La base



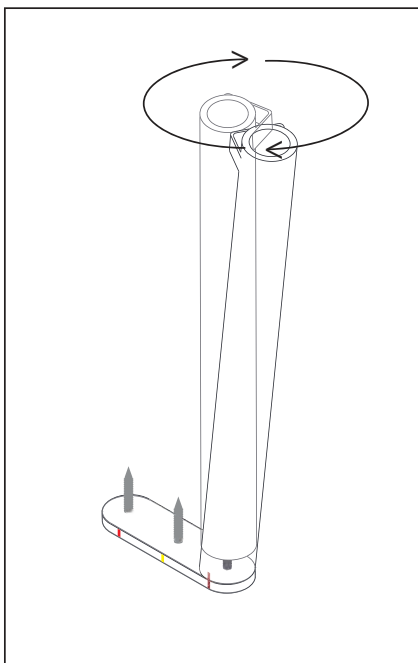


Montaggio della base

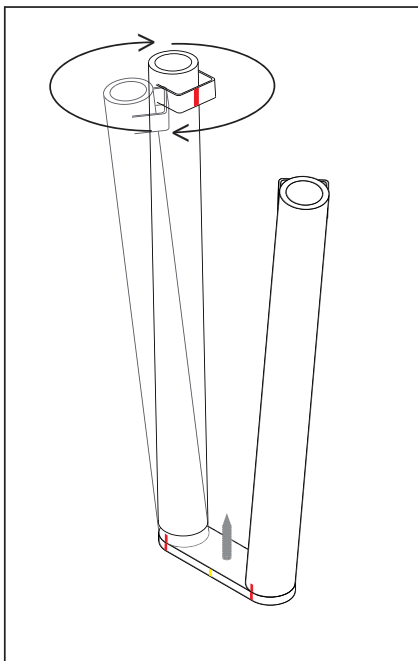


Per agevolare l'assemblaggio, ogni tubo laterale è contrassegnato da un colore rosso, mentre per quello centrale è contrassegnato il colore giallo, che corrisponde a un'indicazione visiva sulla pedana, tutto questo per migliorare l'ergonomia cognitiva all'utente che andrà ad assemblare il prodotto.

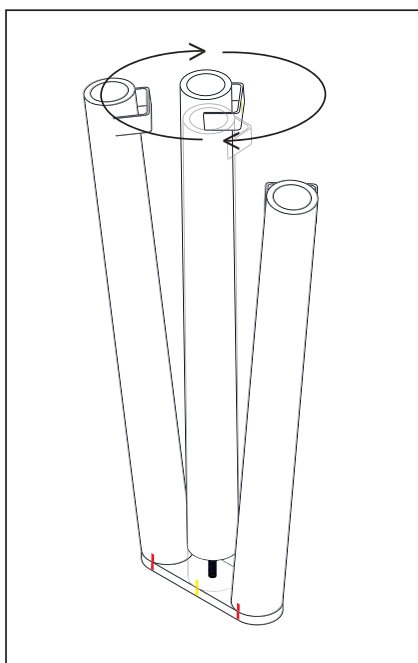
Questa soluzione permette di posizionare correttamente i tubi, garantendo l'angolazione precisa necessaria per la stabilità dell'intera struttura. L'ancoraggio avviene attraverso un sistema di fissaggio con viti che, partendo dalla pedana, attraversano il tubolare assicurando un montaggio saldo e sicuro.



Per prima cosa si avvitano i tubolari laterali, poiché ciò facilita l'assemblaggio. Questo passaggio è particolarmente importante a causa della rotazione del pezzo, che risulta leggermente invasiva. Infatti, il tubolare non è dritto, ma inclinato per adattarsi meglio alle aste.



Anche sull'aggancio progettato per accogliere le cinghie in nylon è presente il colore corrispondente. Questo dettaglio consente all'utente, durante la fase di smontaggio, di identificare facilmente il pezzo specifico e riporlo nella borsa designata, anch'essa contrassegnata con il colore corrispettivo.



Dopo aver assemblato i tubolari laterali, si procede con il terzo, ovvero quello centrale. Questo tubolare è dotato di un dettaglio giallo che serve a identificarlo chiaramente come quello centrale. Tale distinzione è utile per gli stessi motivi già menzionati, ovvero facilitare il riconoscimento e il corretto smontaggio, garantendo che venga riposto nella borsa segnalata con il colore corrispondente.

Materiali

L'alluminio è un metallo leggero e versatile, noto per le sue eccellenti proprietà fisiche e chimiche, che lo rendono ideale per numerose applicazioni strutturali, tra cui la realizzazione di tensostrutture.

Dal punto di vista fisico, l'alluminio ha una densità di circa $2,7 \text{ g/cm}^3$, che lo rende circa tre volte più leggero dell'acciaio, facilitandone il trasporto e la maneggevolezza. Ha un'elevata resistenza meccanica, che può essere ulteriormente migliorata con leghe specifiche, ed è caratterizzato da un'ottima duttilità e malleabilità, permettendo di ottenere forme complesse con lavorazioni come estrusione o trafilatura. Inoltre, possiede una buona conducibilità termica e una bassa temperatura di fusione (circa 660°C), il che facilita i processi di lavorazione e riciclo.

A livello chimico, l'alluminio ha un'ottima resistenza alla corrosione grazie alla formazione spontanea di un sottile strato di ossido sulla superficie, che lo protegge dagli agenti atmosferici e dall'ossidazione. Questo lo rende particolarmente adatto per utilizzi in ambienti esterni. L'alluminio è inoltre un materiale non magnetico e non tossico, il che ne amplia il campo di utilizzo in diversi settori.

Grazie a queste proprietà, l'alluminio si presta perfettamente alla realizzazione di elementi strutturali per tensostrutture, offrendo una combinazione di leggerezza, resistenza e durabilità, fondamentale per garantire la stabilità e la facilità di montaggio della struttura.



Anodizzazione

L'alluminio è stato colorato di nero per diversi motivi. In primo luogo, l'anodizzazione migliora la protezione del materiale dagli agenti atmosferici e dall'usura, aumentando la sua longevità. Inoltre, la colorazione nera riduce i riflessi della luce, evitando fastidiosi abbagliamenti e conferendo un aspetto più raffinato ed elegante alla struttura.

Fasi del processo di anodizzazione

Preparazione del materiale:

L'alluminio viene pulito accuratamente per rimuovere impurità, oli o ossidi preesistenti. Questo avviene tramite sgrassaggio chimico e decapaggio in soluzioni acide o alcaline.

Anodizzazione elettrolitica:

Il pezzo di alluminio viene immerso in un bagno elettrolitico, generalmente una soluzione di acido solforico (o talvolta acido ossalico o fosforico). L'alluminio viene collegato all'anodo (polo positivo) di un circuito elettrico, mentre un catodo (spesso in piombo o acciaio inox) chiude il circuito. Quando viene applicata corrente continua, avviene un'ossidazione controllata della superficie dell'alluminio, formando uno strato di ossido di alluminio poroso.

Colorazione (opzionale):

Poiché lo strato anodizzato è poroso, può assorbire coloranti specifici, permettendo di ottenere diverse finiture estetiche. Il nero, ad esempio, si ottiene con coloranti organici o tramite deposizione elettrolitica di sali metallici.

Sigillatura:

Per chiudere i pori dello strato anodizzato e aumentarne la resistenza alla corrosione, il pezzo viene immerso in acqua calda o vapore, favorendo l'idratazione dell'ossido di alluminio e la sua trasformazione in boehmite, un composto più compatto e resistente.



Tecnologie di produzione: tubolari

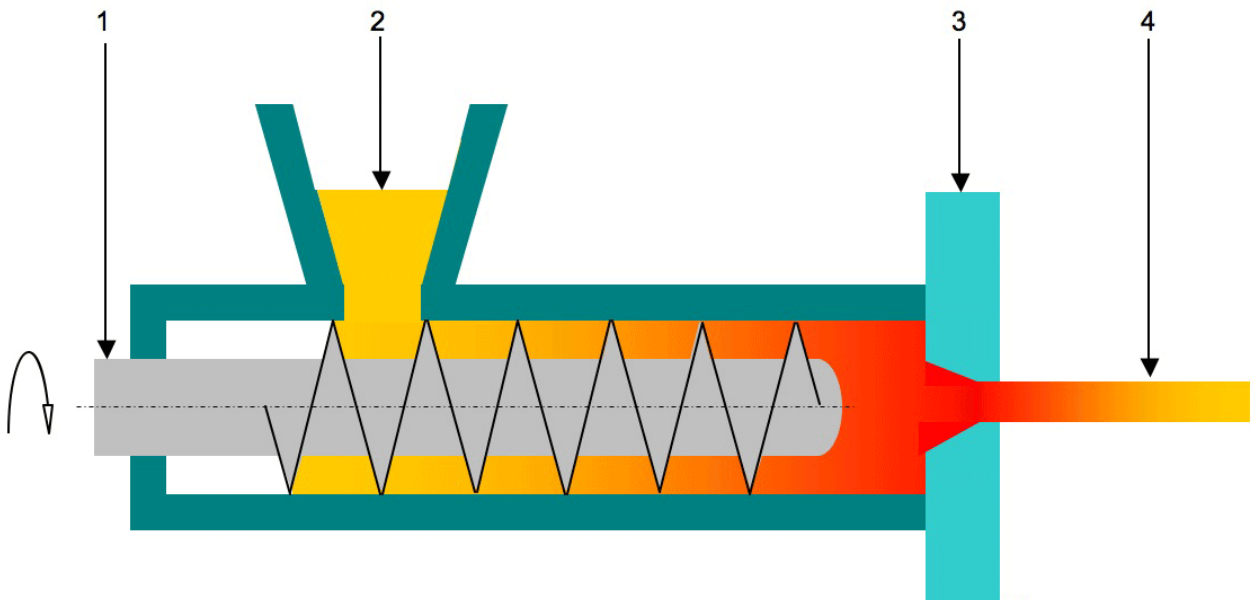
L'estrusione a caldo è il metodo più usato per ottenere barre piene con sezioni interne complesse. Il processo avviene in questo modo:

Preparazione del materiale: Un lingotto metallico viene riscaldato fino a una temperatura plastica.

Pressione attraverso una matrice: Il materiale viene spinto attraverso una matrice sagomata che gli conferisce la forma esterna e interna desiderata.

Raffreddamento e taglio: Il pezzo estruso viene raffreddato e tagliato alla lunghezza richiesta.

Trattamenti termici o lavorazioni successive: A seconda delle esigenze, il pezzo può subire trattamenti termici per migliorare la resistenza meccanica.



Fresatura interna per l'incavo delle aste

Per la fresatura viene utilizzata una macchina a controllo numerico (CNC) a tre assi, in grado di garantire precisione e ripetibilità nel processo.

Il tubolare pieno viene fissato saldamente alla morsa con un sistema di staffaggio rigido per evitare vibrazioni durante la lavorazione. L'incavo superiore più piccolo, destinato all'alloggiamento dell'asta, viene realizzato con una fresa a candela in metallo duro dal diametro di 9 mm, procedendo con passate successive fino a raggiungere una profondità di 20 mm. Per l'incavo più grande, di diametro 16,5 mm e profondità 60 mm, si utilizza una fresa a candela adeguata, operando con una strategia di fresatura a tasca per rimuovere progressivamente il materiale.

Terminata la fresatura, il pezzo viene riposizionato per la foratura inferiore necessaria all'inserimento della vite filettata, eseguita con una punta elicoidale di diametro 5 mm, previa realizzazione di un preforo per migliorare la precisione e ridurre lo sforzo di taglio.

La filettatura viene poi ottenuta con un maschio M6, assicurando una lubrificazione adeguata per evitare grippaggi e ottenere un filetto pulito e preciso.



Tecnologie di produzione: piastra

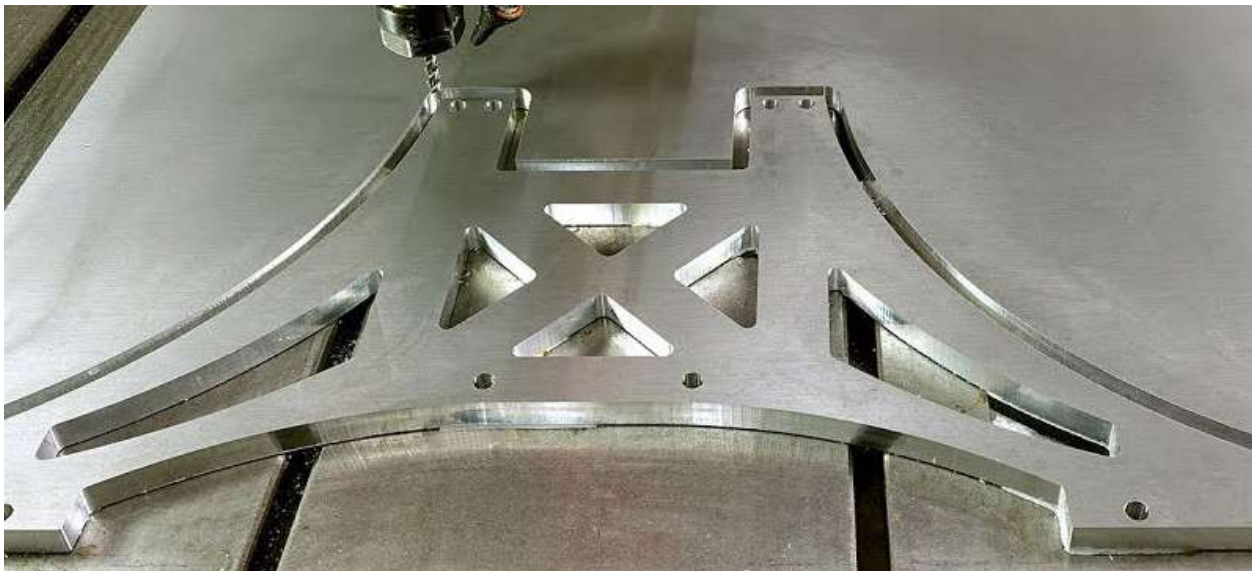
Fusione e colata: L'alluminio viene fuso in grandi forni a partire da lingotti primari o scarti riciclati. Una volta liquido, il metallo viene colato in lingotti rettangolari (slab) di grande spessore.

Laminazione a caldo: I lingotti vengono riscaldati a temperature elevate e passati attraverso laminatoi a caldo. Questo processo riduce gradualmente lo spessore del metallo e conferisce una struttura più omogenea.

Laminazione a freddo: Dopo la laminazione a caldo, la lastra viene ulteriormente lavorata attraverso laminatoi a freddo, fino a raggiungere lo spessore desiderato di 5 mm. Questo passaggio migliora anche la finitura superficiale e le proprietà meccaniche.

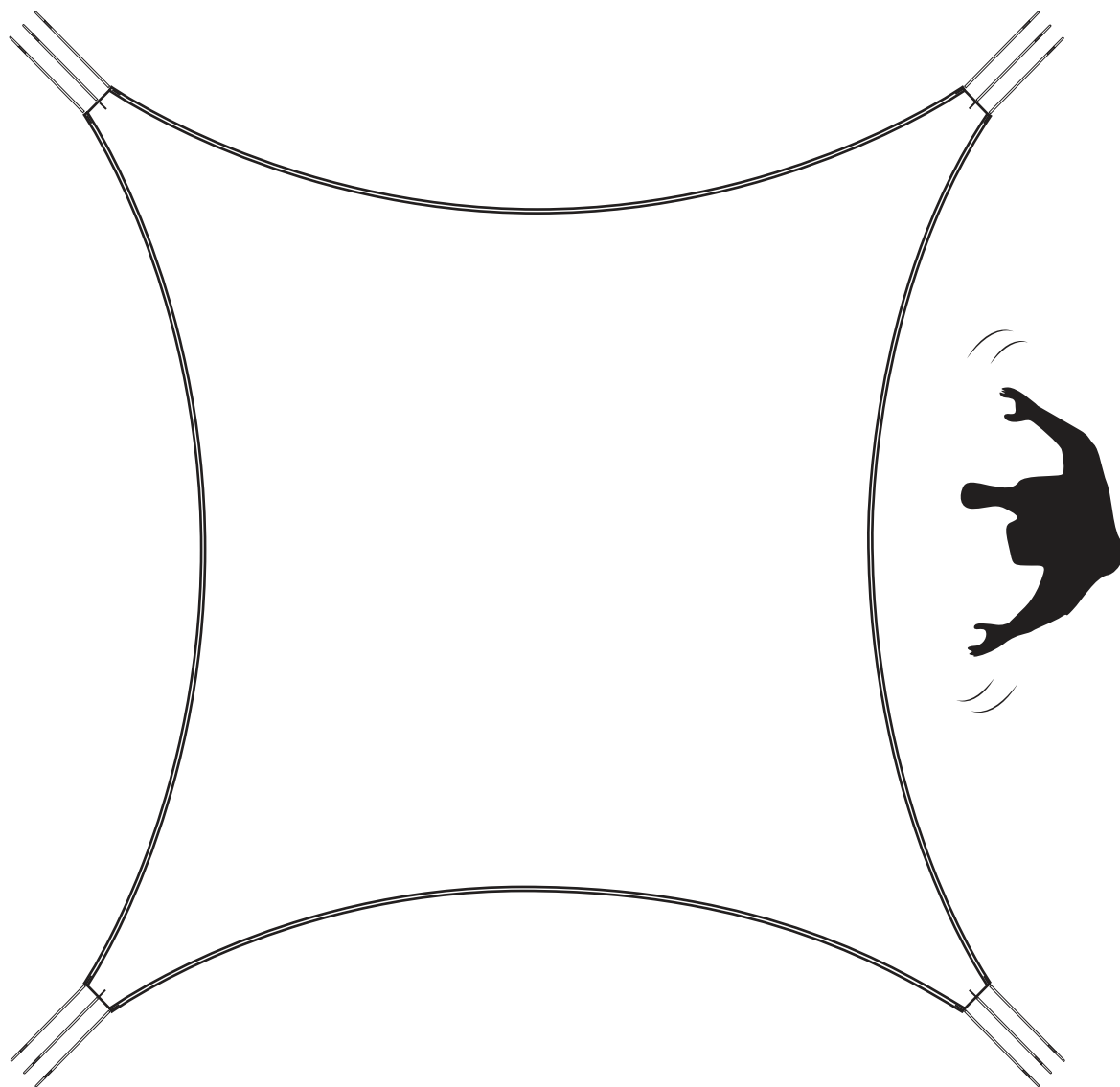
Trattamenti termici: A seconda dell'uso finale, la lastra potrebbe subire trattamenti termici per modificare la durezza, la resistenza o la duttilità.

Taglio e finitura: La piastra viene tagliata secondo le dimensioni di base richieste utilizzando macchinari specifici come taglierine a laser o al plasma. Per ottenere le estremità circolari, il taglio viene effettuato con precisione seguendo una sagoma o un disegno predefinito.





Stesura telo



Dopo averlo estratto dalla sua sacca, il telo viene srotolato seguendo lo stesso procedimento utilizzato per le tende tradizionali e successivamente viene disteso.

Analisi del materiale

Il poliestere ripstop è un materiale caratterizzato da una trama rinforzata che include fili più spessi a intervalli regolari, formando una rete che impedisce la propagazione di eventuali lacerazioni. Questo tipo di struttura conferisce al tessuto una maggiore resistenza agli strappi. Anche nel caso in cui il materiale dovesse danneggiarsi, la griglia ripstop limita l'estensione del danno, mantenendo l'integrità complessiva del tessuto. Questo è fondamentale quando il materiale è sottoposto a sollecitazioni elevate, come avviene in ambienti esposti a condizioni di vento forte e forze dinamiche.

Inoltre, ha una buona resistenza agli agenti atmosferici, in particolare ai raggi UV.

A differenza di altri materiali che possono degradarsi rapidamente a causa dell'esposizione solare, il poliestere ripstop è più resistente ai raggi ultravioletti, mantenendo la sua integrità e le sue proprietà anche con l'esposizione prolungata al sole.

Il suo comportamento igroscopico ridotto implica una minore capacità di assorbire acqua rispetto ad altri tessuti, diminuendo così il rischio di deformazioni o perdita di tensione in presenza di umidità.



Tecnica di produzione

Il poliestere ripstop viene prodotto attraverso un processo di tessitura che integra una struttura rinforzata per migliorarne la resistenza agli strappi. La tecnica di produzione prevede diverse fasi:

Produzione delle fibre di poliestere: Il primo passo consiste nella polimerizzazione del polietilene tereftalato (PET), il monomero base del poliestere. Questo polimero viene poi estruso in filamenti sottili che costituiscono le fibre di poliestere.

Tessitura del tessuto: Il poliestere viene intrecciato con una trama standard, ma per ottenere l'effetto ripstop, si inseriscono fili più spessi (solitamente di poliestere o nylon) in determinati intervalli durante il processo di tessitura. Questi fili più spessi sono disposti a intervalli regolari e creano una struttura reticolare, che è visibile sulla superficie del tessuto. La trama ripstop impedisce che i danni si propagino, rendendo il tessuto più resistente agli strappi.

Rifinitura e trattamento del materiale: Dopo la tessitura, il poliestere ripstop viene sottoposto a trattamenti per migliorarne le proprietà. Questi possono includere la rifinitura superficiale per rendere il tessuto più morbido o per dargli caratteristiche idrorepellenti. Alcuni trattamenti aggiuntivi possono includere la resistenza ai raggi UV o la protezione contro la polvere e lo sporco.

Densità e finitura: Una volta tessuto, il materiale viene rifinito per ottenere la giusta densità e resistenza, a seconda dell'applicazione finale. Può essere trattato anche con un rivestimento di PVC per migliorarne la durabilità e la resistenza alle intemperie.



Cucitura del tessuto

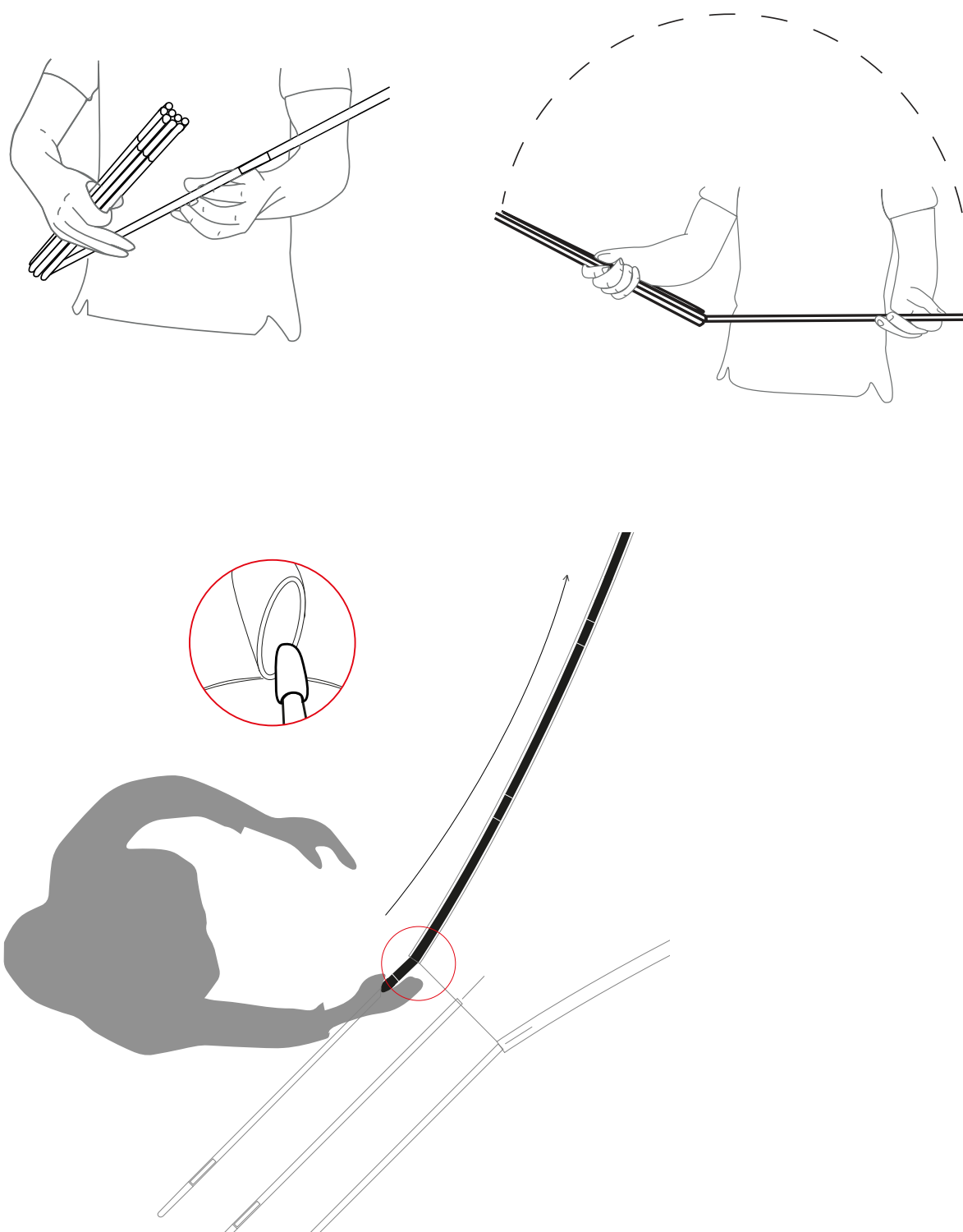
La cucitura del poliestere ripstop avviene spesso utilizzando un filo in Kevlar, una fibra aramidica nota per la sua straordinaria resistenza e durabilità. Il Kevlar viene impiegato per rinforzare le cuciture e garantire che il tessuto rimanga resistente e stabile anche sotto forti sollecitazioni.

Il Kevlar è una fibra sintetica prodotta attraverso il processo di polimerizzazione del diamminobenzene e del cloruro di tereftalico. Questo processo crea una struttura cristallina che conferisce alla fibra una resistenza alla trazione molto elevata. È noto per essere leggero, flessibile, e allo stesso tempo estremamente resistente. Le proprietà fisiche del Kevlar includono una resistenza alla trazione cinque volte superiore a quella dell'acciaio a parità di peso. Inoltre, è termoresistente, cioè non si degrada facilmente sotto alte temperature, e ha una buona resistenza agli agenti chimici.

Queste proprietà lo rendono ideale per l'uso in cuciture di materiali come il poliestere ripstop, poiché le cuciture in Kevlar offrono una resistenza eccezionale agli strappi e garantiscono la durabilità del prodotto finito, anche in condizioni di utilizzo estremo, come il vento forte o il contatto con superfici ruvide. Il Kevlar, quindi, non solo migliora la resistenza del materiale, ma contribuisce anche alla longevità del prodotto, proteggendo dalle rotture delle cuciture.



Inserimento aste



Analisi del materiale

Le aste in fibra di vetro sono state scelte in quanto offrono una combinazione ideale di leggerezza, resistenza e flessibilità, che sono tutte caratteristiche fondamentali per garantire la stabilità e la funzionalità della struttura della tenda da campeggio.

La fibra di vetro è particolarmente adatta per applicazioni esterne come queste, dove il materiale deve essere in grado di resistere a condizioni climatiche variabili senza compromettere le performance.

Una delle principali caratteristiche della fibra di vetro è la sua elevata resistenza alla trazione, che permette alle aste di mantenere la loro forma e stabilità anche sotto forte pressione e sollecitazioni. Questo è particolarmente importante per la struttura della tenda, che deve resistere al vento e agli spostamenti senza deformarsi o rompersi. Inoltre, la fibra di vetro è leggera, il che facilita il trasporto e il montaggio della tenda, riducendo il peso complessivo senza sacrificare la solidità della struttura.



Tecnica di produzione

Per la produzione delle aste in fibra di vetro utilizzate nelle tende da campeggio, la tecnica di produzione prevede diverse fasi di lavorazione specifiche per garantire resistenza, flessibilità e durata. La fibra di vetro viene creata attraverso un processo che coinvolge la fusione del vetro e la sua successiva trasformazione in fili sottili. Questi fili vengono poi intrecciati o orientati in modo specifico per ottenere le proprietà desiderate, come alta resistenza alla trazione e una buona flessibilità.

Il primo passo nella produzione della fibra di vetro è la fusione del vetro. Il materiale grezzo, principalmente sabbia di silice, viene fuso a temperature elevate per creare una massa fusa di vetro. Una volta ottenuto il vetro fuso, viene filato in sottilissimi fili attraverso un processo chiamato filatura. Questi fili di vetro sono molto sottili ma estremamente resistenti e possono essere ulteriormente trattati per migliorare la loro elasticità e durabilità.

Successivamente, i fili di fibra di vetro vengono intrecciati o orientati in modo strategico per conferire maggiore forza e resistenza. I filamenti possono essere organizzati in strati paralleli o disposti in diverse configurazioni per ottimizzare le proprietà meccaniche del materiale. La fibra di vetro a maglia unidirezionale, ad esempio, conferisce una resistenza alla trazione molto elevata, mentre le fibre intrecciate o a reticolo forniscono una maggiore flessibilità.

Una volta ottenuta la fibra di vetro, si procede con la formatura delle aste. Le fibre vengono impregnate con una resina polimerica, solitamente una resina epossidica o poliestere, che le rende rigide e dure. Il processo di impregnazione viene realizzato mediante pultrusione, una tecnica in cui le fibre di vetro passano attraverso una matrice contenente la resina, che viene successivamente indurita tramite un processo di polimerizzazione. Questo processo conferisce alle aste in fibra di vetro la struttura solida e rigida necessaria per mantenere la forma e la stabilità della tenda.

Le aste vengono quindi modellate e tagliate nella forma desiderata, a seconda della lunghezza e del diametro richiesti per l'uso specifico. Successivamente, vengono rinforzate con l'uso di giunti in plastica o inserti metallici per migliorare la resistenza alle sollecitazioni laterali o per facilitare il montaggio.

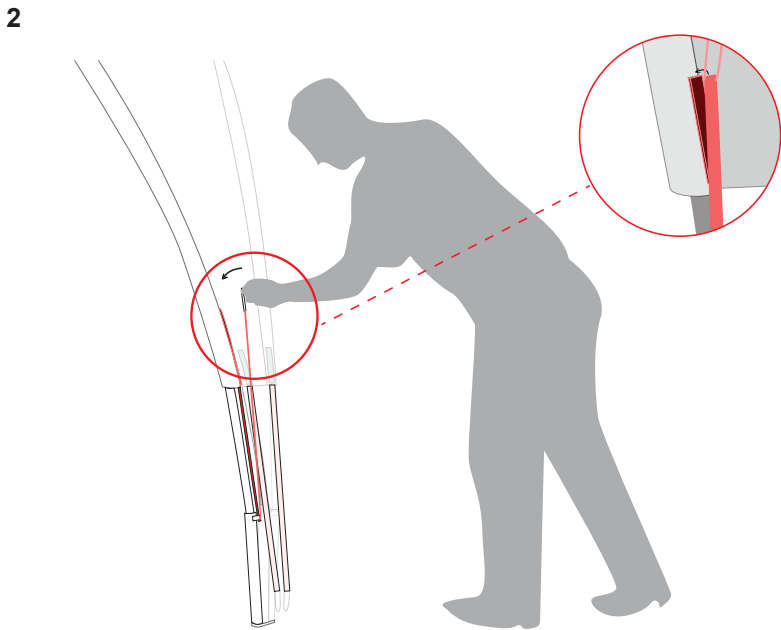
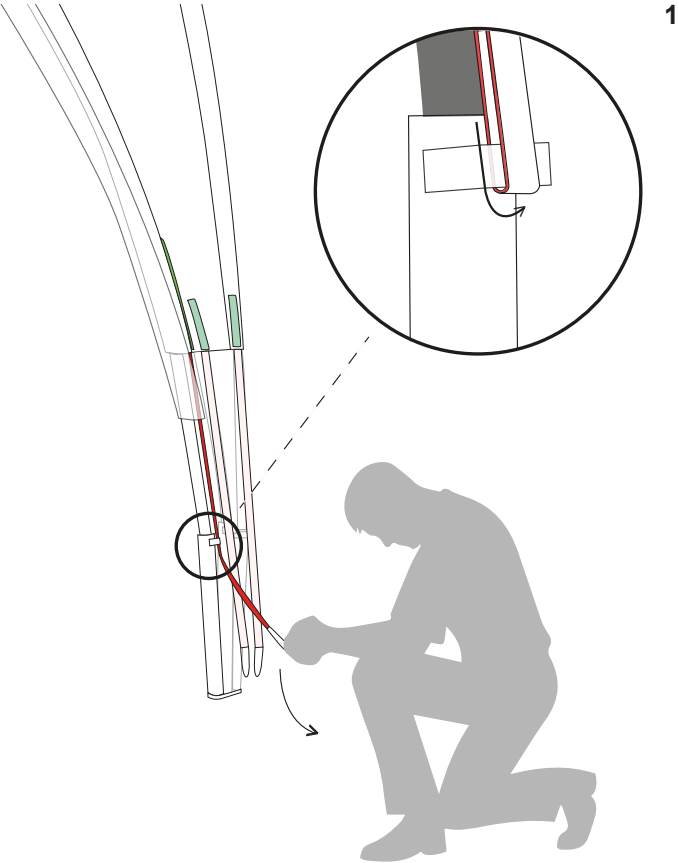


Assemblaggio asta

Nel montaggio della tenda, l'inserto in alluminio funge da supporto rigido, mentre le aste in fibra di vetro forniscono flessibilità e resistenza alla trazione. Il filo di nylon viene utilizzato all'interno delle aste per mantenere uniti i segmenti, favorendo l'elasticità e facilitando l'assemblaggio. Il filo collega i vari pezzi di fibra di vetro e li tiene in posizione all'interno dei canali in alluminio. Questo sistema assicura una struttura leggera, stabile e facilmente montabile, in grado di resistere a sollecitazioni esterne senza compromettere la sua integrità.



Giunzione cinghie su velcro



Analisi delle cinghie

Per il tensionamento del tessuto vengono utilizzate cinghie in nylon ad alta resistenza, progettate per garantire un'ottima capacità di trazione senza compromettere la flessibilità del sistema.

Le cinghie, simili a quelle impiegate per armare le vele nelle tavole da windsurf, sono caratterizzate da un'elevata resistenza meccanica e da una buona resistenza agli agenti atmosferici, assicurando durata nel tempo anche in condizioni di utilizzo prolungato.

Il nylon, grazie alla sua elasticità controllata, permette di assorbire parte delle sollecitazioni evitando strappi improvvisi e mantenendo una tensione uniforme sul tessuto. L'installazione prevede il fissaggio delle cinghie a punti di ancoraggio predefiniti lungo la struttura attraverso la cucitura. La regolazione avviene tramite un sistema di trazione progressiva, che permette di applicare gradualmente la forza necessaria senza deformare il tessuto. Dopo il tensionamento, le estremità delle cinghie vengono bloccate con del velcro.

Infine, viene effettuato un controllo della distribuzione della tensione per assicurare che il tessuto rimanga ben disteso e privo di grinze, garantendo così un risultato estetico e funzionale ottimale.



Tecnica di produzione

Il nylon utilizzato per le cinghie è prodotto attraverso un processo di polimerizzazione per condensazione, in cui le materie prime, come l'acido adipico e l'esametilendiammina, reagiscono per formare lunghe catene polimeriche.

Il materiale così ottenuto viene poi estruso in filamenti, che vengono successivamente stirati per aumentarne la resistenza meccanica e intrecciati per formare la fettuccia ad alta tenacità.

Dopo la produzione, le cinghie vengono sottoposte a trattamenti di stabilizzazione termica per ridurre il rilassamento delle fibre e migliorare la resistenza all'usura e agli agenti atmosferici.



Cucitura sul tessuto

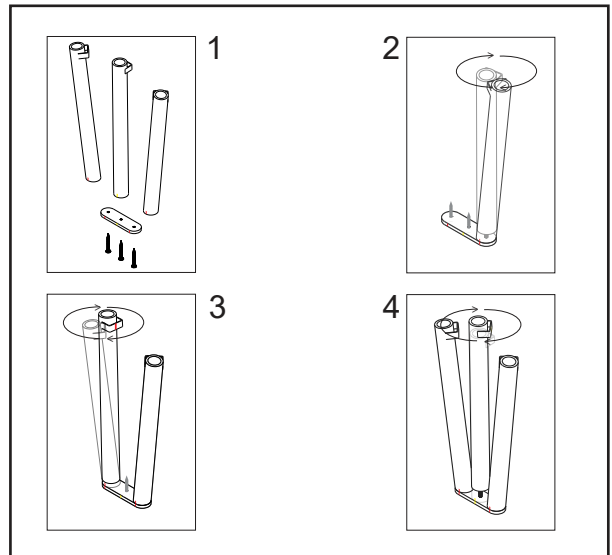
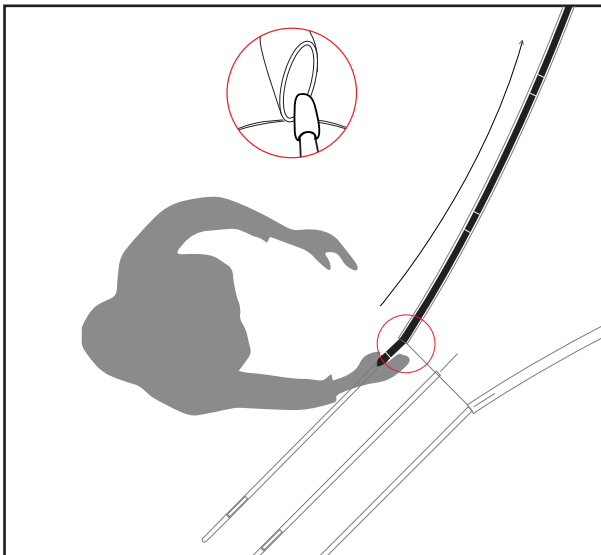
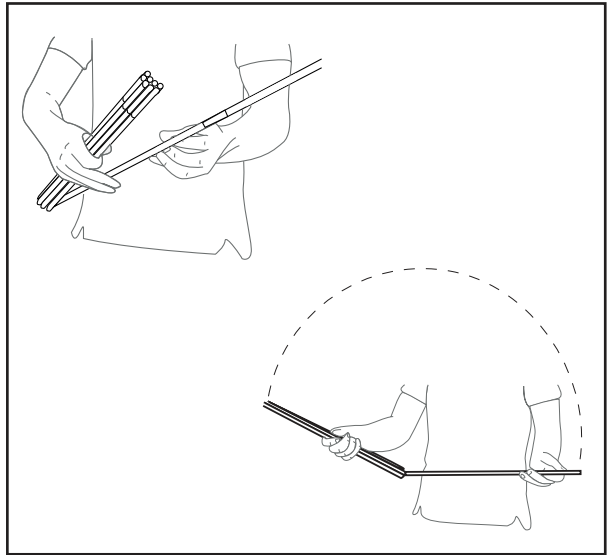
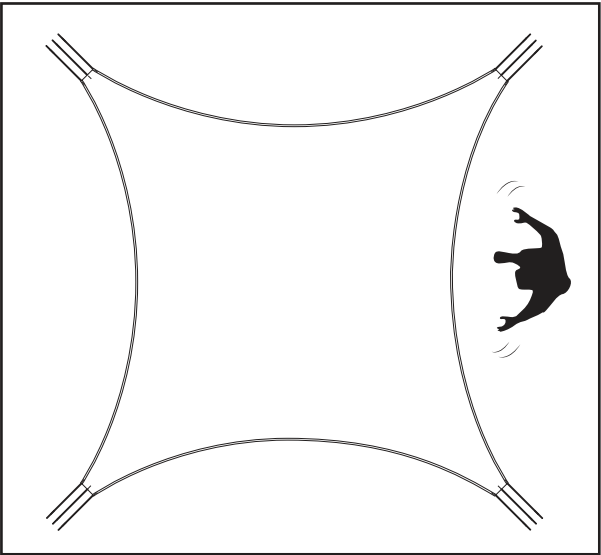
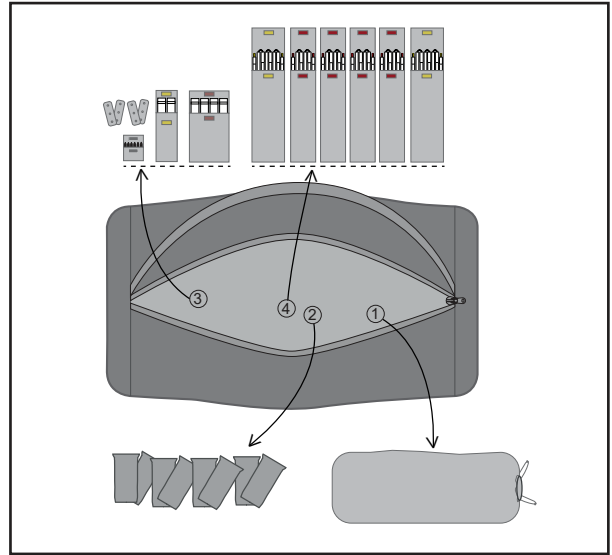
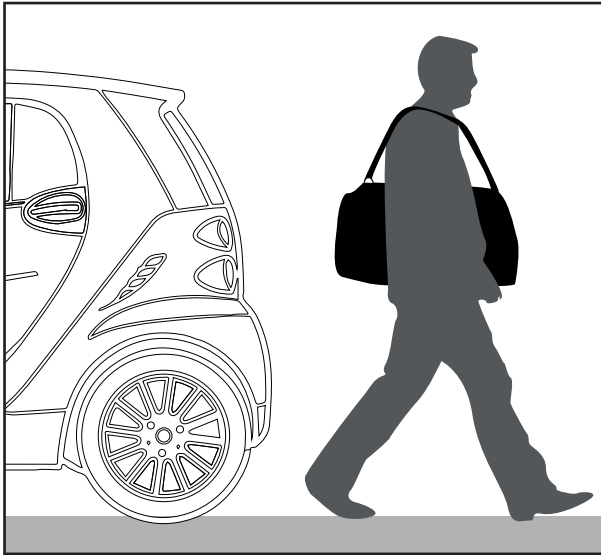
Nella fase di assemblaggio della tensostruttura, le cinghie in nylon sono state cucite direttamente alla membrana in tessuto tecnico, utilizzando una macchina da cucire industriale con filo ad alta resistenza, capace di sopportare le sollecitazioni meccaniche dovute alla tensione applicata.

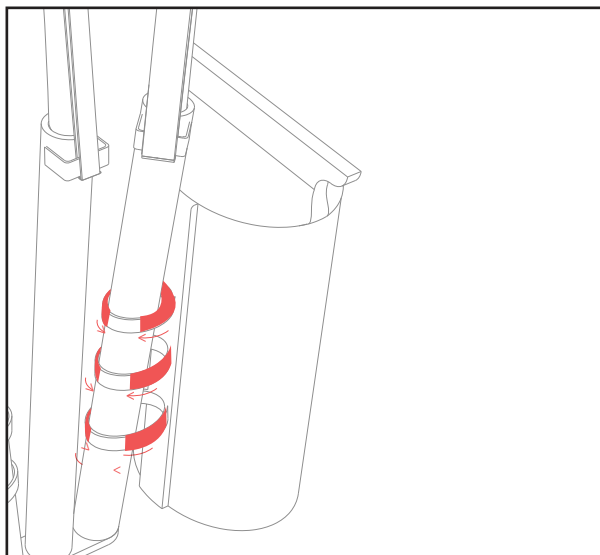
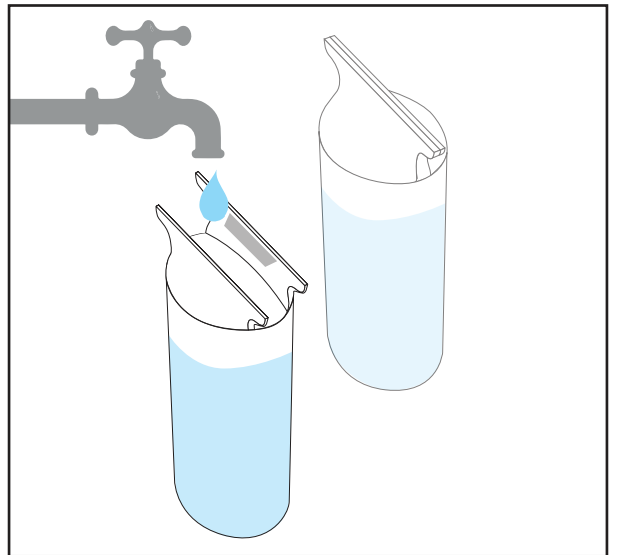
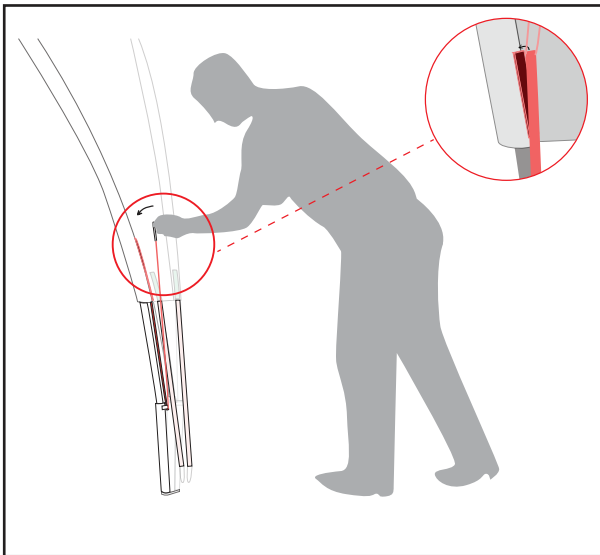
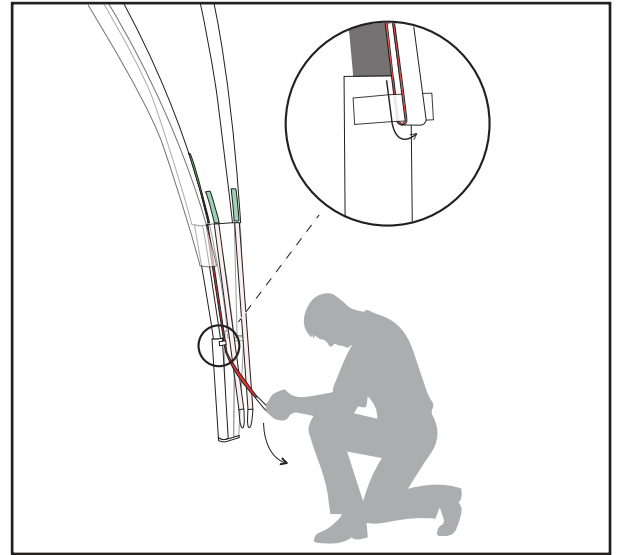
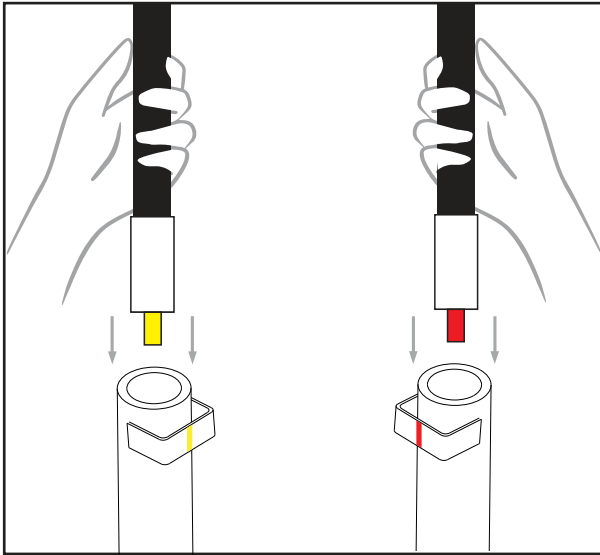
Le cuciture sono state realizzate con uno schema a zig-zag rinforzato, tipico delle lavorazioni utilizzate in ambito nautico e aeronautico, per distribuire uniformemente gli sforzi lungo l'intera lunghezza della giunzione.

Il nylon, grazie alla sua leggerezza e flessibilità, consente di mantenere la tensione del tessuto senza compromettere la capacità di adattamento della struttura alle variazioni di carico e alle condizioni ambientali.



Esempio cucitura a zig-zag







Legenda:

- 1 Telo
- 2 Zavorre
- 3 Aste in fibra di vetro
- 4 Tubolari Aggancio
- 5 Viti
- 6 Pedana Aggancio
- 7 Borsa



04.4 Tavole Tecniche

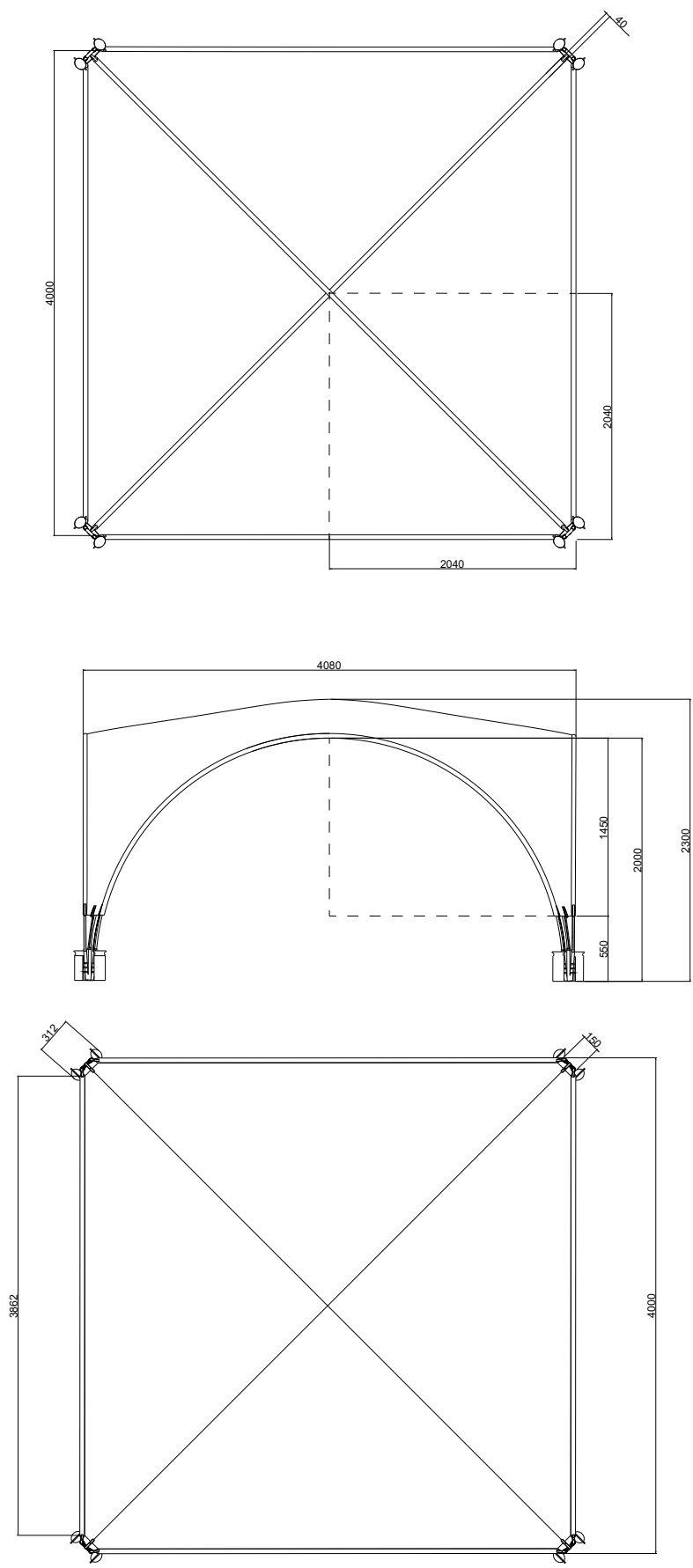
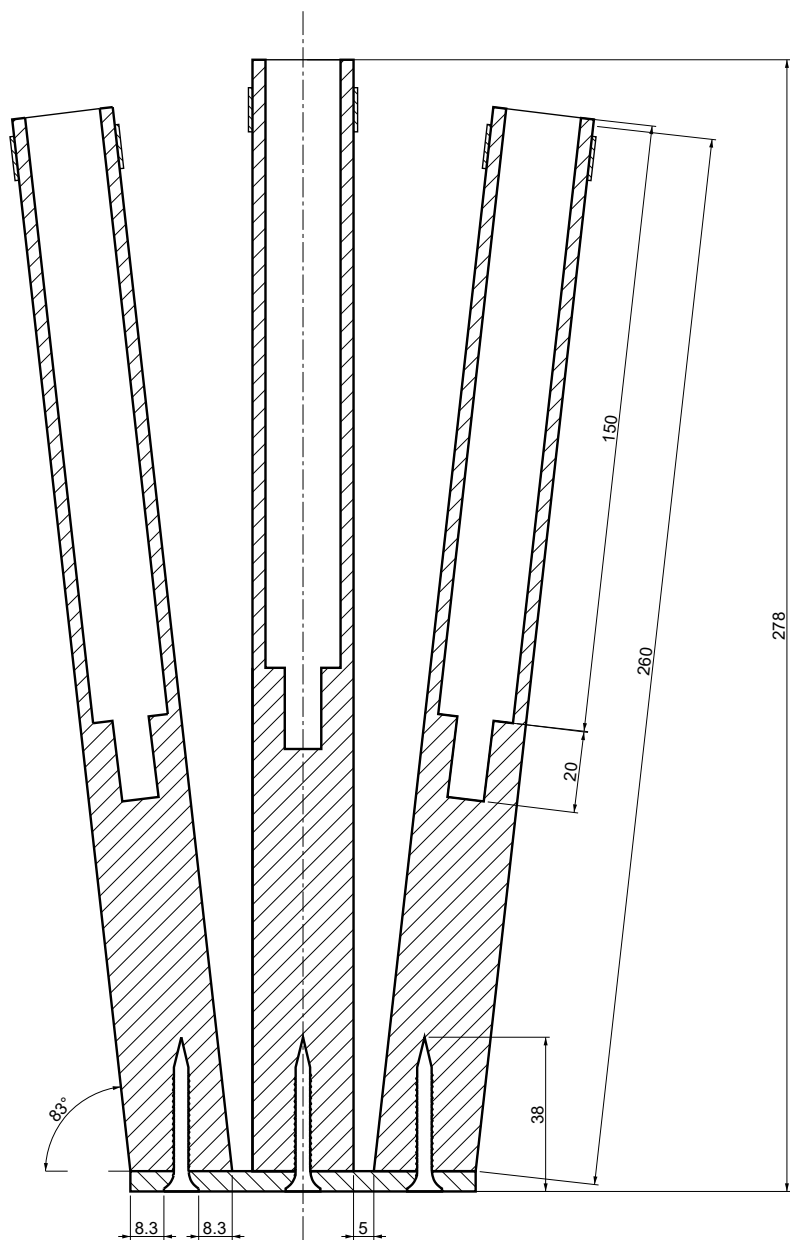
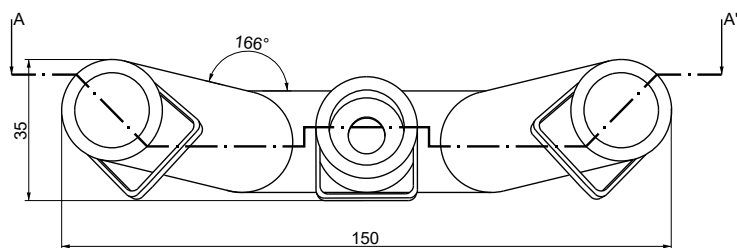


Tavola N.1 Assieme Struttura
Tavola non in scala
Tutte le misure sono espresse in millimetri



Sezione A-A'

Tavola N.2a Sottoassieme Aggancio
 Tavola non in scala
 Tutte le misure sono espresse in millimetri

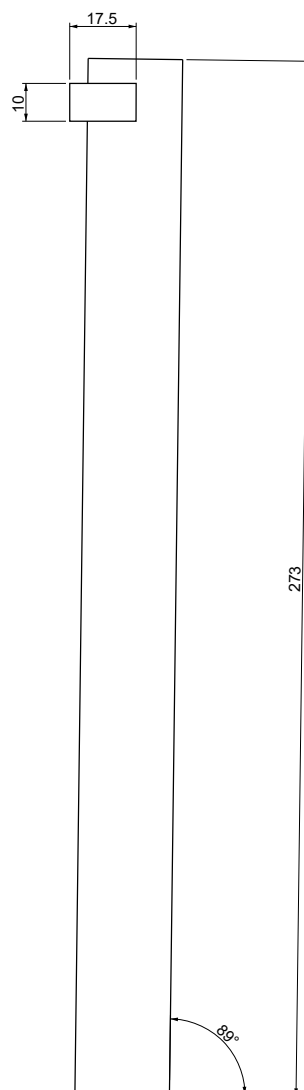
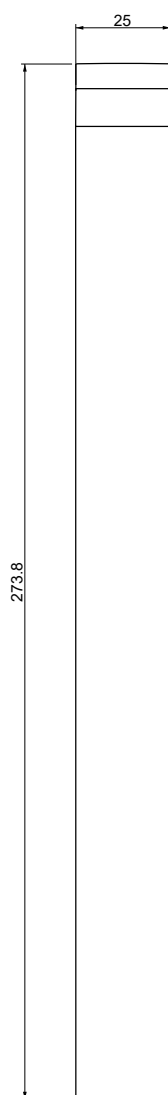
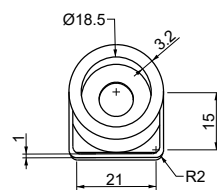


Tavola N.2b Sottoassieme tubolare centrale
Tavola in scala 1:2
Tutte le misure sono espresse in millimetri

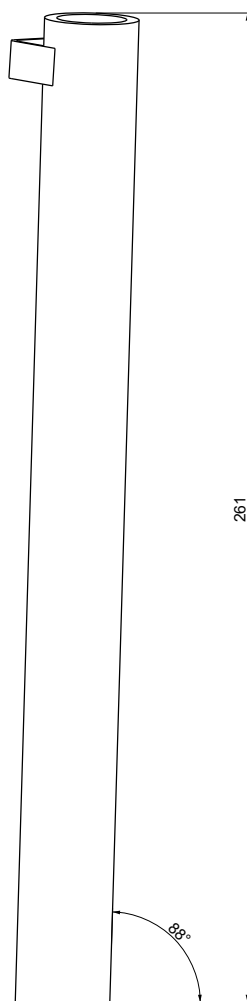
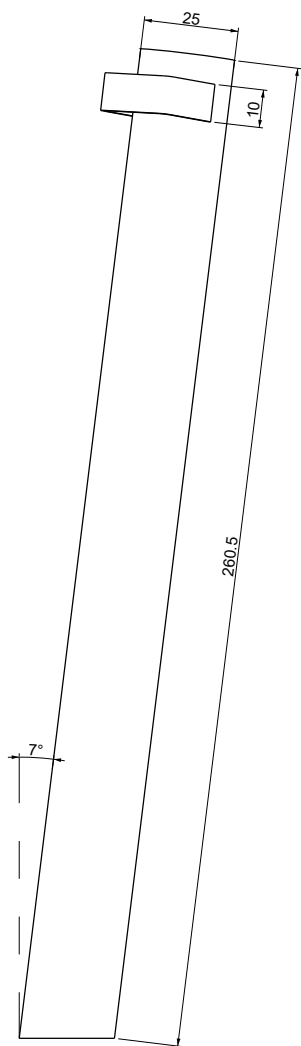
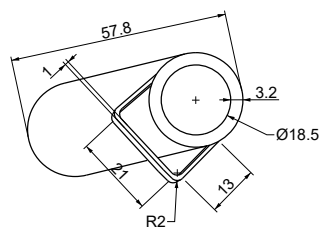


Tavola N.2c Sottoassieme tubolare destro
Tavola in scala 1:2
Tutte le misure sono espresse in millimetri

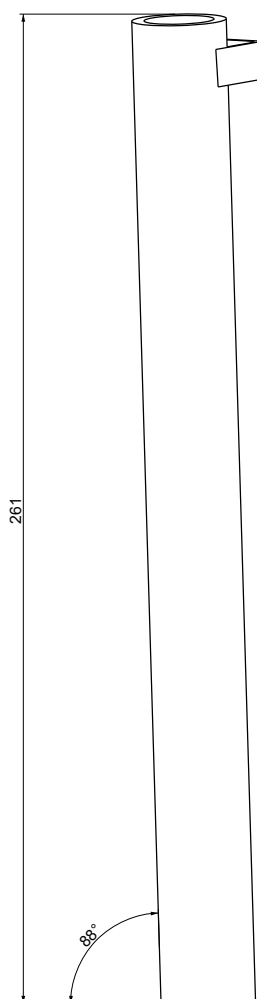
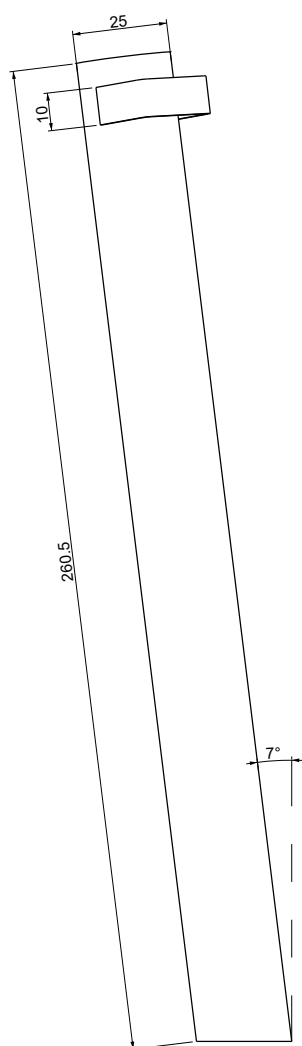
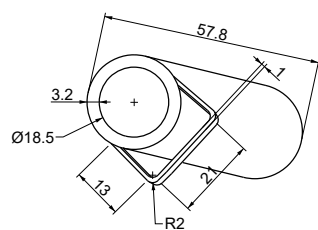


Tavola N.2d Sottoassieme tubolare sinistro
Tavola in scala 1:2
Tutte le misure sono espresse in millimetri

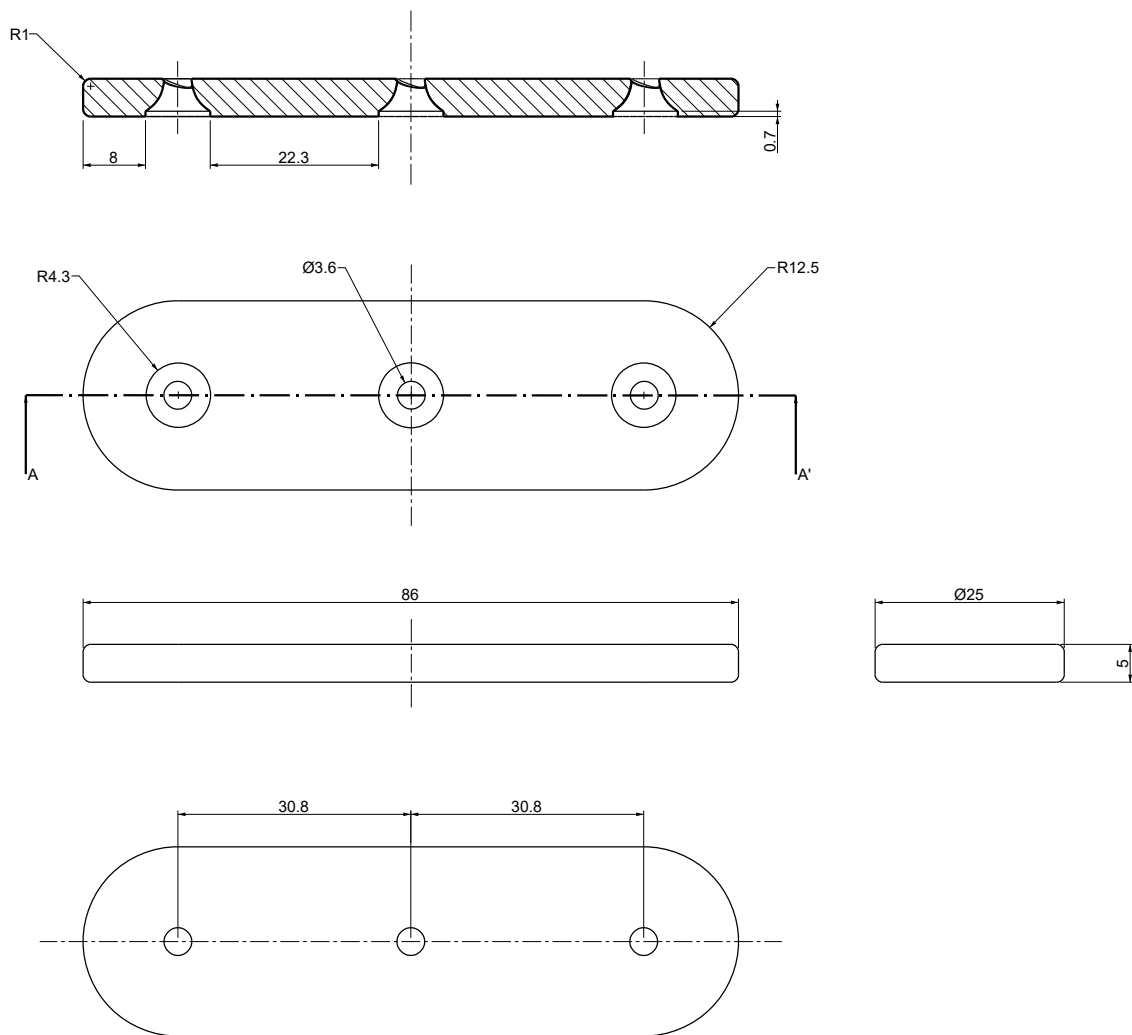
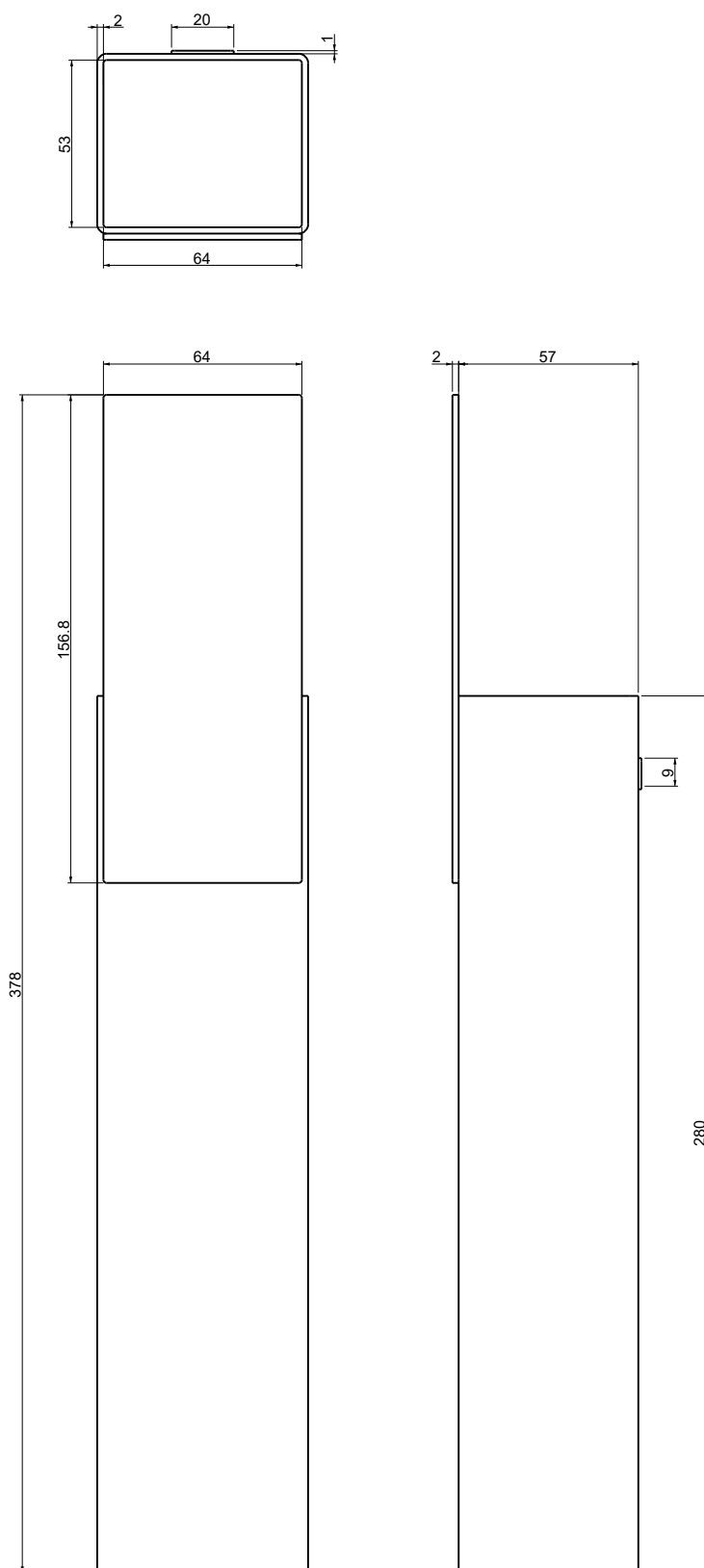
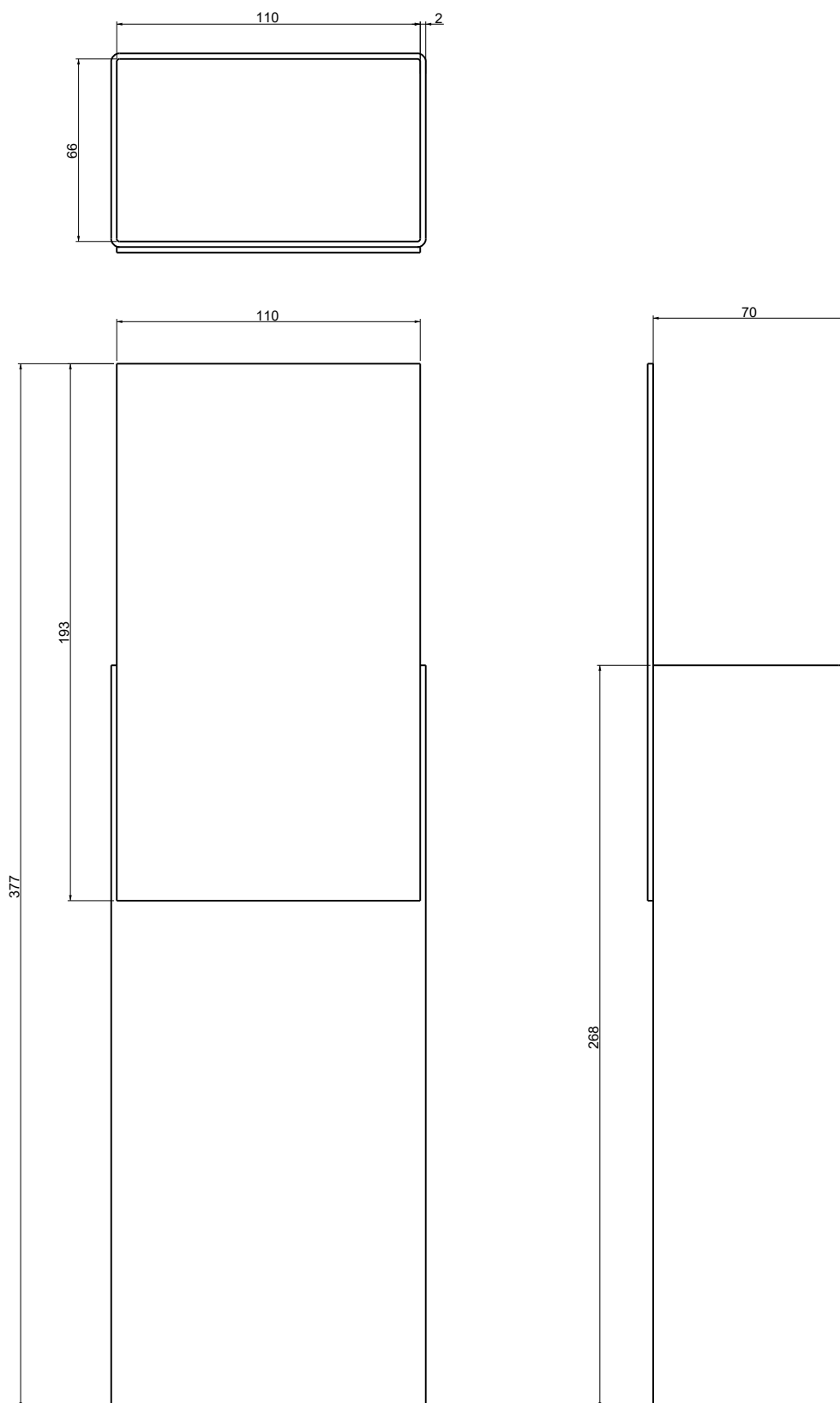


Tavola N.2e Sottoassieme piastra
Tavola in scala 1:1
Tutte le misure sono espresse in millimetri



*Tavola N.3 Assieme custodia tubolari centrali
Tavola non in scala
Tutte le misure sono espresse in millimetri*



*Tavola N.4 Assieme custodia tubolari laterali
Tavola non in scala
Tutte le misure sono espresse in millimetri*

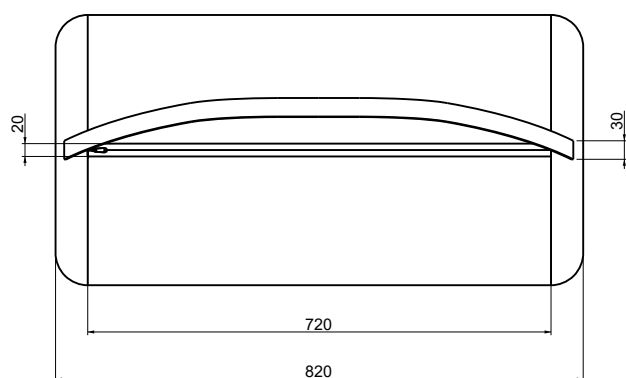
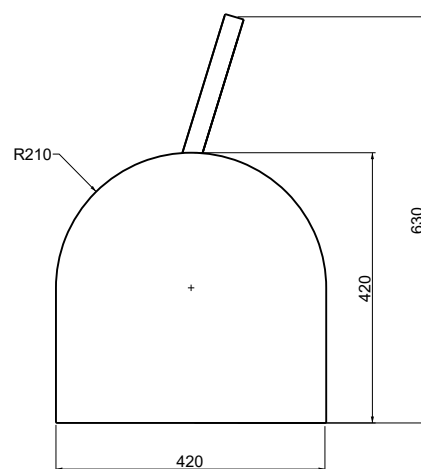
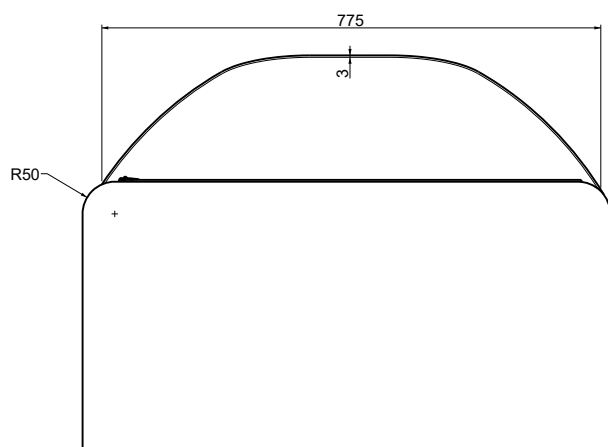


Tavola N.5 Assieme Borsa
Tavola non in scala
Tutte le misure sono espresse in millimetri

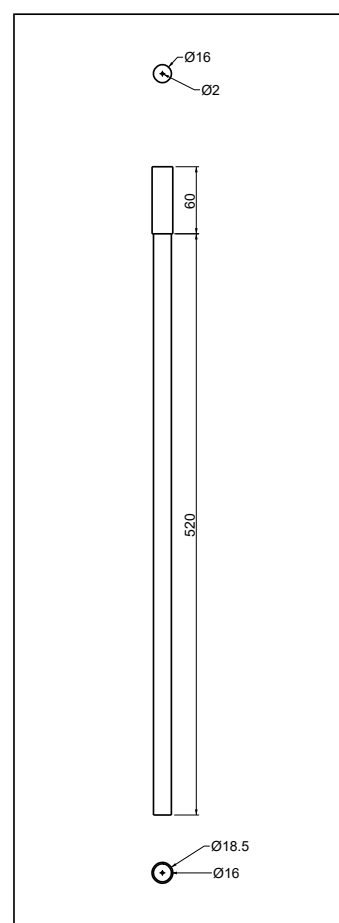
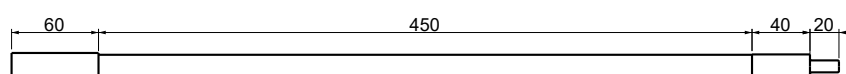
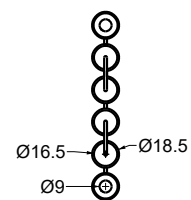
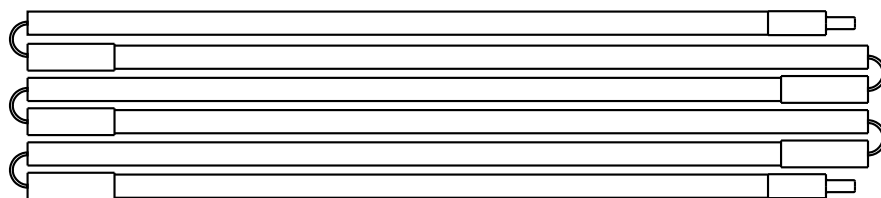


Tavola N.6 Assieme aste flessibili
Tavola non in scala
Tutte le misure sono espresse in millimetri

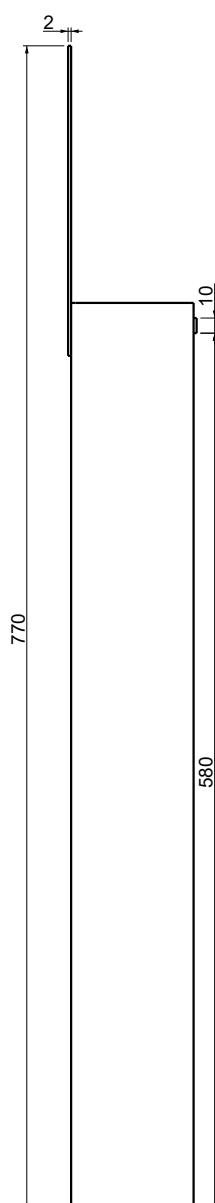
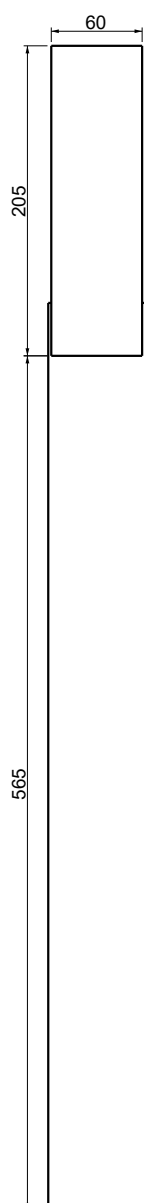
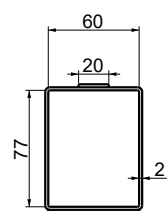


Tavola N.7 Assieme Custodia aste laterali
 Tavola in scala 1:5
 Tutte le misure sono espresse in millimetri

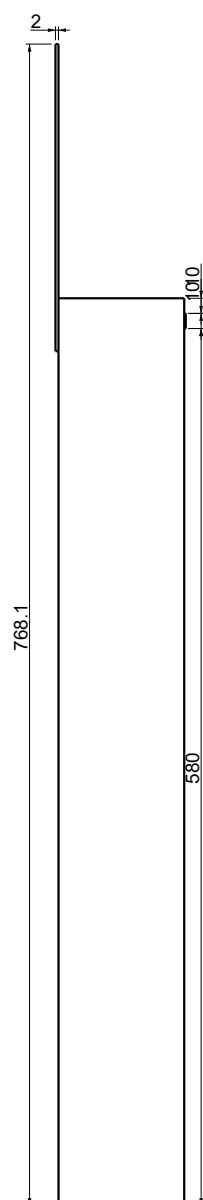
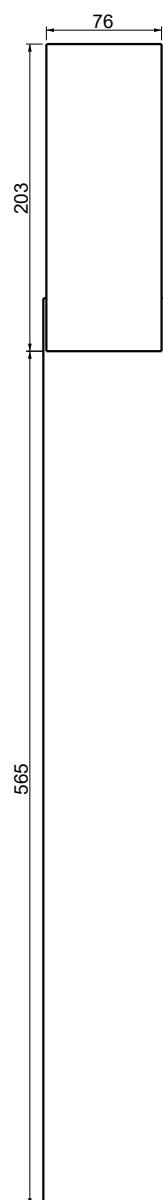
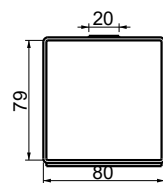
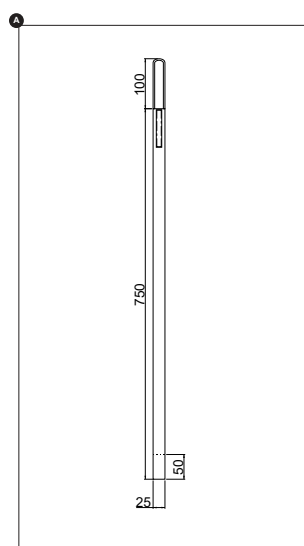
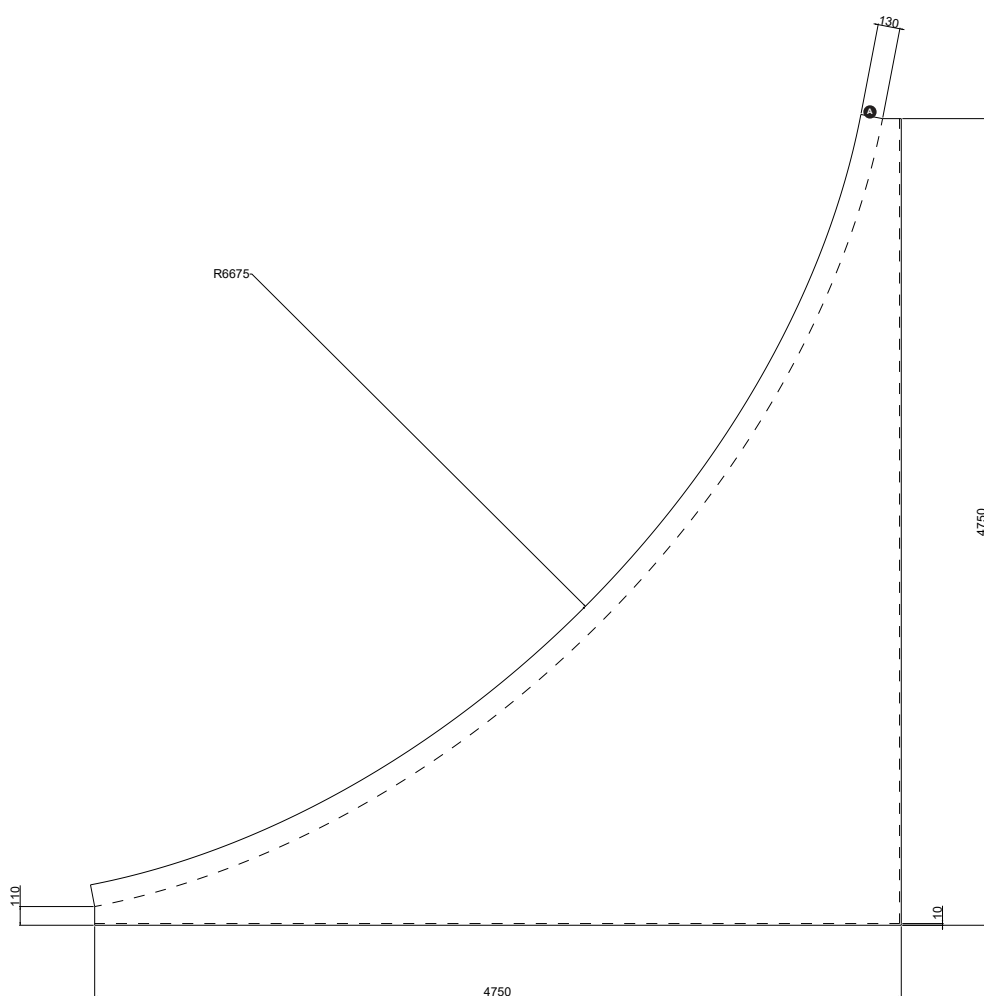
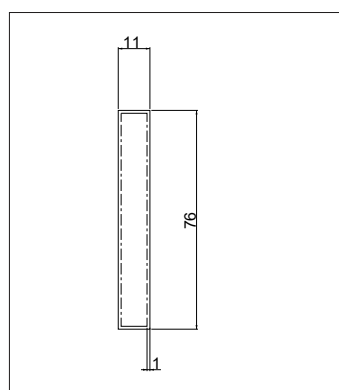


Tavola N.8 Assieme Custodia aste trasversali
Tavola in scala 1:5
Tutte le misure sono espresse in millimetri



Dettaglio cinghia nylon



Dettaglio cucitura velcro



Tavola N.9 Cartamodello telo
Tavola non in scala
Tutte le misure sono espresse in millimetri

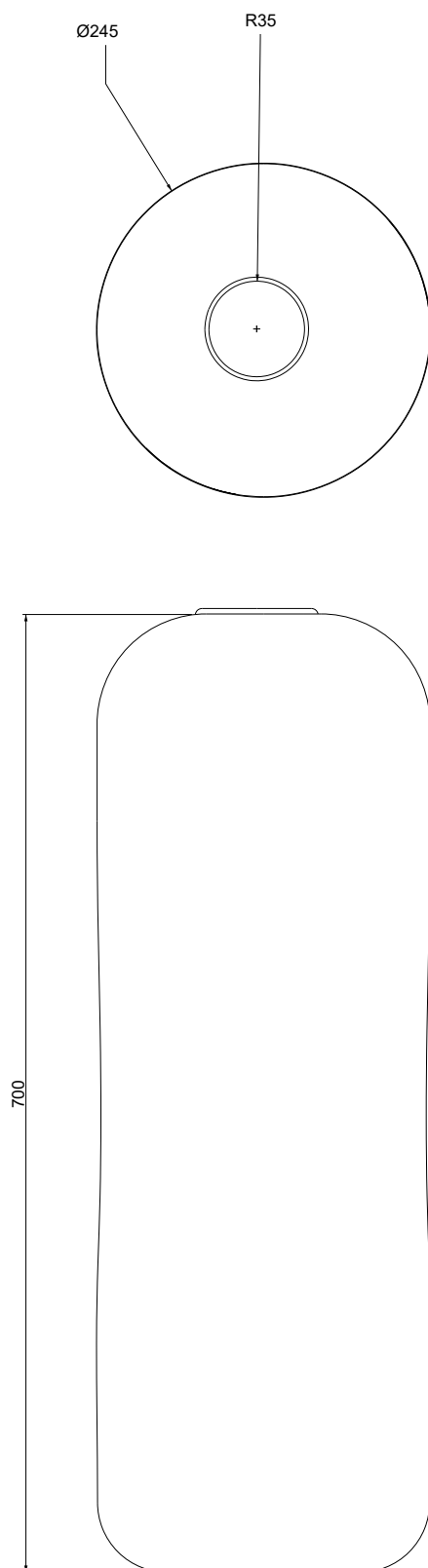


Tavola N.10 Assieme sacca Telo
Tavola non in scala
Tutte le misure sono espresse in millimetri

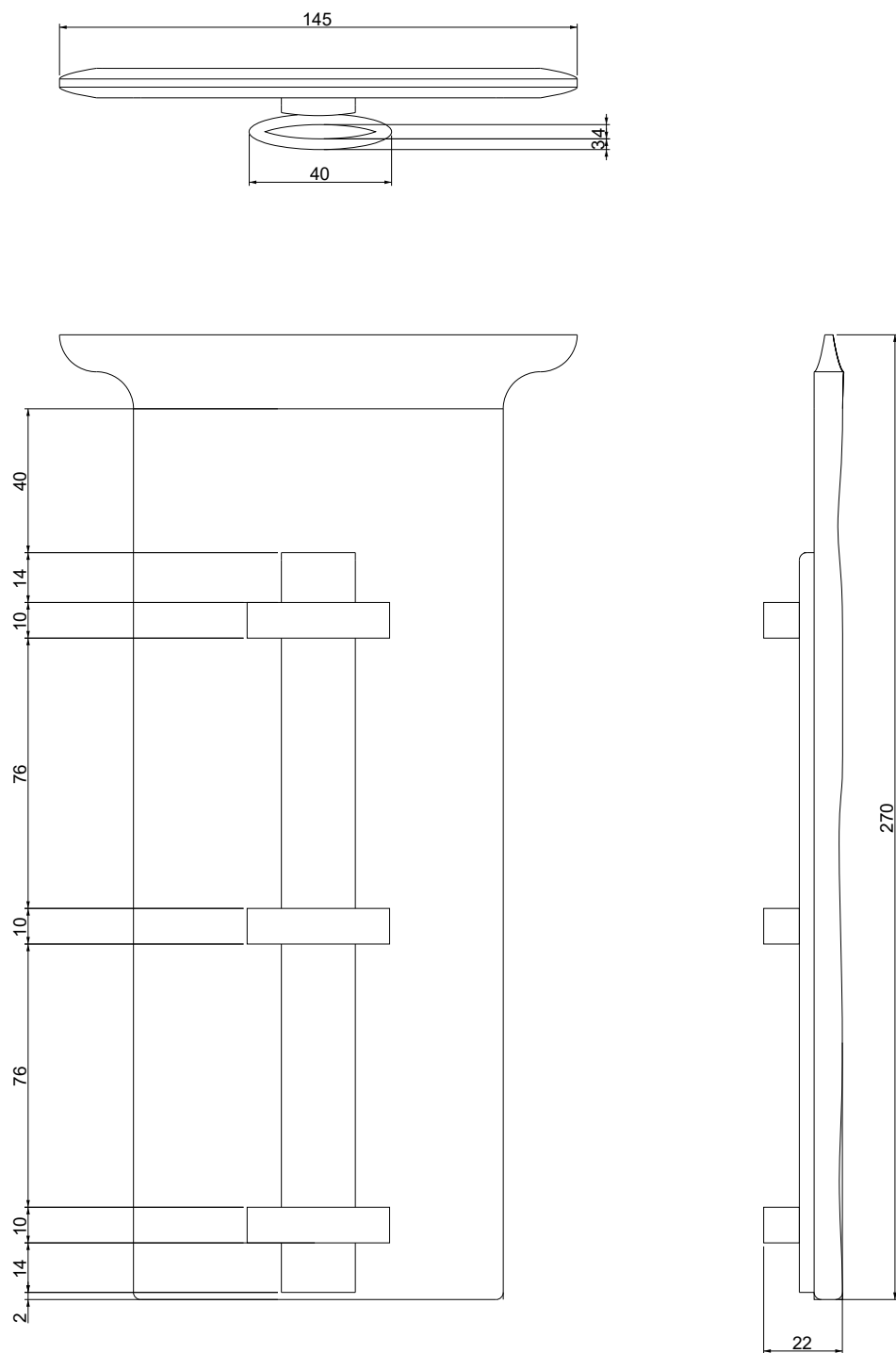


Tavola N.11 Assieme zavorre
Tavola in scala 1:2
Tutte le misure sono espresse in millimetri

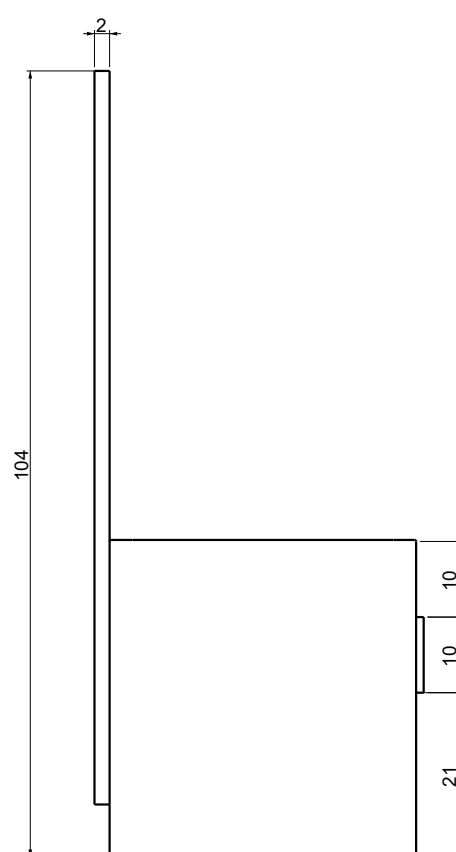
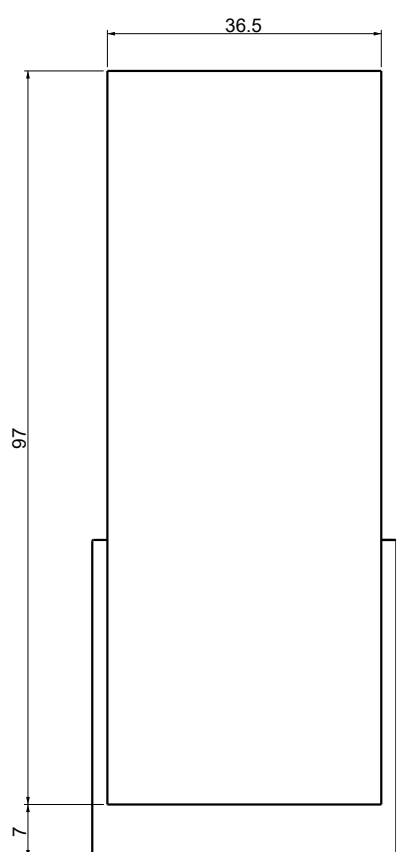
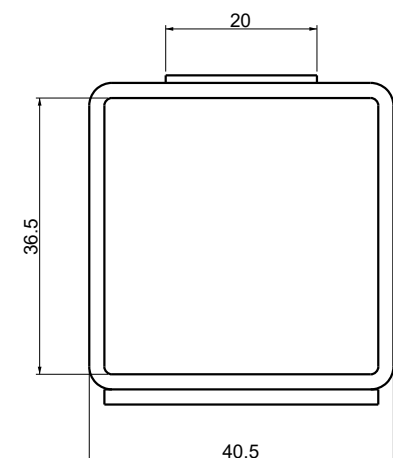


Tavola N.11 Assieme custodia viti
Tavola in scala 1:1
Tutte le misure sono espresse in millimetri





Immaginografia

Introduzione

Immagine 1 < <https://www.cosedicasa.com/> >

Capitolo 1

Immagine 2 < <https://aorillasdeltamesis.com/> >
Immagine 3 < <https://www.artesvelata.it/> >
Immagine 4 < <https://www.artesvelata.it/> >
Immagine 5 < <https://www.grm.com.es/> >
Immagine 6 < <https://www.grm.com.es/> >
Immagine 7 < <https://www.teknoring.com/> >
Immagine 8 < <https://www.flickr.com/> >
Immagine 9 < <https://www.brightfestival.com/> >
Immagine 10 < <https://www.geopop.it/> >
Immagine 11 < aulascienze.scuola.zanichelli.it/ >
Immagine 12 < <https://www.english-heritage.org.uk/> >
Immagine 13 < <https://www.domusweb.it/> >
Immagine 14 < <https://victorianweb.org/> >
Immagine 15 < <https://storiaglocale.com/> >
Immagine 16 < <https://www.dazeroacamping.it/> >
Immagine 17 < <https://www.yesmilano.it/> >
Immagine 18 < <https://www.meisterdrucke.it/> >
Immagine 19 < <https://www.meisterdrucke.it/> >
Immagine 20 < <https://unsplash.com/> >
Immagine 21 < <https://upload.wikimedia.org/> >
Immagine 22 < <https://www.nemolighting.com/> >
Immagine 23 < <https://medium.com/> >
Immagine 24 < <https://www.domusweb.it/> >
Immagine 25 < <https://de-academic.com/> >
Immagine 26 < <https://www.teknoring.com/> >
Immagine 27 < <https://www.teknoring.com/> >
Immagine 28 < <https://www.teknoring.com/> >
Immagine 29 < <https://leultimedahenryzilio.wordpress.com/> >
Immagine 30 < <http://www.organiconcrete.com/> >
Immagine 31 < <https://www.architecturalrecord.com/> >
Immagine 32 < <https://shigerubanarchitects.com/> >
Immagine 33 < <https://www.nasa.gov/> >
Immagine 34 < <https://www.nasa.gov/> >

Capitolo 2

Immagine 35 < <https://sprech.com/> >
Immagine 36 < <https://www.noleggiotensostrutturerasoira.it/> >
Immagine 37 < <https://www.macotechnology.com/> >
Immagine 38 < <https://tenso-estructuras.com/> >
Immagine 39 < <https://parametrichouse.com/> >
Immagine 40 < <https://luckytech.in/> >
Immagine 41 < <https://www.macotechnology.com/> >
Immagine 42 < <https://www.macotechnology.com/> >
Immagine 43 < <https://www.macotechnology.com/> >
Immagine 44 < <https://www.macotechnology.com/> >
Immagine 45 < <https://parametrichouse.com/> >

Immagine 46 < <https://www.irma-stand.com/> >
Immagine 47 < <https://www.metaltecnica.it/> >
Immagine 48 < <https://luxtent.it/> >
Immagine 49 < <https://www.dlubal.com/> >
Immagine 50 < <https://www.macotechnology.com/> >
Immagine 51 < <https://www.macotechnology.com/> >
Immagine 52 < <http://www.girofil.it/> >
Immagine 53 < <https://www.texcene.com> >
Immagine 54 < <https://www.texcene.com> >
Immagine 55 < <https://www.zparrow.it/> >
Immagine 56 < <https://shop.ctmeca.com/> >
Immagine 57 < <https://www.rispsrl.it/> >
Immagine 58 < <https://www.modulor.de/> >
Immagine 59 < <https://www.infobuild.it/> >
Immagine 60 < <https://www.santinifuni.com/> >
Immagine 61 < <https://www.ebay.it/> >
Immagine 62 < <https://www.trafilspec.it/> >
Immagine 63 < <https://www.eurofuni.com/> >
Immagine 64 < <https://www.tutorcasa.it/> >
Immagine 65 < <https://www.macotechnology.com/> >
Immagine 66 < <https://www.vinciecampagna.it/> >
Immagine 67 < <https://www.macotechnology.com/> >
Immagine 68 < <https://www.bdir.com/> >
Immagine 69 < <https://www.ferrino.it/> >
Immagine 70 < <https://italian.alibaba.com/> >
Immagine 71 < <https://it.aliexpress.com/> >
Immagine 72 < <https://www.amazon.it/> >
Immagine 73 < <http://www.tensegrityinbiology.co.uk/> >
Immagine 74 < <https://leganerd.com/> >
Immagine 75 < <http://acadia.org/> >

Capitolo 3

Immagine 76 < <https://kr.pinterest.com/> >
Immagine 77 < <https://www.archdaily.com/> >
Immagine 78 < <https://www.ynu.ac.jp/> >
Immagine 79 < tesi di Laura Veccia >
Immagine 80 < <https://www.macotechnology.com/> >
Immagine 81 < <https://www.macotechnology.com/> >
Immagine 82 < <https://www.cpvpc.it/> >
Immagine 83 < <https://www.ferrino.it/> >
Immagine 84 < <https://it.chinese-fabrics.com/> >
Immagine 85 < <https://www.ferrino.it/> >

Capitolo 4

Immagine 86 < <https://www.autoscout24.it/> >
Immagine 87 < <https://www.amazon.it/> >
Immagine 88 < <https://www.bertonitende.it/> >
Immagine 89 < <https://lasportiva.tn.it/> >
Immagine 90 < <https://www.ferrino.it/> >
Immagine 91 < <https://it.wikipedia.org/> >
Immagine 92 < <https://tensegritywiki.com/> >
Immagine 93 < <https://www.trefil.it/> >

Immagine 94 < <https://www.weerg.com/> >
Immagine 95 < <https://it.wikipedia.org/> >
Immagine 96 < <https://www.officinemeccanichefeletti.com/> >
Immagine 97 < <https://www.roclam.com/> >
Immagine 98 < <https://www.incisman.com/> >
Immagine 99 < <https://italian.alibaba.com/> >
Immagine 100 < https://www.youtube.com/@Waterwind_it >
Immagine 101 < <https://www.decathlon.it/> >
Immagine 102 < <https://www.amazon.it/> >
Immagine 103 < <https://www.amazon.it/> >
Immagine 104 < <https://www.secret-times.it/> >
Immagine 105 < <https://www.incisman.com/> >
Immagine 106 < <https://www.amazon.it/> >
Immagine 107 < <https://www.amazon.it/> >
Immagine 108 < <https://www.vestilanatura.it/> >
Immagine 109 < <https://it.pkfiresleeve.com/> >
Immagine 110 < <https://www.decathlon.it/> >

Sitografia

<https://www.sel.it/it/progetti-eventi-sportivi>
<https://www.macotechnology.com/news/hospitality-ferrari-f1/>
<https://www.enricofulgenziracing.com/it/contatti.html>
<https://it.las-motorsport.com/f1/notizie/paddock-in-formula-1-cose-e-come-funziona/13217/>
https://www.motosprint.it/news/motomondiale/moto-gp/2023/08/11-6592231/il_mondo_delle_hospitality_spiegato_dall_interno_vincent_moretti_e_truckinbox
<https://f1ingenerale.com/f1/f1-la-logistica-della-formula-1-la-corsa-dietro-le-quinte/>
<https://www.amarantoidea.com/tensostruttura-o-tendostruttura/>
https://www.cseurofiere.it/tensostrutture-per-logistica-e-coperture-industriali/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=noleggio_tensostrutture_industriali&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA-p4O8BhAkEiwAqv2UqHOnQ_WH5YIVhqn0POi1m6_wUUvucLFg1H3AyvCF_RjCqRfar_fkRoCJqcQAvD_BwE
<https://it.wikipedia.org/wiki/Tensostruttura>
https://www.pro-tent.com/it-it/settori-dutilizzo/gazebo-pieghevole-per-eventi/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAp4O8BhAkEiwAqv2UqA6IAkV9KutbkIsw08PhFIBvCc-aWtb9asB3ubOqFsr9NER1sIIIn-RoCZmgQAvD_BwE
<https://ilgiornaledellarchitettura.com/2019/12/17/vladimir-shukhov-mirabolante-ingegnere-delle-reti/>
https://it.wikipedia.org/wiki/Fiera_di_Ni%C5%BEnij_Novgorod
<https://www.giovanimoncalieri.it/storie%20di%20ingegneria/shukhov.pdf>
https://www.archiportale.com/news/2022/10/eventi/technoscape.-l-architettura-dell-ingegneria_90761_32.html
<https://shigerubanarchitects.com/>
https://it.wikipedia.org/wiki/L%27Aquila_Temporary_Concert_Hall
<https://www.esamedistatoarchitetto.com/tensostruttura/>
<https://www.designboom.com/architecture/ca-coelacanth-and-associates-moom-tensegritic-membrane-structure/>
<https://www.gioiellidelbosco.com/>
<https://www.architetturaecosostenibile.it/>
<https://www.artscentremelbourne.com.au/visit/theatres-and-spaces/sidney-myer-music-bowl>
<https://docomomoaustralia.com.au/sidney-myer-music-bowl/>
<https://www.canobbio.com/tensostrutture-per-stadi-innovazione-che-trasforma-architettura-sportiva/>
<https://blog.casanoi.it/frei-otto-architetto-delle-tensostrutture/>
<https://blog.casanoi.it/frei-otto-architetto-delle-tensostrutture/>
<https://www.ellededecor.com/it/architettura/a46953331/frei-otto-architetto-rivoluzionato-architettura-osservando-bolle-sapone/>
<https://fattoadarte.corriere.it/2015/03/14/frei-otto-architetto-delle-vele/>
<https://arte.sky.it/archivio/2015/03/architettura-tensostrutture-coperture-frei-otto-foto-pritzker-prize-2015>
<https://it.wikipedia.org/wiki/Tensegrit%C3%A0>
<http://kennethsnelson.net/>
http://kennethsnelson.net/Tensegrity_and_Weaving.pdf
<https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/DN10/DN10005FU1.pdf>
<https://creso.academy/tensegrita-magia-dellicosaedro-e-del-microvacuolo-in-osteopatia/#:~:text=Il%20nostro%20corpo%20possiede%20una,adattamento%20meccanico%20favorisce%20il%20movimento.>
<https://www.osteolab.net/tensegrita-applicata-al-corpo-umano/>
<https://www.treccani.it/enciclopedia/olismo/>
<file:///C:/Users/aless/Downloads/Tesi%20di%20dottorato%20Pavone.pdf>
<https://www.domusweb.it/it/progettisti/richard-buckminster-fuller.html>
<https://www.munart.org/index.php?p=11>
<https://www.archdaily.com/877938/this-adjustable-tensegrity-structure-is-constructed-from-just-two-structural-elements>
<https://vcg.isti.cnr.it/activities/tensegrity/>
https://www.researchgate.net/publication/50838903_Controversial_Origins_of_Tensegrity

https://en.wikipedia.org/wiki/Kurilpa_Bridge
<https://www.centrepompidou.fr/en/ressources/personne/cAnpny7>
https://www.editions-hyx.com/sites/default/files/public/media/david_george_emmerich_2.pdf
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065215609430023>
<https://www.nasa.gov/image-article/super-ball-bot/>
<https://uclouvain.be/en/research-institutes/immc/gce/tensegrity-structures>
<https://www.metexa.it/tensostrutture-professionali/>
<https://www.tenotend.com/>
https://www.researchgate.net/publication/273059942_Tensegrity_Prototype_TG3
<https://www.strohboid.com/en/blog/pavillon>
<https://arxiv.org/abs/2106.08424>
<https://jkbrickworks.com/tensegrity-sculpture>
<https://www.expandmedia.com/en/expand-2000>
<https://www.stretchstructures.com/>
<https://infinityconst.com/en/portfolio/>
<https://www.rhitents.com/>
https://www.meroitaliana.it/it_IT/3/allestimenti/5/m12-system
<https://www.infobuild.it/>
<https://www.tensaform.com/>
https://www.meroitaliana.it/it_IT/3/allestimenti/11/stand-a-progetto
<https://www.ferrino.it>
<https://kongline.it/>
<https://www.pro-tent.com/>
<https://www.ecotent-gazebo.it/>
<https://www.gazeboraybot.it/>
<https://www.leroymerlin.it/>
<https://www.tendapro.it/>
<https://it.wikipedia.org/wiki/Gazebo>
<https://www.giuliobarbieri.it/>
<https://www.madelux.it/>
<https://www.giuliobarbieri.it/>

Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia più sincera gratitudine al Prof. Andrea Lupacchini per la sua disponibilità, competenza e guida preziosa durante il percorso di stesura di questa tesi. Il suo supporto costante e la sua capacità di proporre soluzioni innovative e radicali hanno rappresentato un elemento fondamentale per il successo di questo lavoro. La sua passione per la ricerca e la sua capacità di stimolare il pensiero critico sono stati per me una fonte di grande ispirazione.

Colgo inoltre l'occasione per ringraziare tutti i docenti che ho avuto il piacere di incontrare durante questi tre anni. Ognuno di loro ha contribuito alla mia crescita accademica e personale, trasmettendomi conoscenze, competenze e, soprattutto passione.

Grazie di cuore per aver reso questo percorso così significativo.