



Corso di Laurea in
Disegno Industriale
e Ambientale
A.A. 2020/2021

Relatore

Prof. Alessandro Zona

Correlatore

Prof. Jacopo Mascitti

Laureanda

Laura Veccia

A large, complex tensegrity structure made of thin rods and cables, forming a series of interconnected triangles and quadrilaterals. The structure is rendered in a light gray color against a dark gray background. It consists of several vertical and diagonal rods connected by a network of cables, creating a stable, three-dimensional geometric form.

Tensegrity: 60 anni di esperienze e prospettive per il Design



Corso di Laurea in
Disegno Industriale
e Ambientale
A.A. 2020/2021

Relatore
Prof. Alessandro Zona

Correlatore
Prof. Jacopo Mascitti

Laureanda
Laura Veccia

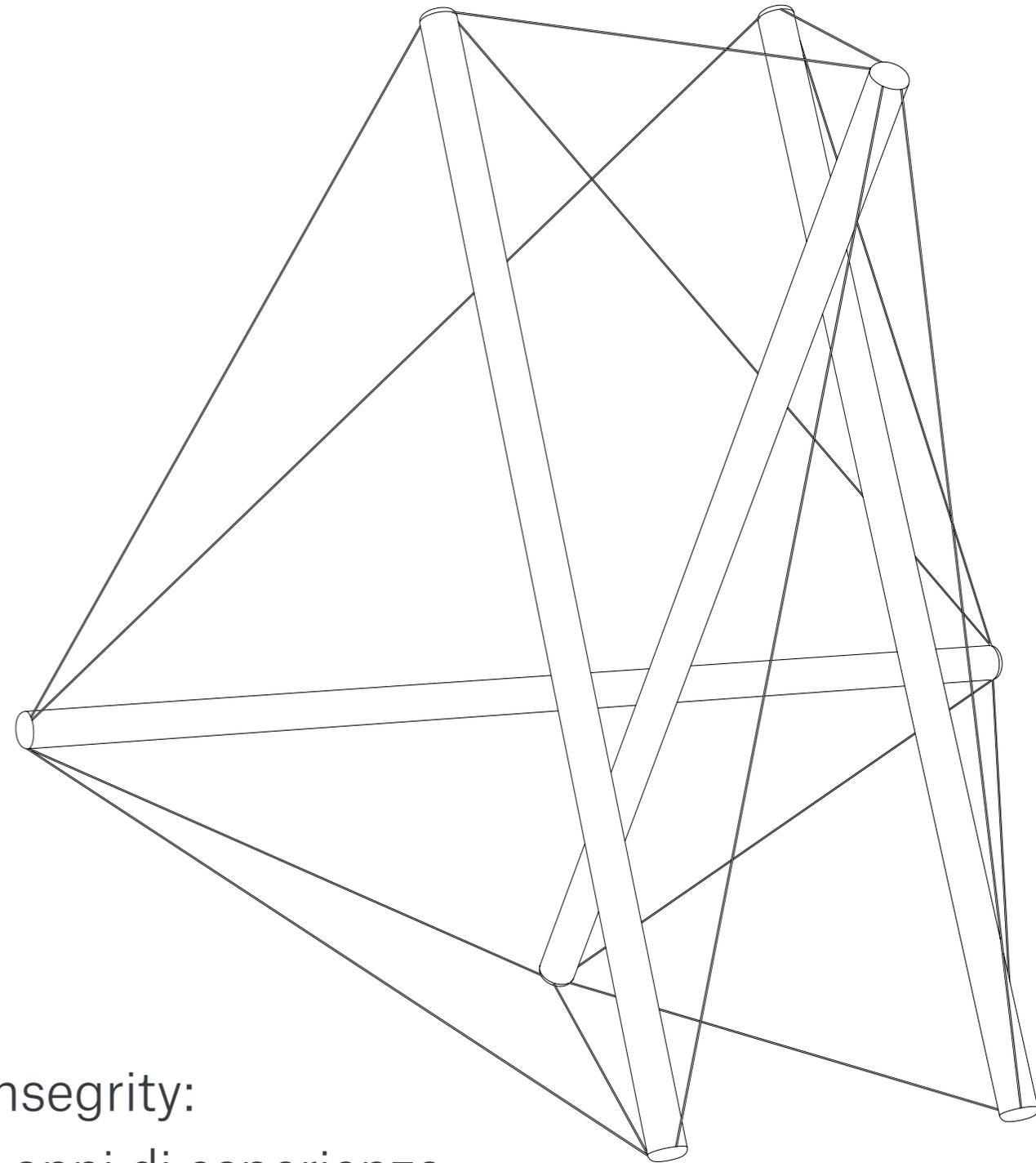


Tensegrity: 60 anni di esperienze e prospettive per il Design

*A mio padre,
la mia stella più bella.*

*"Cerco di non pensarci.
cerco di non pensarti".*

*Accade.
Raramente.*



Tensegrity:
60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

/ Ringraziamenti

Questa è la parte più difficile di tutto il lavoro.
Parole e sensazioni da riordinare a cui dare un senso compiuto.

Ringrazio innanzitutto il mio Relatore, Prof. Alessandro Zona e il mio Correlatore, Prof. Jacopo Mascitti per aver accettato la mia proposta di tesi. Persone squisite e docenti di grande professionalità e competenza. Sempre disponibili, pazienti, diretti e chiari, di grande aiuto, sostegno e insegnamento durante questi mesi di lavoro alla tesi. Sono sinceramente felice e onorata di aver avuto la possibilità di condividere questa esperienza con loro.

Da qui in poi l'elenco dei ringraziamenti si estende praticamente a tutti i tre anni universitari, ai docenti tutti.

Ai colleghi di corso i quali, nonostante il gap generazionale, non mi hanno mai fatta sentire fuori contesto.
Ragazze e ragazzi splendidi con i quali confrontarsi, studiare, condividere gioie e dolori di questo viaggio. Di loro conserverò con affetto molti volti, voci, messaggi whatsapp, consigli, incontri, scelte, errori.

Ai miei figli, Valeria e Andrea che mi hanno sempre incoraggiata e ai quali spero di non aver sottratto troppo il mio tempo per essermi rimessa in gioco. Al mio compagno di vita, ormai da una vita, Domenico, sempre pronto a tendermi una mano per aiutarmi nella preparazione degli esami, sostenendomi in questa scelta e incoraggiandomi senza riserve ad andare avanti.

Ai miei colleghi di squadra del Settore Urbanistica della Provincia, i quali hanno sopportato le mie ansie, riservato consigli e consolato le mie lagne pre-esame.

Infine un pensiero agli affetti più preziosi che avevo e che ho perso durante questo percorso. Grazie al vostro esempio ho imparato che gli anni non sono un limite, c'è sempre tempo per imparare cose nuove e rinnovarsi.



Corso di Laurea in
Disegno Industriale
e Ambientale

A.A. 2020/2021

Relatore

Prof. Alessandro Zona

Correlatore

Prof. Jacopo Mascitti

Laureanda

Laura Veccia

matr. 106210

Stampa Tipografia Adverso - Ascoli Piceno - Maggio 2022

font Atlas Grotesk

Disegnato da Kai Bernau, Susana Carvalho e Christian Schwartz.

Rilasciato nel 2012. Il design è stato ispirato dai sans-serif degli anni '50, in particolare Mercator (noto come "Helvetica olandese").

/ Indice

Premessa	1
00/ Introduzione	6
/ Fare leggero	10
/ Fare resistente	14
/ Tensione	18
/ In-stabilità	26
01/ Cos'è la tensegrità	30
/ 01.1 La tensegrità in natura	34
/ 01.2 La tensegrità nell'arte	47
/ 01.3 La tensegrità in ingegneria, architettura, design: analisi delle applicazioni	56
Sperimentare con la tensegrità: il contest Lego	98
02/ Evoluzione storica	102
/ 02.1 Sistemi proto-tensegrali	105
/ 02.2 Sistemi tensegrali	110
/ 02.3 Sviluppi e brevetti	116

03/	Proprietà e caratteristiche	130
/ 03.1	Definizioni scientifiche	132
/ 03.2	Classificazioni e tipologie	140
	/03.2.1 Identificazione dei sistemi tensegrali	146
	/03.2.2 Nomenclatura delle strutture tensegrali	151
	Esempio di applicazione: Torre Rostock	162
/ 03.3	Concetto strutturale	166
	/03.3.1 Meccanismi infinitesimi	170
	/03.3.2 Non linearità delle strutture tensegrali	172

04/	Generazione di geometrie tensegrali	178
/ 04.1	Form finding	180
/ 04.2	Modellazione algoritmica	183
/ 04.3	Modelli tensegrali	193

05/	Stato della ricerca	202
/ 05.1	Sperimentazioni e ulteriori sviluppi	204
	/ Conclusioni	218
	/ Glossario	226
	/ Bibliografia e sitografia	232

Premessa

Tra le “città invisibili” di Italo Calvino c’è la città ragnatela, Ottavia.

Sospesa sul vuoto tra due montagne scoscese, legata alle creste solo con funi, catene, passerelle.

Si cammina su traversine di legno, badando a non precipitare nel burrone sottostante, aggrappati a maglie di canapa; al di sotto di quelle traversine non c’è altro che vuoto per centinaia e centinaia di metri. Nonostante ad Ottavia la vita sia fisicamente sospesa su un abisso, Calvino la ritiene meno incerta che in altre città, poiché i suoi abitanti sono consapevoli che la rete che li sostiene più di tanto non può reggere: essi infatti sperimentano concretamente la precarietà e si confrontano quotidianamente con i limiti del sistema che sostiene le loro vite.

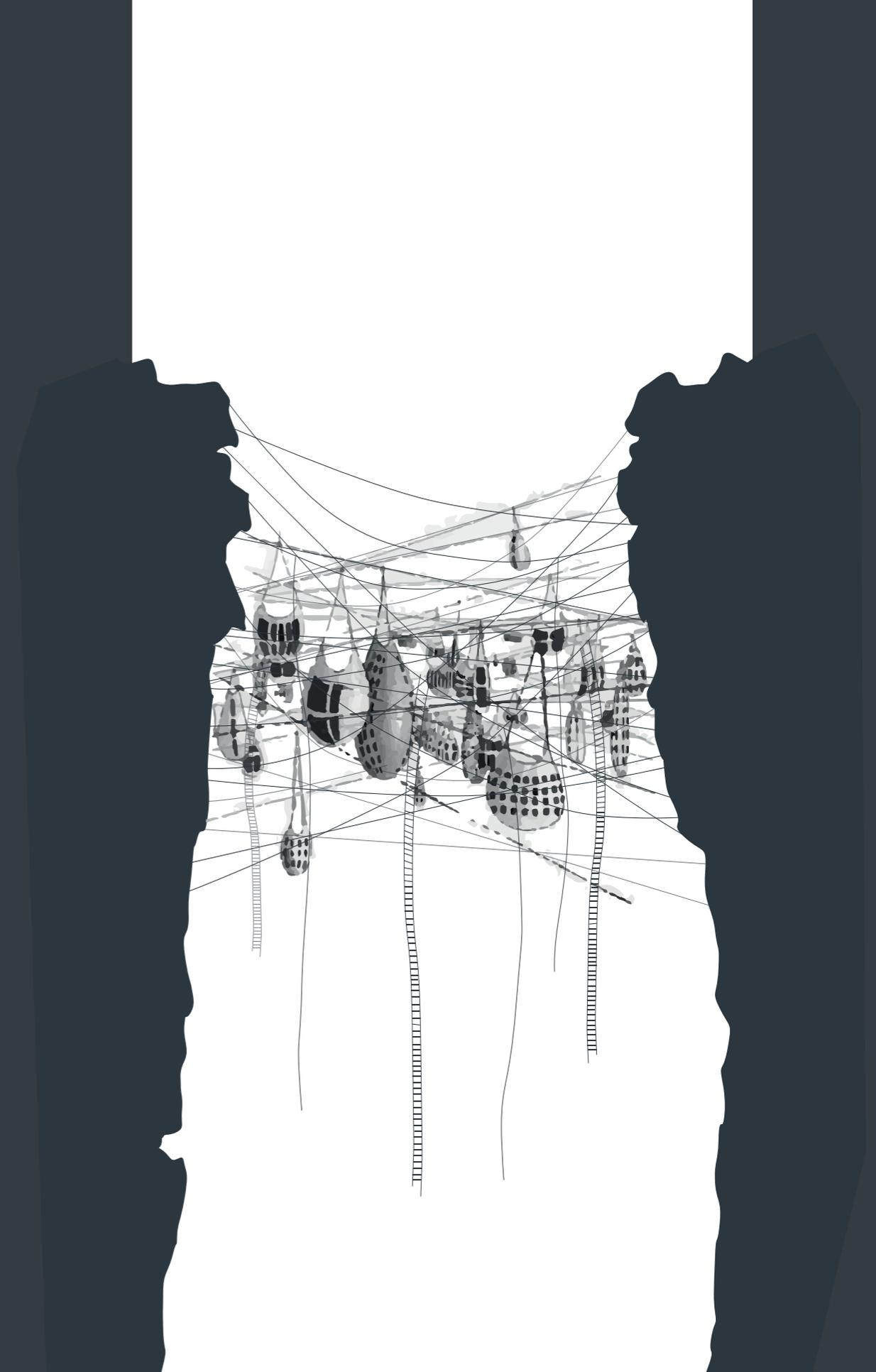
La rete di corde, metafora che richiama temi come la leggerezza e la sospensione, rappresenta più di tutto la fragilità come condizione universale della vita umana, fondamenta delle nostre esistenze.

Spesso viviamo con l’illusione di possedere certezze invulnerabili, delle quali arriviamo a percepire i limiti solo quando di colpo tutto sembra crollarci addosso.

Tensegrità

Come Ottavia, è sinonimo di un sistema strutturale composto da elementi discreti e continui che si auto sostiene per effetto di uno stato di tensione presente nel sistema stesso.

Una metafora della resistenza e la forza dell'insieme che sono date dalla reciproca unità di parti singolarmente instabili





Tensegrità e Design

L'attenzione verso questo campo non è casuale, a differenza dell'architettura dove questo tema è molto trattato e studiato grazie anche all'avvento delle tensostrutture, nel campo del design non ci sono riferimenti ampi, ed anche se le problematiche sulla riduzione di materiale impiegato (e conseguente uso di energia e dismissione) e lo sfruttare al meglio le proprietà dei materiali sono le stesse, pochi sono i prodotti e gli artefatti che utilizzano la tensione come metodologia progettuale.

La tensione è da sempre presente nella natura, da qui molti progettisti ne hanno preso spunto ma il design ne rimane spesso fuori. Eppure la piccola scala in cui il design andrebbe ad operare, a differenza dell'architettura, faciliterebbe la produzione e la conseguente distribuzione di questi artefatti. Probabilmente la motivazione si potrebbe ricondurre alla nostra cultura occidentale che, a differenza di quella orientale, dove la leggerezza è insita culturalmente, ci fa prediligere artefatti massicci che

rievocano sensazioni di qualità, sicurezza, stabilità e durabilità. Un codice linguistico profondamente radicato impone ancora tutt'oggi, l'"immagine del peso".

Ma in un periodo storico dove il tema della sostenibilità fa da protagonista, pensare alla tensione come metodo per poter ridurre la quantità di materiale impiegato senza, in nessun modo, interferire sulla funzione e la resistenza dell'artefatto, potrebbe suggerire una nuova soluzione.

Questo elaborato è incentrato sull'analisi degli aspetti di natura tipologica, formale, strutturale, costruttiva e funzionale, relativi alla progettazione ed alla sperimentazione di sistemi tensegrali da applicare al design.

In architettura è già stato dimostrato che una progettazione basata su tali sistemi può essere una valida proposta innovativa.

Le strutture tensegrali sono innanzitutto molto leggere, sono modulari e possono essere applicate anche nel campo di artefatti trasformabili o transitori.

È stato dimostrato che tali strutture garantiscono la minima massa strutturale per una varietà di condizioni di carico, che includono strutture soggette a carichi eccentrici, di compressione, di trazione di torsione, e strutture semplicemente

appoggiate, senza collasso per compressione o per instabilità.

Sono strutture che consentono trasformazioni di forma, ovvero nei sistemi che variano la loro forma da una configurazione compatta ad una configurazione di servizio espansa (es. sedute, elementi di sostegno o strutture rimovibili, come le tende).

Tali sistemi di solito sono costituiti da moduli elementari che possono essere uniti per formare strutture più complesse.

Il concetto di struttura tensegrale è stato studiato in diverse discipline come la biologia, l'ingegneria aerospaziale, la robotica.

L'obiettivo al quale punta la presente tesi è quello di esplorare e dare una essenziale conoscenza tecnica e scientifica per incoraggiare la scelta di sistemi strutturali tensegrali nel design come applicazione fattibile.

Vuole essere un contributo per la ricerca di metodologie e geometrie che assicurino prestazioni meccaniche, leggerezza strutturale e qualità estetica, capaci di garantire una concreta applicazione nel design anche per mezzo della progettazione parametrica.

“[...] Immaterialità significa leggerezza e non solo in senso fisico ma anche visivo, significa togliere alle cose il loro peso, farle diventare lievi, discrete. Progettare un oggetto leggero significa lavorare sul terreno della levità e della discrezione. La levità indica una qualità dell’oggetto, cioè la consistenza, la struttura resistente, la discrezione suggerisce la relazione con l’intorno. L’oggetto discreto sfugge alla logica dell’immagine, della semplice visibilità, non è vistoso, non si scopre di colpo, ma batte la strada della non invadenza, della miniaturizzazione. L’oggetto discreto, è tutt’altro che evanescente, è definito in tutti i suoi particolari come lo è un’ala di farfalla”.

(Alberto Meda - Ingegnere e designer)

Esistono aspetti che da sempre influiscono nel design e che sono stati spesso oggetto di riflessione durante questo personale percorso di studi, ovvero i rapporti tra materiale, funzione e forma.

Avvalendosi non solo di contributi interpretativi tecnici ma anche filosofici, non esistono posizioni e risposte univoche sulla questione se debba essere il materiale a determinare la forma, o se debba essere la forma a forzare o annullare le caratteristiche del materiale. Ancora più in generale, esistono dubbi e, a volte, posizioni assai contrastanti su quale relazione debba esserci tra funzione, forma e materiale di un prodotto. **Il punto di partenza dal quale si è sviluppato tutto il percorso di ricerca di questo elaborato di tesi è la riflessione su questi ambiti che legano per l'appunto forma, funzione e materiale:**

- **fare leggero** e la conseguente riduzione di materiale impiegato;
- **fare resistente**, contribuendo alla funzionalità della struttura;
- **la tensione**, ovvero la proprietà meccanica che lega il fare leggero e resistente;
- la relazione tra **instabilità visiva e stabilità effettiva**.

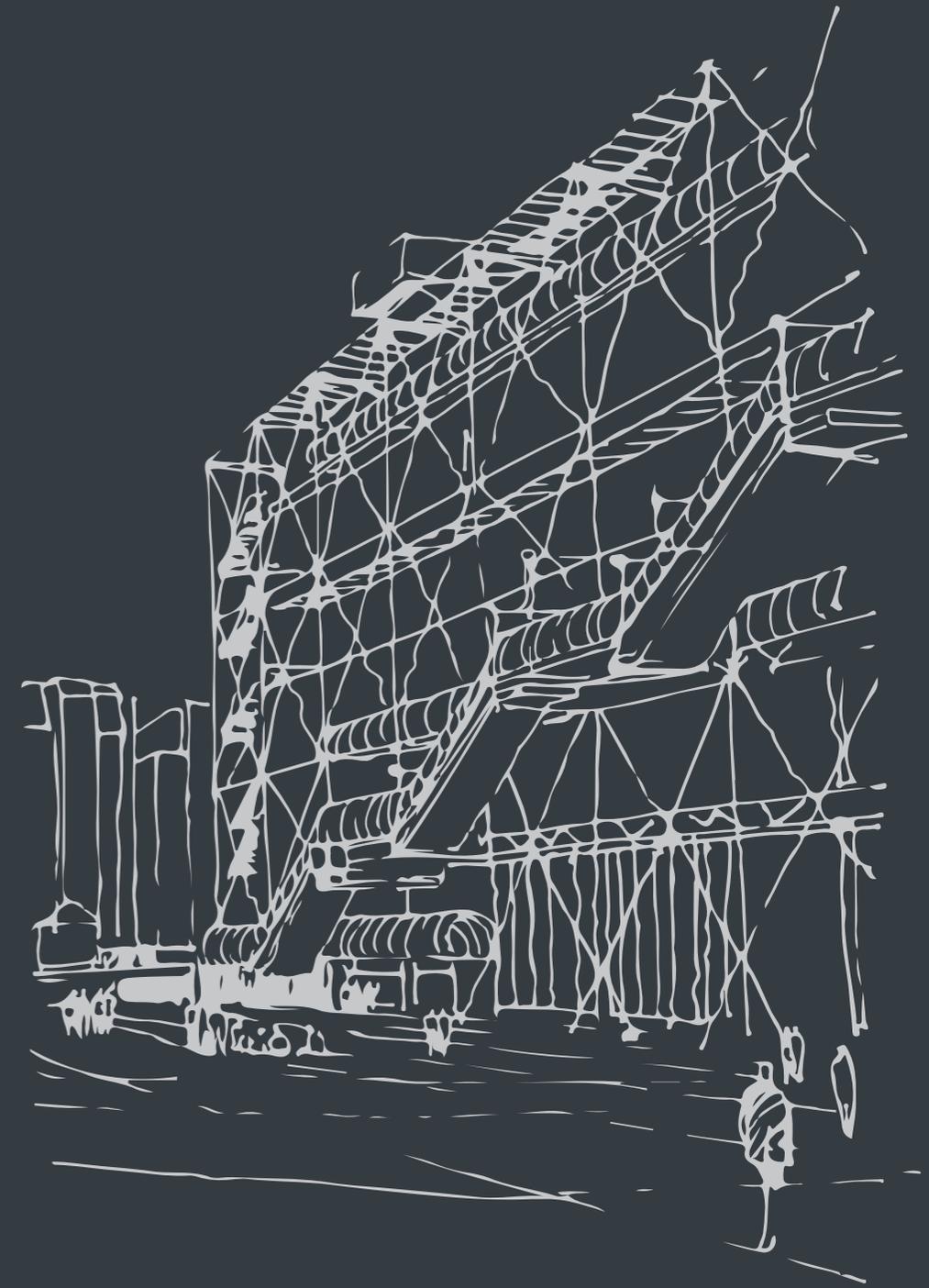
Ognuno di questi ambiti è collegato l’uno all’altro: il saper far leggero e la sua conseguente riduzione di materiale impiegato crea una percezione di instabilità, il ridurre il materiale comporta per il buon funzionamento l’essere resistente, caratteristica che si collega alla tipologia di irrigidimento, ovvero alla tensione, che riporta il prodotto ad una stabilità effettiva. L’obiettivo è quello di porre attenzione principalmente alle caratteristiche strutturali e funzionali non trascurando il fatto che, nella progettazione, il materiale non è un elemento secondario alla forma poiché questa può essere condizionata dal materiale stesso.

Ma qual è una forma strutturale in cui la quantità del materiale possa essere ridotta al minimo mantenendo resistenza e stabilità? Queste quattro tematiche fuse tra loro, pongono le basi per la ricerca di uno scenario e suggeriscono l’uso delle strutture autotensionanti per una tipologia progettuale funzionale e alternativa. Un approccio analitico è quello di descrivere singolarmente questi quattro ambiti partendo da citazioni, mirate sul tema, di designer influenti sul mondo del design.

/ Fare leggero

“Bisogna sempre avere l’ansia di sperimentare, togliere il più possibile, finché non ti casca tutto per terra”

Renzo Piano



La leggerezza è un prodotto molto sofisticato del “sentire” umano, non è uno stato inconscio ma più una ricerca basata sulla evoluzione di capacità naturali.

Leggerezza sta nell'eliminare tutta una serie di elementi che apparentemente servono ma di fatto aiutano solo ad appesantire, così da trovare la capacità di immaginare soluzioni diverse.

Filosofi, scrittori e artisti, a cominciare da Parmenide e Cicerone, passando per Marc Chagall, Paul Valéry e Leonardo Sciascia, per arrivare a Italo Calvino e Milan Kundera ci rammentano come la leggerezza passi per la sottrazione, che non è rinuncia, bensì sintesi, precisione, definizione.

Un design “leggero” non funziona per addizione ma per sottrazione, non toglie forza al pensiero, è un percorso tra ricerca e sperimentazione in cui la leggerezza è il risultato di un equilibrio tra segno, forma e materia. Ottenerla non è affatto semplice, forse perché appare più creativo e brillante progettare forme complesse.

La diminuzione del peso rappresenta un indicatore del livello tecnico. In generale, aumentare la quantità di prestazioni ottenuta da una data quantità di materia, ovvero ridurre la quantità dei materiali occorrenti

per ottenere una data prestazione, risponde ad una tendenza economica elementare che è sempre stata presente nell'attività progettuale.

Il materiale ha una valenza linguistica poiché attribuisce una espressività non programmata all'oggetto realizzato.

Il materiale è un mezzo linguistico di comunicazione della cultura del progetto, indizio di storia e cultura complesso; a volte espresso con chiarezza, altre difficile da comprendere. I materiali non sono solo l'espressione e il linguaggio della “funzione”.

Vi sono oggetti nei quali predomina l'equazione “peso = importanza” che però non è uguale in tutte le culture: una cultura nomade produce forzatamente un sistema di oggetti trasportabili e leggeri costruendo su questo dei significati. Altre culture, come ad esempio la struttura giapponese, hanno prodotto una raffinata cultura del leggero. Ma nella cultura europea il valore del peso è sinonimo di qualità, durata, solidità, sicurezza ed ha lasciato un segno profondo sulla valenza linguistica del materiale.

Esistono oggetti che si alleggeriscono nella sostanza, senza però mostrarlo perché un codice linguistico profondamente radicato gli impone ancora l’“immagine del peso”.

/ Fare resistente

“Come non riconoscere che la forma è sorta dal binomio materia/ funzione? Fare il più con il minimo dispendio di energia e materiali. Questo concetto è reso possibile analizzando e studiando la forma più congegnale che l'oggetto finale deve assumere. Il materiale non cambia né in qualità, né in quantità: la proprietà della rigidità dipende maggiormente da un fattore di forma.”

Gillo Dorfles



Un foglio di carta piegato longitudinalmente diventa da oggetto flessibile a una struttura dotata di una certa rigidità. Il materiale non cambia né in qualità, né in quantità: la rigidità dipende da un fattore di forma.

Ottimizzare al meglio le forme strutturali, mantenendo la resistenza necessaria ad assolvere la funzione per cui essa è stata progettata riduce considerevolmente la quantità di materiale impiegato e di conseguenza i relativi sprechi.

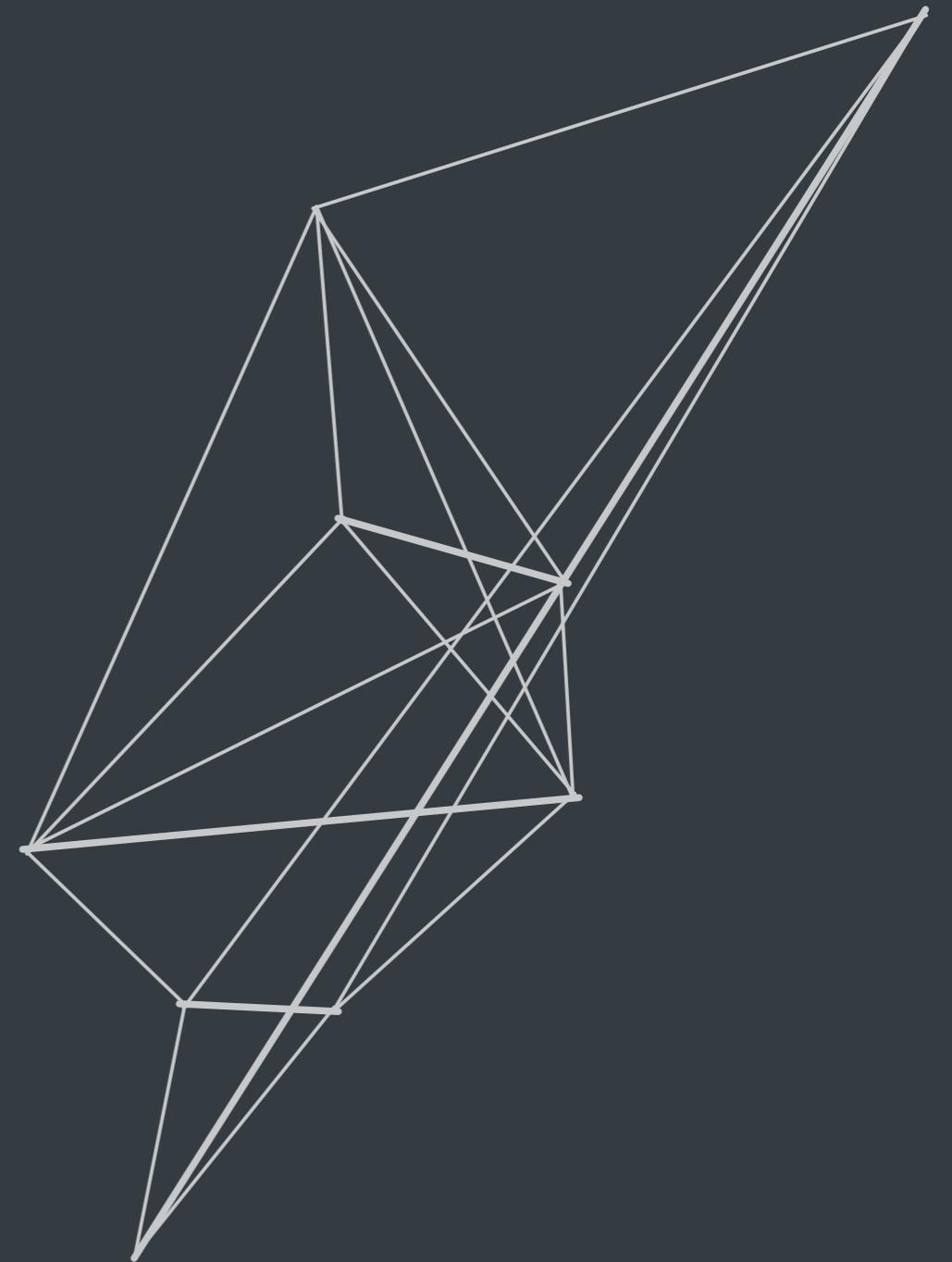
Occorre ispirarsi alla natura che progetta e crea da sempre oggetti resistenti, attenti all'economia: lo scarto non esiste ma diventa input per la realizzazione o il funzionamento di altro.

La resistenza è un elemento importante nella progettazione, poiché ne consegue un ottimale funzionamento. È necessario però utilizzare meno materiale, fare il più con il meno senza andare ad intaccare la resistenza.

/ Tensione

“Io la forma non l’ho mica disegnata, è venuta fuori con la tensione ed il peso”

Bruno Munari



Parlare di tensione significa trattare con tutte quelle soluzioni strutturali che permettono una ripartizione più omogenea del carico, ossia di quel complesso di forze gravanti su una struttura e di conseguenza la possibilità di costruire artefatti più leggeri senza compromettere la stabilità e la resistenza. In fisica e ingegneria, la deformazione di un corpo è un qualsiasi cambiamento della configurazione geometrica che porta ad una variazione della sua forma o delle sue dimensioni in seguito all'applicazione di una sollecitazione interna o esterna. Qualsiasi oggetto sottoposto a forze subisce una variazione delle sue dimensioni. Nella progettazione di un qualsiasi artefatto l'essere in grado di prevedere di quanto variano le dimensioni quando viene sollecitato è importante tanto quanto sapere se si romperà.

Nella progettazione **occorre seguire dei criteri per la scelta del materiale e il dimensionamento.** È necessario scegliere un materiale che abbia una resistenza sufficiente per non rompersi e una rigidità sufficiente per non deformarsi più del dovuto. **A tal fine occorre conoscere le forze agenti, la forma e le dimensioni per poter calcolare gli sforzi e le deformazioni cui l'artefatto verrà sottoposto durante l'uso.** **È necessario quindi conoscere la tipologia di sforzo cui un oggetto può essere sottoposto e le relazioni che legano le deformazioni agli sforzi applicati.** Lo sforzo non è una grandezza effettivamente misurabile, ma solo un'astrazione elaborata per facilitare il compito al progettista. Lo sforzo è valutato come rapporto tra la forza agente e la sezione resistente.

Un corpo soggetto a delle forze subisce una variazione di dimensioni (allungamento, accorciamento...). **La corretta valutazione dello sforzo e della deformazione cui è sottoposto un artefatto anche complesso**, soprattutto se sollecitato da forze che agiscono in varie direzioni, è in realtà piuttosto complicata e occorre ricorrere a metodi di calcolo sofisticati (es. metodo ad elementi finiti).

In sostanza la deformazione può essere valutata come rapporto tra l'allungamento subito e la lunghezza iniziale.

Premesso ciò sono quattro i casi limite di applicazione di sforzo e conseguenti deformazioni:

- **trazione e compressione**
- **taglio**
- **flessione**
- **torsione**

Si prende in considerazione solo il caso di trazione e compressione in quanto l'unico che interessa in questo elaborato di tesi.

Fintanto che si resta nelle deformazioni elastiche esiste una relazione di proporzionalità tra sforzo e deformazione, che prende il nome di Legge di Hooke che può essere scritta come:

$$\sigma = E \epsilon \quad \text{oppure} \quad E = \sigma / \epsilon$$

$$\text{oppure} \quad \epsilon = \sigma / E$$

dove:

σ = sforzo applicato [N/mm²]

E = modulo di elasticità o di Young [N/mm²]

ϵ = deformazione [adimensionale o in %]

La legge di Hooke è estremamente importante in quanto permette:

- noto il modulo di elasticità corrispondente al materiale utilizzato (E) e la deformazione subita del materiale (ϵ), di calcolare lo sforzo σ ($\sigma = E \epsilon$).

- noto lo sforzo (σ) applicato e la deformazione (ϵ) subita, di calcolare il modulo di elasticità del materiale utilizzato ($E = \sigma/\epsilon$).
- noto lo sforzo (σ) applicato ed il modulo di elasticità (E) del materiale utilizzato, di calcolare la deformazione ($\epsilon = \sigma/E$)

A parità di sforzo la maggiore o minore deformazione che un materiale subisce dipende dal materiale stesso. Ogni materiale è caratterizzato da uno specifico valore del modulo di elasticità E .

La conoscenza di tale valore permette di legare lo sforzo a un materiale alla deformazione che esso subisce.

È evidente che maggiore è il modulo di elasticità del materiale più questo sarà rigido e minore è la deformazione che il materiale

subisce a parità di sforzo agente.

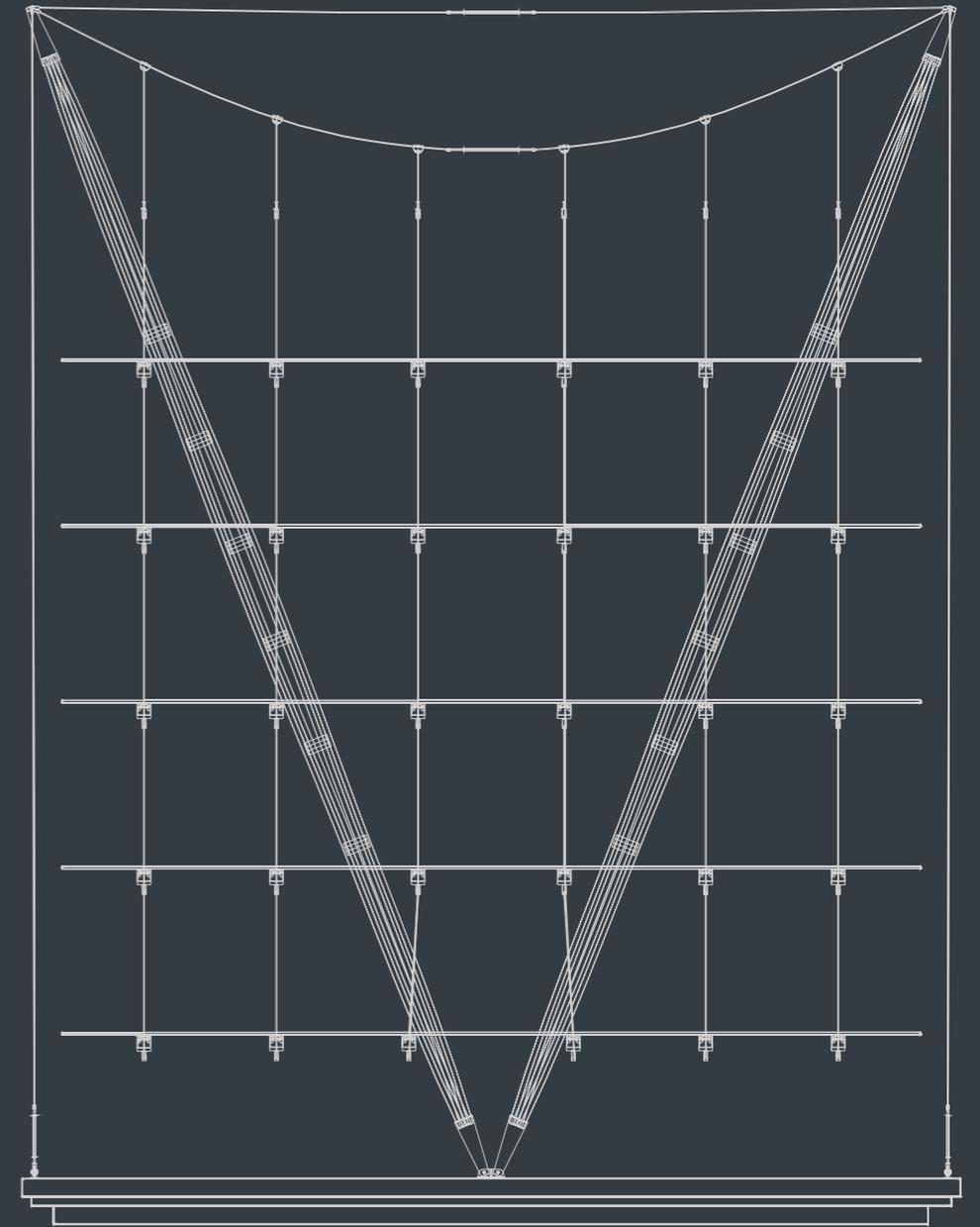
La conoscenza del valore del modulo di elasticità dei materiali con cui è realizzato un artefatto è fondamentale. Nella scelta del materiale due sono le caratteristiche che bisogna che siano verificate:

- il materiale deve essere resistente; cioè la sua resistenza intrinseca (σ ultimo) deve essere superiore allo sforzo agente (σ ultimo $>$ σ agente)
- il materiale deve essere rigido, cioè il suo modulo di elasticità E deve essere sufficientemente alto da determinare un allungamento inferiore a quello massimo ammesso in fase di progetto.

/ In-Stabilità

“La struttura viene denunciata in tutta la sua scarna essenzialità ove la sezione del materiale usato è ridotta al limite delle proprie possibilità.”
[...]“Leggerezza fisica legata al peso, leggerezza visiva legata alla percezione.”

Franco Albini



Nell'ambito del design molti oggetti stupiscono per la loro capacità di resistere alle forze a cui sono sollecitati, assolvendo alla funzione per cui sono stati progettati, ingannando percettivamente la loro stabilità. La visione complessiva di questi oggetti suggerisce precarietà.

Nel mondo del design esistono diversi approcci per manifestare lo stato di instabilità, da ricercarsi nella relazione tra la quantità di materiale impiegato e la percezione instabile che ne sussegue. Gli oggetti che svelano e che dimostrano, purché ingannando, un'immagine complessiva instabile, non sono accettati o facilmente metabolizzati dalla nostra cultura.

Un oggetto che sia in grado di sorprendere, all'apparenza instabile e precario ma effettivamente stabile, crea aspettative. La perfezione non esiste ed il "difetto" di apparire instabile, avvicina l'oggetto al mondo terreno.

La stabilità è intrinseca all'oggetto, non viene mostrata, ma svelata utilizzandola.

La natura del materiale, la sua quantità impiegata e la soluzione di impiego, attribuiscono alle strutture percezioni di instabilità o di instabilità.

Leggerezza fisica legata al peso, leggerezza visiva legata alla percezione.

Instabilità visiva - stabilità effettiva.

01/ Cos'è la Tensegrità

- / 01.1 La tensegrità in natura
- / 01.2 La tensegrità nell'arte
- / 01.3 La tensegrità in ingegneria,
architettura, design:
analisi delle applicazioni

Il campo di interesse e di operatività del designer attualmente si è esteso ad ampio raggio, poiché sempre più ampia è la gamma dei prodotti chiamati a rispondere alle crescenti esigenze dell'uomo. Queste vanno a combinarsi con una sempre più ampia offerta di tecnologie innovative all'interno dei processi produttivi.

La sfera di competenza del designer spazia dal tradizionale campo della progettazione dell'oggetto, al controllo del suo impiego, per finire alla sua dismissione.

Il designer è chiamato inoltre ad individuare le proiezioni future delle necessità e, in base a queste, a pianificare i nuovi obiettivi calibrati sulle innovazioni della produzione.

Il designer quindi deve interfacciarsi con discipline diverse, come la tecnologia dei materiali, i processi produttivi, la sostenibilità ambientale e il ciclo di vita di un prodotto.

La ricerca progettuale deve tener conto di queste discipline anche attraverso la sperimentazione su forme e materiali. Non ha senso parlare di innovazione tecnologica se non si fa riferimento a una maggiore efficienza e controllo dei costi: la leggerezza è sicuramente un prerequisito per tali obiettivi.

Una progettazione sviluppata su sistemi autotensionanti o "tensegrali" può essere una interessante proposta di design innovativo.

Le strutture tensegrali sono innanzitutto molto leggere, offrono variabilità formale essendo smontabili, rimontabili e richiudibili, sono adatte sia per soluzioni temporanee che per quelle di lunga durabilità. Sono realizzabili con i materiali più diversi dal punto di vista dell'efficienza prestazionale, economiche in relazione al loro peso e ai risultati conseguiti e, non da ultimo, anche per la loro qualità estetica.

Oggi viviamo un passaggio tecnologico legato alla produzione di nuovi materiali che forniscono altissime prestazioni di resistenza, sia a compressione che a trazione, quali leghe metalliche ad altissima resistenza, di derivazione meccanica/aerospaziale, materiali compositi sempre più economicamente accessibili e che, proprio per questo, permetteranno e favoriranno sempre più la possibilità di realizzare strutture più resistenti ma anche più leggere e durevoli.

In questo capitolo vengono presentate alcune applicazioni in ambito ingegneristico, architettonico e del design.

/ 01.1 La tensegrità in natura

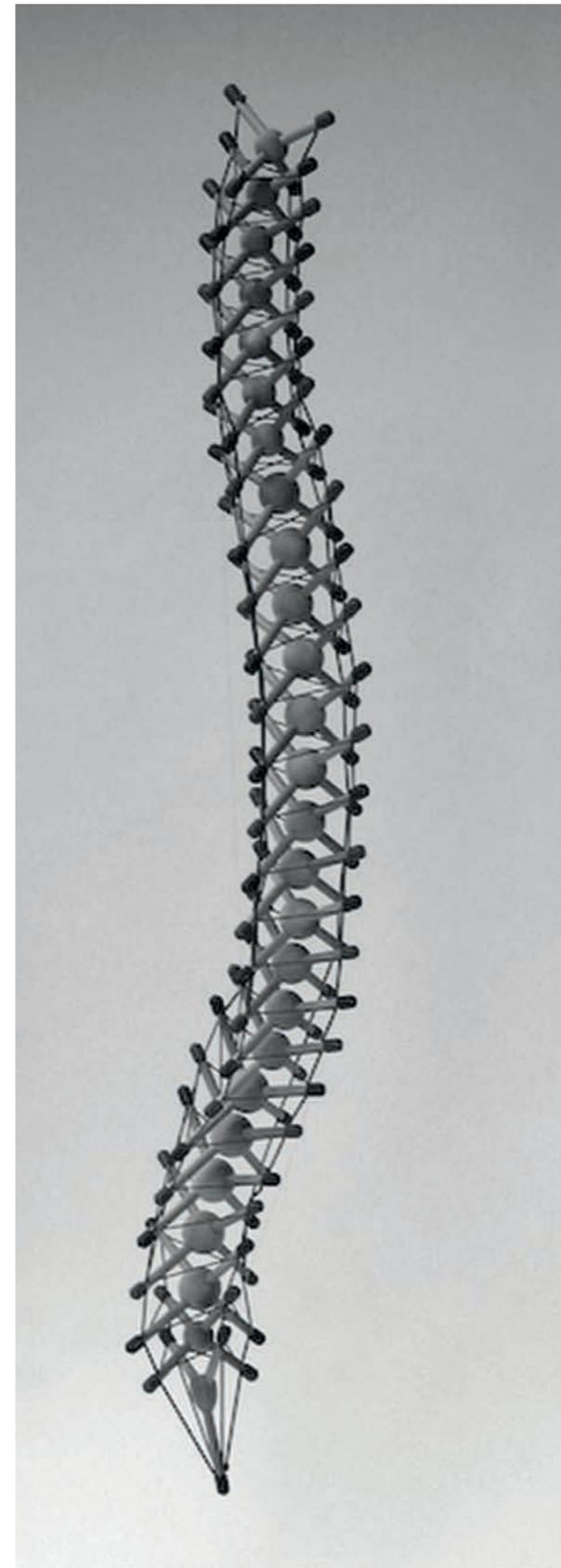
Il modello tensegrale può essere generalmente considerato come **principio strutturale sottoposto ad un particolare campo di forze in equilibrio stabile con una distribuzione precisa di elementi o componenti e con la condizione della continuità tra gli elementi tesi.**

La compressione e la trazione possono essere, per esempio, associati alla repulsione e all'attrazione, fenomeni presenti in campo gravitazionale e atomico.

Snelson sottolinea vari modi di collegamento attraverso le tensegrali in Astronomia (un pianeta al sole), in fisica atomica (un elettrone al nucleo) e in meccanica (un cavo ad un'asta).

Il modello tensegrale, può essere approssimato ad un sistema che già esiste in natura ed esistono molteplici esempi di elementi naturali che possono essere ricondotti ai principi di base delle strutture tensegrali.

34



Il principio tensegrale è stato associato ed applicato sia alla **biomeccanica che all'anatomia, in particolare nell'analisi del comportamento dei muscoli, dei tendini e delle ossa negli esseri umani ed animali.** Sono state analizzate analogie tra le tensegrali e il sistema statico della colonna vertebrale umana e del corpo in generale. Si è teorizzato che lo scheletro non è solo un telaio di sostegno con muscoli, legamenti e tendini, ma è anche un insieme di componenti di compressione sospesi all'interno di una rete continua in tensione, ovvero un sistema tensegrale puro. **A tal proposito, si può citare la corrispondenza tra le ossa e i tendini nell'uomo e negli animali, che sono collegati in modo da permettere un facile controllo del movimento. In tali strutture, le ossa forniscono capacità di carico tramite la compressione mentre i tendini e i muscoli forniscono le tensioni necessarie per stabilizzare il sistema globale**

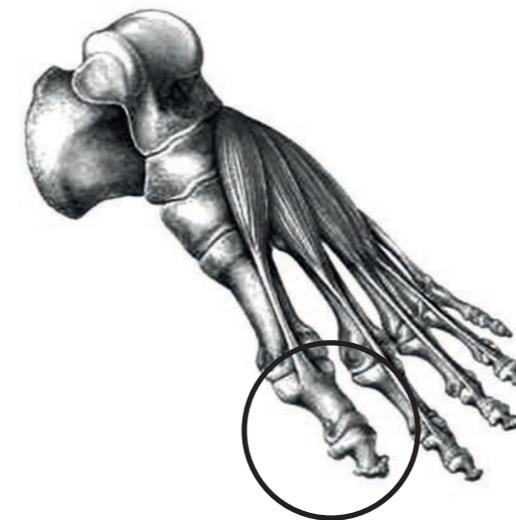
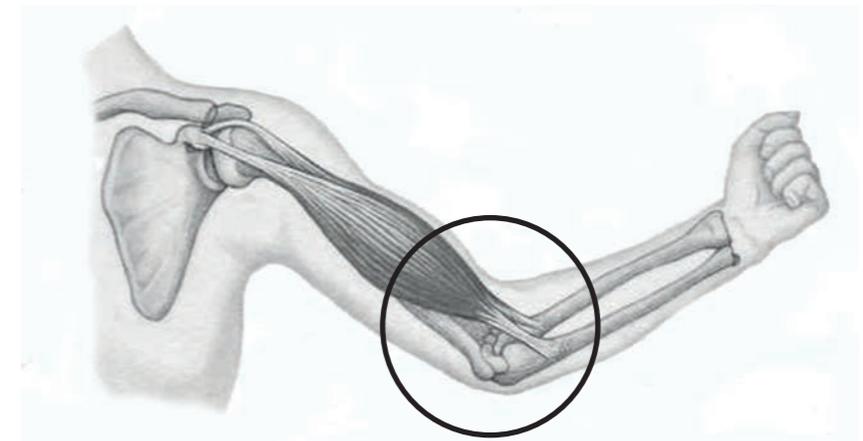
35

Scultura di Tom Flemons

Scultura di Tom Flemons



Nelle immagini sotto si osserva che i tendini collegano l'omero del braccio con l'ulna e le ossa radiali dell'avambraccio. Queste tre ossa si intersecano al gomito, quindi può essere classificato come un giunto di classe 3 di tensegrità.

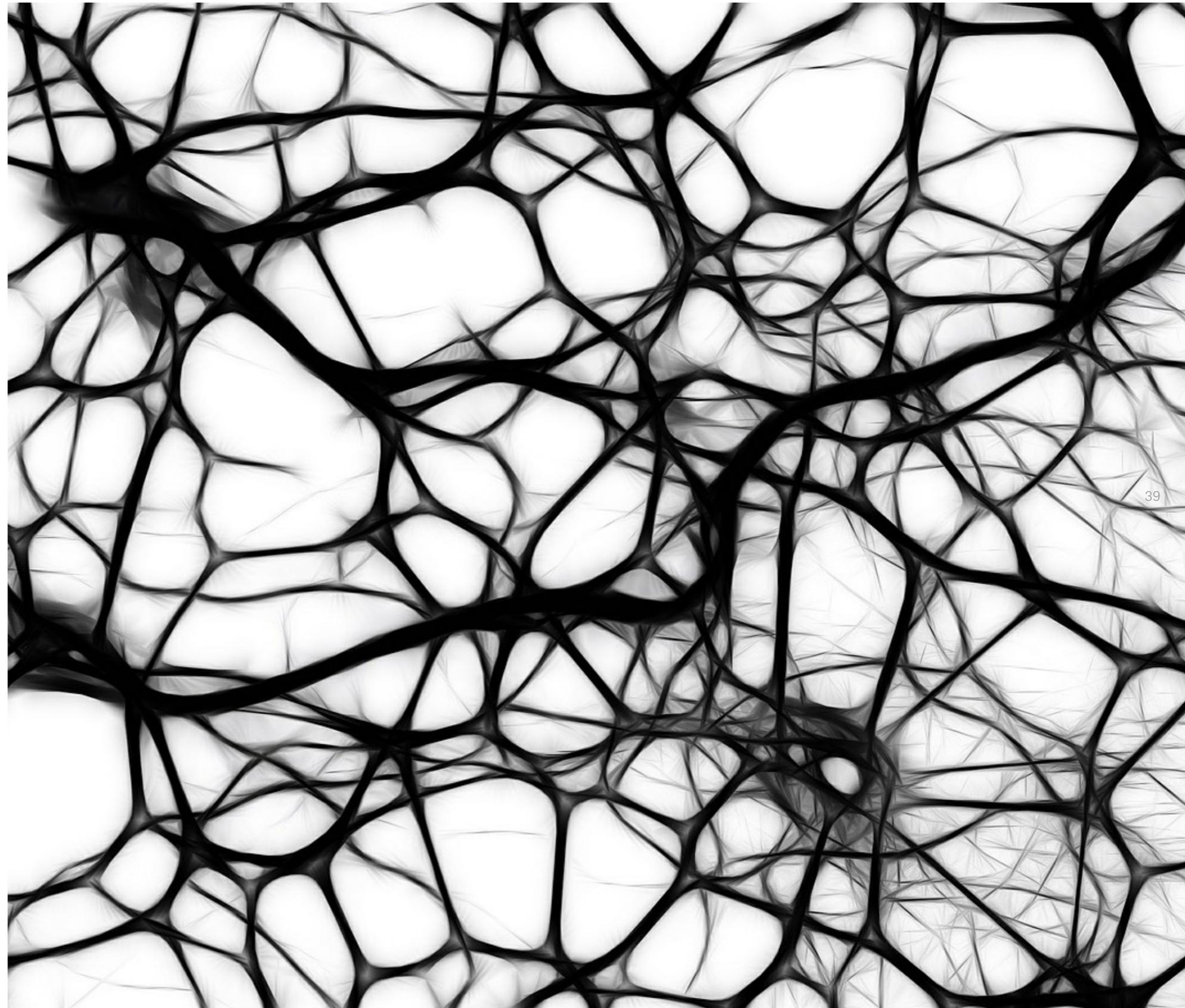


Questa immagine rappresenta l'ipotesi di tensegrità di classe 2 del sistema di controllo dell'alluce del piede.

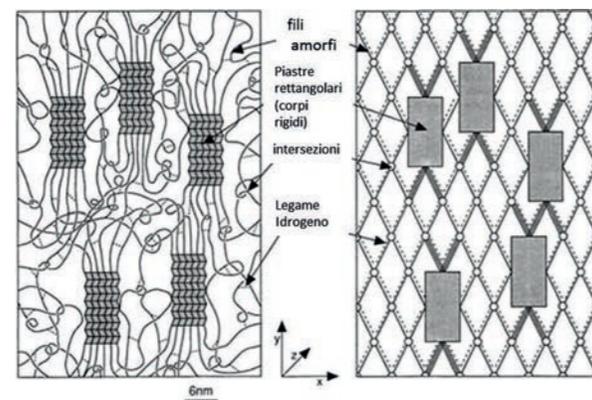
Alcuni studi hanno dimostrato che anche il **sistema nervoso centrale reagisce secondo un principio tensegrale.**

Infatti i neuroni sensoriali sono sempre coinvolti nel trasporto di informazioni e quindi sono in continuo movimento (sottoposti a sforzi di trazione), mentre i motoneuroni sono solo occasionalmente coinvolti in qualche azione motoria (comportamento a compressione).

representazione
della struttura
neurale



Una ipotesi di tensegrità di classe 1 sembra adattarsi molto bene alla **struttura molecolare della tela del ragno *Nephila Clavipes***. La seta prodotta da questo ragno ha una struttura molecolare più forte in natura poiché possiede una resistenza a trazione pari a $4 \cdot 10^9$ N/m²ha, molto superiore a quella dell'acciaio. La seta è una proteina complessa composta principalmente da due aminoacidi, glicina e alanina. Le alanine sono allineate in due modi per formare piastre molecolari da piccoli cristalli, chiamate β -fogli plissettati e fili amorfi che formano una rete di materiale che può assorbire la tensione. Le piastre rettangolari forniscono i corpi rigidi nella definizione di tensegrità, e i fili amorfi formano i membri di trazione sempre nella stessa definizione. Poiché le piastre non sono a contatto tra di loro, la ragnatela è stabilizzata dai fili amorfi in trazione.

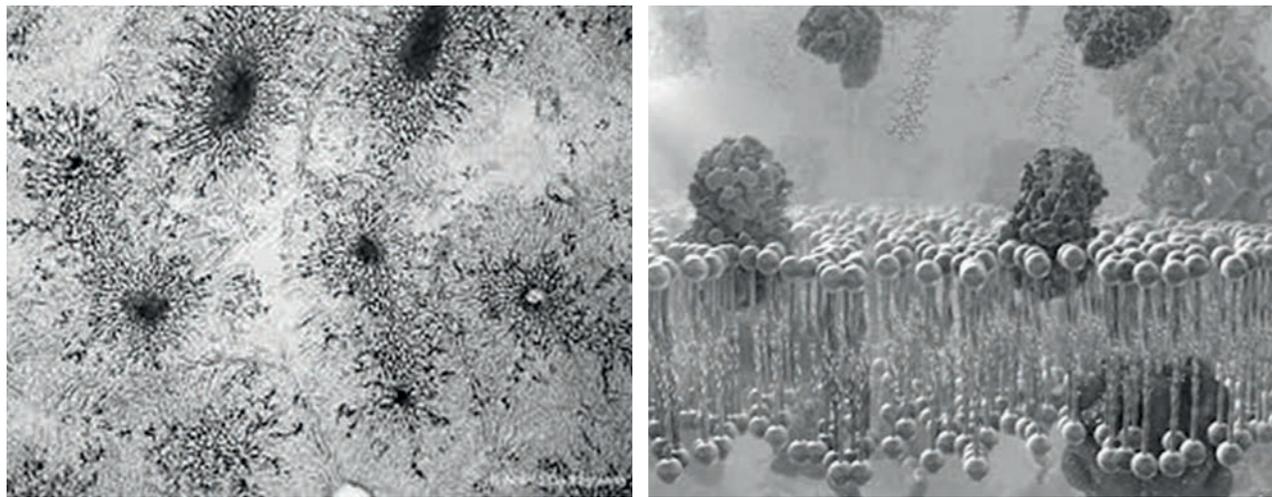


Un modello di tensegrità di classe 1 della struttura molecolare del ragno. I corpi rigidi sono i fogli β -plissettati, e i membri di trazione sono i fili amorfi che si collegano ai fogli β -plissettati.



In biologia un esempio di sistema tensegrale è rappresentato dalla composizione della membrana dei globuli rossi, formata da un doppio strato lipidico costituito da circa 33.000 unità in grado di essere modellate come tensegrali, composte da proto filamenti dal comportamento rigido e da spectrine dal comportamento elastico. Queste ultime sono modellate come insieme di connettori di trazione tra il doppio strato lipidico e i proto filamenti i quali, invece, sono associati a corpi rigidi. L'equilibrio e la composizione ottenuti da tale struttura biologica può essere associata ad un modello tensegrale.

42



rappresentazioni della membrana dei globuli rossi

La forma e la stabilità meccanica delle cellule viventi sono governate da una struttura molecolare interna nota come citoscheletro.

Le proprietà meccaniche del citoscheletro derivano dalla complessa rete di biopolimeri che compongono il reticolo citoscheletrico. Tutti questi biopolimeri subiscono un rimodellamento continuo in quanto i singoli monomeri possono essere aggiunti e rimossi. Alcuni polimeri del citoscheletro, come i filamenti contrattili di actomiosina, possono anche generare una tensione attiva.

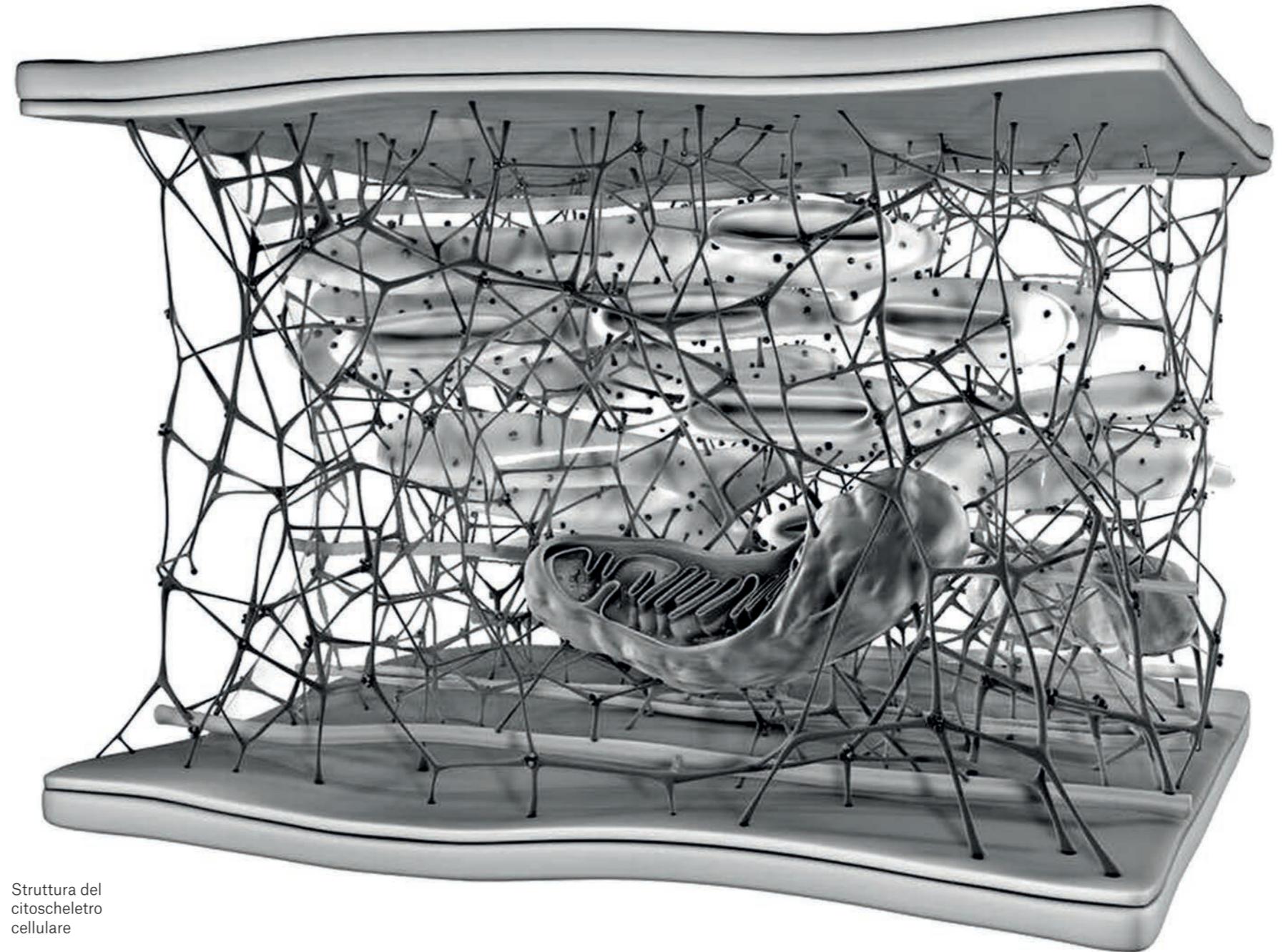
Una ipotesi sul comportamento elastico delle cellule in analogia al sistema tensegrale è stata confermata da diversi lavori sperimentali e da nuove scoperte nel campo della teoria cellulare. La struttura del citoscheletro della cellula può essere modificato alterando l'equilibrio delle forze fisiche trasmesse attraverso la superficie della cellula.

43

Il nucleo di una cellula vivente si appiattisce quando si attacca ad una superficie rigida e si ritrae in una forma sferica su un substrato flessibile.

Poiché tutti i diversi sistemi di filamenti del citoscheletro sono interconnessi come una rete tra loro e con aderenze cellula-cellula, nel citoscheletro viene generata una tensione di precompressione attraverso un equilibrio tra forze opposte distribuite in questa rete.

In particolare, le forze di trazione che vengono generate attivamente all'interno dei filamenti contrattili sono contrastate internamente dai microtubuli che possono sopportare la compressione imposta loro dalla rete contrattile circostante.



Struttura del
citoscheletro
cellulare

Anche se apparentemente le materie inorganiche non godono di questi principi fisici, è interessante sottolineare che, secondo alcune nuove scoperte, anche tali sostanze possono essere basate sulla "floating compression". Alcuni autori, infatti, hanno proposto come nuovo modello di tensegrale un silicone amorfo costituito da agenti di trazione e compressione che ridimensiona e corregge a livello globale i difetti creati localmente.

La geometria ha un particolare tipo di "bellezza" tutta sua, già apprezzata ad esempio da Platone, capace di semplificare e far percepire oggetti complessi tramite linee dritte e curve.

Molte volte si tiene conto solo della meccanica e della tecnologia dei materiali, senza pensare anche agli aspetti estetico formali.

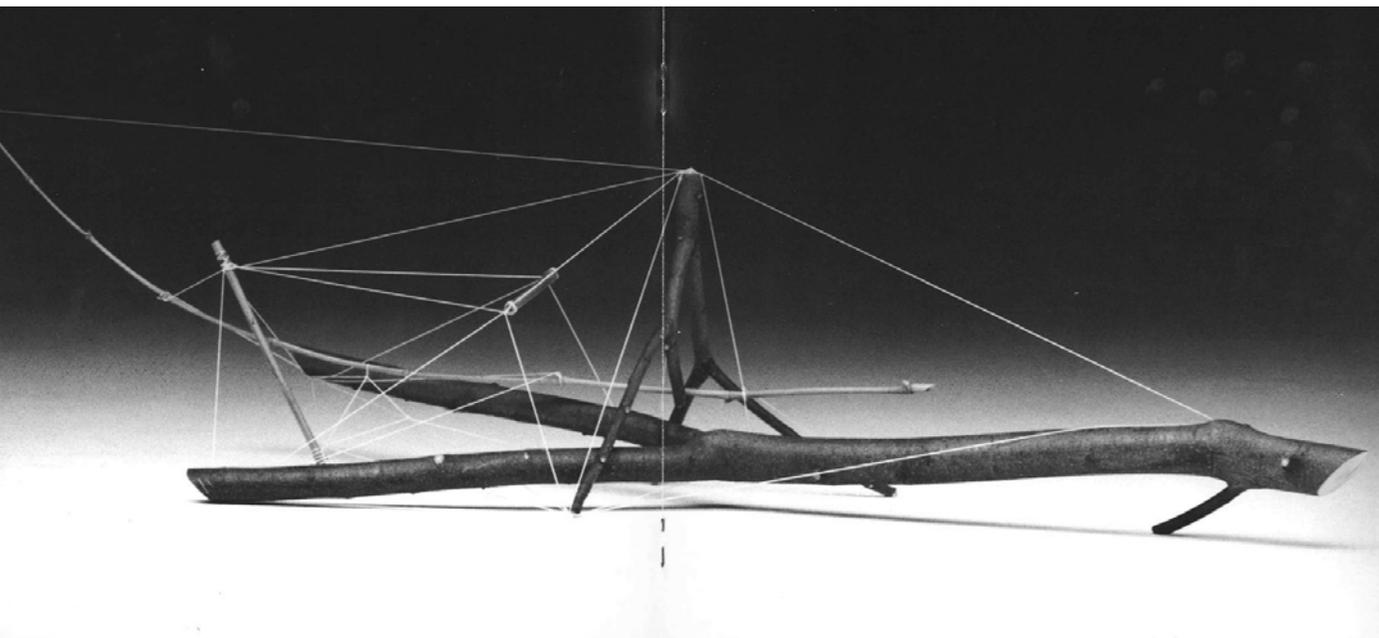
Gli artisti prestano concetti creativi ispirati alle strutture senza la necessità di strumenti analitici per caratterizzare proprietà funzionali della struttura stessa, poiché rappresentano puri sfoghi di energia creativa, completamente inutili come oggetti, eppure visivamente interessanti.

Bruno Munari

La poetica di Munari non è basata esclusivamente sulla pittura, ma mette in gioco, oltre ad un processo di apprendimento attraverso la sperimentazione di materiali, il coinvolgimento emotivo dello spettatore con effetti di sorpresa, realizzando uno spettacolo talvolta complesso.

Nei primi anni cinquanta Munari indaga il rapporto tra la natura e la geometria creando, in pochissimi esemplari, alcune sculture composte da rami raccolti nel bosco e fatti invecchiare, attorno ai quali l'autore intreccia fili di cotone bianco, lega un peso, imbriglia un rametto leggero di sambuco o di sughero, fissa una piuma o lega una pallina di plastica bianca che ciondola come un pendente.

48



*"Vicino a Chiasso
nel silenzio estivo dei boschi di Cardina
sulla cima della collina di Monte Olimpino
si possono trovare rami secchi
di frassino di castagno di betulla
di lauro di carpino di acero di ciliegio
di pero di magnolia... [...]
Faccio così una prima scelta di questi rami diversi
di questi segni solidi campati in aria
cresciuti al canto delle cicale e
tra l'indifferenza delle formiche
seccati dal sole e bagnati dalla luna.
Per lungo tempo li osserverò senza toccarli.
Poi proverò a fare qualche accostamento
con pezzi di rami dello stesso albero
o con pezzi di alberi diversi.
Devono poter stare assieme senza toccarsi
appoggiandosi ai fili di tensione.
I fili saranno bianchi di cotone o lino grezzo
niente interventi di colore.
L'insieme dei fili in tensione mostrerà
la natura geometrica dei rapporti di forza
le parti in compressione si comporteranno
con molta naturalezza quasi con indifferenza.
Nasce così un corpo unico solido
formato da due forze opposte
dove gli elementi in compressione
stanno solidamente assieme senza
toccarsi tra loro.*

*E così, senza attrezzi speciali, senza aiuti manuali
senza un progetto ben definito anche nei particolari
senza pensare perchè lo faccio e a cosa servirà
senza alcuna ragione accessibile a gente pratica
comincio ad annodare un filo bianco
ad una estremità di un ramo poi ancora
finchè due fili restano solidamente tesi quindi
appoggio sul filo teso l'estremità di un altro
ramo e lo tengo in modo che i rami non si tocchino
e mentre ne lego uno l'altro si slega.
Con molta pazienza imparando la tecnica mentre opero
e senza sapere prima che cosa verrà fuori dopo
mi trovo ad un certo punto
ad avere davanti a me con grande sorpresa
un oggetto solido che prima non c'era.
Qualcuno dentro di me mi dice che va bene così.
L'oggetto è compiuto e forse ancora manca qualche filo
per rendere la struttura più solida e qualche filo
lo metterò per ragioni estetiche.
Guardo l'oggetto finito come se lo avessi trovato
già fatto non so da chi.
Mi sento l'esecutore di un progetto che stava nell'aria
sulla cima di Monte Olimpino
tra il vento le nuvole gli alberi il sole le galline.
Un'attività affascinante
si sente un grillo lontano nel gran silenzio
vicino a Chiasso".*

(Bruno Munari, racconto pubblicato sul catalogo della mostra Alta Tensione, Galleria Vismara, Milano 1991)

49

Bruno Munari



Una spiegazione molto esauriente
annullerebbe la funzione dell'oggetto
creato invece per stimolare la fantasia

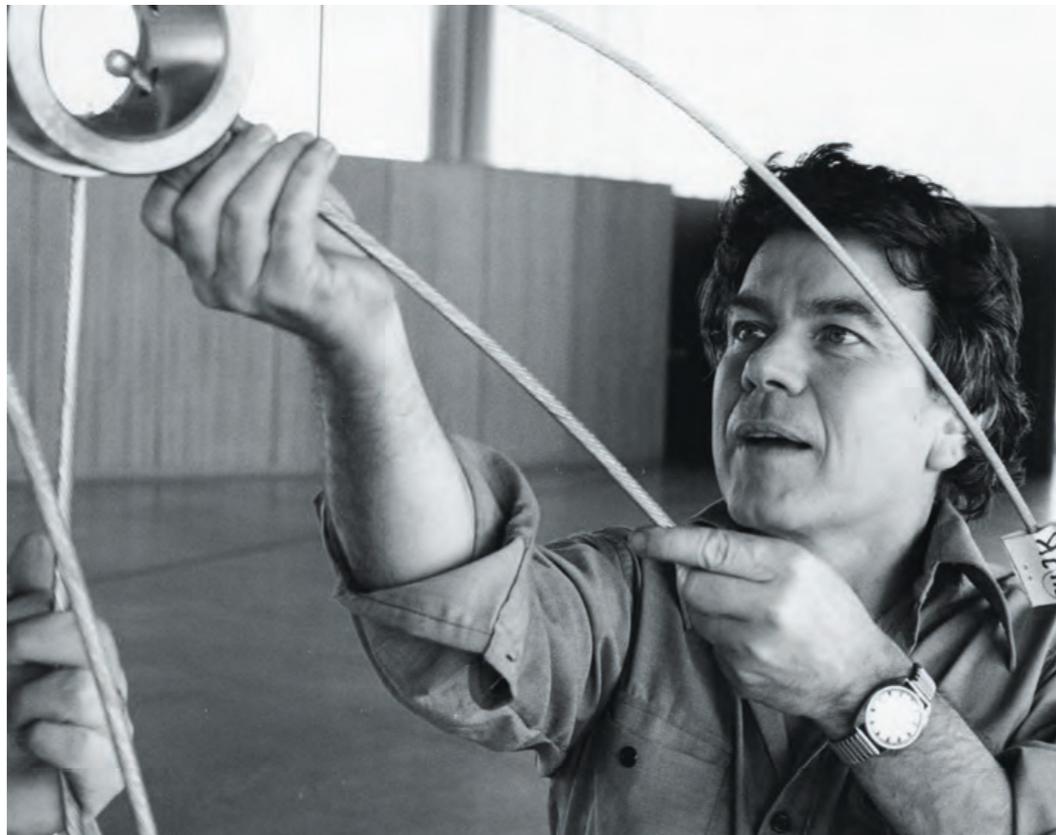
Carlo
Munari

1991

ALTA TENSIONE

Kennet Snelson

Snelson ha studiato i sistemi tensegrali soprattutto da un punto di vista artistico e compositivo, producendo sculture di singolare e straordinaria bellezza e complessità, con tecniche di montaggio ed assemblaggio di grande pulizia, affinate e migliorate nei decenni. Nonostante l'apparente semplicità del principio, Snelson ha avuto la geniale intuizione che il principio tensegrale avrebbe potuto produrre sculture con un ampio grado di variazione. Le sue sculture assumono la forma di torri, archi, immagini naturali di forme e geometrie irregolari. La loro struttura sembra spingersi verso l'alto in una serie di moduli decrescenti e si snodano sopra il terreno a dispetto della gravità.



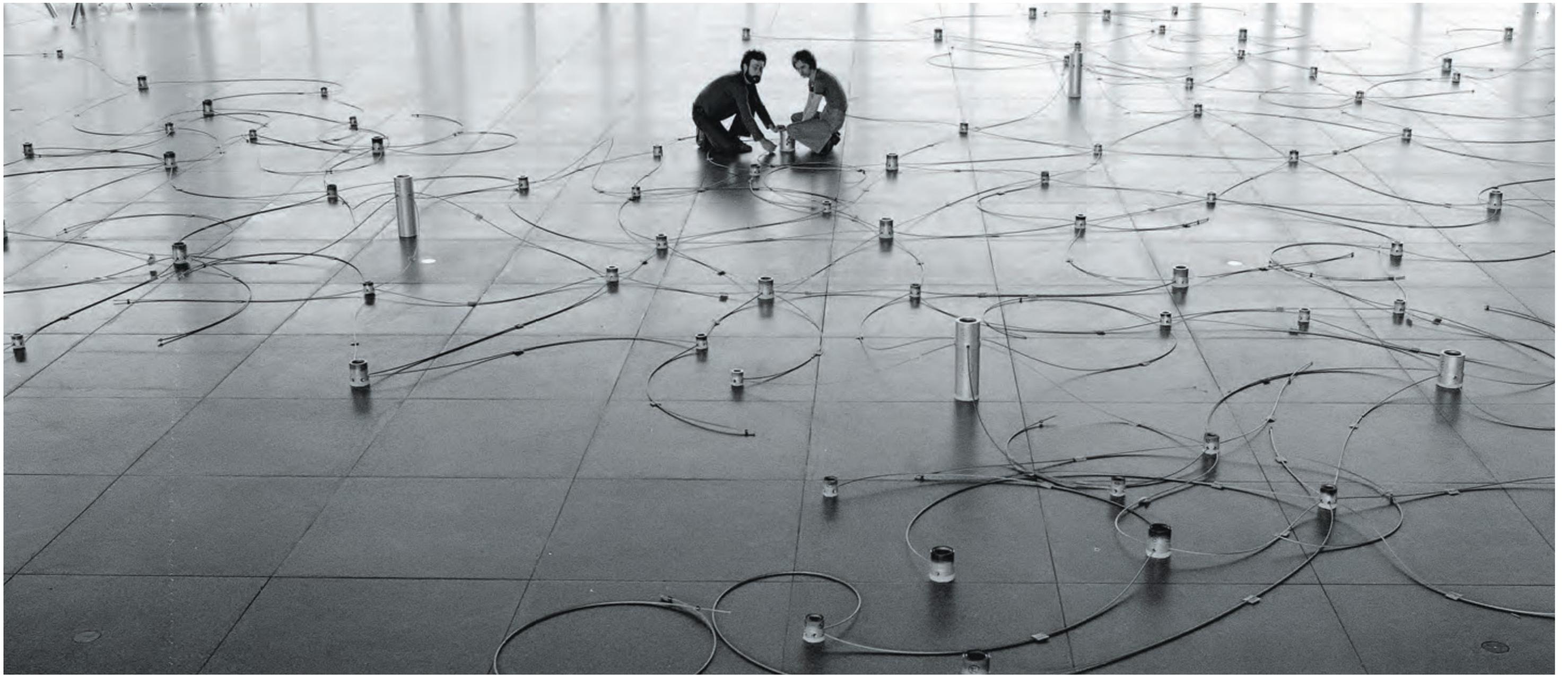
I materiali e le forme di Snelson sembrano tutt'altro che richiamare la scultura tradizionale, portando alcuni a identificare il suo lavoro con l'ingegneria piuttosto che con l'arte. In realtà il suo approccio progettuale è molto in linea con la storia della scultura.

Essendo realizzazione e materializzazione di una forma tridimensionale nello spazio, la scultura è sempre legata ai vincoli del mondo fisico. Così come la pietra, il legno e l'argilla, anche l'acciaio e l'alluminio devono essere modellati e adattati in modo da essere stabili. Snelson non ha sviluppato il concetto di tensegrale per creare edifici o per offrire nuovi modelli di assemblaggio di strutture. E' stato spinto dalla curiosità di comprendere come così pochi vettori possano contenere una scultura e al contempo mantenere un'integrità strutturale.

A tal proposito scrive:

"Ingegneri realizzate strutture per sostenere qualcosa, per tenere qualcosa.

Le mie sculture servono solo a stare in piedi da sé e per rivelare una forma particolare, come una torre o una mensola o un ordine geometrico probabilmente mai visti prima; tutto questo a causa di un desiderio di svelare, in qualsiasi modo, l'essenza meravigliosa della struttura elementare".



52

53

New Dimension, 1977 (Soft Landing, 1975-77) alluminio e acciaio inox
fase di assemblaggio

La leggerezza dei materiali può diventare essa stessa fonte di bellezza. Nel caso delle sculture di Snelson, questa bellezza si esprime attraverso la creazione di strutture la cui forma offre una rappresentazione di forze interne.

L'eleganza di queste sculture poggia sul principio di non - ridondanza, ove nessun elemento può essere rimosso senza pregiudicare l'integrità del complesso.



Dettaglio del giunto brevettato da Snelson



New Dimension, 1977 (Soft Landing, 1975-77)

/ 01.3 La tensegrità in ingegneria, architettura e design analisi delle applicazioni

Il percorso verso la leggerezza necessita di uno sforzo per superare il pregiudizio che la porta ad essere considerata un difetto piuttosto che un pregio.

La leggerezza viene oggi assimilata a un linguaggio universale, sia a livello strutturale sia estetico, che accomuna designer che prediligono evitare l'abbondanza di narrazione, adottare un approccio minimal, che non vuol dire assenza di valori o idee, ma espressività nel minimo di una forma a volte apparentemente fragile.

Il massimo dell'efficienza con il minimo dei materiali.

Di seguito vengono esaminate alcune applicazioni delle quali viene fatta un'analisi attraverso la definizione di uno schema statico equivalente.

Lo scenario che le accomuna tutte è che le strutture presentano sempre il medesimo meccanismo di risposta alle sollecitazioni e gli elementi in costante equilibrio reciproco, ovvero:

- **elementi tesi**
- **elementi compressi**

Kurilpa Bridge - ponte pedonale Brisbane - Australia Designer Arch. Cox Rayner, Ing. Arup anno 2009

Il Kurilpa Bridge è il più grande ponte tensegrale ibrido al mondo. Il complesso sistema di cablaggio comprende 80 cavi principali a trefoli elicoidali zincati e 252 cavi tensegrali realizzati in acciaio inossidabile. Viene definito sistema ibrido perché solo i longheroni orizzontali sono conformi ai principi di tensegrità. L'impalcato è portato da una coppia di travi a cui sono saldati i puntoni compressi. Essendo questi saldati al piede delle travi e non fluttuanti e stabilizzati da altri cavi tesi, questa struttura non può essere considerata tensegrale pura.





Il ponte è lungo 470 m ed è suddiviso in tre campate di cui la più lunga misura 120 m. Il design è il risultato di una partnership creativa tra gli architetti Cox Rayner, Baulderstone e l'ingegnere Arup. Il ponte viene definito dagli stessi progettisti come una struttura ad albero e strallata, il cui disegno architettonico richiama un insieme apparentemente composto da una serie casuale di elementi tensegrali. Infatti la geometria del ponte è apparentemente informale ma i cavi e puntoni sono disposti con un ritmo strutturale che fornisce la forza e la resilienza necessarie per una struttura destinata al trasporto di migliaia di pedoni e ciclisti.

La struttura comprende 18 impalcati in acciaio, 20 alberi in acciaio, 16 longheroni orizzontali e 6,8 chilometri di cavo a trefoli elicoidali. L'impalcato del ponte principale è costituito da 72 lastre di in calcestruzzo prefabbricate fissate alla struttura in acciaio.

60



61

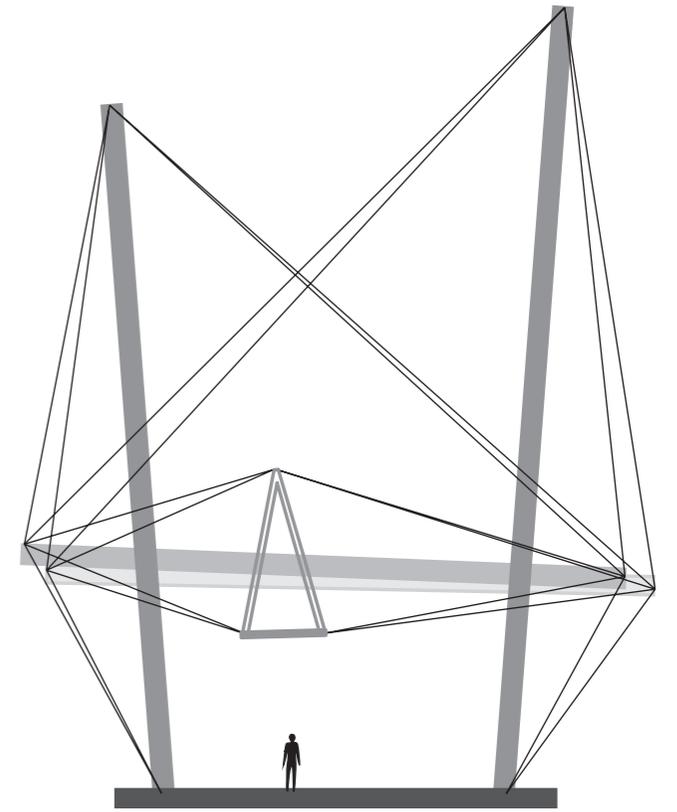
Analisi applicazione

Kurilipa Bridge

62

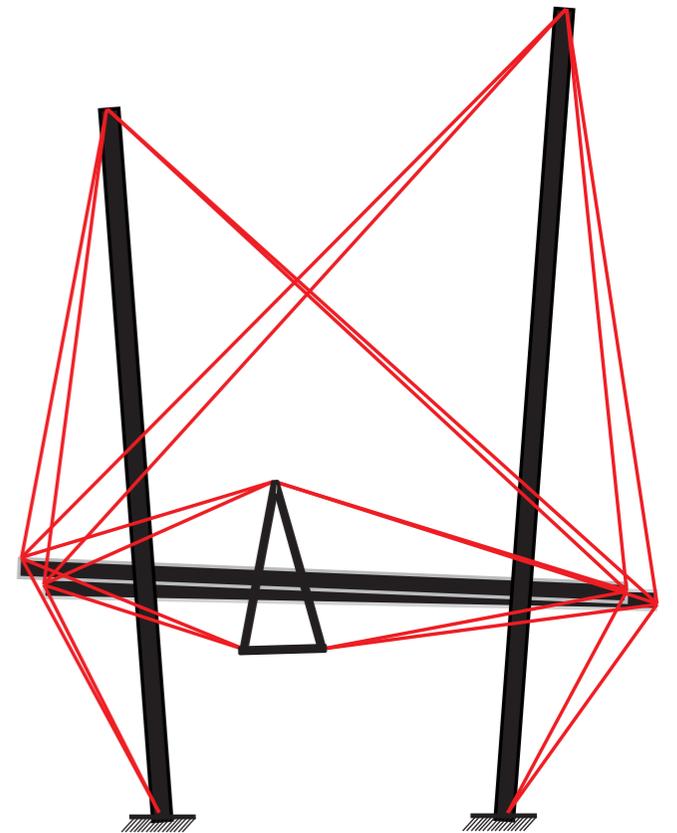
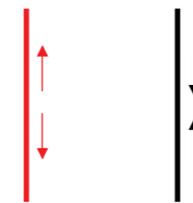


schematizzazione
struttura



63

azioni:
● elementi tesi
● elementi compressi



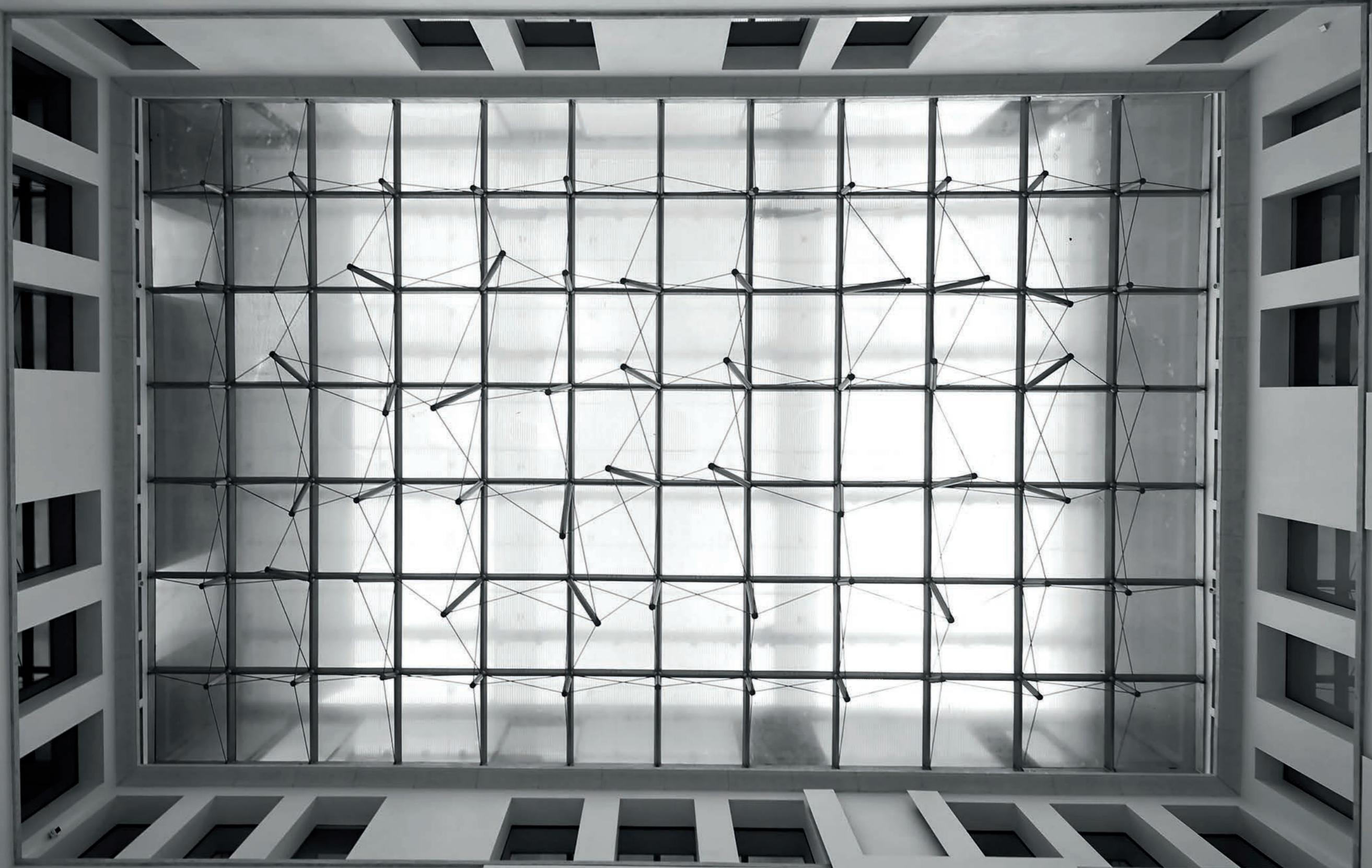
**Copertura pedonabile del
Museo di Storia Naturale di
Reggio Calabria
Designer Studio ABDR Roma
anno 2013**

A Reggio Calabria è stata effettuata la ristrutturazione del famoso Museo di Storia Naturale che ospita i Bronzi di Riace. Per la copertura pedonabile dell'atrio è stata realizzata una struttura tensegrale che sfrutta strutture di sostegno in acciaio saldato di sezione trapezoidale con sistema di tensionamento a mezzo di tiranti in acciaio e specifici apparecchi di fissaggio alle strutture in cemento armato.

È la prima in Europa per grandezza e seconda nel mondo.

Il nuovo atrio monumentale è ricavato per mezzo della copertura vetrata dell'attuale cortile. Il pavimento vetrato calpestabile è stato realizzato in grandi lastre di vetrocamera, inferiormente supportate da una struttura metallica il cui schema statico è basato su un modello tensegrale. L'effetto è quello di un'apparente "casualità" che invece trova una sua logica e sostanziale ragione d'essere nello stato di sforzo equilibrato tra gli elementi compressi e quelli tesi, contribuendo ad una immagine di leggerezza.





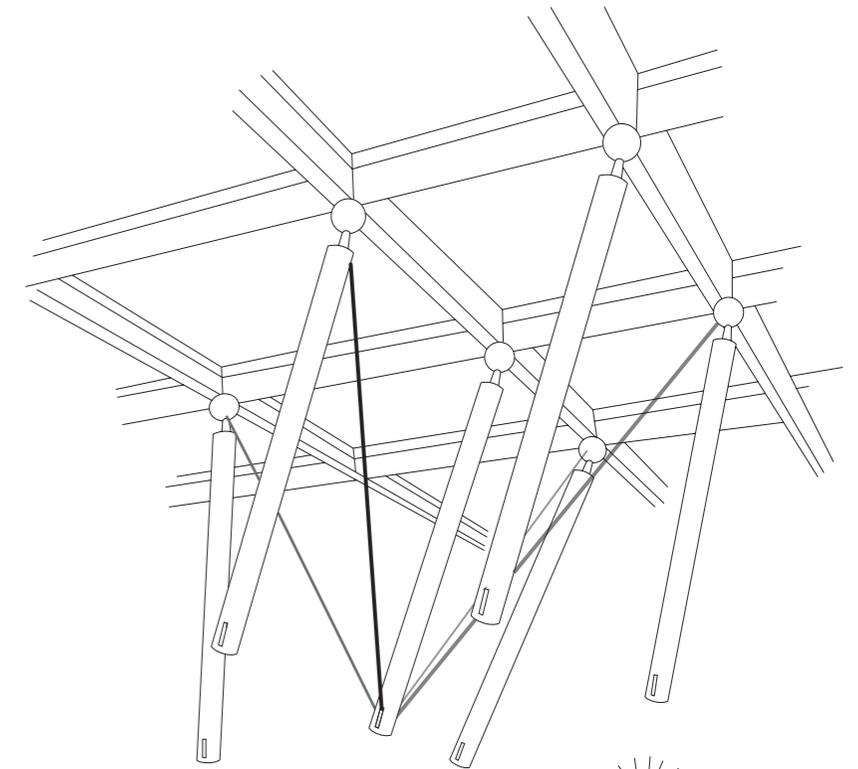
Analisi applicazione

Museo di Storia
Naturale di Reggio
Calabria



68

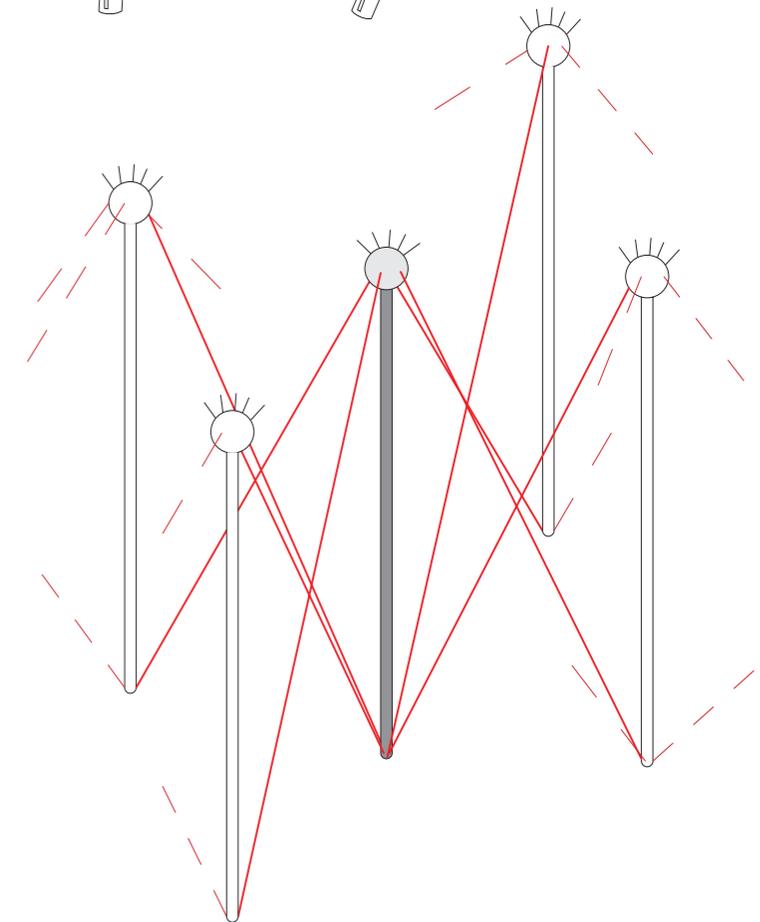
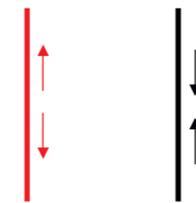
schematizzazione
struttura



69

azioni:

- elementi tesi
- elementi compressi



**MOOM padiglione temporaneo
Tokio
C+A Coelacanth and Associates
Designer Kazuhiro Kojima
anno 2011**

Il MOOM è un padiglione temporaneo sperimentale realizzato con solo due elementi funzionali che formano l'intera struttura. Uno è un singolo strato di tessuto che copre l'intero spazio e racchiude il padiglione dall'ambiente esterno, mentre permette alla luce del sole di passare. L'altro elemento funzionale è un sistema di bastoni rigidi che sostengono l'intero pezzo di tessuto sopra e modellano la forma del padiglione. Tutti i bastoni sono disposti nell'intera struttura totalmente separati l'uno dall'altro. In questo modo la struttura del padiglione, rivelandosi estremamente leggera e resistente, si differenzia da quelle a telaio più comunemente usate, dove gli elementi portanti sono sempre collegati tra loro per condividere il carico. La struttura del padiglione è formata dagli elementi rigidi indipendenti di compressione e gli elementi elastici di tensione continua. Le aste sono in alluminio e la membrana in polimero.





Entrambi tendono a bilanciare le forze di tensione e compressione deformandosi e riposizionandosi, dopo di che il sistema raggiunge uno stato di auto-equilibrio e la struttura complessiva si stabilizza. Il sistema tensegrale è visibile nelle linee di tensione principali che sono tese e sono quasi lineari nelle pieghe del tessuto tra gli elementi di compressione. La membrana, così, potrebbe essere considerata come un continuum delle forze di tensione, ovvero i cavi in tensione sono in pratica sostituiti dalla membrana elastica. Il progetto si basa su tre criteri fondamentali. In primo luogo, la ricerca della leggerezza, che permetterebbe di ottimizzare l'uso del materiale. In secondo luogo, la semplicità del metodo di sollevamento, per cui è stato possibile assemblare il sistema con solo tre elementi: il materiale plastico della membrana (dotato di 'tasche' per il fissaggio delle barre), le barre metalliche stesse e le funi d'acciaio per fissare la membrana al suolo. Infine, il sistema è facile e pulito da smontare, in modo che non lasci segni permanenti nell'ambiente circostante.

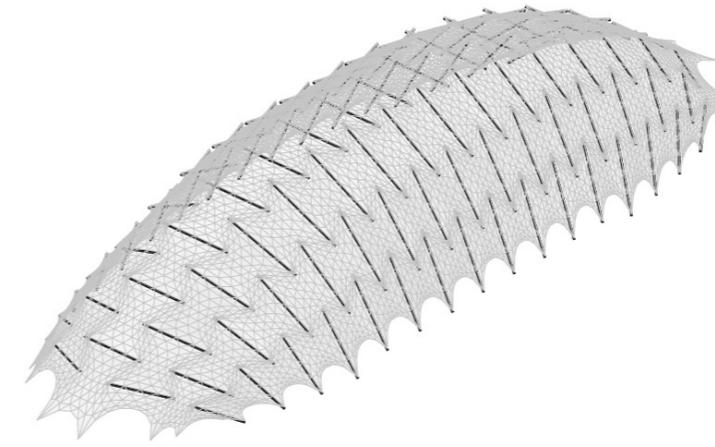
Analisi applicazione

MOOM padiglione temporaneo



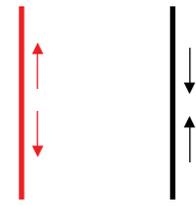
74

schematizzazione
struttura

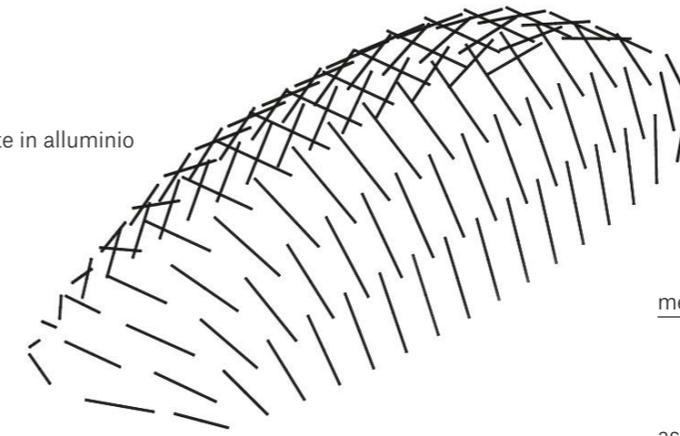


azioni:

- elementi tesi
- elementi compressi



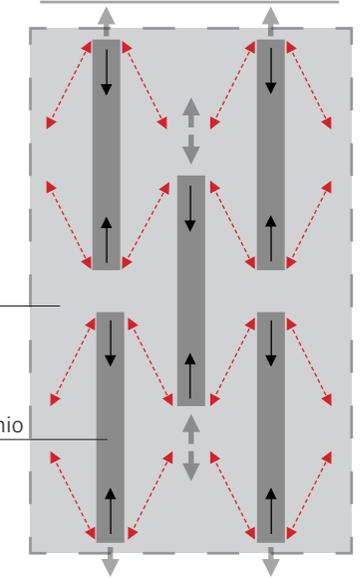
aste in alluminio



membrana

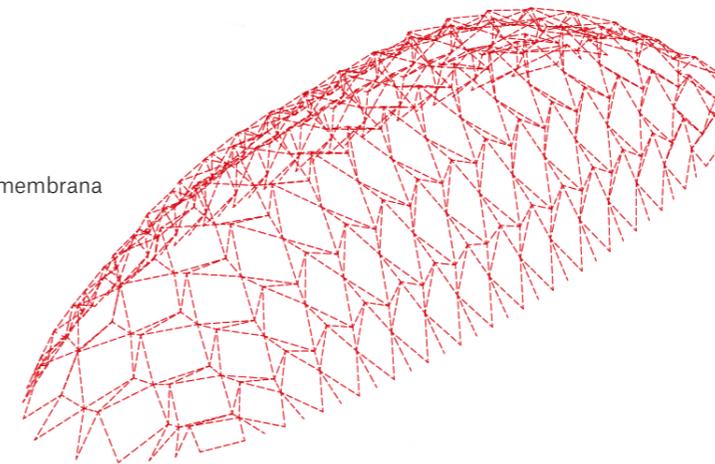
asta in alluminio

ancoraggio



ancoraggio

membrana



75

Tavolo 714
Designer Theodore Waddell
produzione Cassina
anno 1973

Il tavolo nasce dalle ricerche intraprese negli anni '50 da Theodore Waddell, architetto e industrial designer, sui sistemi tensegrali brevettati da Buckminster Fuller.

Partendo da alcune esperienze iniziate nel 1956 per la creazione di tavoli con strutture portanti estremamente leggere, concepite sul principio della tensegrità, Theodore Waddell arriva a metà degli anni sessanta a incrociare la ricerca di Buckminster Fuller e questo lo porta a studiare alcuni innovativi sistemi brevettati dal tecnologo americano.

Waddell, nel suo libro "Design without fashion" e nella pubblicazione "Made in Cassina" descrive come sia arrivato alla soluzione di questo particolare tavolino prodotto da Cassina: *"L'espressione coniata da Fuller - tensegrity - indica una struttura di pura tensione e compressione, priva di forze flettenti. Gli elementi di compressione (puntoni), ovvero le gambe del tavolo, sono separati da tiranti e non sono mai collegati tra loro. Nel 1972 questo tipo di struttura, mai usata nella progettazione di pezzi di arredamento, offriva la soluzione ideale per tenere in piedi qualcosa mediante cavi:*

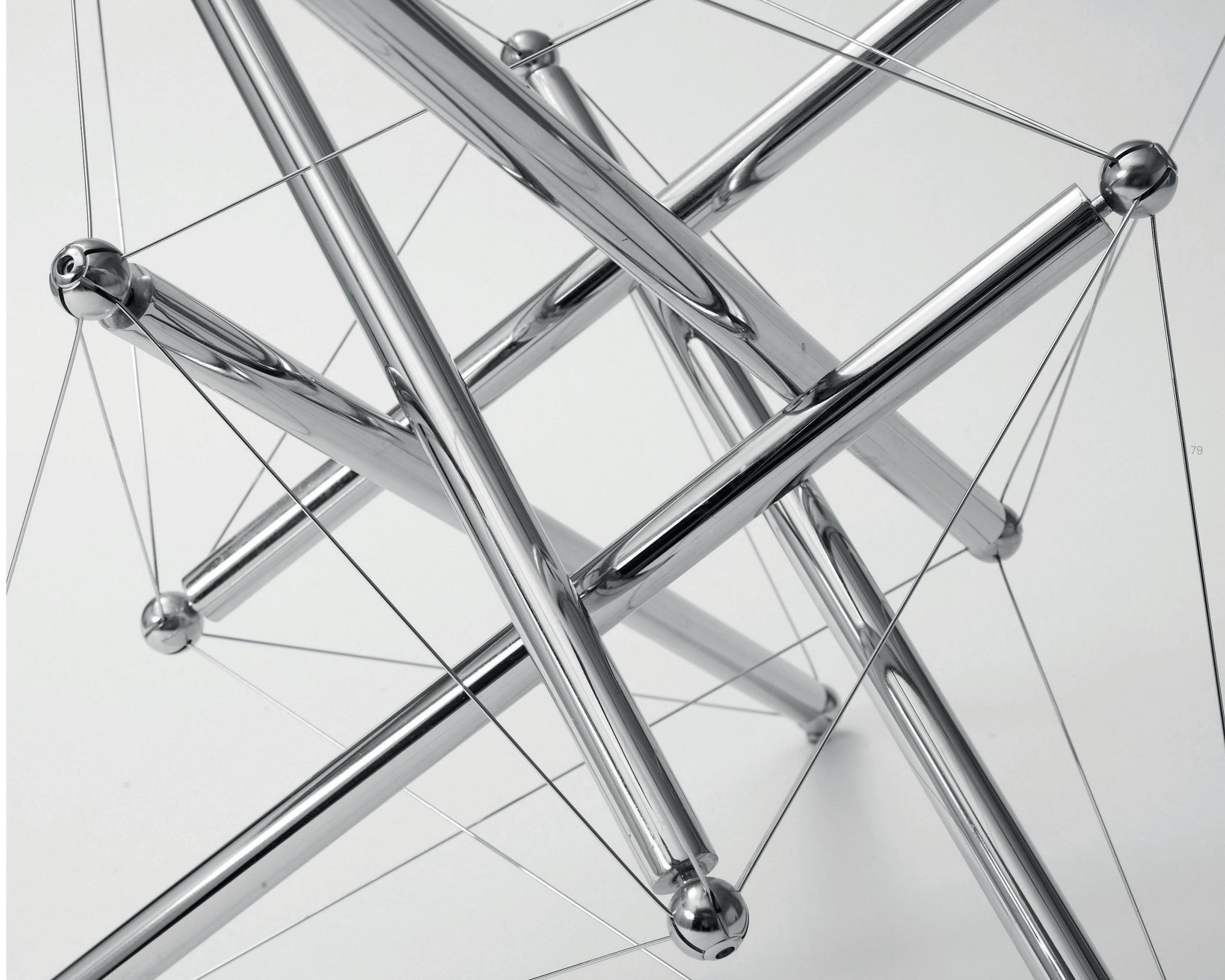


Ingombro massimo: 135cm x 72 cm
mod. 714;
100 cm x 43 cm mod.713
Peso complessivo: 60 kg mod. 714
Materiali: acciaio cromato - vetro

78 questi tavoli hanno sei gambe, tre delle quali sostengono il piano di vetro ma non toccano il pavimento, mentre le altre tre, all'interno toccano terra senza sfiorare il top. Le gambe non si toccano tra loro. Un sistema "tensintegro" convenzionale presenterebbe tiranti di connessione tra le estremità dei puntoni, cioè delle gambe, a rafforzare la struttura. Ma ciò significherebbe tra cavi a livello del pavimento e tre proprio sotto il piano di vetro. Lavorando su questi problemi sono arrivato a mettere a punto una mia apposita soluzione per un adeguato sistema di equilibrio.

All'epoca non esistevano computer in grado di calcolare la lunghezza del cavo che avrebbe permesso la spaziatura ideale, quindi l'intero prototipo venne realizzato con morsetti che tenevano insieme le gambe e tenditori per modificare la lunghezza dei cavi. Dopo settimane di prove e verifiche che continuavano a produrre soluzioni con limiti alti e bassi, ma tensioni intermedie inadeguate, alla fine arrivai a trovare le giuste proporzioni."

L'obiettivo iniziale di questo progetto era quello di progettare un tavolo ispirato al Dining Table di Saarinen del 1956: un tavolo che desse l'impressione di un'impossibilità strutturale, ma che non necessitasse di essere imbullonato al pavimento.



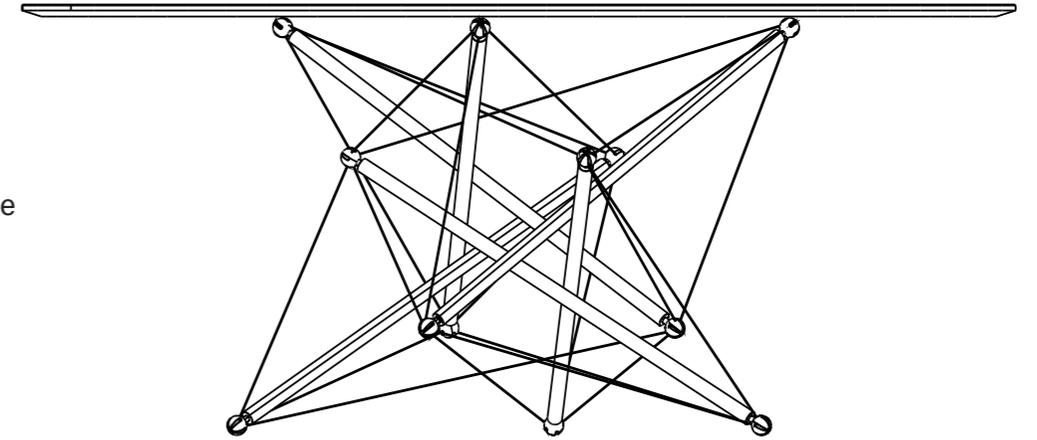
Analisi applicazione

Tavolo 714 Cassina



80

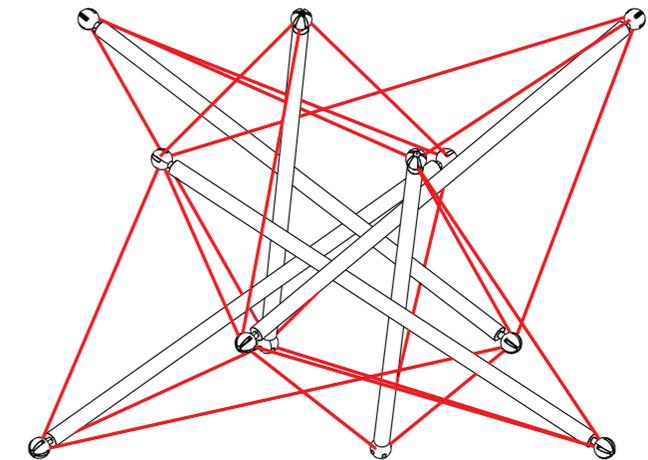
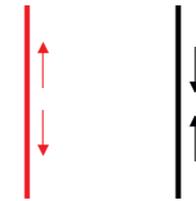
schematizzazione
struttura



81

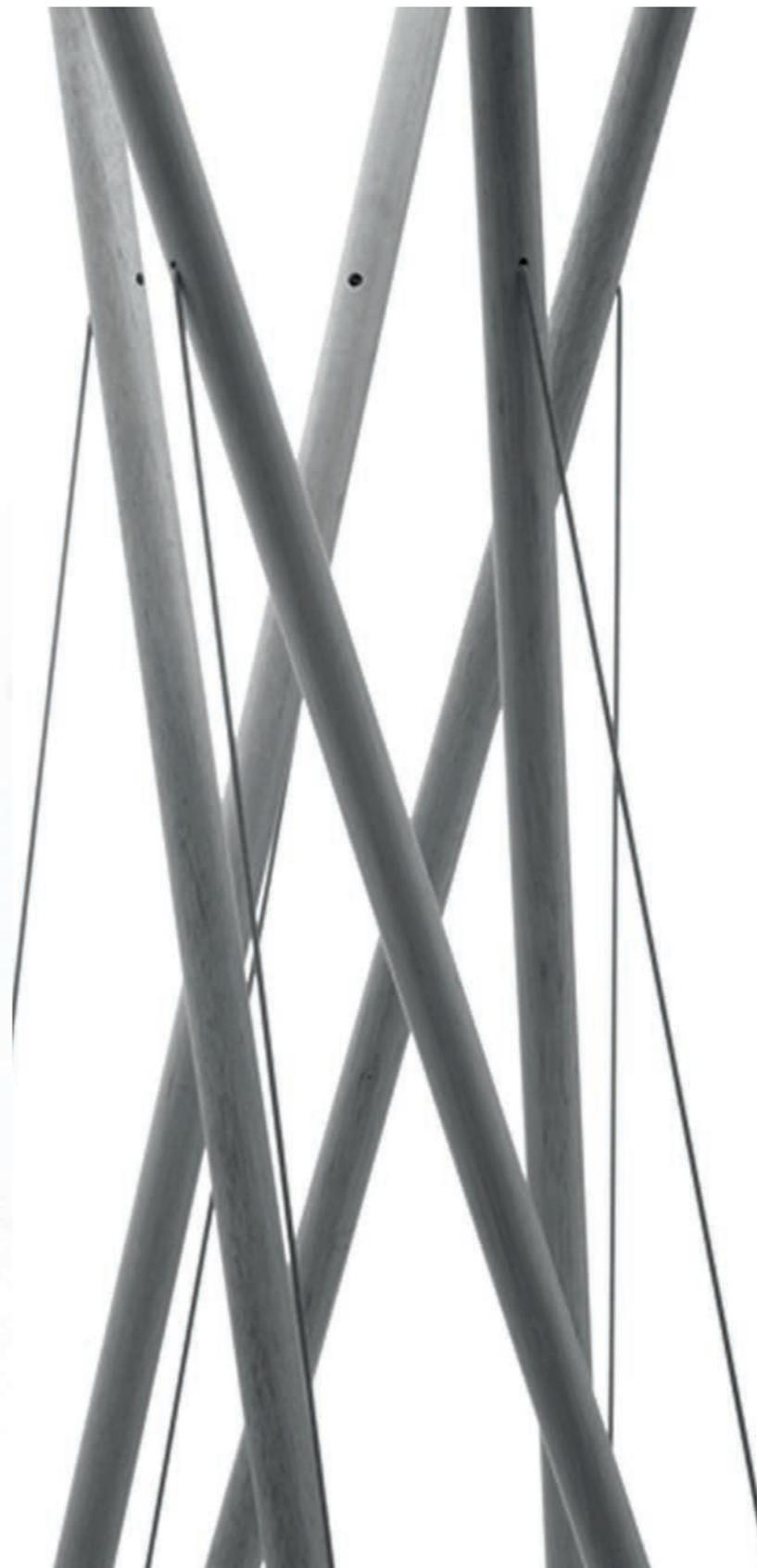
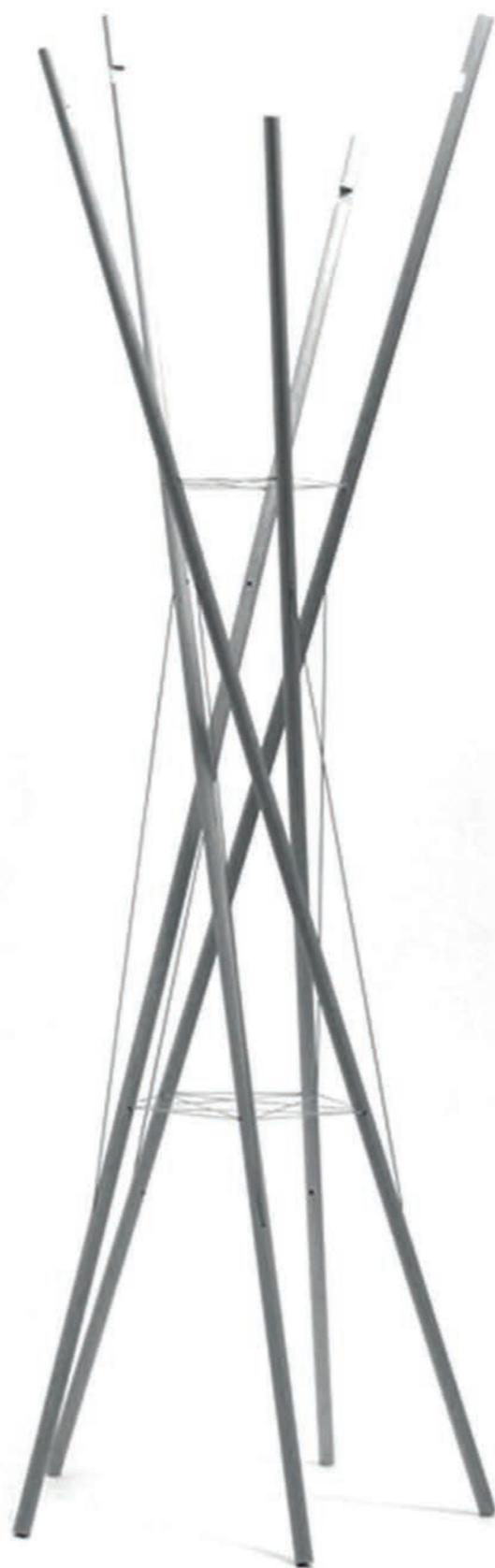
azioni:

- elementi tesi
- elementi compressi



Coat hanger tree
Designer Naruse Inokuma
Architects
anno 2009

Lo studio di Tokyo Naruse Inokuma Architects ha progettato un appendiabiti composto da cinque pali di legno tenuti insieme da uno spago. **Sfruttando il principio della tensegrità, l'intera forma si mantiene solo con l'equilibrio della tensione delle corde sebbene i cinque bastoncini non si tocchino l'un l'altro.**



Analisi applicazione

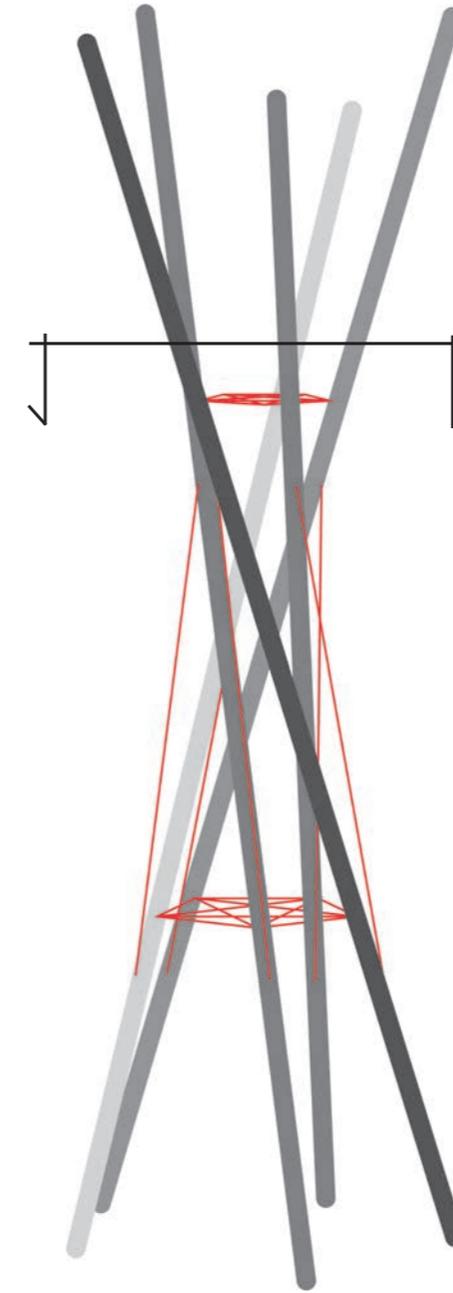
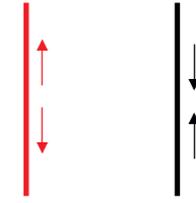
Naruse Inokuma
Coat hanger tree



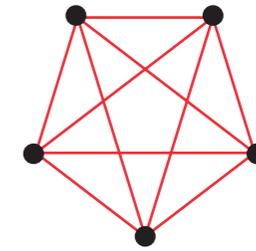
schematizzazione
struttura

azioni:

- elementi tesi
- elementi compressi



sezione



Strange Tensegrity Table 3
Designer DDAA
(Giappone)
anno 2017 - 2019

Questo progetto si basa su metodologie e sperimentazione di materiali e processi di creazione. **L'esigenza era quella di una produzione a basso costo con del materiale, nello specifico il filo, fornito dal cliente. Il designer ha pensato di utilizzare la struttura tensegrale con il filo ed elementi in compressione fatti di materiale economico in modo da realizzare comunque una produzione in serie.**

È stata sfruttata la struttura tensegrale perché ritenuta un sistema molto razionale in ragione del fatto che la proporzione complessiva viene determinata quasi automaticamente dalla lunghezza degli elementi di compressione.

Sfruttando tale sistema si possono sperimentare materiali inusuali le cui variabili morfologiche determinano la composizione complessiva.

Per la realizzazione di questi artefatti si è utilizzato un legname galleggiante denominato "shareboku" (che in giapponese significa legno battuto dalle intemperie) come elemento di compressione.

Shareboku è un termine utilizzato nell'arte dell'ikebana (composizione floreale giapponese) che si riferisce a rami duri e contorti privati della corteccia.



Analisi applicazione

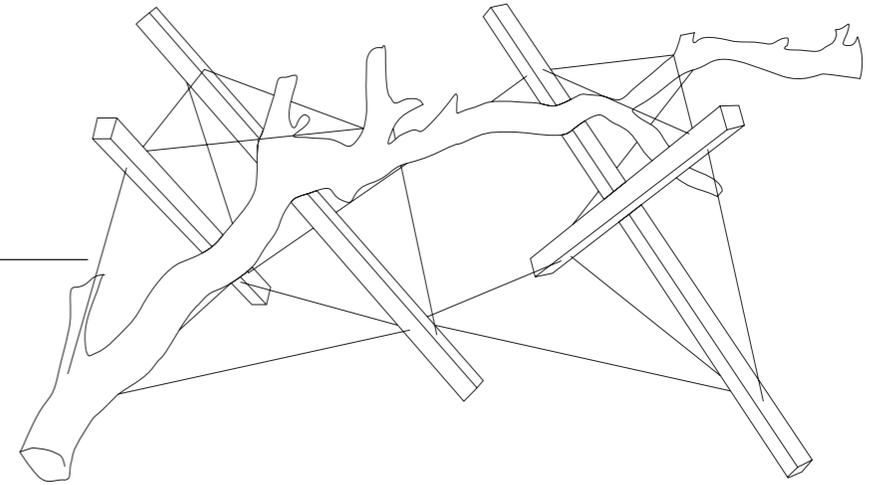
Strange Tensegrity Table

88



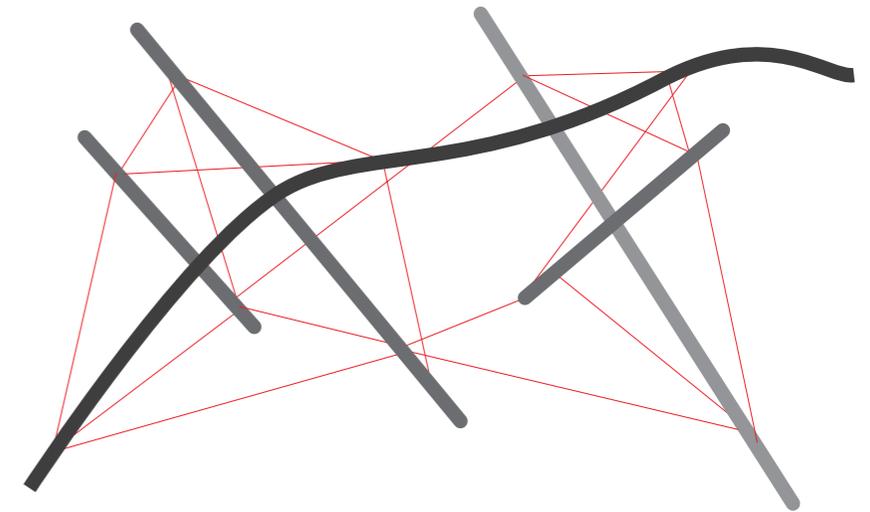
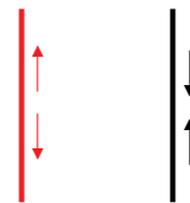
schematizzazione
struttura

elementi in legno e metallo



89

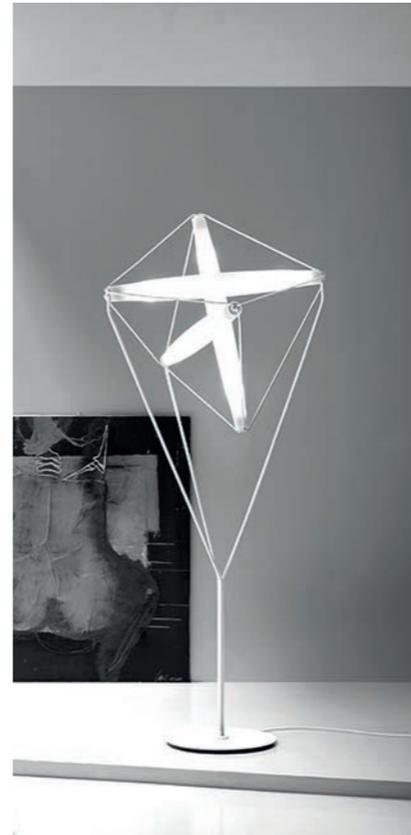
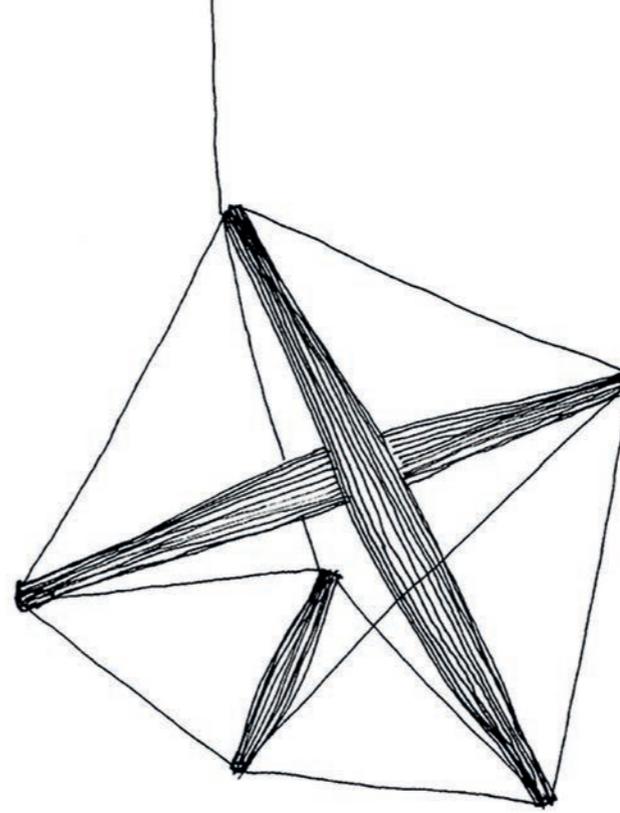
azioni:
● elementi tesi
● elementi compressi



Bucki Lamp
Studio Lagranja Design - Spagna
produzione Pallucco
anno 2011

La lampada Bucky è una tensegrale disegnata dallo studio spagnolo Lagranja, composta da tre canne in vetro soffiato bianco latte.

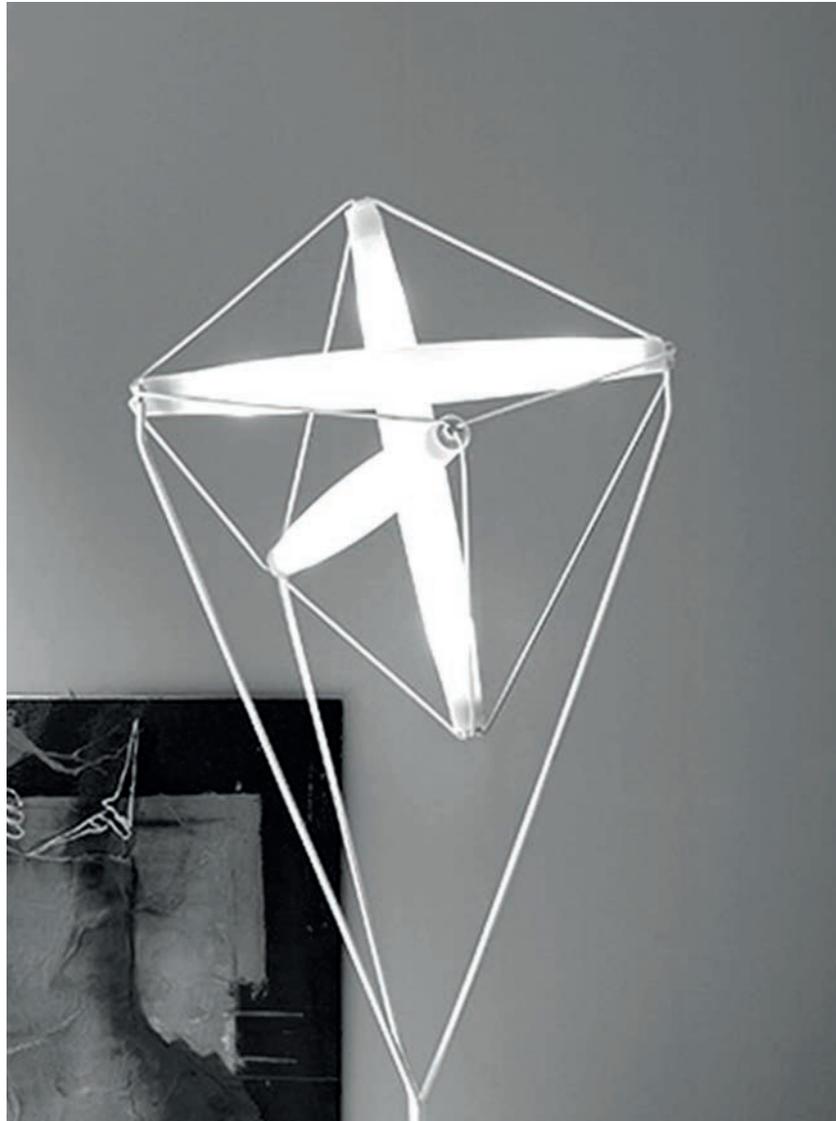
Le bacchette in vetro soffiato sono sostenute dal cavo in silicone, che trasporta anche i fili per la corrente elettrica, il quale viene teso per produrre una struttura rigida e minimale.



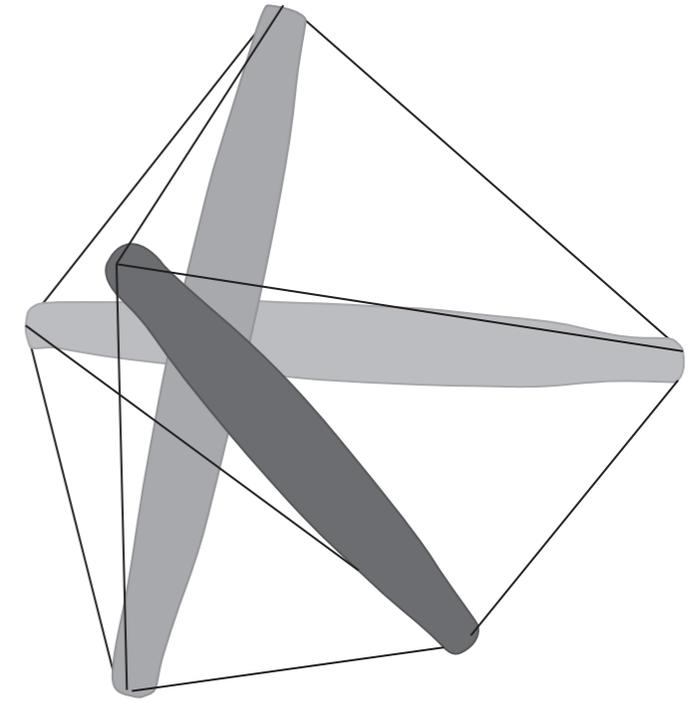
Analisi applicazione

Bucki Lamp

92

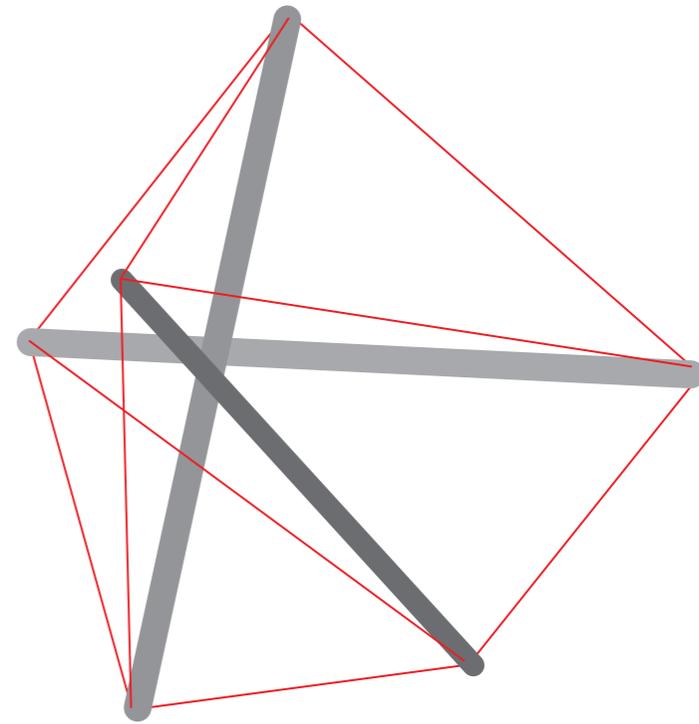
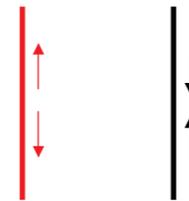


schematizzazione
struttura



93

azioni:
● elementi tesi
● elementi compressi



Bag Chair
Design James Piatt
anno 1998

La seduta tensile ha il rivestimento realizzato con una membrana in neoprene elastico tale da rendere il sistema flessibile, conformabile e trasportabile.

Il rivestimento assicura la struttura interna, costituita da quattro barre in alluminio che a loro volta lasciano le impronte sul rivestimento stesso, creando un gioco di curve tra struttura e contenuto, ridefinendo la forma ogni volta che la seduta viene conformata con l'utilizzo.



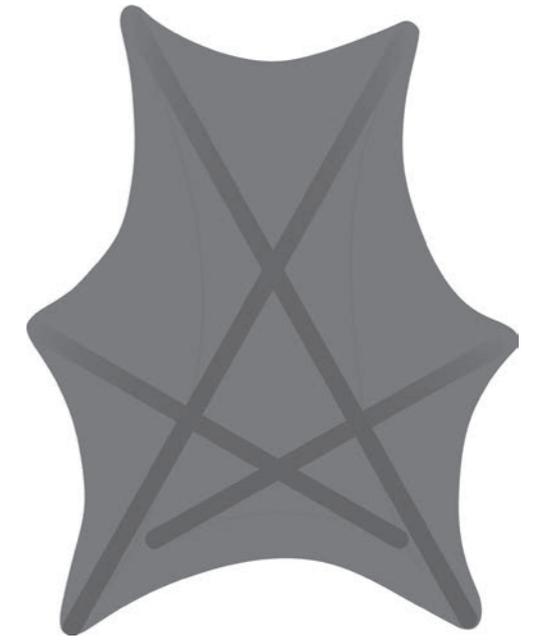
Analisi applicazione

Bag Chair

96

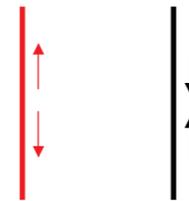


schematizzazione
struttura



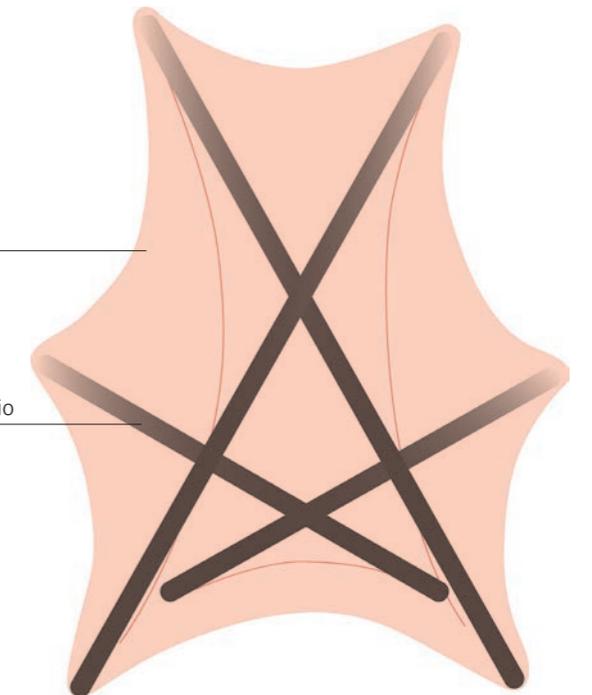
97

azioni:
● elementi tesi
● elementi compressi



membrana

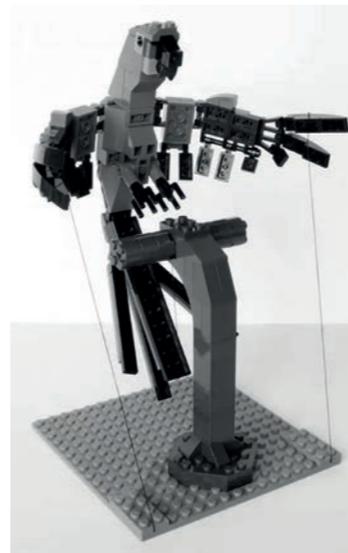
aste in alluminio

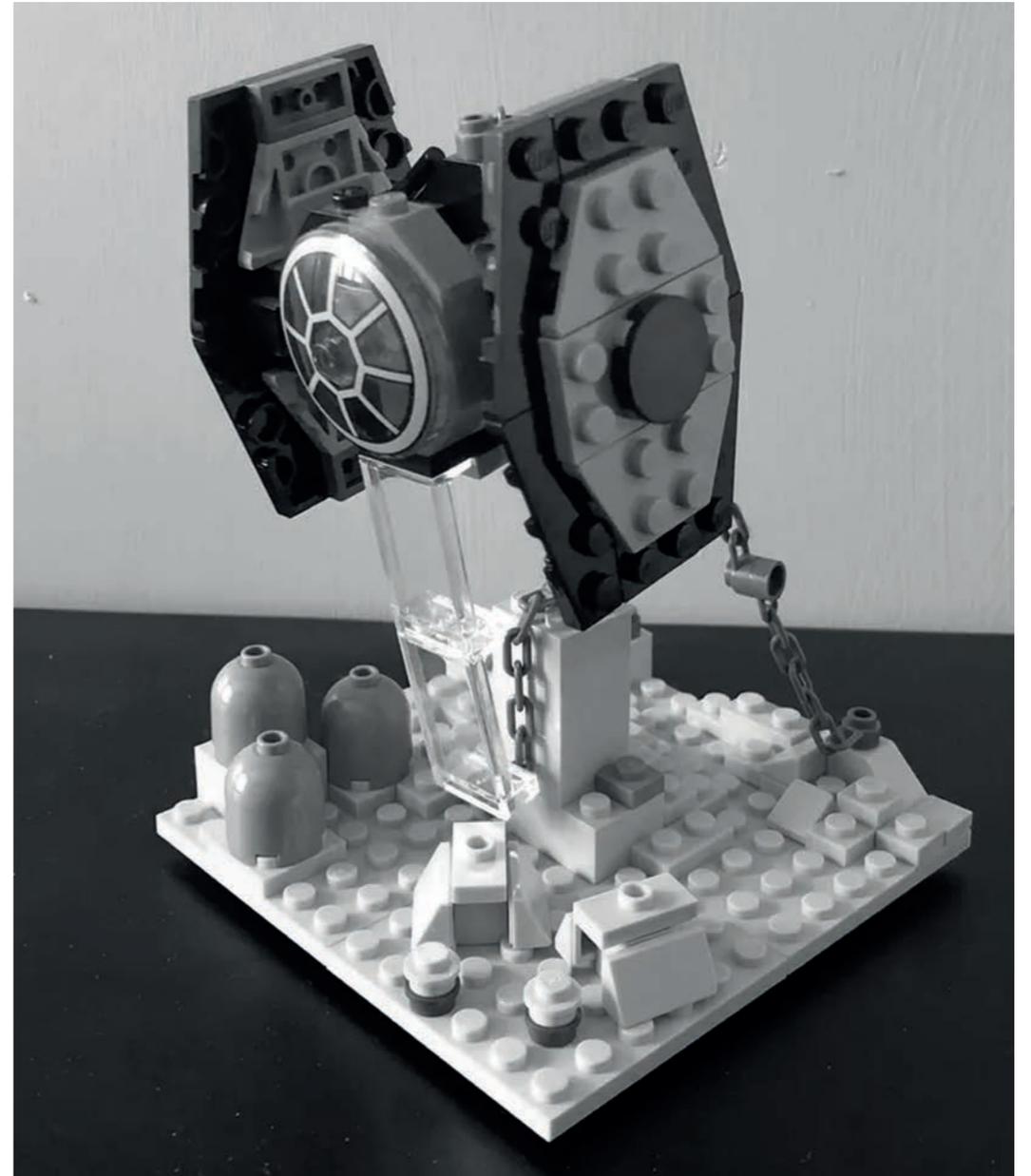


Sperimentare la Tensegrità: Il Contest Lego

La tensegrità può essere anche un gioco per la mente. LEGO ha lanciato nel 2020 un contest online fra i creativi di tutto il mondo per realizzare strutture con i mattoncini sfruttando il principio dei sistemi tensegrali. Questa è stata la call lanciata sul web: *“Tensegrity has taken the Lego world by storm over the past week and we would love to see what kind of fantastical “floating” creations you can make using the structural principle of tensegrity! to show us that your build actually works, you must build your creation using real lego bricks and include a short video showing your creation.”*

La versatilità dei mattoncini ha permesso ai creativi di tutte le età e ai LEGO addicted di sbizzarrirsi a livello mondiale nella creazione di forme estreme, molte delle quali sono pubblicate al link del contest (vedi QR code). **Questo approccio ludico ha avuto anche una valenza educativa, poiché ha contribuito ad ampliare la conoscenza di questa particolare soluzione strutturale, rendendo la sperimentazione in tale ambito accessibile sfruttando il gioco e la competizione.**





02/ Evoluzione storica

- / 02.1 Sistemi proto-tensegrali
- / 02.2 Sistemi tensegrali
- / 02.3 Sviluppi e brevetti

La tensegrità (tensional integrity o floating compression), è un principio strutturale basato sull'utilizzo di componenti isolati in compressione all'interno di una rete di tensione continua, in modo tale che gli elementi compressi (solitamente barre o puntoni) non si tocchino e gli elementi precompressi in tensione (di solito cavi o tiranti) delineino il sistema spazialmente.

I sistemi tensegrali sono quindi strutture reticolari spaziali formati da componenti compressi (aste) e tesi (cavi), che si trovano in uno stato di autoequilibrio in cui i componenti compressi si trovano all'interno della struttura e in cui i bordi esterni della stessa sono invece individuati dalla rete di elementi tesi.

La parola tensegrity, coniata nei primi anni '50 del 1900 da R. Buckminster Fuller, deriva dalla crasi di due parole inglesi "tensional" ed "integrity".



Immagine della Seconda Mostra di Primavera dell'OBMOKhU Bolshaia Dimitrovskaja, Mosca. Nel 1921 i Costruttivisti espressero le loro idee in un'ambiziosa mostra sotto il patrocinio della Società dei Giovani Artisti, la OBMOKhU. Quattro artisti, Alexander Rodchenko, i fratelli Georgii e Vladimir Stenberg, Konstantin Medunetskii e Karlis loganson esposero un totale di 25 costruzioni spaziali. Le nove strutture tridimensionali di loganson, definite "costruzioni autostabilizzanti", mostravano gli innovativi principi di sollecitazione di tipo tensegrale. Tutte tranne due di queste costruzioni (una di Rodchenko attualmente al MoMA e una di Medunetskii a Yale) sono scomparse, comprese le nove costruzioni di loganson.

Le origini dei sistemi tensegrali sono legate ai tre inventori: Kenneth D. Snelson, Richard Buckminster Fuller e David Georges Emmerich.

La prima struttura collocabile nella categoria del sistema proto-tensegrale trova riferimento nella ricerca condotta dai costruttivisti russi, descritta in un libro di Laszlo Moholy Nagy, "Von Materiel zu Architektur", pubblicato per la prima volta nel 1929 e successivamente nel 1968. Nagy includeva due fotografie della Seconda Mostra di Primavera tenutasi a Mosca nel 1921 che mostrano una struttura di equilibrio (Gleichgewichtskonstruktion) dello scultore Karl Johanson.

Kārlis Johansons, alias Karl Johanson

(1890-1929) era un artista d'avanguardia lettone. Durante gli anni della Rivoluzione Russa visse a Mosca dove fu parte attiva nel Movimento Costruttivista.

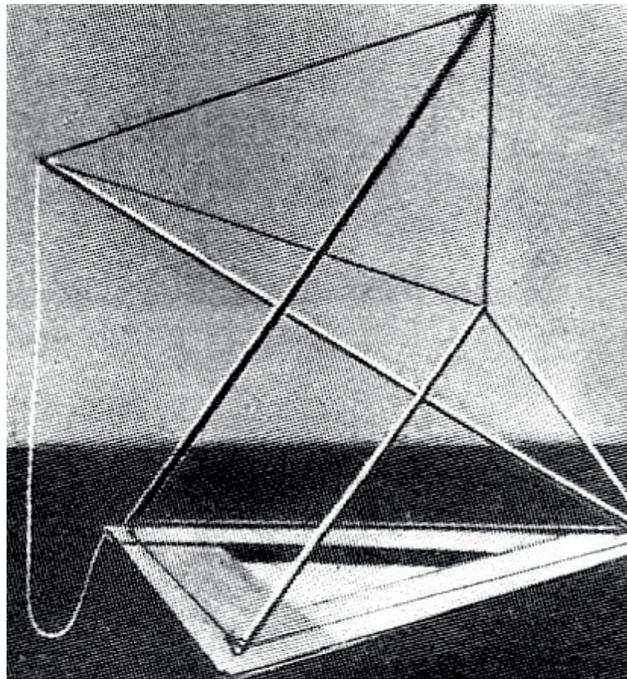
All'inizio del XX secolo realizzò strutture spaziali tridimensionali nell'intento di creare una nuova forma d'arte che materializzasse le dinamiche della vita sociale attraverso opere visionarie.

Le sue "costruzioni autostabilizzanti" sono considerate prototipi dei sistemi di costruzione tensegrali ulteriormente sviluppati da Richard Buckminster Fuller e Kenneth Snelson negli anni '50.



Kārlis Johansons

"Dalla pittura alla scultura, dalla scultura all'architettura, dall'architettura alla tecnologia e all'invenzione, questo è il percorso che ho scelto, e sicuramente diventerà il fine ultimo di ogni artista rivoluzionario".



Kārlis Johansons
Studio in equilibrio

Moholy Nagy ha illustrato questa struttura "Studio in equilibrio", spiegando "...che se si tirasse il filo, la composizione cambierebbe in un'altra posizione e configurazione, pur mantenendone l'equilibrio".

Emmerich, nella descrizione di quest'opera, scriveva:

"Questa curiosa struttura è composta da tre barre e sette cavi ed è gestita per mezzo di un ottavo cavo non sollecitato, il tutto deformabile".

Era una struttura composta da tre barre, sette corde e un ottavo cavo senza tensione che serviva a modificare la configurazione del sistema, ma mantenendone l'equilibrio.

Tuttavia, l'assenza di precompressione, che è una delle caratteristiche dei sistemi tensegrali, non permette di considerare la "scultura/struttura" di Johansons la prima di questo tipologia di strutture.



Tutto il lavoro di Johansons si riferiva ad un concetto fondamentale, ovvero come si verifica la stabilità strutturale della tensione quando gli oggetti sono legati tramite un semplice contatto senza fusioni, leganti o reazioni chimiche.

Johansons indagando con il suo lavoro le intersezioni tra i materiali, ha definito le connessioni "fredde", riferendosi alle rivettature, e "calde" riferendosi alle saldature, sostenendo che "Tutte le giunture fredde sono croci".

Egli definiva quale massima ambizione di ogni artista rivoluzionario quella di intraprendere: "un percorso dalla pittura alla scultura, dalla scultura alla costruzione, dalla costruzione alla tecnologia e invenzione". I giovani costruttivisti erano interessati agli esperimenti, alla ricerca di forme inedite e innovative ed erano spinti dalla fiducia che l'arte sarebbe stata in grado di incarnare un nuovo mondo.

Kārlis Johansons
Construction from Spatial Cros
1920

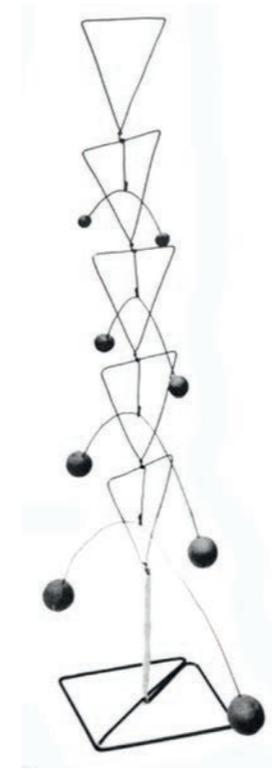
/ 02.2 Sistemi tensegrali

La tensegrità è un sistema in via di sviluppo e relativamente nuovo (poco meno di 60 anni) che crea figure sorprendenti, leggere e adattabili. Le origini dei sistemi tensegrali sono legate ai tre inventori: Kenneth D. Snelson (USA 1927-2016), Richard Buckminster Fuller (USA 1895-1983), e David Georges Emmerich (FR 1925-1996).

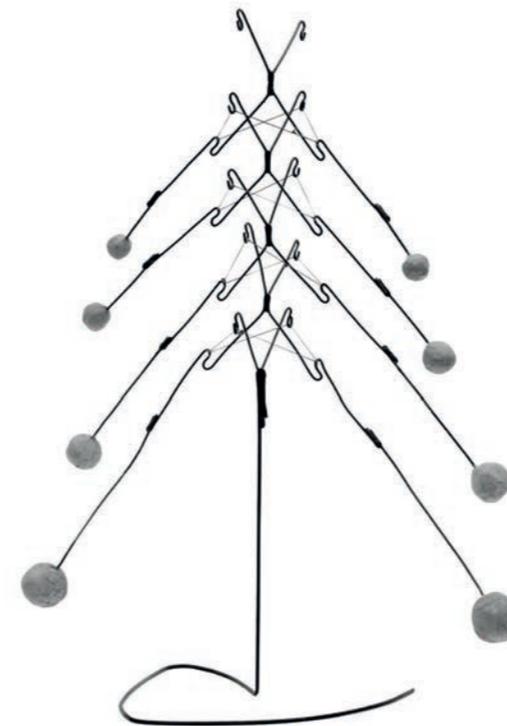
K.D. Snelson, allievo di Richard Buckminster Fuller, ha affrontato l'approccio artistico dei sistemi tensegrali come sculture nello spazio esplorando forme diverse, asimmetriche, lontane da qualsiasi configurazione classica. In contrasto con Snelson, Fuller ed Emmerich si sono concentrati maggiormente sull'aspetto fisico e matematico di questi sistemi cercando di trovare l'effettiva applicazione nell'architettura e nell'ingegneria.

Si sono occupati dello sviluppo di sistemi tensegrali sferici e unidimensionali, dando il via ad altri scienziati per indagare maggiormente sull'approccio strutturale di essi.

Il concetto base di "tensegrità", risale al 1948, quando Kenneth Snelson, allora studente di arte presso il Black Mountain College (North Carolina, USA) ispirato dalle lezioni sui sistemi geometrici di uno dei suoi nuovi docenti, Richard Buckminster Fuller (un carismatico e anticonformista architetto, ingegnere, matematico, cosmologo ed inventore), raggiunse la prima configurazione riconducibile al concetto di "floating compression".



K. Snelson - Moving Column, 1st Study, 1948



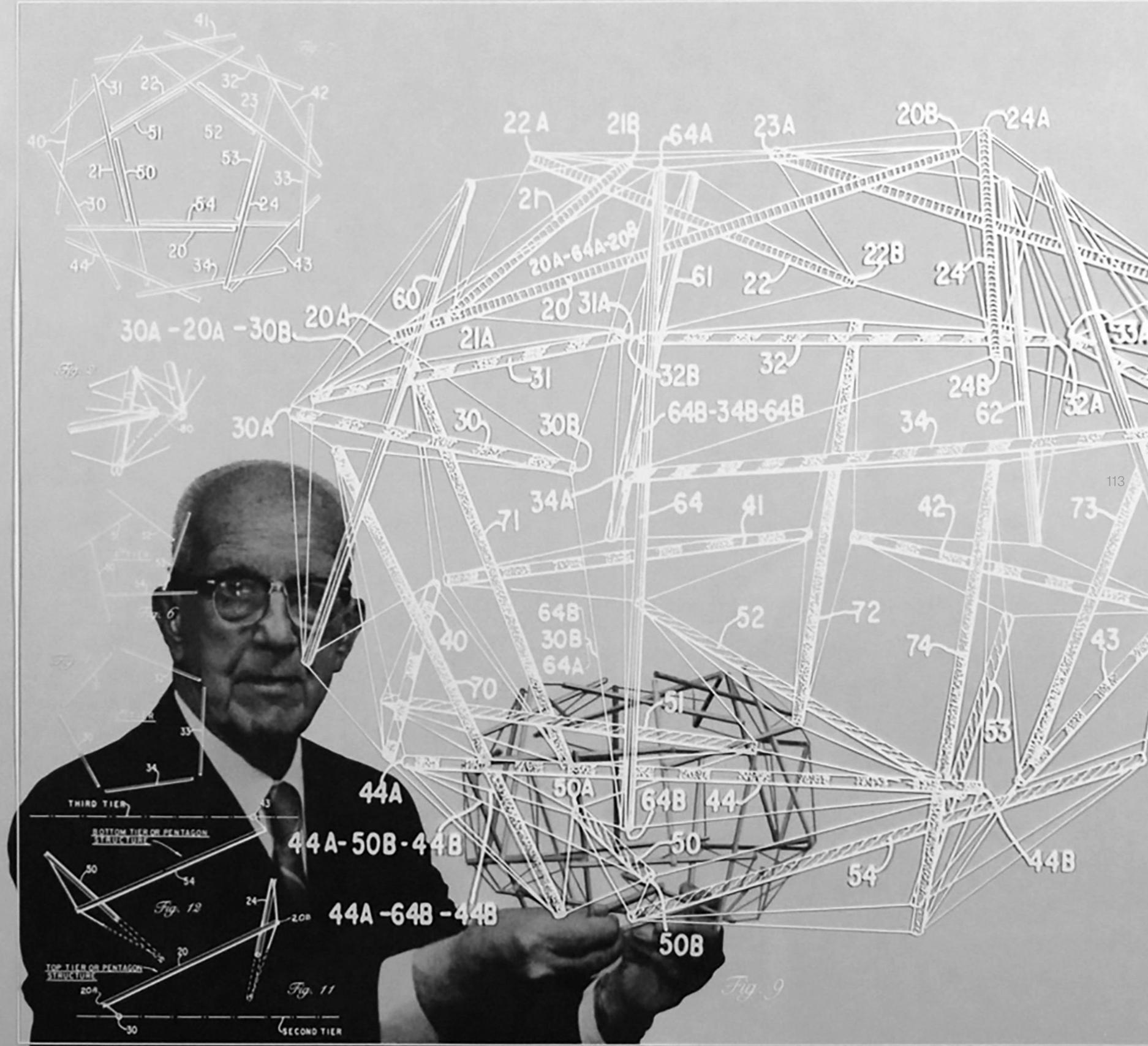
K. Snelson - Moving Column, 2nd Study, 1948

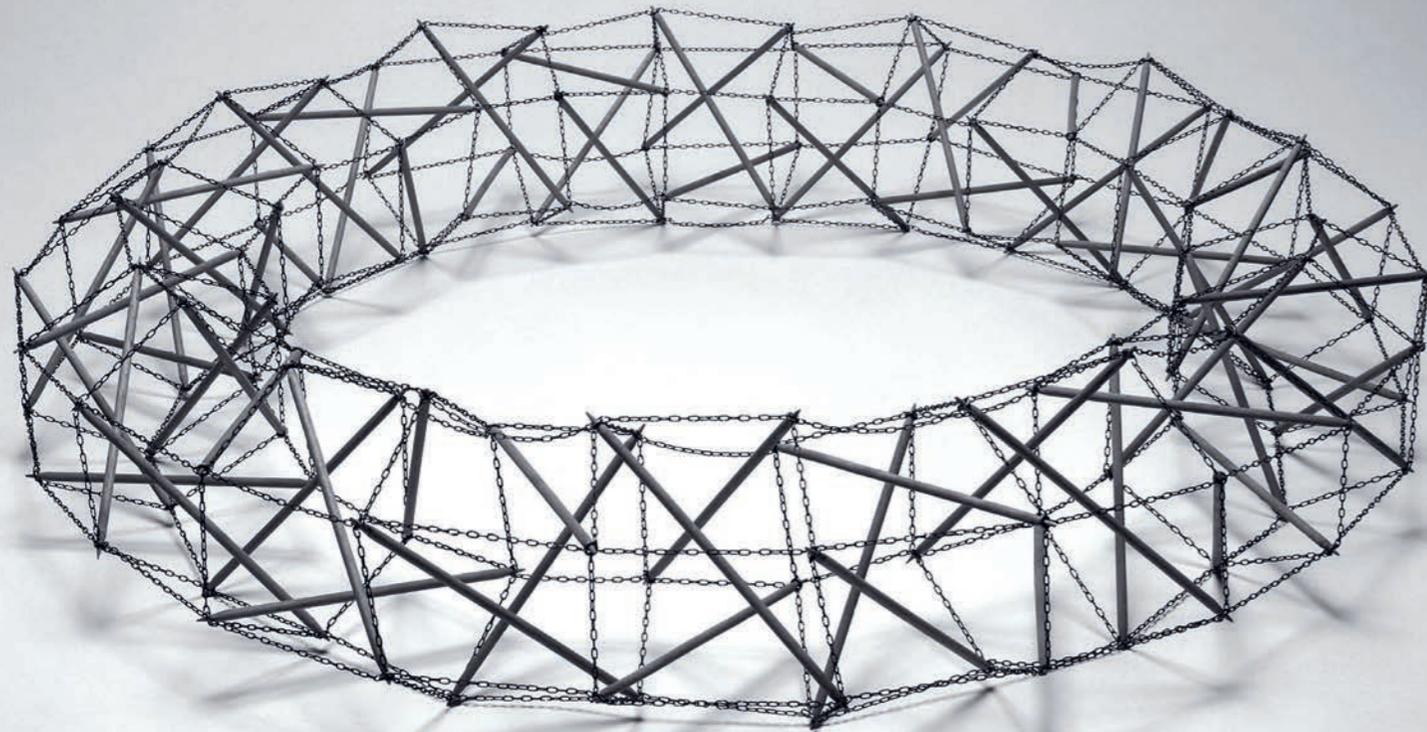


K. Snelson - Early X-Piece, 1948
legno e nylon
primo esempio documentato
del concetto di tensegrità

Fuller si rese subito conto dell'importanza dei lavori di Snelson e si affrettò a sviluppare queste idee, che a detta sua erano la prova di tutte una serie di teorie a cui stava lavorando da anni. Coniando inoltre un nome "adeguato" alla portata della scoperta (tensegrity appunto) riuscì per molto tempo a far pensare che l'intuizione fosse la sua. Parallelamente ma in maniera indipendente, in quegli stessi anni in Francia, David Georges Emmerich, ungherese di nascita ma francese di adozione, forse ispirato dalla struttura di Karl Loganson, unico esempio noto di struttura "prototensegrale", cominciò a studiare diverse strutture tridimensionali tensionali che lui chiamava "strutture tese ed autotendenti", arrivando a soluzioni assolutamente simili a quelle sviluppate da Fuller e Snelson.

Fuller con una sfera tensegrale





Anello tensegrale di Emmerich

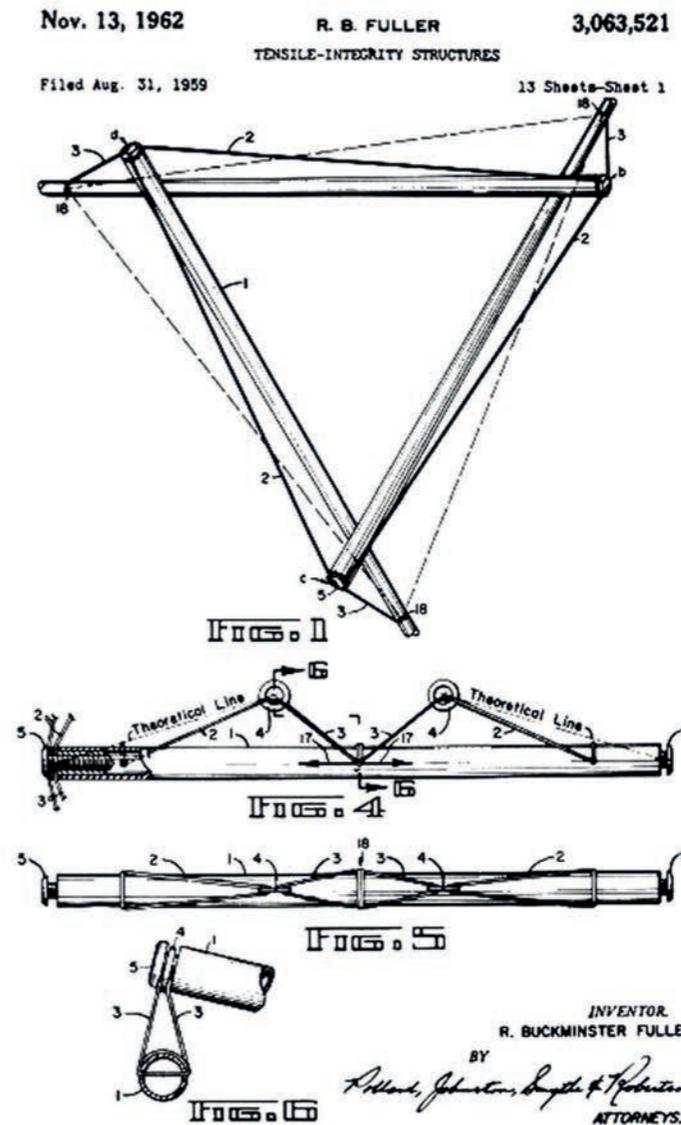
Lo sviluppo di tali strutture seguì strade differenti. Snelson cominciò a studiarne i concetti fondamentali che ne erano alla base, ma data la sua formazione di artista si focalizzò sull'aspetto artistico ed estetico producendo sculture di incredibile bellezza e complessità, con una tecnica di montaggio ed assemblaggio di grande pulizia, affinata nei decenni. Fuller ed Emmerich, invece, cercarono fin dall'inizio applicazioni in ambito costruttivo ed architettonico e tentarono anche di impostare il problema in termini geometrico/matematici, anche se i loro studi rimasero principalmente fondati su prove empiriche e sulla realizzazione di modelli di studio.

Dalle attività di ricerca svolte durante gli anni 60' nel campo delle tensegrali nacquero domande di brevetto, rilasciate parallelamente dai tre inventori. Tali documenti sono considerati come testimonianze inoppugnabili in merito alla paternità dell'invenzione e un riferimento per la precisazione delle definizioni. In ordine cronologico furono registrati diversi brevetti.

Tensegrity Patent

11/13/62

Tensegrity is the physical phenomenon that produces a stable geometric structure with solid members that are arranged in tandem with tense metal cables. The solid members of this system do not touch or support each other directly.



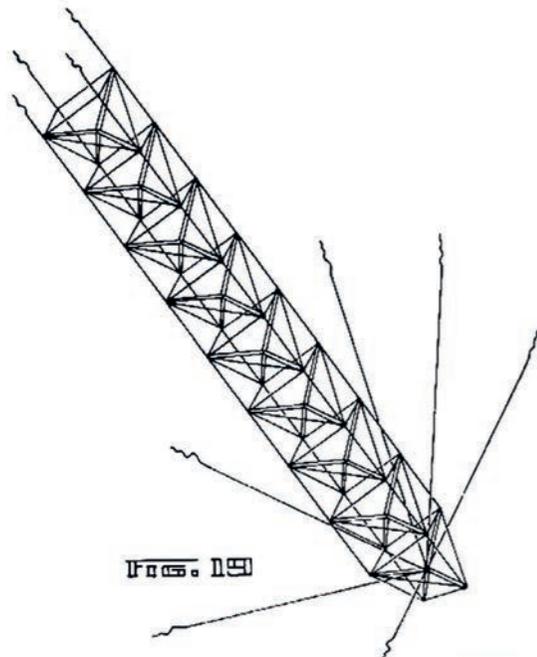


FIG. 14

INVENTOR
 R. BUCKMINSTER FULLER
 BY
Pollard, Johnston, Langley & Robinson
 ATTORNEYS

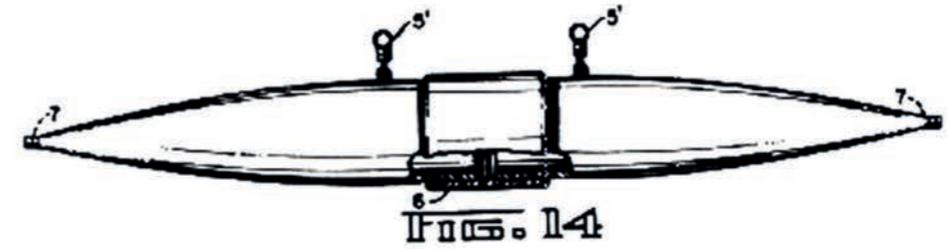


FIG. 14

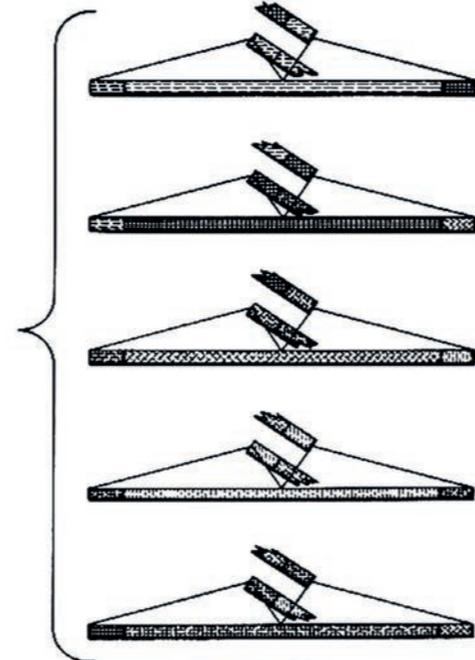


FIG. 15

Legend
 SILVER
 BLACK
 ORANGE
 PURPLE
 YELLOW

INVENTOR
 R. BUCKMINSTER FULLER
 BY
Pollard, Johnston, Langley & Robinson
 ATTORNEYS

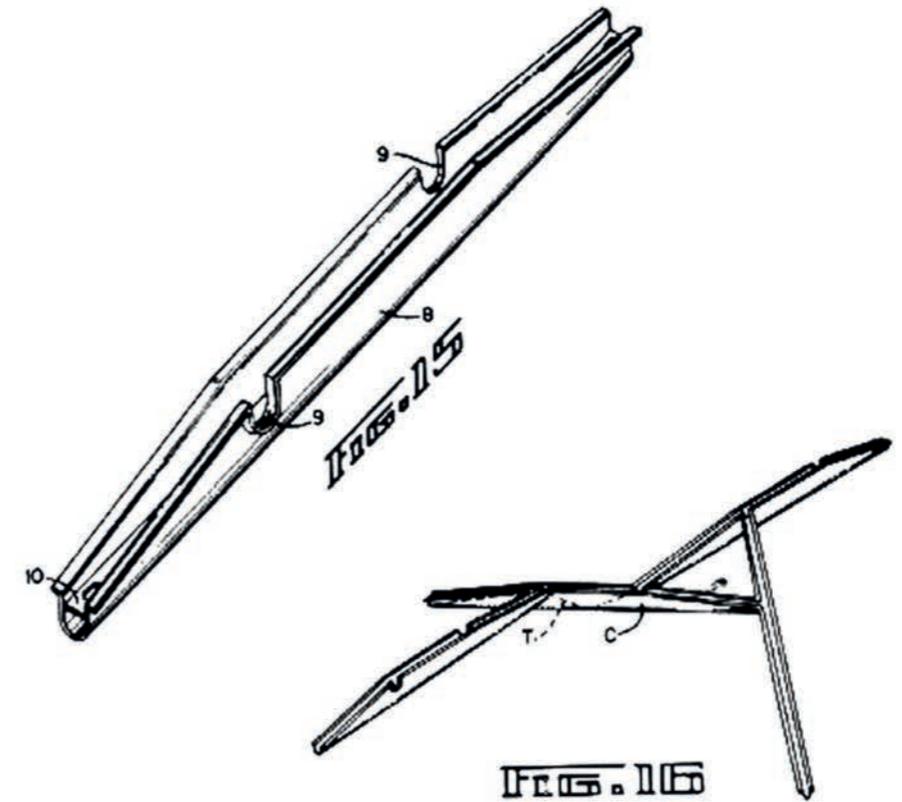
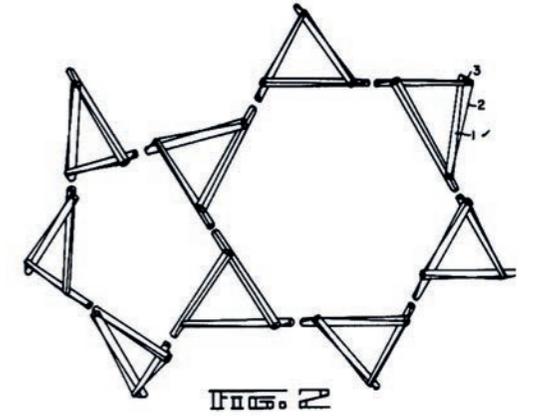
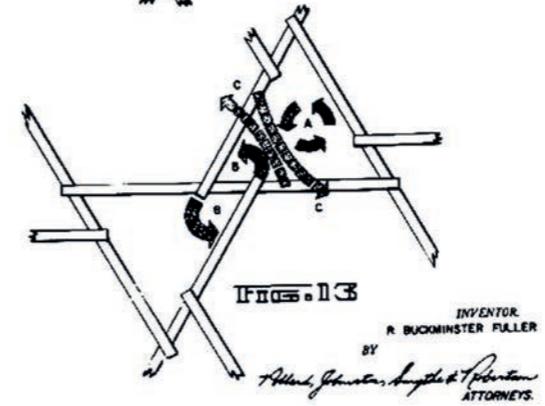
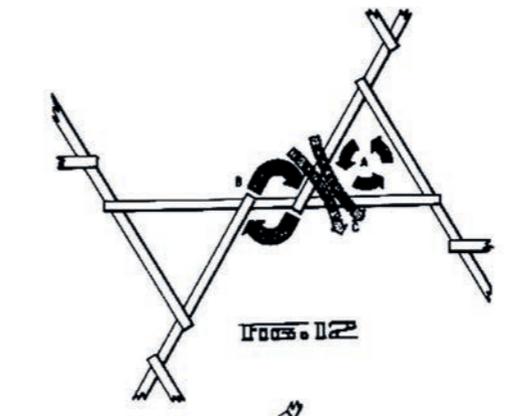
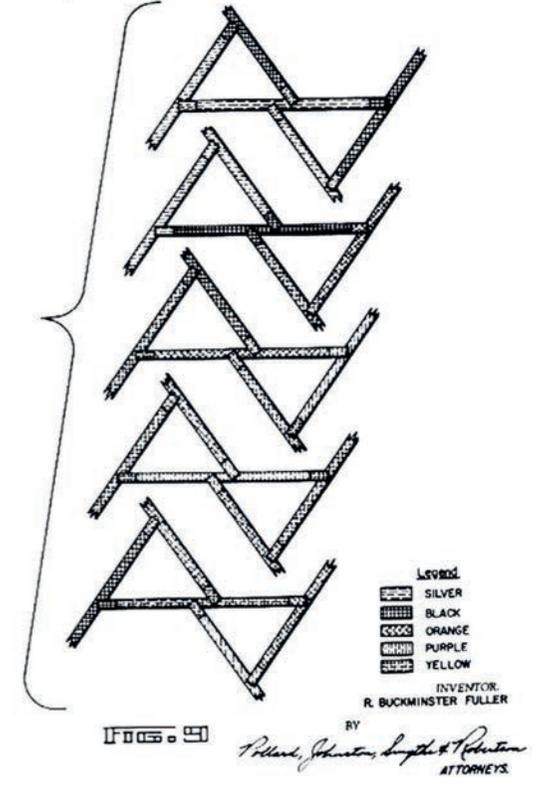
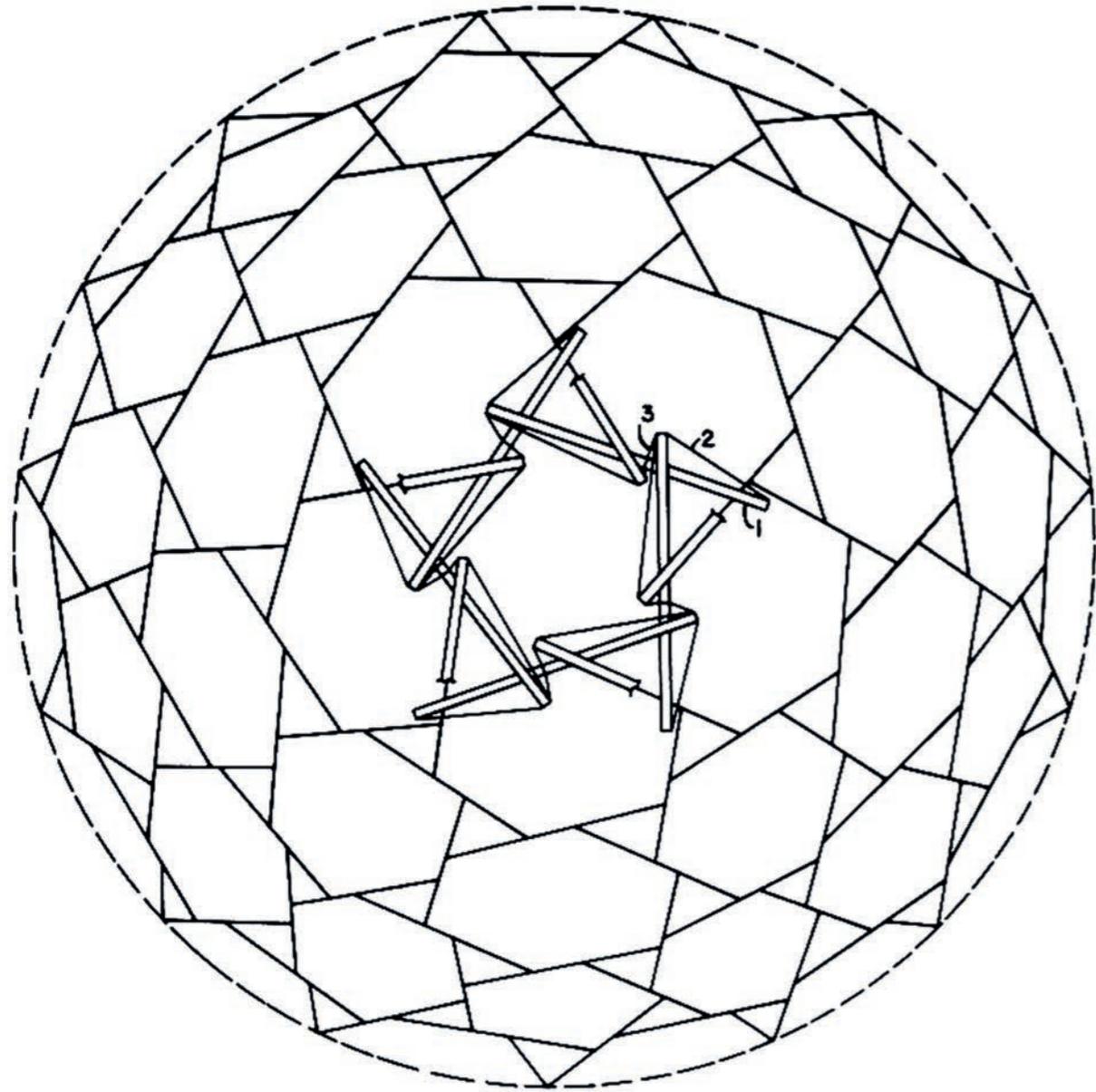


FIG. 16

INVENTOR
 R. BUCKMINSTER FULLER
 BY
Pollard, Johnston, Langley & Robinson
 ATTORNEYS



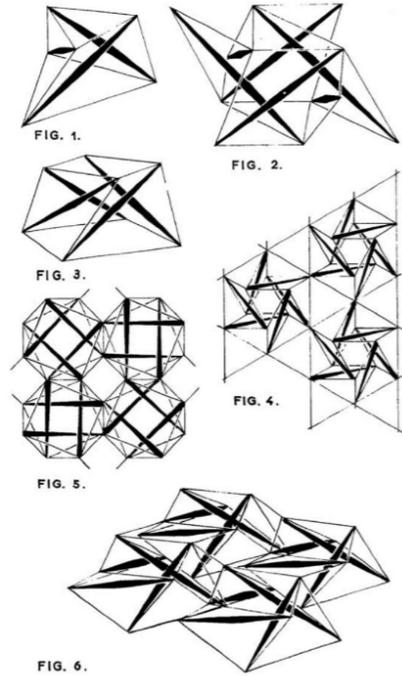
Emmerich
 "Construction de réseaux autotendants"
 28 Settembre 1964

REPUBLIQUE FRANÇAISE
 MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE
 SERVICE
 4. LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

BREVET D'INVENTION
 P.V. n° 931.099 N° 1.377.290
 Classification internationale : E 04 4

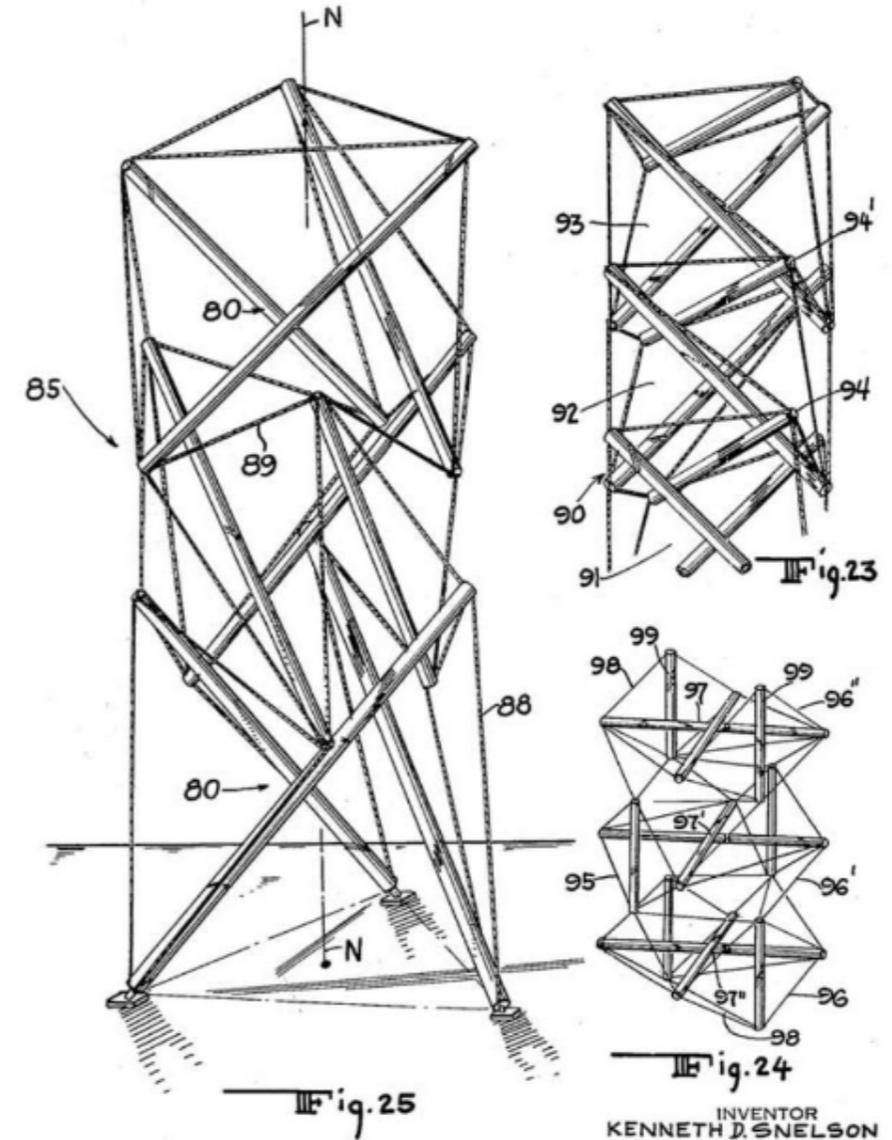
Construction de réseaux autotendants.
 M. DAVID CROISSANT EMMERICH résidant en France (Seine).
 Demandé le 10 avril 1963, à 15^h 50', à Paris.
 Déposé par arrêté du 23 septembre 1964.
 (Bulletin officiel de la Propriété industrielle, n° 42 de 1964.)
 (Brevet d'invention dont la durée est ajournée en vertu de l'article 11, § 7, de la loi du 5 juillet 1944 modifiée par la loi du 7 avril 1962.)

N° 1.377.290 M. Emmerich Pl. unique

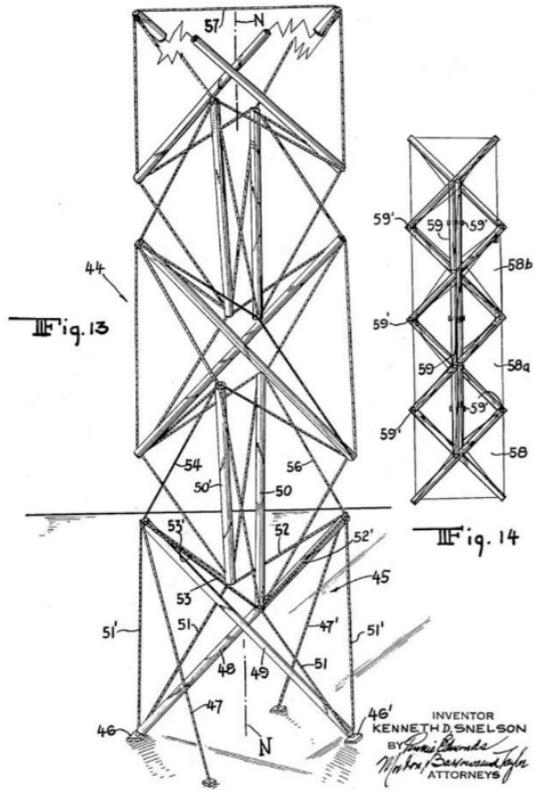


Snelson
 "Continuous tension, discontinuous compression structures"
 16 Febbraio 1965

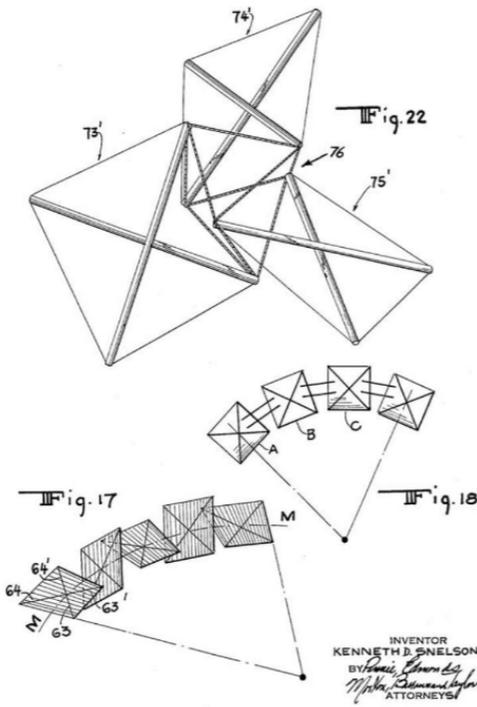
Feb. 16, 1965 K. D. SNELSON 3,169,611
 CONTINUOUS TENSION, DISCONTINUOUS COMPRESSION STRUCTURES
 Filed March 14, 1960 9 Sheets-Sheet 9



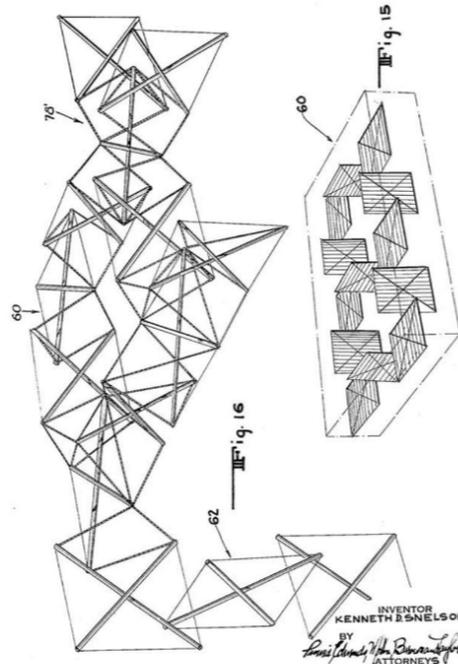
INVENTOR
 KENNETH D. SNELSON
 BY
 Louis Charles, Milton Burman Taylor
 ATTORNEYS



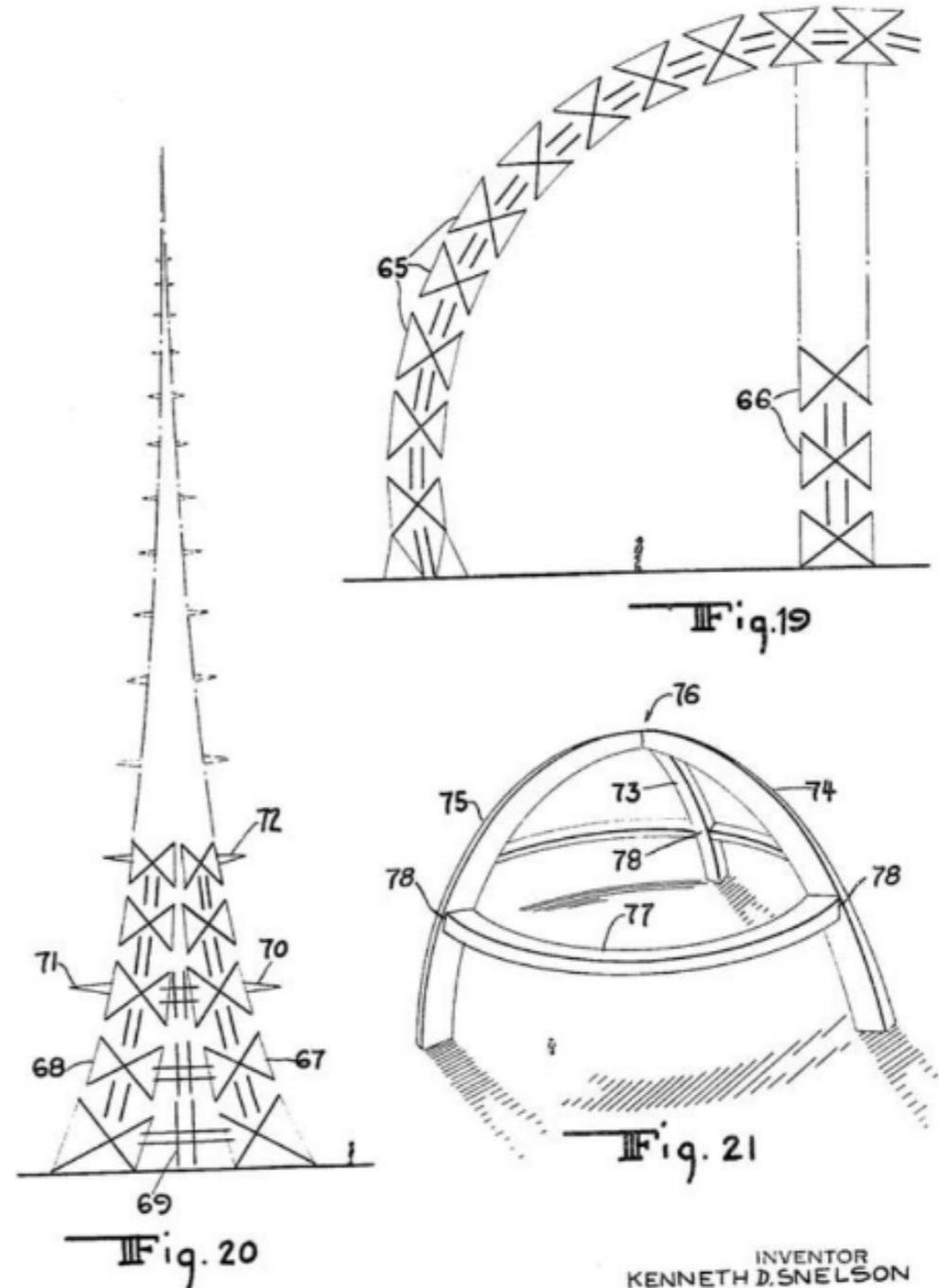
INVENTOR
 KENNETH D. SNELSON
 BY *Forbes, Edwards, McInnis, Brown & Taylor*
 ATTORNEYS



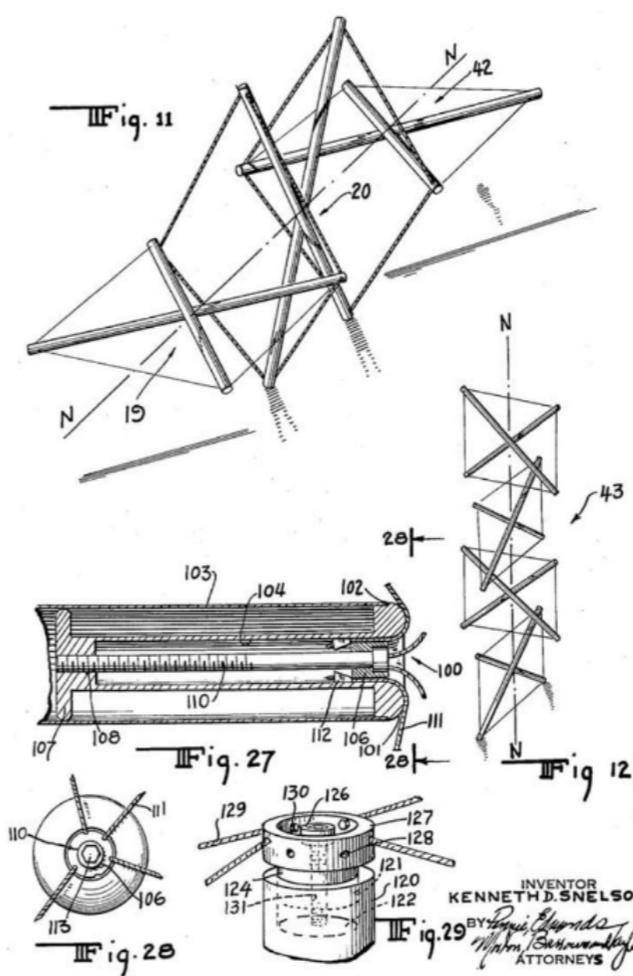
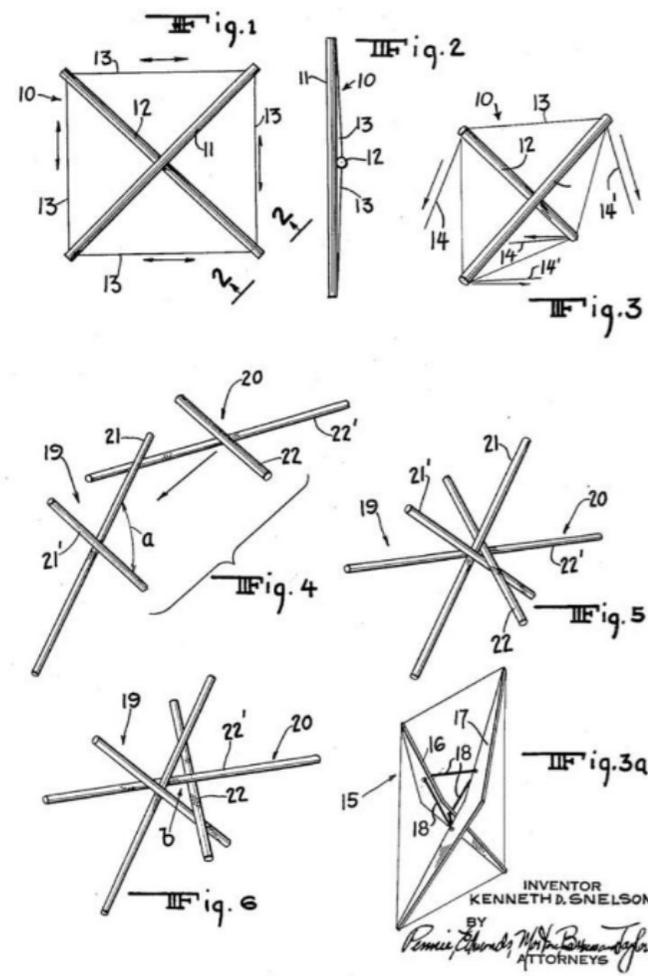
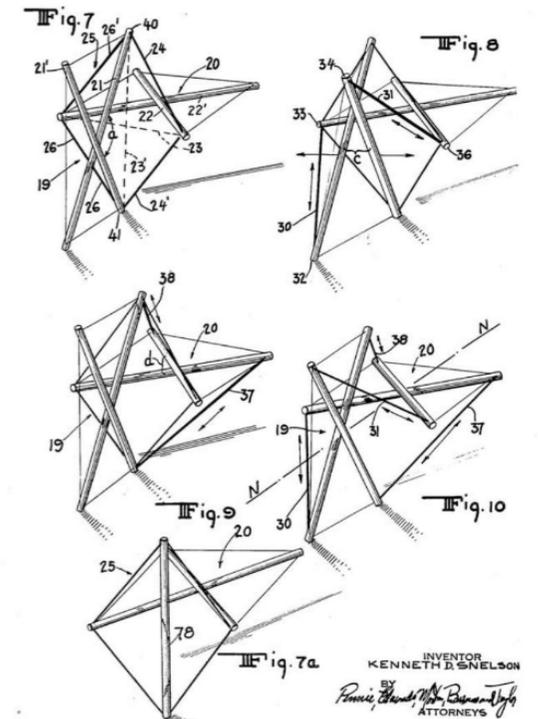
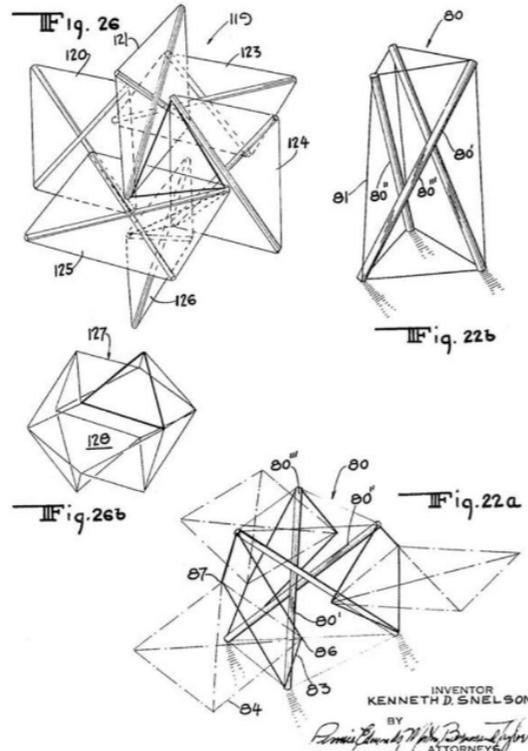
INVENTOR
 KENNETH D. SNELSON
 BY *Forbes, Edwards, McInnis, Brown & Taylor*
 ATTORNEYS



INVENTOR
 KENNETH D. SNELSON
 BY *Forbes, Edwards, McInnis, Brown & Taylor*
 ATTORNEYS



INVENTOR
 KENNETH D. SNELSON
 BY *Forbes, Edwards, McInnis, Brown & Taylor*
 ATTORNEYS



126

127

Le definizioni date nei rispettivi brevetti sono sostanzialmente equivalenti: i sistemi tensegrali sono sistemi reticolari spaziali che conservano la propria forma e sostengono carichi in virtù di uno stato di autosollecitazione; gli elementi sono rettilinei e tutti di dimensioni confrontabili; quelli compressi costituiscono un insieme discontinuo, quelli tesi un insieme continuo; in ogni nodo confluiscono un puntone e almeno tre cavi; i cavi non hanno alcuna rigidità in compressione.

Richard Buckminster Fuller nel suo brevetto descrive questo tipo di strutture come:

- “Una pluralità di colonne discontinue a compressione disposte in gruppi di tre colonne congiunte non collegate da elementi in tensione che formano triangoli di tensione”.

Kenneth Snelson nel suo brevetto definisce:

- “La presente invenzione riguarda il quadro strutturale e più in particolare, una nuova e migliorata struttura di elementi allungati che sono collocati separatamente in

tensione o in compressione per formare un reticolo, i membri in compressione sono separati l'uno dall'altro e gli elementi di trazione sono interconnessi per formare una rete continua in tensione. La tensegrale è un sistema strutturale chiuso costituito da un insieme di tre o più puntoni allungati sottoposti a compressione, all'interno di una rete di cavi sottoposti a tensione. Le parti così messe insieme, sono di reciproco supporto in modo tale che i montanti non si tocchino tra di loro, ma premano verso l'esterno contro i punti nodali della rete in tensione allo scopo di formare un insieme rigido triangolato, precompresso, sottoposto sia a tensione che a compressione”.

David George Emmerich ha invece dichiarato nel suo brevetto che la sua invenzione potrebbe essere ulteriormente descritta in modo non limitativo con riferimento ai diversi esempi mostrati, accompagnati da disegni. In questo modo, ha evitato di dare una descrizione rigorosa.

03/ Proprietà e caratteristiche

- / 03.1 Definizioni scientifiche
- / 03.2 Classificazioni e tipologie
- / 03.3 Concetto strutturale

Le definizioni del concetto tensegrale sono state dissimili negli anni, a partire dalle modalità in cui i primi ideatori di tali sistemi, ovvero Richard Buckminster Fuller, Kenneth Snelson e David Georges Emmerich si riferivano alle loro invenzioni:

- **“tensional integrity”**
(Fuller)
- **“floating compression”**
(Snelson)
- **“systemes autotendant”**
(Emmerich)

Il sistema tensegrale è stato negli anni oggetto di analisi da parte di molti studiosi i quali hanno contribuito all'elaborazione di ulteriori definizioni scientifiche:

Anthony Pugh ha dato la seguente definizione estesa di tensegrale, accettata quasi universalmente dal resto degli specialisti, prima nel suo genere:
“un sistema tensegrale viene stabilito quando un insieme discontinuo di componenti a compressione interagisce con una serie di componenti in trazione continua a definire un volume stabile nello spazio”.

Daniel Schodeck agli inizi degli anni '90 si rese conto che la essenziale definizione basata sul concetto di ripetitività dei componenti sarebbe potuta essere sicuramente migliore rispetto alle nozioni vaghe e molteplici formulate in quel momento. Pertanto etichettò le tensegrali come un insieme di strutture rigide fatte di aste discontinue in compressione e cavi in tensione continua con una livello di ripetitività dei componenti.

Bin - Bing Wang, nel 1998 è andato oltre la definizione precedente, individuando altre caratteristiche importanti: le strutture tensegrali sono autoportanti e irrigidite da un'auto - sollecitazione (cosa che era già stata avanzata da Emmerich).

K. Snelson
Mozart
1982



Mingsheng Wang e Dange Liu tra il 1998 e il 2003) hanno dato la più ampia definizione ovvero:

“I sistemi tensegrali sono una rete di cavi liberamente configurati, collegati da giunti nei quale un sistema connesso di cavi è sollecitato contro un sistema disconnesso di aste e in modo estensivo, ogni insieme di cavi liberamente configurati è composto da un’ unità costruttive che soddisfano la definizione prima citata”

Koryo Miura e Sergio Pellegrino hanno dato un’interpretazione essenziale:

“Una struttura tensegrale è una struttura realizzata da cavi e puntoni, ai quali viene imposto uno stato di precompressione che genera la tensione di tutti i cavi”.

Infine ci sono ulteriori e più complesse definizioni a seconda degli sviluppi studiati dagli autori.

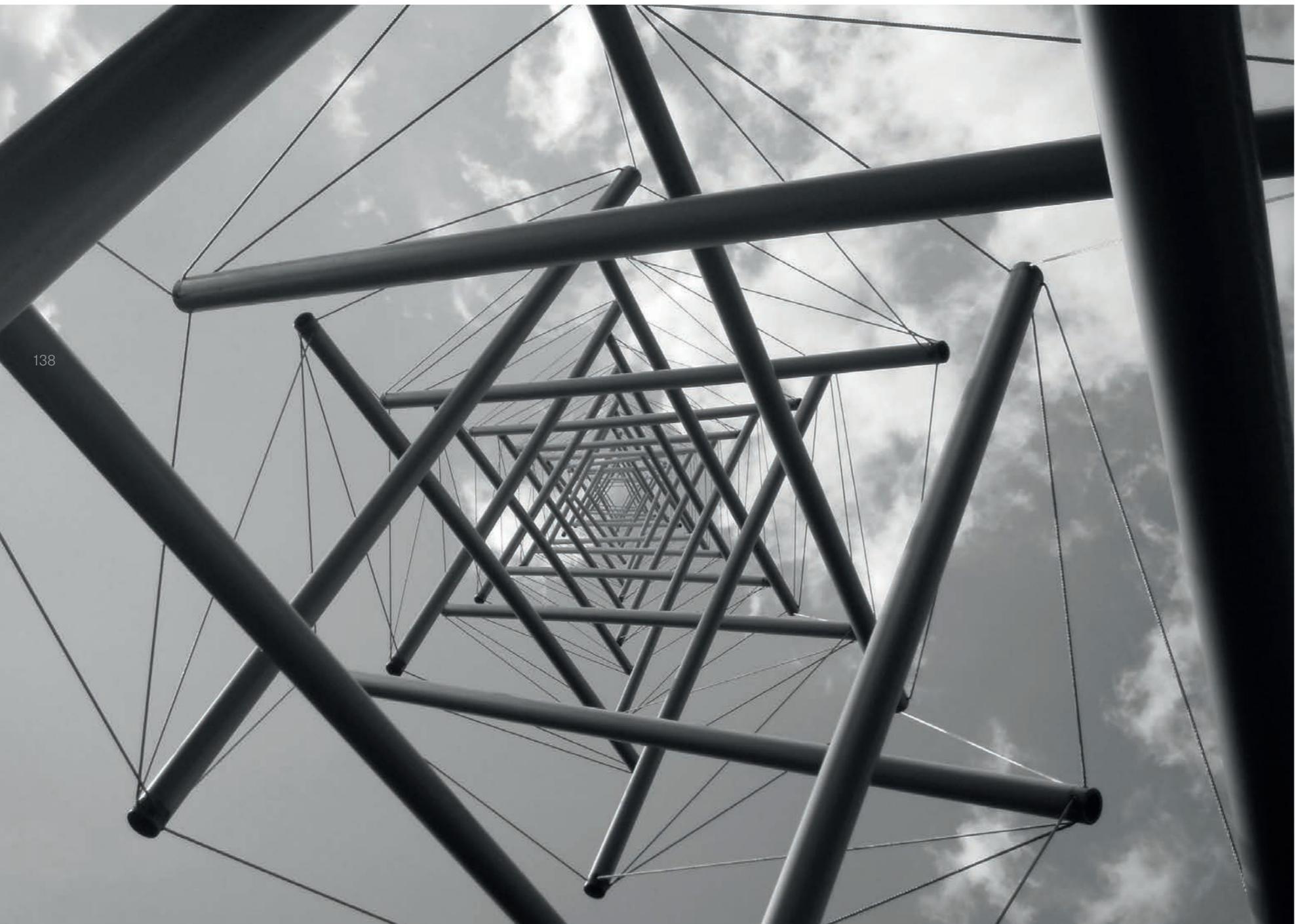
Narongsak Kanchanasaratool e Darrell Williamson, agli inizi degli anni 2000 affermano che:

“Un sistema tensegrale è una connessione stabile di componenti assialmente - caricati, essendo una struttura tensegrale classe k se al massimo “ k ” componenti a compressione sono collegati a qualsiasi nodo”.

Ad esempio, una struttura tensegrale tradizionale è una struttura di classe 1 perché solo un membro di compressione arriva ad un nodo.

René Motro nel 2003 ha cercato di distinguere due concetti differenti facendo una distinzione tra la definizione “estesa e quella “di brevetto”. Quest’ultima fa riferimento ai brevetti presentati dagli inventori ed è una sintesi comune delle descrizioni della struttura.

La definizione estesa ha alcuni punti comuni con la definizione di Pugh, ma con qualche



Needle Tower II
Kenneth Snelson
1969

aggiunta: gli elementi compressi sono inclusi all'interno di un insieme continuo in tensione e il sistema ha stabilità autonoma in equilibrio.

La definizione estesa e globalmente riconosciuta esplicita che:

“Il sistema tensegrale è un sistema in uno stato di auto - equilibrio stabile comprendente un insieme di componenti discontinui compressi all'interno di un continuum di componenti in tensione”.

La seconda definizione, basata sul brevetto ufficialmente riconosciuto, è la seguente:

“I sistemi tensegrali sono sistemi reticolari spaziali in uno stato di sollecitazione in sé. Tutti i loro elementi hanno un elemento centrale rettilineo e sono di dimensioni equivalenti. Elementi tesi costituiscono un insieme continuo. Elementi compressi costituiscono una serie discontinua. Ogni nodo riceve uno ed un solo elemento compresso”.



/ 03.2 Classificazioni e tipologie

Secondo la definizione di Narongsak Kanchanasaratool e Darrell Williamson:

“Un sistema tensegrale è una connessione stabile di componenti assialmente caricati, essendo una struttura tensegrale di classe k se al massimo “ k ” componenti a compressione sono collegati a qualsiasi nodo”.

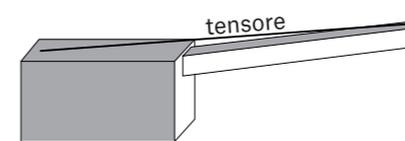
Connessione stabile può significare che la struttura, prima ancora di essere soggetta a qualsiasi carico esterno compreso il peso proprio, deve essere in uno stato di pre-sollecitazione per essere stabile e mantenere la sua forma.

La stabilità è definita come la capacità di un sistema di tornare nella posizione iniziale dopo una perturbazione.

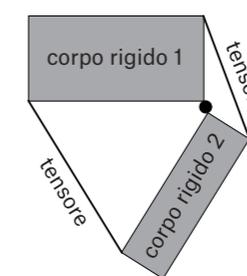
Un insieme di corpi rigidi (punti) forma una “configurazione tensegrale” nel caso in cui trovi un reticolo di tiranti tesi in grado di stabilizzare tale sistema.

In funzione del numero di punti impiegati nel sistema tensegrale si configurano diverse classi di tensegrali ognuna delle quali è caratterizzata da una rigidità meccanica maggiore della precedente classe.

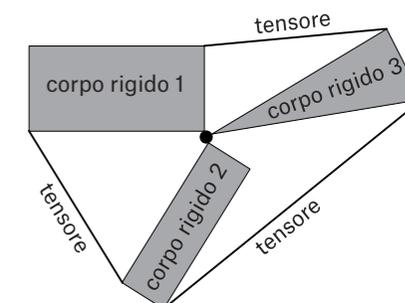
Una configurazione tensegrale in cui le barre non siano in contatto tra di loro è detta di classe 1, mentre una configurazione nella quale k barre convergano in uno stesso nodo si dice di classe k .



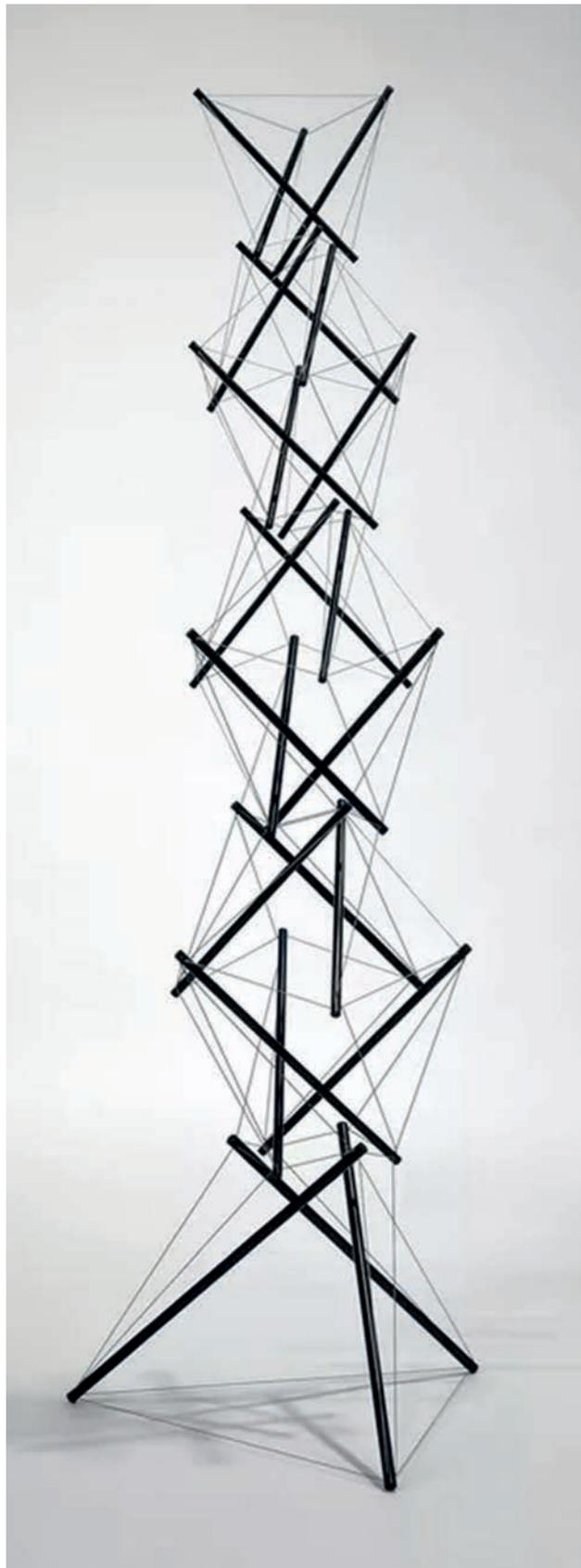
struttura tensegrale di classe 1



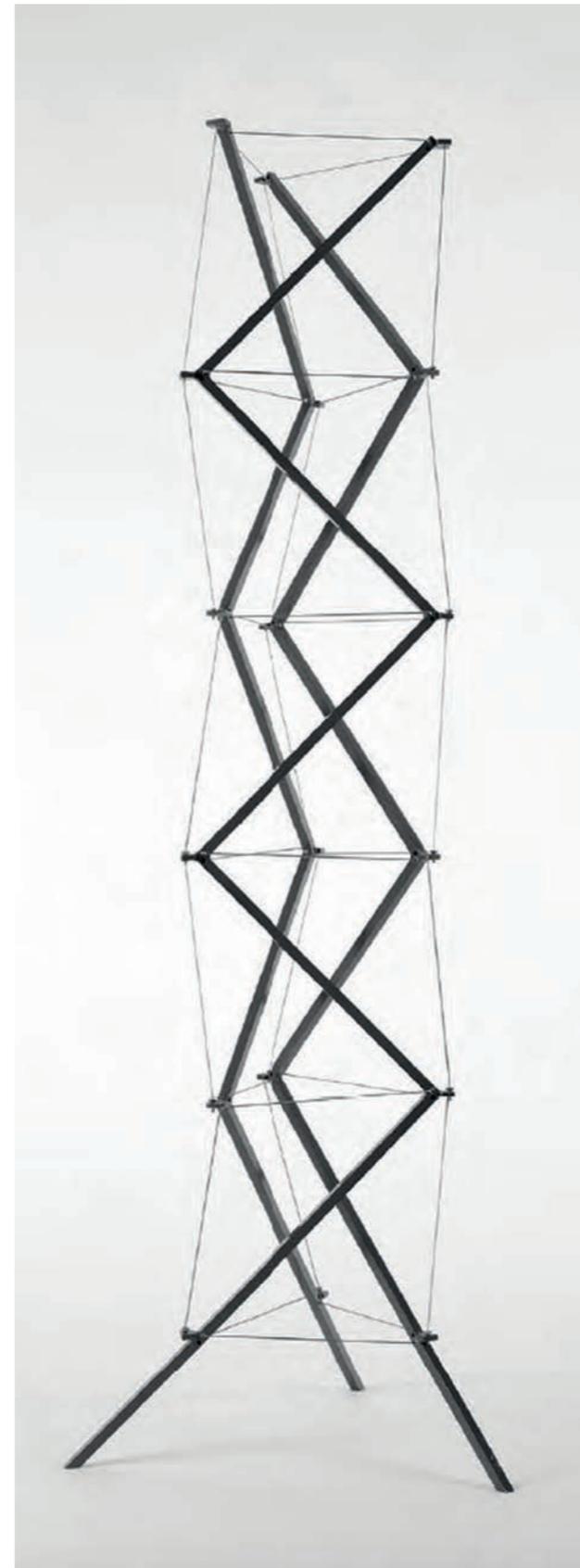
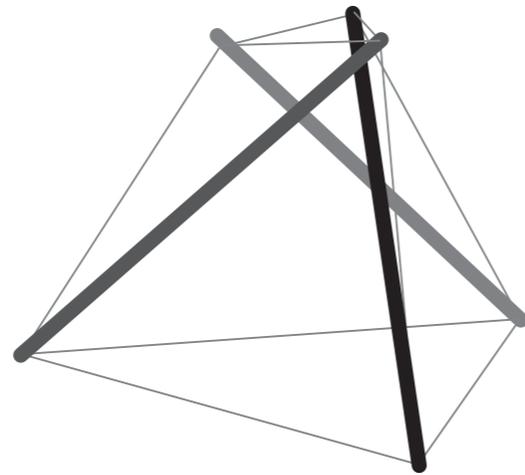
struttura tensegrale di classe 2



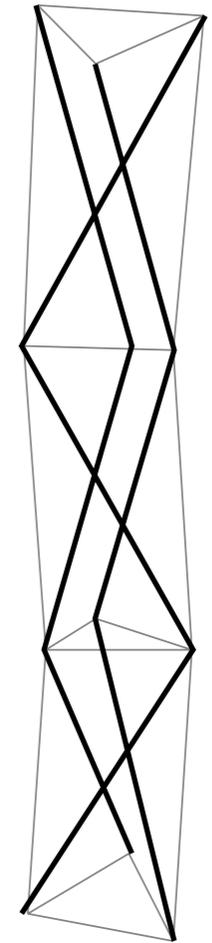
struttura tensegrale di classe 3



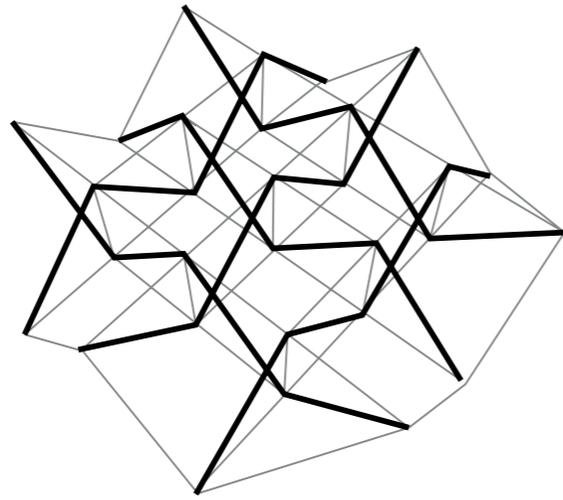
struttura tensegrale di classe 1



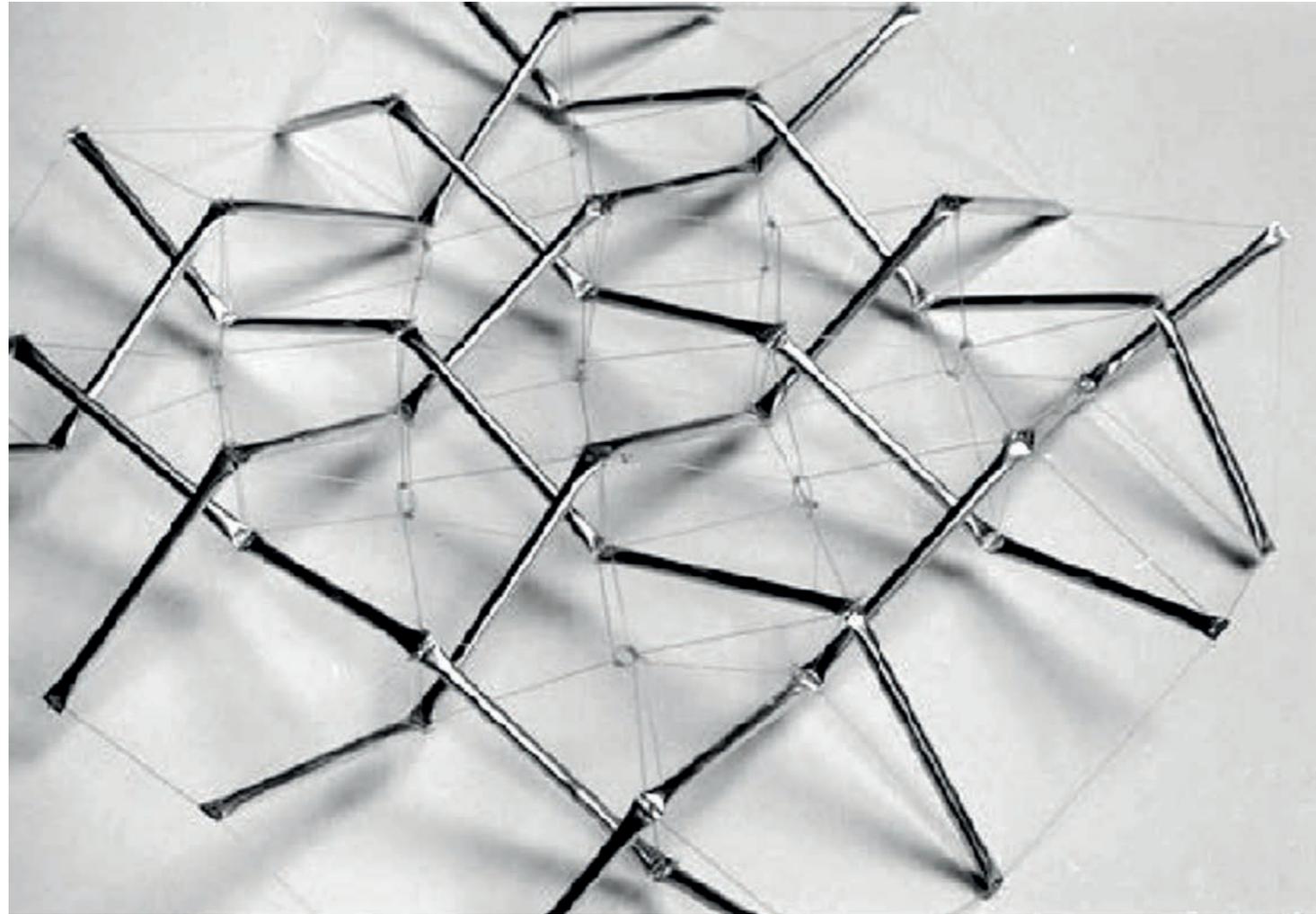
struttura tensegrale di classe 2



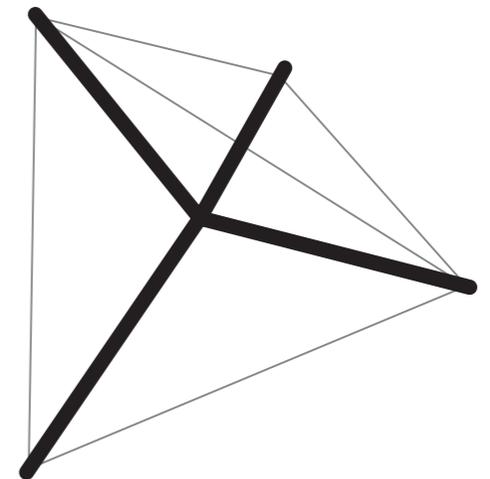
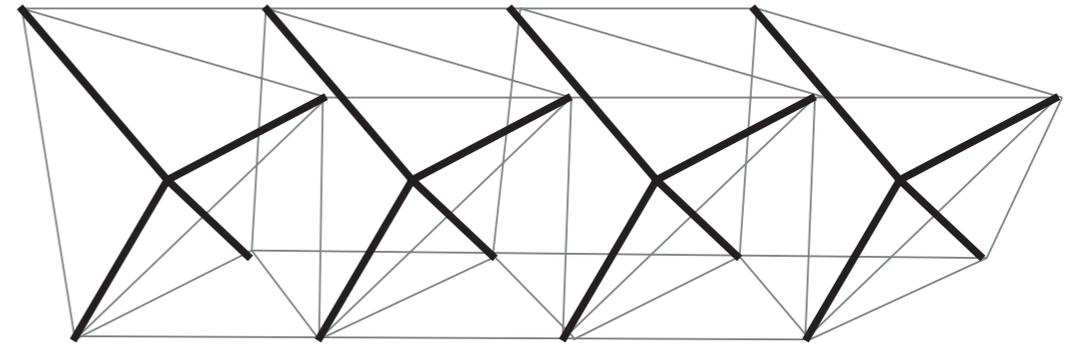
struttura tensegrale di classe 2



Lo stesso Fuller realizzò fra i suoi primi modelli di grandi dimensioni una torre classe 4, formata appunto da componenti formati da 4 aste rigide saldate fra di loro ad una estremità. La classe di una struttura tensegrale quindi coincide con il numero massimo di barre che concorrono nei suoi nodi.



struttura tensegrale di classe 3

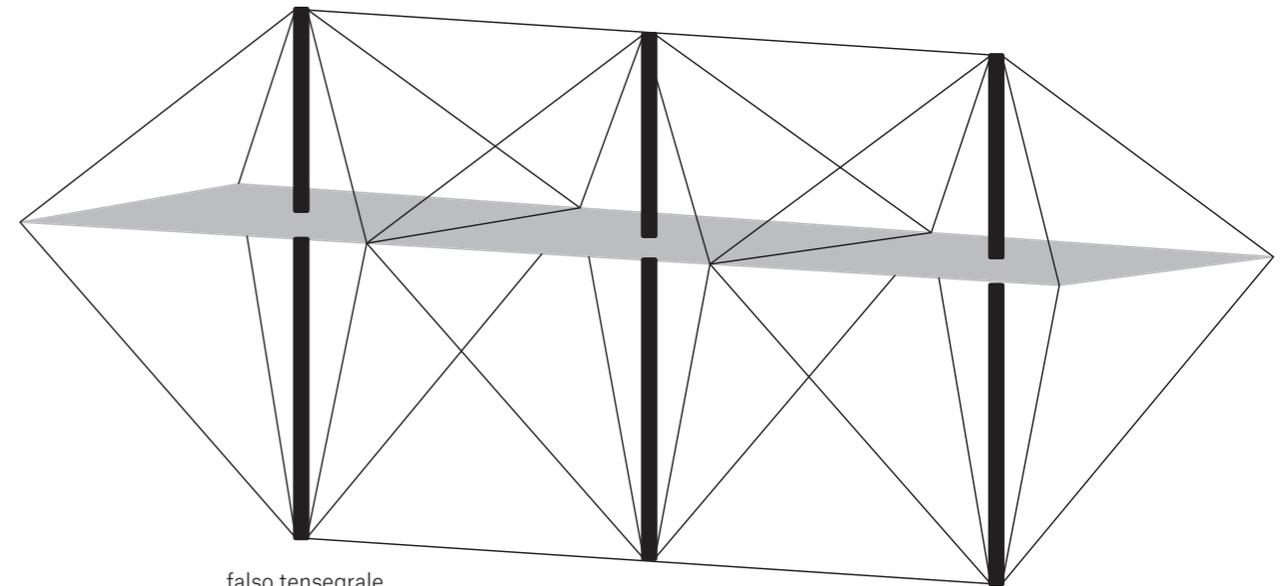


Prendendo a riferimento la definizione estesa di Renè Motro:

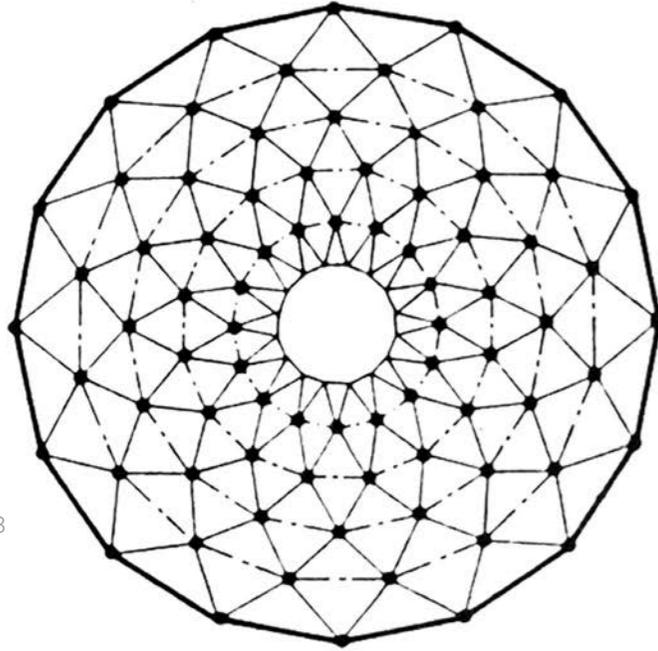
“Il sistema tensegrale è un sistema in uno stato di auto - equilibrio stabile comprendente un insieme di componenti discontinui compressi all’interno di un continuum di componenti in tensione”.

Il termine **“all’interno”** usato nella definizione sta a indicare che **i componenti compressi devono trovarsi sempre all’interno del continuum tensionale**, ovvero che individuata la forma esterna del sistema, i suoi bordi, questi devono essere percorsi esclusivamente da elementi tesi. I componenti compressi possono avere le estremità sui bordi ma ogni altro punto appartenente ad essi deve rimanere all’interno dei limiti esterni della struttura. **Questo concetto è fra i fondamentali per distinguere i veri sistemi tensegrali dai falsi.**

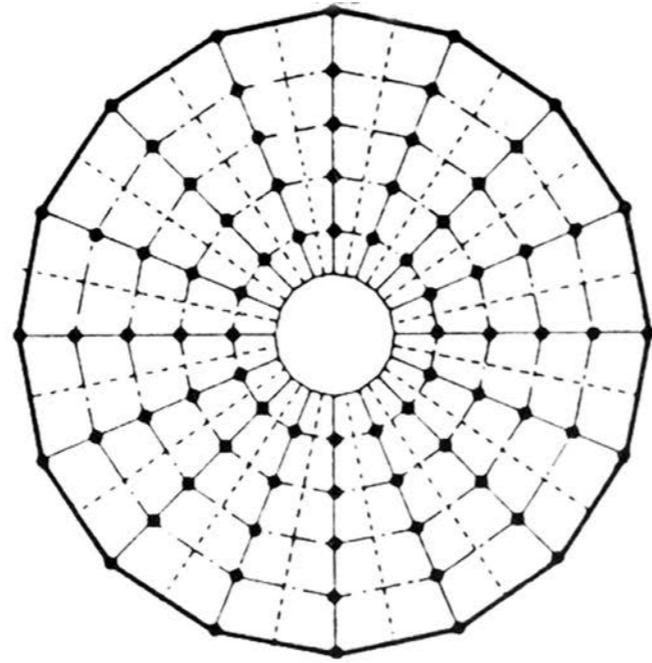
Si hanno le false strutture tensegrali quando non è possibile individuare gli elementi compressi separati fra loro o quando i bordi della struttura sono delimitati da elementi rigidi.



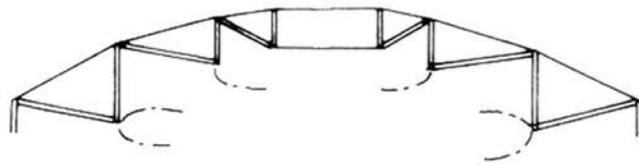
copertura di Geiger dello stadio
The Georgia Dome, Atlanta - USA
falso tensegrale



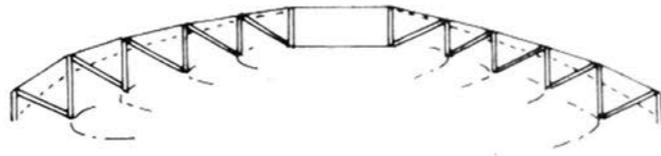
148



149



cupola tensegrale di Fuller

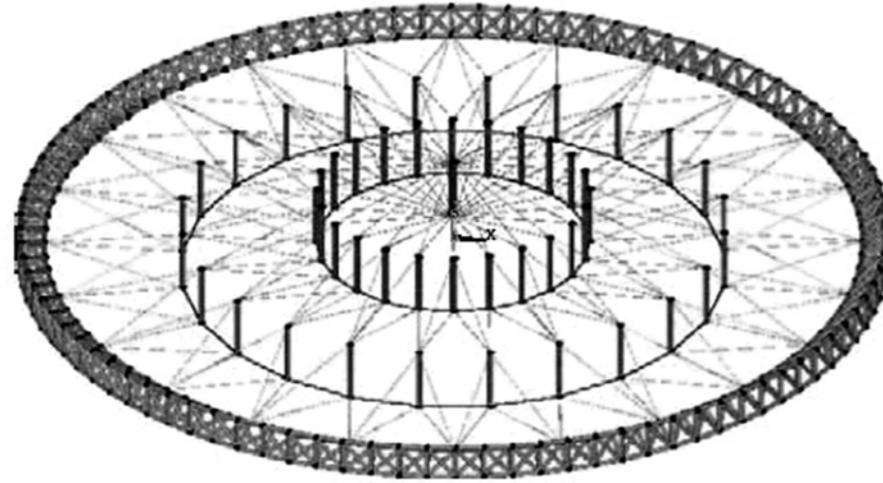


cupola di Geiger

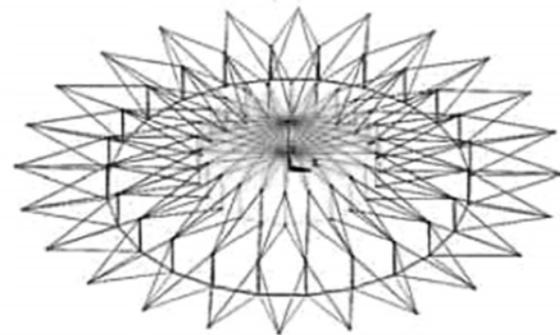
Fuller ha ideato un sistema strutturale di "integrità tensile" o "tensegrità" per cupole e altri tetti a campata lunga. La complessità delle di tali cupole tensegrali ha precluso la loro realizzazione su vasta scala fino agli anni '80, quando un altro ingegnere, David Geiger, le ha semplificate abbastanza da renderle costruibili, anche se non classificabili come sistemi tensegrali puri.

Per esempio le coperture di Geiger sono fondate sul concetto delle ruote da bicicletta, cioè presentano una trave circolare di bordo in compressione, solitamente realizzata in calcestruzzo armato, alla quale vengono agganciati dei cavi radiali. Grazie alla tensione dei cavi e alla presenza all'interno del sistema teso di puntoni opportunamente posizionati e "fluttuanti nell'aria" si ottiene una posizione della copertura più alta rispetto alla trave di bordo, idonea a scaricare all'esterno le acque meteoriche e a dare l'illusione di sfidare la gravità.

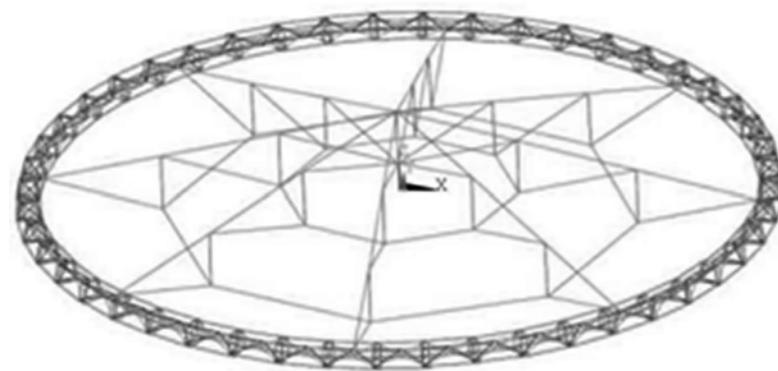




toroide tensegrale



Schemi di copertura alla Geiger ma "veramente" tensegrity, con sostituzione della trave di bordo compressa con un toroide tensegrale, nel rispetto quindi di quanto espresso nella definizione estesa di un sistema tensegrity.



dettaglio toroide tensegrale

Lo studio delle strutture tensegrali è stato portato avanti per molto tempo da svariati ricercatori in modo abbastanza autonomo. Ogni studioso ha finito con l'inventare un personale metodo di nomenclatura delle varie tipologie, cosicché non è sempre facile capire immediatamente a quale tipo di struttura si faccia riferimento, specialmente se si considera la vastità delle configurazioni che si possono ottenere.

La cellula base "simplex" può essere altresì definita: "equilibrio elementare", "prisma a 3 aste", "3 aste, 9 cavi", "twist element", "3 aste strato singolo".

Un sistema di nomenclatura è stato proposto da Motro ed è basato sulla topologia del sistema tensegrale a cui si fa riferimento.

Nella fattispecie i dati che danno una definizione del codice riguardano:

- numero dei nodi "n"
- numero degli elementi compressi "S"
- numero di elementi tesi "C"
- sistema regolare o sistema irregolare "R" o "I"
- sistema sferico "SS"

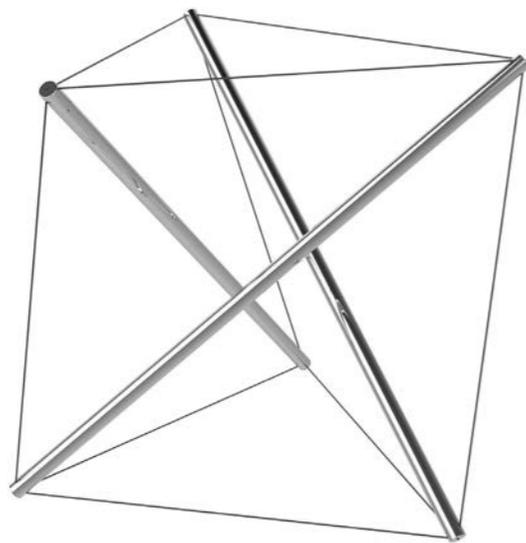
Con questo sistema di nomenclatura il simplex verrebbe chiamato **n6-S3-C9-R-SS**.

Classificazioni

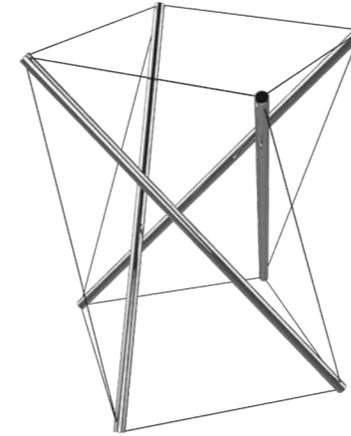
Le principali "famiglie" di strutture tensegrali sono state individuate nei primi lavori di Fuller, Emmerich e successivamente Pugh. Questi autori hanno determinato una serie di strutture facendo ampio uso per via empirica dei poliedri.

Cellule elementari

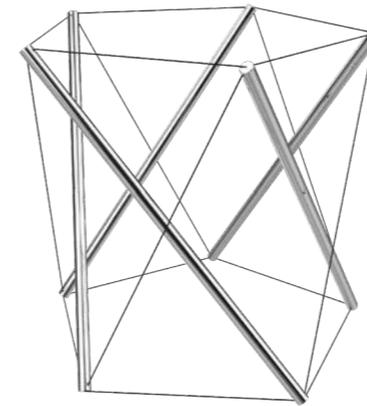
Sono definite tali tutte quelle strutture che non sono ulteriormente divisibili in singole cellule stabili, dette anche "cellule sferiche" in quanto topologicamente il set di cavi che le compongono è simile (omeomorfo) ad una sfera, cioè è possibile proiettare su una sfera tutti i cavi del sistema senza che questi si intersechino fra di loro se non nei nodi.



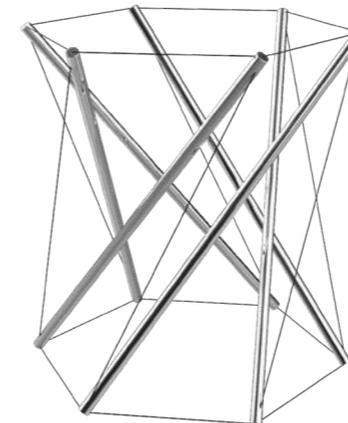
simplex



quadruplex



pentaplex



esaplex

Aumentando il numero dei tensori della base del modulo elementare a quattro, cinque o sei si ottengono rispettivamente moduli prismatici quadruplex, pentaplex ed esaplex

Le cellule elementari sono, per la maggior parte, strutture prismatiche classificate secondo la loro forma geometrica complessiva.

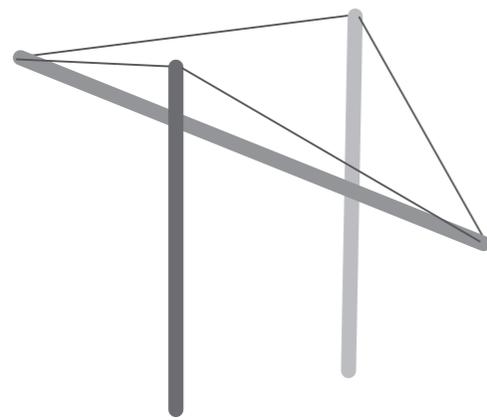
I moduli elementari più comuni sono composti da una base poligonale regolare, possono essere formati da 3, 4, 5, ...n elementi compressi e, a seconda del numero delle aste, presentano diversi angoli di rotazione tra le basi.

Gli angoli di rotazione si possono calcolare grazie alla formula $\alpha = 90^\circ - (180^\circ/n)$ da cui si ottiene per il simplex $\alpha = 30^\circ$, per il prisma a base quadrata $\alpha = 45^\circ$, a base pentagonale $\alpha = 54^\circ$, a base esagonale $\alpha = 60^\circ$.

Quindi l'angolo di rotazione aumenta all'aumentare del numero delle aste e la resistenza alle sollecitazioni esterne della cellula prismatica diminuisce all'aumentare del numero di aste.

Il Simplex, composto da tre aste in compressione e nove cavi in tensione, risulta uno dei sistemi più semplici e stabili.

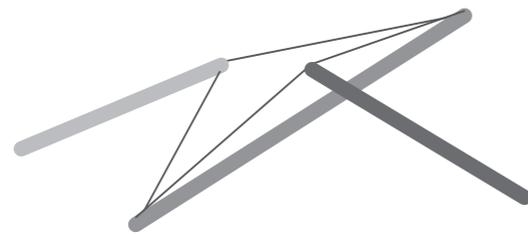
La classificazione introdotta da Pugh prevedeva invece **tre classi principali: rombica, a circuito e con configurazione a Z**. Questa classificazione è basata sul modo in cui gli elementi compressi sono collegati tra loro dai cavi.



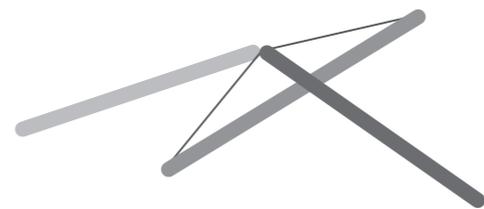
rombica



a zeta



circuito



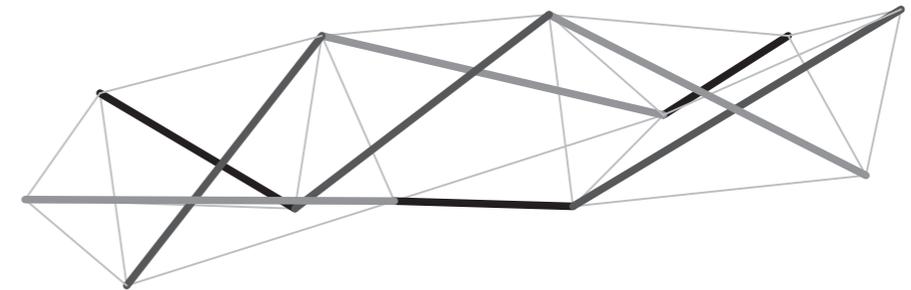
Assemblaggio di cellule elementari

Le strutture tensegrali composte sono un assemblaggio di cellule elementari.

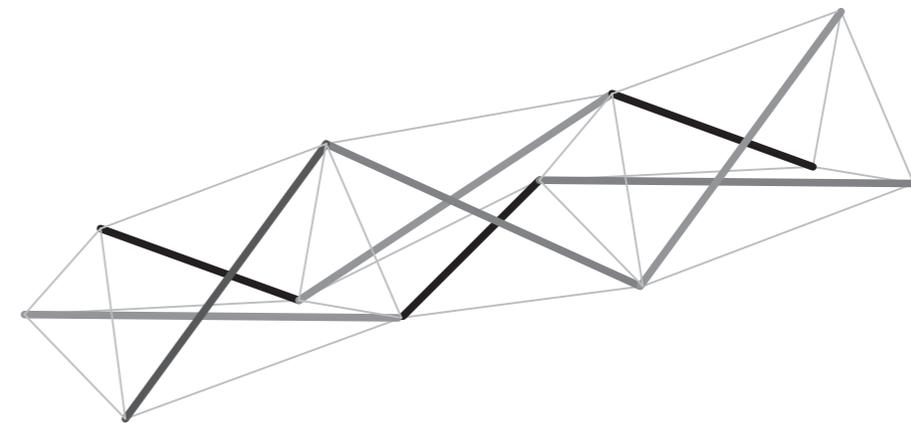
Possono essere divise in due famiglie.

Assemblaggi monodimensionali: composti disponendo cellule elementari identiche secondo due metodologie:

- **allineamento semplice** che conferisce un aspetto contorto alla struttura formata.
- **allineamento alternato** in cui le cellule sono ruotate prima di essere impilate.



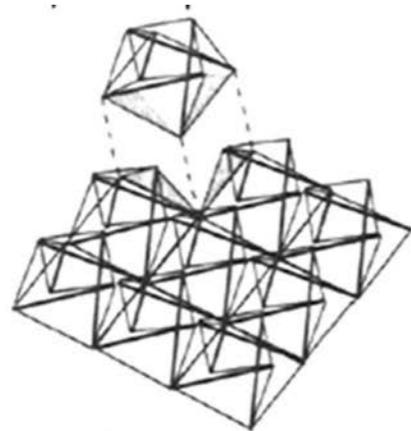
allineamento semplice



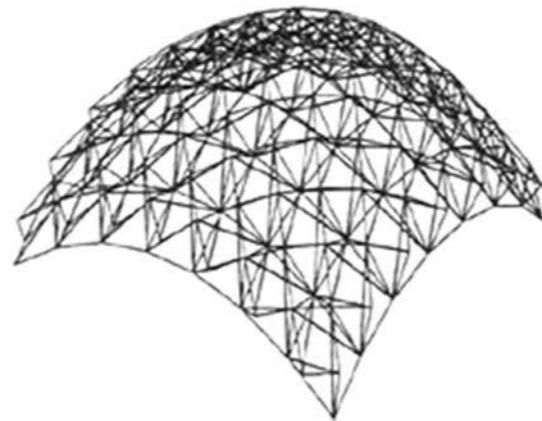
allineamento alternato

**Assemblaggi bidimensionali:
Sono composti dall'accostamento di
cellule elementari una accanto all'altra.**

Queste strutture possono essere multistrato,
cioè costituite da una pila di assemblaggi
bidimensionali e/o con curvatura singola o
doppia.



griglia piana



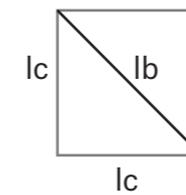
griglia doppia
curvatura

Il simplex

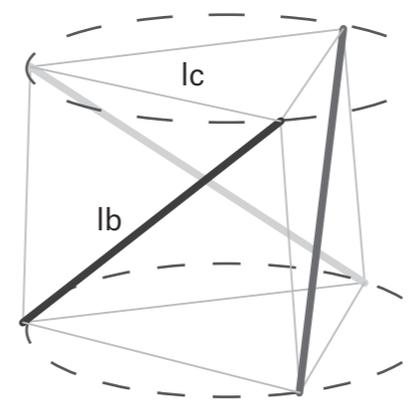
Le strutture tensegrali prismatiche come il
simplex, sono formate da **cavi orizzontali e
verticali e aste diagonali che generano un
angolo di rotazione α fra le basi del prisma,
definito come "twist angle".**

Eseguendo uno studio geometrico di un
simplex regolare, dove tutti i cavi hanno la
stessa lunghezza l_c e tutte le barre hanno
la stessa lunghezza l_b , si può stabilire una
relazione geometrica tra queste lunghezze
e l'angolo di rotazione relativo delle basi del
simplex:

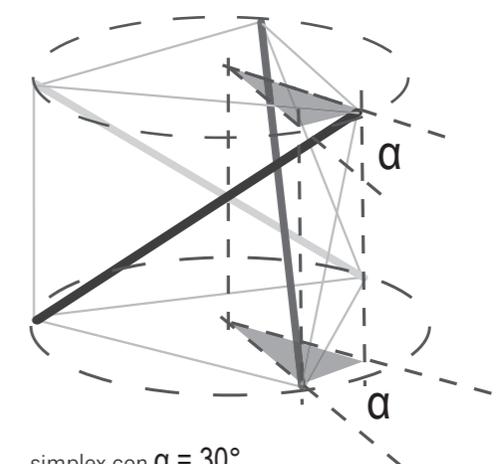
vista laterale



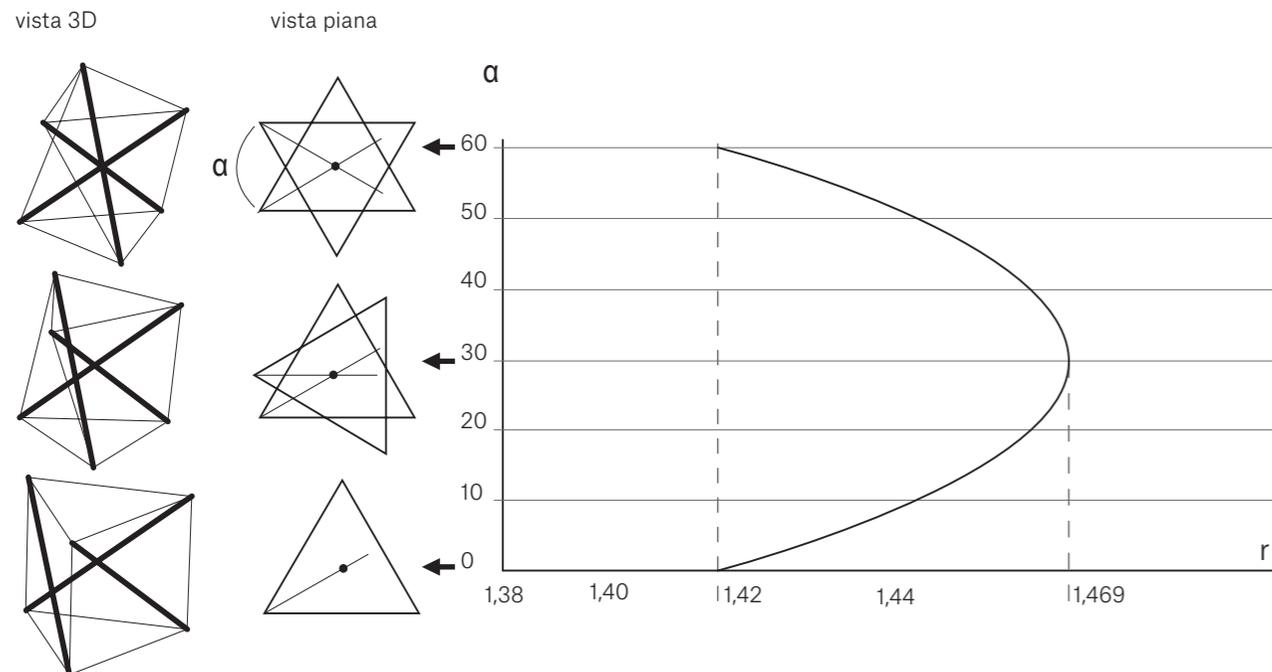
$$r = l_b/l_c = \sqrt{(1+2/\sqrt{3}) \sin(\alpha+60^\circ)}$$



simplex con $\alpha = 0^\circ$



simplex con $\alpha = 30^\circ$



Da questo grafico possono essere tratte diverse conclusioni sullo stato geometrico del simplex:

Se si impone una lunghezza l_b della barra si ha:

- Per una lunghezza del cavo l_c , tale che $r < \sqrt{2}$, la geometria è fisicamente impossibile. I cavi sono troppo lunghi e le barre sono quindi libere di muoversi;
- Per una lunghezza del cavo l_c , tale che $r = \sqrt{2}$, la geometria può essere impostata sia su $\alpha = 0^\circ$ o $\alpha = 60^\circ$. Quest'ultimo caso corrisponde all'incrocio delle barre nello stesso punto;
- Per una lunghezza decrescente del cavo l_c , tale che $\sqrt{2} \leq r < 1,468$, la geometria può essere fissata a due valori di angoli di rotazione α ;

- Per una lunghezza del cavo l_c , tale che $r = 1,468$, la geometria fissa l'angolo di rotazione a $\alpha = 30^\circ$. Tuttavia, la struttura non ha rigidità, poiché questa geometria non impone nessuno stato di autotensionamento. Una piccola perturbazione (ad esempio un aumento infinitesimale di l_c con conseguente diminuzione di r) è sufficiente a torcere la struttura ad un angolo $\alpha = 30^\circ \pm \epsilon$. Il simplex ha quindi un'instabilità torsionale effettiva per l'angolo $\alpha = 30^\circ$.
- Una lunghezza del cavo l_c tale che $r > 1,468$, implica un allungamento a trazione dei cavi per tensione e un accorciamento delle barre per compressione tale che il sistema risultante tende verso $r = 1,468$. La geometria è quindi inequivocabilmente fissata ad $\alpha = 30^\circ$ e la struttura ha una certa rigidità perché la geometria le impone uno stato di auto stress. Infatti un piccolo disturbo non ha più alcun impatto sulla geometria generale della struttura poiché la struttura tornerà alla sua posizione iniziale dopo la perturbazione.
- Il simplex è quindi in uno stato di auto-stress ed è in equilibrio stabile per $\alpha = 30^\circ$.
- Questo stato di stress interno è indipendente da qualsiasi collegamento, dipende dalla configurazione geometrica degli elementi e viene introdotto durante l'assemblaggio del sistema.

Approccio cinematico

di René Motro

“Una delle migliori introduzioni ai sistemi tensegrali è certamente quella di costruire un piccolo modello. La realizzazione effettiva appare sempre utile; è possibile, per esempio, costruire semplicemente un “equilibrio elementare”.

Sarà composto da tre elementi compressi di uguale lunghezza e nove elementi tesi di uguale lunghezza. Questa uguaglianza di lunghezze per ciascuna delle due classi di elementi giustifica la qualifica “regolare” che adotteremo per questo sistema elementare. È necessario in questo caso specifico che il rapporto “r” tra la lunghezza degli elementi compressi “s” e quella degli elementi tesi “c” sia uguale a 1,4682. Una diversa scelta di questi valori crea o un sistema senza rigidità, un sistema a cui non si può dare una forma (“r” è troppo piccolo), o un sistema che sarà molto difficile e forse anche impossibile da assemblare (“r” troppo grande).

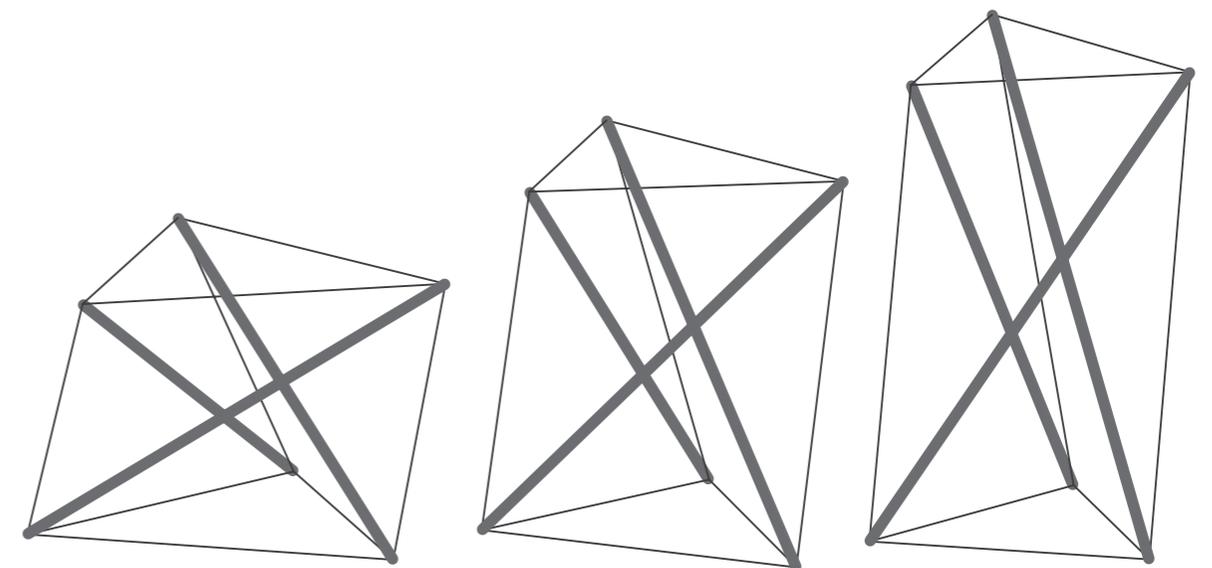
dal libro “Tensegrity Structural Systems for the Future”
di R. Motro (1988) - ed. 2003

Rapporto di snellezza

Il rapporto di snellezza è rappresentato dalla formula $S = h/r$, dove h è l'altezza del singolo modulo base (ovvero distanza fra il triangolo superiore ed inferiore del simplex) ed r è il raggio del poligono di base (ossia il raggio della circonferenza circoscritta al triangolo di base). **All'aumentare della snellezza il modulo base tende ad assumere proporzioni slanciate verso l'alto, al diminuire tende a divenire sempre più basso e tozzo.**

Alcune ricerche hanno messo in evidenza come la snellezza sia proporzionale alla resistenza ai carichi verticali e inversamente proporzionale alla resistenza ai carichi orizzontali, in maniera sempre non lineare.

A riguardo si citano i lavori di Tibert G., Deployable Tensegrity Structures for Space Applications, tesi di dottorato, Stockholm, Sweden, Royal Institute of Technology, 2002; di Peters S., Tensional Integrity, tesi di laurea, Università di Stoccarda, 1998 e di Micheletti A., Strutture pieghevoli che ricercano una forma di equilibrio, tesi di laurea in Ingegneria Civile, Roma, Università di “Tor Vergata”, 1999.



Esempio di applicazione: Torre Rostock

La torre di Rostock è l'unica "vera" struttura tensegrale di dimensioni importanti che sia attualmente in essere.

La torre tensegrity è stata realizzata nel 2003 in occasione dell'Esposizione Internazionale dei Giardini di Rostock in Germania e ha svolto funzione simbolica ed estetica.

La struttura è alta 62,3 ml e se sollecitata da carico di vento può avere deflessioni maggiori di un metro.

È stata ideata, progettata e staticamente calcolata dallo studio Schlaich Bergermann und partner.

Si tratta di una struttura tensegrity di classe 2, formata dall'addizione verticale di sei simplex con orientamenti alternati dell'altezza di 8,3 ml ciascuno.

Questo progetto, per certi versi pionieristico, prova che con le tecnologie attuali è possibile realizzare strutture tensegrali, anche di grandi dimensioni, che rispondono in maniera perfetta ai requisiti di progetto.

L'intera struttura pesa circa 50 tonnellate. **L'individuazione del valore di pretensionamento è stata fatta rispetto al carico di vento, in quanto la torre non ha altra funzione statica che portare il proprio peso.** I cavi sono stati dimensionati imponendo che la forza di pre-tensione equivalesse al 30% della forza di rottura del cavo.



Tale forza di pre-tensione di progetto nei cavi diagonali è di 1200 kN e di 1500 kN per i puntoni tubolari compressi.

La distanza di allungamento affinché i cavi diagonali (\varnothing 75 mm. lunghi 9,6 ml) raggiungano la tensione di progetto è di soli 20 mm., questo significa che con una variazione di lunghezza di soli 10 mm il cavo presenterebbe una perdita di tensione del 50%.

Questo è stato il grande problema della fase realizzativa: per motivi architettonici non si poteva fare uso di tenditori, quindi l'unica soluzione per avere sotto controllo i valori di presollecitazione era l'accuratezza della fabbricazione.

Per raggiungere la massima precisione i fori e le saldature dei giunti con le aste sono stati realizzati già nella loro posizione finale in opera.

Sono stati utilizzati 3 martinetti da 100 kN l'uno che assieme ad una "briglia" in acciaio hanno tenuto in posizione le aste fino al fissaggio a quelle sottostanti.

Il metodo di montaggio per settori auto-equilibrati è avvenuto sul posto da terra in soli 10 giorni.

Il sistema è stato analizzato con un modello 3D ad elementi finiti che tenesse in considerazione le non linearità e le grandi deformazioni.

La torre è stata realizzata dalla azienda tedesca Mero TSK.



Ogni simplex è composto da 3 tubi in acciaio \varnothing 273 mm. con uno spessore variabile fra i 12 e i 40 mm. e 6 cavi in acciaio ad alta resistenza, 3 orizzontali (\varnothing 30 e 50 mm.) e 3 verticali (\varnothing 50 e 75 mm.).

Le aste della torre convergono a due a due in un nodo (tensegrity classe 2) e il giunto di collegamento è stato ottenuto con delle piastre di attacco imbullonate.



Un sistema di tensegrità si stabilisce quando un insieme di compressioni discontinue interagisce con un insieme di componenti di trazione continua per definire un volume stabile nello spazio.

(definizione di A. Pugh)

“Il sistema tensegrale è un sistema in uno stato di auto - equilibrio stabile comprendente un insieme di componenti discontinui compressi all’interno di un continuum di componenti in tensione”.

(definizione estesa di R. Motro)

Entrambe le definizioni potrebbero prevedere quindi fra i possibili componenti compressi all’interno del continuum di tensione anche l’aria, per cui le strutture pneumatiche possono a tutti gli effetti essere considerate strutture tensegrali.

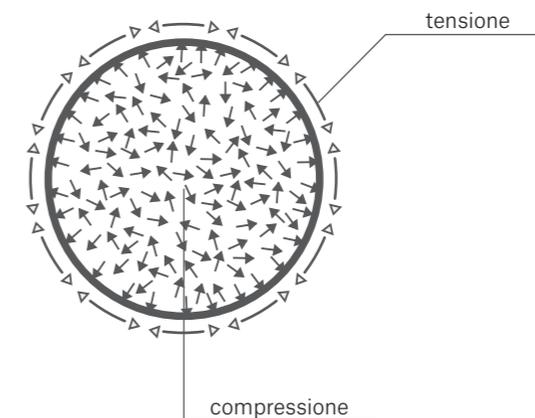
Per comprendere meglio il ruolo dell’autosollecitazione in tali sistemi e per spiegare come questo particolare stato iniziale possa esistere, è possibile tracciare un’analogia tra l’autosollecitazione di un sistema tensegrale e la pressurizzazione di un pallone.

Quando un pallone è sgonfio, la sua geometria è casuale e la pressione dell’aria all’interno è uguale alla pressione atmosferica.

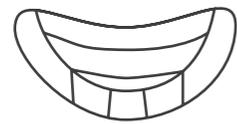
Per gonfiarlo, bisogna immettere dell’aria. Se il volume di aria è uguale al volume limitato dal suo involucro, il pallone raggiunge la sua forma finale ma la membrana non è tesa. La pressione interna è quindi sempre uguale alla pressione atmosferica. Questo corrisponde al caso del simplex con $\alpha = 0^\circ$ dove lo stato di autostress è pari a zero.

Il sistema è stabile ma non ha rigidità; Se aumentiamo ulteriormente la quantità d’aria immessa, la pressione interna del pallone aumenterà in modo che la pressione interna sia maggiore di quella atmosferica.

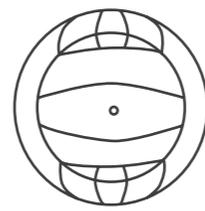
La membrana si tenderà, il che darà rigidità al pallone.



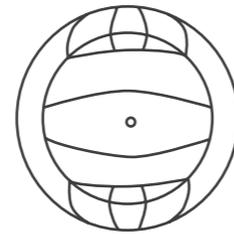
Questa situazione corrisponde al caso del simplex con angolo di rotazione α pari a 30° , nello stato di autotensionamento.



membrana senza aria
 $p =$ pressione atmosferica



forma sferica
 $p =$ pressione atmosferica

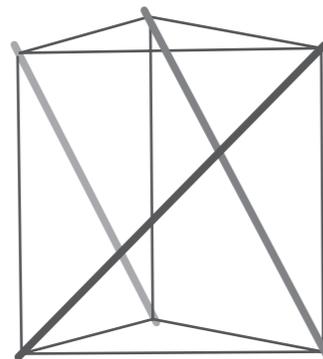


pallone sotto pressione
 $p >$ pressione atmosferica



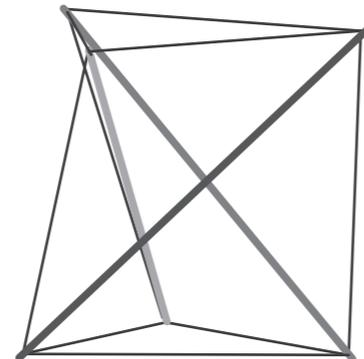
$T = 0$

viste laterali
 $\alpha = 0^\circ$



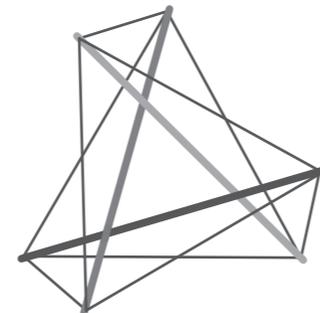
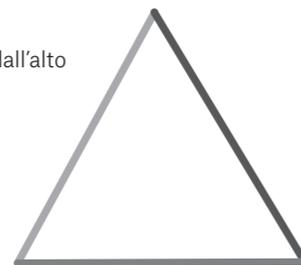
$T = 0$
configurazione iniziale

$\alpha = 30^\circ$



$T > 0$
configurazione equilibrata

viste dall'alto



Tutto ciò vale anche per le strutture tensegrali, con l'unica differenza che la forza stabilizzante in questo caso non si ottiene attraverso l'aumento della pressione dell'aria interna ma attraverso l'allungamento dei puntoni o l'accorciamento dei tiranti.

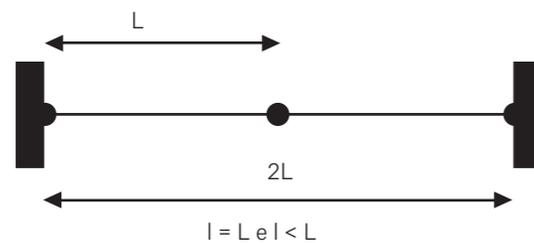
Infatti se la lunghezza dei puntoni è troppo corta o la lunghezza dei tiranti è troppo lunga il sistema tensegrale è cinematicamente indeterminato, in quanto può assumere innumerevoli configurazioni.

Esiste una ed una sola lunghezza degli elementi tale che la struttura si ritrovi in una condizione di equilibrio con presollecitazione nulla; in questa condizione il sistema è ancora una volta cinematicamente indeterminato ma questa volta il meccanismo interno è infinitesimale.

Da questo punto in poi se invece tentiamo di allungare i puntoni o accorciare i tiranti allora imponiamo al sistema uno stato di presollecitazione interno che stabilizza la struttura . Il valore di questa presollecitazione può variare all'interno di un range, oltrepassati i valori limite del quale la struttura ha un collasso, o per cedimento dei tiranti o per cedimento dei puntoni (lo stesso accade nei sistemi pneumatici dove il rischio, a pressioni troppo elevate, è quello di esplosione della camera d'aria).

I sistemi tensegrali appartengono alla classe più generale dei meccanismi infinitesimi del primo ordine.

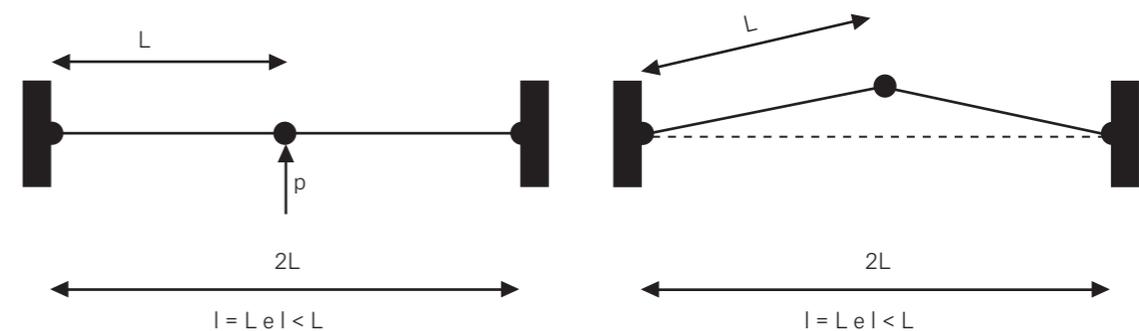
Per capire meglio questo concetto, può essere analizzata la seguente analogia: si consideri uno schema a tre cerniere distanziate $2L$ e collegate da due barre identiche complanari di lunghezza L . Si distinguono diversi casi a seconda delle dimensioni delle barre in relazione alla distanza tra gli elementi:



Le barre sono orizzontali e non hanno forze interne. Questa situazione corrisponde al caso del simplex $\alpha = 30^\circ$ dove lo stato di autostress è zero;

Le barre sono orizzontali e in tensione.

Quando il sistema è sollecitato, automaticamente ritorna alla sua posizione iniziale. Questo stato di equilibrio stabile corrisponde al caso di simplex con $\alpha = 30^\circ$ in stato di autotensionamento

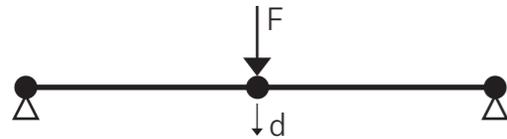


Se le barre sono tenute in posizione orizzontale, il sistema è in equilibrio instabile. Infatti, una perturbazione le farà allontanare permanentemente dalla loro posizione iniziale verso uno stato di equilibrio stabile. Questa situazione corrisponde al caso del simplex $\sqrt{2} \leq l_c < 1,468$ con $\alpha \neq 30^\circ$.

Una seconda perturbazione, opposta alla prima e sufficientemente alta, farà sì che il sistema passi alla posizione di equilibrio stabile opposta, passando attraverso la posizione di equilibrio instabile. **Questo fenomeno è chiamato "snap through"** (scatto).

Il calcolo delle strutture tensegrali presenta delle difficoltà intrinseche a causa della loro non linearità.

Per capire meglio questa particolarità, si consideri l'analogia delle 2 aste ruotate sottoposte a un carico esterno:



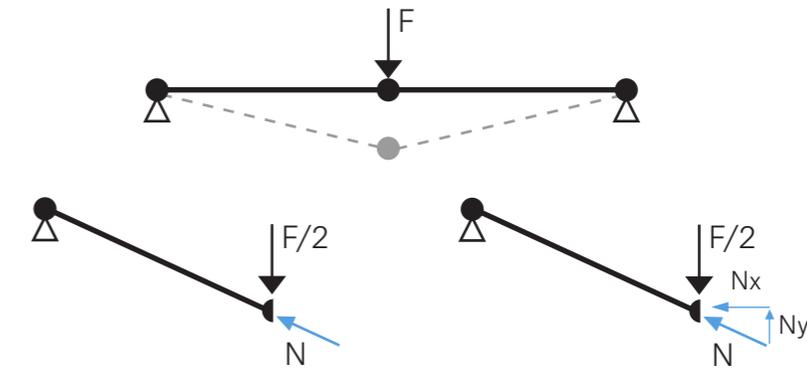
Per bilanciare le forze interne e i carichi esterni usando un calcolo lineare del primo ordine, troviamo che l'equilibrio delle forze verticali non è rispettato.

Questo perché, se studiamo la stabilità delle barre su entrambi i lati del vincolo interno (cerniera), osserviamo che nessuna forza impedisce la barra di ruotare indefinitamente intorno al suo supporto. La risoluzione di questo sistema porta quindi a uno spostamento verticale di valore infinito.

Questo è chiamato **indeterminazione numerica**: anche se la soluzione esiste fisicamente, il metodo di calcolo lineare utilizzato non permette di trovare questa soluzione.



Per risolvere correttamente questo sistema, è necessario eseguire un calcolo del secondo ordine, cioè sulla struttura deformata.



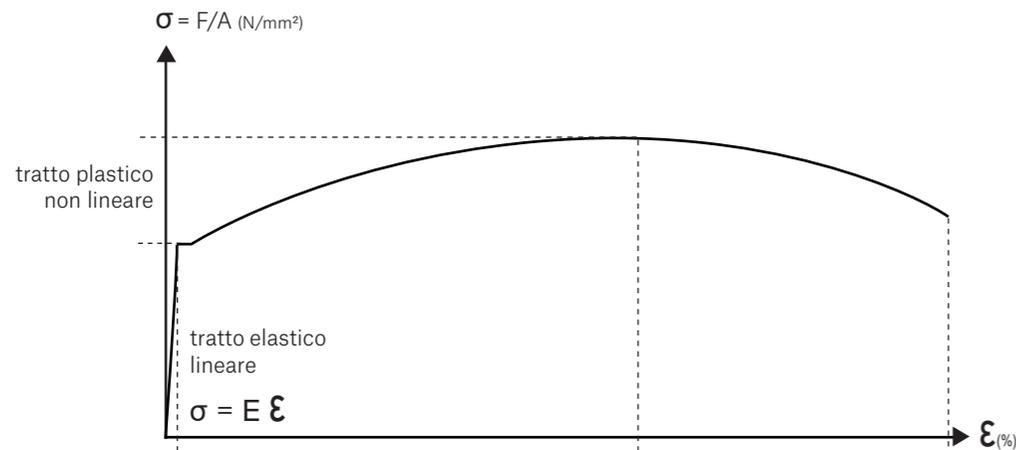
Si può vedere che considerando la struttura deformata, l'equilibrio delle forze verticali può ora essere rispettato. Infatti, la forza normale può essere scomposta in una componente verticale che permette di reagire con una intensità pari alla metà della forza verticale. Si può quindi calcolare una soluzione fisica. Questa soluzione porta ad una relazione non lineare tra lo spostamento e la forza esterna applicata.

Non linearità

Ci sono due tipi di non linearità in una struttura: **la non linearità materiale e la non linearità geometrica.**

- **Non linearità materiale:**

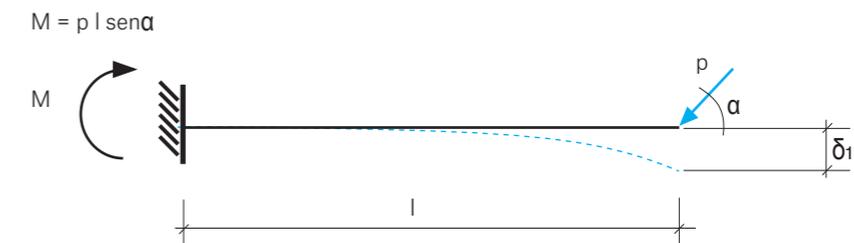
Le deformazioni non rispettano più la legge lineare di Hooke.



- **Non linearità geometrica:**

La non linearità geometrica riguarda le strutture che sono soggette a grandi deformazioni. In questo caso, la struttura deve essere calcolata sulla base della sua deformazione.

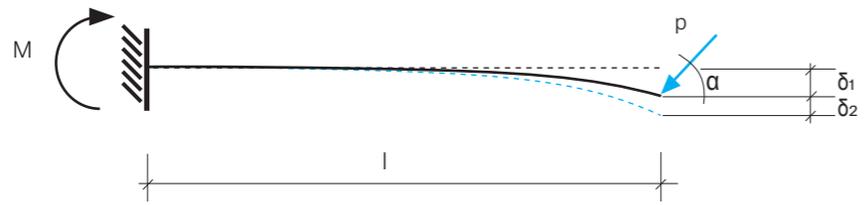
calcolo di primo ordine



Se la deformazione δ_1 della struttura è molto piccola, la struttura deformata è praticamente sovrapponibile con la struttura iniziale. L'equilibrio della struttura può quindi essere calcolato sulla base della sua geometria iniziale. Questo è definito **calcolo di primo ordine ed è un presupposto semplificativo l'analisi elastica lineare.**

calcolo di secondo ordine

$$M = p l \operatorname{sen} \alpha + (p \operatorname{cos} \alpha) \delta_1$$



Quando la deformazione δ_1 non è più trascurabile, l'errore di un calcolo del primo ordine diventa troppo grande.

È quindi necessario calcolare la struttura al secondo ordine. Questo consiste nell'analizzare l'effetto dell'applicazione del carico sulla struttura deformata.

Spoletosfera
R.F. Buckminster
1967



04/ Generazione di geometrie tensegrali

/ 04.1

Form finding

/ 04.2

Modellazione algoritmica

/ 04.3

Modelli tensegrali

/ 4.1 Form-finding

Molto importante nello studio di un sistema tensegrale è il problema della ricerca della forma.

Sono stati sviluppati diversi metodi analitici, numerici ed empirici per risolvere questo problema ma ad oggi non esiste una metodologia univoca per conoscere l'esatta posizione dei nodi di una data struttura tensegrale. Analizzare nel dettaglio i metodi di calcolo va oltre lo scopo di questa tesi ma a titolo semplicemente nozionistico si riportano di seguito i metodi di risoluzione del problema del "form-finding":

- **metodi cinematici - soluzione analitica**
- **programmazione non lineare**
- **rilassamento dinamico**
- **metodi statici - soluzione analitica**
- **metodo della densità delle forze**
(Vassart 1997)
- **metodo energetico**
- **metodo delle coordinate ridotte**
(Sultan 1999)
- **modellazione algoritmica**
(empirica/analitica, Grasshopper, Kangaroo)

I metodi analitici possono essere usati solo nei casi di strutture molto semplici o ad elevata simmetria, mentre per sistemi più complessi il calcolo è di tipo numerico.

Il problema dell'analisi statica è fortemente connesso a quello della ricerca di forma.

Kennet Snelson
B-Tree II
1982



È infatti impossibile effettuare un calcolo statico se non sono stati imposti i vincoli di equilibrio con presollecitazione nulla che permettono di trovare la geometria della struttura; inoltre non si ha alcuna resistenza ai carichi se non si imprime uno stato interno di presollecitazione alla struttura.

La resistenza alle sollecitazioni esterne in un sistema tensegrale dipende da due fattori: la conformazione geometrica degli elementi ed il livello di pre-tensionamento.

Diversi studi hanno analizzato alcune casistiche di carico in relazione a parametri di geometria e presollecitazione per alcune tipologie di sistemi, ad esempio il simplex, torri cilindriche di classe 1 e 2, griglie di Motro.

Le ricerche hanno evidenziato che le **strutture di classe 2, che presentano aste in contatto fra loro, sono più stabili e staticamente più efficienti delle strutture di classe 1, in cui le aste fluttuano nel vuoto.**

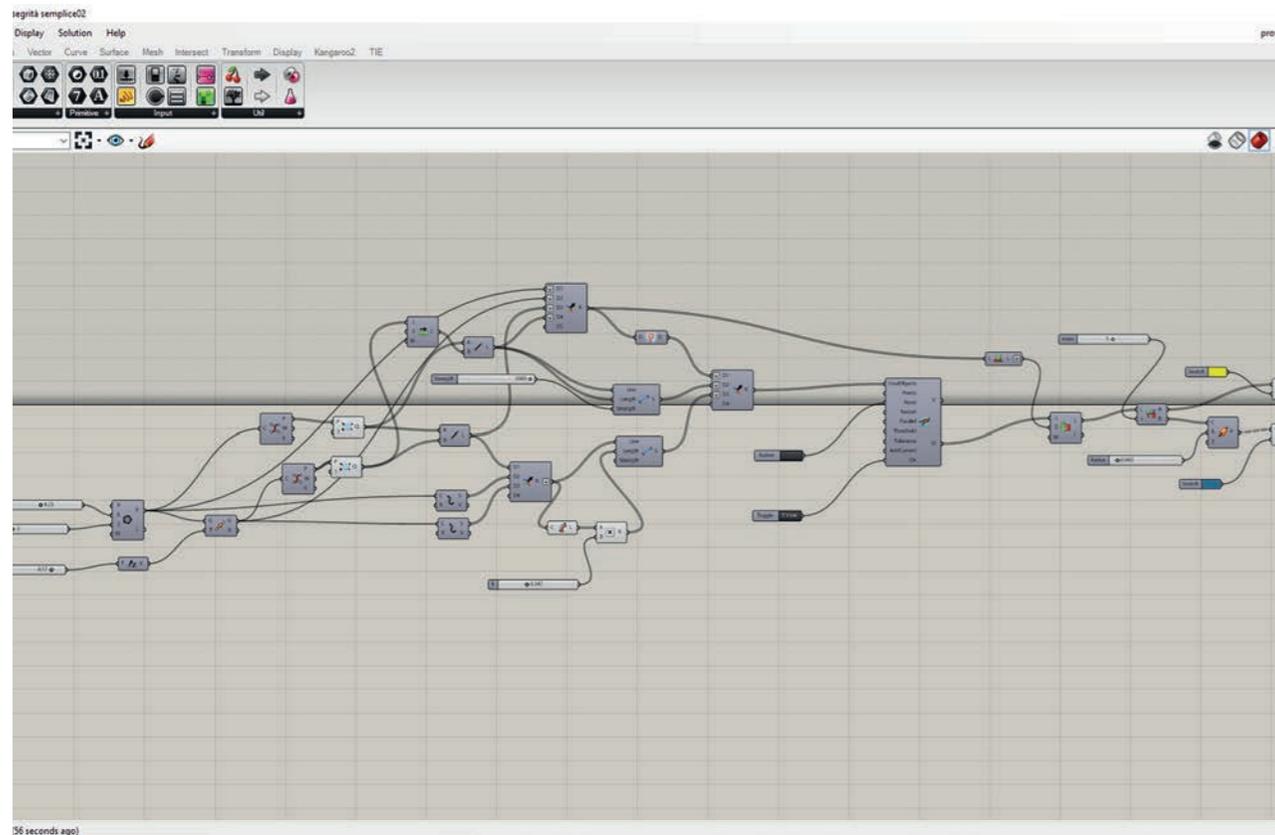
In linea generale tutte le strutture tensegrali presentano un forte calo di resistenza nel momento in cui uno solo dei cavi che le compongono si allenta. Questo può determinare il collasso della struttura ed è quindi uno dei parametri da tenere in maggior conto durante le fasi di progettazione.

Per il form finding e quindi la generazione e il controllo di strutture tensegrali attualmente viene in ausilio la modellazione algoritmica, con la quale si ha la possibilità di creare oggetti tridimensionali attraverso la descrizione del sistema di relazioni alla base di una qualsiasi geometria complessa.

Tale descrizione avviene mediante lo sviluppo di un diagramma a nodi (algoritmo visuale) all'interno di specifici editor che operano in parallelo al software di modellazione.

Uno degli editor è ad esempio **Grasshopper**, strumento di modellazione algoritmica per la generazione ed il controllo di forme complesse a qualsiasi scala, dall'architettura al design.

Plug-in integrato in Rhinoceros dalla release 6 in poi, in grado di generare forme tridimensionali complesse attraverso la definizione di un diagramma a nodi (algoritmo) il quale descrive le relazioni matematiche e geometriche di un modello.

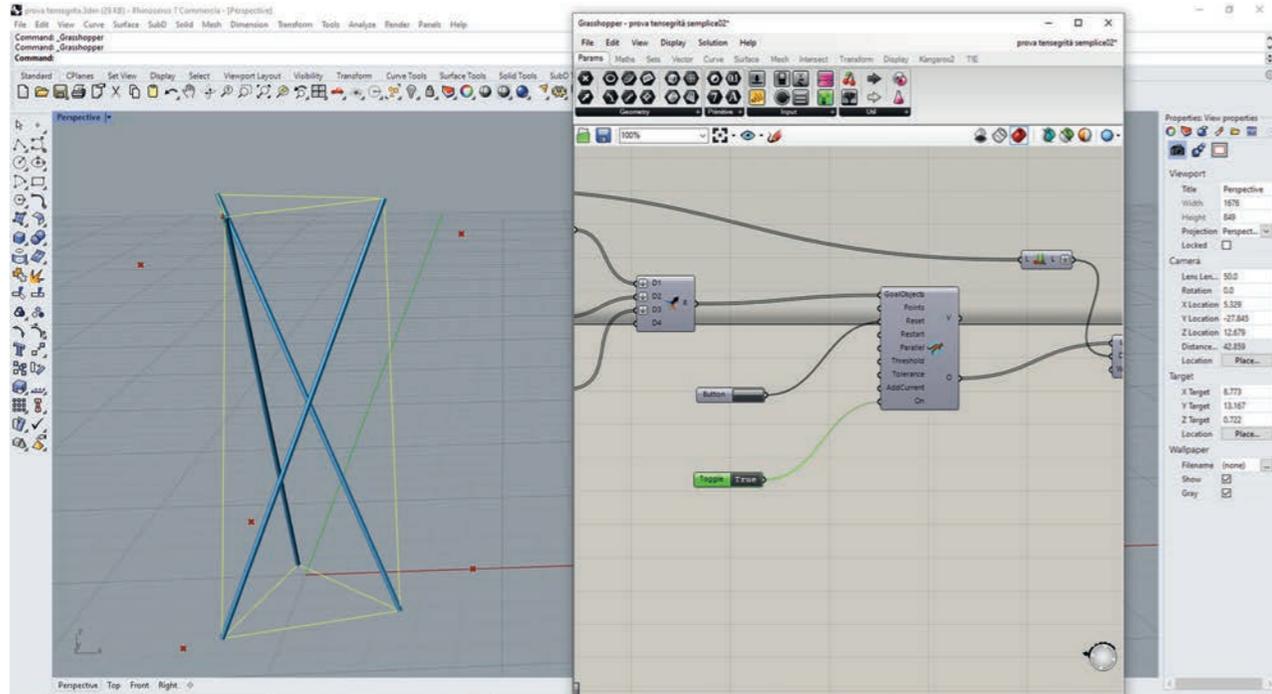


interfaccia di Grasshopper

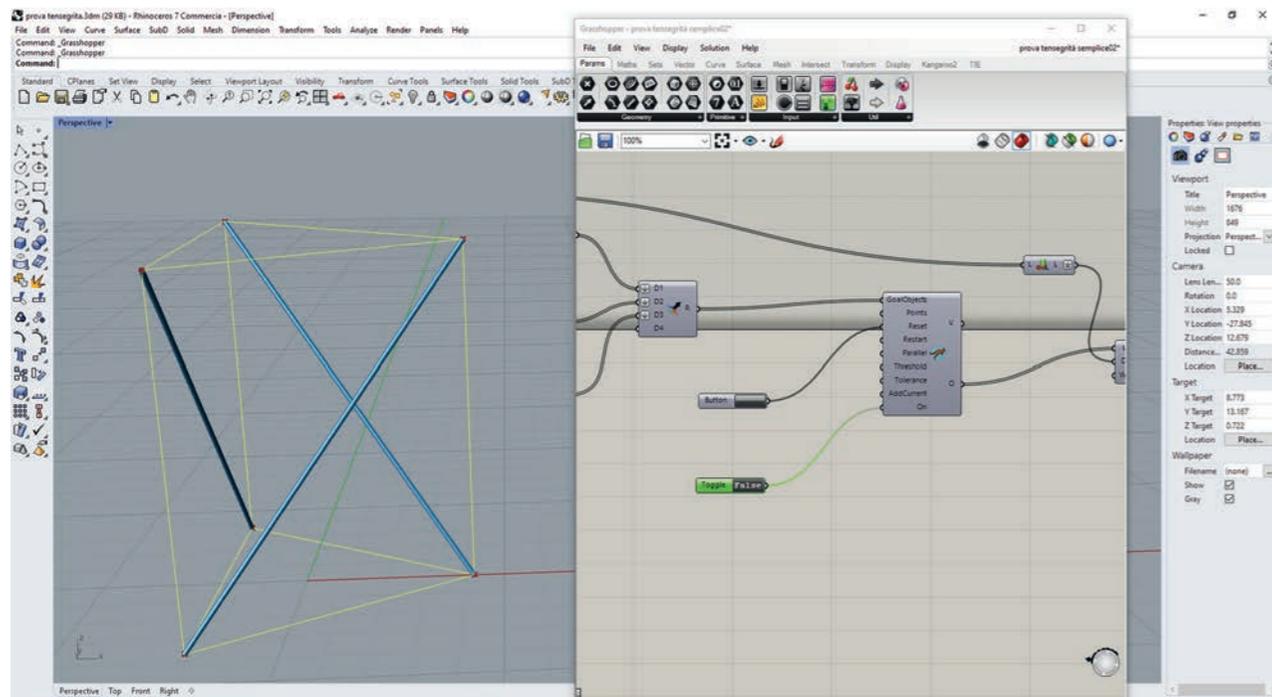
Ciò che si genera è un sistema dinamico modificabile in tempo reale mediante la variazione dei parametri definiti durante la costruzione del diagramma.

Questo vuol dire che la modifica di un parametro è in grado di generare una estensione di modifiche tale da determinare la ridefinizione anche dei dettagli. La razionalizzazione della forma, la sua scomposizione o il suo sviluppo di superfici complesse, non sono più quindi operazioni "a posteriori" ma vengono integrate nel medesimo processo di definizione.

Rhino, Grasshopper e Kangaroo, simulazione della risposta alle sollecitazioni di una configurazione tensegrale simplex



186



La realizzazione di un sistema tensegrale prevede nella fase form-finding l'analisi di una combinazione di valori di tensione e compressione che lo mantenga stabile, raggiungendo l'equilibrio delle azioni senza determinare un collasso.

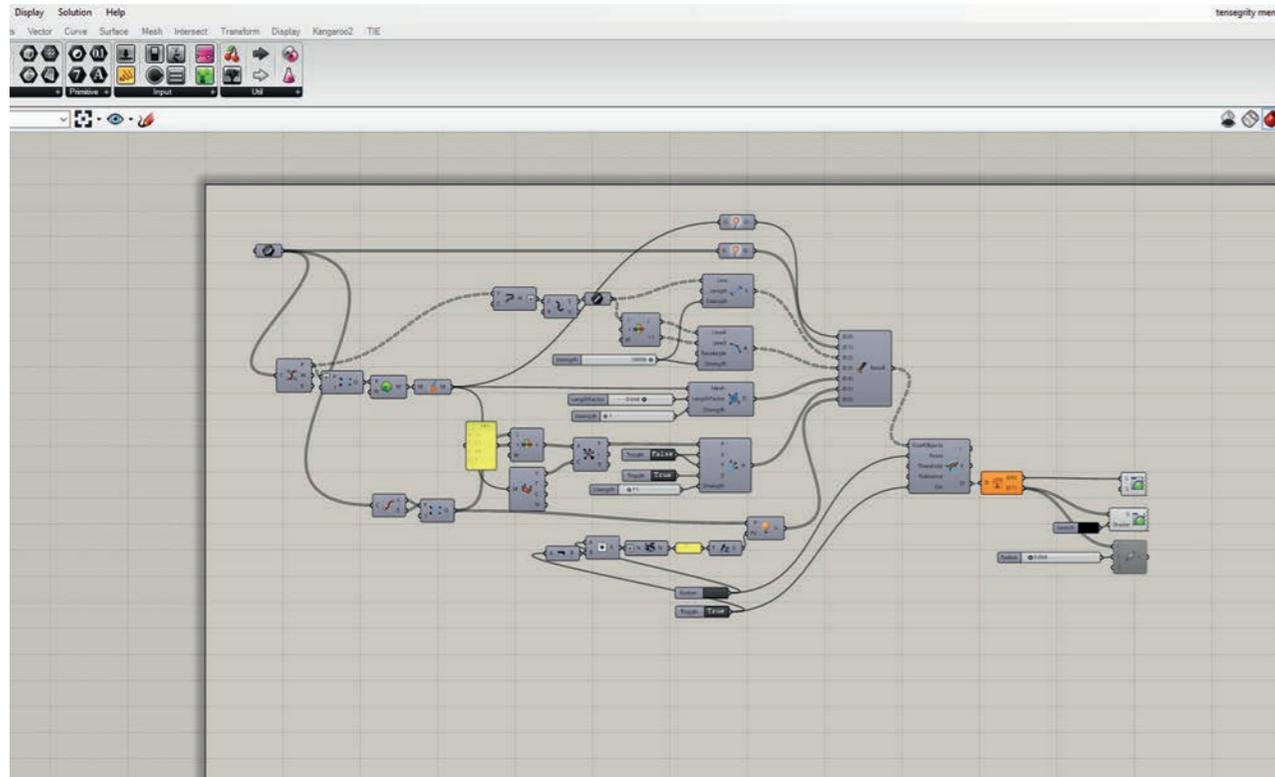
La modellazione algoritmica di Grasshopper a tal scopo viene integrata dal plug-in **Kangaroo**, un motore di fisica/solver di rilassamento interattivo e dinamico.

Un motore fisico è un software che contiene informazioni sulla fisica realistica ed ha la funzione di imitare esperienze reali in ambiente digitale. Viene utilizzato per simulazioni scientifiche ma anche nell'industria dei videogame poiché fornisce un'esperienza di gioco più realistica.

In questo modo nella generazione di un sistema tensegrale è possibile, oltre che definire la geometria, simulare anche le azioni di pretensione, tensione e rilassamento per testare e risolvere la stabilità del sistema, sempre in "real time".

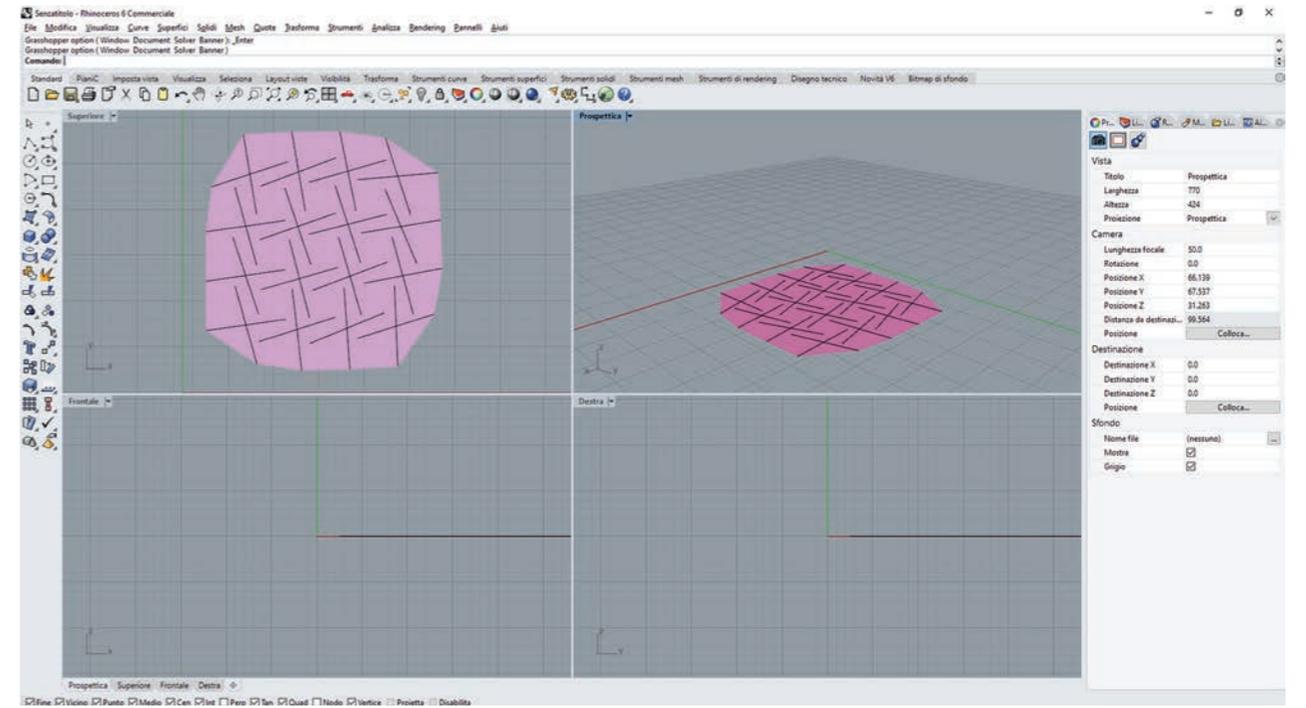
Un ulteriore software, **"Tensegrité 2000"**, è stato sviluppato da René Motro e dal suo gruppo di ricerca presso il Laboratoire de Génie Civil a Montpellier.

187

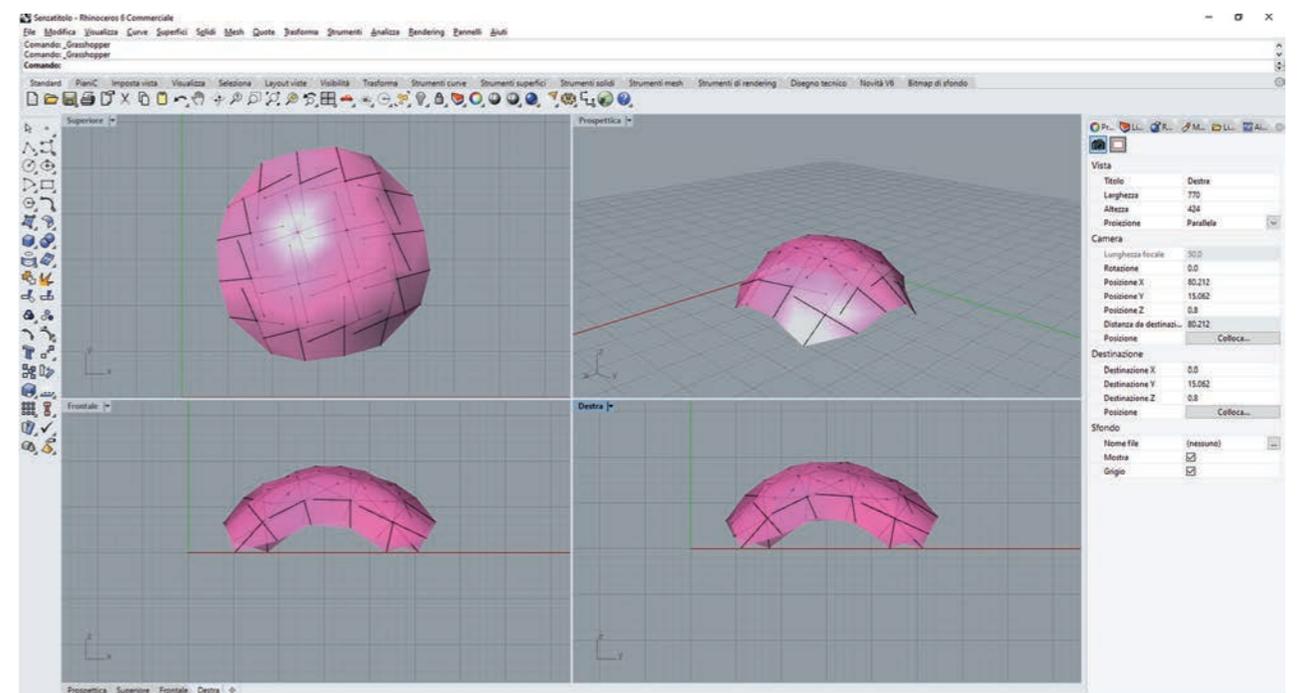


188

Esempio di simulazione dell'interazione tra puntoni in compressione e membrana in tensione che porta la struttura a sollevarsi, dallo stato di riposo in piano, in una forma tridimensionale (Rhinoceros con i plug in Grasshopper e Kangaroo)



189

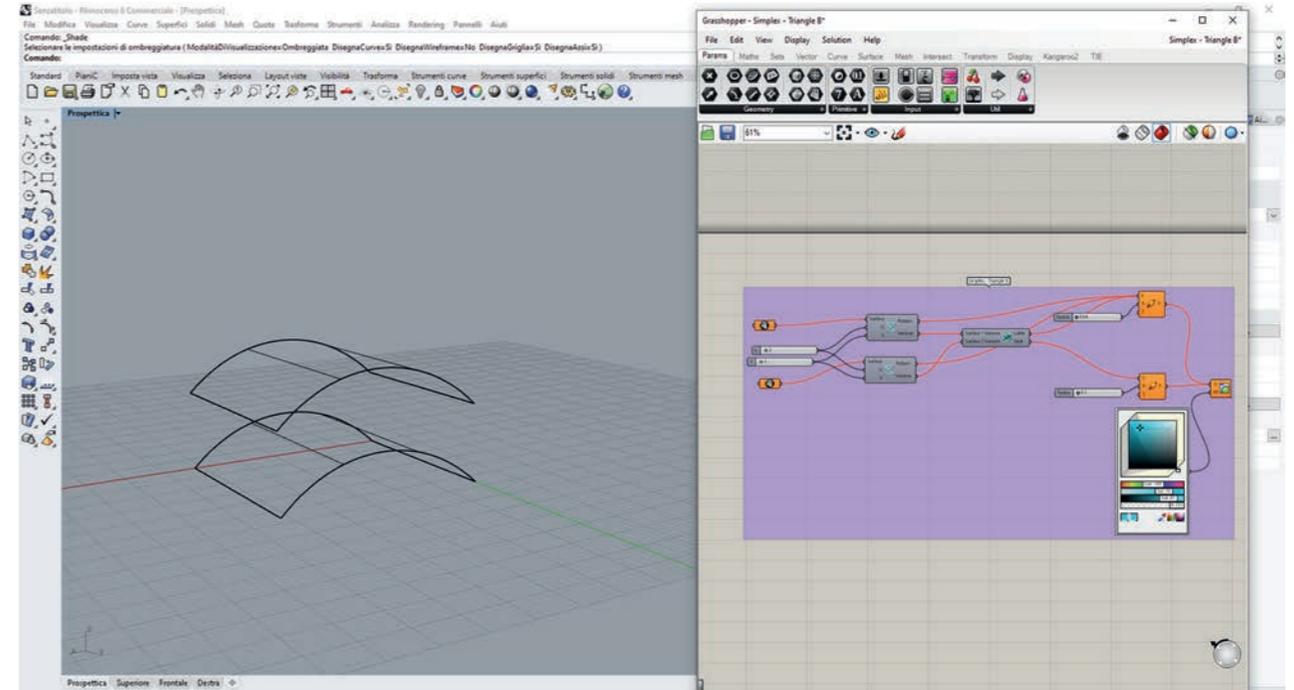
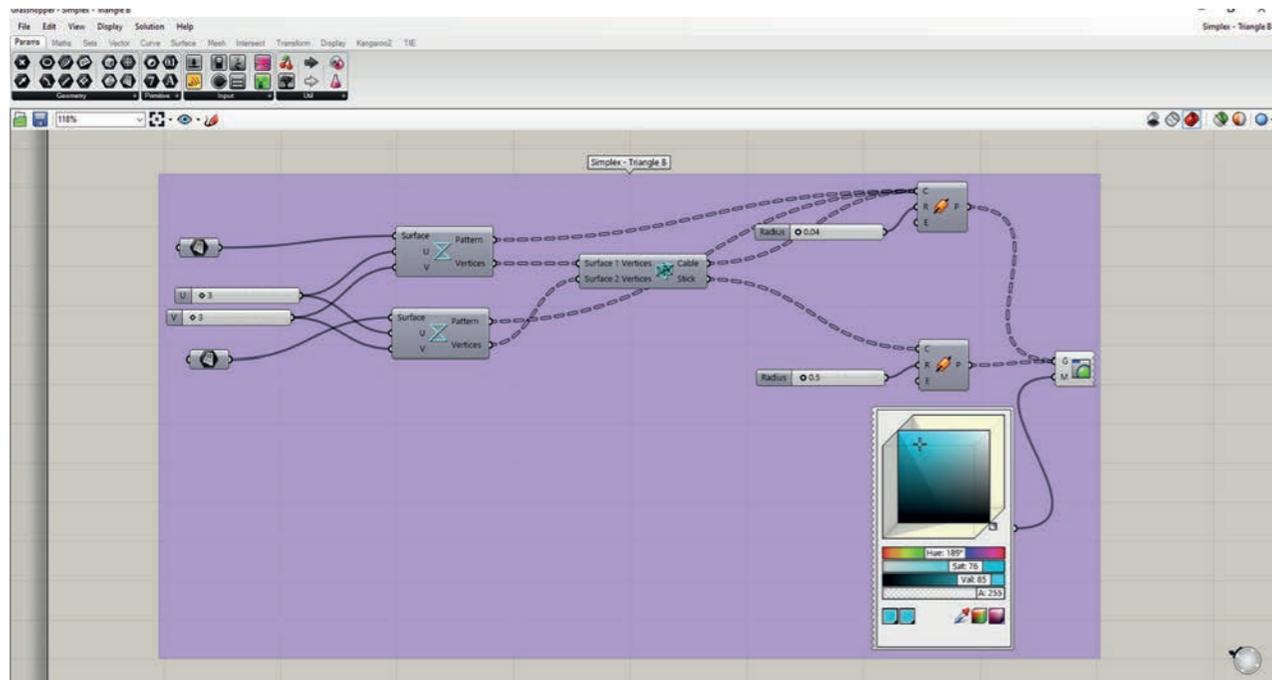


Un altro plug in sviluppato per Grasshopper è **T.I.E. (Tensegrity Integration Element)**, sviluppato da Responsive Architecture Lab Team presso la School of Architecture - University of Illinois.

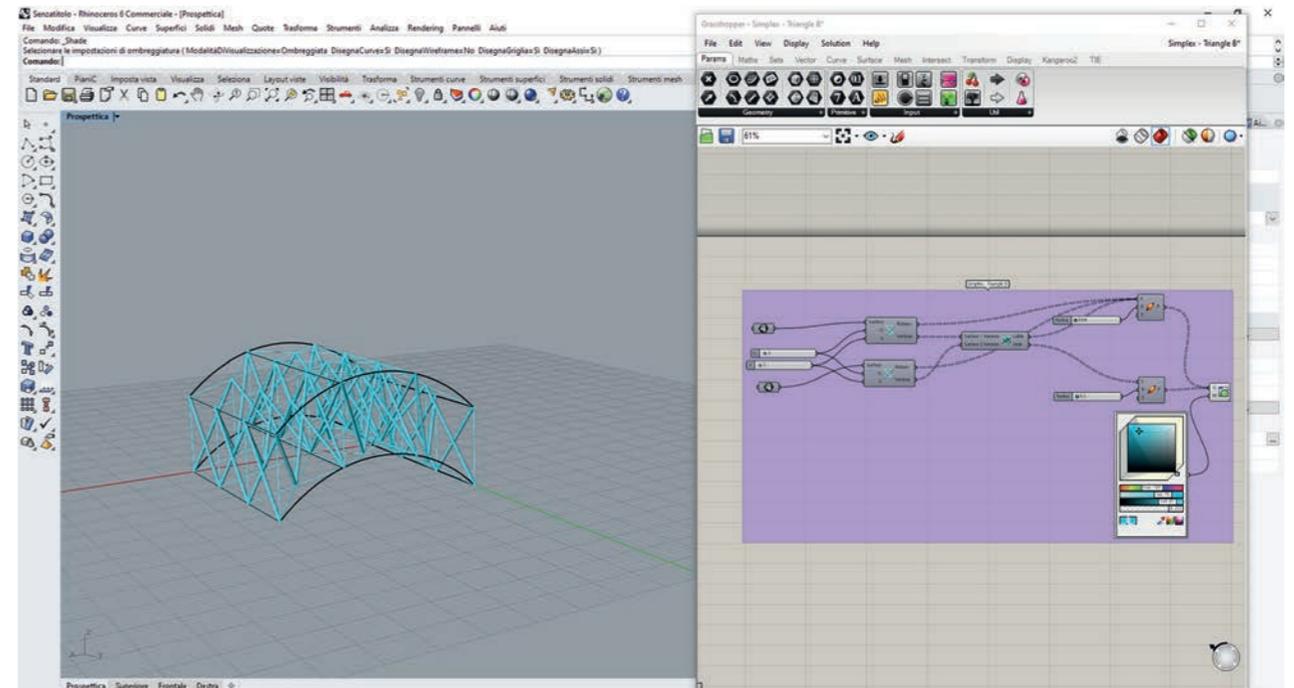
T.I.E. genera automaticamente moduli tensegrali di tipo simplex o rombico combinati tra loro e distribuendoli in maniera omogenea in una geometria, intesa come superficie o volume.

Il che dà la libertà a un designer di non dover progettare puntoni e tiranti angolati in direzioni diverse ma di poter valutare più possibili configurazioni inserendo come variabili, nel diagramma a nodi, le geometrie dove generare il sistema tensegrale modulare.

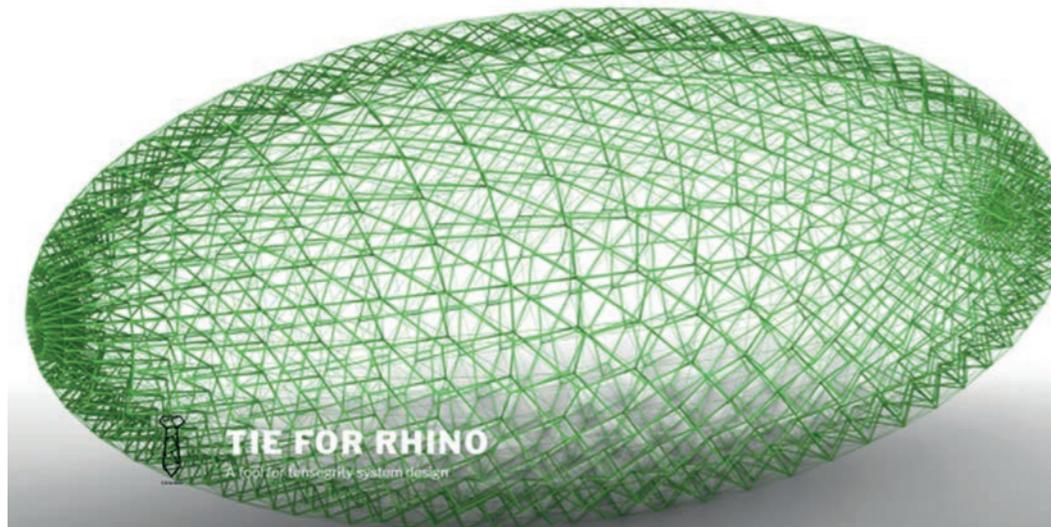
190



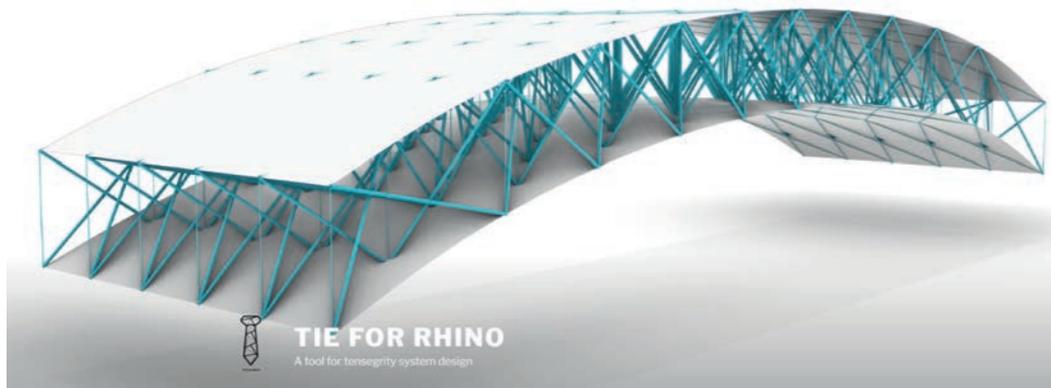
191



/ 4.3 Modelli tensegrali



192

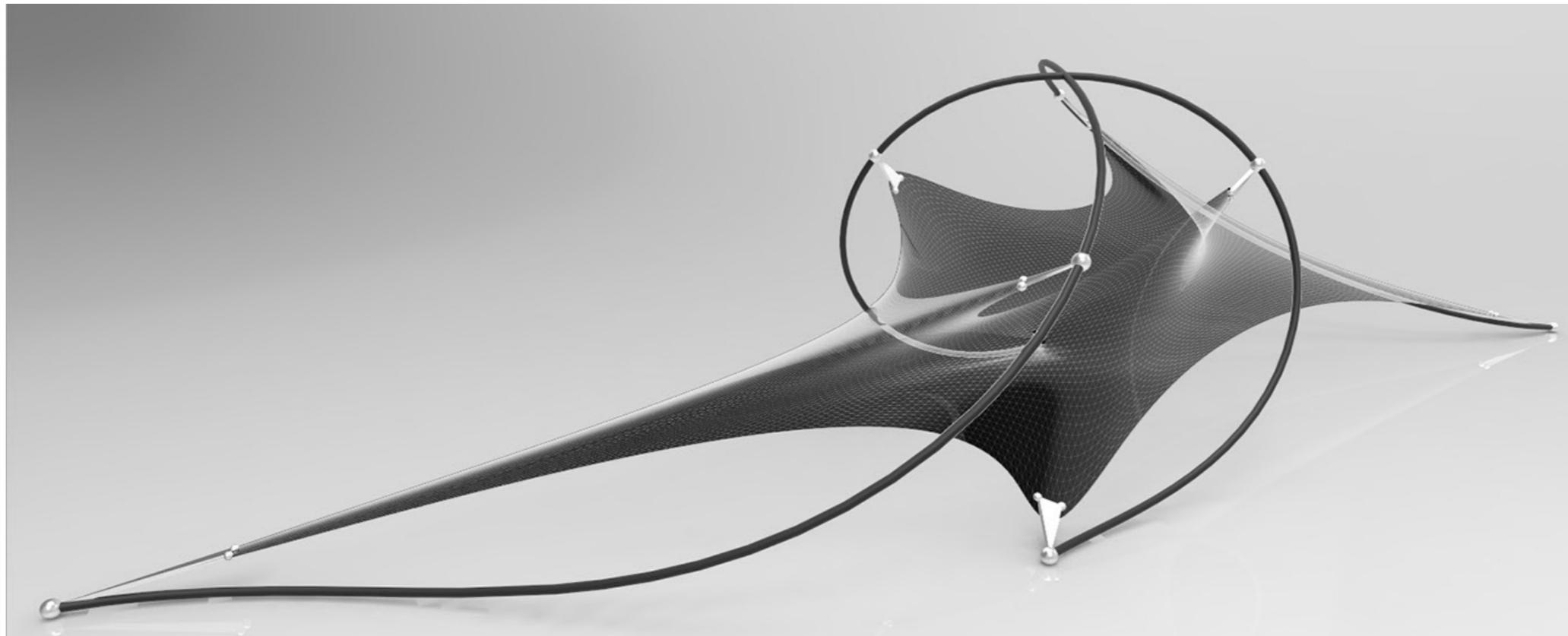


La particolarità del sistema tensegrale è data dalla presenza di elementi discreti rigidi e distinti, sottoposti a compressione, e da elementi continui tali da definire una “rete” di tensione continua. Gli elementi compressi non si toccano tra di loro ma sono sostenuti dalla “rete” di elementi in tensione delineando il sistema e conferendo la percezione di una struttura fluttuante nello spazio.

Una struttura così fatta diventa anche più forte quando viene caricata: nessuno dei singoli elementi subisce un momento flettente e non ci sono sollecitazioni di taglio all'interno del sistema.

Il carico consente al materiale di essere in tensione mantenendo così l'integrità strutturale e la stabilità meccanica, con la conseguenza che in questo modo gli elementi restano in tensione o compressione all'aumentare delle sollecitazioni sulla struttura.

193



render 3D di una struttura tensegrale
con montanti curvi e membrane

In generale, il sistema funziona unendo le forze opposte e, secondo Fuller, è la “base strutturale della natura, capace di, con un minimo di elementi, di formare una struttura forte”.

Gli elementi strutturali possono essere costituiti da qualsiasi materiale che assolve alle stesse funzioni meccaniche, purché la geometria definisca l'equilibrio di forze di trazione e compressione. Tali modelli hanno interessato gli ingegneri, che hanno proposto una nuova terminologia, gli artisti, che hanno provato a realizzarli, i matematici, che hanno provato a renderli modelli applicabili, i biologi, che hanno affrontato il tema conducendo esperimenti e considerazioni sulla loro evoluzione.

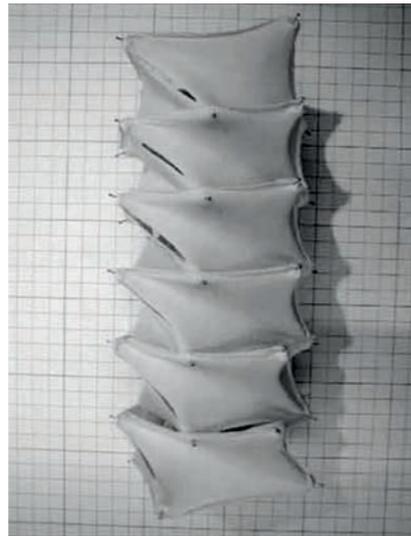
Tensegrità con le membrane

La geometria è basata sulla concezione di un modulo base poligonale o poliedrico (unità tensegrale) e la sostituzione dei componenti geometrici quali aste, cavi e giunti con la superficie della membrana.

La geometria è generata dal taglio di membrane tessili, a forma di rombo o diamante che sono disposte in direzione obliqua o in posizione diagonale. Le barre sono unite ai punti finali della membrana. Le aste sono legate al modello adiacente su uno dei suoi vertici, e così via. Le unità legate possono essere chiuse unendo la prima asta e l'ultima con la membrana stessa.



modellini realizzati con membrana continua e puntoni



Latex



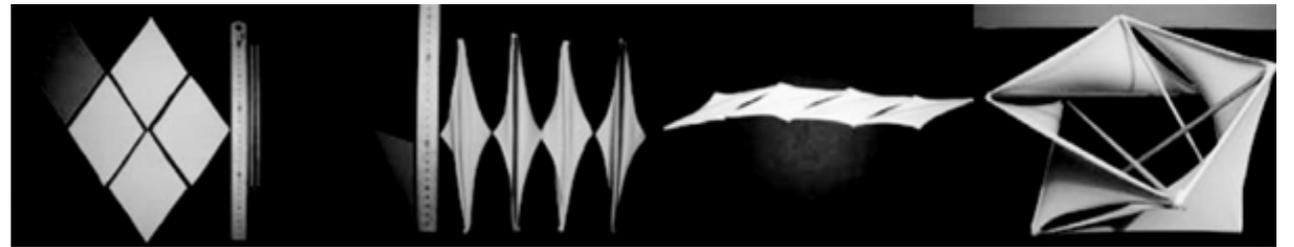
rete di plastica



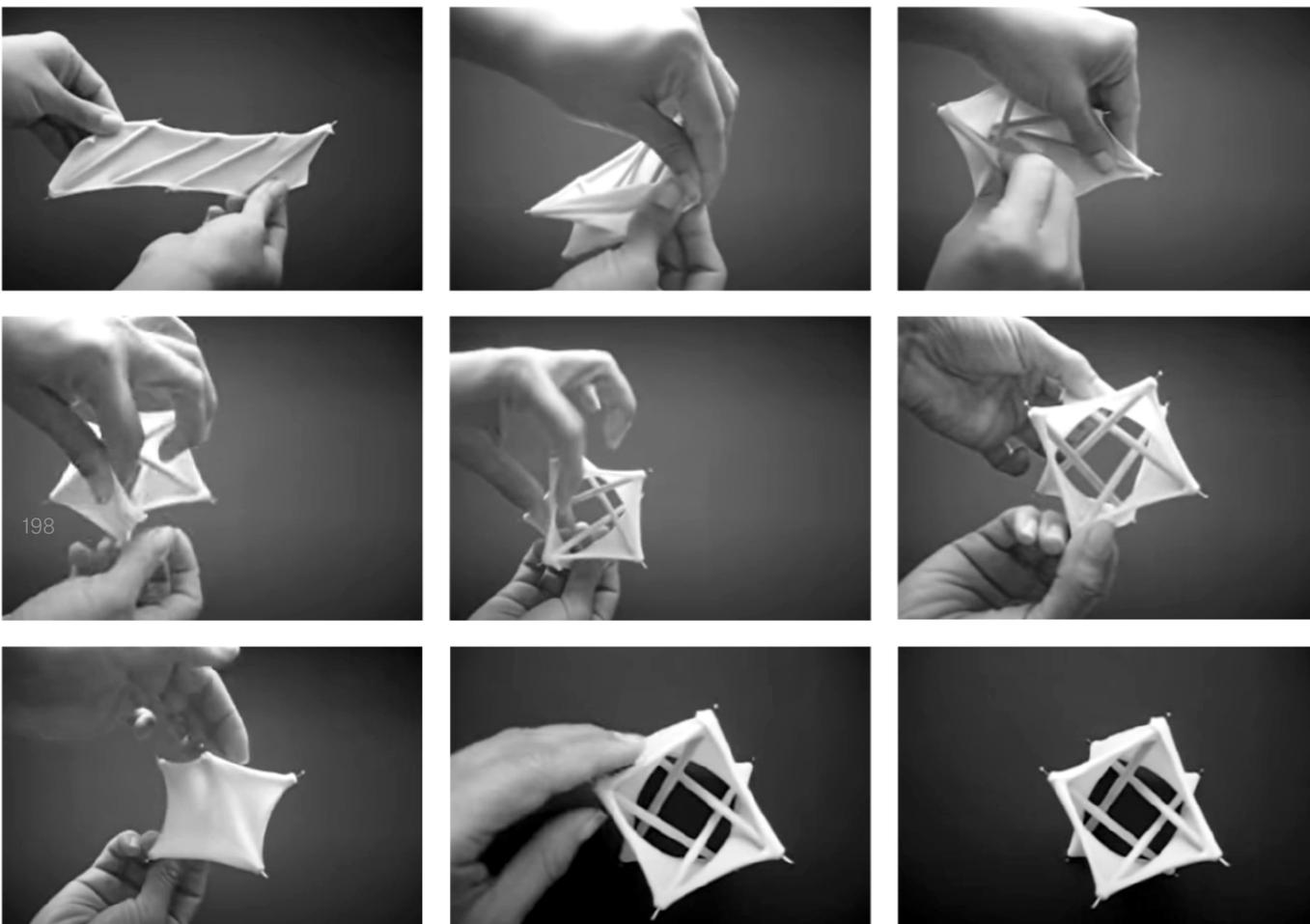
Lycra



modelli realizzati con membrane continue in materiali diversi



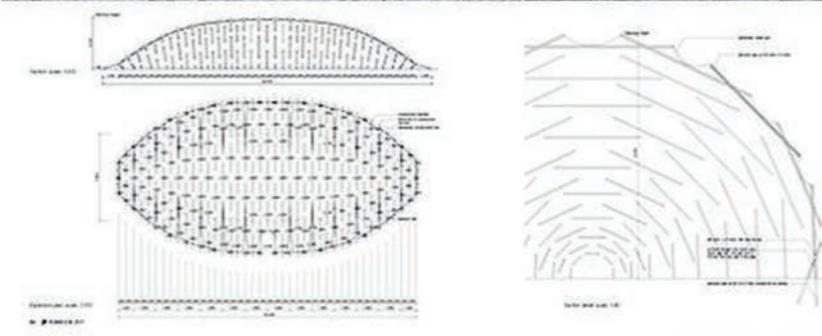
modellini realizzati con membrana continua e discontinua



tensegrity con membrane continue
(vedi QR code)



Uno degli esempi di applicazione è il pagiglione MOOM
(cfr cap. / 0.1.3, pag. 70)
Il sistema tensegrale si realizza nelle linee di tensione
principali e quasi lineari, visibili nelle pieghe del tessuto tra gli
elementi di compressione.
La membrana potrebbe essere considerata come un
continuum delle forze di tensione, ovvero i cavi in tensione
sono in pratica sostituiti dalla membrana elastica.





messa in opera del padiglione MOOM (vedi QR code)



05/ Stato della ricerca

/ 05.1

Sperimentazioni
e ulteriori sviluppi

/ 05.1 Sperimentazioni e ulteriori sviluppi

L'applicabilità pratica delle strutture tensegrali nella progettazione ha fatto sì che sia stata superata la concezione che non siano in grado di andare oltre la dimensione artistica e simbolica entro cui vengono lette e percepite tante opere sia di Fuller e ancor più quelle di Kenneth Snelson o di Tom Flemons, al pari cioè di una suggestiva quanto emozionante installazione o di una performance artistica.

Oggi si va ben oltre quella attenzione che nei decenni passati ha guardato alle tensegrity come puri giochi per la mente, "food for thought", per citare la definizione che ne diede Jörg Schlaich, l'ingegnere di Stoccarda che ha progettato una delle opere più note realizzate con tale tecnologia, la Tensegrity Tower di Rostock (cfr pag. 164).

Il loro studio è stato inserito in alcuni corsi universitari, vengono presentate in apposite sessioni dei convegni specializzati e si vanno moltiplicando esempi di realizzazioni anche quando non sono perfettamente rispondenti alla definizione canonica di tensegrity.

Le proprietà dei sistemi tensegrali trovano applicazione nei più svariati ambiti e forniscono in diversi casi modelli teorici per la comprensione di fenomeni naturali o biologici.

Esiste anche una letteratura che richiama il concetto di tensegrità per spiegare fenomeni psico-sociali di attrazione e repulsione.

Lo stesso Buckminster Fuller richiamava le peculiarità di questi sistemi per dimostrare le sue teorie metafisiche sulla reale natura delle forze che regolano l'universo.

La parola "tensegrità" infatti non descrive una struttura, un'opera d'arte o un oggetto definito bensì una relazione di equilibrio tra tensioni opposte.

Attualmente la ricerca è orientata ad una maggiore conoscenza del potenziale del sistema tensegrale, allo sviluppo di diverse possibili applicazioni e alla generazione di nuove forme.

Nonostante questo campo d'indagine si possa ancora considerare di nicchia, è stata reperita ed analizzata una notevole quantità di dati, prodotti e siti internet che affrontano questo argomento.

Gli ambiti indagati sono molteplici: arte, matematica, geometria, robotica, biologia, medicina, ingegneria strutturale, ingegneria aerospaziale, architettura, design e addirittura psicologia, filosofia e metafisica.

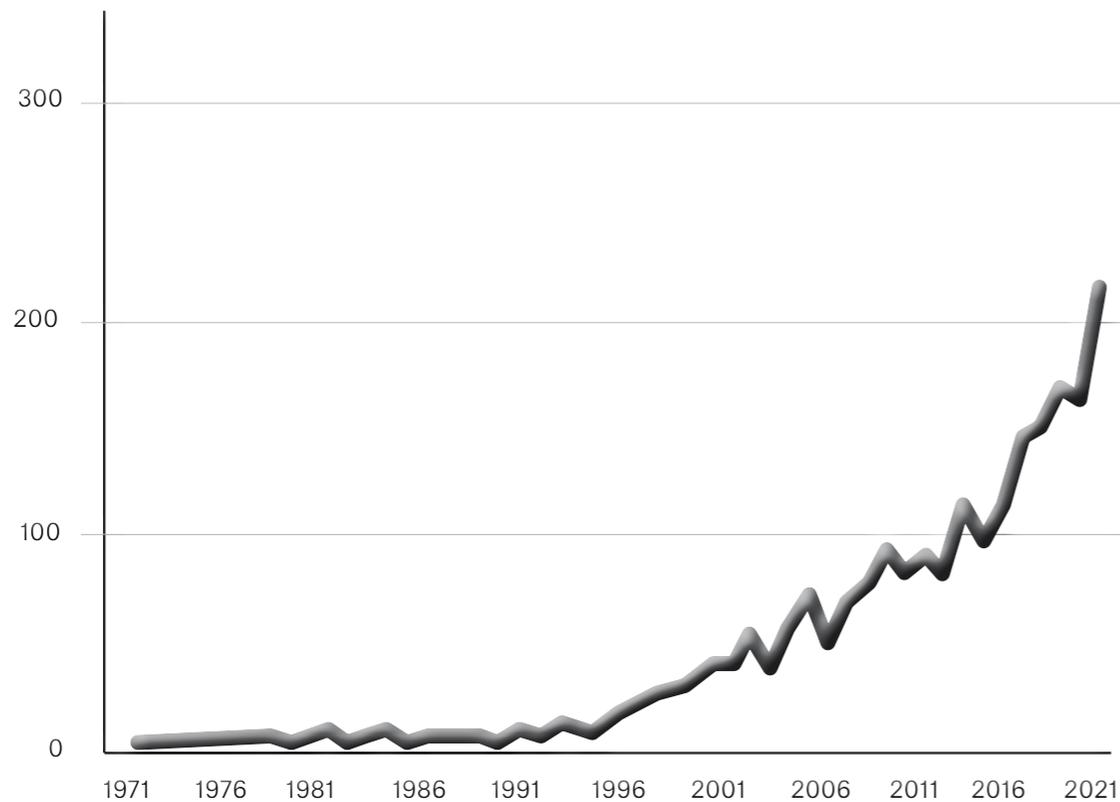
Ricerca per parole chiave su banca dati Scopus

keyword "tensegrity"

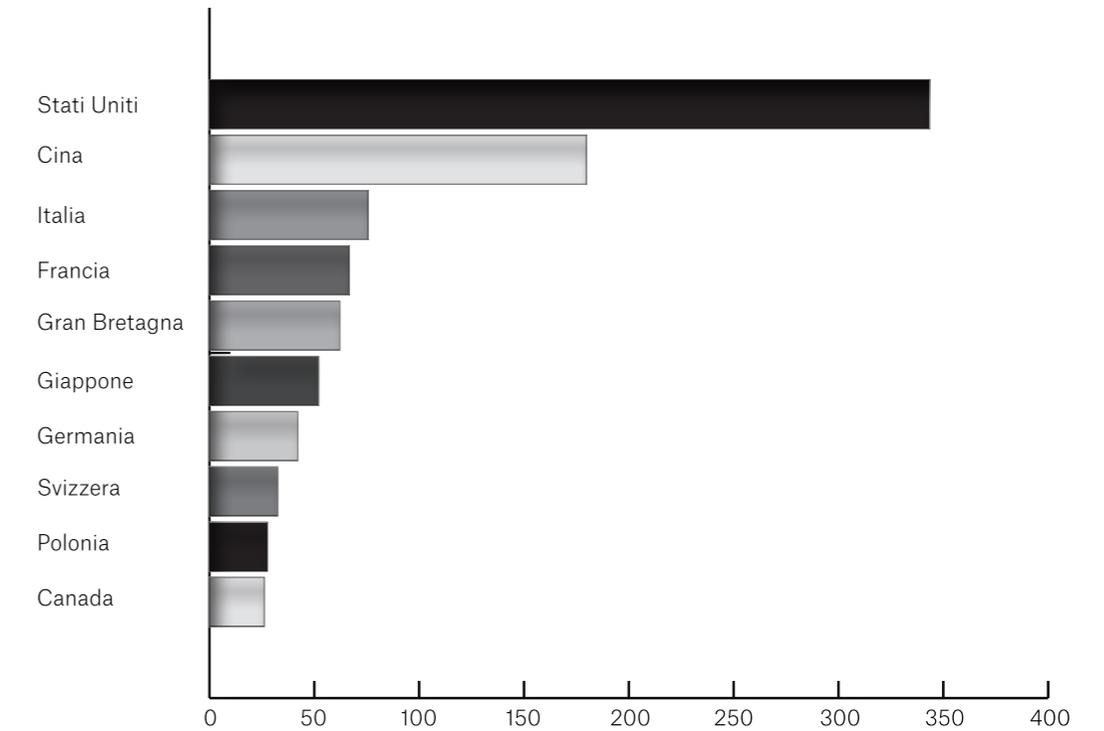
Le banche dati dei sistema informativi citazionali di tipo tecnico scientifico, come ad esempio Scopus, consentono di osservare il trend e constatare quanto questo argomento abbia acquisito crescente interesse nel tempo. I dati sono restituiti come grafici di analisi che evidenziano le tendenze e lo stato attuale dell'attività di studio e ricerca. Ad esempio dal grafico del trend temporale è evidente che l'attenzione della ricerca verso questo argomento abbia avuto un incremento sostanziale più di vent'anni fa. Non è da escludere che con l'evoluzione delle tecnologie e dei materiali la ricerca si sia orientata verso soluzioni strutturali alternative realizzabili più facilmente ora che in passato.

206

trend temporale

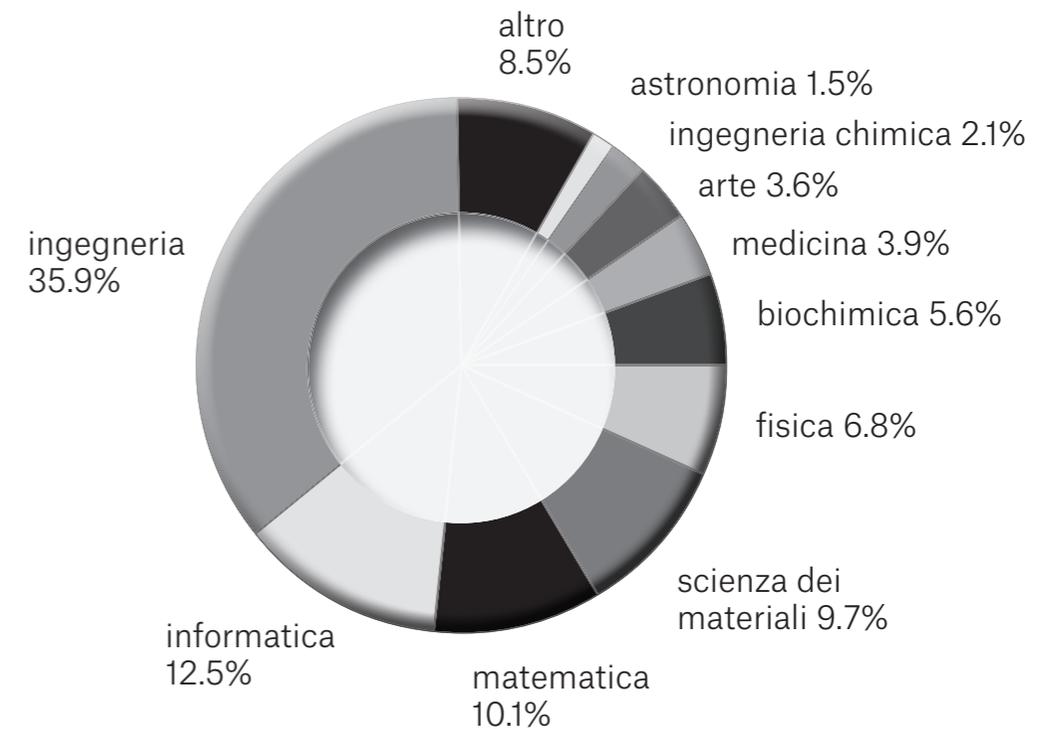


trend per nazione



207

trend per disciplina % di incidenza



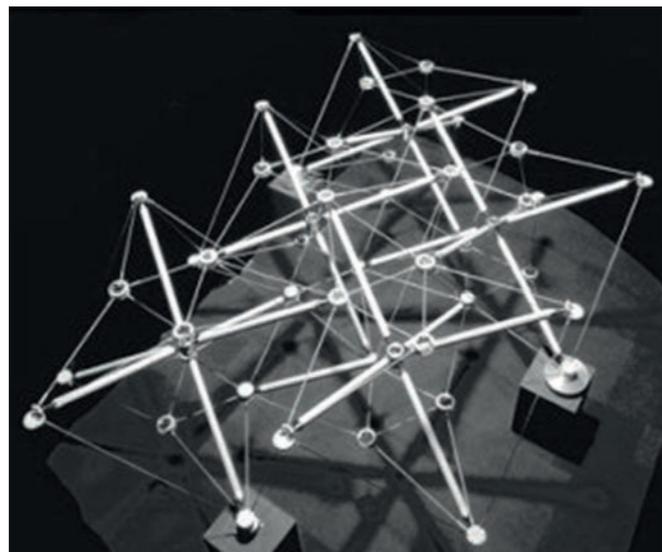
dati aggiornati maggio 2022

Strutture tensegrali come “sistemi attivi”

Recentemente diverse ricerche si sono orientate sulla possibilità di trasformare le strutture tensegrali in sistemi attivi.

Il fatto che questi sistemi siano costituiti da aste collegate da cavi lascia ipotizzare che agendo sul sistema si possano smorzare gli effetti dinamici e le vibrazioni dovute ad esempio all'effetto del sisma o del movimento di un carico sulla struttura, oppure alla possibilità di monitorare in tempo reale il livello di tensione presente in ogni elemento di una copertura tensionata.

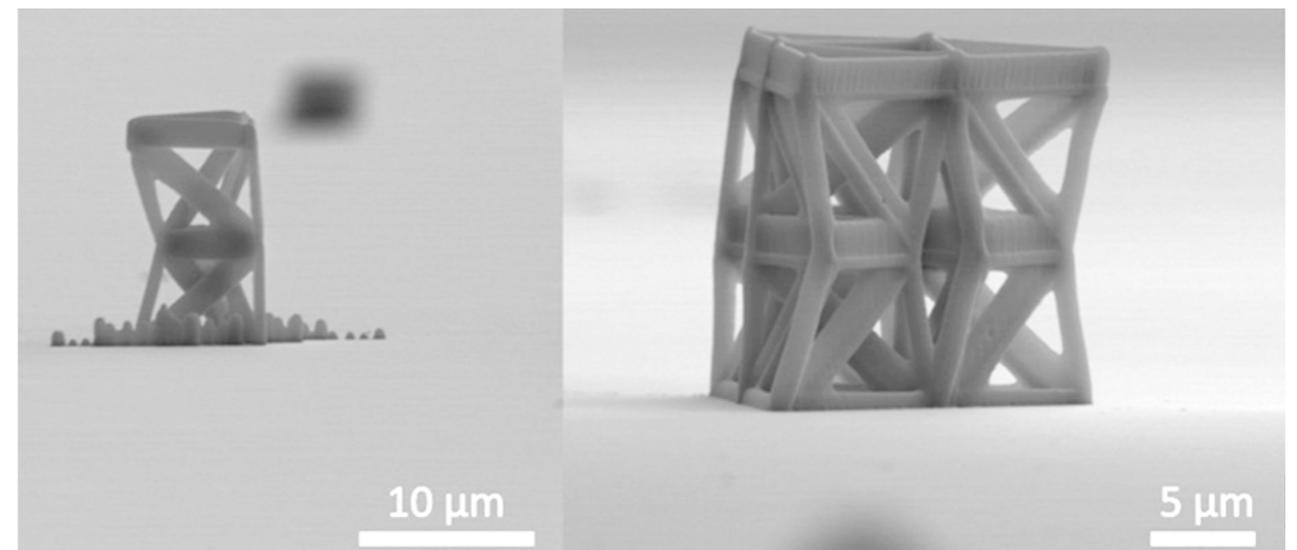
Sono stati eseguiti studi di fattibilità e diversi gruppi di ricerca hanno realizzato sistemi attivi in scala. Per mezzo di attuatori elettrici in sincronia collegati a dei computer, in tempo reale sono stati in grado di misurare le vibrazioni della struttura ed attivare un'azione sui componenti tale da generare un effetto smorzante.



Metamateriali

La geometria tensegrale è particolarmente adatta per la creazione di reticoli in microscala tramite formatura additiva con litografia a multifotone, restituendo ottime risposte statiche e dinamiche.

La stampa di oggetti tridimensionali su scala nanoscopica può essere realizzata grazie alla tecnica chiamata litografia a due fotoni. La stampa tridimensionale fa uso di una particolare resina liquida che viene indurita in maniera estremamente precisa nei punti investiti da un raggio di luce laser concentrata. Il punto di fuoco del raggio laser è indirizzato nella resina mediante una serie di specchi movimentabili e lascia dietro di sé una striscia di polimeri solidi, dell'ampiezza di poche centinaia di nanometri, rendendo possibile la realizzazione di nanosculture piuttosto complesse grandi quanto un granello di sabbia.

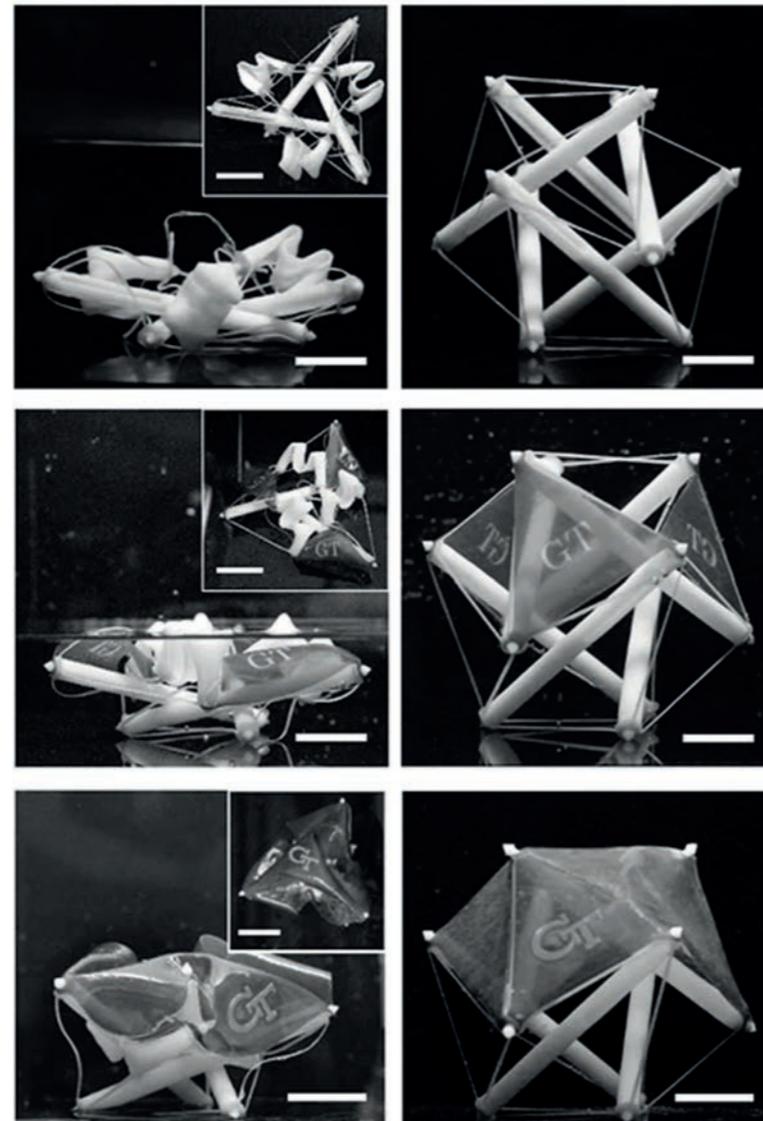


Dispiegamento programmabile di strutture tensegrali mediante polimeri reattivi allo stimolo

(SMP – polimeri a memoria di forma)

Le strutture di tensegrali sono adatte per applicazioni dispiegabili. Composti da puntoni discontinui e cavi continui, tali sistemi sono strutturalmente stabili solo quando l'auto-sollecitazione è indotta; altrimenti, perdono la configurazione geometrica originale (pur mantenendo la topologia) e quindi possono essere strettamente imballati.

Questa caratteristica viene sfruttata utilizzando polimeri reattivi allo stimolo per la creazione di strutture 3D attivamente implementabili con forme complesse. Il cambiamento di forma dei materiali intelligenti stampati in 3D aggiunge una dimensione attiva allo spazio configurazionale di alcuni componenti strutturali. Queste proprietà permettono ai sistemi strutturali di raggiungere cambiamenti di forma notevoli, rendendoli ideali come piattaforma per strutture super leggere, robot che cambiano forma, antenne e dispositivi biomedicali.



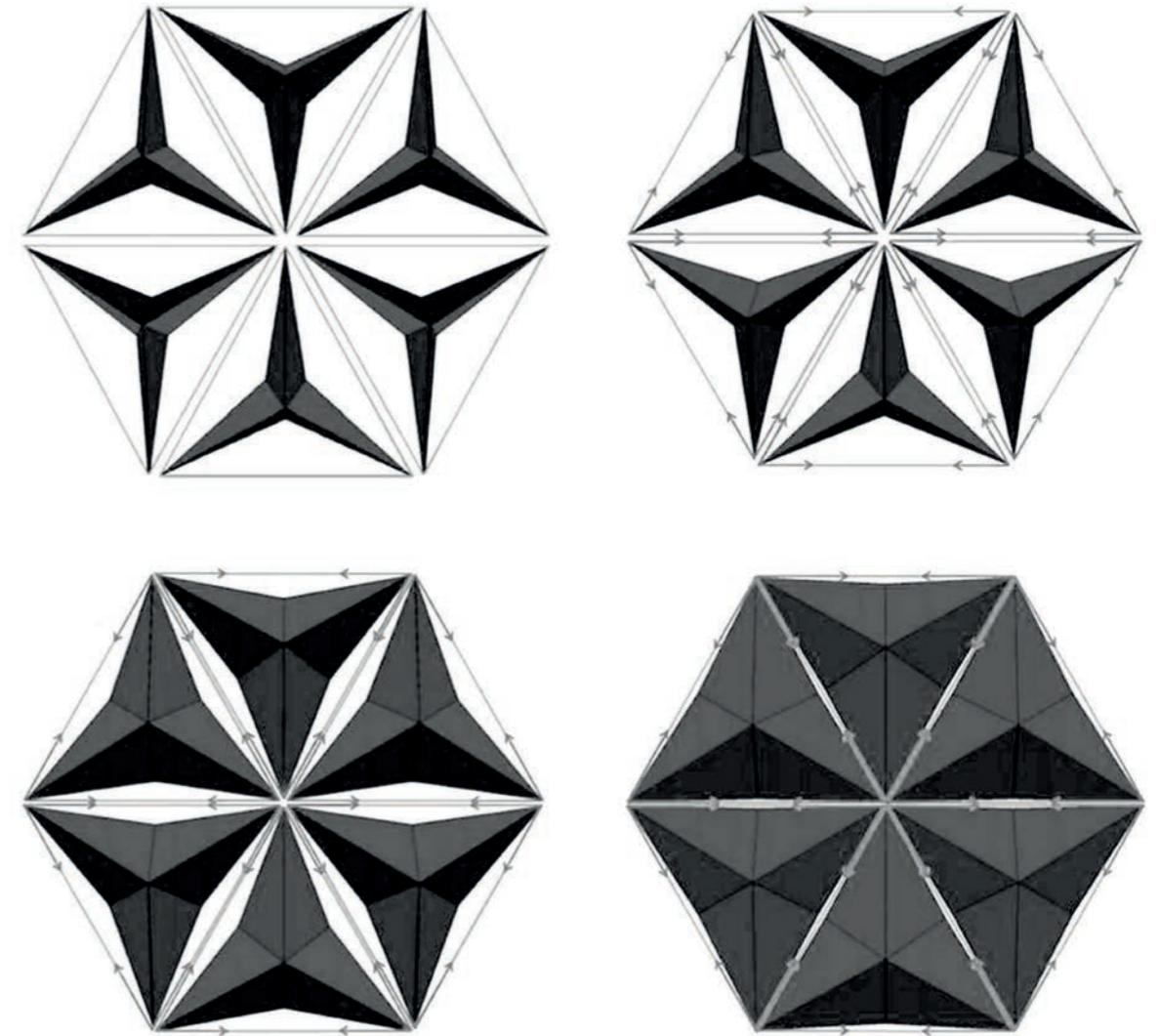
Robot morbido a forma di stella marina stampato in 3d una struttura Tensegrity (team di ricercatori dell'Istituto nazionale di scienza e tecnologia di Ulsan , Corea del Sud - 2020)

Con una combinazione di montanti rigidi e una rete multidirezionale di tendini, le strutture di tensegrità possono fornire sia integrità strutturale che flessibilità con una manipolazione intelligente dei tensori. Tali concept, integrando anche materiali intelligenti, o funzionalmente classificati nelle strutture di tensegrità, possono essere ulteriormente funzionalizzati con una migliore controllabilità.



Schermature solari per ventilazione naturale tipo "mashrabiyya"

Sfruttando strutture con capacità di "morphing" sono stati modellati degli schermi solari per edifici energeticamente efficienti che possano modificare la loro configurazione durante le ore del giorno attraverso il controllo di un limitato numero di cavi. Gli elementi compressi degli schermi restano indeformati durante le operazioni di apertura e chiusura e possono pertanto essere equipaggiati con pannelli solari e/o membrane rigide. La capacità di morphing di tali strutture consente di progettare schermi solari attivi che richiedono un limitato consumo di energia per la loro attuazione. **La mashrabiyya è un dispositivo di ventilazione forzata naturale, usato nell'architettura tradizionale dei Paesi arabi.** La riduzione della superficie, prodotta dalla griglia della mashrabiyya, accelera il passaggio del vento. L'effetto viene amplificato dal contatto con superfici umide, ad esempio contenitori riempiti d'acqua, che diffondono il senso di freschezza all'interno della casa.



Meccanismo di azionamento di schermi solari "mashrabiyya" con architettura tensegrale. Il concetto porta alla realizzazione di schermi ombreggianti che sono notevolmente leggeri, funzionano a bassissimo consumo energetico e possono essere utilmente impiegati per raccogliere energia solare ed eolica.

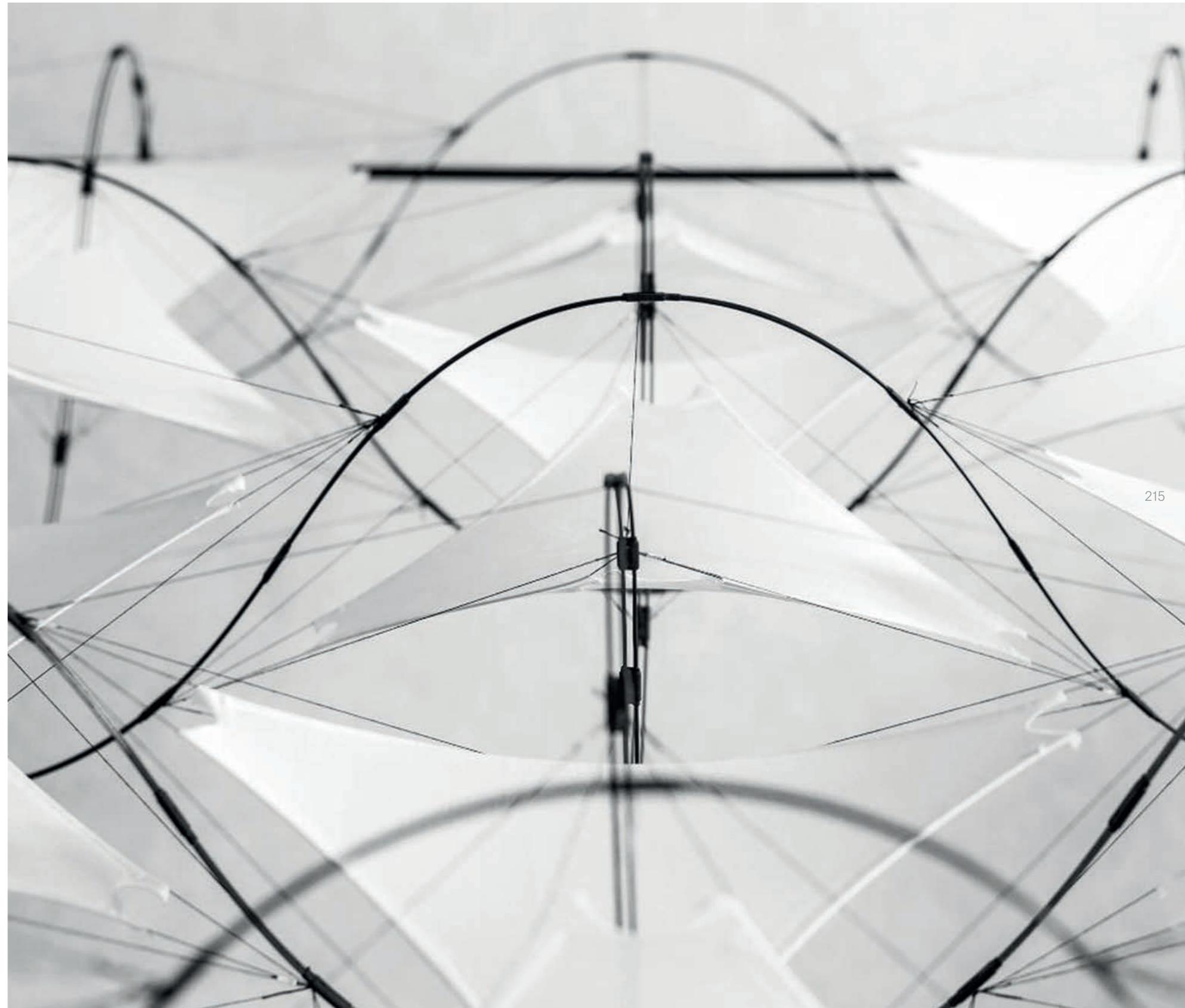
“Form Follows Tension” struttura sperimentale 2015

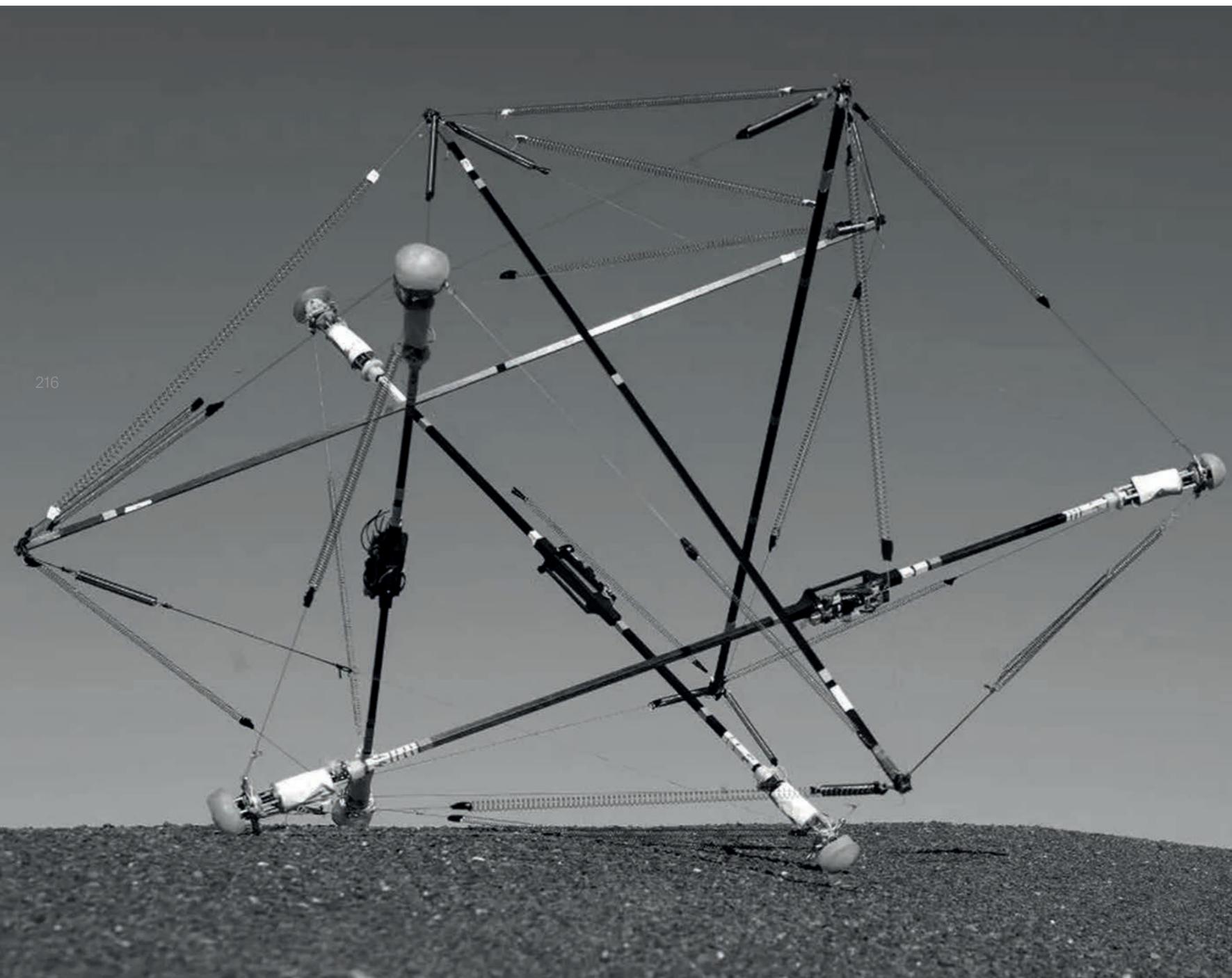
Nello studio di design “Experimental Structures”, Sebastian Huth ha sviluppato una struttura modulare paragonabile al “prototipo di griglia a doppio strato tensegrity” di R. Motro.

Tuttavia, invece della pura compressione, ha introdotto elementi elastici. Queste aste “active-bending” possono assumere la forma curva desiderata, portare la compressione e introdurre tensione ai cavi e alle membrane all’interno della struttura.

Il modulo di base consiste in due aste di acciaio elastico piegate, che sono posizionate ortogonalmente, con i loro lati concavi uno di fronte all’altro. Una membrana è legata ai loro quattro punti esterni, mentre due cavi collegano le estremità di un arco al centro dell’arco opposto. La tensione di trazione all’interno delle membrane e dei cavi equilibra e stabilizza la posizione delle aste d’acciaio.

Questi moduli sono replicati in una griglia planare ortogonale. Le aste elastiche formano curve sinuose intrecciate che non si toccano mai. Ogni intersezione è fissata da una membrana e due serie di cavi. Questo crea un sistema chiuso di tensegrità in cui tutte le sollecitazioni sono in equilibrio.





216

Nasa Super Ball Bot robot tensegrile 2016

È una piattaforma di atterraggio e mobilità all-in-one basata su una struttura di tensegrità, destinata per missioni planetarie a basso costo. Il programma Innovative Advanced Concepts della NASA (www.nasa.gov/niac) sta sviluppando un Super Ball Bot, un robot terrestre pieghevole utilizzato per gli obiettivi di esplorazione spaziale della NASA. Il Super Ball Bot ha una matrice sferica di cavi e giunti in grado di resistere alla caduta da un veicolo spaziale sopra una superficie planetaria. Una volta sul pianeta le articolazioni, oltre a contenere nel loro nucleo dispositivi per la raccolta dei dati, potrebbero adattarsi per far rotolare il bot in qualsiasi direzione. La leggerezza, l'elasticità e la capacità di dispiegamento renderebbe il robot estremamente manovrabile ed utilizzabile anche in situazioni emergenziali, come catastrofi naturali o in ausilio al soccorso sanitario in condizioni particolarmente complesse.

217

Le peculiarità dei sistemi tensegrali possono essere così sintetizzate:

Punti di forza

- l'interconnessione meccanica e funzionale di tutti gli elementi costitutivi consentono una continua comunicazione bidirezionale, come un vero e proprio network;
- assemblabili senza l'uso di leganti;
- sono strutture disassemblabili, trasformabili e di facile manutenzione;
- possono essere ripiegabili e dispiegabili;
- per loro natura sono strutture leggere;
- possono essere trasportabili;
- ottimizzano l'uso dei materiali;
- altamente modulari (strutture regolari);
- è possibile unire cellule elementari singolarmente stabili per ottenere strutture composte;
- le strutture tensegrity di 2° ordine sono solitamente più stabili di quelle di 1° ordine;
- le strutture maggiormente "triangolate" sono più rigide;
- potenzialmente possono acquisire energia dall'ambiente (es. eolica e sismica) e convertire l'energia meccanica immagazzinata nella struttura in energia elettrica;
- garantiscono la minima massa strutturale sopportando varie condizioni di carico, perchè la struttura reagisce a perturbazioni cambiando configurazione di equilibrio.

Criticità

- strutture geometricamente complesse anche se esistono sistemi dalla forma più semplice;
- difficoltà di messa in opera di strutture tensegrali di particolare configurazione geometrica;
- problema della ricerca di forma, di primaria importanza per l'analisi sia geometrica che statica;
- complessità di progettazione;
- scarsa diffusione di software e sistemi di calcolo;
- per la stabilità del sistema è fondamentale lo stato di presollecitazione interno.

L'analisi presentata in questo lavoro di tesi vuole definire le caratteristiche delle strutture tensegrali e presentarne il potenziale.

La tecnologia tensegrale si basa su un insieme di principi e proprietà che la rendono utilizzabile nei più disparati campi di applicazione, dall'arte (disciplina dalla quale trae origine) alla biologia, passando per le realizzazioni in campo architettonico ed ingegneristico e, non per ultimo, il design. In fase di analisi l'obiettivo è stato quello di riorganizzare il materiale a disposizione allo scopo di avere una base teorica sufficientemente completa e accessibile a progettisti nell'ambito del design, per poter affrontare un percorso progettuale utilizzando la strategia strutturale della tensegrità, cercando di evidenziarne sia i vantaggi che le criticità.

La ricerca proposta ha inteso analizzare e riattualizzare peculiarità e limiti delle strutture tensegrali, di potenziale interesse per il design, mettendo in risalto possibili realizzazioni tecnologiche basate su un tale sistema strutturale affascinante e alternativo, leggero e moderno.

La tecnologia tensegrale, a discapito di una laboriosa ed articolata messa in opera (le operazioni di montaggio richiedono un elevato livello di precisione) necessita di un numero ridottissimo di strumenti specifici.

Una progettazione che assuma come fondamento concettuale le strutture tensegrali rappresenta una valida risposta alla sfida progettuale della contemporaneità, sia sul piano dell'immagine, sia sull'utilizzo e la ricerca di materiali innovativi che uniscono il massimo dell'efficienza al minimo consumo di energia.

La possibilità di sfruttare materiali diversi per i suoi elementi (quali acciaio, alluminio, titanio, materiali compositi, legno, bambù), ciascuno con i suoi specifici parametri strutturali (modulo di elasticità, peso specifico, resistenza a trazione), garantisce elevati vantaggi di adattabilità e ottimizzazione del progetto, in funzione degli obiettivi prioritari di leggerezza, economicità, prestazioni strutturali e funzionalità.

Il design è legato da sempre al raggiungimento degli obiettivi di efficienza ed efficacia e **la leggerezza, che costituisce il carattere più significativo e peculiare della tensescrità, rappresenta oggi uno dei valori che più influenza la ricerca scientifica e il progresso tecnologico e che potrà incidere positivamente verso la transizione ad un'economia circolare e sostenibile.**

L'evoluzione dei materiali, l'affinarsi delle tecniche e lo sviluppo in generale delle tecnologie implicano la interconnessione e la trasversalità del sapere e la possibilità di trasferire in campi di applicazione non ancora esplorati conoscenze ed esperienze come quella della tensescrità, per soddisfare nuove esigenze specifiche e far evolvere gli oggetti che popolano la nostra quotidianità verso le sfide del futuro.

A questo ruolo è chiamato a rispondere in primis il designer, per sua natura sperimentatore, visionario e connettore di conoscenze e competenze.

Il mondo si riflette nell'armonia di tensioni opposte.

(Eraclito di Efeso)

Algoritmo: qualsiasi schema o procedimento sistematico di calcolo. successione di istruzioni o passi che definiscono le operazioni da eseguire sui dati per ottenere i risultati.

Biopolimero: bioplastiche (BP), polimeri preparati attraverso processi biologici, che conferiscono al prodotto finale un'elevata biodegradabilità.

Citoscheletro: grande rete di filamenti e tubuli connessi fra di loro che si estendono nel citoplasma, dal nucleo alla membrana plasmatica delle cellule.

Compressione: diminuzione del volume di un corpo ottenuta con mezzi meccanici; l'azione delle forze che la provocano.

Coppia: sistema di due forze uguali in modulo e direzione e con verso opposto, che applicata a un corpo tende a farlo ruotare attorno a un'asse perpendicolare al piano individuato dalle rette di applicazione delle due forze.

Costruttivismo: movimento culturale nato in Russia nel 1913, di poco precedente alla rivoluzione del 1917, che rifiutava il culto dell'"arte per l'arte" a favore dell'arte come pratica diretta verso scopi sociali.

E: modulo di elasticità longitudinale o modulo di Young, grandezza caratteristica di un materiale, che esprime il rapporto tra tensione σ e deformazione ϵ nel caso di condizioni di carico monoassiale ed in caso di comportamento di tipo "elastico" del materiale. È definito come il rapporto tra lo sforzo applicato e la deformazione che ne deriva. È definito come la costante della Legge di Hooke.

ϵ : deformazione di un corpo continuo (o di una struttura) è un qualsiasi cambiamento della configurazione geometrica del corpo che porta ad una variazione della sua forma o delle sue dimensioni in seguito all'applicazione di una sollecitazione interna o esterna.

Flessione: distribuzione delle tensioni interne di un corpo determinata dalla sollecitazione esterna.

Impalcato: sistema delle strutture di sostegno di un piano.

Legge di Hooke: relazione costitutiva di comportamento dei materiali elastici, formulata dicendo che un corpo elastico subisce una deformazione direttamente proporzionale allo sforzo a esso applicato. La costante di proporzionalità dipende dalla natura del materiale stesso.

Longherone: parte di una struttura più articolata definita telaio.

Lycra: spandex o elastam è una fibra sintetica di poliuretano molto utilizzata per elasticizzare i tessuti.

Metamateriale: materiale creato artificialmente con proprietà elettromagnetiche peculiari che lo differenziano dagli altri materiali. Le sue caratteristiche macroscopiche non dipendono solo dalla sua struttura molecolare, ma anche dalla sua geometria realizzativa. In altri termini, un metamateriale guadagna le sue proprietà dalla sua struttura piuttosto che direttamente dalla sua composizione chimica.

Momento: grandezza vettoriale dipendente da un vettore e dalla sua posizione relativa rispetto ad un punto.

Monomero: composto generalmente a basso peso molecolare, dall'unione delle cui molecole si forma un polimero: ad esempio lo stirene è il monomero del polistirene.

Newton: (simbolo: N) è l'unità di misura della forza; fa parte delle unità di misura derivate del Sistema internazionale di unità di misura (SI).

SMP: polimeri a memoria di forma - appartengono alla classe degli smart materials, definiti come quei polimeri che hanno l'abilità di tornare da uno stato deformato (forma temporanea) a quello originale (forma permanente) tramite uno stimolo esterno (attivazione).

Sollecitazione: azione di una o più forze su un sistema.

Strallo/strallato: elemento strutturale del ponte strallato. Tirante inclinato che parte dalla sommità dell'antenna e a cui è sospeso l'impalcato del ponte strallato.

Taglio: sollecitazione al taglio quando, ad esempio, su una trave è applicata una forza T agente nel piano della sezione della trave stessa e quindi perpendicolarmente al suo asse. L'effetto del taglio è quello di produrre uno scorrimento tra due sezioni adiacenti.

σ : tensione ovvero lo stato derivante dall'applicazione di una o più forze di trazione.

Tensostruttura: struttura realizzata con materiali mantenuti in posizione tramite tensione.

Torsione: sollecitazione cui è sottoposto un corpo allungato quando una sua sezione viene fatta ruotare rispetto a un'altra; anche, l'effetto di tale sollecitazione.

Trazione: qualsiasi forza che agisce su un corpo tendendo ad allungarlo nella sua stessa direzione.

Trefolo: elemento costruttivo delle corde, costituito da un insieme di fili elementari fra loro ritorti.

/ Bibliografia e tesigrafia

bibliografia:

Calvino I., *Le città invisibili*, Oscar Mondadori; 1972

Motro R., *Tensegrity Structural Systems for the Future*, London & Sterling; 1988

Skelton R. E., De Oliveira M. C., *Tensegrity Systems*, Springer; 2009.

Sthenly Gan B., *Computational modeling of tensegrity structures*, Springer; 2019

Scarr G., *Biotensegrity, the structural basis of life*, Handspring; 2014

Del Curto B., Marano C., *Materiali per il design: introduzione ai materiali e loro proprietà*, Ambrosiana; 2012

Waddell T., *Design without fashion*, Skira; 2010

Waddell T., *L'impossibilità strutturale della tensegrity structure*, Made in Cassina; 2008

Snelson K., *Art And Ideas*, Web Publication; 2013

Manzini E., *La materia dell'invenzione: materiali e progetto* Arcadia Edizioni; 1986 (*estratti dal web*)

Autori vari, Department of Civil Engineering, University of Salerno, *Design and Testing of Bistable Lattices with Tensegrity architecture and nanoscale features fabricated by multiphoton lithography*; 2020 - articolo

Dal Co F., "Tensegrity: Ohel Mo-ed, Fuller e Foster" - Casabella n. 889; settembre 2018 - articolo

R. Motro, *Tensegrity Systems: The State of the Art*; 1992 articolo

Schilng E., Bartel R., Ihde A., Tutsh J., Huth S., *Bending activated tensegrity*; 2015 - articolo

Ingber D. E., *Tensegrity Cell structure and hierarchical systems biology*; 2003 - articolo

bibliografia:

Università degli studi di Camerino - Scuola di Ateneo di Architettura e Design - "Resistenza dei materiali e forme strutturali per il design" - dispense prof. A. Zona. prof. A. Dall'Asta - 2021

Università degli studi di Camerino - Scuola di Ateneo di Architettura e Design - "Strumenti e metodi dell'ecodesign" - dispense prof. J. Mascitti, prof. D. Galloppo - 2021

Università degli studi di Camerino - Scuola di Ateneo di Architettura e Design - "Biomimetica: la lezione della natura - nuovi materiali per un design bioispirato" - dispense prof. C. Santulli - 2019

Facoltà di Architettura di Reggio Calabria, dispense di "Cultura dei materiali e cultura del progetto rapporti tra materiale, funzione e forma" - 2011

Università degli Studi di Bergamo - Dipartimento di Ingegneria A. Pizzigoni, G. Ruscica, "Tensegrity: da gioco per la mente a nuova tecnologia costruttiva" - 2013

Università degli studi di Napoli Federico II - Dipartimento di Architettura, Dottorato di ricerca in tecnologia dell'architettura C. Sicignano "Le strutture Tensegrali e la loro applicazione in Architettura" - 2017

Aalto University - Ye Feng - "Design of Freeform Membrane, Tensegrity Structure"- tesi - 2019

Università degli studi di Firenze - Dipartimento di tecnologie dell'Architettura e Design - Lorenzo Zoli: "Tecnologie innovative leggere applicate all'architettura transitoria: l'ipotesi delle strutture tensegrali" - tesi di dottorato - 2006

Università La Sapienza - Roma - facoltà di Ingegneria - Davide Conclusio - "Analisi agli elementi finiti di strutture tensegrali ed applicazioni in campo biomedico" - tesi di dottorato - 2013

Université di Montpellier - Etienne Fest: "Une structure active de type tensegrité" - tesi di dottorato - 2003

Université catholique de Louvain - L. Boucher - "Optimisation des structures de tensegrité composées de modules prismatiques" - tesi di dottorato - 2017

Escola Politecnica da Universidade de São Paulo Deifeld T. E. C., Sobre A. "Analise e os processos construtivos das estruturas tensegrity" - tesi di dottorato - 2005

sitografia:

<https://tensegritywiki.com>
<http://www.kennethsnelson.net/>
<https://www.cassina.com/it/it.html>
<http://www.biagiodicarlo.com/>
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:K%C4%81rlis_Johansons_1920_%22Gleichgewichtkonstruktion%22_\(%22Equilibrium-structure%22\)_a_Study_in_Balance.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:K%C4%81rlis_Johansons_1920_%22Gleichgewichtkonstruktion%22_(%22Equilibrium-structure%22)_a_Study_in_Balance.jpg)
<https://athanailidipanagiota.weebly.com/origins-8232and-evolution-in-tensegrity-systems.html>
https://en.wikipedia.org/wiki/Karlis_Johansons
<https://www.artsy.net/artwork/karl-ioganson-spatial-construction>
<https://www.e-flux.com/announcements/30035/visionary-structures-from-johansons-to-johansons/>
<https://lcca.lv/en/online-shop/visionary-structures--from-johansons-to-johansons--collector-s-box-in-english-/>
<https://www.fondazionefrancoalbini.com/>
<https://codepen.io/slshaw115/full/vGvvoV>
<http://it.knowledgr.com/00062880/Tensegrity#StruttureTensegrityFondamentali>
<https://cupdf.com/document/controversial-origins-of-tensegrity-by-gomez-jauregui.html>
<https://ita.architecturaldesignschool.com/tensegrity-structures-70887>
<https://www.yang-yu.net/tensegrity>
<http://tensegritywiki.blogspot.com/2011/11/kurilpa-bridge-analyzed.html>
https://www.arup.com/Projects/Kurilpa_Bridge.aspx
<https://ecofriend.com/eco-architecture-kurilpa-bridge-the-world-s-largest-solar-powered-footbridge.html>
<https://pdfcoffee.com/the-meseturm-in-rostock-a-tensegrity-tower-by-schlaich-pdf-free.html>
Mike Schlaich, Il meseturm di Rostock - una torre di tensegrità
[https://www.solaripedia.com/13/129/kurilpa_solar_powered_bridge_\(brisbane_australia\).html](https://www.solaripedia.com/13/129/kurilpa_solar_powered_bridge_(brisbane_australia).html)
https://en.wikipedia.org/wiki/Kurilpa_Bridge
<https://www.slideshare.net/DhruvSeth/dhruvin-kurilpa-bridge>
<https://www.fernandofraternalierearch.com/>
<https://cupdf.com/document/controversial-origins-of-tensegrity-by-gomez-jauregui.html>
<https://www.archilovers.com/projects/62561/restauro-del-museo-nazionale-di-reggio-calabria.html#info>

sitografia:

<https://www.mero.de/>
<https://www.fastcompany.com/1662554/teagues-2020-headphones-fit-perfectly-thanks-to-buckminster-fullers-genius>
<https://teague.com/>
<https://www.designboom.com/design/>
<https://www.coroflot.com/dkrieger/2020-Headphone-Concept>
<https://www.lagranjadesign.com>
<https://www.designisthis.com/blog/en/post/pallucco-bucky-lamp-lagranja-design>
<https://thetremag.com/strange-tensegrity-table-2-di-ddaa/>
<https://www.archiproducts.com/it/prodotti/>
<http://www.paoloulia.it/accortezze.html>
Expressive furniture collection of wood and textile | L + W Furniture Design (lanzavecchia-wai.com)
<https://www.nlm.nih.gov/> biblioteca nazionale di medicina
www.kennethsnelson.net
www.munart.org
<https://www.archilovers.com>
<https://www.abitare.it/>
<https://www.domusweb.it/it/progettisti/richard-buckminster-fuller.html>
<https://design-milk.com/tensegrity-michal-maciej-batosik/>
<https://www.arch2o.com/underwood-pavilion-gernot-riether-andrew-wit/>
<https://stamparein3d.it/un-robot-morbido-a-forma-di-stella-marina-stampato-in-3d-una-struttura-tensegrity>
<https://parametrichouse.com/tensile-configurations/>
<https://parametrichouse.com/membrane-tensegrity/>
<https://www.food4rhino.com/en/app/tie-tensegrity-integration-element-rhino> sito tie for rhino
<https://publish.illinois.edu/tie4rhino/>
https://mediaspace.illinois.edu/media/t/1_wi5mqjec/215397163
<https://wewanttolearn.wordpress.com/category/resources/inspiration/structures/tensegrity/>
www.nasa.gov/niac
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2019.00007/full>



Il design non è un gioco per chi non sa giocare seriamente.
Il design è social perché media tra chi progetta, chi produce e chi usa.
Il design non accetta la superficialità: un progetto trascurato è un insulto al mondo.
Il design non ammette l'approssimazione: per progettare è necessario sapere (tanto) e sperimentare (tanto tanto).
Il design non usa algoritmi.
Il design non è per esibizionisti, meglio saper scomparire nelle forme.
Il design è relazione.
Il design accetta il provocatorio ma non l'immotivato.
Il design non è irrilevante.
Il design è saper fare, sapere di saper fare e sapere se fare.

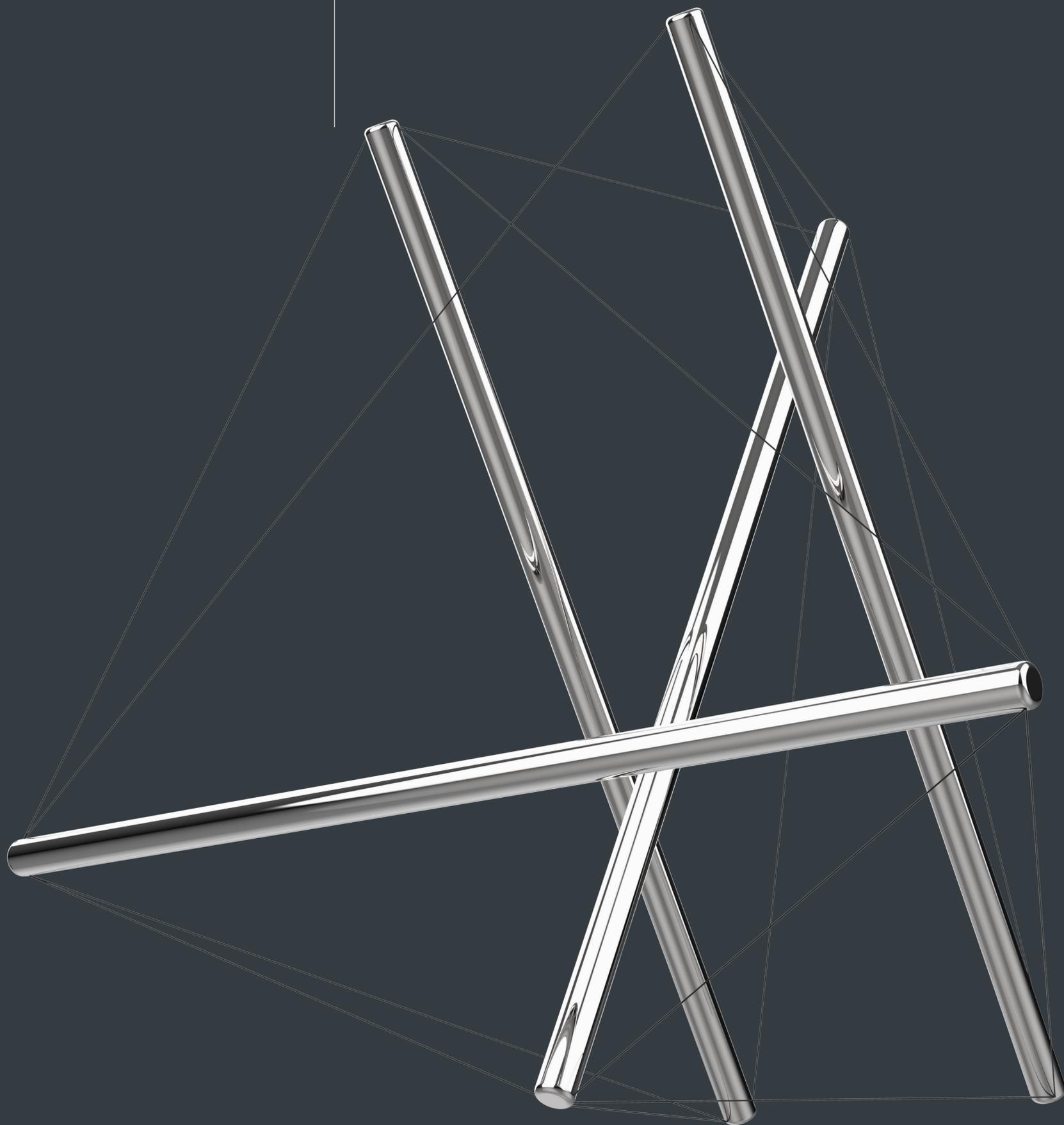
(Libero adattamento dal Manifesto della Scuola di scrittura Belleville)

leggerezza

Un design "leggero" non funziona per addizione ma per sottrazione, non toglie forza al pensiero, è un percorso tra ricerca e sperimentazione in cui la leggerezza è il risultato di un equilibrio tra segno, forma e materia. Ottenerla non è affatto semplice, forse perché appare più creativo e brillante progettare forme complesse.

resistenza

Ottimizzare al meglio le forme strutturali, mantenendo la resistenza necessaria ad assolvere la funzione per cui essa è stata progettata riduce considerevolmente la quantità di materiale impiegato e di conseguenza i relativi sprechi.



Kennet Snelson
Sun river
1967
Collezione Whitney Museum
of American Art - NY

tensione

Nella progettazione occorre seguire dei criteri per la scelta del materiale e il dimensionamento. È necessario scegliere un materiale che abbia una resistenza sufficiente per non rompersi e una rigidità sufficiente per non deformarsi più del dovuto. Lo sforzo non è una grandezza effettivamente misurabile, ma solo un'astrazione elaborata per facilitare il compito al progettista.

in-stabilità

Nel design molti oggetti stupiscono per la loro capacità di resistere alle forze a cui sono sollecitati, assolvendo alla funzione per cui sono stati progettati, ingannando percettivamente la loro stabilità. Gli oggetti che comunicano, ingannando, un'immagine complessiva instabile, non sono accettati o facilmente metabolizzati dalla nostra cultura.



S A A D

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

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale | A.A. 2020/2021

Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

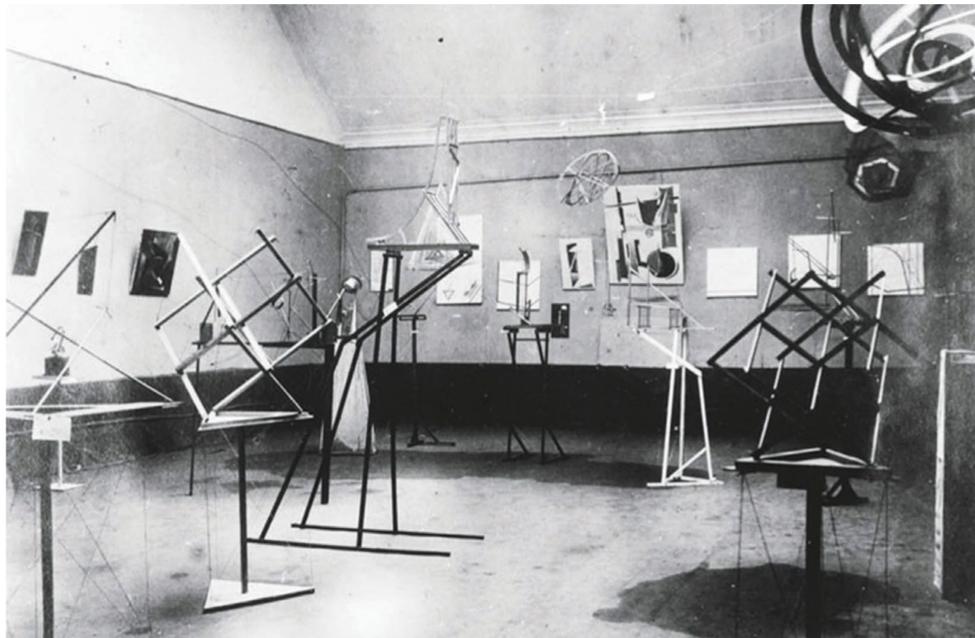
Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

A

Tensegrity

origini e storia



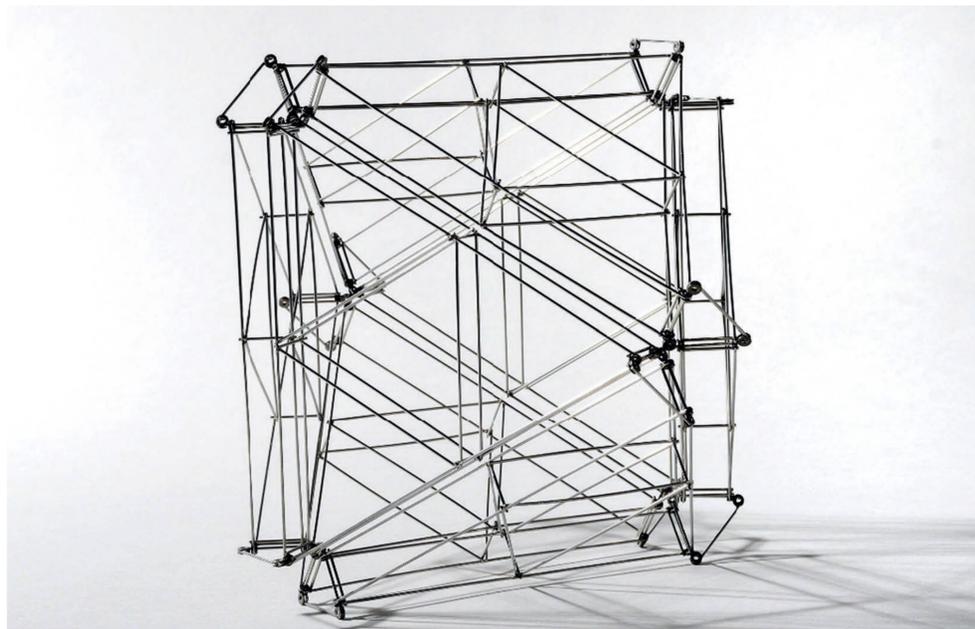
Nel 1921 i Costruttivisti espressero le loro idee in un'ambiziosa mostra sotto il patrocinio della Società dei Giovani Artisti, la OBMOKhU. Quattro artisti, **Alexander Rodchenko**, i fratelli **Georgii e Vladimir Stenberg**, **Konstantin Medunetskii** e **Karlis Ioganson** esposero un totale di 25 costruzioni spaziali. Le strutture tridimensionali di Ioganson, definite "costruzioni autostabilizzanti", mostravano gli innovativi principi di sollecitazione di tipo tensegrale.

La **tensegrità** (tensional integrity o floating compression), è un principio strutturale basato sull'utilizzo di componenti isolati in compressione all'interno di una rete di tensione continua, in modo tale che gli elementi compressi non si tocchino e gli elementi in tensione delimitano il sistema spazialmente.

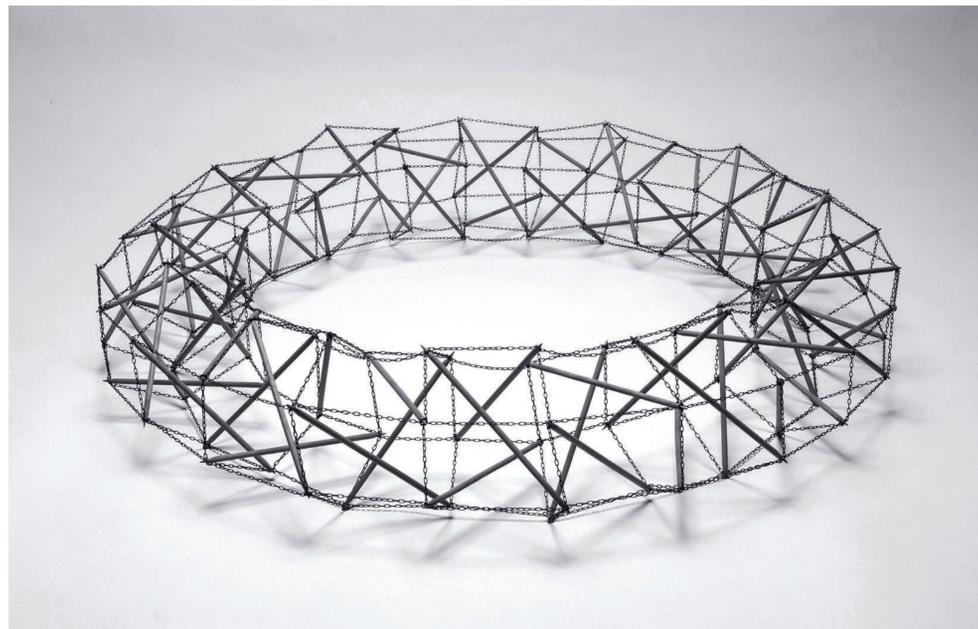
La prima struttura collocabile nella categoria del sistema prototensegrale trova riferimento nella **ricerca condotta dai costruttivisti russi**, mentre la scoperta delle tensegrali viene attribuita a tre studiosi: **Richard Buckminster Fuller**, **Kenneth Duane Snelson** e **David Georges Emmerich**.

Fuller ed Emmerich hanno concentrato i loro studi in ambito costruttivo ed architettonico, Snelson invece sull'aspetto artistico ed estetico, proponendo sculture estremamente complesse.

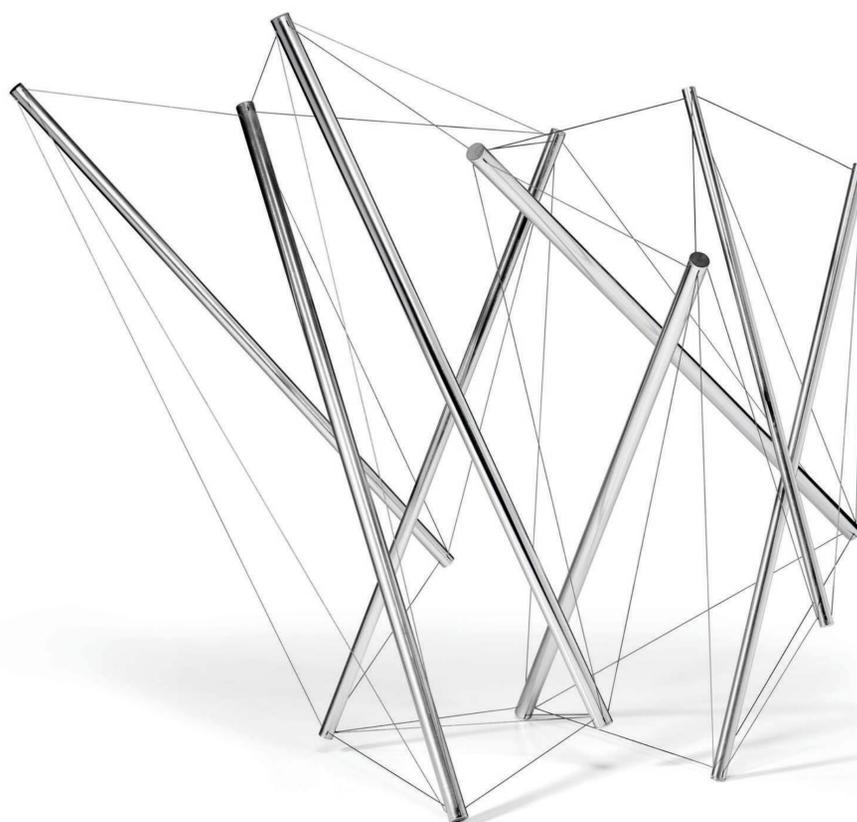
Richard Buckminster Fuller
(USA 1895-1983)



David Georges Emmerich
(FR 1925-1996)



Kenneth Duane Snelson
(USA 1927-2016)



S A A D

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

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale | A.A. 2020/2021

Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

B

Tensegrity

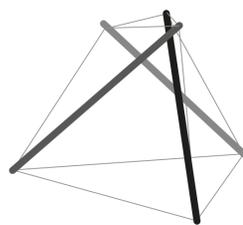
classificazioni e tipologie

Un sistema tensegrale è una connessione stabile di componenti assialmente caricati, detto di classe k se al massimo " k " componenti a compressione sono collegati a qualsiasi nodo.

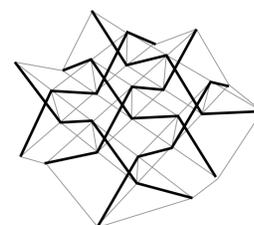
La rigidità meccanica cresce al crescere della classe.

In funzione del numero di puntoni impiegati nel sistema tensegrale si configurano diverse classi di tensegrali ognuna delle quali è caratterizzata da una rigidità meccanica maggiore della precedente classe.

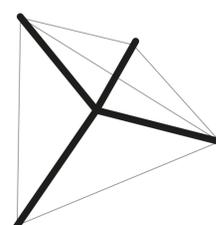
struttura tensegrale di classe 1



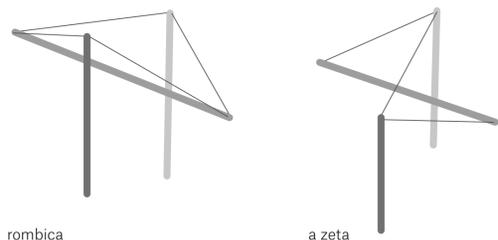
strutture tensegrali di classe 2



struttura tensegrale di classe 3



tipologie di disposizione degli elementi



rombica

a zeta



circuito

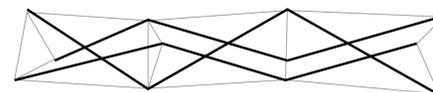
tipologie di assemblaggio



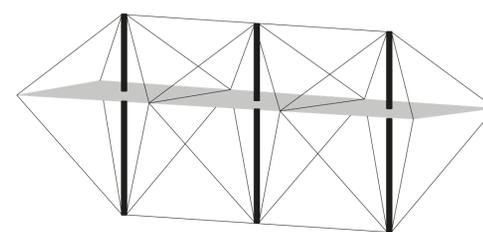
semplice



alternato



Le false strutture tensegrali si hanno quando non è possibile individuare gli elementi compressi separati fra loro o quando i bordi della struttura sono delimitati da elementi rigidi.



falso tensegrale

Cellule elementari

Sono tutte quelle strutture che non sono ulteriormente divisibili in singole cellule stabili. Le cellule elementari sono, per la maggior parte, strutture prismatiche classificate secondo la loro forma geometrica complessiva.

I moduli elementari più comuni sono composti da una base poligonale regolare e possono essere formati da 3, 4, 5, ...n elementi compressi. A seconda del numero delle aste, presentano diversi angoli di rotazione tra le basi.

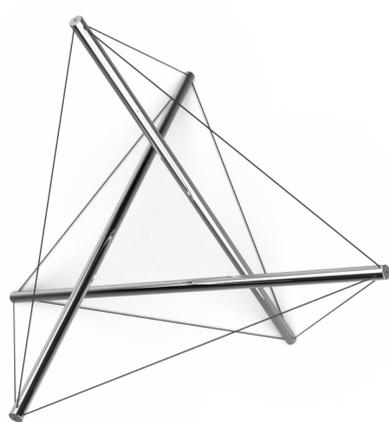
Gli angoli di rotazione si possono calcolare grazie alla formula $\alpha = 90^\circ - (180^\circ/n)$ da cui si ottiene:

- per il simplex $\alpha = 30^\circ$
- per il prisma a base quadrata $\alpha = 45^\circ$
- a base pentagonale $\alpha = 54^\circ$
- a base esagonale $\alpha = 60^\circ$

simplex $\alpha = 30^\circ$
vista laterale



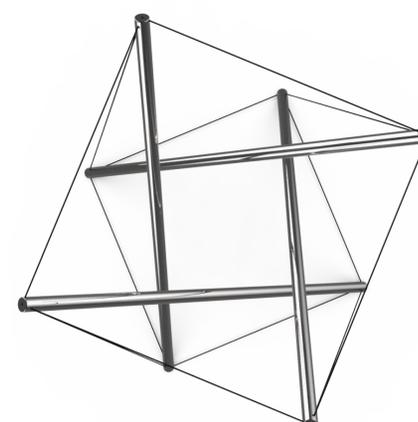
vista dall'alto



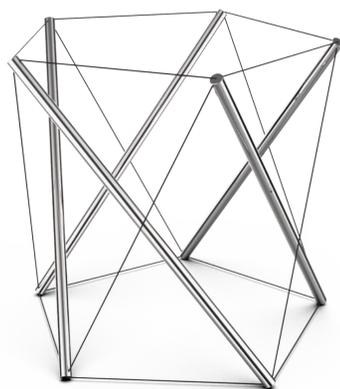
quadruplex $\alpha = 45^\circ$
vista laterale



vista dall'alto



pentaplex $\alpha = 54^\circ$
vista laterale



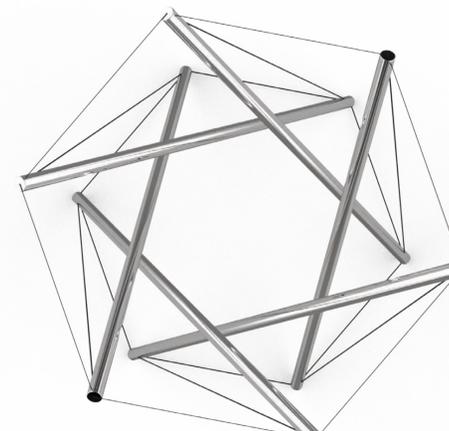
vista dall'alto



esaplex $\alpha = 60^\circ$
vista laterale



vista dall'alto



S A A D

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

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale | A.A. 2020/2021

Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

C

Tensegrity

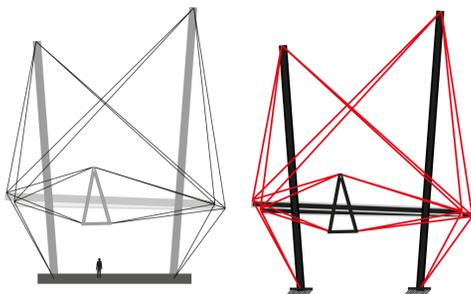
applicazioni e analisi

Le applicazioni di tensegrity si declinano in ingegneria, architettura e design presentando il medesimo meccanismo di risposta alle sollecitazioni e gli elementi in costante equilibrio reciproco.

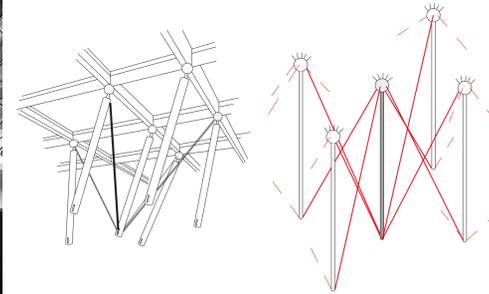
azioni di risposta alle sollecitazioni:



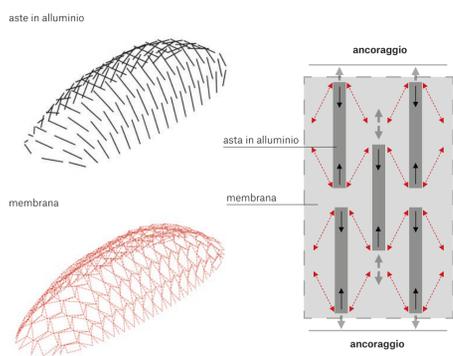
Kurilpa Bridge - ponte pedonale
Brisbane - Australia
Designer Arch. Cox Rayner, Ing. Arup
anno 2009



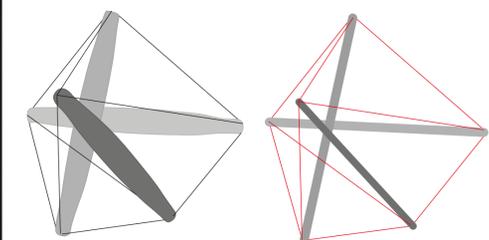
Copertura pedonale del
Museo di Storia Naturale di Reggio Calabria
Designer Studio ABDR Roma
anno 2013



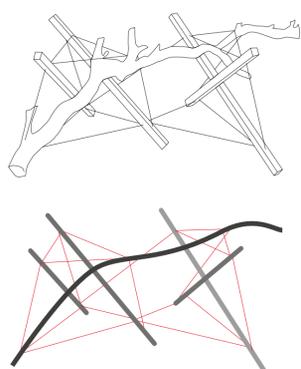
MOOM padiglione temporaneo
Tokio
C+A Coelacanth and Associates
Designer Kazuhiro Kojima
anno 2011



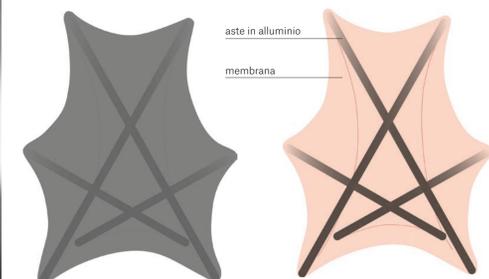
Bucki Lamp
Studio Lagranja Design - Spagna
produzione Pallucco
anno 2011



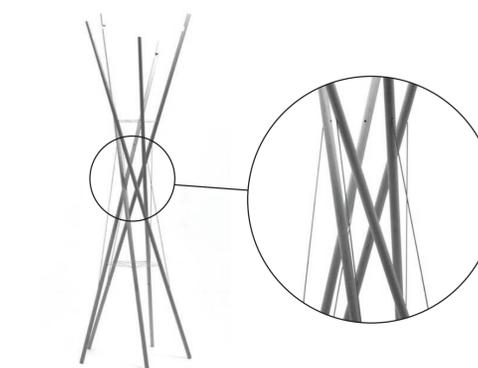
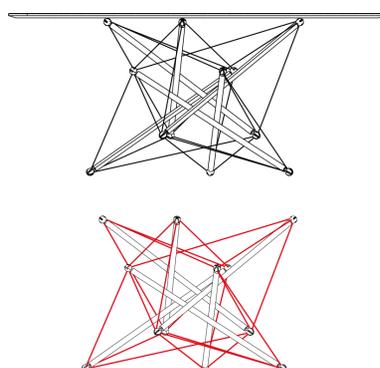
Strange Tensegrity Table 3
Designer DDAA
anno 2017 - 2019



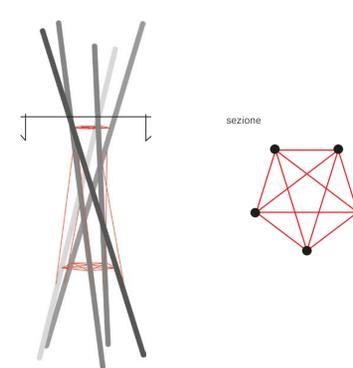
Bag Chair
Designer James Piatt
anno 1998



Tavolo 714
Designer Theodore Waddell
produzione Cassina
anno 1973



Coat hanger tree
Design Naruse Inokuma Architects
anno 2009



S A A D

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

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale I A.A. 2020/2021

Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

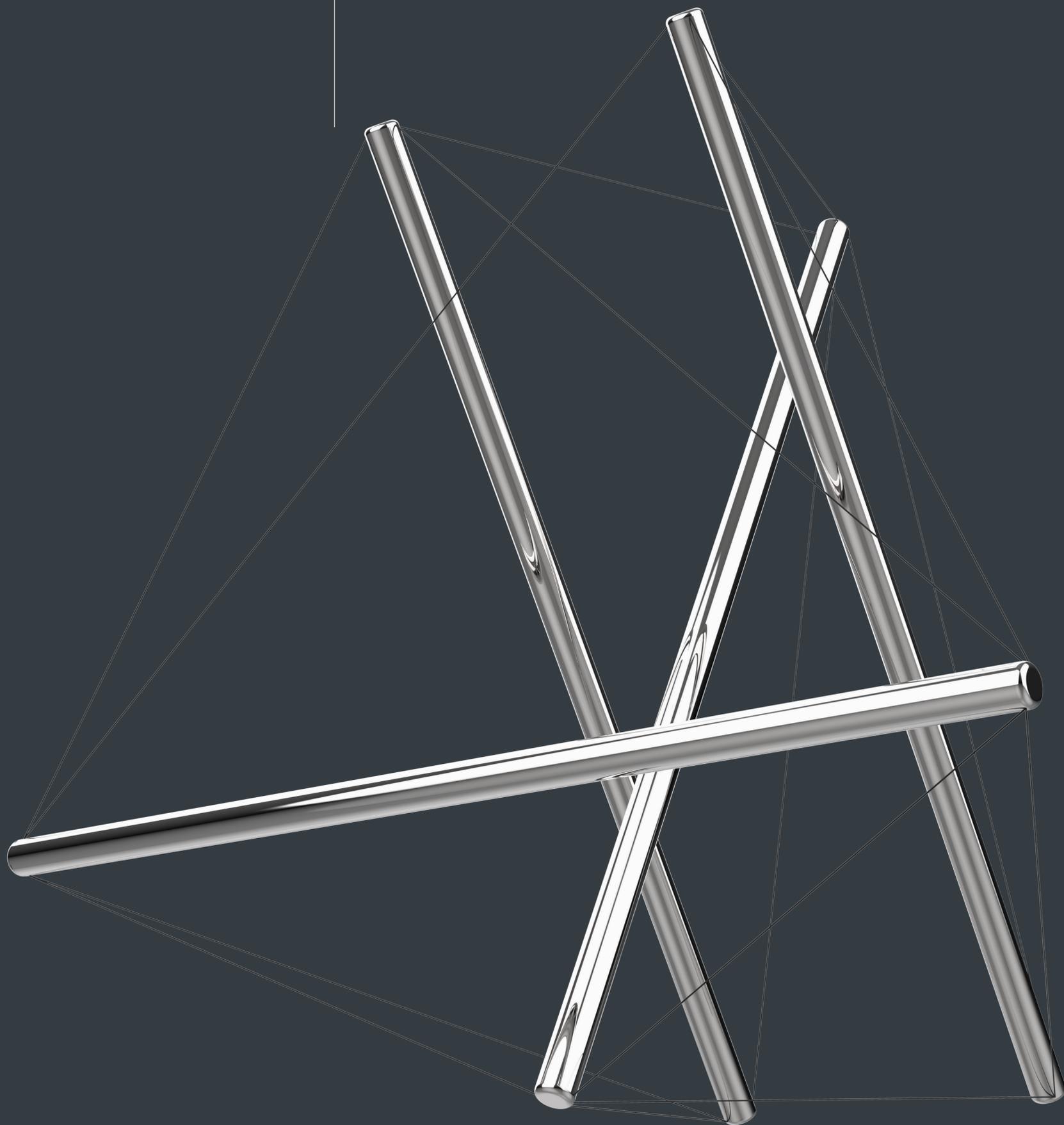
D

leggerezza

Un design "leggero" non funziona per addizione ma per sottrazione, non toglie forza al pensiero, è un percorso tra ricerca e sperimentazione in cui la leggerezza è il risultato di un equilibrio tra segno, forma e materia. Ottenerla non è affatto semplice, forse perché appare più creativo e brillante progettare forme complesse.

resistenza

Ottimizzare al meglio le forme strutturali, mantenendo la resistenza necessaria ad assolvere la funzione per cui essa è stata progettata riduce considerevolmente la quantità di materiale impiegato e di conseguenza i relativi sprechi.



Kennet Snelson
Sun river
1967
Collezione Whitney Museum
of American Art - NY

tensione

Nella progettazione occorre seguire dei criteri per la scelta del materiale e il dimensionamento. È necessario scegliere un materiale che abbia una resistenza sufficiente per non rompersi e una rigidità sufficiente per non deformarsi più del dovuto. Lo sforzo non è una grandezza effettivamente misurabile, ma solo un'astrazione elaborata per facilitare il compito al progettista.

in-stabilità

Nel design molti oggetti stupiscono per la loro capacità di resistere alle forze a cui sono sollecitati, assolvendo alla funzione per cui sono stati progettati, ingannando percettivamente la loro stabilità. Gli oggetti che comunicano, ingannando, un'immagine complessiva instabile, non sono accettati o facilmente metabolizzati dalla nostra cultura.



S A A D

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

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale | A.A. 2020/2021

Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

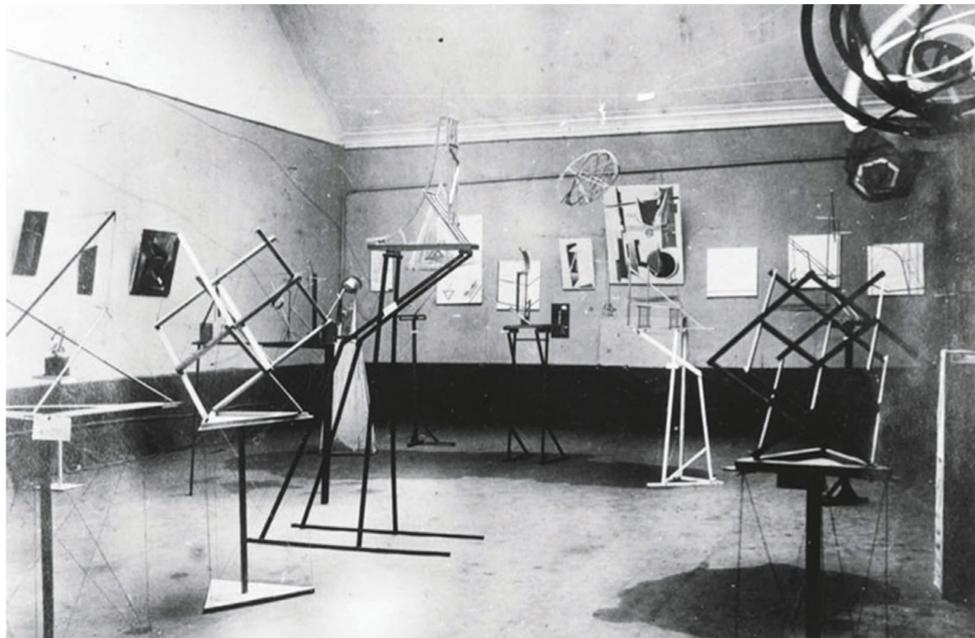
Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

A

Tensegrity

origini e storia



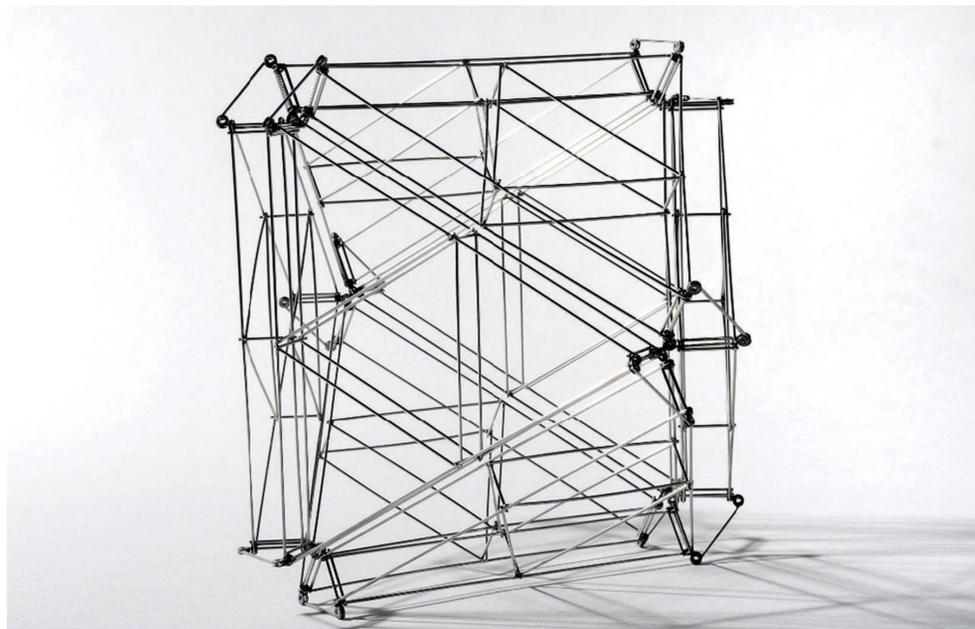
Nel 1921 i Costruttivisti espressero le loro idee in un'ambiziosa mostra sotto il patrocinio della Società dei Giovani Artisti, la OBMOKhU. Quattro artisti, **Alexander Rodchenko**, i fratelli **Georgii e Vladimir Stenberg**, **Konstantin Medunetskii** e **Karlis loganson** esposero un totale di 25 costruzioni spaziali. Le strutture tridimensionali di loganson, definite "costruzioni autostabilizzanti", mostravano gli innovativi principi di sollecitazione di tipo tensegrale.

La **tensegrità** (tensional integrity o floating compression), è un principio strutturale basato sull'utilizzo di componenti isolati in compressione all'interno di una rete di tensione continua, in modo tale che gli elementi compressi non si tocchino e gli elementi in tensione deliniscano il sistema spazialmente.

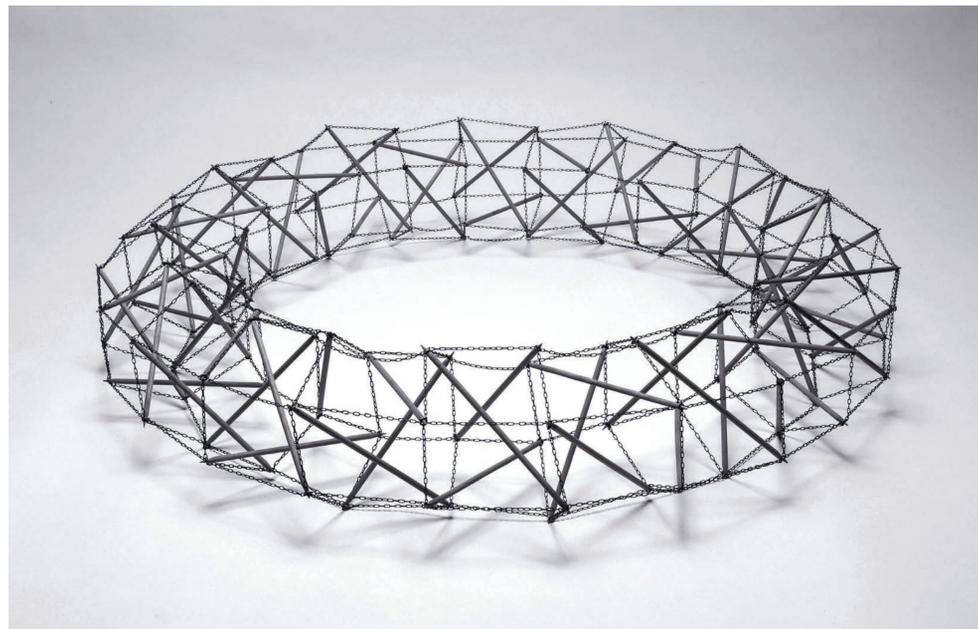
La prima struttura collocabile nella categoria del sistema prototensegrale trova riferimento nella **ricerca condotta dai costruttivisti russi**, mentre la scoperta delle tensegrali viene attribuita a tre studiosi: **Richard Buckminster Fuller**, **Kenneth Duane Snelson** e **David Georges Emmerich**.

Fuller ed Emmerich hanno concentrato i loro studi in ambito costruttivo ed architettonico, Snelson invece sull'aspetto artistico ed estetico, proponendo sculture estremamente complesse.

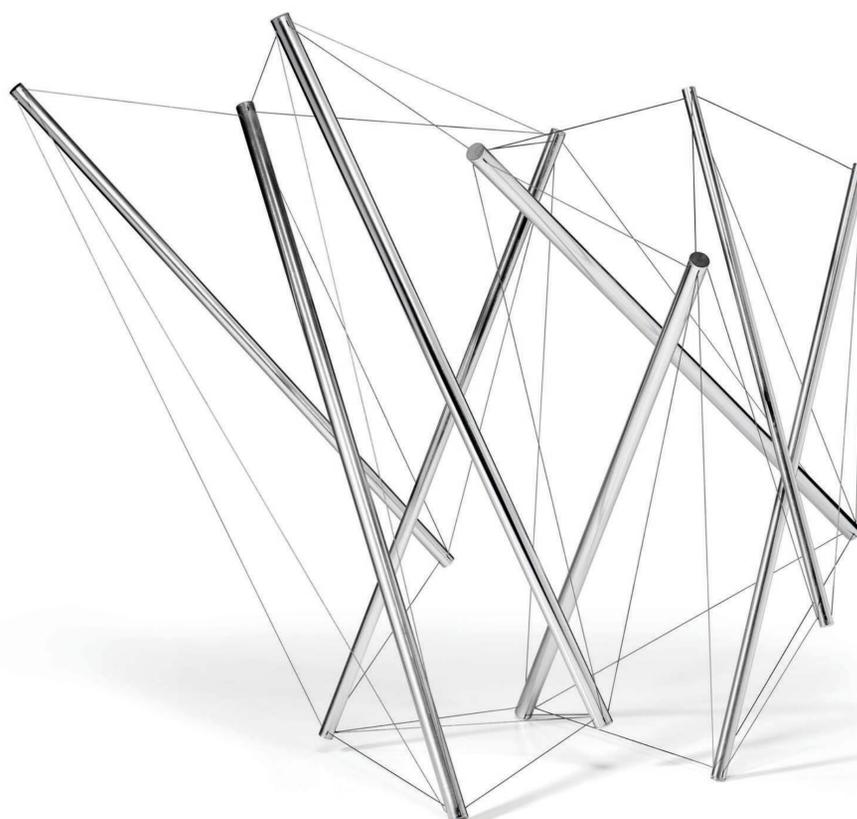
Richard Buckminster Fuller
(USA 1895-1983)



David Georges Emmerich
(FR 1925-1996)



Kenneth Duane Snelson
(USA 1927-2016)



S A A D

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

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale | A.A. 2020/2021

Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

B

Tensegrity

classificazioni e tipologie

Un sistema tensegrale è una connessione stabile di componenti assialmente caricati, detto di classe k se al massimo " k " componenti a compressione sono collegati a qualsiasi nodo.

La rigidità meccanica cresce al crescere della classe.

In funzione del numero di puntoni impiegati nel sistema tensegrale si configurano diverse classi di tensegrali ognuna delle quali è caratterizzata da una rigidità meccanica maggiore della precedente classe.

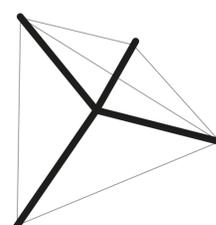
struttura tensegrale di classe 1



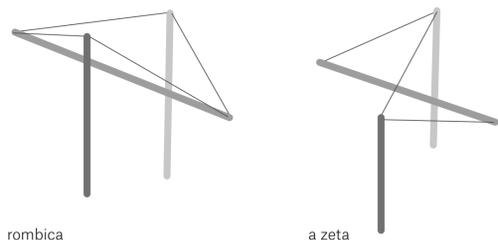
strutture tensegrali di classe 2



struttura tensegrale di classe 3



tipologie di disposizione degli elementi



rombica

a zeta



circuito

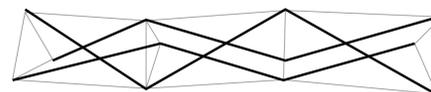
tipologie di assemblaggio



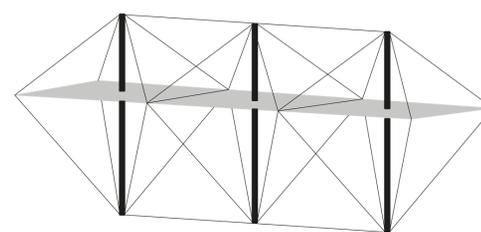
semplice



alternato



Le false strutture tensegrali si hanno quando non è possibile individuare gli elementi compressi separati fra loro o quando i bordi della struttura sono delimitati da elementi rigidi.



falso tensegrale

Cellule elementari

Sono tutte quelle strutture che non sono ulteriormente divisibili in singole cellule stabili. Le cellule elementari sono, per la maggior parte, strutture prismatiche classificate secondo la loro forma geometrica complessiva.

I moduli elementari più comuni sono composti da una base poligonale regolare e possono essere formati da 3, 4, 5, ...n elementi compressi. A seconda del numero delle aste, presentano diversi angoli di rotazione tra le basi.

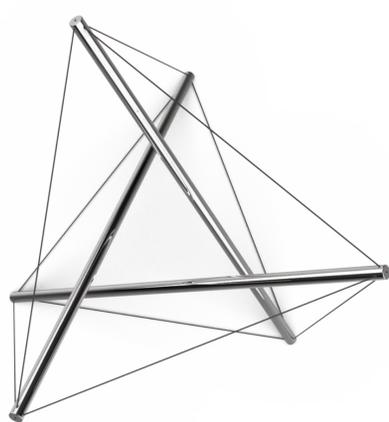
Gli angoli di rotazione si possono calcolare grazie alla formula $\alpha = 90^\circ - (180^\circ/n)$ da cui si ottiene:

- per il simplex $\alpha = 30^\circ$
- per il prisma a base quadrata $\alpha = 45^\circ$
- a base pentagonale $\alpha = 54^\circ$
- a base esagonale $\alpha = 60^\circ$

simplex $\alpha = 30^\circ$
vista laterale



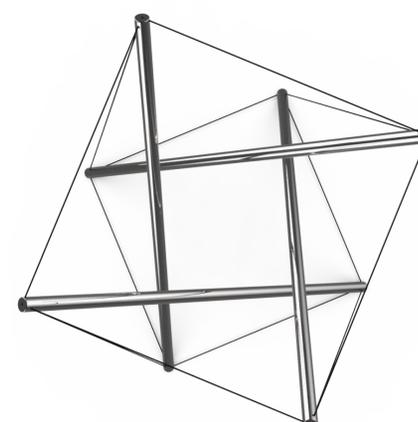
vista dall'alto



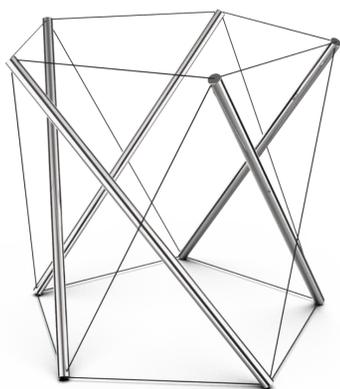
quadruplex $\alpha = 45^\circ$
vista laterale



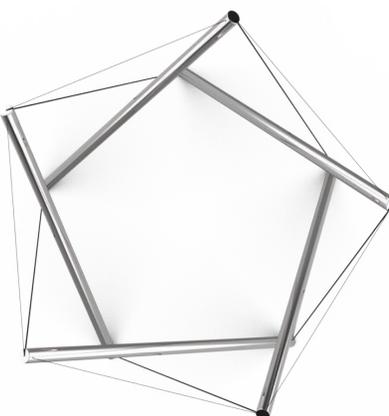
vista dall'alto



pentaplex $\alpha = 54^\circ$
vista laterale



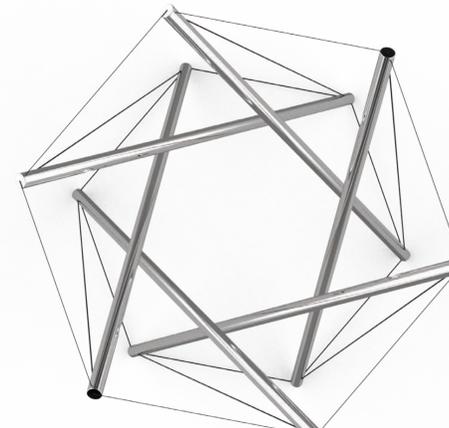
vista dall'alto



esaplex $\alpha = 60^\circ$
vista laterale



vista dall'alto



S A A D

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

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale | A.A. 2020/2021

Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

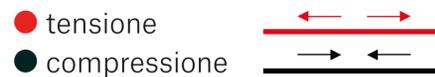
C

Tensegrity

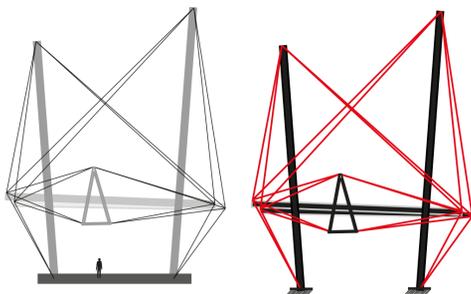
applicazioni e analisi

Le applicazioni di tensegrity si declinano in ingegneria, architettura e design presentando il medesimo meccanismo di risposta alle sollecitazioni e gli elementi in costante equilibrio reciproco.

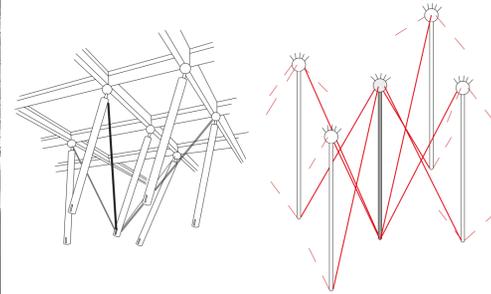
azioni di risposta alle sollecitazioni:



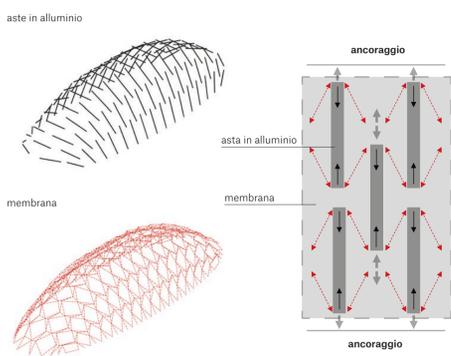
Kurilpa Bridge - ponte pedonale
Brisbane - Australia
Designer Arch. Cox Rayner, Ing. Arup
anno 2009



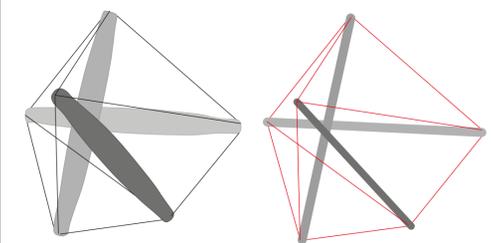
Copertura pedonale del
Museo di Storia Naturale di Reggio Calabria
Designer Studio ABDR Roma
anno 2013



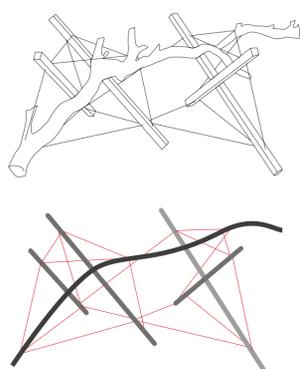
MOOM padiglione temporaneo
Tokio
C+A Coelacanth and Associates
Designer Kazuhiro Kojima
anno 2011



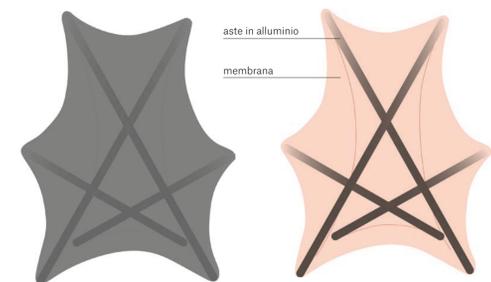
Bucki Lamp
Studio Lagranja Design - Spagna
produzione Pallucco
anno 2011



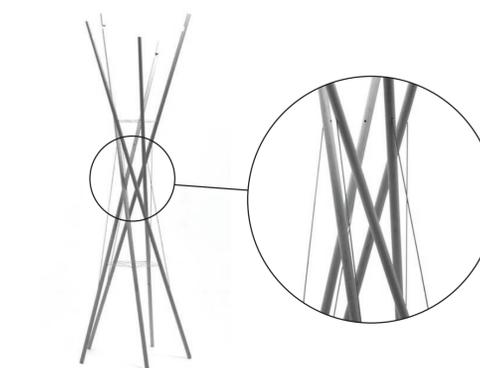
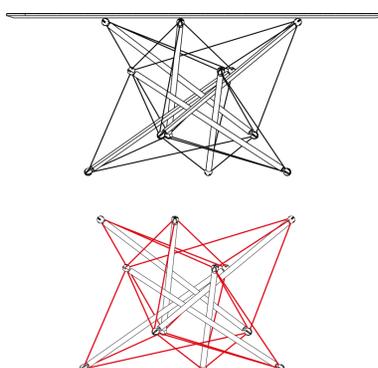
Strange Tensegrity Table 3
Designer DDAA
anno 2017 - 2019



Bag Chair
Designer James Piatt
anno 1998



Tavolo 714
Designer Theodore Waddell
produzione Cassina
anno 1973



Coat hanger tree
Design Naruse Inokuma Architects
anno 2009



S A A D

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

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale I A.A. 2020/2021

Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

D

*A mio padre,
la mia stella più bella.*

*"Cerco di non pensarci.
cerco di non pensarti".*

*Accade.
Raramente.*

/ Ringraziamenti

Questa è la parte più difficile di tutto il lavoro.
Parole e sensazioni da riordinare a cui dare un senso compiuto.

Ringrazio innanzitutto il mio Relatore, Prof. Alessandro Zona e il mio Correlatore, Prof. Jacopo Mascitti per aver accettato la mia proposta di tesi. Persone squisite e docenti di grande professionalità e competenza. Sempre disponibili, pazienti, diretti e chiari, di grande aiuto, sostegno e insegnamento durante questi mesi di lavoro alla tesi. Sono sinceramente felice e onorata di aver avuto la possibilità di condividere questa esperienza con loro.

Da qui in poi l'elenco dei ringraziamenti si estende praticamente a tutti i tre anni universitari, ai docenti tutti.

Ai colleghi di corso i quali, nonostante il gap generazionale, non mi hanno mai fatta sentire fuori contesto.
Ragazze e ragazzi splendidi con i quali confrontarsi, studiare, condividere gioie e dolori di questo viaggio. Di loro conserverò con affetto molti volti, voci, messaggi whatsapp, consigli, incontri, scelte, errori.

Ai miei figli, Valeria e Andrea che mi hanno sempre incoraggiata e ai quali spero di non aver sottratto troppo il mio tempo per essermi rimessa in gioco. Al mio compagno di vita, ormai da una vita, Domenico, sempre pronto a tendermi una mano per aiutarmi nella preparazione degli esami, sostenendomi in questa scelta e incoraggiandomi senza riserve ad andare avanti.

Ai miei colleghi di squadra del Settore Urbanistica della Provincia, i quali hanno sopportato le mie ansie, riservato consigli e consolato le mie lagne pre-esame.

Infine un pensiero agli affetti più preziosi che avevo e che ho perso durante questo percorso. Grazie al vostro esempio ho imparato che gli anni non sono un limite, c'è sempre tempo per imparare cose nuove e rinnovarsi.



Corso di Laurea in
Disegno Industriale
e Ambientale

A.A. 2020/2021

Relatore

Prof. Alessandro Zona

Correlatore

Prof. Jacopo Mascitti

Laureanda

Laura Veccia

matr. 106210

Stampa Tipografia Adverso - Ascoli Piceno - Maggio 2022

font Atlas Grotesk

Disegnato da Kai Bernau, Susana Carvalho e Christian Schwartz.
Rilasciato nel 2012. Il design è stato ispirato dai sans-serif degli
anni '50, in particolare Mercator (noto come "Helvetica olandese").

/ Indice

Premessa	1
00/ Introduzione	6
/ Fare leggero	10
/ Fare resistente	14
/ Tensione	18
/ In-stabilità	26
01/ Cos'è la tensegrità	30
/ 01.1 La tensegrità in natura	34
/ 01.2 La tensegrità nell'arte	47
/ 01.3 La tensegrità in ingegneria, architettura, design: analisi delle applicazioni	56
Sperimentare con la tensegrità: il contest Lego	98
02/ Evoluzione storica	102
/ 02.1 Sistemi proto-tensegrali	105
/ 02.2 Sistemi tensegrali	110
/ 02.3 Sviluppi e brevetti	116

03/	Proprietà e caratteristiche	130
/ 03.1	Definizioni scientifiche	132
/ 03.2	Classificazioni e tipologie	140
	/03.2.1 Identificazione dei sistemi tensegrali	146
	/03.2.2 Nomenclatura delle strutture tensegrali	151
	Esempio di applicazione: Torre Rostock	162
/ 03.3	Concetto strutturale	166
	/03.3.1 Meccanismi infinitesimi	170
	/03.3.2 Non linearità delle strutture tensegrali	172

04/	Generazione di geometrie tensegrali	178
/ 04.1	Form finding	180
/ 04.2	Modellazione algoritmica	183
/ 04.3	Modelli tensegrali	193

05/	Stato della ricerca	202
/ 05.1	Sperimentazioni e ulteriori sviluppi	204
	/ Conclusioni	218
	/ Glossario	226
	/ Bibliografia e sitografia	232



Tensegrità e Design

L'attenzione verso questo campo non è casuale, a differenza dell'architettura dove questo tema è molto trattato e studiato grazie anche all'avvento delle tensostrutture, nel campo del design non ci sono riferimenti ampi, ed anche se le problematiche sulla riduzione di materiale impiegato (e conseguente uso di energia e dismissione) e lo sfruttare al meglio le proprietà dei materiali sono le stesse, pochi sono i prodotti e gli artefatti che utilizzano la tensione come metodologia progettuale.

La tensione è da sempre presente nella natura, da qui molti progettisti ne hanno preso spunto ma il design ne rimane spesso fuori. Eppure la piccola scala in cui il design andrebbe ad operare, a differenza dell'architettura, faciliterebbe la produzione e la conseguente distribuzione di questi artefatti. Probabilmente la motivazione si potrebbe ricondurre alla nostra cultura occidentale che, a differenza di quella orientale, dove la leggerezza è insita culturalmente, ci fa prediligere artefatti massicci che

rievocano sensazioni di qualità, sicurezza, stabilità e durabilità. Un codice linguistico profondamente radicato impone ancora tutt'oggi, l'"immagine del peso".

Ma in un periodo storico dove il tema della sostenibilità fa da protagonista, pensare alla tensione come metodo per poter ridurre la quantità di materiale impiegato senza, in nessun modo, interferire sulla funzione e la resistenza dell'artefatto, potrebbe suggerire una nuova soluzione.

Questo elaborato è incentrato sull'analisi degli aspetti di natura tipologica, formale, strutturale, costruttiva e funzionale, relativi alla progettazione ed alla sperimentazione di sistemi tensegrali da applicare al design.

In architettura è già stato dimostrato che una progettazione basata su tali sistemi può essere una valida proposta innovativa.

Le strutture tensegrali sono innanzitutto molto leggere, sono modulari e possono essere applicate anche nel campo di artefatti trasformabili o transitori.

È stato dimostrato che tali strutture garantiscono la minima massa strutturale per una varietà di condizioni di carico, che includono strutture soggette a carichi eccentrici, di compressione, di trazione di torsione, e strutture semplicemente

appoggiate, senza collasso per compressione o per instabilità.

Sono strutture che consentono trasformazioni di forma, ovvero nei sistemi che variano la loro forma da una configurazione compatta ad una configurazione di servizio espansa (es. sedute, elementi di sostegno o strutture rimovibili, come le tende).

Tali sistemi di solito sono costituiti da moduli elementari che possono essere uniti per formare strutture più complesse.

Il concetto di struttura tensegrale è stato studiato in diverse discipline come la biologia, l'ingegneria aerospaziale, la robotica.

L'obiettivo al quale punta la presente tesi è quello di esplorare e dare una essenziale conoscenza tecnica e scientifica per incoraggiare la scelta di sistemi strutturali tensegrali nel design come applicazione fattibile.

Vuole essere un contributo per la ricerca di metodologie e geometrie che assicurino prestazioni meccaniche, leggerezza strutturale e qualità estetica, capaci di garantire una concreta applicazione nel design anche per mezzo della progettazione parametrica.

00/ Introduzione

“[...] Immaterialità significa leggerezza e non solo in senso fisico ma anche visivo, significa togliere alle cose il loro peso, farle diventare lievi, discrete. Progettare un oggetto leggero significa lavorare sul terreno della levità e della discrezione. La levità indica una qualità dell’oggetto, cioè la consistenza, la struttura resistente, la discrezione suggerisce la relazione con l’intorno. L’oggetto discreto sfugge alla logica dell’immagine, della semplice visibilità, non è vistoso, non si scopre di colpo, ma batte la strada della non invadenza, della miniaturizzazione. L’oggetto discreto, è tutt’altro che evanescente, è definito in tutti i suoi particolari come lo è un’ala di farfalla”.

(Alberto Meda - Ingegnere e designer)

Esistono aspetti che da sempre influiscono nel design e che sono stati spesso oggetto di riflessione durante questo personale percorso di studi, ovvero i rapporti tra materiale, funzione e forma.

Avvalendosi non solo di contributi interpretativi tecnici ma anche filosofici, non esistono posizioni e risposte univoche sulla questione se debba essere il materiale a determinare la forma, o se debba essere la forma a forzare o annullare le caratteristiche del materiale. Ancora più in generale, esistono dubbi e, a volte, posizioni assai contrastanti su quale relazione debba esserci tra funzione, forma e materiale di un prodotto. **Il punto di partenza dal quale si è sviluppato tutto il percorso di ricerca di questo elaborato di tesi è la riflessione su questi ambiti che legano per l'appunto forma, funzione e materiale:**

- **fare leggero** e la conseguente riduzione di materiale impiegato;
- **fare resistente**, contribuendo alla funzionalità della struttura;
- **la tensione**, ovvero la proprietà meccanica che lega il fare leggero e resistente;
- la relazione tra **instabilità visiva e stabilità effettiva**.

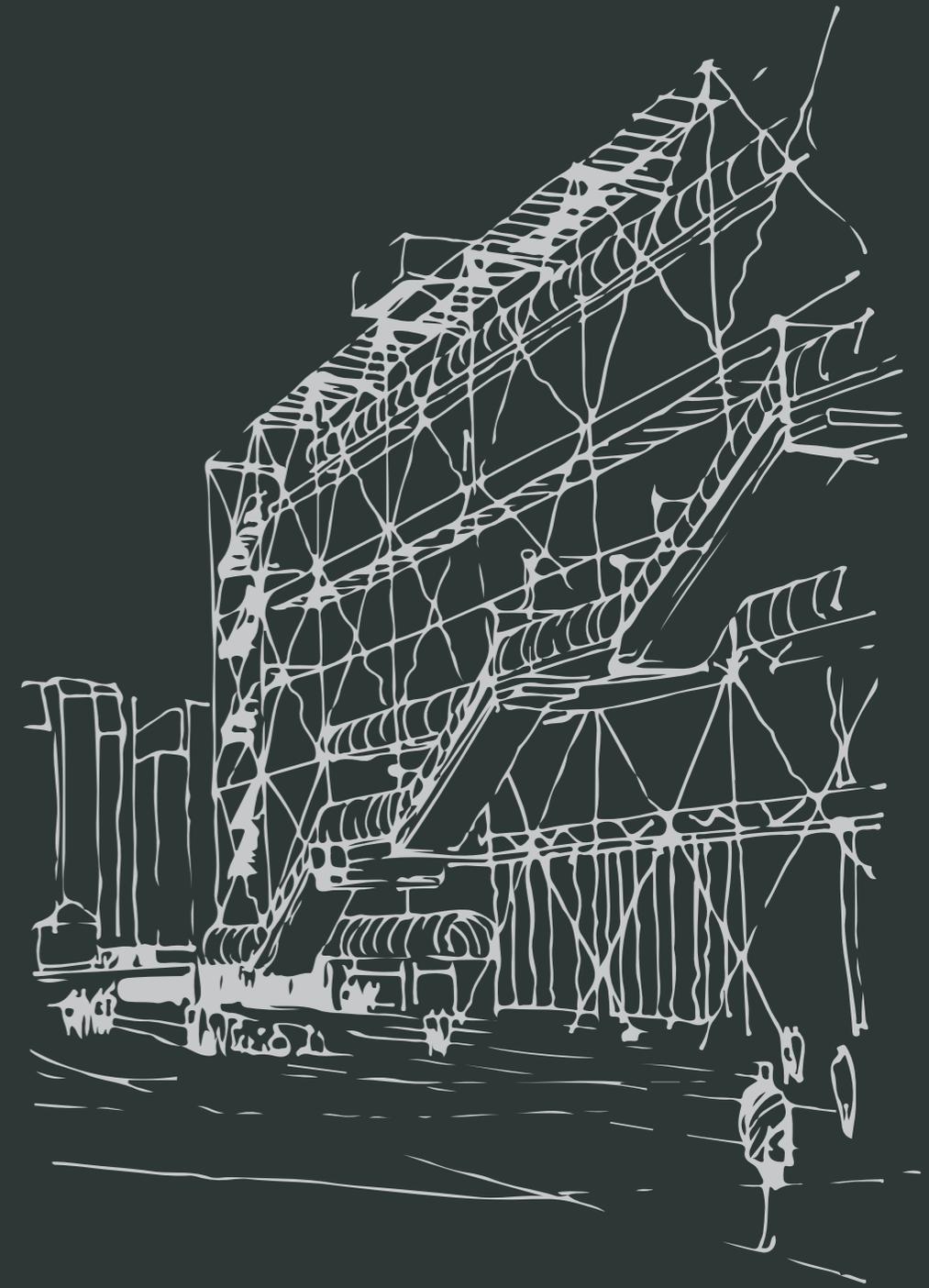
Ognuno di questi ambiti è collegato l’uno all’altro: il saper far leggero e la sua conseguente riduzione di materiale impiegato crea una percezione di instabilità, il ridurre il materiale comporta per il buon funzionamento l’essere resistente, caratteristica che si collega alla tipologia di irrigidimento, ovvero alla tensione, che riporta il prodotto ad una stabilità effettiva. L’obiettivo è quello di porre attenzione principalmente alle caratteristiche strutturali e funzionali non trascurando il fatto che, nella progettazione, il materiale non è un elemento secondario alla forma poiché questa può essere condizionata dal materiale stesso.

Ma qual è una forma strutturale in cui la quantità del materiale possa essere ridotta al minimo mantenendo resistenza e stabilità? Queste quattro tematiche fuse tra loro, pongono le basi per la ricerca di uno scenario e suggeriscono l’uso delle strutture autotensionanti per una tipologia progettuale funzionale e alternativa. Un approccio analitico è quello di descrivere singolarmente questi quattro ambiti partendo da citazioni, mirate sul tema, di designer influenti sul mondo del design.

/ Fare leggero

“Bisogna sempre avere l’ansia di sperimentare, togliere il più possibile, finché non ti casca tutto per terra”

Renzo Piano



La leggerezza è un prodotto molto sofisticato del “sentire” umano, non è uno stato inconscio ma più una ricerca basata sulla evoluzione di capacità naturali.

Leggerezza sta nell'eliminare tutta una serie di elementi che apparentemente servono ma di fatto aiutano solo ad appesantire, così da trovare la capacità di immaginare soluzioni diverse.

Filosofi, scrittori e artisti, a cominciare da Parmenide e Cicerone, passando per Marc Chagall, Paul Valéry e Leonardo Sciascia, per arrivare a Italo Calvino e Milan Kundera ci rammentano come la leggerezza passi per la sottrazione, che non è rinuncia, bensì sintesi, precisione, definizione.

Un design “leggero” non funziona per addizione ma per sottrazione, non toglie forza al pensiero, è un percorso tra ricerca e sperimentazione in cui la leggerezza è il risultato di un equilibrio tra segno, forma e materia. Ottenerla non è affatto semplice, forse perché appare più creativo e brillante progettare forme complesse.

La diminuzione del peso rappresenta un indicatore del livello tecnico. In generale, aumentare la quantità di prestazioni ottenuta da una data quantità di materia, ovvero ridurre la quantità dei materiali occorrenti

per ottenere una data prestazione, risponde ad una tendenza economica elementare che è sempre stata presente nell'attività progettuale.

Il materiale ha una valenza linguistica poiché attribuisce una espressività non programmata all'oggetto realizzato.

Il materiale è un mezzo linguistico di comunicazione della cultura del progetto, indizio di storia e cultura complesso; a volte espresso con chiarezza, altre difficile da comprendere. I materiali non sono solo l'espressione e il linguaggio della “funzione”.

Vi sono oggetti nei quali predomina l'equazione “peso = importanza” che però non è uguale in tutte le culture: una cultura nomade produce forzatamente un sistema di oggetti trasportabili e leggeri costruendo su questo dei significati. Altre culture, come ad esempio la struttura giapponese, hanno prodotto una raffinata cultura del leggero. Ma nella cultura europea il valore del peso è sinonimo di qualità, durata, solidità, sicurezza ed ha lasciato un segno profondo sulla valenza linguistica del materiale.

Esistono oggetti che si alleggeriscono nella sostanza, senza però mostrarlo perché un codice linguistico profondamente radicato gli impone ancora l’“immagine del peso”.

/ Fare resistente

“Come non riconoscere che la forma è sorta dal binomio materia/ funzione? Fare il più con il minimo dispendio di energia e materiali. Questo concetto è reso possibile analizzando e studiando la forma più congegnale che l'oggetto finale deve assumere. Il materiale non cambia né in qualità, né in quantità: la proprietà della rigidità dipende maggiormente da un fattore di forma.”

Gillo Dorfles



Un foglio di carta piegato longitudinalmente diventa da oggetto flessibile a una struttura dotata di una certa rigidità. Il materiale non cambia né in qualità, né in quantità: la rigidità dipende da un fattore di forma.

Ottimizzare al meglio le forme strutturali, mantenendo la resistenza necessaria ad assolvere la funzione per cui essa è stata progettata riduce considerevolmente la quantità di materiale impiegato e di conseguenza i relativi sprechi.

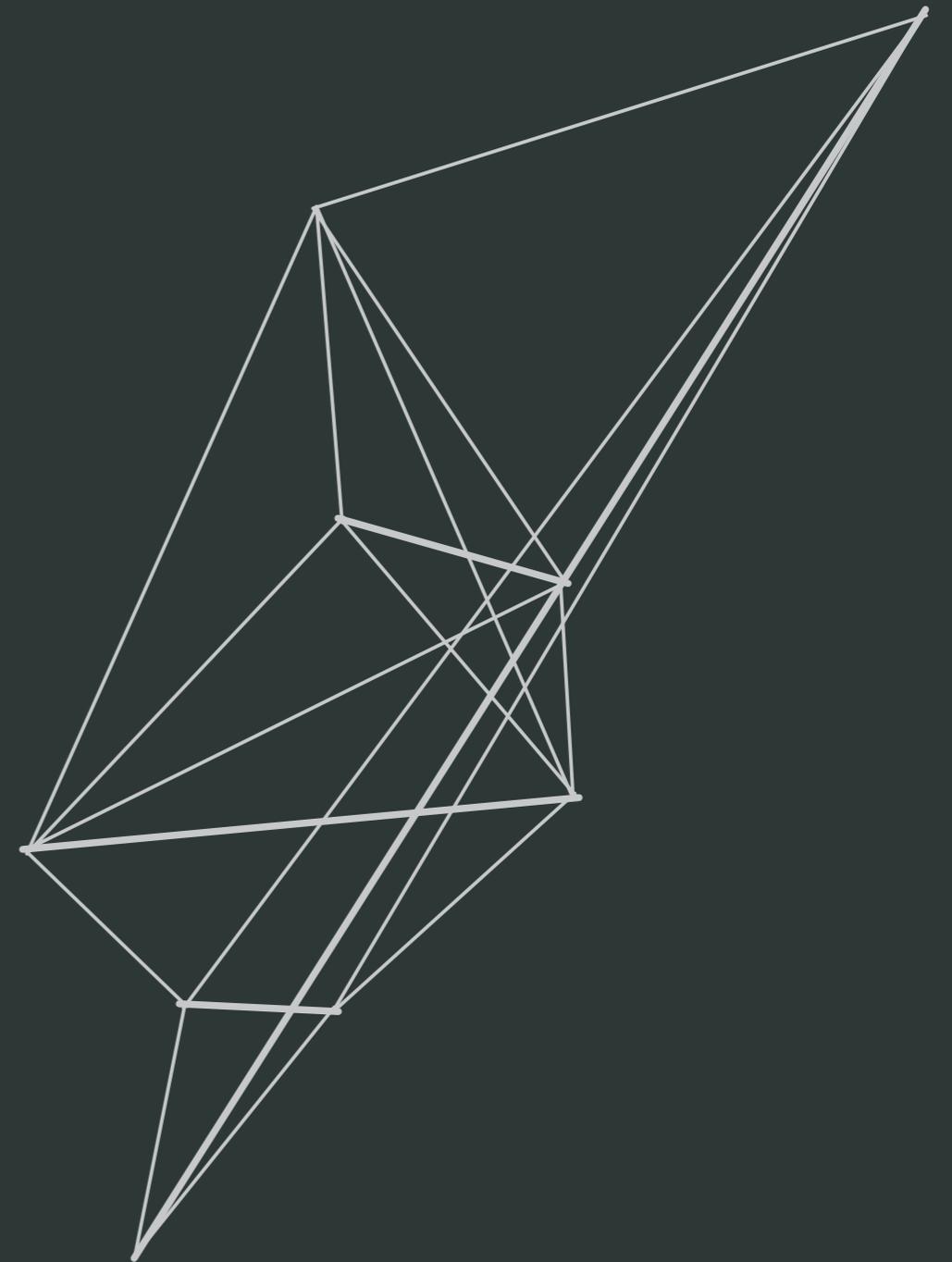
Occorre ispirarsi alla natura che progetta e crea da sempre oggetti resistenti, attenti all'economia: lo scarto non esiste ma diventa input per la realizzazione o il funzionamento di altro.

La resistenza è un elemento importante nella progettazione, poiché ne consegue un ottimale funzionamento. È necessario però utilizzare meno materiale, fare il più con il meno senza andare ad intaccare la resistenza.

/ Tensione

“Io la forma non l’ho mica disegnata, è venuta fuori con la tensione ed il peso”

Bruno Munari



Parlare di tensione significa trattare con tutte quelle soluzioni strutturali che permettono una ripartizione più omogenea del carico, ossia di quel complesso di forze gravanti su una struttura e di conseguenza la possibilità di costruire artefatti più leggeri senza compromettere la stabilità e la resistenza. In fisica e ingegneria, la deformazione di un corpo è un qualsiasi cambiamento della configurazione geometrica che porta ad una variazione della sua forma o delle sue dimensioni in seguito all'applicazione di una sollecitazione interna o esterna. Qualsiasi oggetto sottoposto a forze subisce una variazione delle sue dimensioni. Nella progettazione di un qualsiasi artefatto l'essere in grado di prevedere di quanto variano le dimensioni quando viene sollecitato è importante tanto quanto sapere se si romperà.

Nella progettazione **occorre seguire dei criteri per la scelta del materiale e il dimensionamento.** È necessario scegliere un materiale che abbia una resistenza sufficiente per non rompersi e una rigidità sufficiente per non deformarsi più del dovuto. **A tal fine occorre conoscere le forze agenti, la forma e le dimensioni per poter calcolare gli sforzi e le deformazioni cui l'artefatto verrà sottoposto durante l'uso.** **È necessario quindi conoscere la tipologia di sforzo cui un oggetto può essere sottoposto e le relazioni che legano le deformazioni agli sforzi applicati.** Lo sforzo non è una grandezza effettivamente misurabile, ma solo un'astrazione elaborata per facilitare il compito al progettista. Lo sforzo è valutato come rapporto tra la forza agente e la sezione resistente.

Un corpo soggetto a delle forze subisce una variazione di dimensioni (allungamento, accorciamento...). **La corretta valutazione dello sforzo e della deformazione cui è sottoposto un artefatto anche complesso**, soprattutto se sollecitato da forze che agiscono in varie direzioni, è in realtà piuttosto complicata e occorre ricorrere a metodi di calcolo sofisticati (es. metodo ad elementi finiti).

In sostanza la deformazione può essere valutata come rapporto tra l'allungamento subito e la lunghezza iniziale.

Premesso ciò sono quattro i casi limite di applicazione di sforzo e conseguenti deformazioni:

- **trazione e compressione**
- **taglio**
- **flessione**
- **torsione**

Si prende in considerazione solo il caso di trazione e compressione in quanto l'unico che interessa in questo elaborato di tesi.

Fintanto che si resta nelle deformazioni elastiche esiste una relazione di proporzionalità tra sforzo e deformazione, che prende il nome di Legge di Hooke che può essere scritta come:

$$\sigma = E \epsilon \quad \text{oppure} \quad E = \sigma / \epsilon$$

$$\text{oppure} \quad \epsilon = \sigma / E$$

dove:

σ = sforzo applicato [N/mm²]

E = modulo di elasticità o di Young [N/mm²]

ϵ = deformazione [adimensionale o in %]

La legge di Hooke è estremamente importante in quanto permette:

- noto il modulo di elasticità corrispondente al materiale utilizzato (E) e la deformazione subita del materiale (ϵ), di calcolare lo sforzo σ ($\sigma = E \epsilon$).

- noto lo sforzo (σ) applicato e la deformazione (ϵ) subita, di calcolare il modulo di elasticità del materiale utilizzato ($E = \sigma/\epsilon$).
- noto lo sforzo (σ) applicato ed il modulo di elasticità (E) del materiale utilizzato, di calcolare la deformazione ($\epsilon = \sigma/E$)

A parità di sforzo la maggiore o minore deformazione che un materiale subisce dipende dal materiale stesso. Ogni materiale è caratterizzato da uno specifico valore del modulo di elasticità E .

La conoscenza di tale valore permette di legare lo sforzo a un materiale alla deformazione che esso subisce.

È evidente che maggiore è il modulo di elasticità del materiale più questo sarà rigido e minore è la deformazione che il materiale

subisce a parità di sforzo agente.

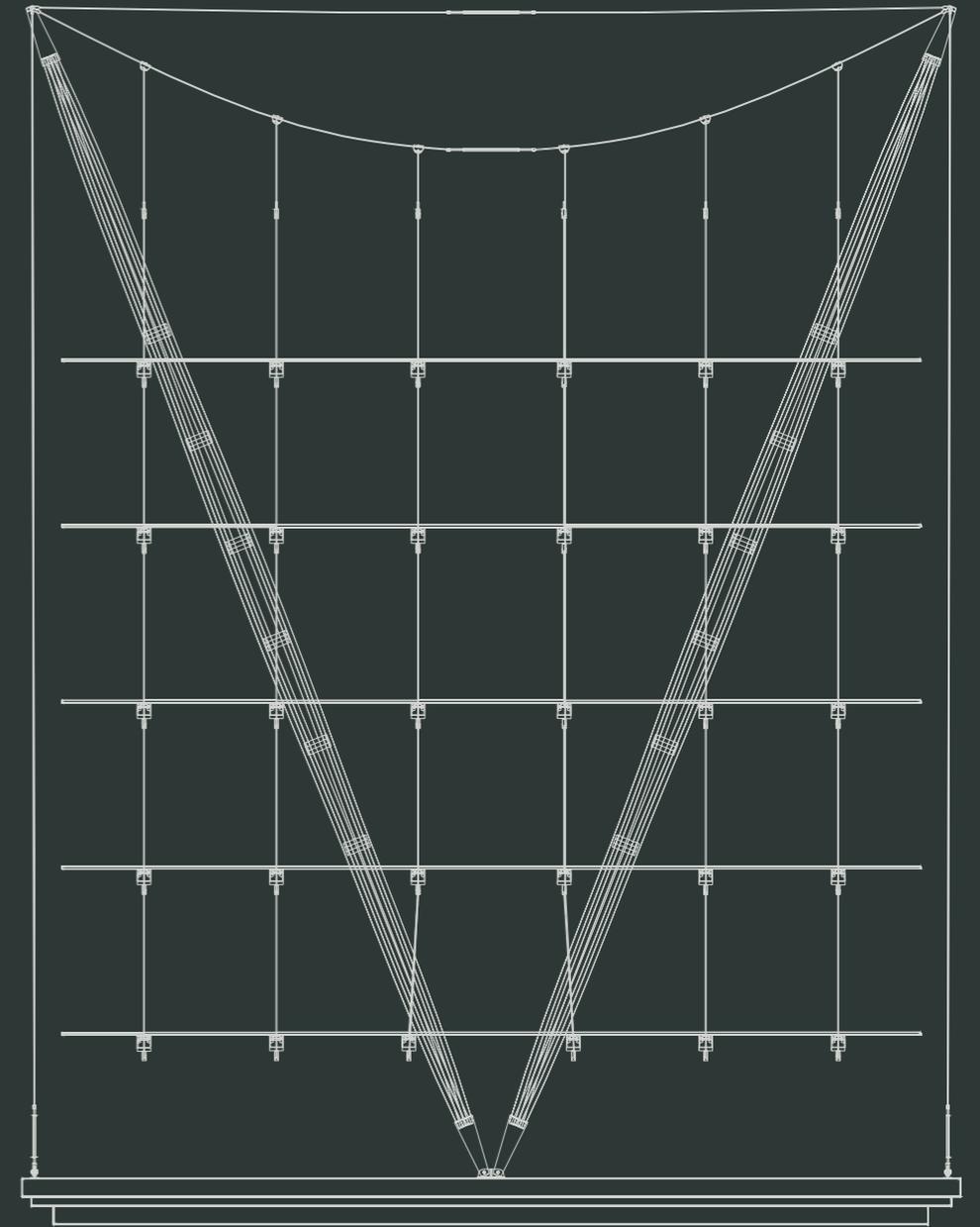
La conoscenza del valore del modulo di elasticità dei materiali con cui è realizzato un artefatto è fondamentale. Nella scelta del materiale due sono le caratteristiche che bisogna che siano verificate:

- il materiale deve essere resistente; cioè la sua resistenza intrinseca (σ ultimo) deve essere superiore allo sforzo agente (σ ultimo $>$ σ agente)
- il materiale deve essere rigido, cioè il suo modulo di elasticità E deve essere sufficientemente alto da determinare un allungamento inferiore a quello massimo ammesso in fase di progetto.

/ In-Stabilità

“La struttura viene denunciata in tutta la sua scarna essenzialità ove la sezione del materiale usato è ridotta al limite delle proprie possibilità.”
[...]
“Leggerezza fisica legata al peso, leggerezza visiva legata alla percezione.”

Franco Albini



Nell'ambito del design molti oggetti stupiscono per la loro capacità di resistere alle forze a cui sono sollecitati, assolvendo alla funzione per cui sono stati progettati, ingannando percettivamente la loro stabilità. La visione complessiva di questi oggetti suggerisce precarietà.

Nel mondo del design esistono diversi approcci per manifestare lo stato di instabilità, da ricercarsi nella relazione tra la quantità di materiale impiegato e la percezione instabile che ne sussegue. Gli oggetti che svelano e che dimostrano, purché ingannando, un'immagine complessiva instabile, non sono accettati o facilmente metabolizzati dalla nostra cultura.

Un oggetto che sia in grado di sorprendere, all'apparenza instabile e precario ma effettivamente stabile, crea aspettative. La perfezione non esiste ed il "difetto" di apparire instabile, avvicina l'oggetto al mondo terreno.

La stabilità è intrinseca all'oggetto, non viene mostrata, ma svelata utilizzandola.

La natura del materiale, la sua quantità impiegata e la soluzione di impiego, attribuiscono alle strutture percezioni di instabilità o di instabilità.

Leggerezza fisica legata al peso, leggerezza visiva legata alla percezione.

Instabilità visiva - stabilità effettiva.

01/ Cos'è la Tensegrità

- / 01.1 La tensegrità in natura
- / 01.2 La tensegrità nell'arte
- / 01.3 La tensegrità in ingegneria,
architettura, design:
analisi delle applicazioni

Il campo di interesse e di operatività del designer attualmente si è esteso ad ampio raggio, poiché sempre più ampia è la gamma dei prodotti chiamati a rispondere alle crescenti esigenze dell'uomo. Queste vanno a combinarsi con una sempre più ampia offerta di tecnologie innovative all'interno dei processi produttivi.

La sfera di competenza del designer spazia dal tradizionale campo della progettazione dell'oggetto, al controllo del suo impiego, per finire alla sua dismissione.

Il designer è chiamato inoltre ad individuare le proiezioni future delle necessità e, in base a queste, a pianificare i nuovi obiettivi calibrati sulle innovazioni della produzione.

Il designer quindi deve interfacciarsi con discipline diverse, come la tecnologia dei materiali, i processi produttivi, la sostenibilità ambientale e il ciclo di vita di un prodotto.

La ricerca progettuale deve tener conto di queste discipline anche attraverso la sperimentazione su forme e materiali. Non ha senso parlare di innovazione tecnologica se non si fa riferimento a una maggiore efficienza e controllo dei costi: la leggerezza è sicuramente un prerequisito per tali obiettivi.

Una progettazione sviluppata su sistemi autotensionanti o "tensegrali" può essere una interessante proposta di design innovativo.

Le strutture tensegrali sono innanzitutto molto leggere, offrono variabilità formale essendo smontabili, rimontabili e richiudibili, sono adatte sia per soluzioni temporanee che per quelle di lunga durabilità. Sono realizzabili con i materiali più diversi dal punto di vista dell'efficienza prestazionale, economiche in relazione al loro peso e ai risultati conseguiti e, non da ultimo, anche per la loro qualità estetica.

Oggi viviamo un passaggio tecnologico legato alla produzione di nuovi materiali che forniscono altissime prestazioni di resistenza, sia a compressione che a trazione, quali leghe metalliche ad altissima resistenza, di derivazione meccanica/aerospaziale, materiali compositi sempre più economicamente accessibili e che, proprio per questo, permetteranno e favoriranno sempre più la possibilità di realizzare strutture più resistenti ma anche più leggere e durevoli.

In questo capitolo vengono presentate alcune applicazioni in ambito ingegneristico, architettonico e del design.

/ 01.1 La tensegrità in natura

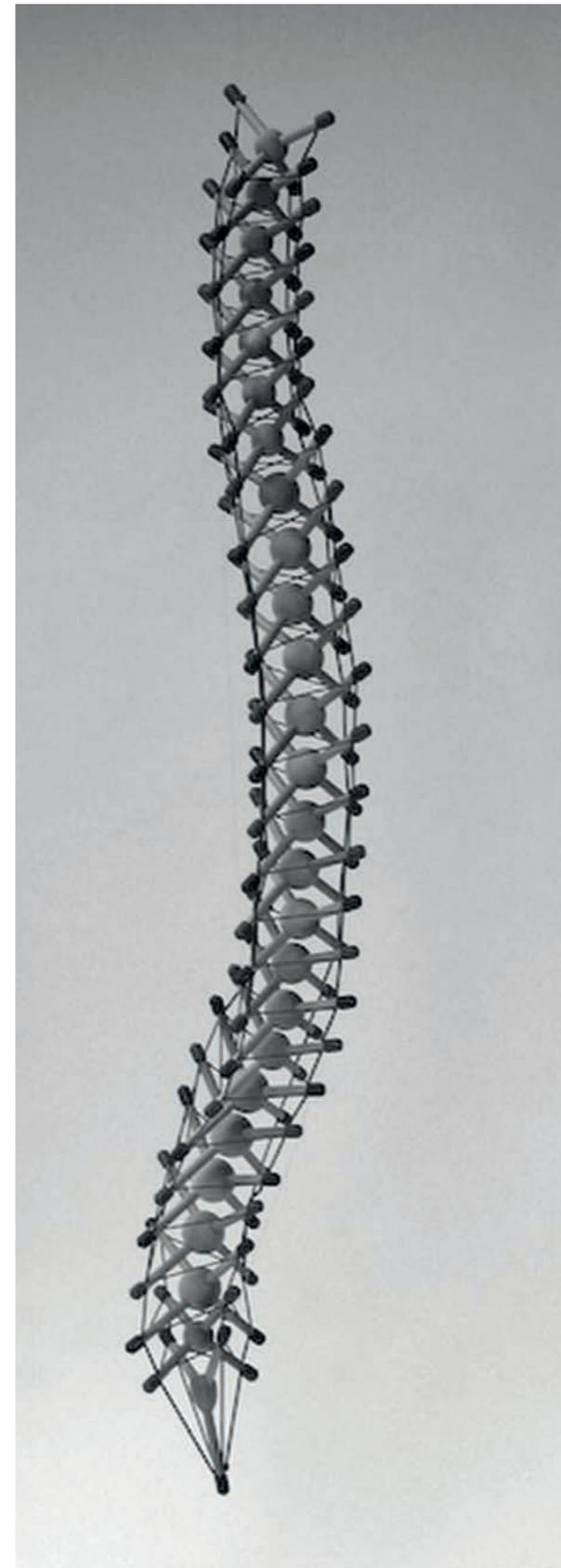
Il modello tensegrale può essere generalmente considerato come **principio strutturale sottoposto ad un particolare campo di forze in equilibrio stabile con una distribuzione precisa di elementi o componenti e con la condizione della continuità tra gli elementi tesi.**

La compressione e la trazione possono essere, per esempio, associati alla repulsione e all'attrazione, fenomeni presenti in campo gravitazionale e atomico.

Snelson sottolinea vari modi di collegamento attraverso le tensegrali in Astronomia (un pianeta al sole), in fisica atomica (un elettrone al nucleo) e in meccanica (un cavo ad un'asta).

Il modello tensegrale, può essere approssimato ad un sistema che già esiste in natura ed esistono molteplici esempi di elementi naturali che possono essere ricondotti ai principi di base delle strutture tensegrali.

34

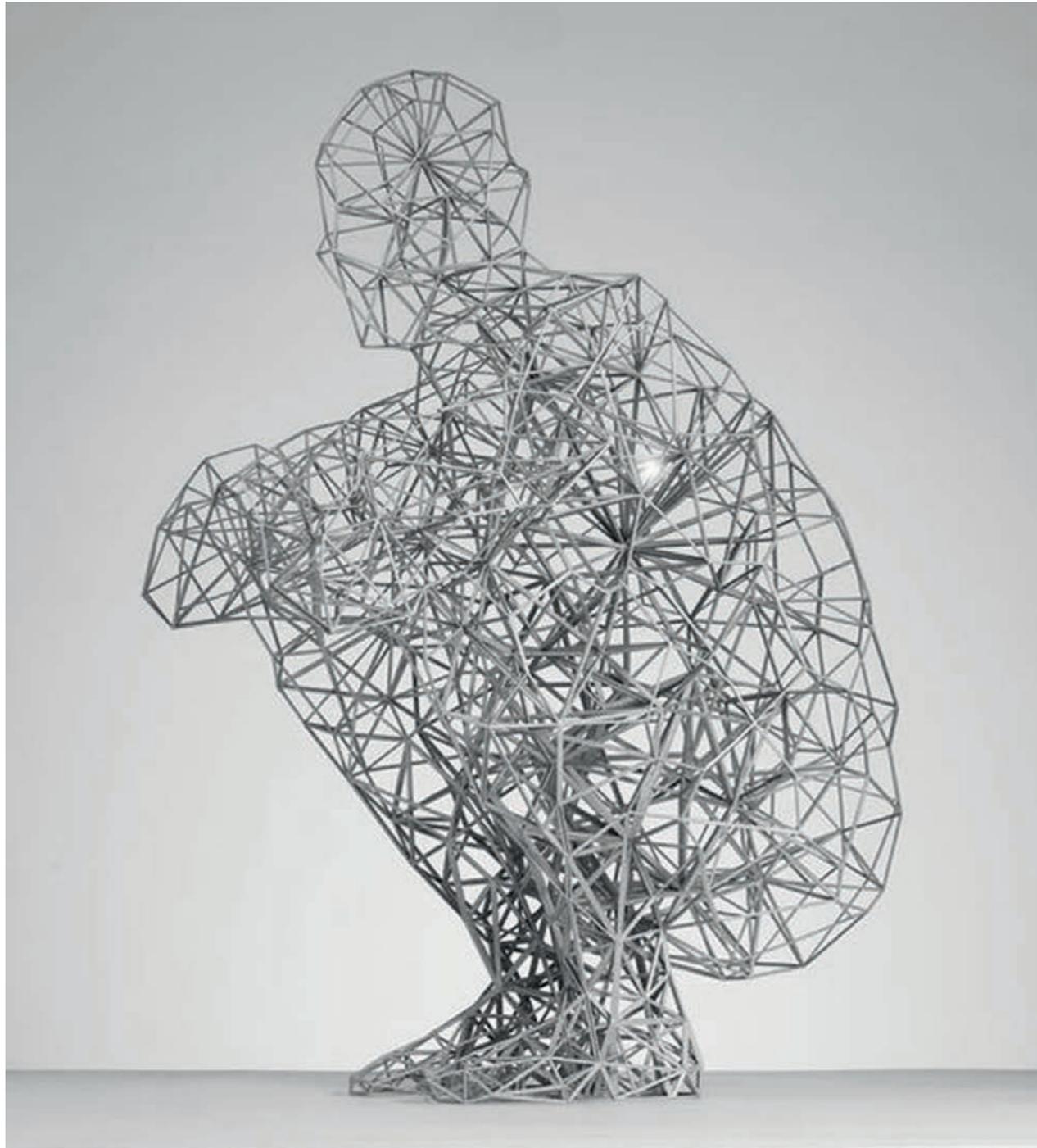


Il principio tensegrale è stato associato ed applicato sia alla **biomeccanica che all'anatomia, in particolare nell'analisi del comportamento dei muscoli, dei tendini e delle ossa negli esseri umani ed animali.** Sono state analizzate analogie tra le tensegrali e il sistema statico della colonna vertebrale umana e del corpo in generale. Si è teorizzato che lo scheletro non è solo un telaio di sostegno con muscoli, legamenti e tendini, ma è anche un insieme di componenti di compressione sospesi all'interno di una rete continua in tensione, ovvero un sistema tensegrale puro. **A tal proposito, si può citare la corrispondenza tra le ossa e i tendini nell'uomo e negli animali, che sono collegati in modo da permettere un facile controllo del movimento. In tali strutture, le ossa forniscono capacità di carico tramite la compressione mentre i tendini e i muscoli forniscono le tensioni necessarie per stabilizzare il sistema globale**

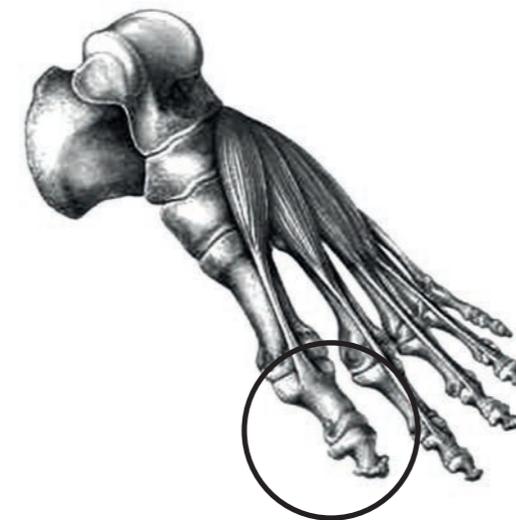
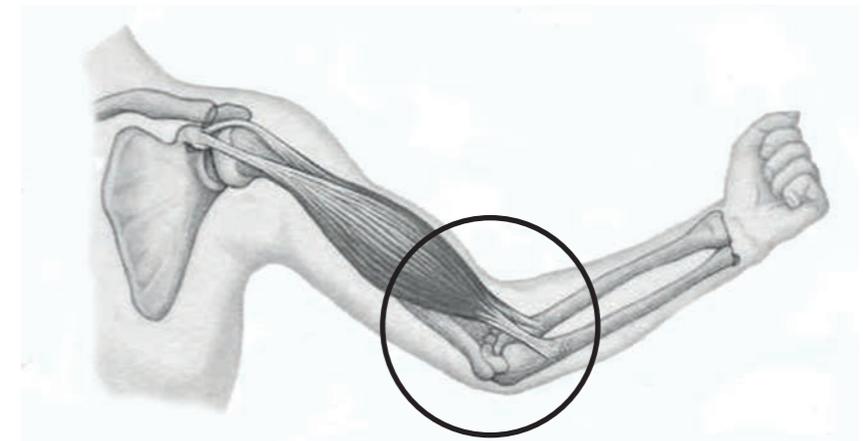
35

Scultura di Tom Flemons

Scultura di Tom Flemons



Nelle immagini sotto si osserva che i tendini collegano l'omero del braccio con l'ulna e le ossa radiali dell'avambraccio. Queste tre ossa si intersecano al gomito, quindi può essere classificato come un giunto di classe 3 di tensegrità.

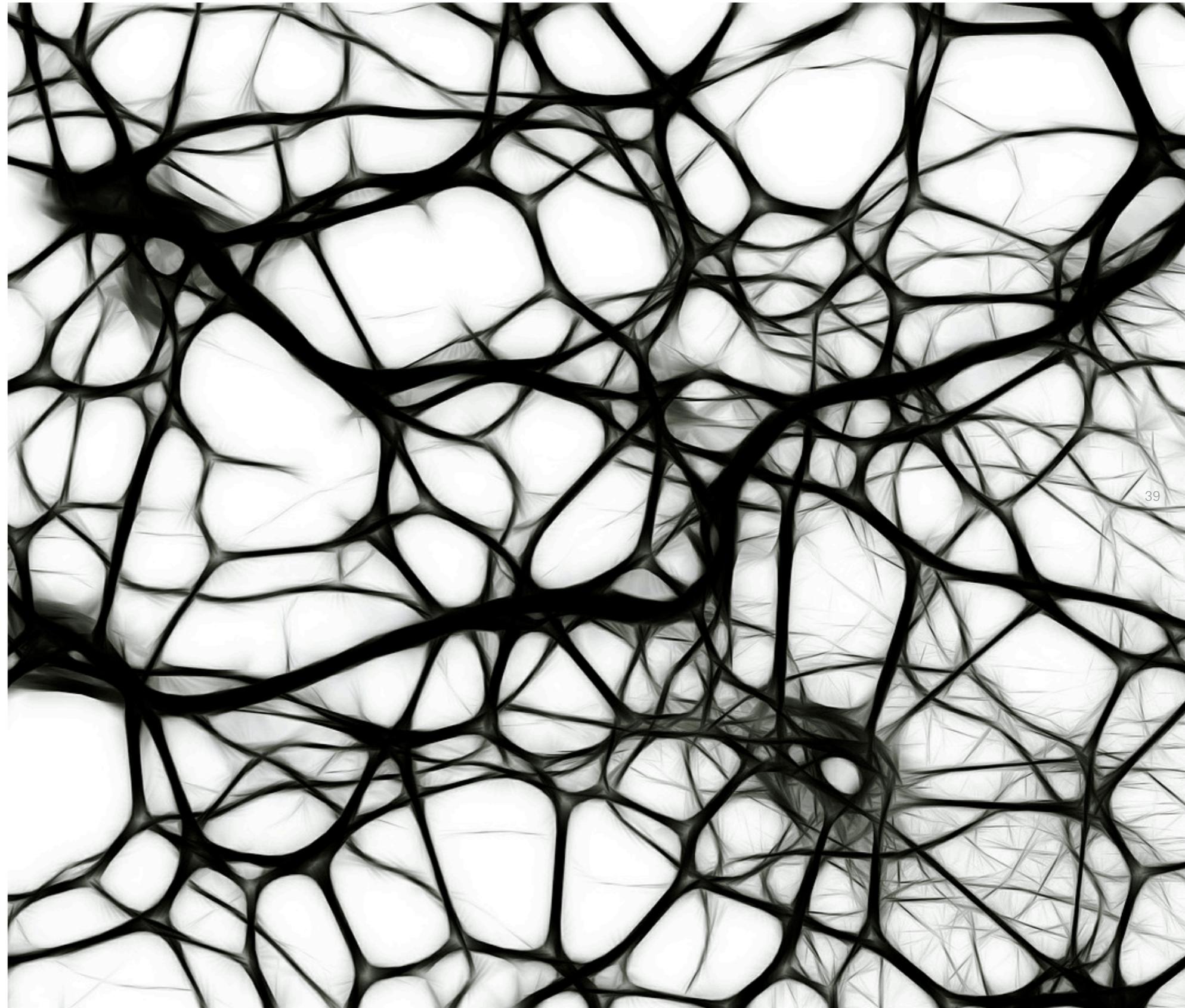


Questa immagine rappresenta l'ipotesi di tensegrità di classe 2 del sistema di controllo dell'alluce del piede.

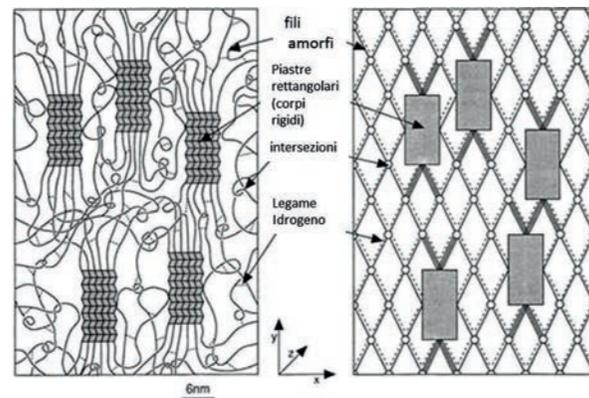
Alcuni studi hanno dimostrato che anche il **sistema nervoso centrale reagisce secondo un principio tensegrale.**

Infatti i neuroni sensoriali sono sempre coinvolti nel trasporto di informazioni e quindi sono in continuo movimento (sottoposti a sforzi di trazione), mentre i motoneuroni sono solo occasionalmente coinvolti in qualche azione motoria (comportamento a compressione).

rappresentazione
della struttura
neurale



Una ipotesi di tensegrità di classe 1 sembra adattarsi molto bene alla **struttura molecolare della tela del ragno Nephila Clavipes**. La seta prodotta da questo ragno ha una struttura molecolare più forte in natura poiché possiede una resistenza a trazione pari a $4 \cdot 10^9$ N/m²ha, molto superiore a quella dell'acciaio. La seta è una proteina complessa composta principalmente da due aminoacidi, glicina e alanina. Le alanine sono allineate in due modi per formare piastre molecolari da piccoli cristalli, chiamate β -fogli plissettati e fili amorfi che formano una rete di materiale che può assorbire la tensione. Le piastre rettangolari forniscono i corpi rigidi nella definizione di tensegrità, e i fili amorfi formano i membri di trazione sempre nella stessa definizione. Poiché le piastre non sono a contatto tra di loro, la ragnatela è stabilizzata dai fili amorfi in trazione.

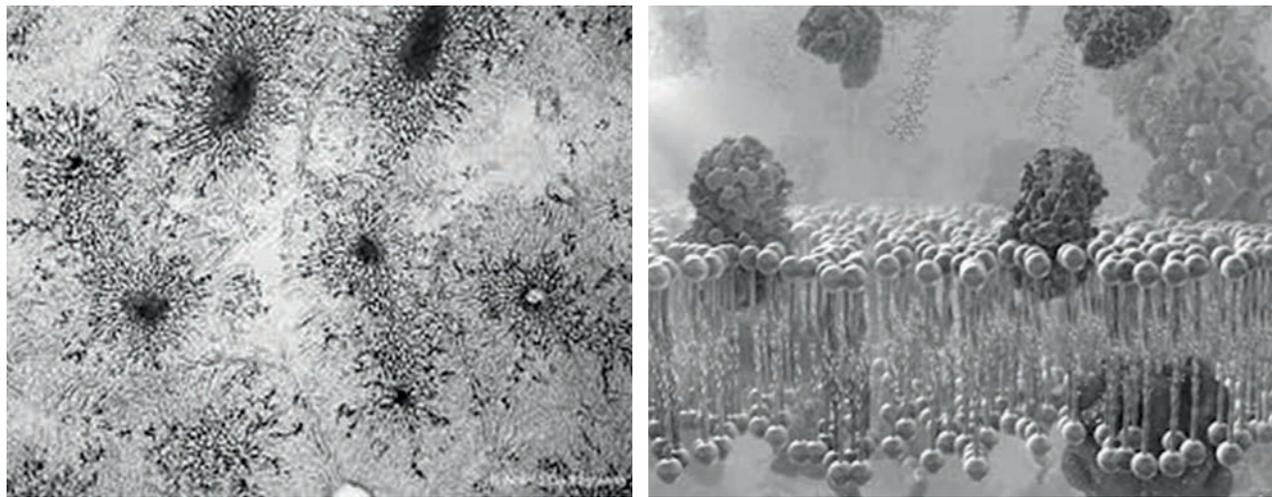


Un modello di tensegrità di classe 1 della struttura molecolare del ragno. I corpi rigidi sono i fogli β -plissettati, e i membri di trazione sono i fili amorfi che si collegano ai fogli β -plissettati.



In biologia un esempio di sistema tensegrale è rappresentato dalla composizione della membrana dei globuli rossi, formata da un doppio strato lipidico costituito da circa 33.000 unità in grado di essere modellate come tensegrali, composte da proto filamenti dal comportamento rigido e da spectrine dal comportamento elastico. Queste ultime sono modellate come insieme di connettori di trazione tra il doppio strato lipidico e i proto filamenti i quali, invece, sono associati a corpi rigidi. L'equilibrio e la composizione ottenuti da tale struttura biologica può essere associata ad un modello tensegrale.

42



rappresentazioni della membrana dei globuli rossi

La forma e la stabilità meccanica delle cellule viventi sono governate da una struttura molecolare interna nota come citoscheletro.

Le proprietà meccaniche del citoscheletro derivano dalla complessa rete di biopolimeri che compongono il reticolo citoscheletrico. Tutti questi biopolimeri subiscono un rimodellamento continuo in quanto i singoli monomeri possono essere aggiunti e rimossi. Alcuni polimeri del citoscheletro, come i filamenti contrattili di actomiosina, possono anche generare una tensione attiva.

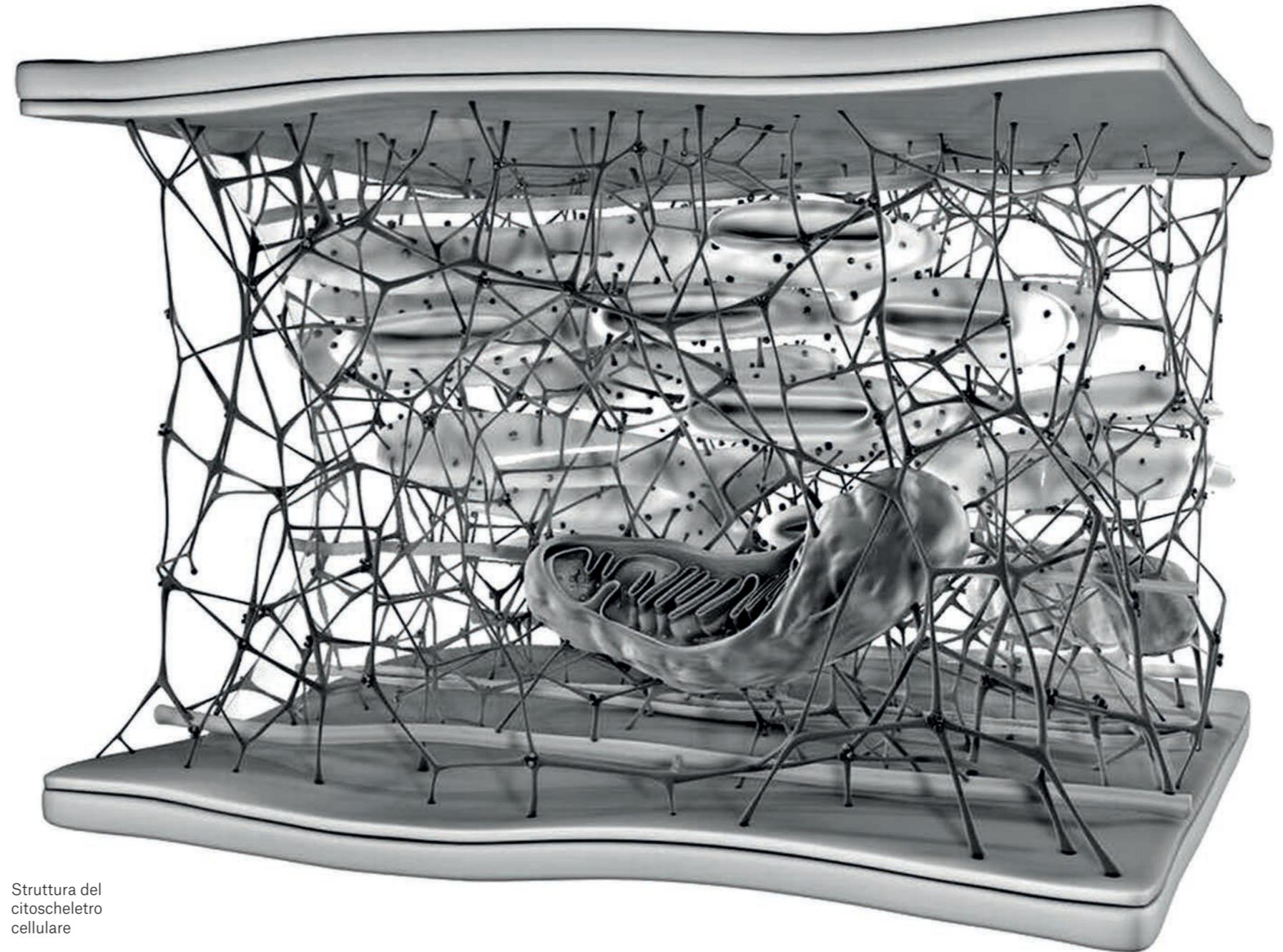
Una ipotesi sul comportamento elastico delle cellule in analogia al sistema tensegrale è stata confermata da diversi lavori sperimentali e da nuove scoperte nel campo della teoria cellulare. La struttura del citoscheletro della cellula può essere modificato alterando l'equilibrio delle forze fisiche trasmesse attraverso la superficie della cellula.

43

Il nucleo di una cellula vivente si appiattisce quando si attacca ad una superficie rigida e si ritrae in una forma sferica su un substrato flessibile.

Poiché tutti i diversi sistemi di filamenti del citoscheletro sono interconnessi come una rete tra loro e con aderenze cellula-cellula, nel citoscheletro viene generata una tensione di precompressione attraverso un equilibrio tra forze opposte distribuite in questa rete.

In particolare, le forze di trazione che vengono generate attivamente all'interno dei filamenti contrattili sono contrastate internamente dai microtubuli che possono sopportare la compressione imposta loro dalla rete contrattile circostante.



Struttura del
citoscheletro
cellulare

Anche se apparentemente le materie inorganiche non godono di questi principi fisici, è interessante sottolineare che, secondo alcune nuove scoperte, anche tali sostanze possono essere basate sulla "floating compression". Alcuni autori, infatti, hanno proposto come nuovo modello di tensegrale un silicone amorfo costituito da agenti di trazione e compressione che ridimensiona e corregge a livello globale i difetti creati localmente.

La geometria ha un particolare tipo di "bellezza" tutta sua, già apprezzata ad esempio da Platone, capace di semplificare e far percepire oggetti complessi tramite linee dritte e curve.

Molte volte si tiene conto solo della meccanica e della tecnologia dei materiali, senza pensare anche agli aspetti estetico formali.

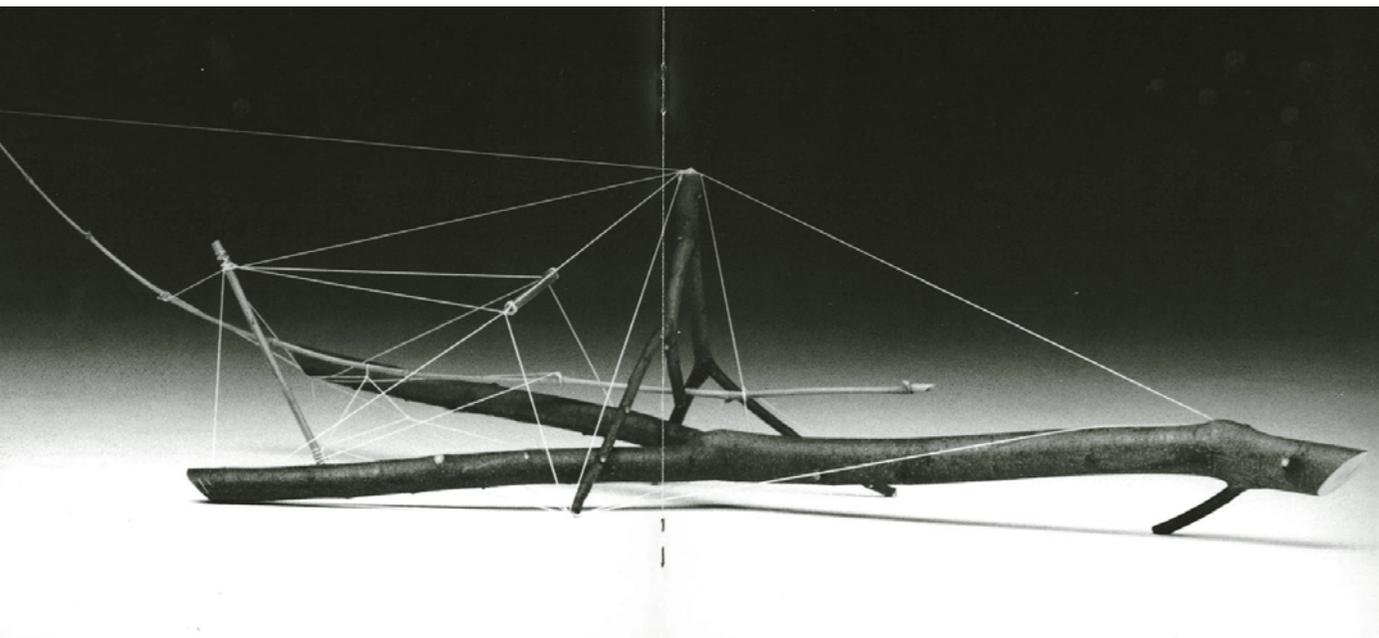
Gli artisti prestano concetti creativi ispirati alle strutture senza la necessità di strumenti analitici per caratterizzare proprietà funzionali della struttura stessa, poiché rappresentano puri sfoghi di energia creativa, completamente inutili come oggetti, eppure visivamente interessanti.

Bruno Munari

La poetica di Munari non è basata esclusivamente sulla pittura, ma mette in gioco, oltre ad un processo di apprendimento attraverso la sperimentazione di materiali, il coinvolgimento emotivo dello spettatore con effetti di sorpresa, realizzando uno spettacolo talvolta complesso.

Nei primi anni cinquanta Munari indaga il rapporto tra la natura e la geometria creando, in pochissimi esemplari, alcune sculture composte da rami raccolti nel bosco e fatti invecchiare, attorno ai quali l'autore intreccia fili di cotone bianco, lega un peso, imbriglia un rametto leggero di sambuco o di sughero, fissa una piuma o lega una pallina di plastica bianca che ciondola come un pendente.

48



*"Vicino a Chiasso
nel silenzio estivo dei boschi di Cardina
sulla cima della collina di Monte Olimpino
si possono trovare rami secchi
di frassino di castagno di betulla
di lauro di carpino di acero di ciliegio
di pero di magnolia... [...]
Faccio così una prima scelta di questi rami diversi
di questi segni solidi campati in aria
cresciuti al canto delle cicale e
tra l'indifferenza delle formiche
seccati dal sole e bagnati dalla luna.
Per lungo tempo li osserverò senza toccarli.
Poi proverò a fare qualche accostamento
con pezzi di rami dello stesso albero
o con pezzi di alberi diversi.
Devono poter stare assieme senza toccarsi
appoggiandosi ai fili di tensione.
I fili saranno bianchi di cotone o lino grezzo
niente interventi di colore.
L'insieme dei fili in tensione mostrerà
la natura geometrica dei rapporti di forza
le parti in compressione si comporteranno
con molta naturalezza quasi con indifferenza.
Nasce così un corpo unico solido
formato da due forze opposte
dove gli elementi in compressione
stanno solidamente assieme senza
toccarsi tra loro.*

*E così, senza attrezzi speciali, senza aiuti manuali
senza un progetto ben definito anche nei particolari
senza pensare perchè lo faccio e a cosa servirà
senza alcuna ragione accessibile a gente pratica
comincio ad annodare un filo bianco
ad una estremità di un ramo poi ancora
finchè due fili restano solidamente tesi quindi
appoggio sul filo teso l'estremità di un altro
ramo e lo tengo in modo che i rami non si tocchino
e mentre ne lego uno l'altro si slega.
Con molta pazienza imparando la tecnica mentre opero
e senza sapere prima che cosa verrà fuori dopo
mi trovo ad un certo punto
ad avere davanti a me con grande sorpresa
un oggetto solido che prima non c'era.
Qualcuno dentro di me mi dice che va bene così.
L'oggetto è compiuto e forse ancora manca qualche filo
per rendere la struttura più solida e qualche filo
lo metterò per ragioni estetiche.
Guardo l'oggetto finito come se lo avessi trovato
già fatto non so da chi.
Mi sento l'esecutore di un progetto che stava nell'aria
sulla cima di Monte Olimpino
tra il vento le nuvole gli alberi il sole le galline.
Un'attività affascinante
si sente un grillo lontano nel gran silenzio
vicino a Chiasso".*

(Bruno Munari, racconto pubblicato sul catalogo della mostra Alta Tensione, Galleria Vismara, Milano 1991)

49

Bruno Munari



Una spiegazione molto esauriente
annullerebbe la funzione dell'oggetto
creato invece per stimolare la fantasia

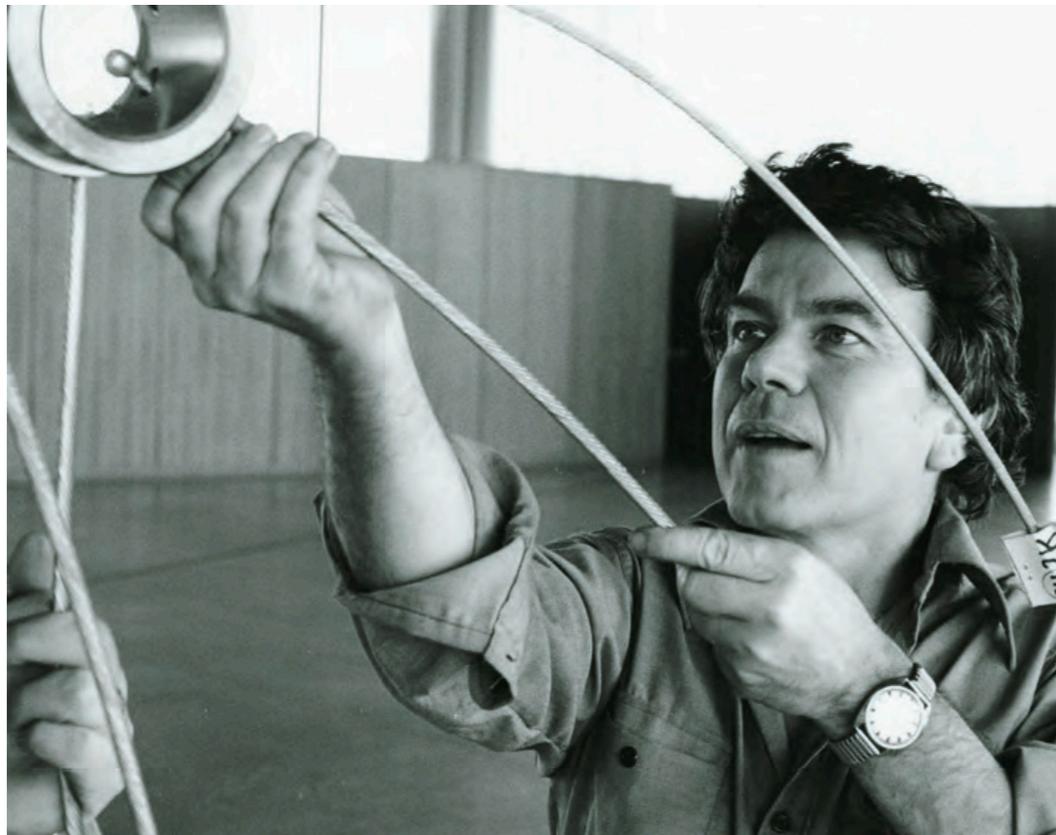
Carlo
Munari

1991

ALTA TENSIONE

Kennet Snelson

Snelson ha studiato i sistemi tensegrali soprattutto da un punto di vista artistico e compositivo, producendo sculture di singolare e straordinaria bellezza e complessità, con tecniche di montaggio ed assemblaggio di grande pulizia, affinate e migliorate nei decenni. Nonostante l'apparente semplicità del principio, Snelson ha avuto la geniale intuizione che il principio tensegrale avrebbe potuto produrre sculture con un ampio grado di variazione. Le sue sculture assumono la forma di torri, archi, immagini naturali di forme e geometrie irregolari. La loro struttura sembra spingersi verso l'alto in una serie di moduli decrescenti e si snodano sopra il terreno a dispetto della gravità.



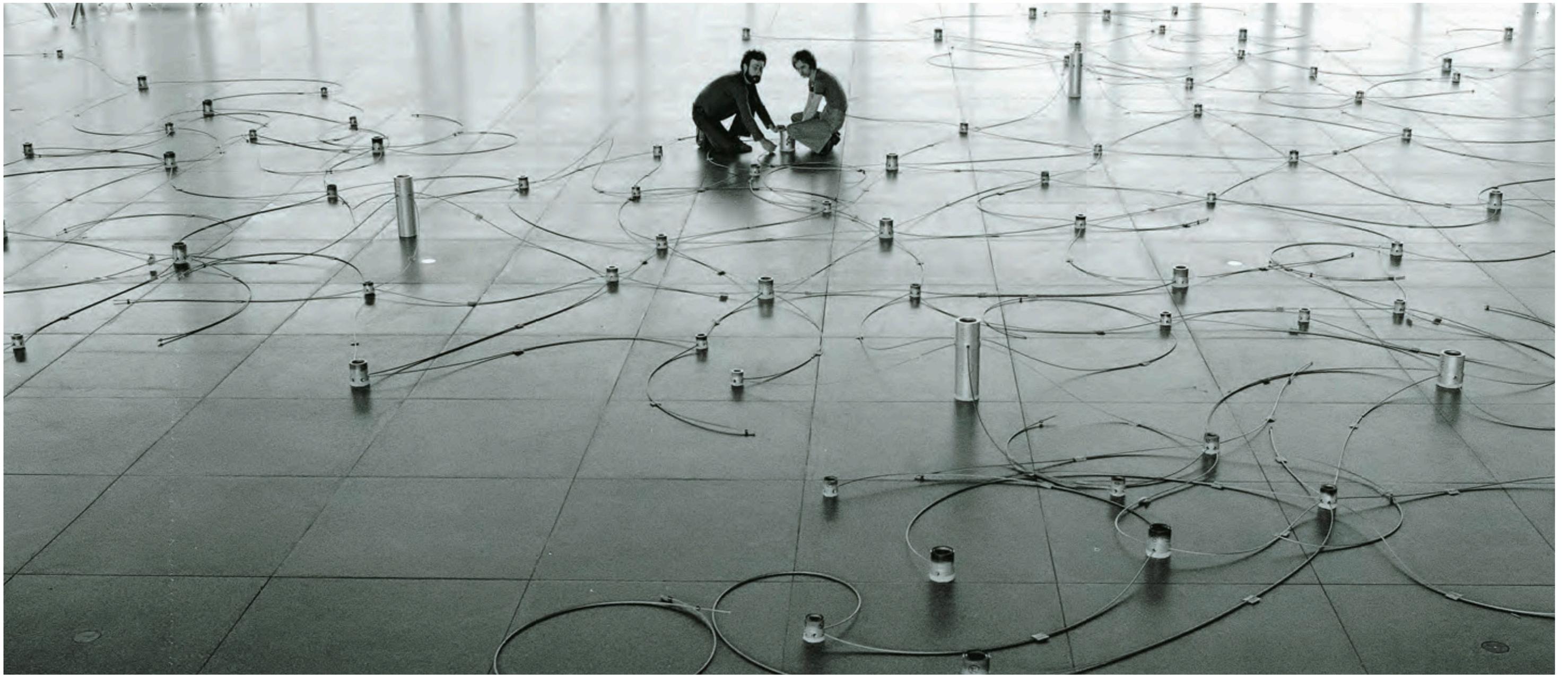
I materiali e le forme di Snelson sembrano tutt'altro che richiamare la scultura tradizionale, portando alcuni a identificare il suo lavoro con l'ingegneria piuttosto che con l'arte. In realtà il suo approccio progettuale è molto in linea con la storia della scultura.

Essendo realizzazione e materializzazione di una forma tridimensionale nello spazio, la scultura è sempre legata ai vincoli del mondo fisico. Così come la pietra, il legno e l'argilla, anche l'acciaio e l'alluminio devono essere modellati e adattati in modo da essere stabili. Snelson non ha sviluppato il concetto di tensegrale per creare edifici o per offrire nuovi modelli di assemblaggio di strutture. E' stato spinto dalla curiosità di comprendere come così pochi vettori possano contenere una scultura e al contempo mantenere un'integrità strutturale.

A tal proposito scrive:

"Ingegneri realizzate strutture per sostenere qualcosa, per tenere qualcosa.

Le mie sculture servono solo a stare in piedi da sé e per rivelare una forma particolare, come una torre o una mensola o un ordine geometrico probabilmente mai visti prima; tutto questo a causa di un desiderio di svelare, in qualsiasi modo, l'essenza meravigliosa della struttura elementare".



52

53

New Dimension, 1977 (Soft Landing, 1975-77) alluminio e acciaio inox
fase di assemblaggio

La leggerezza dei materiali può diventare essa stessa fonte di bellezza. Nel caso delle sculture di Snelson, questa bellezza si esprime attraverso la creazione di strutture la cui forma offre una rappresentazione di forze interne.

L'eleganza di queste sculture poggia sul principio di non - ridondanza, ove nessun elemento può essere rimosso senza pregiudicare l'integrità del complesso.



54

55

Dettaglio del giunto brevettato da Snelson

New Dimension, 1977 (Soft Landing, 1975-77)

/ 01.3 La tensegrità in ingegneria, architettura e design analisi delle applicazioni

Il percorso verso la leggerezza necessita di uno sforzo per superare il pregiudizio che la porta ad essere considerata un difetto piuttosto che un pregio.

La leggerezza viene oggi assimilata a un linguaggio universale, sia a livello strutturale sia estetico, che accomuna designer che prediligono evitare l'abbondanza di narrazione, adottare un approccio minimal, che non vuol dire assenza di valori o idee, ma espressività nel minimo di una forma a volte apparentemente fragile.

Il massimo dell'efficienza con il minimo dei materiali.

Di seguito vengono esaminate alcune applicazioni delle quali viene fatta un'analisi attraverso la definizione di uno schema statico equivalente.

Lo scenario che le accomuna tutte è che le strutture presentano sempre il medesimo meccanismo di risposta alle sollecitazioni e gli elementi in costante equilibrio reciproco, ovvero:

- **elementi tesi**
- **elementi compressi**

Kurilpa Bridge - ponte pedonale Brisbane - Australia Designer Arch. Cox Rayner, Ing. Arup anno 2009

Il Kurilpa Bridge è il più grande ponte tensegrale ibrido al mondo. Il complesso sistema di cablaggio comprende 80 cavi principali a trefoli elicoidali zincati e 252 cavi tensegrali realizzati in acciaio inossidabile. Viene definito sistema ibrido perché solo i longheroni orizzontali sono conformi ai principi di tensegrità. L'impalcato è portato da una coppia di travi a cui sono saldati i puntoni compressi. Essendo questi saldati al piede delle travi e non fluttuanti e stabilizzati da altri cavi tesi, questa struttura non può essere considerata tensegrale pura.





Il ponte è lungo 470 m ed è suddiviso in tre campate di cui la più lunga misura 120 m. Il design è il risultato di una partnership creativa tra gli architetti Cox Rayner, Baulderstone e l'ingegnere Arup. Il ponte viene definito dagli stessi progettisti come una struttura ad albero e strallata, il cui disegno architettonico richiama un insieme apparentemente composto da una serie casuale di elementi tensegrali. Infatti la geometria del ponte è apparentemente informale ma i cavi e puntoni sono disposti con un ritmo strutturale che fornisce la forza e la resilienza necessarie per una struttura destinata al trasporto di migliaia di pedoni e ciclisti.

La struttura comprende 18 impalcati in acciaio, 20 alberi in acciaio, 16 longheroni orizzontali e 6,8 chilometri di cavo a trefoli elicoidali. L'impalcato del ponte principale è costituito da 72 lastre di in calcestruzzo prefabbricate fissate alla struttura in acciaio.

60



61

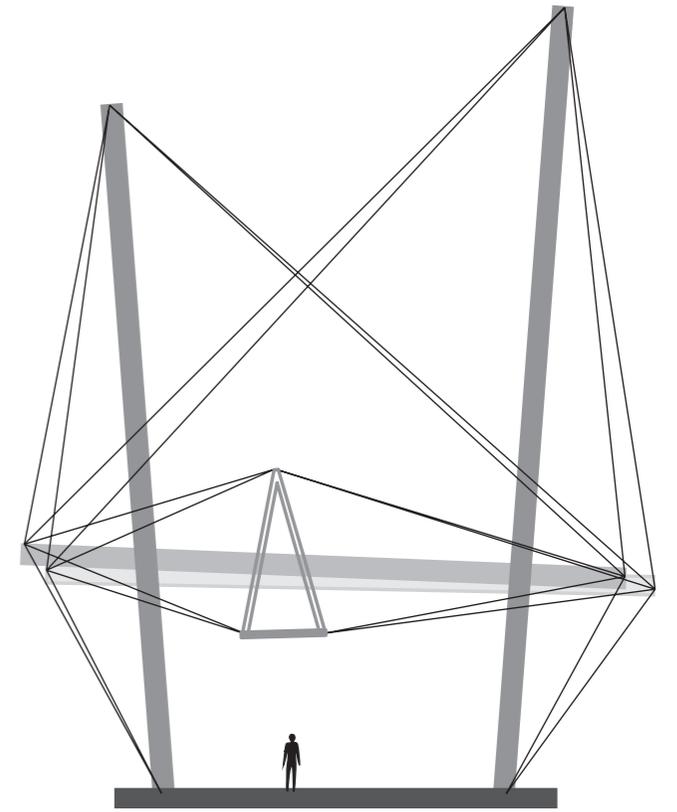
Analisi applicazione

Kurilipa Bridge

62

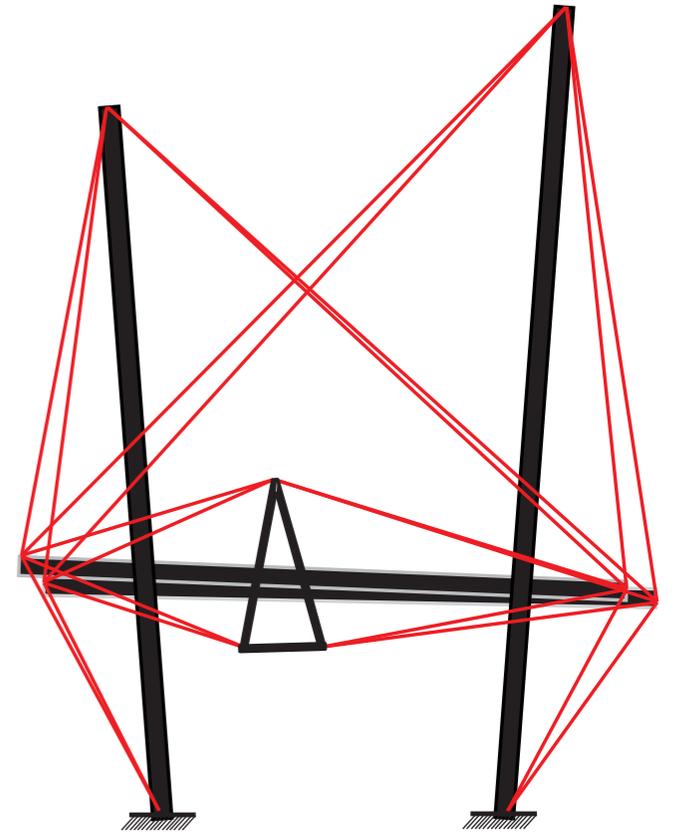
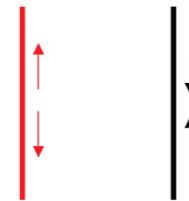


schematizzazione
struttura



63

azioni:
● elementi tesi
● elementi compressi



**Copertura pedonabile del
Museo di Storia Naturale di
Reggio Calabria
Designer Studio ABDR Roma
anno 2013**

A Reggio Calabria è stata effettuata la ristrutturazione del famoso Museo di Storia Naturale che ospita i Bronzi di Riace. Per la copertura pedonabile dell'atrio è stata realizzata una struttura tensegrale che sfrutta strutture di sostegno in acciaio saldato di sezione trapezoidale con sistema di tensionamento a mezzo di tiranti in acciaio e specifici apparecchi di fissaggio alle strutture in cemento armato.

È la prima in Europa per grandezza e seconda nel mondo.

Il nuovo atrio monumentale è ricavato per mezzo della copertura vetrata dell'attuale cortile. Il pavimento vetrato calpestabile è stato realizzato in grandi lastre di vetrocamera, inferiormente supportate da una struttura metallica il cui schema statico è basato su un modello tensegrale. L'effetto è quello di un'apparente "casualità" che invece trova una sua logica e sostanziale ragione d'essere nello stato di sforzo equilibrato tra gli elementi compressi e quelli tesi, contribuendo ad una immagine di leggerezza.



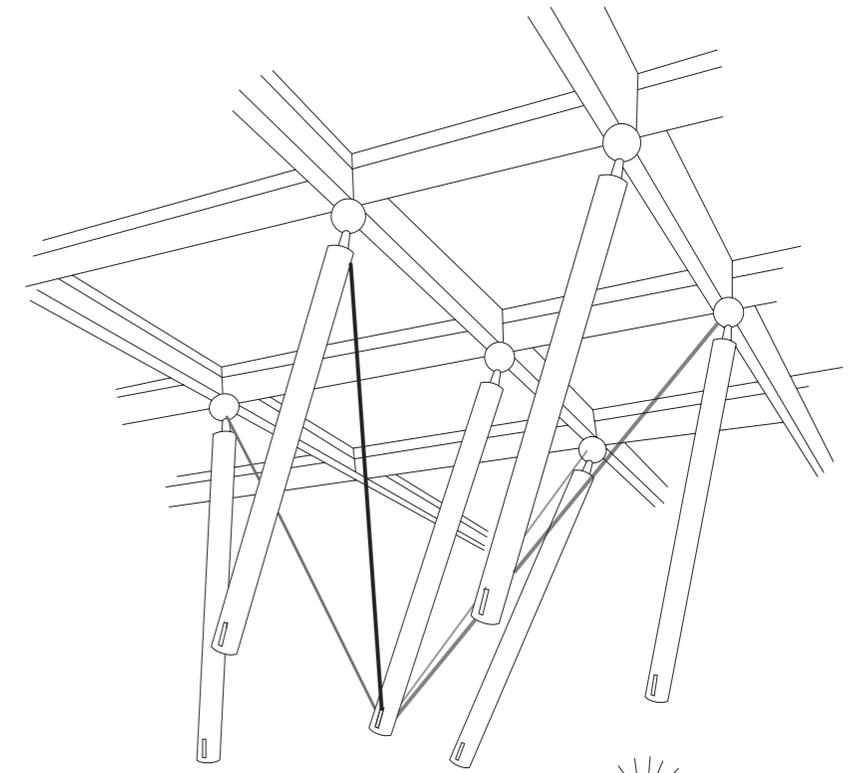
Analisi applicazione

Museo di Storia
Naturale di Reggio
Calabria

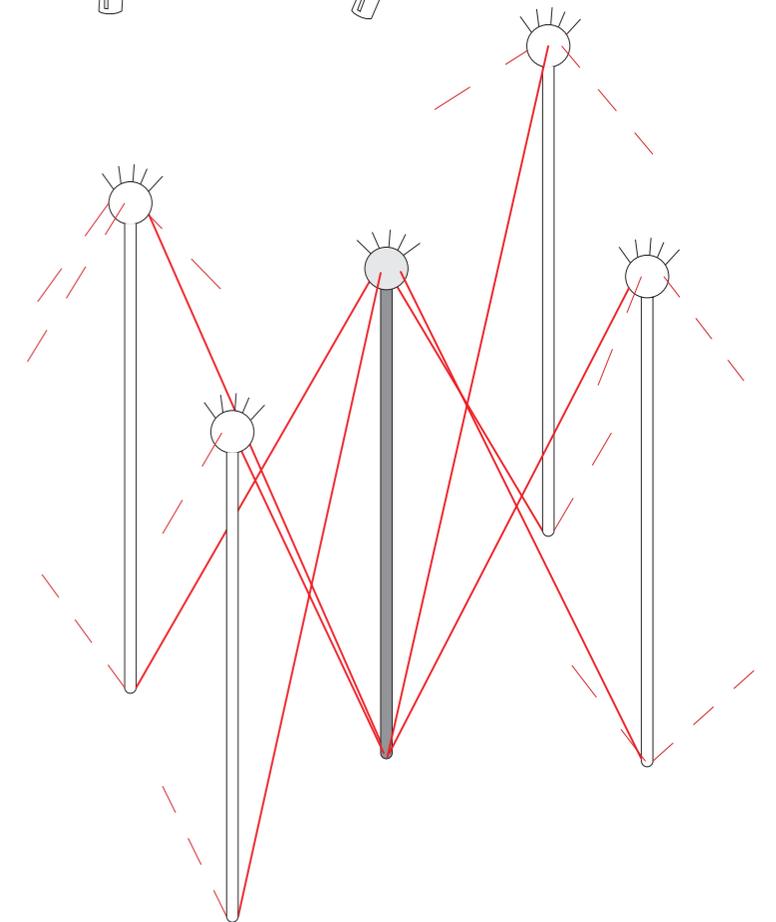
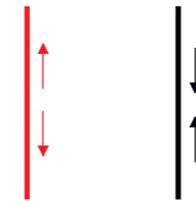


68

schematizzazione
struttura



azioni:
● elementi tesi
● elementi compressi



69

**MOOM padiglione temporaneo
Tokio
C+A Coelacanth and Associates
Designer Kazuhiro Kojima
anno 2011**

Il MOOM è un padiglione temporaneo sperimentale realizzato con solo due elementi funzionali che formano l'intera struttura. Uno è un singolo strato di tessuto che copre l'intero spazio e racchiude il padiglione dall'ambiente esterno, mentre permette alla luce del sole di passare. L'altro elemento funzionale è un sistema di bastoni rigidi che sostengono l'intero pezzo di tessuto sopra e modellano la forma del padiglione. Tutti i bastoni sono disposti nell'intera struttura totalmente separati l'uno dall'altro. In questo modo la struttura del padiglione, rivelandosi estremamente leggera e resistente, si differenzia da quelle a telaio più comunemente usate, dove gli elementi portanti sono sempre collegati tra loro per condividere il carico. La struttura del padiglione è formata dagli elementi rigidi indipendenti di compressione e gli elementi elastici di tensione continua. Le aste sono in alluminio e la membrana in polimero.





Entrambi tendono a bilanciare le forze di tensione e compressione deformandosi e riposizionandosi, dopo di che il sistema raggiunge uno stato di auto-equilibrio e la struttura complessiva si stabilizza. Il sistema tensegrale è visibile nelle linee di tensione principali che sono tese e sono quasi lineari nelle pieghe del tessuto tra gli elementi di compressione. La membrana, così, potrebbe essere considerata come un continuum delle forze di tensione, ovvero i cavi in tensione sono in pratica sostituiti dalla membrana elastica. Il progetto si basa su tre criteri fondamentali. In primo luogo, la ricerca della leggerezza, che permetterebbe di ottimizzare l'uso del materiale. In secondo luogo, la semplicità del metodo di sollevamento, per cui è stato possibile assemblare il sistema con solo tre elementi: il materiale plastico della membrana (dotato di 'tasche' per il fissaggio delle barre), le barre metalliche stesse e le funi d'acciaio per fissare la membrana al suolo. Infine, il sistema è facile e pulito da smontare, in modo che non lasci segni permanenti nell'ambiente circostante.

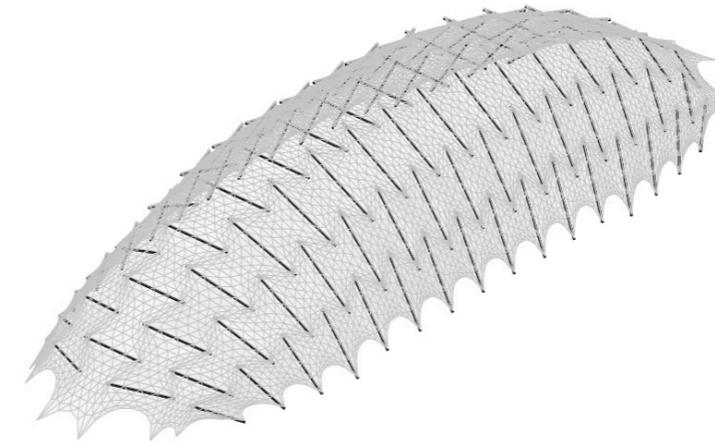
Analisi applicazione

MOOM padiglione temporaneo



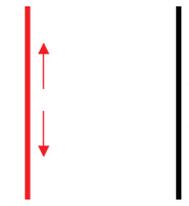
74

schematizzazione
struttura

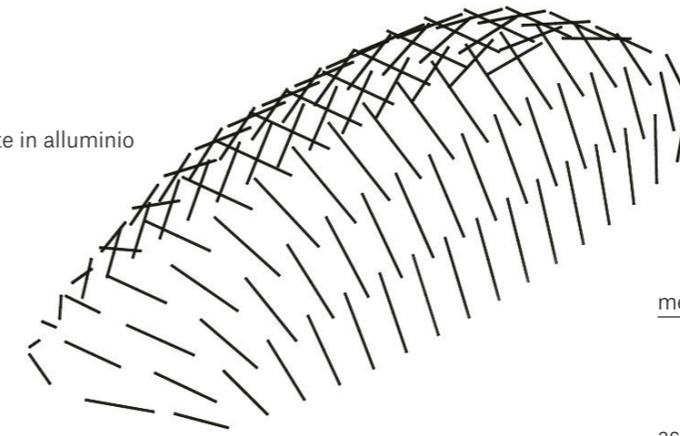


azioni:

- elementi tesi
- elementi compressi



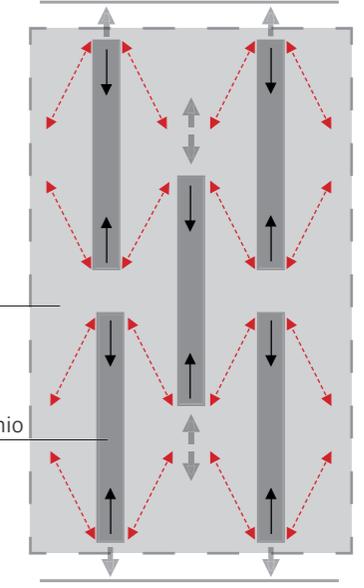
aste in alluminio



membrana

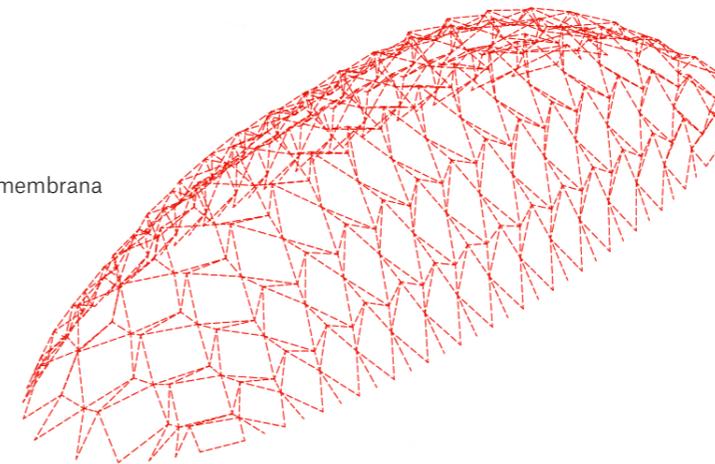
asta in alluminio

ancoraggio



ancoraggio

membrana



75

Tavolo 714
Designer Theodore Waddell
produzione Cassina
anno 1973

Il tavolo nasce dalle ricerche intraprese negli anni '50 da Theodore Waddell, architetto e industrial designer, sui sistemi tensegrali brevettati da Buckminster Fuller.

Partendo da alcune esperienze iniziate nel 1956 per la creazione di tavoli con strutture portanti estremamente leggere, concepite sul principio della tensegrità, Theodore Waddell arriva a metà degli anni sessanta a incrociare la ricerca di Buckminster Fuller e questo lo porta a studiare alcuni innovativi sistemi brevettati dal tecnologo americano.

Waddell, nel suo libro "Design without fashion" e nella pubblicazione "Made in Cassina" descrive come sia arrivato alla soluzione di questo particolare tavolino prodotto da Cassina: *"L'espressione coniata da Fuller - tensegrity - indica una struttura di pura tensione e compressione, priva di forze flettenti. Gli elementi di compressione (puntoni), ovvero le gambe del tavolo, sono separati da tiranti e non sono mai collegati tra loro. Nel 1972 questo tipo di struttura, mai usata nella progettazione di pezzi di arredamento, offriva la soluzione ideale per tenere in piedi qualcosa mediante cavi:*



Ingombro massimo: 135cm x 72 cm
mod. 714;
100 cm x 43 cm mod.713
Peso complessivo: 60 kg mod. 714
Materiali: acciaio cromato - vetro

78 questi tavoli hanno sei gambe, tre delle quali sostengono il piano di vetro ma non toccano il pavimento, mentre le altre tre, all'interno toccano terra senza sfiorare il top. Le gambe non si toccano tra loro. Un sistema "tensintegro" convenzionale presenterebbe tiranti di connessione tra le estremità dei puntoni, cioè delle gambe, a rafforzare la struttura. Ma ciò significherebbe tra cavi a livello del pavimento e tre proprio sotto il piano di vetro. Lavorando su questi problemi sono arrivato a mettere a punto una mia apposita soluzione per un adeguato sistema di equilibrio.

All'epoca non esistevano computer in grado di calcolare la lunghezza del cavo che avrebbe permesso la spaziatura ideale, quindi l'intero prototipo venne realizzato con morsetti che tenevano insieme le gambe e tenditori per modificare la lunghezza dei cavi. Dopo settimane di prove e verifiche che continuavano a produrre soluzioni con limiti alti e bassi, ma tensioni intermedie inadeguate, alla fine arrivai a trovare le giuste proporzioni."

L'obiettivo iniziale di questo progetto era quello di progettare un tavolo ispirato al Dining Table di Saarinen del 1956: un tavolo che desse l'impressione di un'impossibilità strutturale, ma che non necessitasse di essere imbullonato al pavimento.



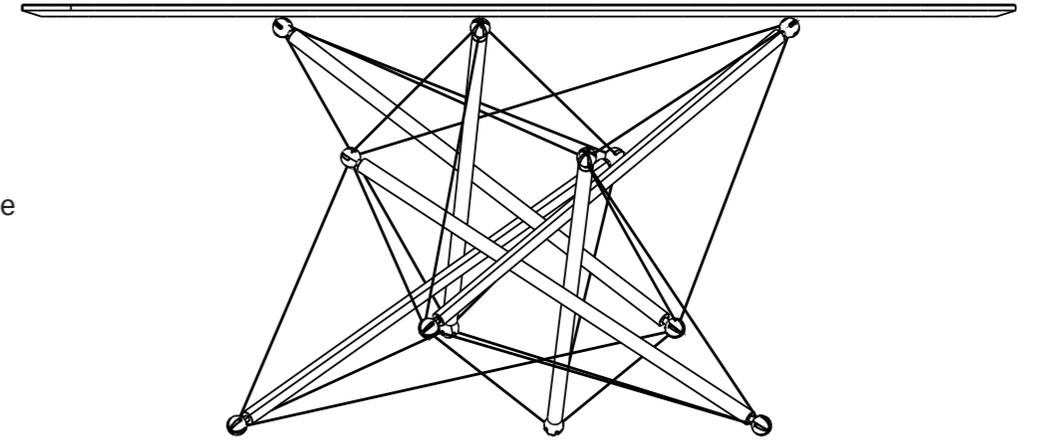
Analisi applicazione

Tavolo 714 Cassina



80

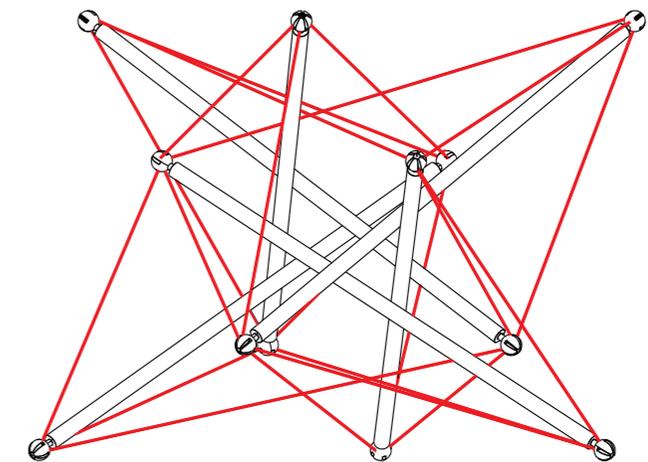
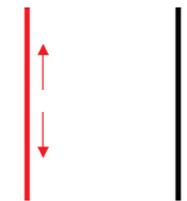
schematizzazione
struttura



81

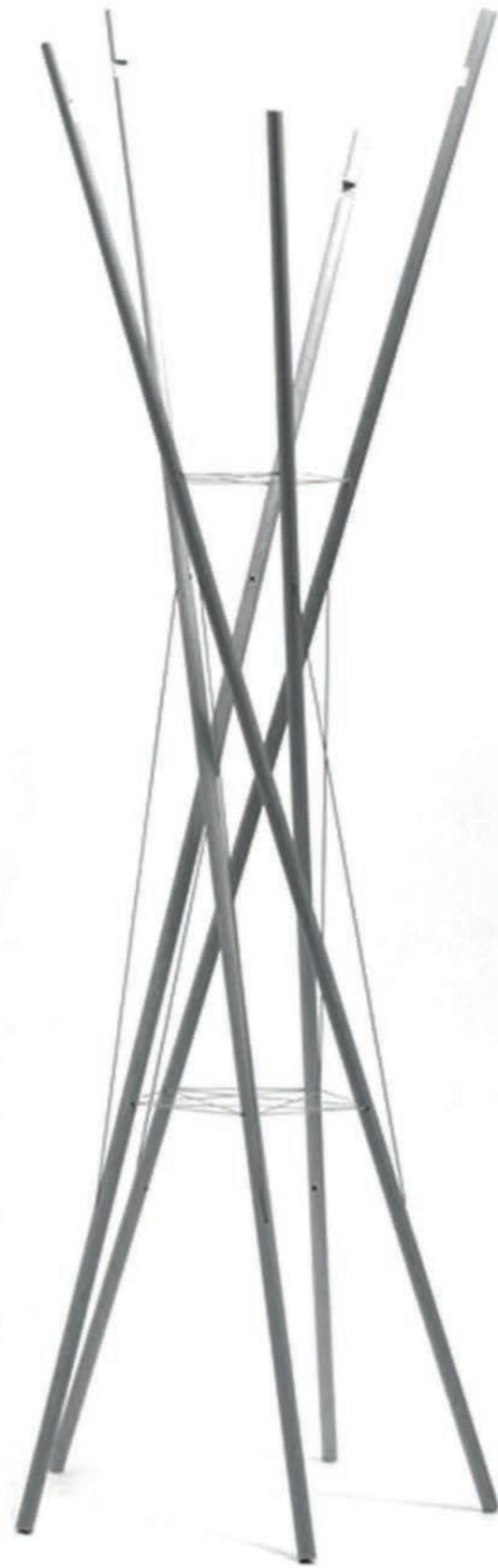
azioni:

- elementi tesi
- elementi compressi



Coat hanger tree
Designer Naruse Inokuma
Architects
anno 2009

Lo studio di Tokyo Naruse Inokuma Architects ha progettato un appendiabiti composto da cinque pali di legno tenuti insieme da uno spago. **Sfruttando il principio della tensegrità, l'intera forma si mantiene solo con l'equilibrio della tensione delle corde sebbene i cinque bastoncini non si tocchino l'un l'altro.**



Analisi applicazione

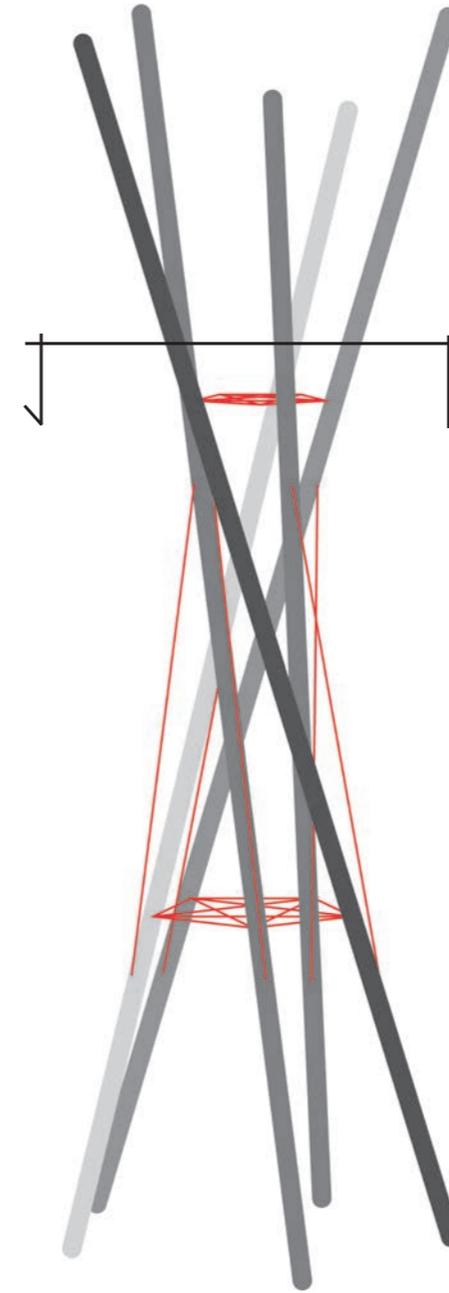
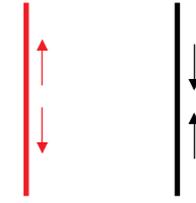
Naruse Inokuma
Coat hanger tree



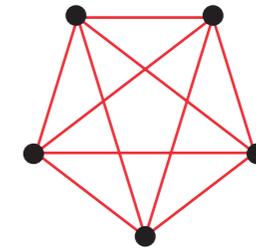
schematizzazione
struttura

azioni:

- elementi tesi
- elementi compressi



sezione



Strange Tensegrity Table 3
Designer DDAA
(Giappone)
anno 2017 - 2019

Questo progetto si basa su metodologie e sperimentazione di materiali e processi di creazione. **L'esigenza era quella di una produzione a basso costo con del materiale, nello specifico il filo, fornito dal cliente. Il designer ha pensato di utilizzare la struttura tensegrale con il filo ed elementi in compressione fatti di materiale economico in modo da realizzare comunque una produzione in serie.**

È stata sfruttata la struttura tensegrale perché ritenuta un sistema molto razionale in ragione del fatto che la proporzione complessiva viene determinata quasi automaticamente dalla lunghezza degli elementi di compressione.

Sfruttando tale sistema si possono sperimentare materiali inusuali le cui variabili morfologiche determinano la composizione complessiva.

Per la realizzazione di questi artefatti si è utilizzato un legname galleggiante denominato "shareboku" (che in giapponese significa legno battuto dalle intemperie) come elemento di compressione.

Shareboku è un termine utilizzato nell'arte dell'ikebana (composizione floreale giapponese) che si riferisce a rami duri e contorti privati della corteccia.



Analisi applicazione

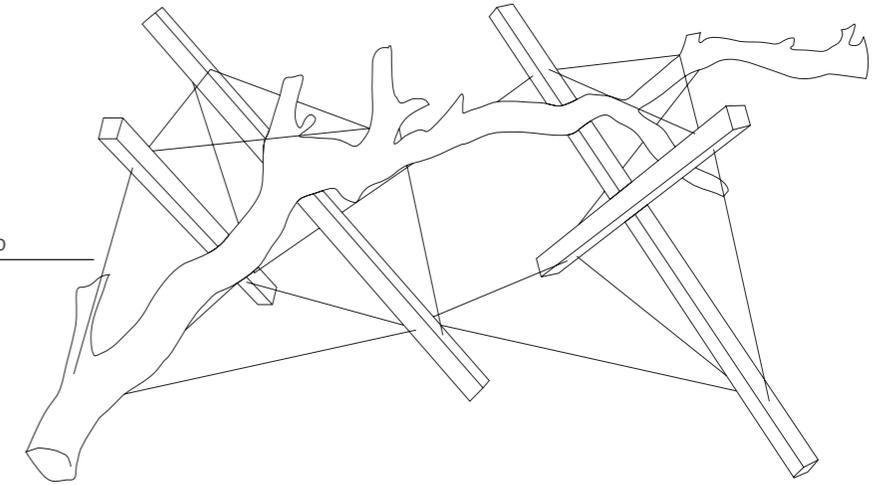
Strange Tensegrity Table

88



schematizzazione
struttura

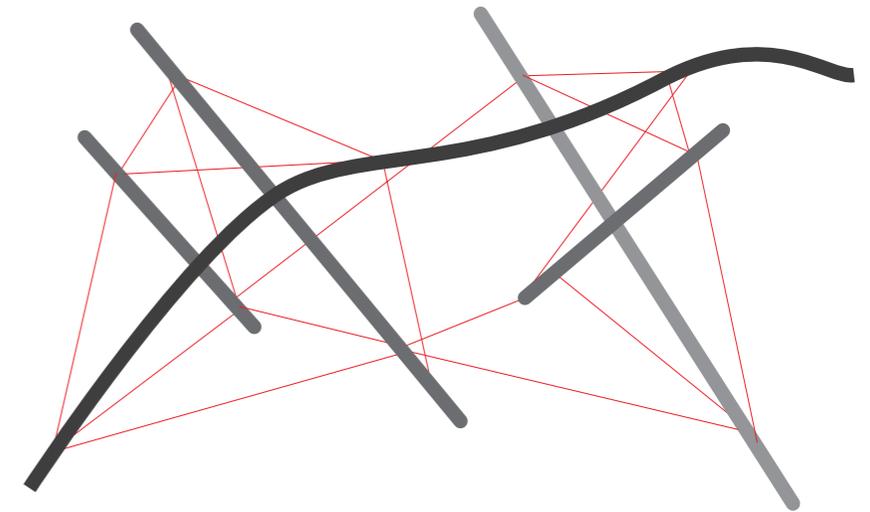
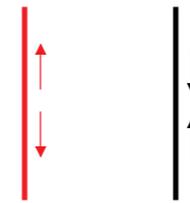
elementi in legno e metallo



89

azioni:

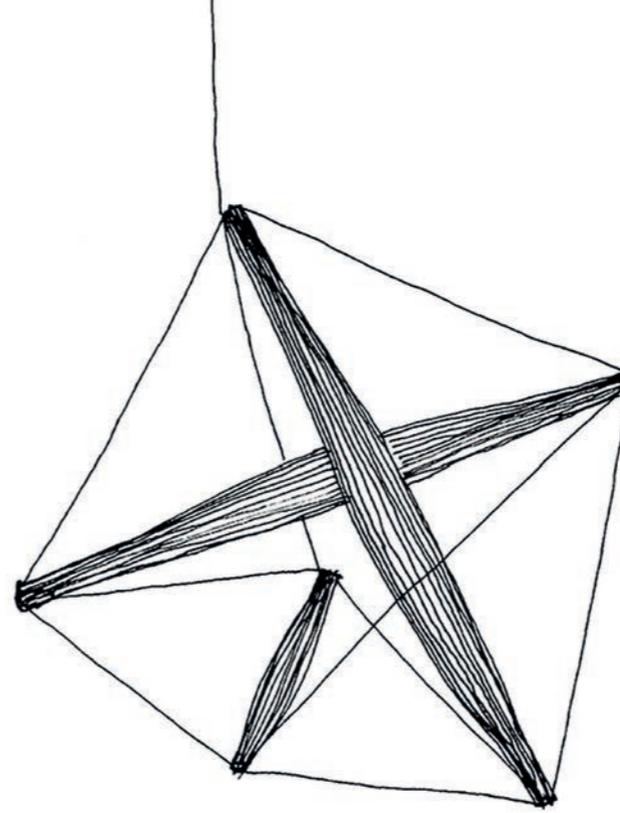
- elementi tesi
- elementi compressi



Bucki Lamp
Studio Lagranja Design - Spagna
produzione Pallucco
anno 2011

La lampada Bucky è una tensegrale disegnata dallo studio spagnolo Lagranja, composta da tre canne in vetro soffiato bianco latte.

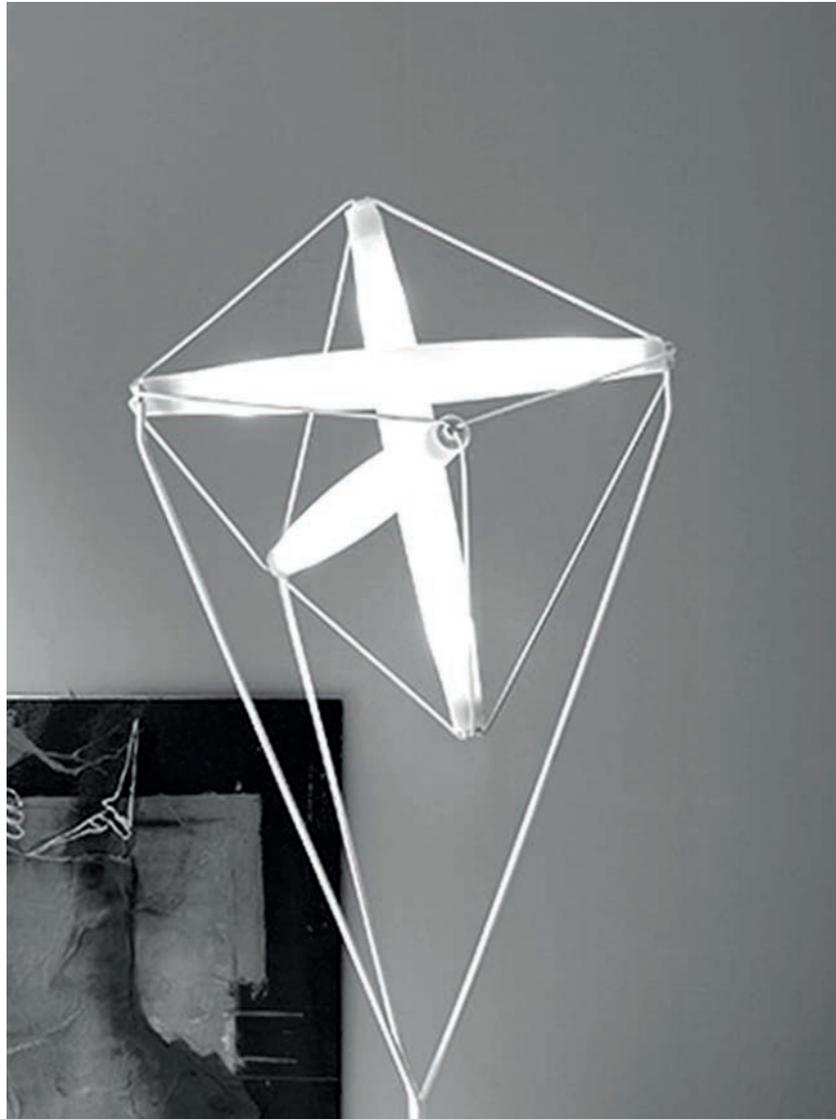
Le bacchette in vetro soffiato sono sostenute dal cavo in silicone, che trasporta anche i fili per la corrente elettrica, il quale viene teso per produrre una struttura rigida e minimale.



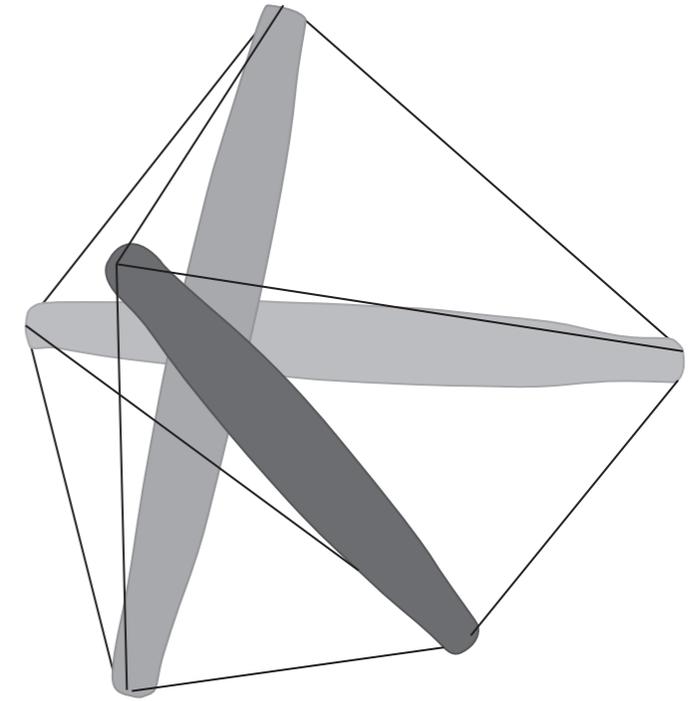
Analisi applicazione

Bucki Lamp

92

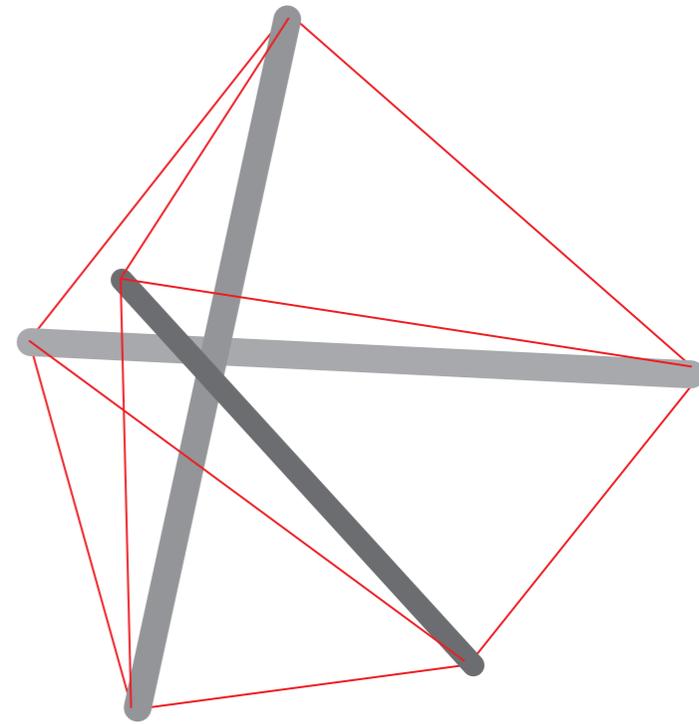
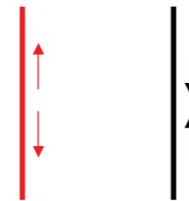


schematizzazione
struttura



93

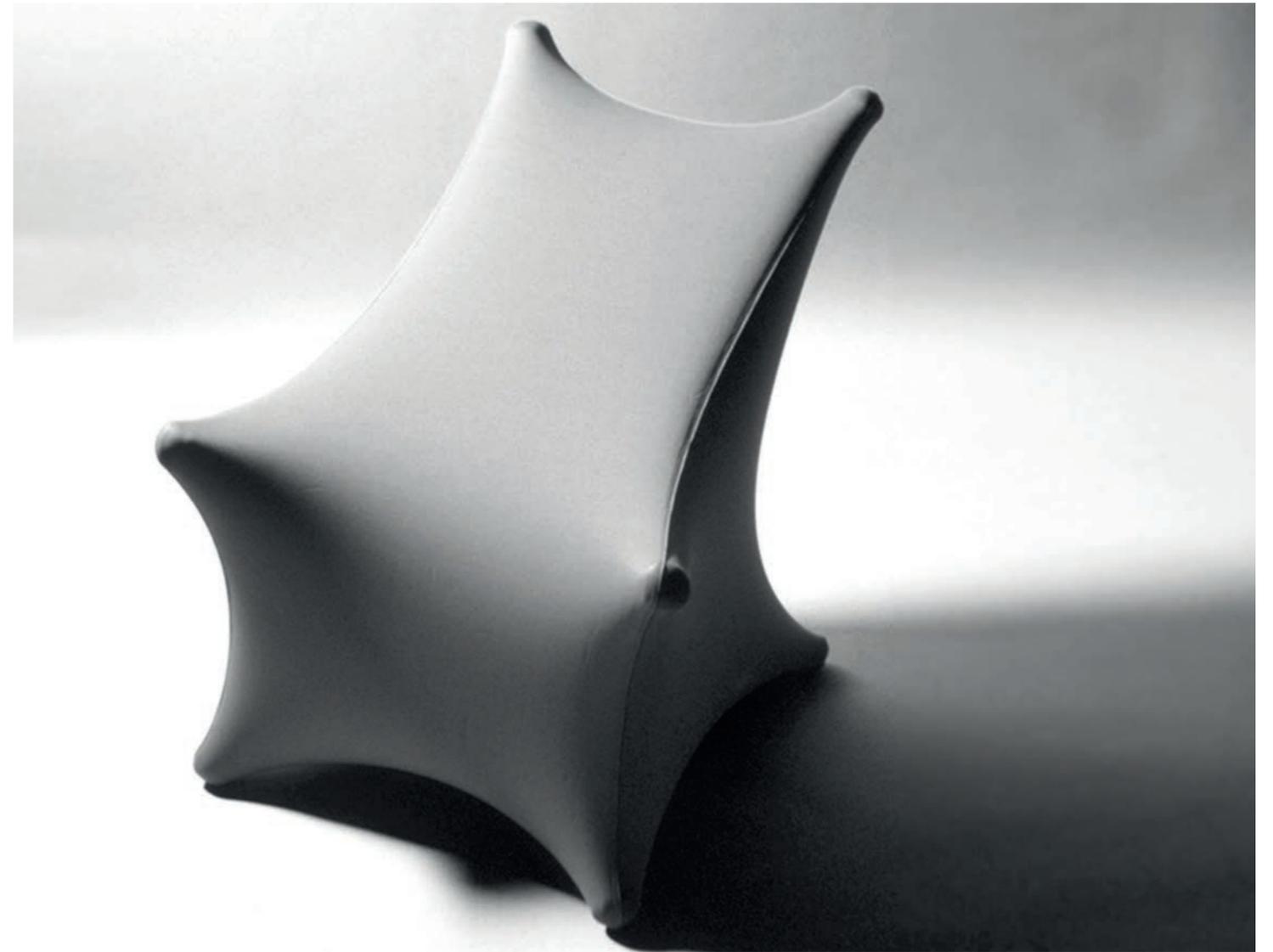
azioni:
● elementi tesi
● elementi compressi



Bag Chair
Design James Piatt
anno 1998

La seduta tensile ha il rivestimento realizzato con una membrana in neoprene elastico tale da rendere il sistema flessibile, conformabile e trasportabile.

Il rivestimento assicura la struttura interna, costituita da quattro barre in alluminio che a loro volta lasciano le impronte sul rivestimento stesso, creando un gioco di curve tra struttura e contenuto, ridefinendo la forma ogni volta che la seduta viene conformata con l'utilizzo.



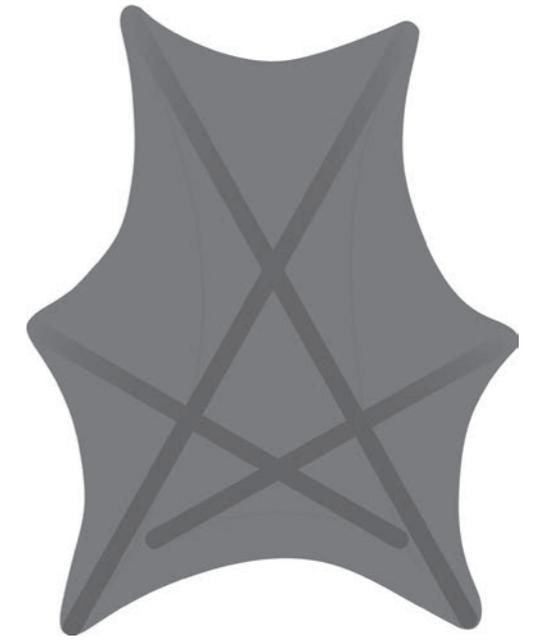
Analisi applicazione

Bag Chair

96

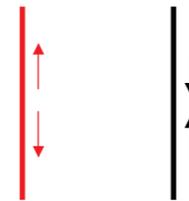


schematizzazione
struttura



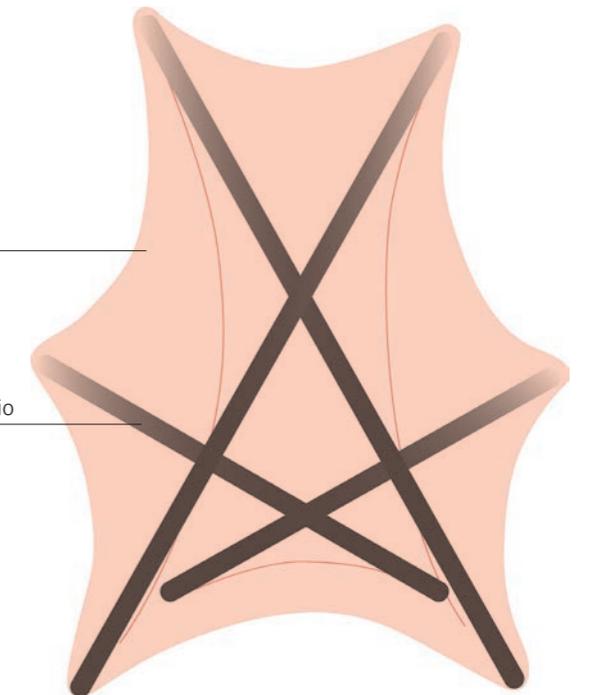
97

azioni:
● elementi tesi
● elementi compressi



membrana

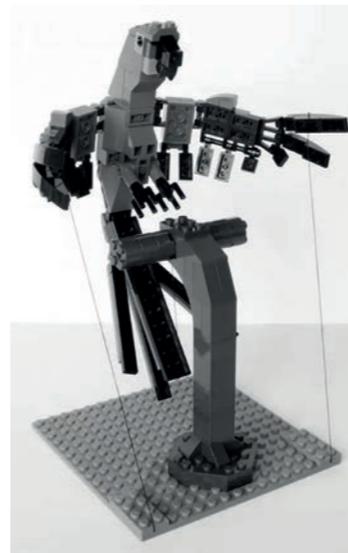
aste in alluminio



Sperimentare la Tensegrità: Il Contest Lego

La tensegrità può essere anche un gioco per la mente. LEGO ha lanciato nel 2020 un contest online fra i creativi di tutto il mondo per realizzare strutture con i mattoncini sfruttando il principio dei sistemi tensegrali. Questa è stata la call lanciata sul web: *“Tensegrity has taken the Lego world by storm over the past week and we would love to see what kind of fantastical “floating” creations you can make using the structural principle of tensegrity! to show us that your build actually works, you must build your creation using real lego bricks and include a short video showing your creation.”*

La versatilità dei mattoncini ha permesso ai creativi di tutte le età e ai LEGO addicted di sbizzarrirsi a livello mondiale nella creazione di forme estreme, molte delle quali sono pubblicate al link del contest (vedi QR code). **Questo approccio ludico ha avuto anche una valenza educativa, poiché ha contribuito ad ampliare la conoscenza di questa particolare soluzione strutturale, rendendo la sperimentazione in tale ambito accessibile sfruttando il gioco e la competizione.**



La tensegrità (tensional integrity o floating compression), è un principio strutturale basato sull'utilizzo di componenti isolati in compressione all'interno di una rete di tensione continua, in modo tale che gli elementi compressi (solitamente barre o puntoni) non si tocchino e gli elementi precompressi in tensione (di solito cavi o tiranti) delineino il sistema spazialmente.

I sistemi tensegrali sono quindi strutture reticolari spaziali formati da componenti compressi (aste) e tesi (cavi), che si trovano in uno stato di autoequilibrio in cui i componenti compressi si trovano all'interno della struttura e in cui i bordi esterni della stessa sono invece individuati dalla rete di elementi tesi.

La parola tensegrity, conosciuta nei primi anni '50 del 1900 da R. Buckminster Fuller, deriva dalla crasi di due parole inglesi "tensional" ed "integrity".



Immagine della Seconda Mostra di Primavera dell'OBMOKhU Bolshaia Dimitrovskaja, Mosca. Nel 1921 i Costruttivisti espressero le loro idee in un'ambiziosa mostra sotto il patrocinio della Società dei Giovani Artisti, la OBMOKhU. Quattro artisti, Alexander Rodchenko, i fratelli Georgii e Vladimir Stenberg, Konstantin Medunetskii e Karlis loganson esposero un totale di 25 costruzioni spaziali. Le nove strutture tridimensionali di loganson, definite "costruzioni autostabilizzanti", mostravano gli innovativi principi di sollecitazione di tipo tensegrale. Tutte tranne due di queste costruzioni (una di Rodchenko attualmente al MoMA e una di Medunetskii a Yale) sono scomparse, comprese le nove costruzioni di loganson.

Le origini dei sistemi tensegrali sono legate ai tre inventori: Kenneth D. Snelson, Richard Buckminster Fuller e David Georges Emmerich.

La prima struttura collocabile nella categoria del sistema proto-tensegrale trova riferimento nella ricerca condotta dai costruttivisti russi, descritta in un libro di Laszlo Moholy Nagy, "Von Materiel zu Architektur", pubblicato per la prima volta nel 1929 e successivamente nel 1968. Nagy includeva due fotografie della Seconda Mostra di Primavera tenutasi a Mosca nel 1921 che mostrano una struttura di equilibrio (Gleichgewichtskonstruktion) dello scultore Karl Jorganson.

Kārlis Johansons, alias Karl Jorganson

(1890-1929) era un artista d'avanguardia lettone. Durante gli anni della Rivoluzione Russa visse a Mosca dove fu parte attiva nel Movimento Costruttivista.

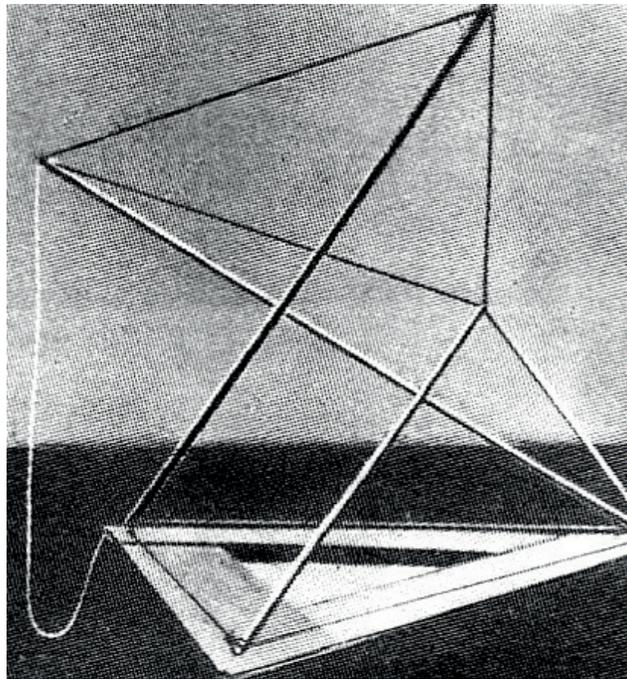
All'inizio del XX secolo realizzò strutture spaziali tridimensionali nell'intento di creare una nuova forma d'arte che materializzasse le dinamiche della vita sociale attraverso opere visionarie.

Le sue "costruzioni autostabilizzanti" sono considerate prototipi dei sistemi di costruzione tensegrali ulteriormente sviluppati da Richard Buckminster Fuller e Kenneth Snelson negli anni '50.



Kārlis Johansons

"Dalla pittura alla scultura, dalla scultura all'architettura, dall'architettura alla tecnologia e all'invenzione, questo è il percorso che ho scelto, e sicuramente diventerà il fine ultimo di ogni artista rivoluzionario".



Kārlis Johansons
Studio in equilibrio

Moholy Nagy ha illustrato questa struttura "Studio in equilibrio", spiegando "...che se si tirasse il filo, la composizione cambierebbe in un'altra posizione e configurazione, pur mantenendone l'equilibrio".

Emmerich, nella descrizione di quest'opera, scriveva:

"Questa curiosa struttura è composta da tre barre e sette cavi ed è gestita per mezzo di un ottavo cavo non sollecitato, il tutto deformabile".

Era una struttura composta da tre barre, sette corde e un ottavo cavo senza tensione che serviva a modificare la configurazione del sistema, ma mantenendone l'equilibrio.

Tuttavia, l'assenza di precompressione, che è una delle caratteristiche dei sistemi tensegrali, non permette di considerare la "scultura/struttura" di Johansons la prima di questo tipologia di strutture.



Tutto il lavoro di Johansons si riferiva ad un concetto fondamentale, ovvero come si verifica la stabilità strutturale della tensione quando gli oggetti sono legati tramite un semplice contatto senza fusioni, leganti o reazioni chimiche.

Johansons indagando con il suo lavoro le intersezioni tra i materiali, ha definito le connessioni "fredde", riferendosi alle rivettature, e "calde" riferendosi alle saldature, sostenendo che "Tutte le giunture fredde sono croci".

Egli definiva quale massima ambizione di ogni artista rivoluzionario quella di intraprendere: "un percorso dalla pittura alla scultura, dalla scultura alla costruzione, dalla costruzione alla tecnologia e invenzione".

I giovani costruttivisti erano interessati agli esperimenti, alla ricerca di forme inedite e innovative ed erano spinti dalla fiducia che l'arte sarebbe stata in grado di incarnare un nuovo mondo.

Kārlis Johansons
Construction from Spatial Cros
1920

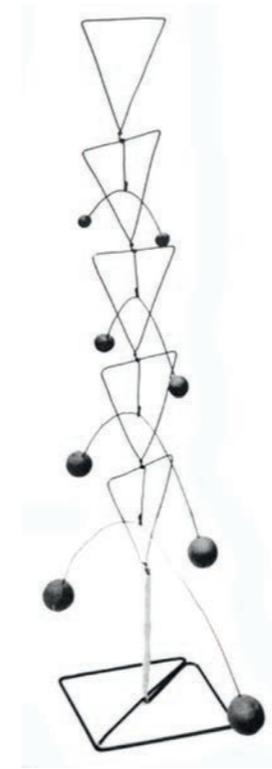
/ 02.2 Sistemi tensegrali

La tensegrità è un sistema in via di sviluppo e relativamente nuovo (poco meno di 60 anni) che crea figure sorprendenti, leggere e adattabili. Le origini dei sistemi tensegrali sono legate ai tre inventori: Kenneth D. Snelson (USA 1927-2016), Richard Buckminster Fuller (USA 1895-1983), e David Georges Emmerich (FR 1925-1996).

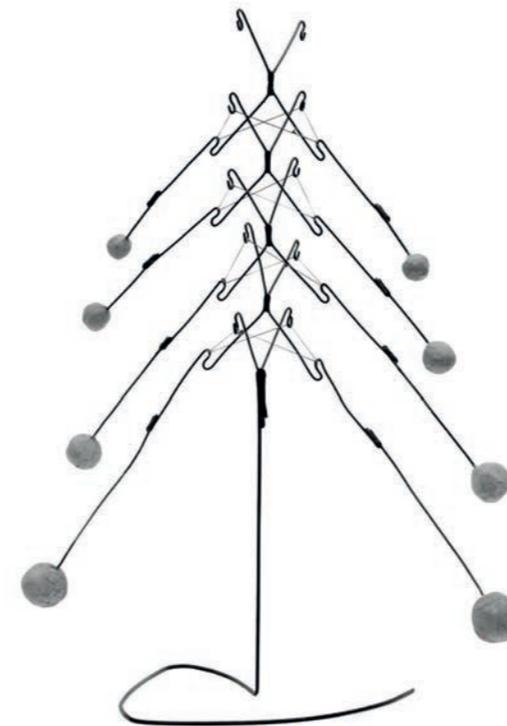
K.D. Snelson, allievo di Richard Buckminster Fuller, ha affrontato l'approccio artistico dei sistemi tensegrali come sculture nello spazio esplorando forme diverse, asimmetriche, lontane da qualsiasi configurazione classica. In contrasto con Snelson, Fuller ed Emmerich si sono concentrati maggiormente sull'aspetto fisico e matematico di questi sistemi cercando di trovare l'effettiva applicazione nell'architettura e nell'ingegneria.

Si sono occupati dello sviluppo di sistemi tensegrali sferici e unidimensionali, dando il via ad altri scienziati per indagare maggiormente sull'approccio strutturale di essi.

Il concetto base di "tensegrità", risale al 1948, quando Kenneth Snelson, allora studente di arte presso il Black Mountain College (North Carolina, USA) ispirato dalle lezioni sui sistemi geometrici di uno dei suoi nuovi docenti, Richard Buckminster Fuller (un carismatico e anticonformista architetto, ingegnere, matematico, cosmologo ed inventore), raggiunse la prima configurazione riconducibile al concetto di "floating compression".



K. Snelson - Moving Column, 1st Study, 1948



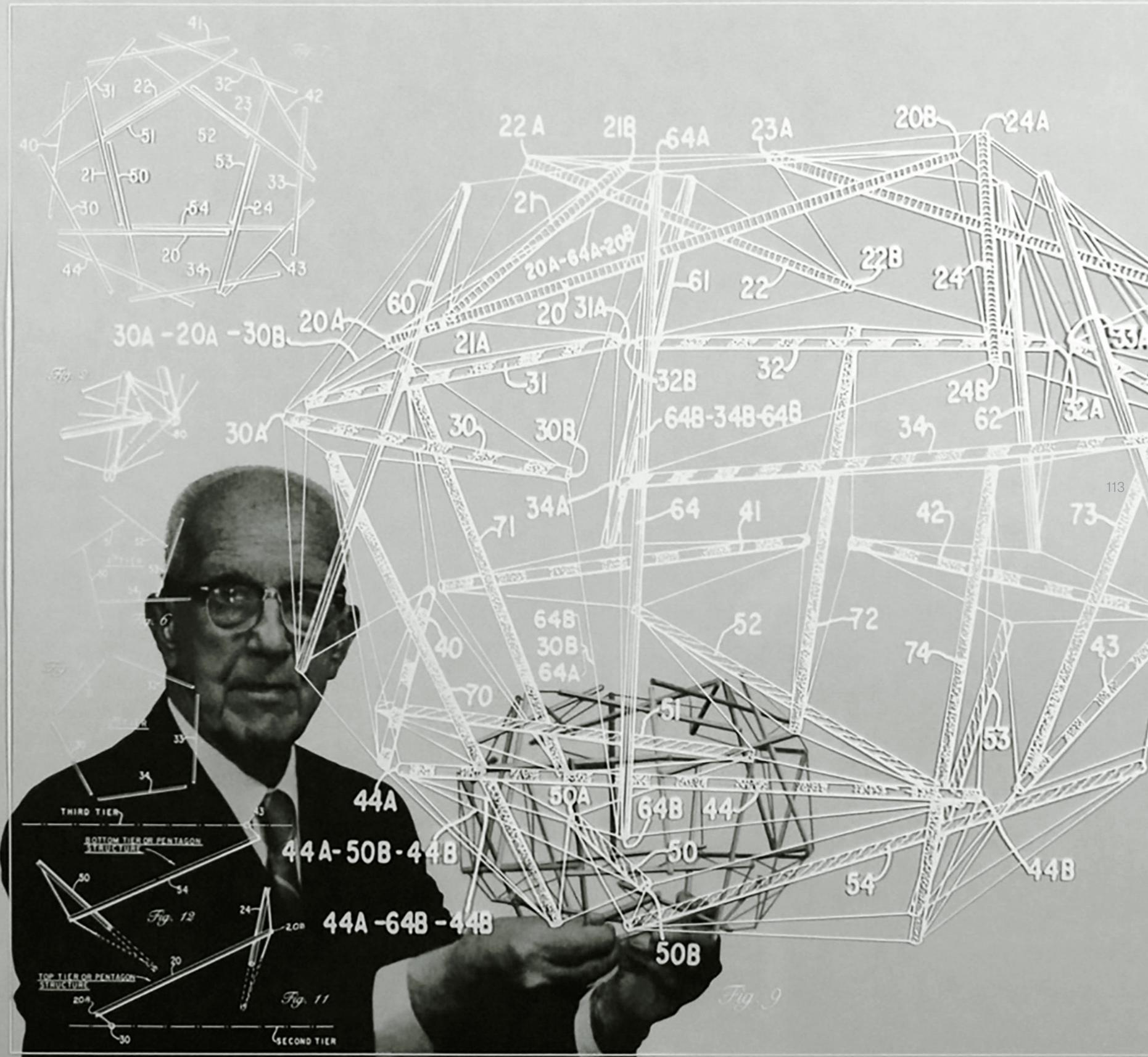
K. Snelson - Moving Column, 2nd Study, 1948

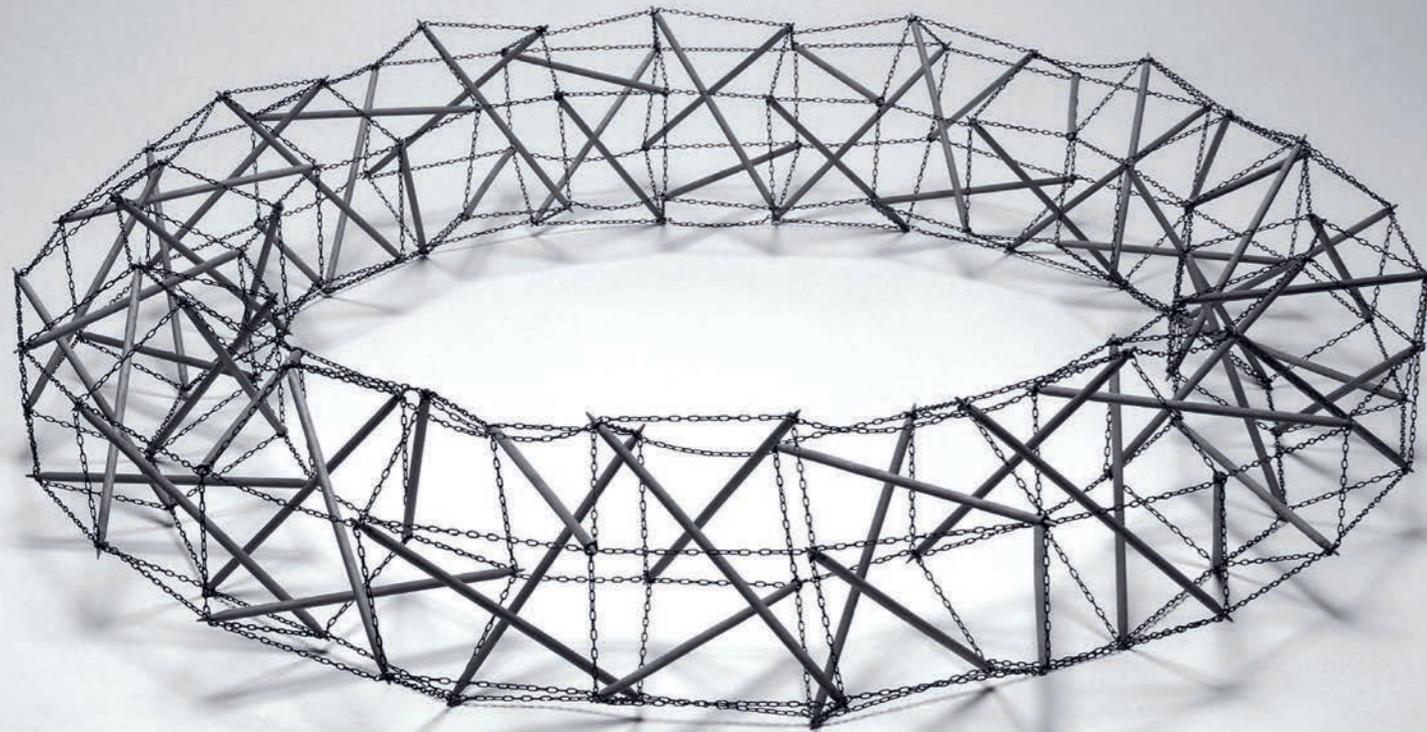


K. Snelson - Early X-Piece, 1948
legno e nylon
primo esempio documentato
del concetto di tensegrità

Fuller si rese subito conto dell'importanza dei lavori di Snelson e si affrettò a sviluppare queste idee, che a detta sua erano la prova di tutte una serie di teorie a cui stava lavorando da anni. Coniando inoltre un nome "adeguato" alla portata della scoperta (tensegrity appunto) riuscì per molto tempo a far pensare che l'intuizione fosse la sua. Parallelamente ma in maniera indipendente, in quegli stessi anni in Francia, David Georges Emmerich, ungherese di nascita ma francese di adozione, forse ispirato dalla struttura di Karl loganson, unico esempio noto di struttura "prototensegrale", cominciò a studiare diverse strutture tridimensionali tensionali che lui chiamava "strutture tese ed autotendenti", arrivando a soluzioni assolutamente simili a quelle sviluppate da Fuller e Snelson.

Fuller con una sfera tensegrale





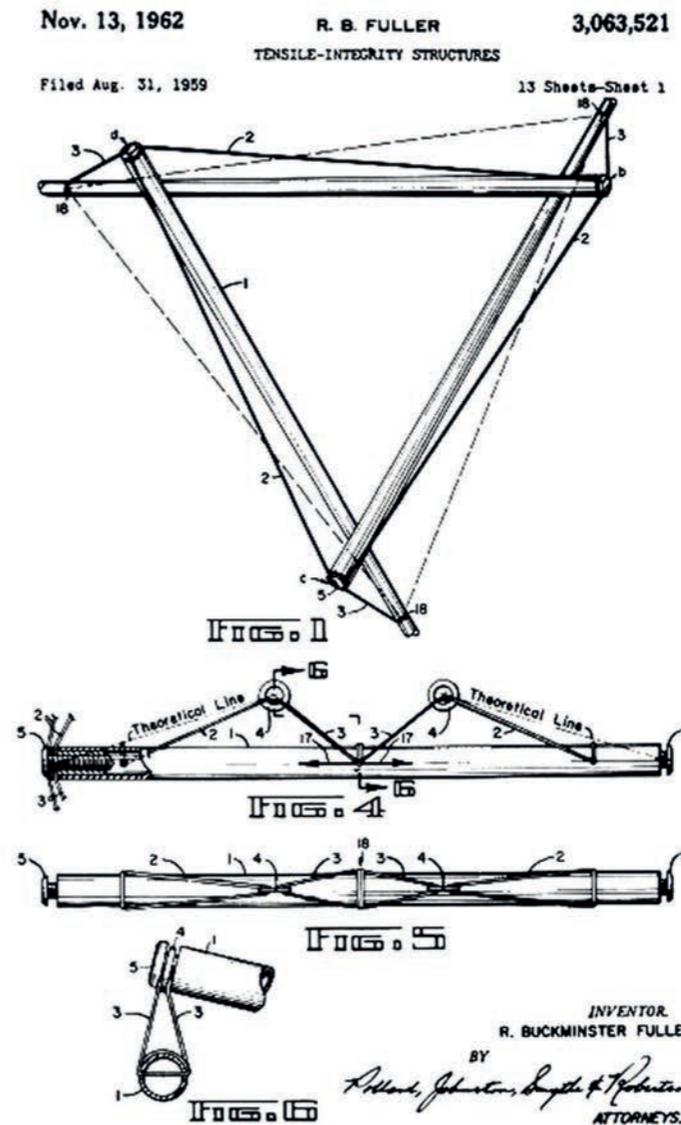
Anello tensegrale di Emmerich

Lo sviluppo di tali strutture seguì strade differenti. Snelson cominciò a studiarne i concetti fondamentali che ne erano alla base, ma data la sua formazione di artista si focalizzò sull'aspetto artistico ed estetico producendo sculture di incredibile bellezza e complessità, con una tecnica di montaggio ed assemblaggio di grande pulizia, affinata nei decenni. Fuller ed Emmerich, invece, cercarono fin dall'inizio applicazioni in ambito costruttivo ed architettonico e tentarono anche di impostare il problema in termini geometrico/matematici, anche se i loro studi rimasero principalmente fondati su prove empiriche e sulla realizzazione di modelli di studio.

Dalle attività di ricerca svolte durante gli anni 60' nel campo delle tensegrali nacquero domande di brevetto, rilasciate parallelamente dai tre inventori. Tali documenti sono considerati come testimonianze inoppugnabili in merito alla paternità dell'invenzione e un riferimento per la precisazione delle definizioni. In ordine cronologico furono registrati diversi brevetti.

Tensegrity Patent 11/13/62

Tensegrity is the physical phenomenon that produces a stable geometric structure with solid members that are arranged in tandem with tense metal cables. The solid members of this system do not touch or support each other directly.



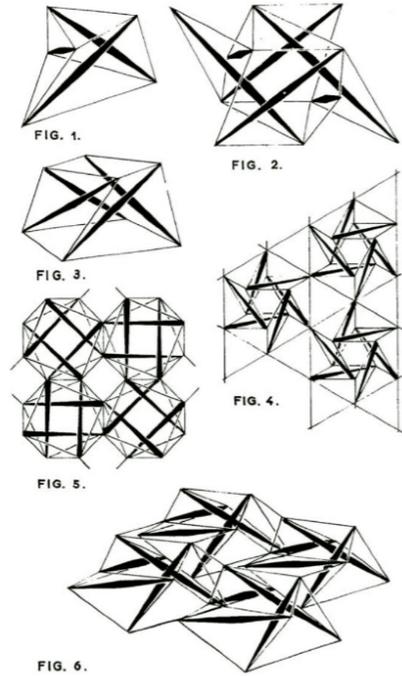
Emmerich
 "Construction de réseaux autotendants"
 28 Settembre 1964

REPUBLIQUE FRANÇAISE
 MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE
 SERVICE
 4. LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

BREVET D'INVENTION
 P.V. n° 931.099 N° 1.377.290
 Classification internationale : E 04 4

Construction de réseaux autotendants.
 M. DAVID CROISSANT EMMERICH résidant en France (Seine).
 Demandé le 10 avril 1963, à 15^h 50', à Paris.
 Déposé par arrêté du 23 septembre 1964.
 (Bulletin officiel de la Propriété industrielle, n° 42 de 1964.)
 (Brevet d'invention dont la durée est prorogée en vertu de l'article 11, § 7, de la loi du 5 juillet 1944 modifiée par la loi du 7 avril 1962.)

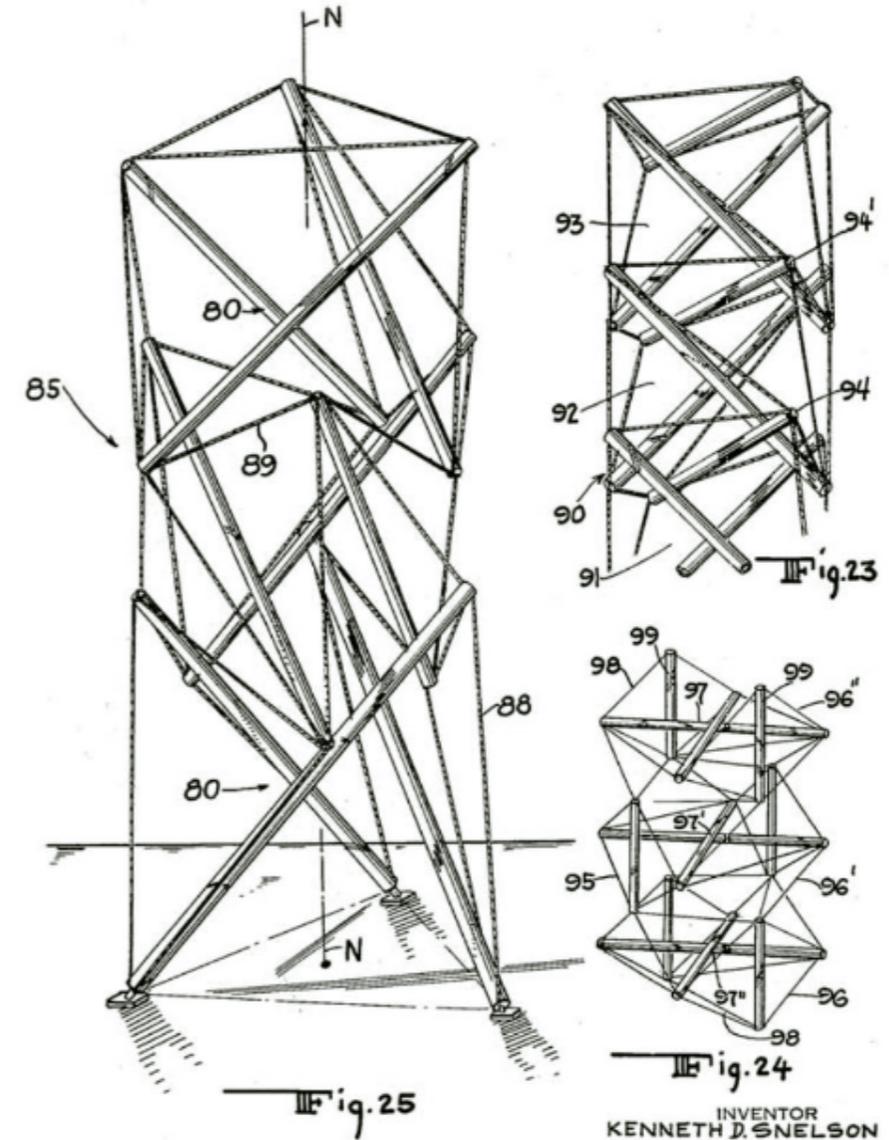
N° 1.377.290 M. Emmerich Pl. unique



122

Snelson
 "Continuous tension, discontinuous compression structures"
 16 Febbraio 1965

Feb. 16, 1965 K. D. SNELSON 3,169,611
 CONTINUOUS TENSION, DISCONTINUOUS COMPRESSION STRUCTURES
 Filed March 14, 1960 9 Sheets-Sheet 9



INVENTOR
 KENNETH D. SNELSON
 BY
 Louis Charles, Milton B. Brown, Taylor
 ATTORNEYS

123

Le definizioni date nei rispettivi brevetti sono sostanzialmente equivalenti: i sistemi tensegrali sono sistemi reticolari spaziali che conservano la propria forma e sostengono carichi in virtù di uno stato di autosollecitazione; gli elementi sono rettilinei e tutti di dimensioni confrontabili; quelli compressi costituiscono un insieme discontinuo, quelli tesi un insieme continuo; in ogni nodo confluiscono un puntone e almeno tre cavi; i cavi non hanno alcuna rigidità in compressione.

Richard Buckminster Fuller nel suo brevetto descrive questo tipo di strutture come:

- “Una pluralità di colonne discontinue a compressione disposte in gruppi di tre colonne congiunte non collegate da elementi in tensione che formano triangoli di tensione”.

Kenneth Snelson nel suo brevetto definisce:

- “La presente invenzione riguarda il quadro strutturale e più in particolare, una nuova e migliorata struttura di elementi allungati che sono collocati separatamente in

tensione o in compressione per formare un reticolo, i membri in compressione sono separati l'uno dall'altro e gli elementi di trazione sono interconnessi per formare una rete continua in tensione. La tensegrale è un sistema strutturale chiuso costituito da un insieme di tre o più puntoni allungati sottoposti a compressione, all'interno di una rete di cavi sottoposti a tensione. Le parti così messe insieme, sono di reciproco supporto in modo tale che i montanti non si tocchino tra di loro, ma premano verso l'esterno contro i punti nodali della rete in tensione allo scopo di formare un insieme rigido triangolato, precompresso, sottoposto sia a tensione che a compressione”.

David George Emmerich ha invece dichiarato nel suo brevetto che la sua invenzione potrebbe essere ulteriormente descritta in modo non limitativo con riferimento ai diversi esempi mostrati, accompagnati da disegni. In questo modo, ha evitato di dare una descrizione rigorosa.

03/ Proprietà e caratteristiche

- / 03.1 Definizioni scientifiche
- / 03.2 Classificazioni e tipologie
- / 03.3 Concetto strutturale

Le definizioni del concetto tensegrale sono state dissimili negli anni, a partire dalle modalità in cui i primi ideatori di tali sistemi, ovvero Richard Buckminster Fuller, Kenneth Snelson e David Georges Emmerich si riferivano alle loro invenzioni:

- **“tensional integrity”**
(Fuller)
- **“floating compression”**
(Snelson)
- **“systemes autotendant”**
(Emmerich)

Il sistema tensegrale è stato negli anni oggetto di analisi da parte di molti studiosi i quali hanno contribuito all'elaborazione di ulteriori definizioni scientifiche:

Anthony Pugh ha dato la seguente definizione estesa di tensegrale, accettata quasi universalmente dal resto degli specialisti, prima nel suo genere:
“un sistema tensegrale viene stabilito quando un insieme discontinuo di componenti a compressione interagisce con una serie di componenti in trazione continua a definire un volume stabile nello spazio”.

Daniel Schodeck agli inizi degli anni '90 si rese conto che la essenziale definizione basata sul concetto di ripetitività dei componenti sarebbe potuta essere sicuramente migliore rispetto alle nozioni vaghe e molteplici formulate in quel momento. Pertanto etichettò le tensegrali come un insieme di strutture rigide fatte di aste discontinue in compressione e cavi in tensione continua con una livello di ripetitività dei componenti.

Bin - Bing Wang, nel 1998 è andato oltre la definizione precedente, individuando altre caratteristiche importanti: le strutture tensegrali sono autoportanti e irrigidite da un'auto - sollecitazione (cosa che era già stata avanzata da Emmerich).

K. Snelson
Mozart
1982



Mingsheng Wang e Dange Liu tra il 1998 e il 2003) hanno dato la più ampia definizione ovvero:

“I sistemi tensegrali sono una rete di cavi liberamente configurati, collegati da giunti nei quale un sistema connesso di cavi è sollecitato contro un sistema disconnesso di aste e in modo estensivo, ogni insieme di cavi liberamente configurati è composto da un’ unità costruttive che soddisfano la definizione prima citata”

Koryo Miura e Sergio Pellegrino hanno dato un’interpretazione essenziale:

“Una struttura tensegrale è una struttura realizzata da cavi e puntoni, ai quali viene imposto uno stato di precompressione che genera la tensione di tutti i cavi”.

Infine ci sono ulteriori e più complesse definizioni a seconda degli sviluppi studiati dagli autori.

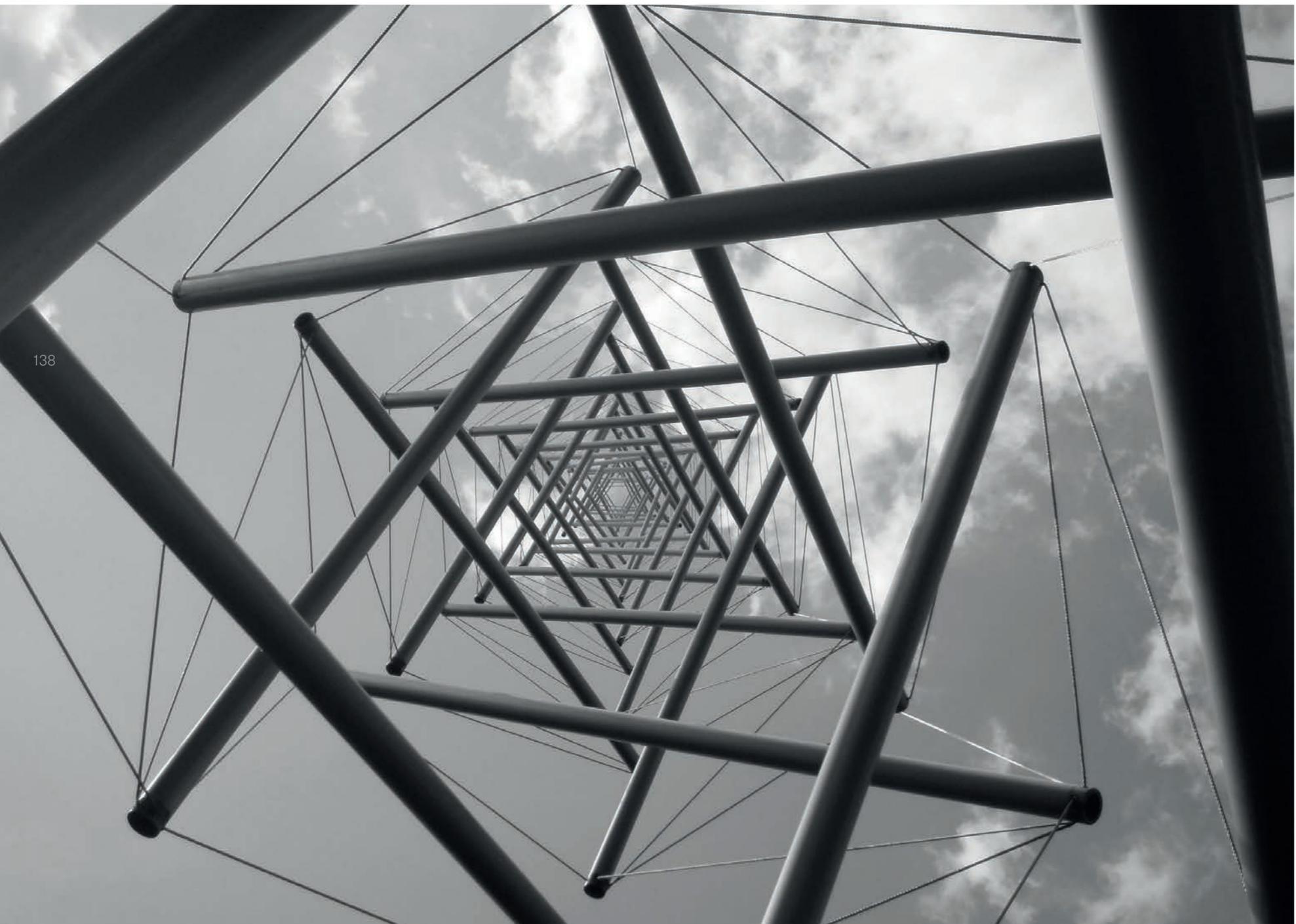
Narongsak Kanchanasaratool e Darrell Williamson, agli inizi degli anni 2000 affermano che:

“Un sistema tensegrale è una connessione stabile di componenti assialmente - caricati, essendo una struttura tensegrale classe k se al massimo “ k ” componenti a compressione sono collegati a qualsiasi nodo”.

Ad esempio, una struttura tensegrale tradizionale è una struttura di classe 1 perché solo un membro di compressione arriva ad un nodo.

René Motro nel 2003 ha cercato di distinguere due concetti differenti facendo una distinzione tra la definizione “estesa e quella “di brevetto”. Quest’ultima fa riferimento ai brevetti presentati dagli inventori ed è una sintesi comune delle descrizioni della struttura.

La definizione estesa ha alcuni punti comuni con la definizione di Pugh, ma con qualche



Needle Tower II
Kenneth Snelson
1969

aggiunta: gli elementi compressi sono inclusi all'interno di un insieme continuo in tensione e il sistema ha stabilità autonoma in equilibrio.

La definizione estesa e globalmente riconosciuta esplicita che:

“Il sistema tensegrale è un sistema in uno stato di auto - equilibrio stabile comprendente un insieme di componenti discontinui compressi all'interno di un continuum di componenti in tensione”.

La seconda definizione, basata sul brevetto ufficialmente riconosciuto, è la seguente:

“I sistemi tensegrali sono sistemi reticolari spaziali in uno stato di sollecitazione in sé. Tutti i loro elementi hanno un elemento centrale rettilineo e sono di dimensioni equivalenti. Elementi tesi costituiscono un insieme continuo. Elementi compressi costituiscono una serie discontinua. Ogni nodo riceve uno ed un solo elemento compresso”.



/ 03.2 Classificazioni e tipologie

Secondo la definizione di Narongsak Kanchanasaratool e Darrell Williamson:

“Un sistema tensegrale è una connessione stabile di componenti assialmente caricati, essendo una struttura tensegrale di classe k se al massimo “ k ” componenti a compressione sono collegati a qualsiasi nodo”.

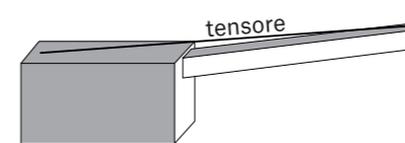
Connessione stabile può significare che la struttura, prima ancora di essere soggetta a qualsiasi carico esterno compreso il peso proprio, deve essere in uno stato di pre-sollecitazione per essere stabile e mantenere la sua forma.

La stabilità è definita come la capacità di un sistema di tornare nella posizione iniziale dopo una perturbazione.

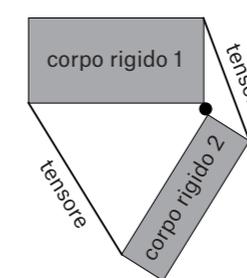
Un insieme di corpi rigidi (punti) forma una “configurazione tensegrale” nel caso in cui trovi un reticolo di tiranti tesi in grado di stabilizzare tale sistema.

In funzione del numero di punti impiegati nel sistema tensegrale si configurano diverse classi di tensegrali ognuna delle quali è caratterizzata da una rigidità meccanica maggiore della precedente classe.

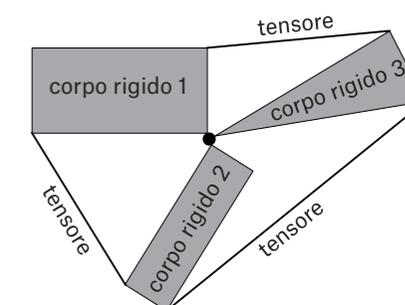
Una configurazione tensegrale in cui le barre non siano in contatto tra di loro è detta di classe 1, mentre una configurazione nella quale k barre convergano in uno stesso nodo si dice di classe k .



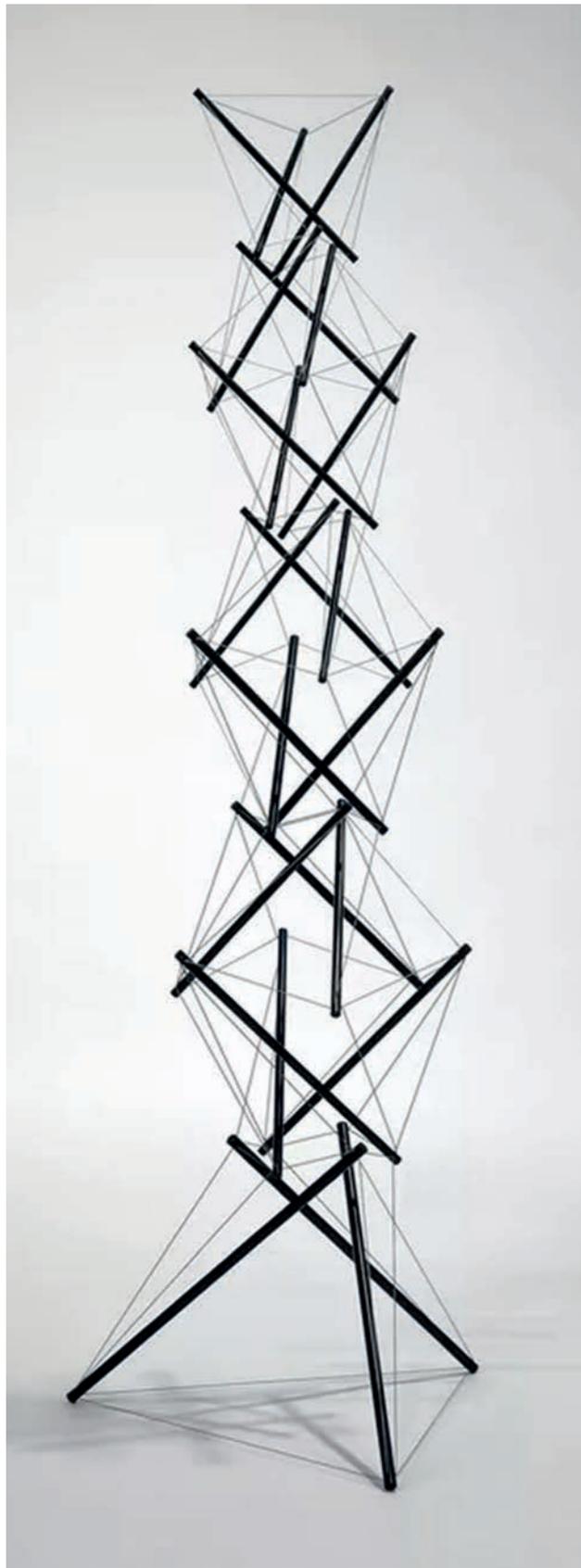
struttura tensegrale di classe 1



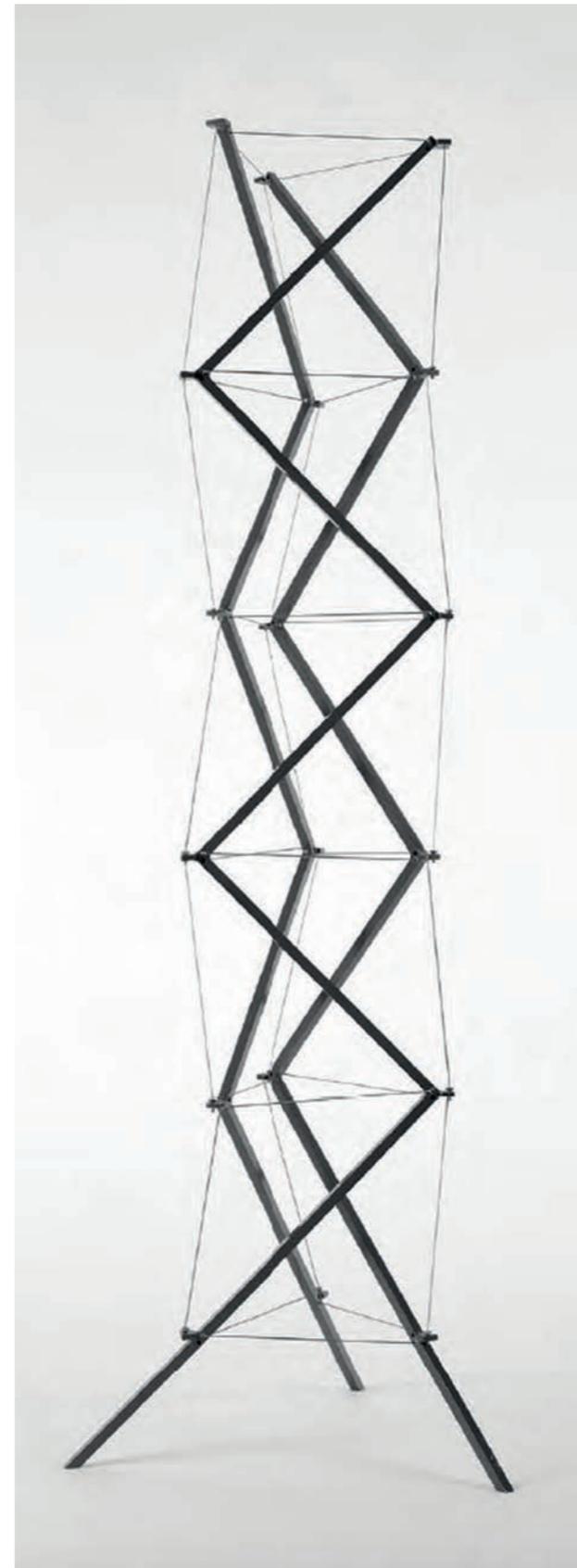
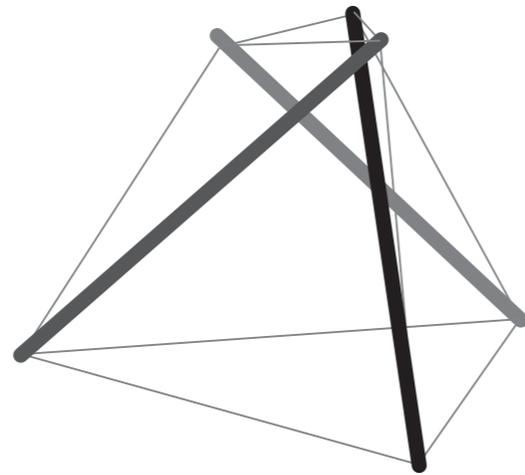
struttura tensegrale di classe 2



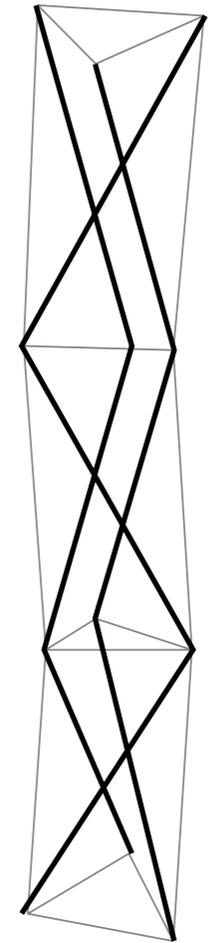
struttura tensegrale di classe 3



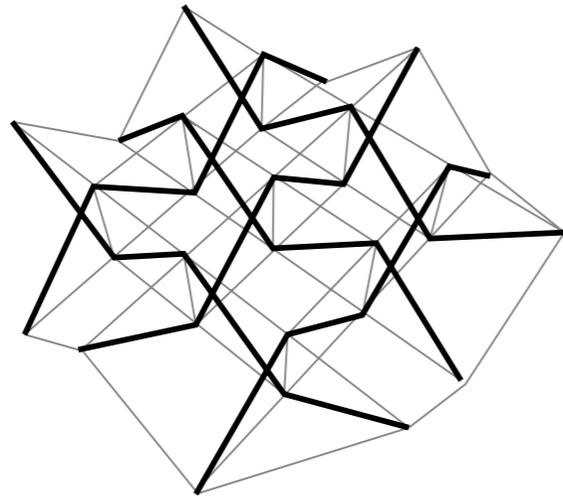
struttura tensegrale di classe 1



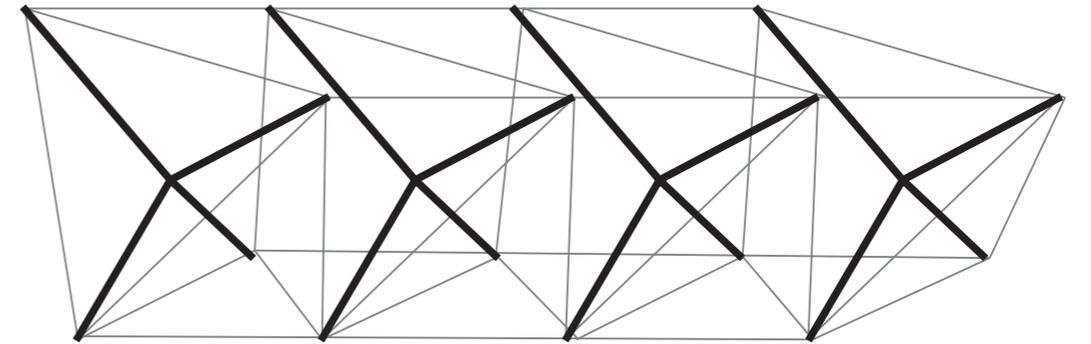
struttura tensegrale di classe 2



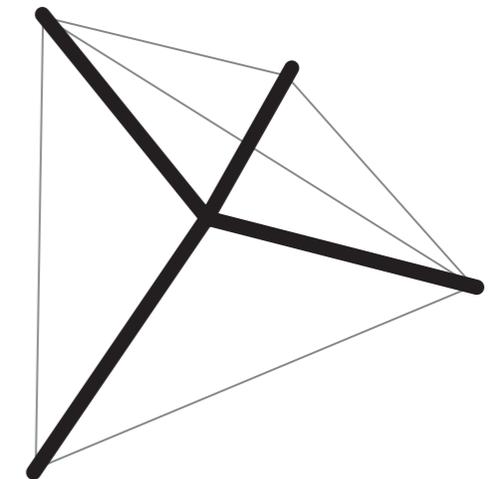
struttura tensegrale di classe 2



Lo stesso Fuller realizzò fra i suoi primi modelli di grandi dimensioni una torre classe 4, formata appunto da componenti formati da 4 aste rigide saldate fra di loro ad una estremità. La classe di una struttura tensegrale quindi coincide con il numero massimo di barre che concorrono nei suoi nodi.



struttura tensegrale di classe 3



Prendendo a riferimento la definizione estesa di Renè Motro:

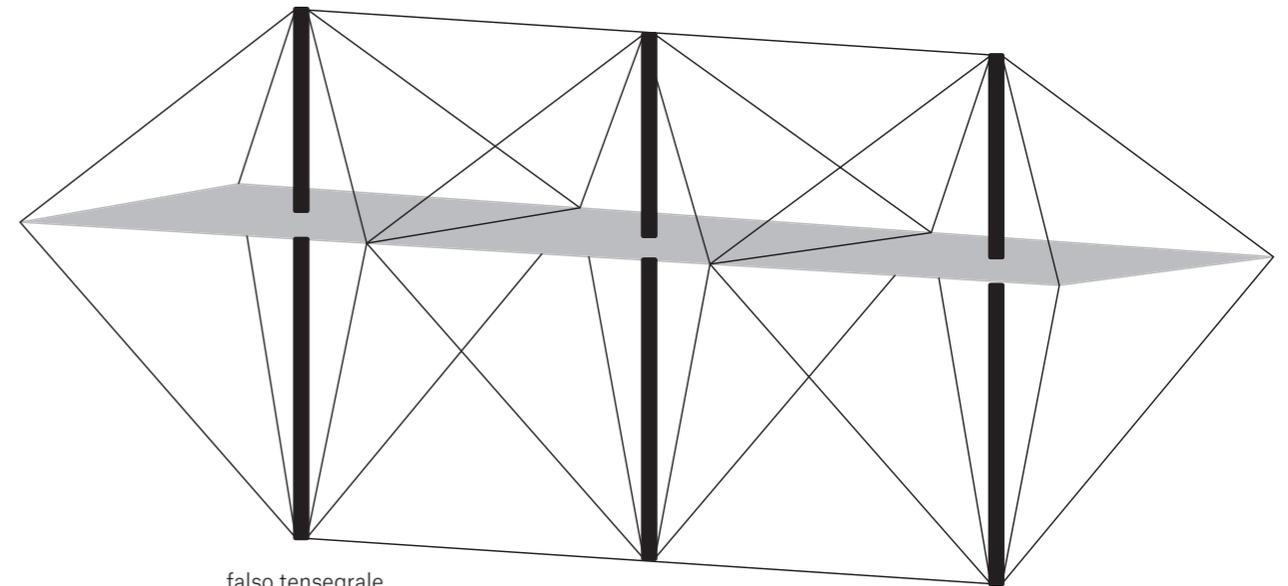
“Il sistema tensegrale è un sistema in uno stato di auto - equilibrio stabile comprendente un insieme di componenti discontinui compressi all’interno di un continuum di componenti in tensione”.

Il termine **“all’interno”** usato nella definizione sta a indicare che **i componenti compressi devono trovarsi sempre all’interno del continuum tensionale**, ovvero che individuata la forma esterna del sistema, i suoi bordi, questi devono essere percorsi esclusivamente da elementi tesi.

I componenti compressi possono avere le estremità sui bordi ma ogni altro punto appartenente ad essi deve rimanere all’interno dei limiti esterni della struttura.

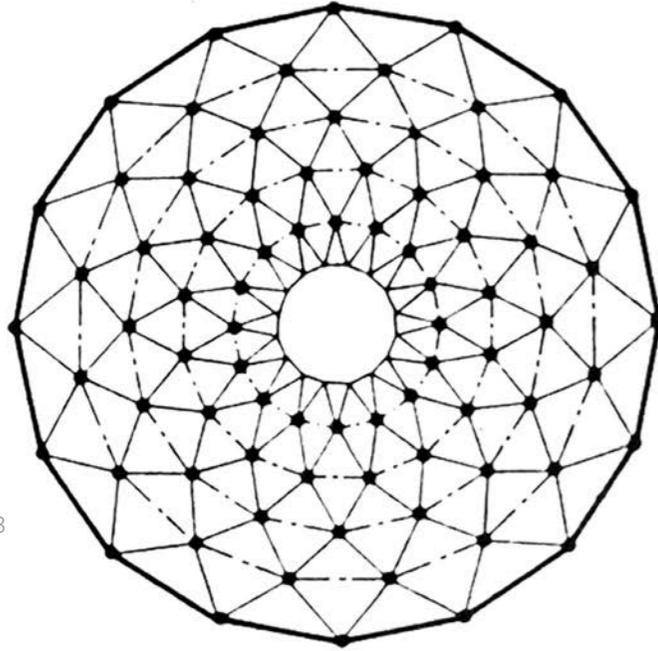
Questo concetto è fra i fondamentali per distinguere i veri sistemi tensegrali dai falsi.

Si hanno le false strutture tensegrali quando non è possibile individuare gli elementi compressi separati fra loro o quando i bordi della struttura sono delimitati da elementi rigidi.

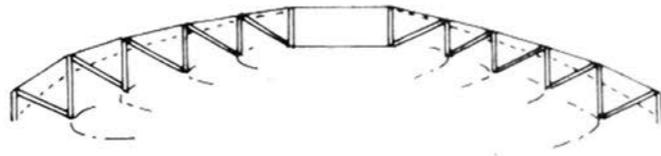
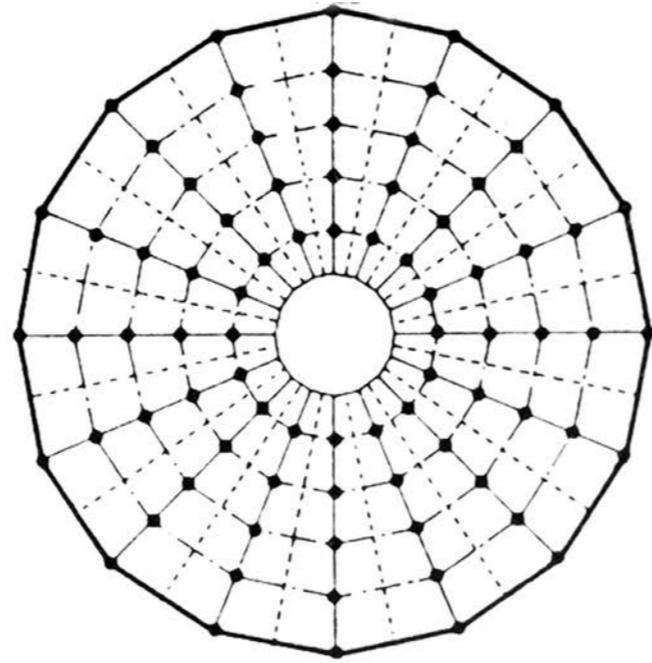


falso tensegrale

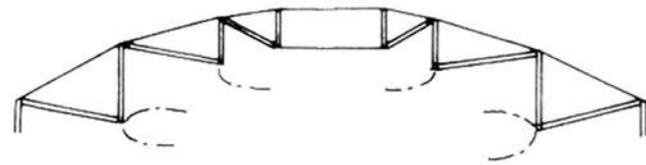
copertura di Geiger dello stadio
The Georgia Dome, Atlanta - USA
falso tensegrale



148



cupola di Geiger



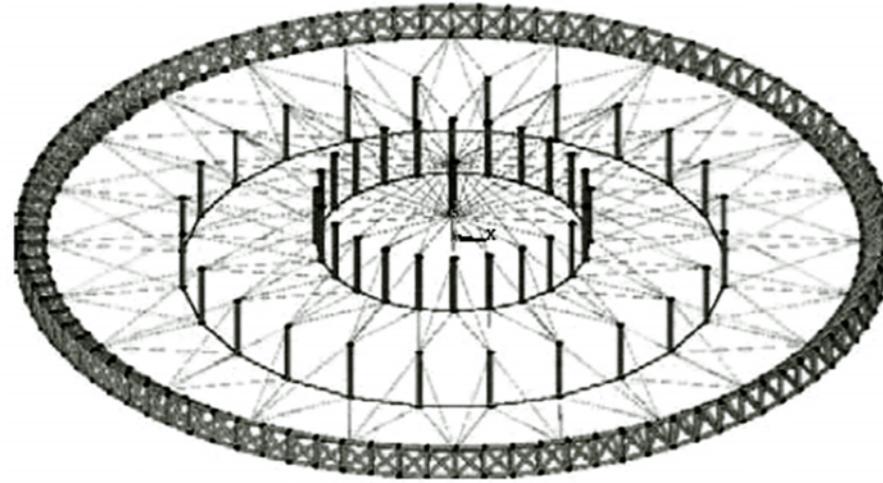
cupola tensegrale di Fuller

Fuller ha ideato un sistema strutturale di "integrità tensile" o "tensegrità" per cupole e altri tetti a campata lunga. La complessità delle di tali cupole tensegrali ha precluso la loro realizzazione su vasta scala fino agli anni '80, quando un altro ingegnere, David Geiger, le ha semplificate abbastanza da renderle costruibili, anche se non classificabili come sistemi tensegrali puri.

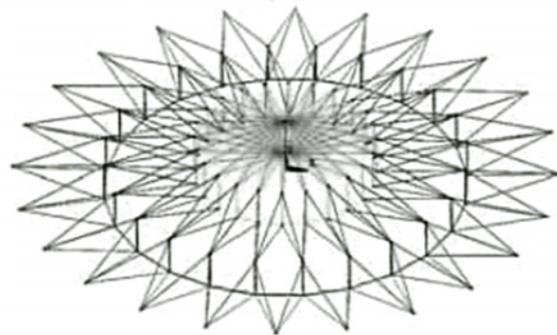
Per esempio le coperture di Geiger sono fondate sul concetto delle ruote da bicicletta, cioè presentano una trave circolare di bordo in compressione, solitamente realizzata in calcestruzzo armato, alla quale vengono agganciati dei cavi radiali. Grazie alla tensione dei cavi e alla presenza all'interno del sistema teso di puntoni opportunamente posizionati e "fluttuanti nell'aria" si ottiene una posizione della copertura più alta rispetto alla trave di bordo, idonea a scaricare all'esterno le acque meteoriche e a dare l'illusione di sfidare la gravità.



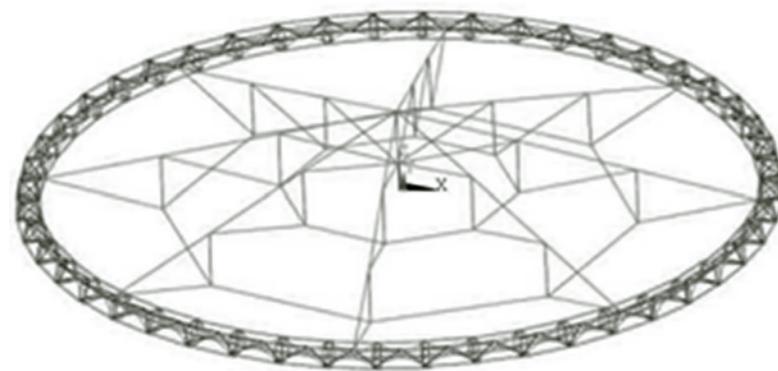
149



toroide tensegrale



Schemi di copertura alla Geiger ma "veramente" tensegrity, con sostituzione della trave di bordo compressa con un toroide tensegrale, nel rispetto quindi di quanto espresso nella definizione estesa di un sistema tensegrity.



dettaglio toroide tensegrale

Lo studio delle strutture tensegrali è stato portato avanti per molto tempo da svariati ricercatori in modo abbastanza autonomo. Ogni studioso ha finito con l'inventare un personale metodo di nomenclatura delle varie tipologie, cosicché non è sempre facile capire immediatamente a quale tipo di struttura si faccia riferimento, specialmente se si considera la vastità delle configurazioni che si possono ottenere.

La cellula base "simplex" può essere altresì definita: "equilibrio elementare", "prisma a 3 aste", "3 aste, 9 cavi", "twist element", "3 aste strato singolo".

Un sistema di nomenclatura è stato proposto da Motro ed è basato sulla topologia del sistema tensegrale a cui si fa riferimento.

Nella fattispecie i dati che danno una definizione del codice riguardano:

- numero dei nodi "n"
- numero degli elementi compressi "S"
- numero di elementi tesi "C"
- sistema regolare o sistema irregolare "R" o "I"
- sistema sferico "SS"

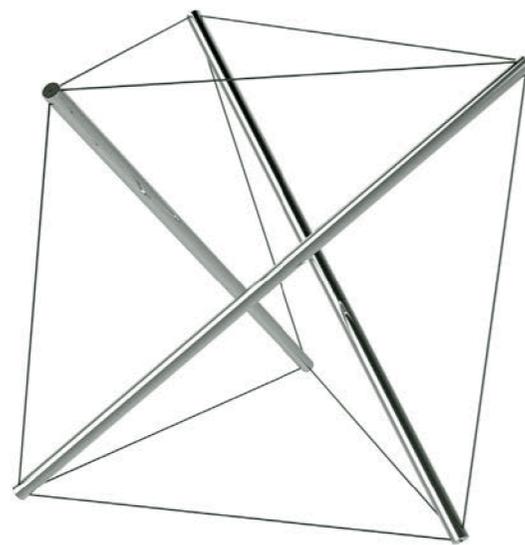
Con questo sistema di nomenclatura il simplex verrebbe chiamato **n6-S3-C9-R-SS**.

Classificazioni

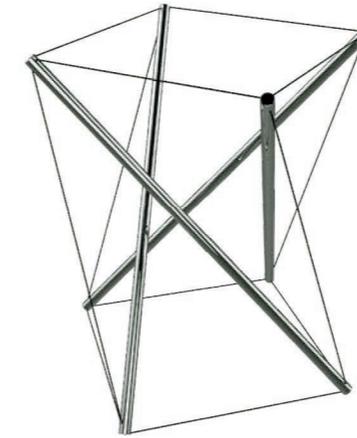
Le principali "famiglie" di strutture tensegrali sono state individuate nei primi lavori di Fuller, Emmerich e successivamente Pugh. Questi autori hanno determinato una serie di strutture facendo ampio uso per via empirica dei poliedri.

Cellule elementari

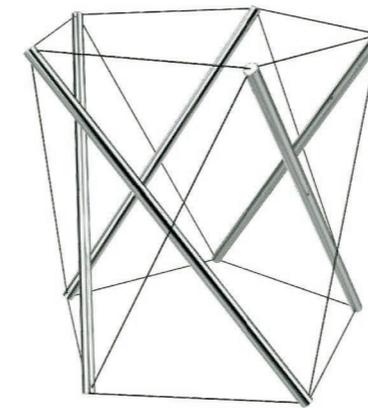
Sono definite tali tutte quelle strutture che non sono ulteriormente divisibili in singole cellule stabili, dette anche "cellule sferiche" in quanto topologicamente il set di cavi che le compongono è simile (omeomorfo) ad una sfera, cioè è possibile proiettare su una sfera tutti i cavi del sistema senza che questi si intersechino fra di loro se non nei nodi.



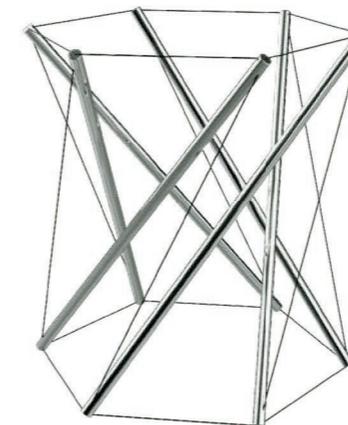
simplex



quadruplex



pentaplex



esaplex

Aumentando il numero dei tensori della base del modulo elementare a quattro, cinque o sei si ottengono rispettivamente moduli prismatici quadruplex, pentaplex ed esaplex

Le cellule elementari sono, per la maggior parte, strutture prismatiche classificate secondo la loro forma geometrica complessiva.

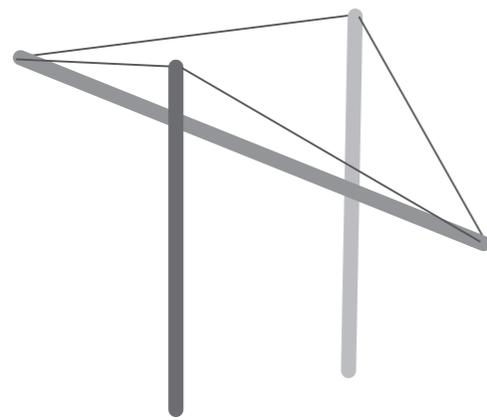
I moduli elementari più comuni sono composti da una base poligonale regolare, possono essere formati da 3, 4, 5, ...n elementi compressi e, a seconda del numero delle aste, presentano diversi angoli di rotazione tra le basi.

Gli angoli di rotazione si possono calcolare grazie alla formula $\alpha = 90^\circ - (180^\circ/n)$ da cui si ottiene per il simplex $\alpha = 30^\circ$, per il prisma a base quadrata $\alpha = 45^\circ$, a base pentagonale $\alpha = 54^\circ$, a base esagonale $\alpha = 60^\circ$.

Quindi l'angolo di rotazione aumenta all'aumentare del numero delle aste e la resistenza alle sollecitazioni esterne della cellula prismatica diminuisce all'aumentare del numero di aste.

Il Simplex, composto da tre aste in compressione e nove cavi in tensione, risulta uno dei sistemi più semplici e stabili.

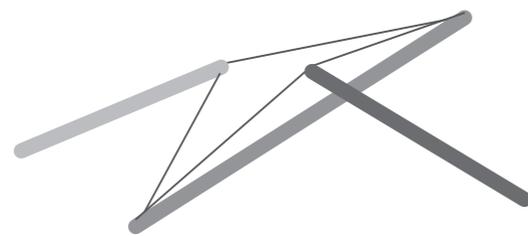
La classificazione introdotta da Pugh prevedeva invece **tre classi principali: rombica, a circuito e con configurazione a Z**. Questa classificazione è basata sul modo in cui gli elementi compressi sono collegati tra loro dai cavi.



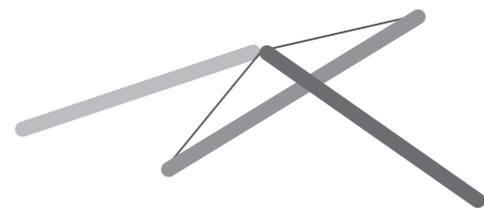
rombica



a zeta



circuito



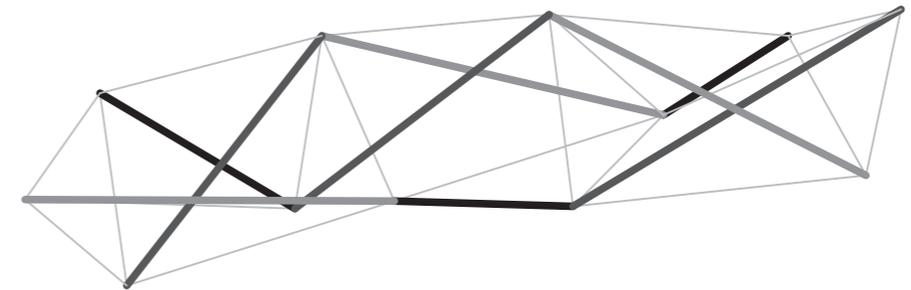
Assemblaggio di cellule elementari

Le strutture tensegrali composte sono un assemblaggio di cellule elementari.

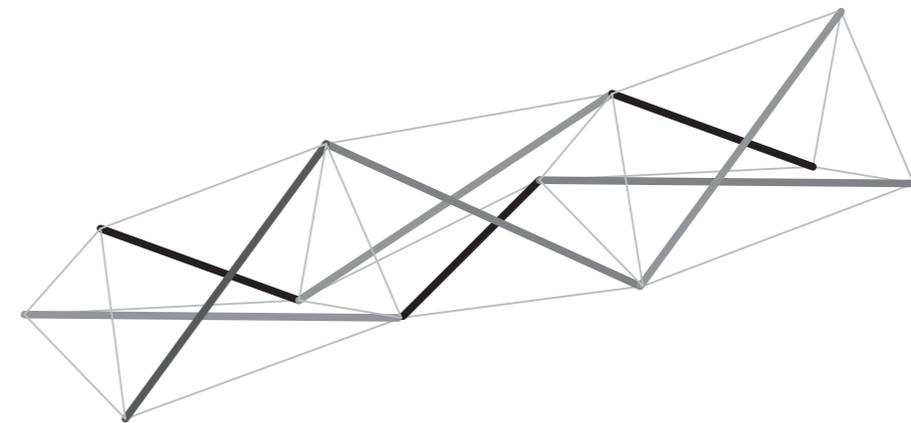
Possono essere divise in due famiglie.

Assemblaggi monodimensionali: composti disponendo cellule elementari identiche secondo due metodologie:

- **allineamento semplice** che conferisce un aspetto contorto alla struttura formata.
- **allineamento alternato** in cui le cellule sono ruotate prima di essere impilate.



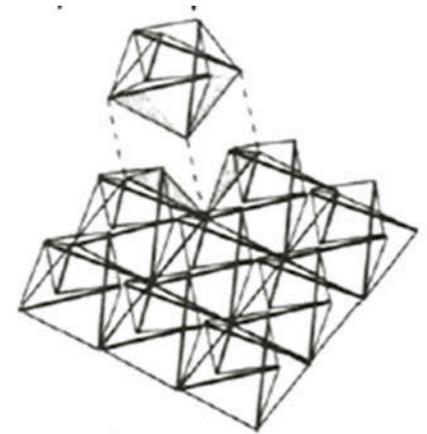
allineamento semplice



allineamento alternato

**Assemblaggi bidimensionali:
Sono composti dall'accostamento di
cellule elementari una accanto all'altra.**

Queste strutture possono essere multistrato,
cioè costituite da una pila di assemblaggi
bidimensionali e/o con curvatura singola o
doppia.



griglia piana



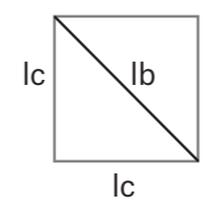
griglia doppia
curvatura

Il simplex

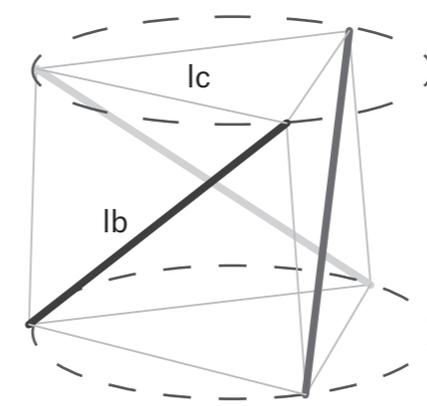
Le strutture tensegrali prismatiche come il
simplex, sono formate da **cavi orizzontali e
verticali e aste diagonali che generano un
angolo di rotazione α fra le basi del prisma,
definito come "twist angle".**

Eseguendo uno studio geometrico di un
simplex regolare, dove tutti i cavi hanno la
stessa lunghezza l_c e tutte le barre hanno
la stessa lunghezza l_b , si può stabilire una
relazione geometrica tra queste lunghezze
e l'angolo di rotazione relativo delle basi del
simplex:

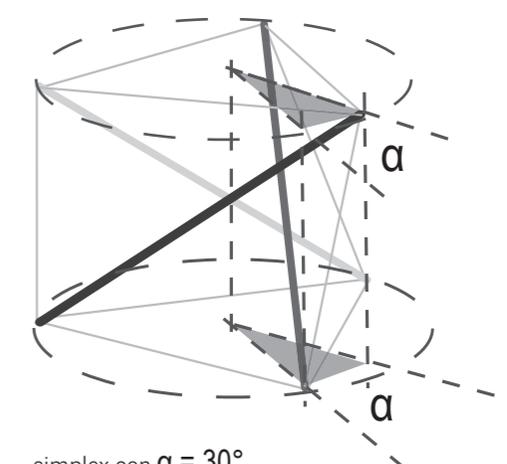
vista laterale



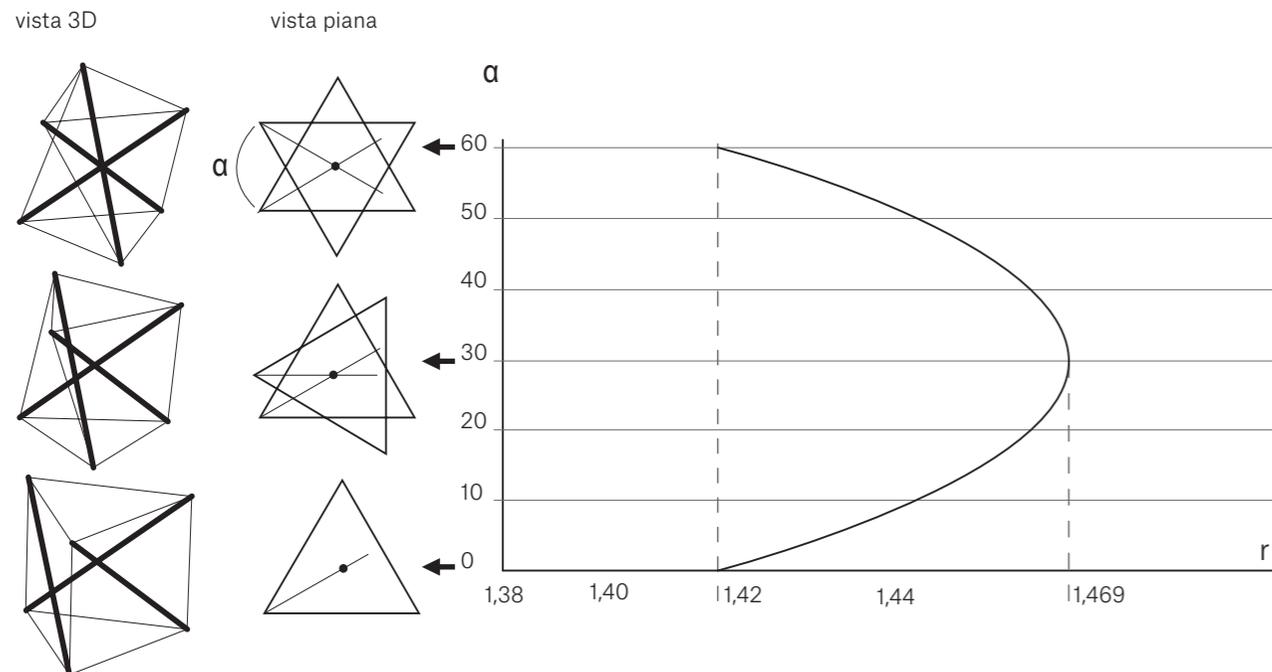
$$r = l_b/l_c = \sqrt{(1+2/\sqrt{3}) \sin(\alpha+60^\circ)}$$



simplex con $\alpha = 0^\circ$



simplex con $\alpha = 30^\circ$



158

Da questo grafico possono essere tratte diverse conclusioni sullo stato geometrico del simplex:

Se si impone una lunghezza l_b della barra si ha:

- Per una lunghezza del cavo l_c , tale che $r < \sqrt{2}$, la geometria è fisicamente impossibile. I cavi sono troppo lunghi e le barre sono quindi libere di muoversi;
- Per una lunghezza del cavo l_c , tale che $r = \sqrt{2}$, la geometria può essere impostata sia su $\alpha = 0^\circ$ o $\alpha = 60^\circ$. Quest'ultimo caso corrisponde all'incrocio delle barre nello stesso punto;
- Per una lunghezza decrescente del cavo l_c , tale che $\sqrt{2} \leq r < 1,468$, la geometria può essere fissata a due valori di angoli di rotazione α ;

- Per una lunghezza del cavo l_c , tale che $r = 1,468$, la geometria fissa l'angolo di rotazione a $\alpha = 30^\circ$. Tuttavia, la struttura non ha rigidità, poiché questa geometria non impone nessuno stato di autotensionamento. Una piccola perturbazione (ad esempio un aumento infinitesimale di l_c con conseguente diminuzione di r) è sufficiente a torcere la struttura ad un angolo $\alpha = 30^\circ \pm \epsilon$. Il simplex ha quindi un'instabilità torsionale effettiva per l'angolo $\alpha = 30^\circ$.
- Una lunghezza del cavo l_c tale che $r > 1,468$, implica un allungamento a trazione dei cavi per tensione e un accorciamento delle barre per compressione tale che il sistema risultante tende verso $r = 1,468$. La geometria è quindi inequivocabilmente fissata ad $\alpha = 30^\circ$ e la struttura ha una certa rigidità perché la geometria le impone uno stato di auto stress. Infatti un piccolo disturbo non ha più alcun impatto sulla geometria generale della struttura poiché la struttura tornerà alla sua posizione iniziale dopo la perturbazione.
- Il simplex è quindi in uno stato di auto-stress ed è in equilibrio stabile per $\alpha = 30^\circ$.
- Questo stato di stress interno è indipendente da qualsiasi collegamento, dipende dalla configurazione geometrica degli elementi e viene introdotto durante l'assemblaggio del sistema.

159

Approccio cinematico

di René Motro

“Una delle migliori introduzioni ai sistemi tensegrali è certamente quella di costruire un piccolo modello. La realizzazione effettiva appare sempre utile; è possibile, per esempio, costruire semplicemente un “equilibrio elementare”.

Sarà composto da tre elementi compressi di uguale lunghezza e nove elementi tesi di uguale lunghezza. Questa uguaglianza di lunghezze per ciascuna delle due classi di elementi giustifica la qualifica “regolare” che adotteremo per questo sistema elementare. È necessario in questo caso specifico che il rapporto “r” tra la lunghezza degli elementi compressi “s” e quella degli elementi tesi “c” sia uguale a 1,4682. Una diversa scelta di questi valori crea o un sistema senza rigidità, un sistema a cui non si può dare una forma (“r” è troppo piccolo), o un sistema che sarà molto difficile e forse anche impossibile da assemblare (“r” troppo grande).

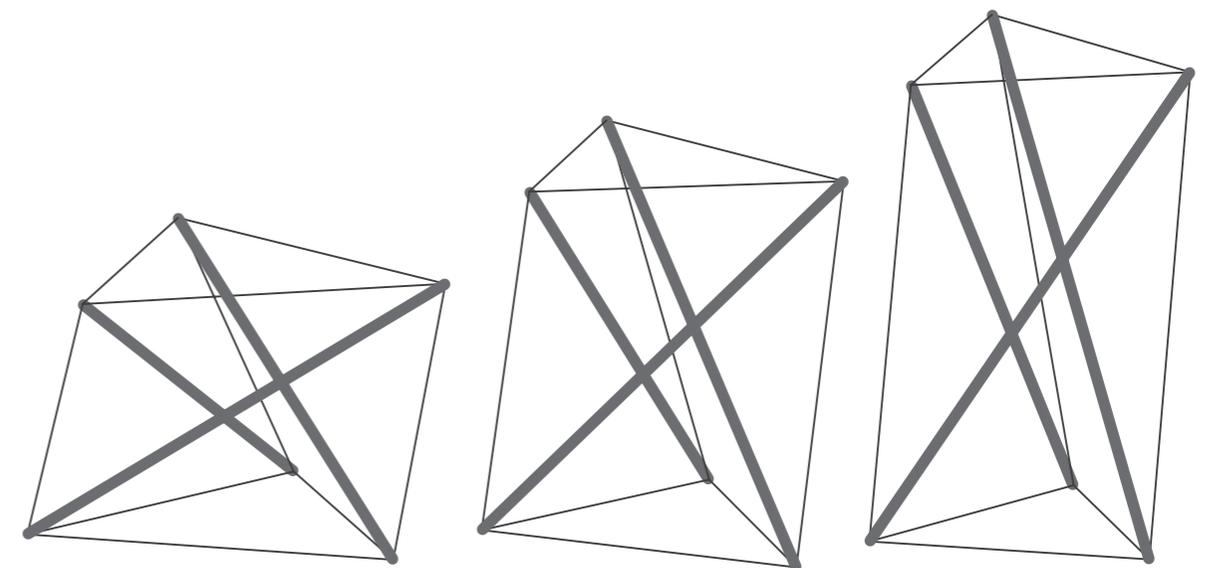
dal libro “Tensegrity Structural Systems for the Future”
di R. Motro (1988) - ed. 2003

Rapporto di snellezza

Il rapporto di snellezza è rappresentato dalla formula $S = h/r$, dove h è l'altezza del singolo modulo base (ovvero distanza fra il triangolo superiore ed inferiore del simplex) ed r è il raggio del poligono di base (ossia il raggio della circonferenza circoscritta al triangolo di base). **All'aumentare della snellezza il modulo base tende ad assumere proporzioni slanciate verso l'alto, al diminuire tende a divenire sempre più basso e tozzo.**

Alcune ricerche hanno messo in evidenza come la snellezza sia proporzionale alla resistenza ai carichi verticali e inversamente proporzionale alla resistenza ai carichi orizzontali, in maniera sempre non lineare.

A riguardo si citano i lavori di Tibert G., Deployable Tensegrity Structures for Space Applications, tesi di dottorato, Stockholm, Sweden, Royal Institute of Technology, 2002; di Peters S., Tensional Integrity, tesi di laurea, Università di Stoccarda, 1998 e di Micheletti A., Strutture pieghevoli che ricercano una forma di equilibrio, tesi di laurea in Ingegneria Civile, Roma, Università di “Tor Vergata”, 1999.



Esempio di applicazione: Torre Rostock

La torre di Rostock è l'unica "vera" struttura tensegrale di dimensioni importanti che sia attualmente in essere.

La torre tensegrity è stata realizzata nel 2003 in occasione dell'Esposizione Internazionale dei Giardini di Rostock in Germania e ha svolto funzione simbolica ed estetica.

La struttura è alta 62,3 ml e se sollecitata da carico di vento può avere deflessioni maggiori di un metro.

È stata ideata, progettata e staticamente calcolata dallo studio Schlaich Bergermann und partner.

Si tratta di una struttura tensegrity di classe 2, formata dall'addizione verticale di sei simplex con orientamenti alternati dell'altezza di 8,3 ml ciascuno.

Questo progetto, per certi versi pionieristico, prova che con le tecnologie attuali è possibile realizzare strutture tensegrali, anche di grandi dimensioni, che rispondono in maniera perfetta ai requisiti di progetto.

L'intera struttura pesa circa 50 tonnellate. **L'individuazione del valore di pretensionamento è stata fatta rispetto al carico di vento, in quanto la torre non ha altra funzione statica che portare il proprio peso.** I cavi sono stati dimensionati imponendo che la forza di pre-tensione equivalesse al 30% della forza di rottura del cavo.



Tale forza di pre-tensione di progetto nei cavi diagonali è di 1200 kN e di 1500 kN per i puntoni tubolari compressi.

La distanza di allungamento affinché i cavi diagonali (\varnothing 75 mm. lunghi 9,6 ml) raggiungano la tensione di progetto è di soli 20 mm., questo significa che con una variazione di lunghezza di soli 10 mm il cavo presenterebbe una perdita di tensione del 50%.

Questo è stato il grande problema della fase realizzativa: per motivi architettonici non si poteva fare uso di tenditori, quindi l'unica soluzione per avere sotto controllo i valori di presollecitazione era l'accuratezza della fabbricazione.

Per raggiungere la massima precisione i fori e le saldature dei giunti con le aste sono stati realizzati già nella loro posizione finale in opera.

Sono stati utilizzati 3 martinetti da 100 kN l'uno che assieme ad una "briglia" in acciaio hanno tenuto in posizione le aste fino al fissaggio a quelle sottostanti.

Il metodo di montaggio per settori auto-equilibrati è avvenuto sul posto da terra in soli 10 giorni.

Il sistema è stato analizzato con un modello 3D ad elementi finiti che tenesse in considerazione le non linearità e le grandi deformazioni.

La torre è stata realizzata dalla azienda tedesca Mero TSK.



Ogni simplex è composto da 3 tubi in acciaio \varnothing 273 mm. con uno spessore variabile fra i 12 e i 40 mm. e 6 cavi in acciaio ad alta resistenza, 3 orizzontali (\varnothing 30 e 50 mm.) e 3 verticali (\varnothing 50 e 75 mm.).

Le aste della torre convergono a due a due in un nodo (tensegrity classe 2) e il giunto di collegamento è stato ottenuto con delle piastre di attacco imbullonate.



Un sistema di tensegrità si stabilisce quando un insieme di compressioni discontinue interagisce con un insieme di componenti di trazione continua per definire un volume stabile nello spazio.

(definizione di A. Pugh)

“Il sistema tensegrale è un sistema in uno stato di auto - equilibrio stabile comprendente un insieme di componenti discontinui compressi all’interno di un continuum di componenti in tensione”.

(definizione estesa di R. Motro)

Entrambe le definizioni potrebbero prevedere quindi fra i possibili componenti compressi all’interno del continuum di tensione anche l’aria, per cui le strutture pneumatiche possono a tutti gli effetti essere considerate strutture tensegrali.

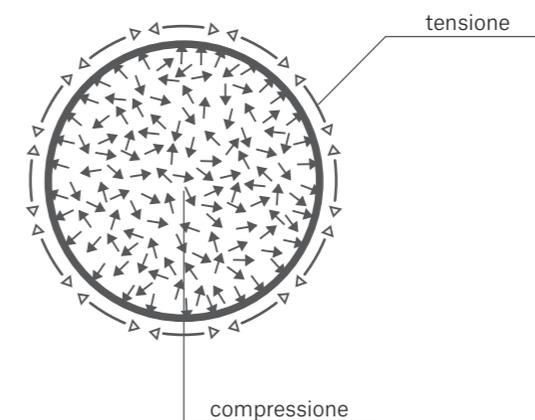
Per comprendere meglio il ruolo dell’autosollecitazione in tali sistemi e per spiegare come questo particolare stato iniziale possa esistere, è possibile tracciare un’analogia tra l’autosollecitazione di un sistema tensegrale e la pressurizzazione di un pallone.

Quando un pallone è sgonfio, la sua geometria è casuale e la pressione dell’aria all’interno è uguale alla pressione atmosferica.

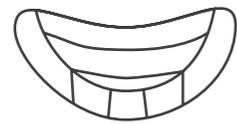
Per gonfiarlo, bisogna immettere dell’aria. Se il volume di aria è uguale al volume limitato dal suo involucro, il pallone raggiunge la sua forma finale ma la membrana non è tesa. La pressione interna è quindi sempre uguale alla pressione atmosferica. Questo corrisponde al caso del simplex con $\alpha = 0^\circ$ dove lo stato di autostress è pari a zero.

Il sistema è stabile ma non ha rigidità; Se aumentiamo ulteriormente la quantità d’aria immessa, la pressione interna del pallone aumenterà in modo che la pressione interna sia maggiore di quella atmosferica.

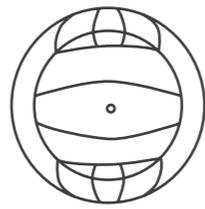
La membrana si tenderà, il che darà rigidità al pallone.



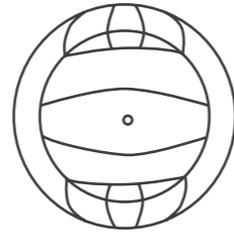
Questa situazione corrisponde al caso del simplex con angolo di rotazione α pari a 30° , nello stato di autotensionamento.



membrana senza aria
 $p =$ pressione atmosferica



forma sferica
 $p =$ pressione atmosferica

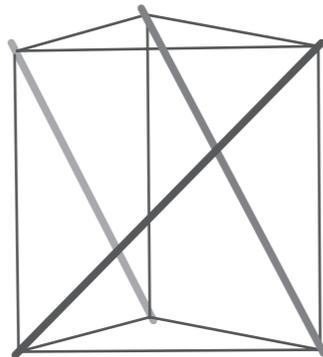


pallone sotto pressione
 $p >$ pressione atmosferica



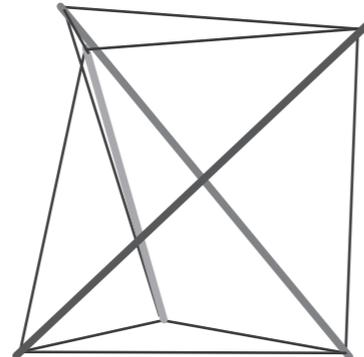
$T = 0$

viste laterali
 $\alpha = 0^\circ$



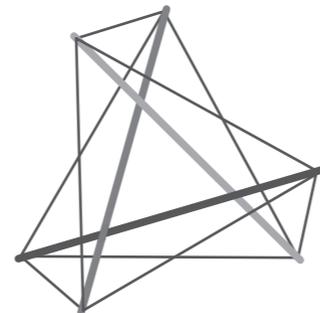
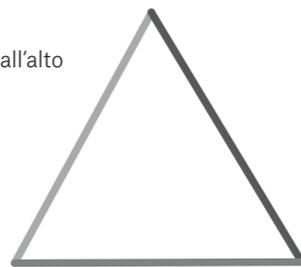
$T = 0$
configurazione iniziale

$\alpha = 30^\circ$



$T > 0$
configurazione equilibrata

viste dall'alto



Tutto ciò vale anche per le strutture tensegrali, con l'unica differenza che la forza stabilizzante in questo caso non si ottiene attraverso l'aumento della pressione dell'aria interna ma attraverso l'allungamento dei puntoni o l'accorciamento dei tiranti.

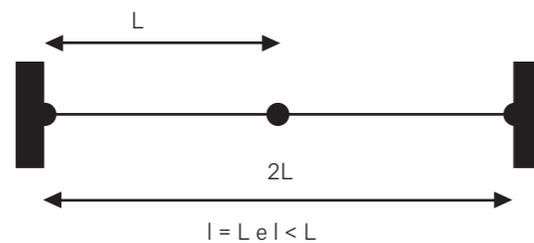
Infatti se la lunghezza dei puntoni è troppo corta o la lunghezza dei tiranti è troppo lunga il sistema tensegrale è cinematicamente indeterminato, in quanto può assumere innumerevoli configurazioni.

Esiste una ed una sola lunghezza degli elementi tale che la struttura si ritrovi in una condizione di equilibrio con presollecitazione nulla; in questa condizione il sistema è ancora una volta cinematicamente indeterminato ma questa volta il meccanismo interno è infinitesimale.

Da questo punto in poi se invece tentiamo di allungare i puntoni o accorciare i tiranti allora imponiamo al sistema uno stato di presollecitazione interno che stabilizza la struttura . Il valore di questa presollecitazione può variare all'interno di un range, oltrepassati i valori limite del quale la struttura ha un collasso, o per cedimento dei tiranti o per cedimento dei puntoni (lo stesso accade nei sistemi pneumatici dove il rischio, a pressioni troppo elevate, è quello di esplosione della camera d'aria).

I sistemi tensegrali appartengono alla classe più generale dei meccanismi infinitesimi del primo ordine.

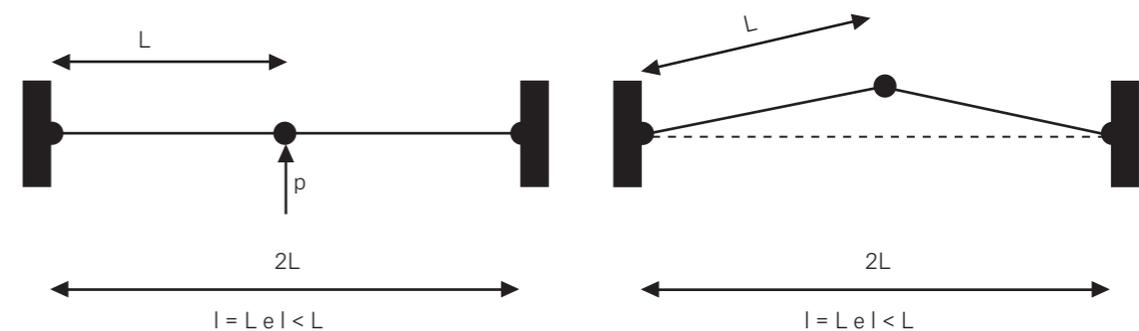
Per capire meglio questo concetto, può essere analizzata la seguente analogia: si consideri uno schema a tre cerniere distanziate $2L$ e collegate da due barre identiche complanari di lunghezza L . Si distinguono diversi casi a seconda delle dimensioni delle barre in relazione alla distanza tra gli elementi:



Le barre sono orizzontali e non hanno forze interne. Questa situazione corrisponde a il caso del simplex $\alpha = 30^\circ$ dove lo stato di autostress è zero;

Le barre sono orizzontali e in tensione.

Quando il sistema è sollecitato, automaticamente ritorna alla sua posizione iniziale. Questo stato di equilibrio stabile corrisponde al caso di simplex con $\alpha = 30^\circ$ in stato di autotensionamento

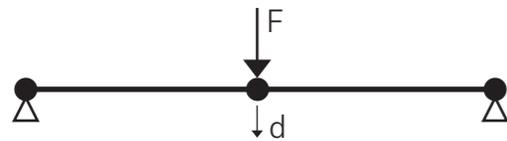


Se le barre sono tenute in posizione orizzontale, il sistema è in equilibrio instabile. Infatti, una perturbazione le farà allontanare permanentemente dalla loro posizione iniziale verso uno stato di equilibrio stabile. Questa situazione corrisponde al caso del simplex $\sqrt{2} \leq l_c < 1,468$ con $\alpha \neq 30^\circ$.

Una seconda perturbazione, opposta alla prima e sufficientemente alta, farà sì che il sistema passi alla posizione di equilibrio stabile opposta, passando attraverso la posizione di equilibrio instabile. **Questo fenomeno è chiamato "snap through"** (scatto).

Il calcolo delle strutture tensegrali presenta delle difficoltà intrinseche a causa della loro non linearità.

Per capire meglio questa particolarità, si consideri l'analogia delle 2 aste ruotate sottoposte a un carico esterno:



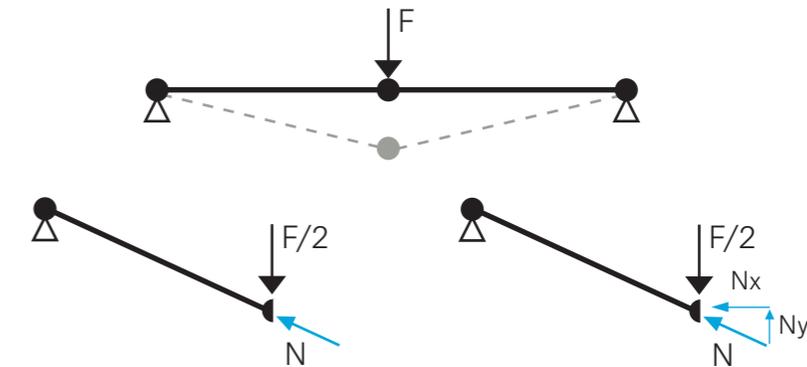
Per bilanciare le forze interne e i carichi esterni usando un calcolo lineare del primo ordine, troviamo che l'equilibrio delle forze verticali non è rispettato.

Questo perché, se studiamo la stabilità delle barre su entrambi i lati del vincolo interno (cerniera), osserviamo che nessuna forza impedisce la barra di ruotare indefinitamente intorno al suo supporto. La risoluzione di questo sistema porta quindi a uno spostamento verticale di valore infinito.

Questo è chiamato **indeterminazione numerica**: anche se la soluzione esiste fisicamente, il metodo di calcolo lineare utilizzato non permette di trovare questa soluzione.



Per risolvere correttamente questo sistema, è necessario eseguire un calcolo del secondo ordine, cioè sulla struttura deformata.



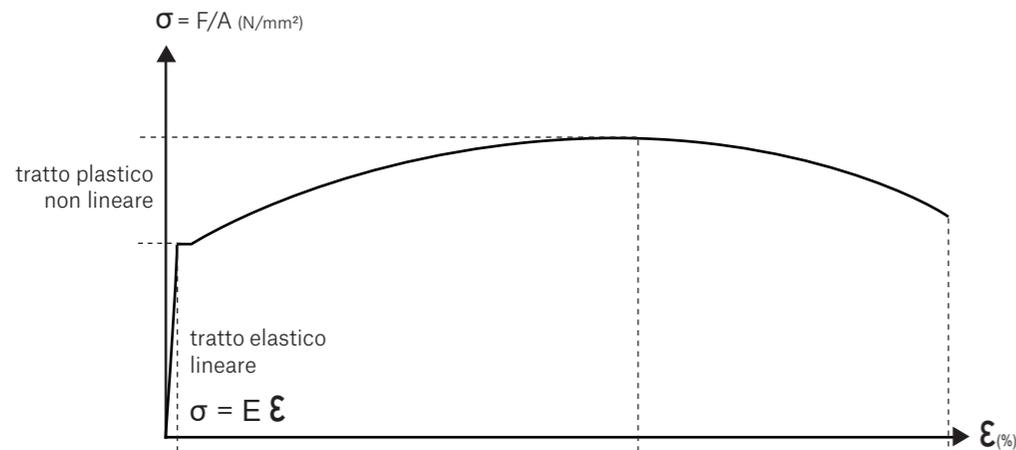
Si può vedere che considerando la struttura deformata, l'equilibrio delle forze verticali può ora essere rispettato. Infatti, la forza normale può essere scomposta in una componente verticale che permette di reagire con una intensità pari alla metà della forza verticale. Si può quindi calcolare una soluzione fisica. Questa soluzione porta ad una relazione non lineare tra lo spostamento e la forza esterna applicata.

Non linearità

Ci sono due tipi di non linearità in una struttura: **la non linearità materiale e la non linearità geometrica.**

- **Non linearità materiale:**

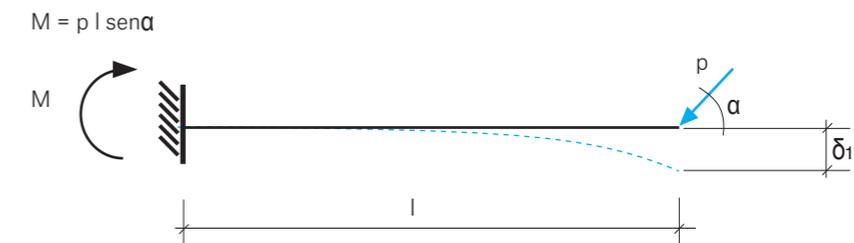
Le deformazioni non rispettano più la legge lineare di Hooke.



- **Non linearità geometrica:**

La non linearità geometrica riguarda le strutture che sono soggette a grandi deformazioni. In questo caso, la struttura deve essere calcolata sulla base della sua deformazione.

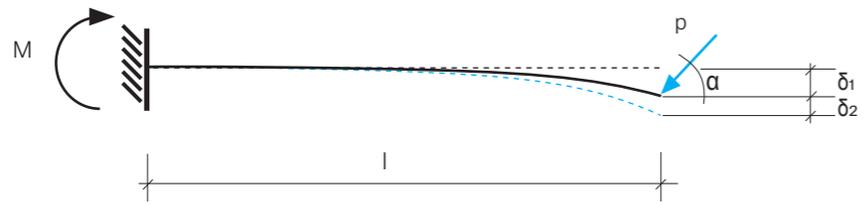
calcolo di primo ordine



Se la deformazione δ_1 della struttura è molto piccola, la struttura deformata è praticamente sovrapponibile con la struttura iniziale. L'equilibrio della struttura può quindi essere calcolato sulla base della sua geometria iniziale. Questo è definito **calcolo di primo ordine ed è un presupposto semplificativo l'analisi elastica lineare.**

calcolo di secondo ordine

$$M = p l \operatorname{sen} \alpha + (p \operatorname{cos} \alpha) \delta_1$$



Quando la deformazione δ_1 non è più trascurabile, l'errore di un calcolo del primo ordine diventa troppo grande.

È quindi necessario calcolare la struttura al secondo ordine. Questo consiste nell'analizzare l'effetto dell'applicazione del carico sulla struttura deformata.

Spoletosfera
R.F. Buckminster
1967



04/ Generazione di geometrie tensegrali

/ 04.1

Form finding

/ 04.2

Modellazione algoritmica

/ 04.3

Modelli tensegrali

/ 4.1 Form-finding

Molto importante nello studio di un sistema tensegrale è il problema della ricerca della forma.

Sono stati sviluppati diversi metodi analitici, numerici ed empirici per risolvere questo problema ma ad oggi non esiste una metodologia univoca per conoscere l'esatta posizione dei nodi di una data struttura tensegrale. Analizzare nel dettaglio i metodi di calcolo va oltre lo scopo di questa tesi ma a titolo semplicemente nozionistico si riportano di seguito i metodi di risoluzione del problema del "form-finding":

- **metodi cinematici - soluzione analitica**
- **programmazione non lineare**
- **rilassamento dinamico**
- **metodi statici - soluzione analitica**
- **metodo della densità delle forze**
(Vassart 1997)
- **metodo energetico**
- **metodo delle coordinate ridotte**
(Sultan 1999)
- **modellazione algoritmica**
(empirica/analitica, Grasshopper, Kangaroo)

I metodi analitici possono essere usati solo nei casi di strutture molto semplici o ad elevata simmetria, mentre per sistemi più complessi il calcolo è di tipo numerico.

Il problema dell'analisi statica è fortemente connesso a quello della ricerca di forma.

Kennet Snelson
B-Tree II
1982



È infatti impossibile effettuare un calcolo statico se non sono stati imposti i vincoli di equilibrio con presollecitazione nulla che permettono di trovare la geometria della struttura; inoltre non si ha alcuna resistenza ai carichi se non si imprime uno stato interno di presollecitazione alla struttura.

La resistenza alle sollecitazioni esterne in un sistema tensegrale dipende da due fattori: la conformazione geometrica degli elementi ed il livello di pre-tensionamento.

Diversi studi hanno analizzato alcune casistiche di carico in relazione a parametri di geometria e presollecitazione per alcune tipologie di sistemi, ad esempio il simplex, torri cilindriche di classe 1 e 2, griglie di Motro.

Le ricerche hanno evidenziato che le **strutture di classe 2, che presentano aste in contatto fra loro, sono più stabili e staticamente più efficienti delle strutture di classe 1, in cui le aste fluttuano nel vuoto.**

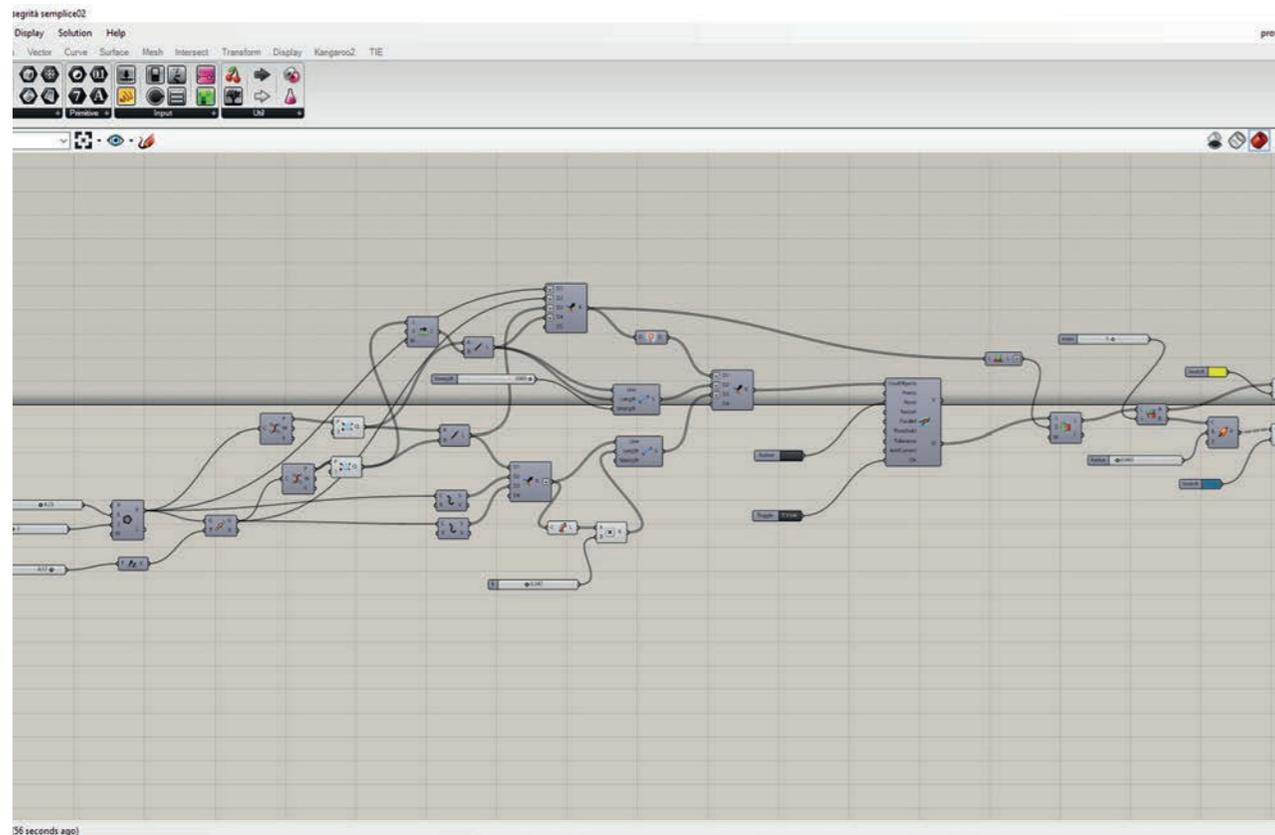
In linea generale tutte le strutture tensegrali presentano un forte calo di resistenza nel momento in cui uno solo dei cavi che le compongono si allenta. Questo può determinare il collasso della struttura ed è quindi uno dei parametri da tenere in maggior conto durante le fasi di progettazione.

Per il form finding e quindi la generazione e il controllo di strutture tensegrali attualmente viene in ausilio la modellazione algoritmica, con la quale si ha la possibilità di creare oggetti tridimensionali attraverso la descrizione del sistema di relazioni alla base di una qualsiasi geometria complessa.

Tale descrizione avviene mediante lo sviluppo di un diagramma a nodi (algoritmo visuale) all'interno di specifici editor che operano in parallelo al software di modellazione.

Uno degli editor è ad esempio **Grasshopper**, strumento di modellazione algoritmica per la generazione ed il controllo di forme complesse a qualsiasi scala, dall'architettura al design.

Plug-in integrato in Rhinoceros dalla release 6 in poi, in grado di generare forme tridimensionali complesse attraverso la definizione di un diagramma a nodi (algoritmo) il quale descrive le relazioni matematiche e geometriche di un modello.

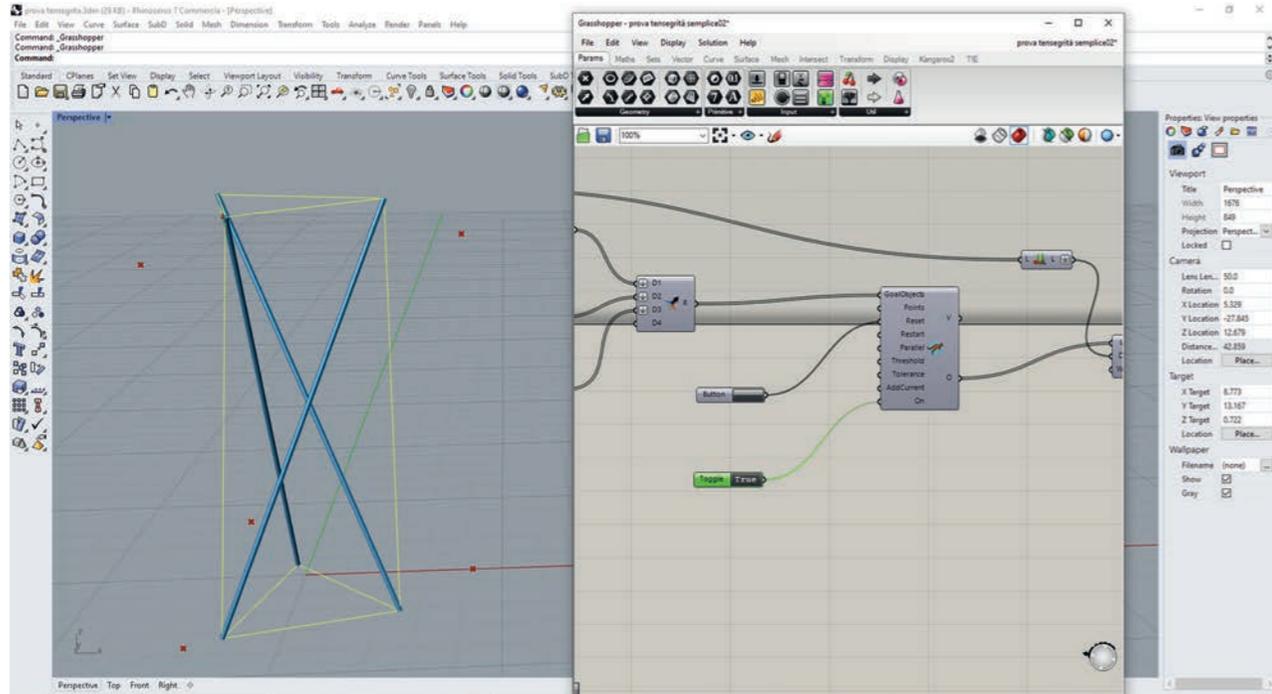


interfaccia di Grasshopper

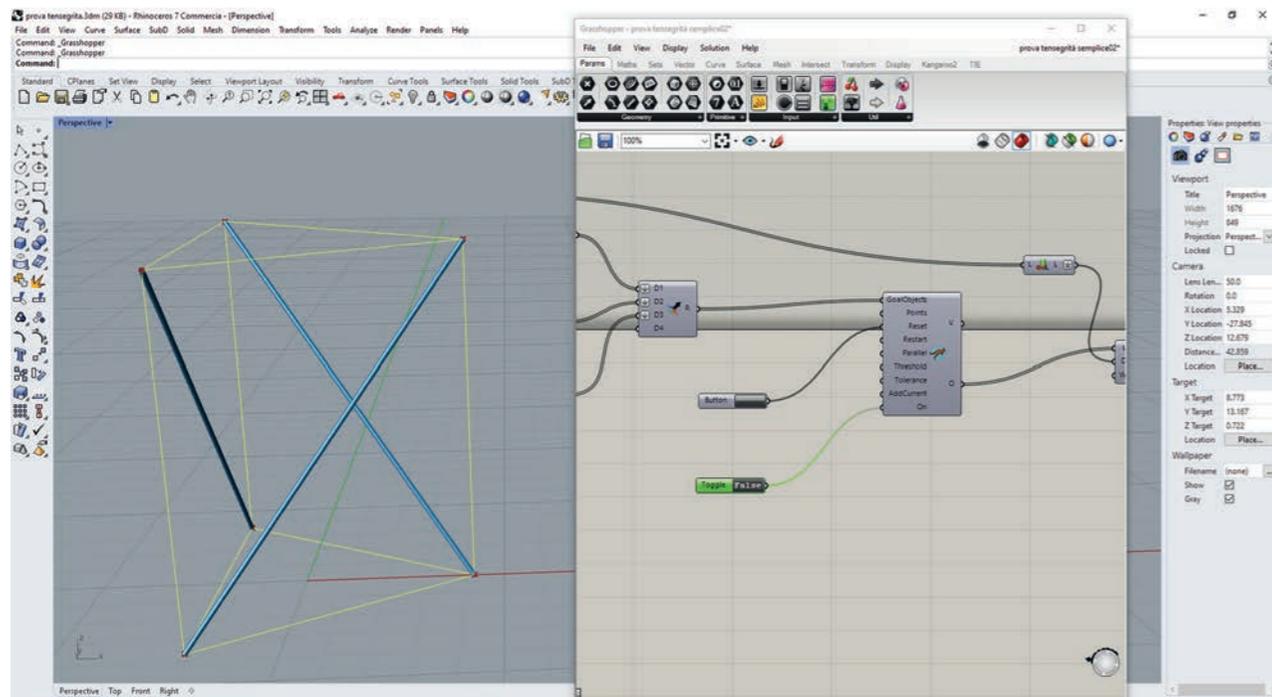
Ciò che si genera è un sistema dinamico modificabile in tempo reale mediante la variazione dei parametri definiti durante la costruzione del diagramma.

Questo vuol dire che la modifica di un parametro è in grado di generare una estensione di modifiche tale da determinare la ridefinizione anche dei dettagli. La razionalizzazione della forma, la sua scomposizione o il suo sviluppo di superfici complesse, non sono più quindi operazioni "a posteriori" ma vengono integrate nel medesimo processo di definizione.

Rhino, Grasshopper e Kangaroo,
simulazione della risposta alle sollecitazioni di
una configurazione tensegrale simplex



186



La realizzazione di un sistema tensegrale prevede nella fase form-finding l'analisi di una combinazione di valori di tensione e compressione che lo mantenga stabile, raggiungendo l'equilibrio delle azioni senza determinare un collasso.

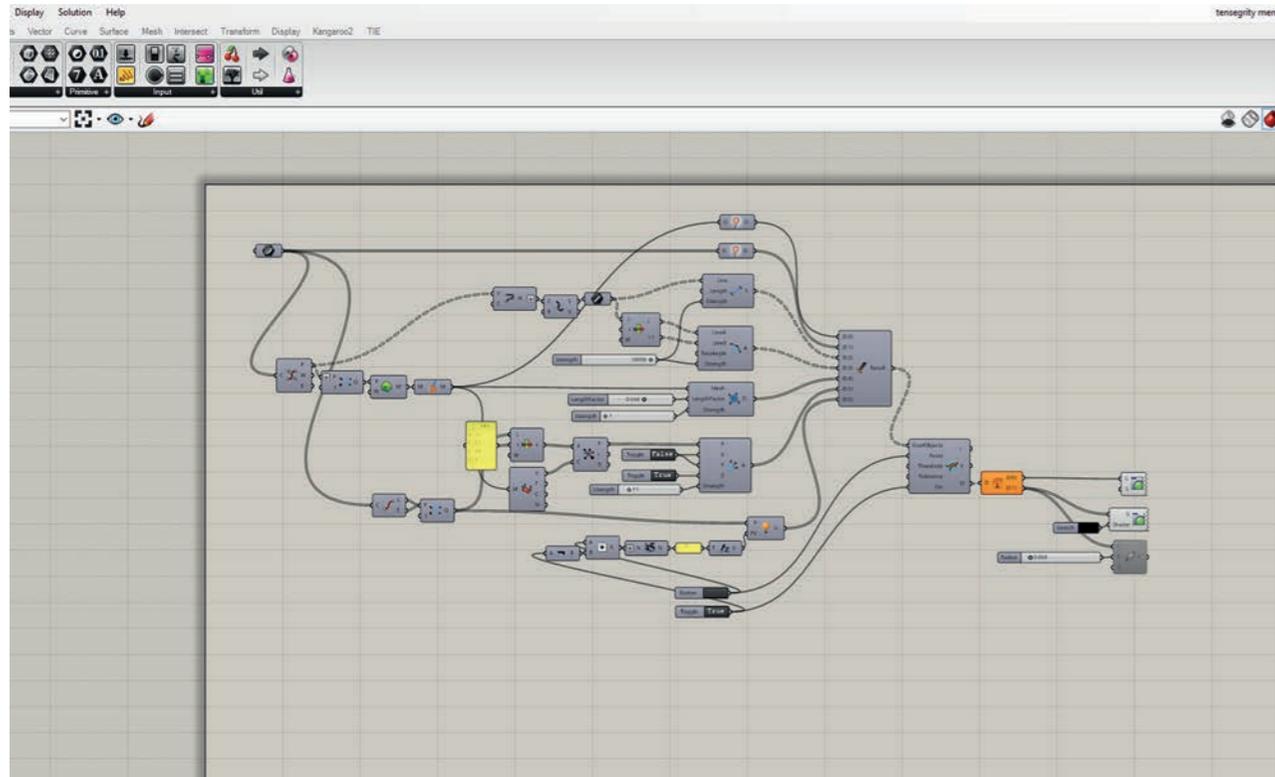
La modellazione algoritmica di Grasshopper a tal scopo viene integrata dal plug-in **Kangaroo**, un motore di fisica/solver di rilassamento interattivo e dinamico.

Un motore fisico è un software che contiene informazioni sulla fisica realistica ed ha la funzione di imitare esperienze reali in ambiente digitale. Viene utilizzato per simulazioni scientifiche ma anche nell'industria dei videogame poiché fornisce un'esperienza di gioco più realistica.

In questo modo nella generazione di un sistema tensegrale è possibile, oltre che definire la geometria, simulare anche le azioni di pretensione, tensione e rilassamento per testare e risolvere la stabilità del sistema, sempre in "real time".

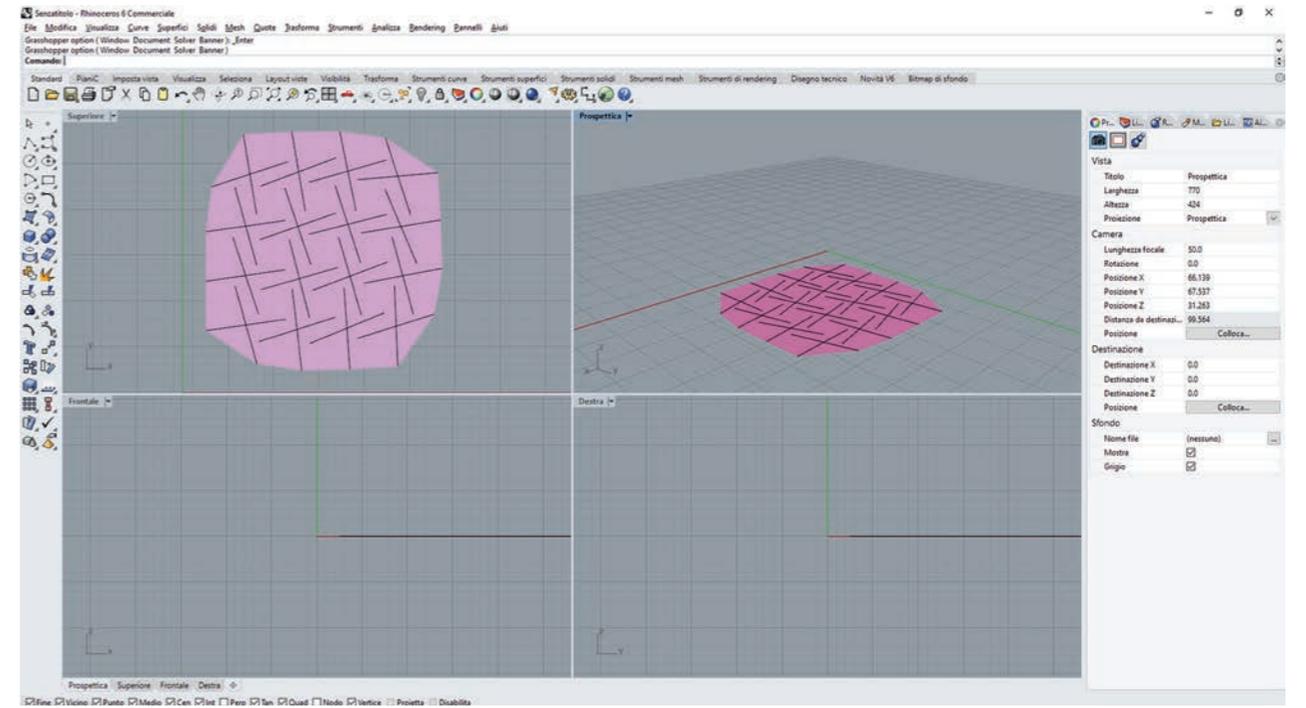
Un ulteriore software, **"Tensegrité 2000"**, è stato sviluppato da René Motro e dal suo gruppo di ricerca presso il Laboratoire de Génie Civil a Montpellier.

187

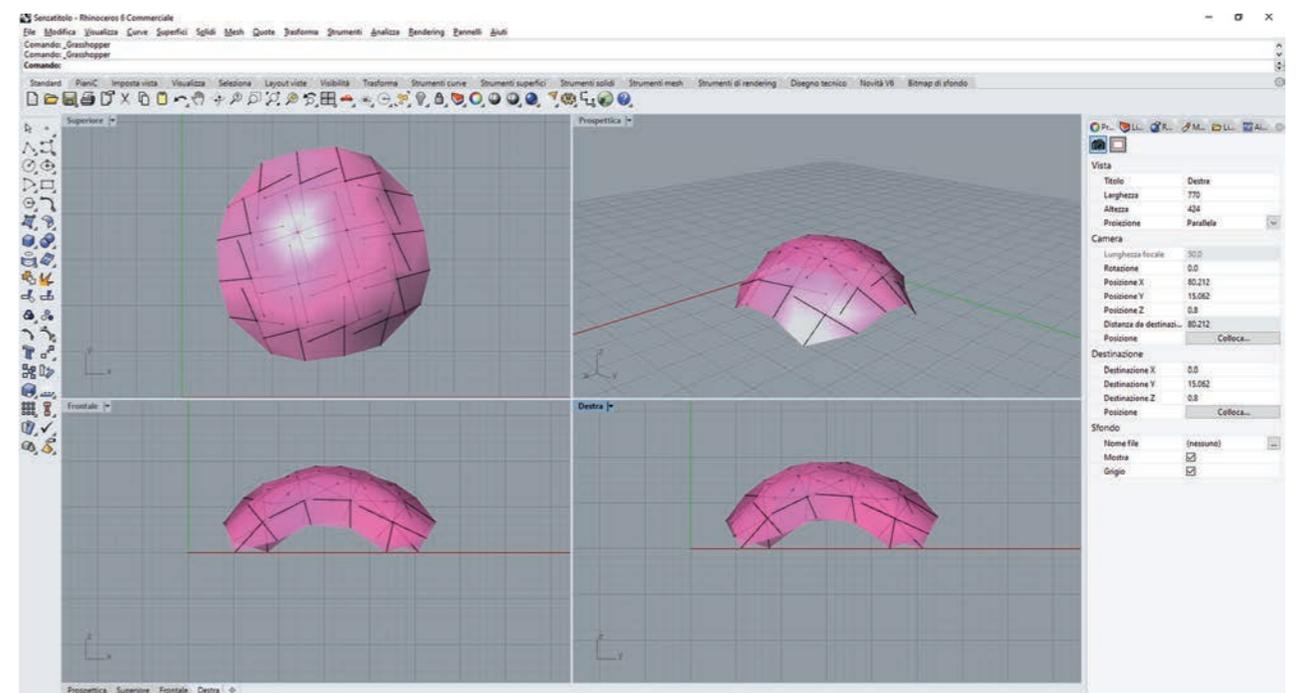


188

Esempio di simulazione dell'interazione tra puntoni in compressione e membrana in tensione che porta la struttura a sollevarsi, dallo stato di riposo in piano, in una forma tridimensionale (Rhinoceros con i plug in Grasshopper e Kangaroo)



189

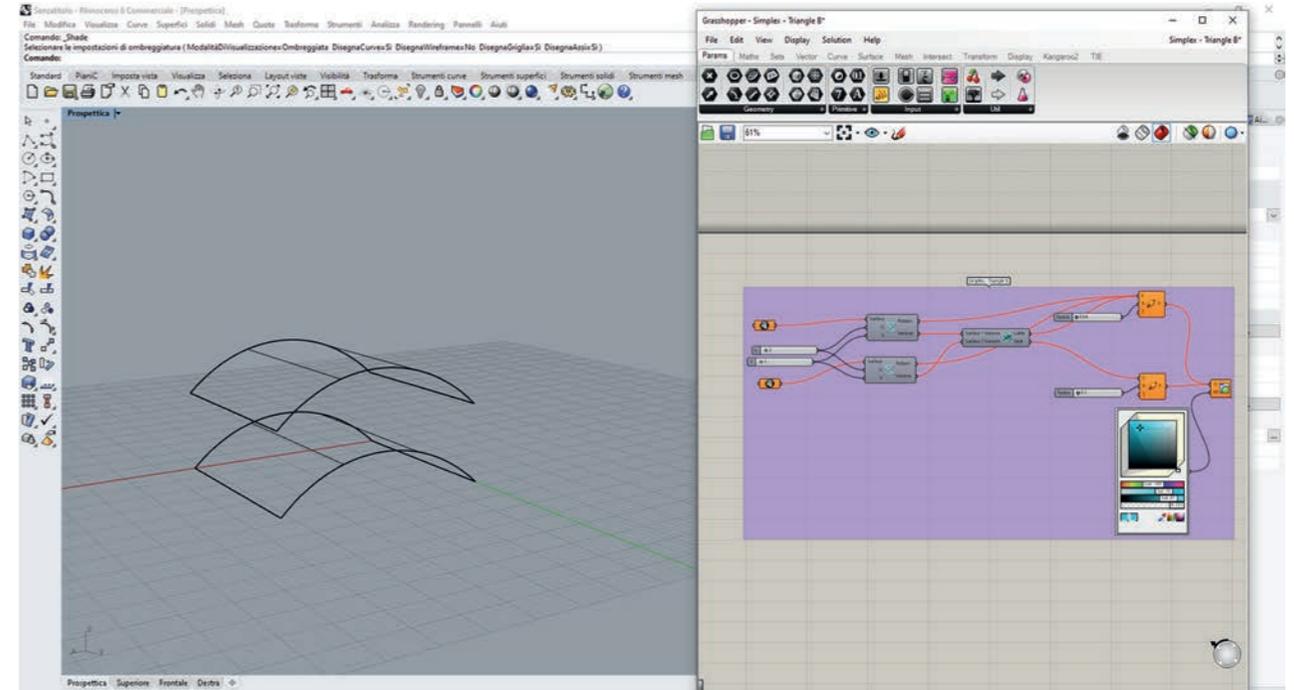
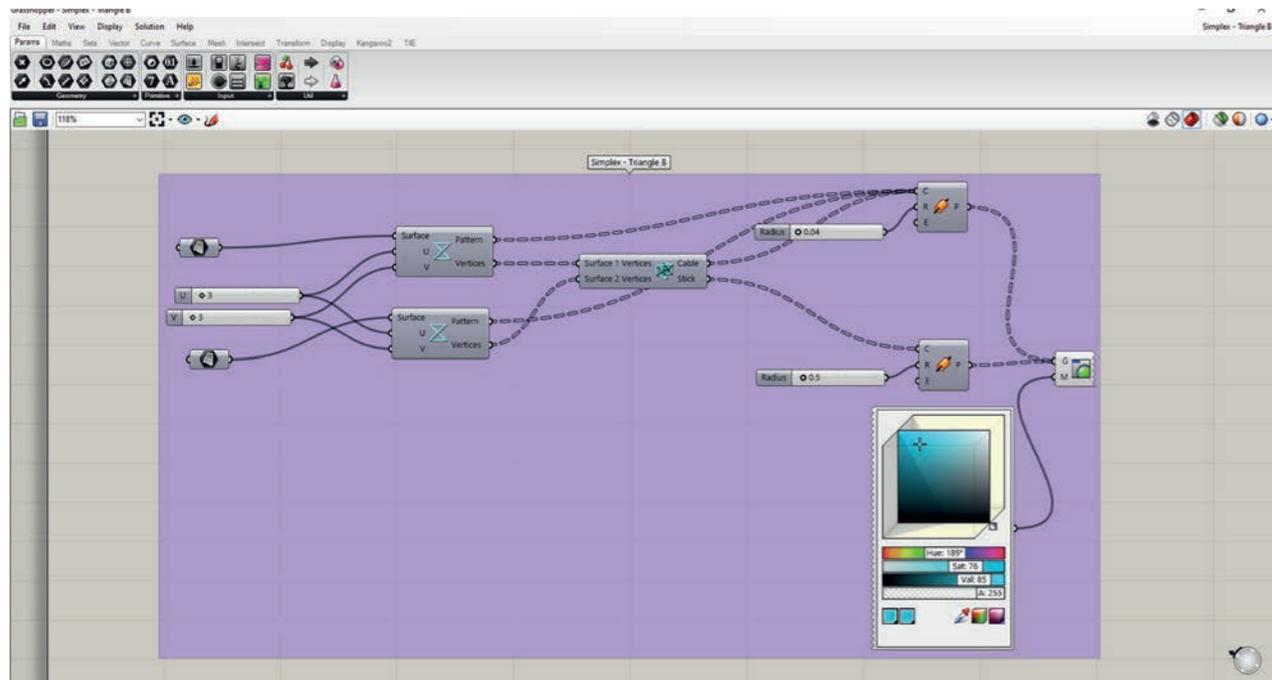


Un altro plug in sviluppato per Grasshopper è **T.I.E. (Tensegrity Integration Element)**, sviluppato da Responsive Architecture Lab Team presso la School of Architecture - University of Illinois.

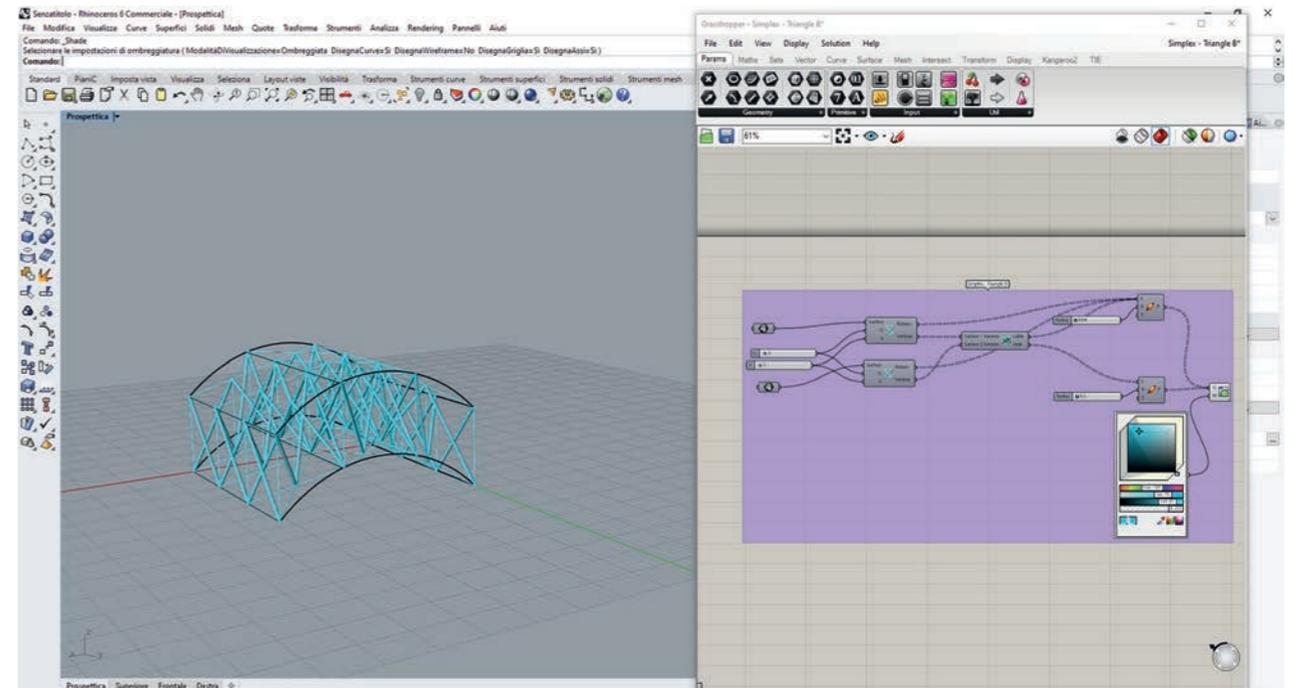
T.I.E. genera automaticamente moduli tensegrali di tipo simplex o rombico combinati tra loro e distribuendoli in maniera omogenea in una geometria, intesa come superficie o volume.

Il che dà la libertà a un designer di non dover progettare puntoni e tiranti angolati in direzioni diverse ma di poter valutare più possibili configurazioni inserendo come variabili, nel diagramma a nodi, le geometrie dove generare il sistema tensegrale modulare.

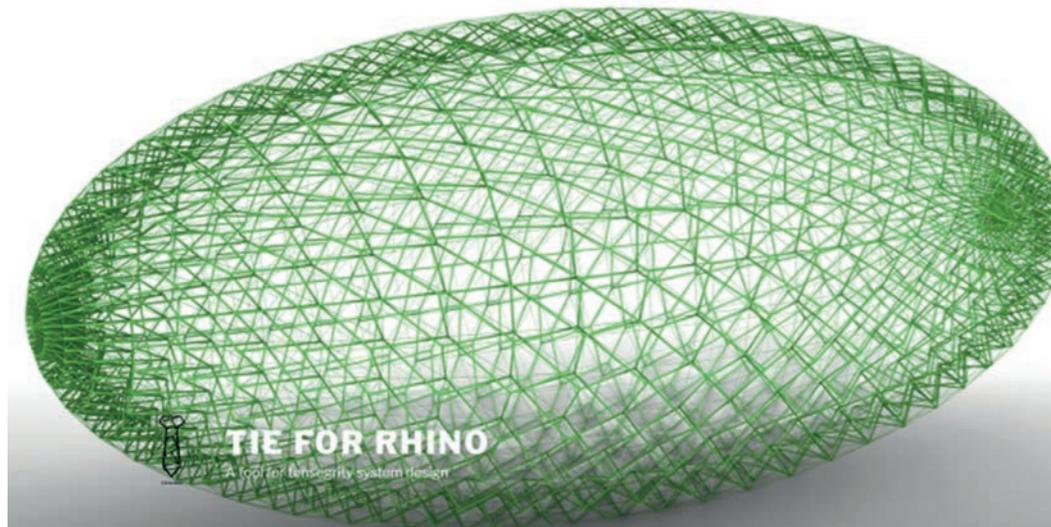
190



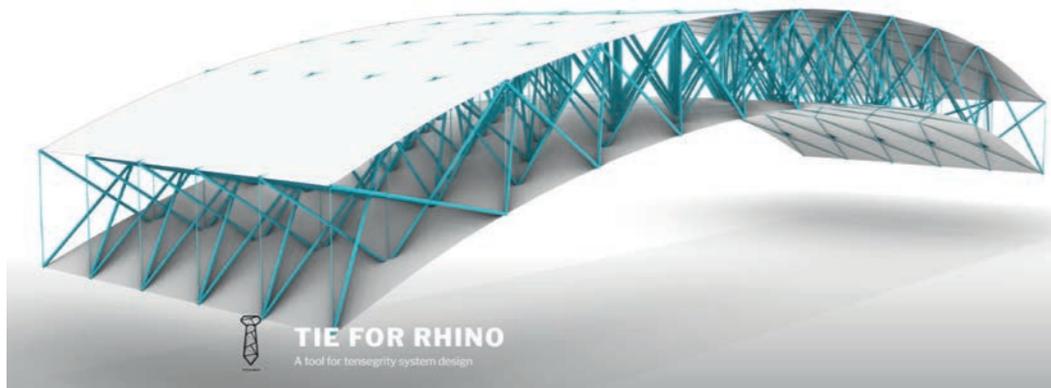
191



/ 4.3 Modelli tensegrali



192

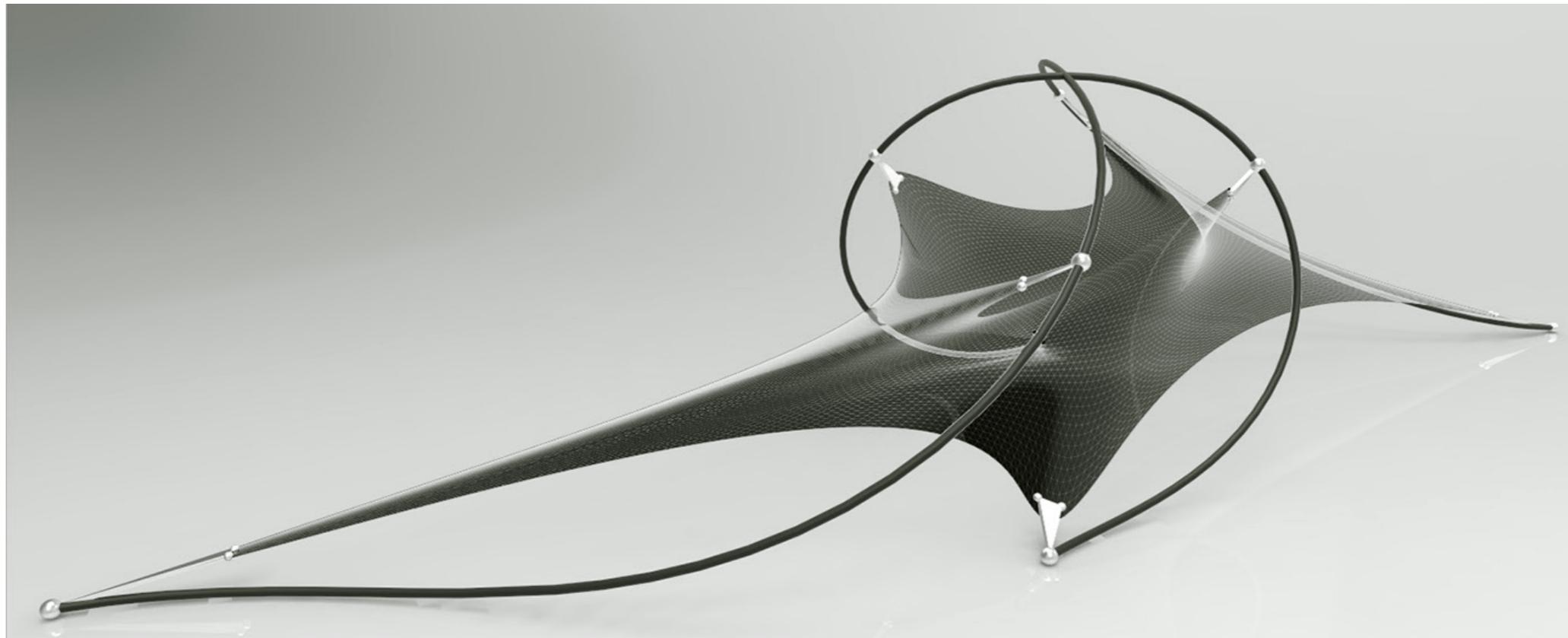


La particolarità del sistema tensegrale è data dalla presenza di elementi discreti rigidi e distinti, sottoposti a compressione, e da elementi continui tali da definire una “rete” di tensione continua. Gli elementi compressi non si toccano tra di loro ma sono sostenuti dalla “rete” di elementi in tensione delineando il sistema e conferendo la percezione di una struttura fluttuante nello spazio.

Una struttura così fatta diventa anche più forte quando viene caricata: nessuno dei singoli elementi subisce un momento flettente e non ci sono sollecitazioni di taglio all'interno del sistema.

Il carico consente al materiale di essere in tensione mantenendo così l'integrità strutturale e la stabilità meccanica, con la conseguenza che in questo modo gli elementi restano in tensione o compressione all'aumentare delle sollecitazioni sulla struttura.

193



render 3D di una struttura tensegrale
con montanti curvi e membrane

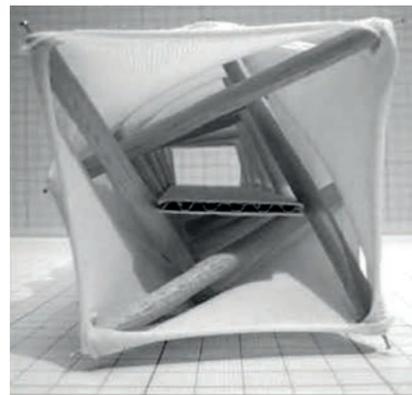
In generale, il sistema funziona unendo le forze opposte e, secondo Fuller, è la “base strutturale della natura, capace di, con un minimo di elementi, di formare una struttura forte”.

Gli elementi strutturali possono essere costituiti da qualsiasi materiale che assolve alle stesse funzioni meccaniche, purché la geometria definisca l'equilibrio di forze di trazione e compressione. Tali modelli hanno interessato gli ingegneri, che hanno proposto una nuova terminologia, gli artisti, che hanno provato a realizzarli, i matematici, che hanno provato a renderli modelli applicabili, i biologi, che hanno affrontato il tema conducendo esperimenti e considerazioni sulla loro evoluzione.

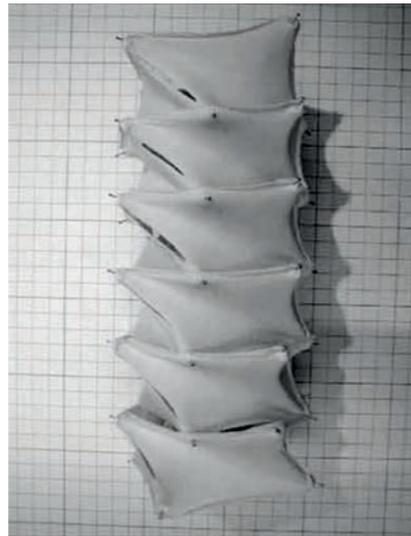
Tensegrità con le membrane

La geometria è basata sulla concezione di un modulo base poligonale o poliedrico (unità tensegrale) e la sostituzione dei componenti geometrici quali aste, cavi e giunti con la superficie della membrana.

La geometria è generata dal taglio di membrane tessili, a forma di rombo o diamante che sono disposte in direzione obliqua o in posizione diagonale. Le barre sono unite ai punti finali della membrana. Le aste sono legate al modello adiacente su uno dei suoi vertici, e così via. Le unità legate possono essere chiuse unendo la prima asta e l'ultima con la membrana stessa.



modellini realizzati con membrana continua e puntoni



Latex



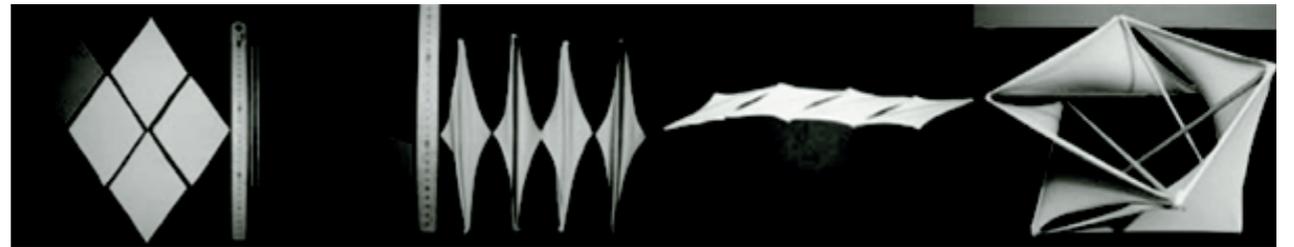
rete di plastica



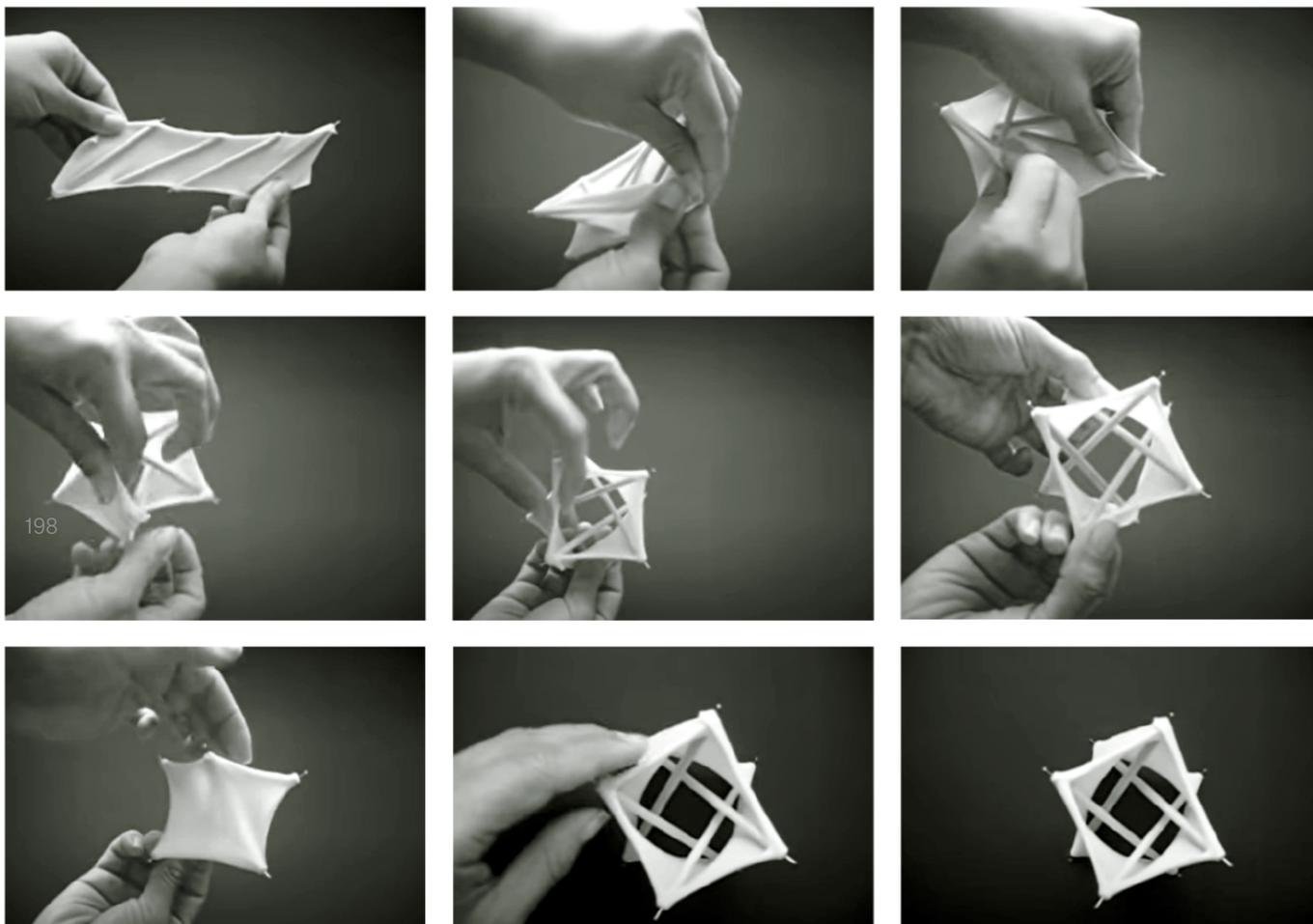
Lycra



modelli realizzati con membrane continue in materiali diversi



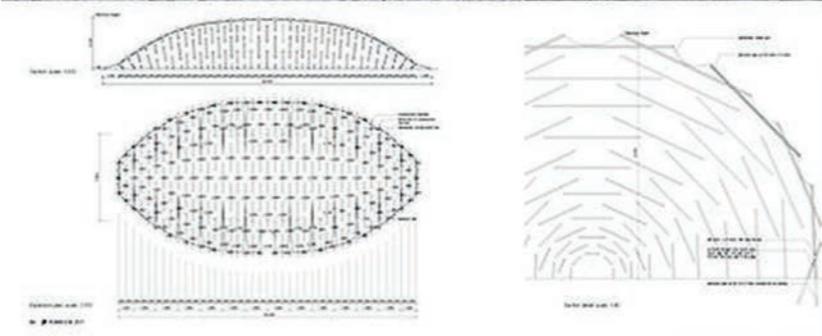
modellini realizzati con membrana continua e discontinua



tensegrity con membrane continue
(vedi QR code)



Uno degli esempi di applicazione è il pagiglione MOOM
(cfr cap. / 0.1.3, pag. 70)
Il sistema tensegrale si realizza nelle linee di tensione
principali e quasi lineari, visibili nelle pieghe del tessuto tra gli
elementi di compressione.
La membrana potrebbe essere considerata come un
continuum delle forze di tensione, ovvero i cavi in tensione
sono in pratica sostituiti dalla membrana elastica.





messa in opera del padiglione MOOM (vedi QR code)



05/ Stato della ricerca

/ 05.1

Sperimentazioni
e ulteriori sviluppi

/ 05.1 Sperimentazioni e ulteriori sviluppi

L'applicabilità pratica delle strutture tensegrali nella progettazione ha fatto sì che sia stata superata la concezione che non siano in grado di andare oltre la dimensione artistica e simbolica entro cui vengono lette e percepite tante opere sia di Fuller e ancor più quelle di Kenneth Snelson o di Tom Flemons, al pari cioè di una suggestiva quanto emozionante installazione o di una performance artistica.

Oggi si va ben oltre quella attenzione che nei decenni passati ha guardato alle tensegrity come puri giochi per la mente, "food for thought", per citare la definizione che ne diede Jörg Schlaich, l'ingegnere di Stoccarda che ha progettato una delle opere più note realizzate con tale tecnologia, la Tensegrity Tower di Rostock (cfr pag. 164).

Il loro studio è stato inserito in alcuni corsi universitari, vengono presentate in apposite sessioni dei convegni specializzati e si vanno moltiplicando esempi di realizzazioni anche quando non sono perfettamente rispondenti alla definizione canonica di tensegrity.

Le proprietà dei sistemi tensegrali trovano applicazione nei più svariati ambiti e forniscono in diversi casi modelli teorici per la comprensione di fenomeni naturali o biologici.

Esiste anche una letteratura che richiama il concetto di tensegrità per spiegare fenomeni psico-sociali di attrazione e repulsione.

Lo stesso Buckminster Fuller richiamava le peculiarità di questi sistemi per dimostrare le sue teorie metafisiche sulla reale natura delle forze che regolano l'universo.

La parola "tensegrità" infatti non descrive una struttura, un'opera d'arte o un oggetto definito bensì una relazione di equilibrio tra tensioni opposte.

Attualmente la ricerca è orientata ad una maggiore conoscenza del potenziale del sistema tensegrale, allo sviluppo di diverse possibili applicazioni e alla generazione di nuove forme.

Nonostante questo campo d'indagine si possa ancora considerare di nicchia, è stata reperita ed analizzata una notevole quantità di dati, prodotti e siti internet che affrontano questo argomento.

Gli ambiti indagati sono molteplici: arte, matematica, geometria, robotica, biologia, medicina, ingegneria strutturale, ingegneria aerospaziale, architettura, design e addirittura psicologia, filosofia e metafisica.

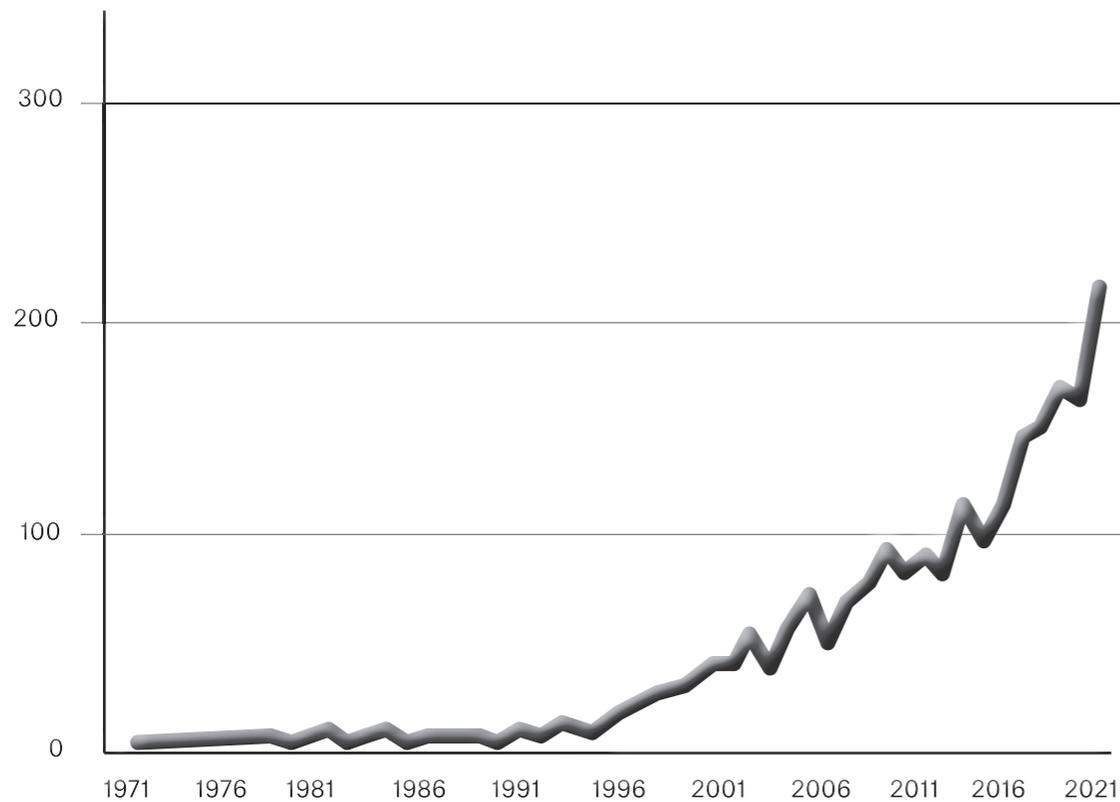
Ricerca per parole chiave su banca dati Scopus

keyword "tensegrity"

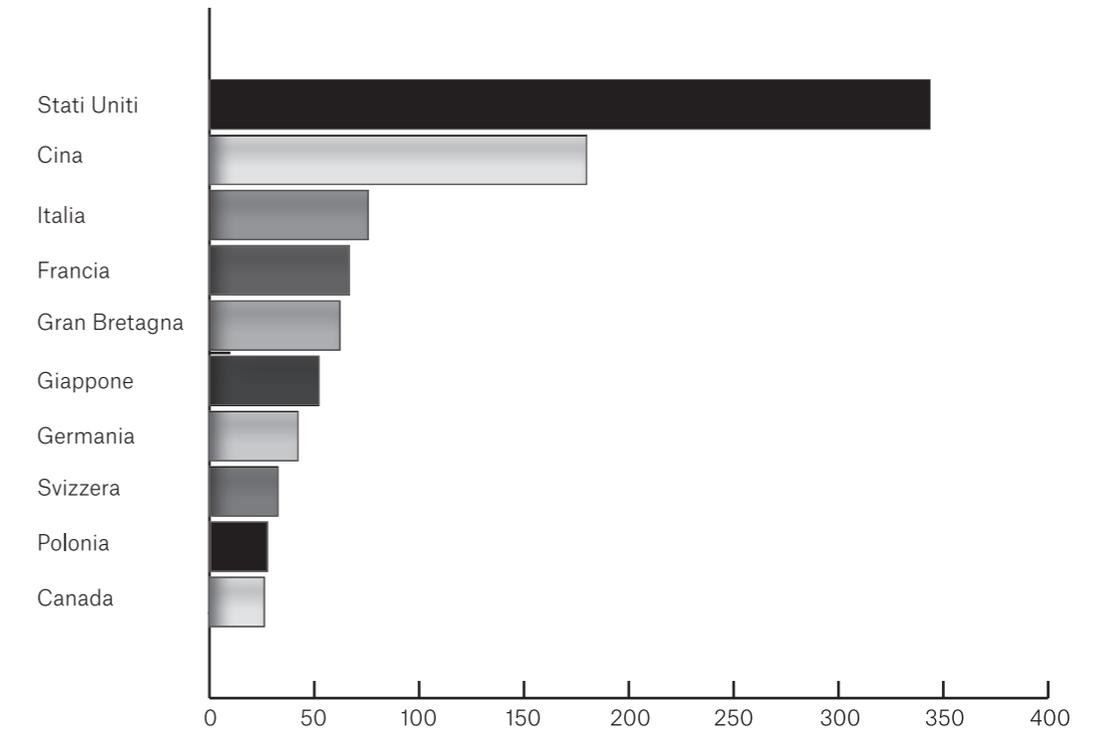
Le banche dati dei sistema informativi citazionali di tipo tecnico scientifico, come ad esempio Scopus, consentono di osservare il trend e constatare quanto questo argomento abbia acquisito crescente interesse nel tempo. I dati sono restituiti come grafici di analisi che evidenziano le tendenze e lo stato attuale dell'attività di studio e ricerca. Ad esempio dal grafico del trend temporale è evidente che l'attenzione della ricerca verso questo argomento abbia avuto un incremento sostanziale più di vent'anni fa. Non è da escludere che con l'evoluzione delle tecnologie e dei materiali la ricerca si sia orientata verso soluzioni strutturali alternative realizzabili più facilmente ora che in passato.

206

trend temporale

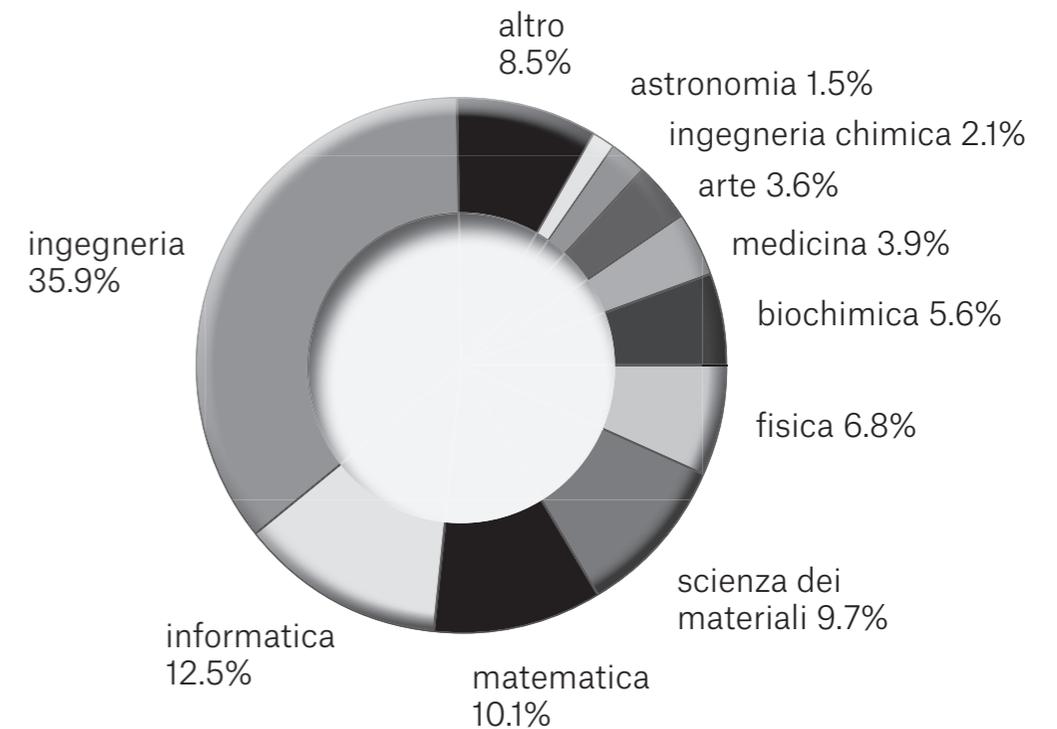


trend per nazione



207

trend per disciplina % di incidenza



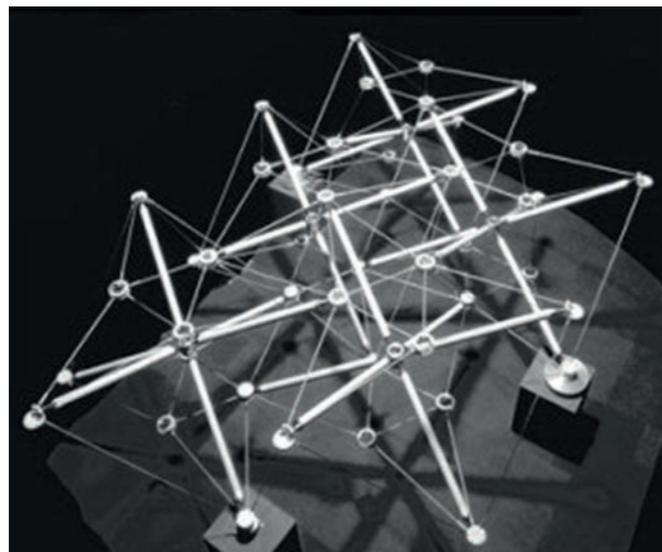
dati aggiornati maggio 2022

Strutture tensegrali come "sistemi attivi"

Recentemente diverse ricerche si sono orientate sulla possibilità di trasformare le strutture tensegrali in sistemi attivi.

Il fatto che questi sistemi siano costituiti da aste collegate da cavi lascia ipotizzare che agendo sul sistema si possano smorzare gli effetti dinamici e le vibrazioni dovute ad esempio all'effetto del sisma o del movimento di un carico sulla struttura, oppure alla possibilità di monitorare in tempo reale il livello di tensione presente in ogni elemento di una copertura tensionata.

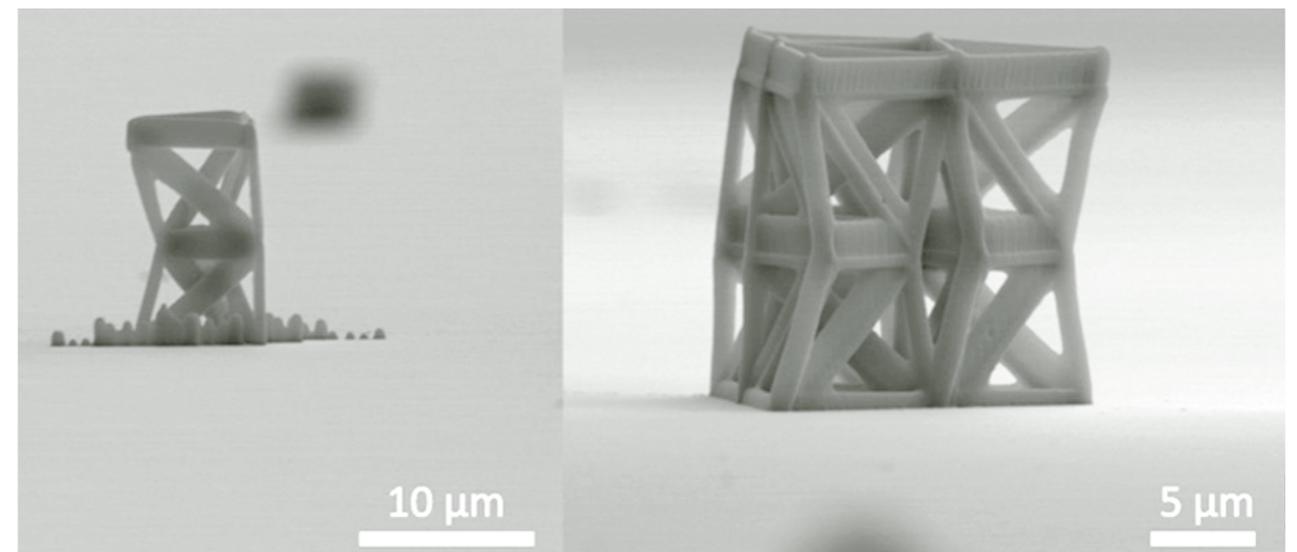
Sono stati eseguiti studi di fattibilità e diversi gruppi di ricerca hanno realizzato sistemi attivi in scala. Per mezzo di attuatori elettrici in sincronia collegati a dei computer, in tempo reale sono stati in grado di misurare le vibrazioni della struttura ed attivare un'azione sui componenti tale da generare un effetto smorzante.



Metamateriali

La geometria tensegrale è particolarmente adatta per la creazione di reticoli in microscala tramite formatura additiva con litografia a multifotone, restituendo ottime risposte statiche e dinamiche.

La stampa di oggetti tridimensionali su scala nanoscopica può essere realizzata grazie alla tecnica chiamata litografia a due fotoni. La stampa tridimensionale fa uso di una particolare resina liquida che viene indurita in maniera estremamente precisa nei punti investiti da un raggio di luce laser concentrata. Il punto di fuoco del raggio laser è indirizzato nella resina mediante una serie di specchi movimentabili e lascia dietro di sé una striscia di polimeri solidi, dell'ampiezza di poche centinaia di nanometri, rendendo possibile la realizzazione di nanosculture piuttosto complesse grandi quanto un granello di sabbia.

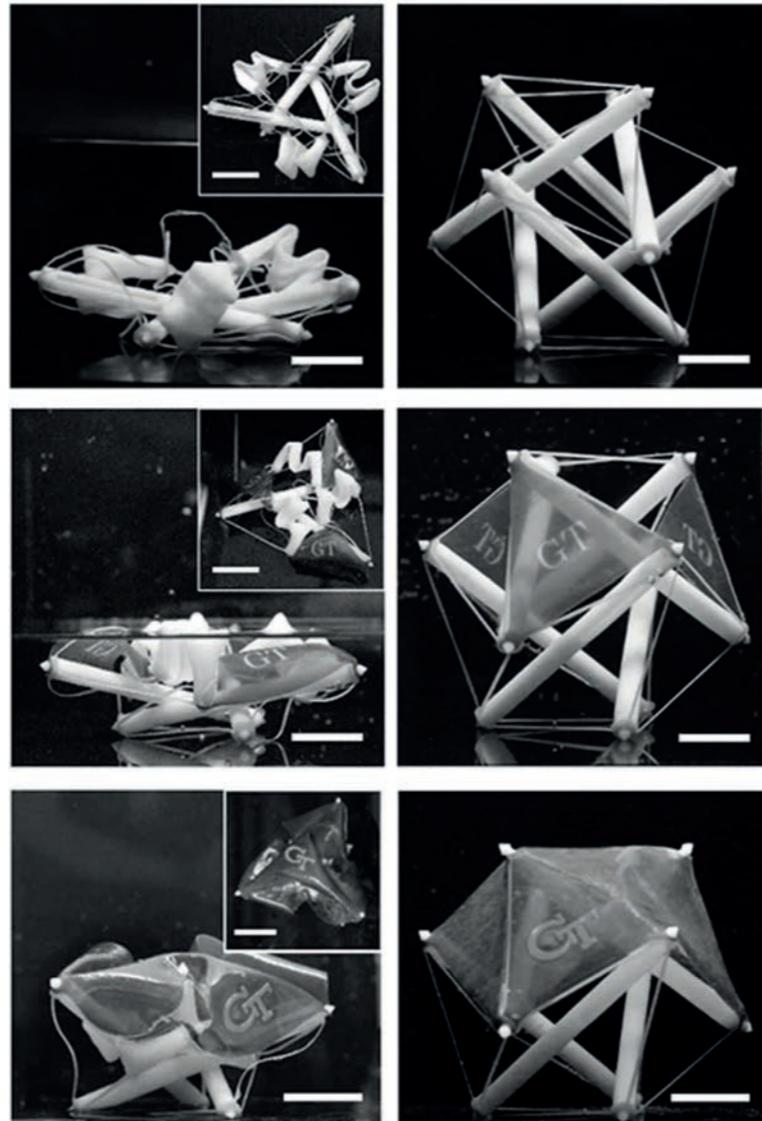


Dispiegamento programmabile di strutture tensegrali mediante polimeri reattivi allo stimolo

(SMP – polimeri a memoria di forma)

Le strutture di tensegrali sono adatte per applicazioni dispiegabili. Composti da puntoni discontinui e cavi continui, tali sistemi sono strutturalmente stabili solo quando l'auto-sollecitazione è indotta; altrimenti, perdono la configurazione geometrica originale (pur mantenendo la topologia) e quindi possono essere strettamente imballati.

Questa caratteristica viene sfruttata utilizzando polimeri reattivi allo stimolo per la creazione di strutture 3D attivamente implementabili con forme complesse. Il cambiamento di forma dei materiali intelligenti stampati in 3D aggiunge una dimensione attiva allo spazio configurazionale di alcuni componenti strutturali. Queste proprietà permettono ai sistemi strutturali di raggiungere cambiamenti di forma notevoli, rendendoli ideali come piattaforma per strutture super leggere, robot che cambiano forma, antenne e dispositivi biomedicali.



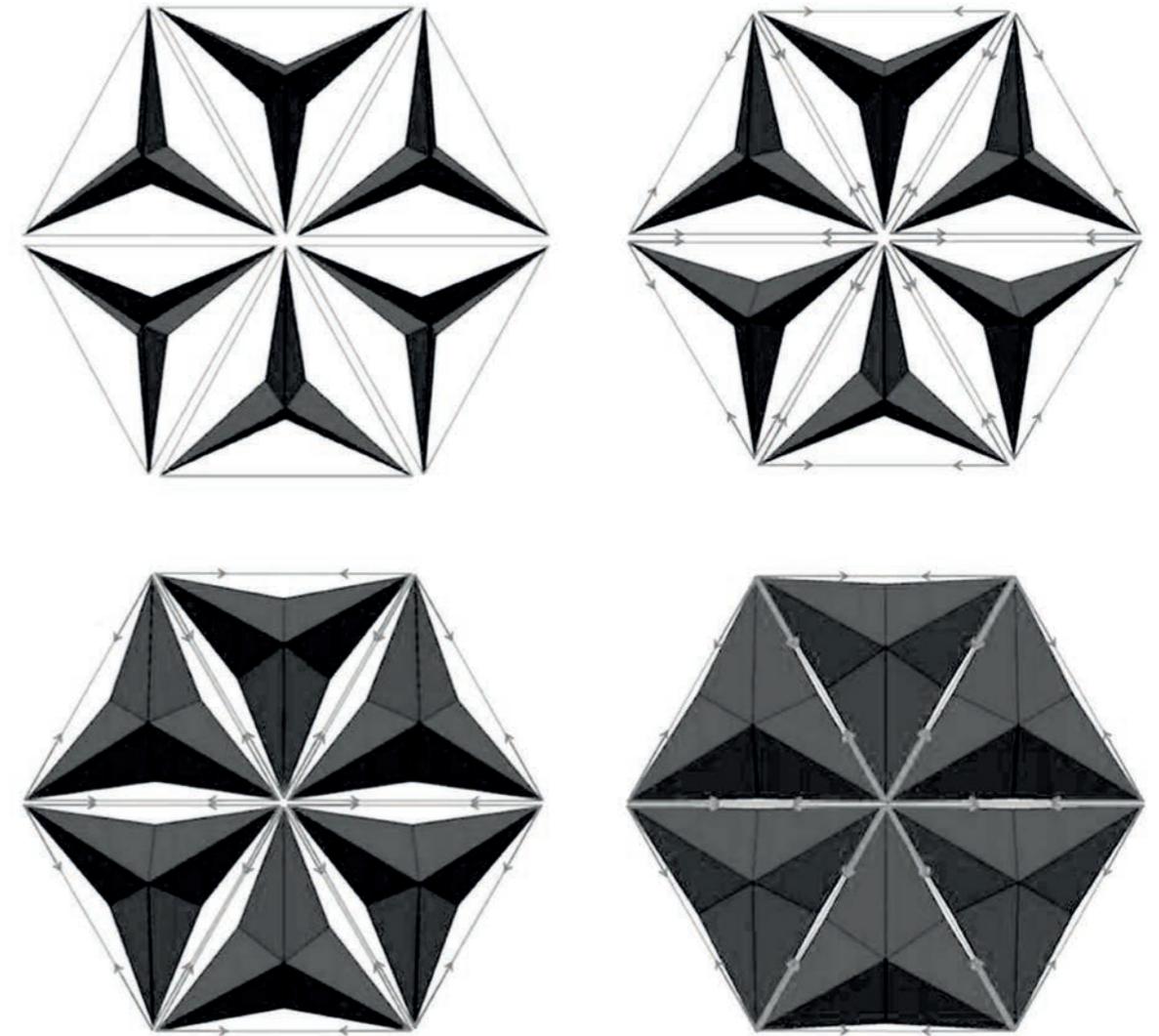
Robot morbido a forma di stella marina stampato in 3d una struttura Tensegrity (team di ricercatori dell'Istituto nazionale di scienza e tecnologia di Ulsan , Corea del Sud - 2020)

Con una combinazione di montanti rigidi e una rete multidirezionale di tendini, le strutture di tensegrità possono fornire sia integrità strutturale che flessibilità con una manipolazione intelligente dei tensori. Tali concept, integrando anche materiali intelligenti, o funzionalmente classificati nelle strutture di tensegrità, possono essere ulteriormente funzionalizzati con una migliore controllabilità.



Schermature solari per ventilazione naturale tipo "mashrabiyya"

Sfruttando strutture con capacità di "morphing" sono stati modellati degli schermi solari per edifici energeticamente efficienti che possano modificare la loro configurazione durante le ore del giorno attraverso il controllo di un limitato numero di cavi. Gli elementi compressi degli schermi restano indeformati durante le operazioni di apertura e chiusura e possono pertanto essere equipaggiati con pannelli solari e/o membrane rigide. La capacità di morphing di tali strutture consente di progettare schermi solari attivi che richiedono un limitato consumo di energia per la loro attuazione. **La mashrabiyya è un dispositivo di ventilazione forzata naturale, usato nell'architettura tradizionale dei Paesi arabi.** La riduzione della superficie, prodotta dalla griglia della mashrabiyya, accelera il passaggio del vento. L'effetto viene amplificato dal contatto con superfici umide, ad esempio contenitori riempiti d'acqua, che diffondono il senso di freschezza all'interno della casa.



Meccanismo di azionamento di schermi solari "mashrabiyya" con architettura tensegrale. Il concetto porta alla realizzazione di schermi ombreggianti che sono notevolmente leggeri, funzionano a bassissimo consumo energetico e possono essere utilmente impiegati per raccogliere energia solare ed eolica.

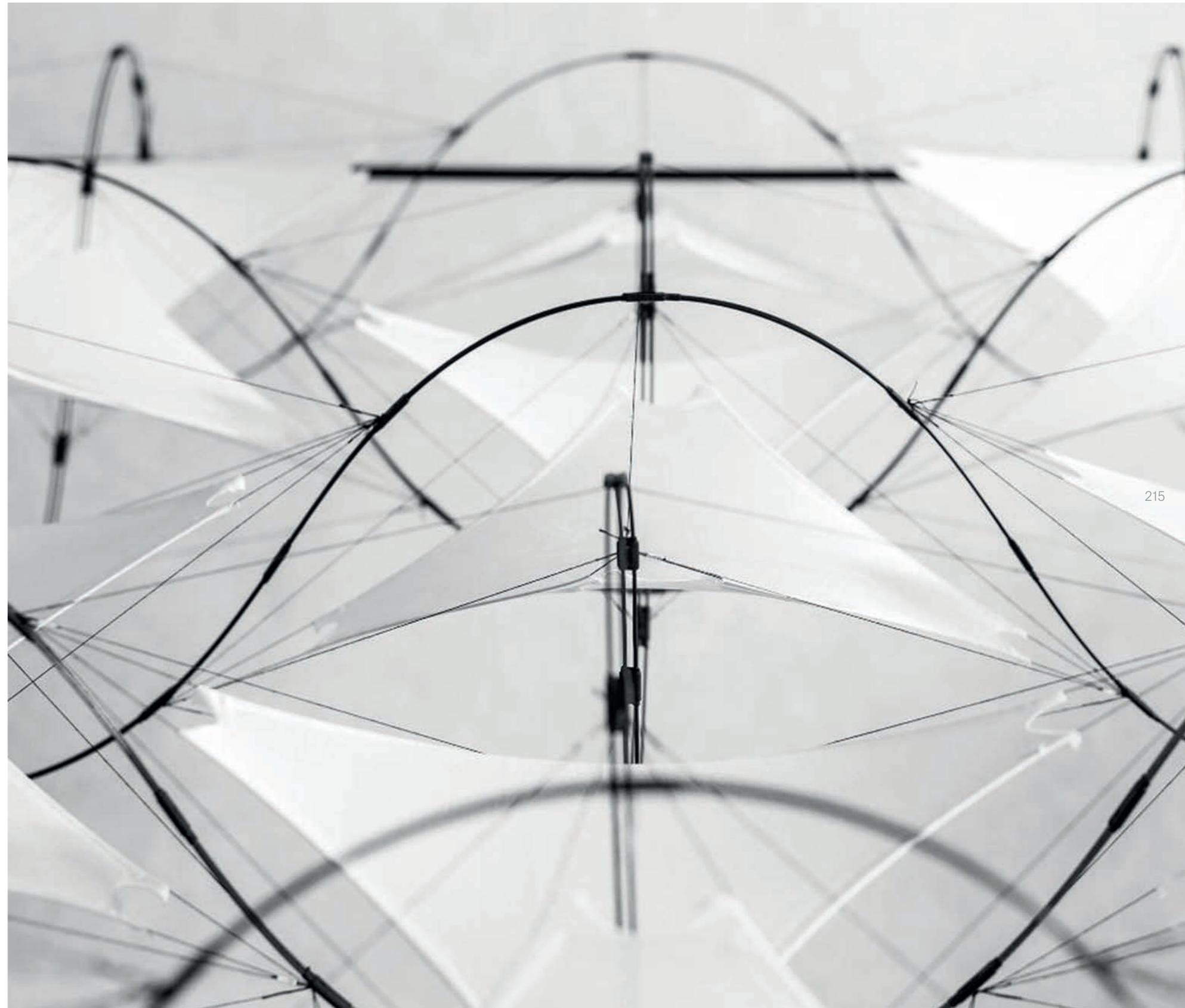
“Form Follows Tension” struttura sperimentale 2015

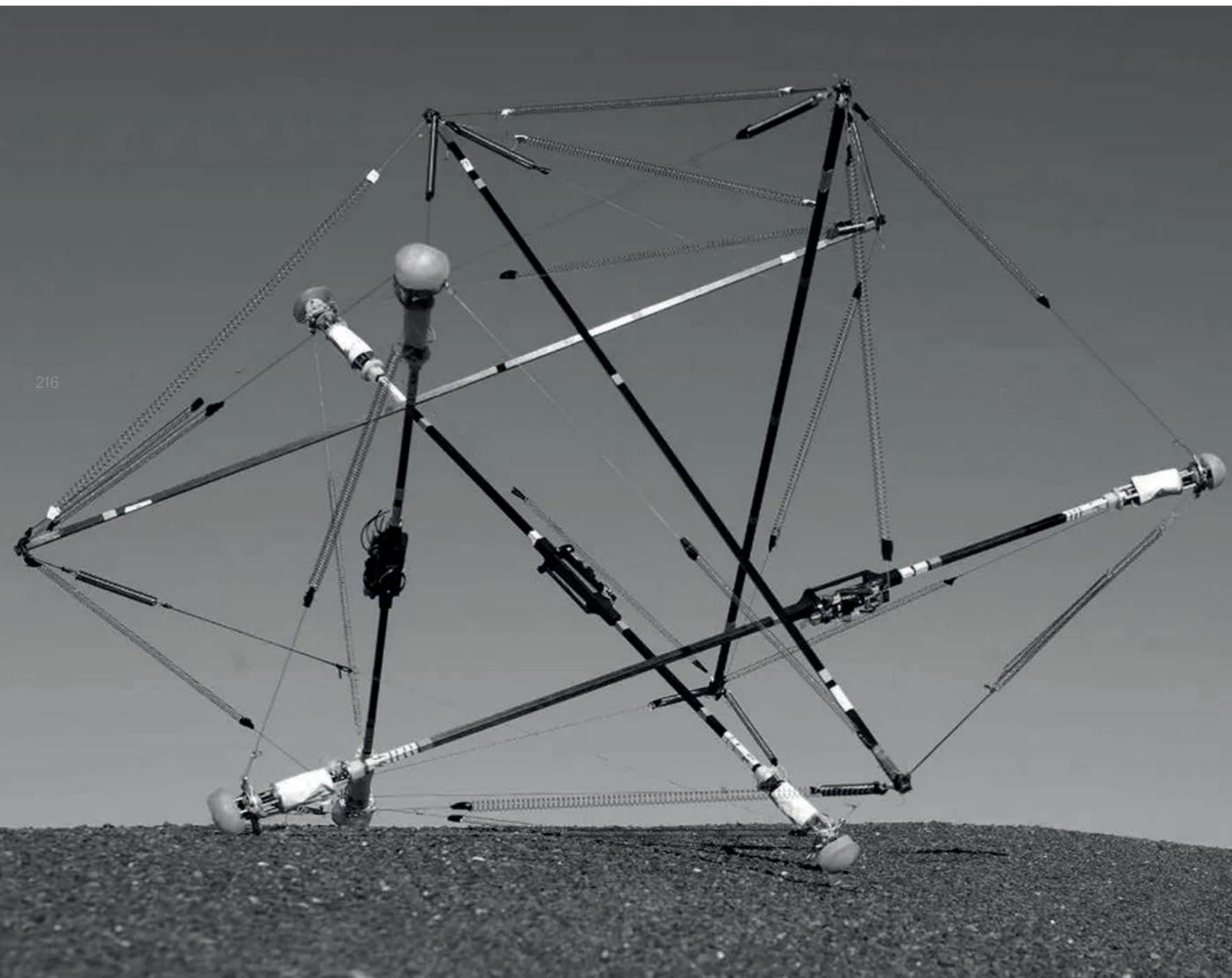
Nello studio di design “Experimental Structures”, Sebastian Huth ha sviluppato una struttura modulare paragonabile al “prototipo di griglia a doppio strato tensegrity” di R. Motro.

Tuttavia, invece della pura compressione, ha introdotto elementi elastici. Queste aste “active-bending” possono assumere la forma curva desiderata, portare la compressione e introdurre tensione ai cavi e alle membrane all’interno della struttura.

Il modulo di base consiste in due aste di acciaio elastico piegate, che sono posizionate ortogonalmente, con i loro lati concavi uno di fronte all’altro. Una membrana è legata ai loro quattro punti esterni, mentre due cavi collegano le estremità di un arco al centro dell’arco opposto. La tensione di trazione all’interno delle membrane e dei cavi equilibra e stabilizza la posizione delle aste d’acciaio.

Questi moduli sono replicati in una griglia planare ortogonale. Le aste elastiche formano curve sinuose intrecciate che non si toccano mai. Ogni intersezione è fissata da una membrana e due serie di cavi. Questo crea un sistema chiuso di tensegrità in cui tutte le sollecitazioni sono in equilibrio.





216

Nasa Super Ball Bot robot tensegrile 2016

È una piattaforma di atterraggio e mobilità all-in-one basata su una struttura di tensegrità, destinata per missioni planetarie a basso costo. Il programma Innovative Advanced Concepts della NASA (www.nasa.gov/niac) sta sviluppando un Super Ball Bot, un robot terrestre pieghevole utilizzato per gli obiettivi di esplorazione spaziale della NASA. Il Super Ball Bot ha una matrice sferica di cavi e giunti in grado di resistere alla caduta da un veicolo spaziale sopra una superficie planetaria. Una volta sul pianeta le articolazioni, oltre a contenere nel loro nucleo dispositivi per la raccolta dei dati, potrebbero adattarsi per far rotolare il bot in qualsiasi direzione. La leggerezza, l'elasticità e la capacità di dispiegamento renderebbe il robot estremamente manovrabile ed utilizzabile anche in situazioni emergenziali, come catastrofi naturali o in ausilio al soccorso sanitario in condizioni particolarmente complesse.

217

Le peculiarità dei sistemi tensegrali possono essere così sintetizzate:

Punti di forza

- l'interconnessione meccanica e funzionale di tutti gli elementi costitutivi consentono una continua comunicazione bidirezionale, come un vero e proprio network;
- assemblabili senza l'uso di leganti;
- sono strutture disassemblabili, trasformabili e di facile manutenzione;
- possono essere ripiegabili e dispiegabili;
- per loro natura sono strutture leggere;
- possono essere trasportabili;
- ottimizzano l'uso dei materiali;
- altamente modulari (strutture regolari);
- è possibile unire cellule elementari singolarmente stabili per ottenere strutture composte;
- le strutture tensegrity di 2° ordine sono solitamente più stabili di quelle di 1° ordine;
- le strutture maggiormente "triangolate" sono più rigide;
- potenzialmente possono acquisire energia dall'ambiente (es. eolica e sismica) e convertire l'energia meccanica immagazzinata nella struttura in energia elettrica;
- garantiscono la minima massa strutturale sopportando varie condizioni di carico, perchè la struttura reagisce a perturbazioni cambiando configurazione di equilibrio.

Criticità

- strutture geometricamente complesse anche se esistono sistemi dalla forma più semplice;
- difficoltà di messa in opera di strutture tensegrali di particolare configurazione geometrica;
- problema della ricerca di forma, di primaria importanza per l'analisi sia geometrica che statica;
- complessità di progettazione;
- scarsa diffusione di software e sistemi di calcolo;
- per la stabilità del sistema è fondamentale lo stato di presollecitazione interno.

L'analisi presentata in questo lavoro di tesi vuole definire le caratteristiche delle strutture tensegrali e presentarne il potenziale.

La tecnologia tensegrale si basa su un insieme di principi e proprietà che la rendono utilizzabile nei più disparati campi di applicazione, dall'arte (disciplina dalla quale trae origine) alla biologia, passando per le realizzazioni in campo architettonico ed ingegneristico e, non per ultimo, il design. In fase di analisi l'obiettivo è stato quello di riorganizzare il materiale a disposizione allo scopo di avere una base teorica sufficientemente completa e accessibile a progettisti nell'ambito del design, per poter affrontare un percorso progettuale utilizzando la strategia strutturale della tensegrità, cercando di evidenziarne sia i vantaggi che le criticità.

La ricerca proposta ha inteso analizzare e riattualizzare peculiarità e limiti delle strutture tensegrali, di potenziale interesse per il design, mettendo in risalto possibili realizzazioni tecnologiche basate su un tale sistema strutturale affascinante e alternativo, leggero e moderno.

La tecnologia tensegrale, a discapito di una laboriosa ed articolata messa in opera (le operazioni di montaggio richiedono un elevato livello di precisione) necessita di un numero ridottissimo di strumenti specifici.

Una progettazione che assuma come fondamento concettuale le strutture tensegrali rappresenta una valida risposta alla sfida progettuale della contemporaneità, sia sul piano dell'immagine, sia sull'utilizzo e la ricerca di materiali innovativi che uniscono il massimo dell'efficienza al minimo consumo di energia.

La possibilità di sfruttare materiali diversi per i suoi elementi (quali acciaio, alluminio, titanio, materiali compositi, legno, bambù), ciascuno con i suoi specifici parametri strutturali (modulo di elasticità, peso specifico, resistenza a trazione), garantisce elevati vantaggi di adattabilità e ottimizzazione del progetto, in funzione degli obiettivi prioritari di leggerezza, economicità, prestazioni strutturali e funzionalità.

Il design è legato da sempre al raggiungimento degli obiettivi di efficienza ed efficacia e **la leggerezza, che costituisce il carattere più significativo e peculiare della tensescrità, rappresenta oggi uno dei valori che più influenza la ricerca scientifica e il progresso tecnologico e che potrà incidere positivamente verso la transizione ad un'economia circolare e sostenibile.**

L'evoluzione dei materiali, l'affinarsi delle tecniche e lo sviluppo in generale delle tecnologie implicano la interconnessione e la trasversalità del sapere e la possibilità di trasferire in campi di applicazione non ancora esplorati conoscenze ed esperienze come quella della tensescrità, per soddisfare nuove esigenze specifiche e far evolvere gli oggetti che popolano la nostra quotidianità verso le sfide del futuro.

A questo ruolo è chiamato a rispondere in primis il designer, per sua natura sperimentatore, visionario e connettore di conoscenze e competenze.

Il mondo si riflette nell'armonia di tensioni opposte.

(Eraclito di Efeso)

Algoritmo: qualsiasi schema o procedimento sistematico di calcolo. successione di istruzioni o passi che definiscono le operazioni da eseguire sui dati per ottenere i risultati.

Biopolimero: bioplastiche (BP), polimeri preparati attraverso processi biologici, che conferiscono al prodotto finale un'elevata biodegradabilità.

Citoscheletro: grande rete di filamenti e tubuli connessi fra di loro che si estendono nel citoplasma, dal nucleo alla membrana plasmatica delle cellule.

Compressione: diminuzione del volume di un corpo ottenuta con mezzi meccanici; l'azione delle forze che la provocano.

Coppia: sistema di due forze uguali in modulo e direzione e con verso opposto, che applicata a un corpo tende a farlo ruotare attorno a un'asse perpendicolare al piano individuato dalle rette di applicazione delle due forze.

Costruttivismo: movimento culturale nato in Russia nel 1913, di poco precedente alla rivoluzione del 1917, che rifiutava il culto dell'"arte per l'arte" a favore dell'arte come pratica diretta verso scopi sociali.

E: modulo di elasticità longitudinale o modulo di Young, grandezza caratteristica di un materiale, che esprime il rapporto tra tensione σ e deformazione ϵ nel caso di condizioni di carico monoassiale ed in caso di comportamento di tipo "elastico" del materiale. È definito come il rapporto tra lo sforzo applicato e la deformazione che ne deriva. È definito come la costante della Legge di Hooke.

ϵ : deformazione di un corpo continuo (o di una struttura) è un qualsiasi cambiamento della configurazione geometrica del corpo che porta ad una variazione della sua forma o delle sue dimensioni in seguito all'applicazione di una sollecitazione interna o esterna.

Flessione: distribuzione delle tensioni interne di un corpo determinata dalla sollecitazione esterna.

Impalcato: sistema delle strutture di sostegno di un piano.

Legge di Hooke: relazione costitutiva di comportamento dei materiali elastici, formulata dicendo che un corpo elastico subisce una deformazione direttamente proporzionale allo sforzo a esso applicato. La costante di proporzionalità dipende dalla natura del materiale stesso.

Longherone: parte di una struttura più articolata definita telaio.

Lycra: spandex o elastam è una fibra sintetica di poliuretano molto utilizzata per elasticizzare i tessuti.

Metamateriale: materiale creato artificialmente con proprietà elettromagnetiche peculiari che lo differenziano dagli altri materiali. Le sue caratteristiche macroscopiche non dipendono solo dalla sua struttura molecolare, ma anche dalla sua geometria realizzativa. In altri termini, un metamateriale guadagna le sue proprietà dalla sua struttura piuttosto che direttamente dalla sua composizione chimica.

Momento: grandezza vettoriale dipendente da un vettore e dalla sua posizione relativa rispetto ad un punto.

Monomero: composto generalmente a basso peso molecolare, dall'unione delle cui molecole si forma un polimero: ad esempio lo stirene è il monomero del polistirene.

Newton: (simbolo: N) è l'unità di misura della forza; fa parte delle unità di misura derivate del Sistema internazionale di unità di misura (SI).

SMP: polimeri a memoria di forma - appartengono alla classe degli smart materials, definiti come quei polimeri che hanno l'abilità di tornare da uno stato deformato (forma temporanea) a quello originale (forma permanente) tramite uno stimolo esterno (attivazione).

Sollecitazione: azione di una o più forze su un sistema.

Strallo/strallato: elemento strutturale del ponte strallato. Tirante inclinato che parte dalla sommità dell'antenna e a cui è sospeso l'impalcato del ponte strallato.

Taglio: sollecitazione al taglio quando, ad esempio, su una trave è applicata una forza T agente nel piano della sezione della trave stessa e quindi perpendicolarmente al suo asse. L'effetto del taglio è quello di produrre uno scorrimento tra due sezioni adiacenti.

σ : tensione ovvero lo stato derivante dall'applicazione di una o più forze di trazione.

Tensostruttura: struttura realizzata con materiali mantenuti in posizione tramite tensione.

Torsione: sollecitazione cui è sottoposto un corpo allungato quando una sua sezione viene fatta ruotare rispetto a un'altra; anche, l'effetto di tale sollecitazione.

Trazione: qualsiasi forza che agisce su un corpo tendendo ad allungarlo nella sua stessa direzione.

Trefolo: elemento costruttivo delle corde, costituito da un insieme di fili elementari fra loro ritorti.

/ Bibliografia e tesigrafia

bibliografia:

Calvino I., Le città invisibili , Oscar Mondadori; 1972

Motro R., Tensegrity Structural Systems for the Future, London & Sterling; 1988

Skelton R. E., De Oliveira M. C., Tensegrity Systems, Springer; 2009.

Sthenly Gan B. , Computational modeling of tensegrity structures, Springer; 2019

Scarr G. , Biotensegrity, the structural basis of life, Handspring; 2014

Del Curto B. , Marano C. , Materiali per il design: introduzione ai materiali e loro proprietà, Ambrosiana; 2012

Waddell T. , Design without fashion, Skira; 2010

Waddell T., L'impossibilità strutturale della tensegrity structure, Made in Cassina; 2008

Snelson K., Art And Ideas, Web Publication; 2013

Manzini E., La materia dell'invenzione: materiali e progetto Arcadia Edizioni; 1986 *(estratti dal web)*

Autori vari, Department of Civil Engineering, University of Salerno, Design and Testing of Bistable Lattices with Tensegrity architecture and nanoscale features fabricated by multiphoton lithography; 2020 - articolo

Dal Co F., "Tensegrity: Ohel Mo-ed, Fuller e Foster" - Casabella n. 889; settembre 2018 - articolo

R. Motro, Tensegrity Systems: The State of the Art; 1992 articolo

Schilng E. , Bartel R. , Ihde A. , Tutsh J. , Huth S., Bending activated tensegrity; 2015 - articolo

Ingber D. E., Tensegrity Cell structure and hierarchical systems biology; 2003 - articolo

bibliografia:

Università degli studi di Camerino - Scuola di Ateneo di Architettura e Design - "Resistenza dei materiali e forme strutturali per il design" - dispense prof. A. Zona. prof. A. Dall'Asta - 2021

Università degli studi di Camerino - Scuola di Ateneo di Architettura e Design - "Strumenti e metodi dell'ecodesign" - dispense prof. J. Mascitti, prof. D. Galloppo - 2021

Università degli studi di Camerino - Scuola di Ateneo di Architettura e Design - "Biomimetica: la lezione della natura - nuovi materiali per un design bioispirato" - dispense prof. C. Santulli - 2019

Facoltà di Architettura di Reggio Calabria, dispense di "Cultura dei materiali e cultura del progetto rapporti tra materiale, funzione e forma" - 2011

Università degli Studi di Bergamo - Dipartimento di Ingegneria A. Pizzigoni, G. Ruscica, "Tensegrity: da gioco per la mente a nuova tecnologia costruttiva" - 2013

Università degli studi di Napoli Federico II - Dipartimento di Architettura, Dottorato di ricerca in tecnologia dell'architettura C. Sicignano "Le strutture Tensegrali e la loro applicazione in Architettura" - 2017

Aalto University - Ye Feng - "Design of Freeform Membrane, Tensegrity Structure"- tesi - 2019

Università degli studi di Firenze - Dipartimento di tecnologie dell'Architettura e Design - Lorenzo Zoli: "Tecnologie innovative leggere applicate all'architettura transitoria: l'ipotesi delle strutture tensegrali" - tesi di dottorato - 2006

Università La Sapienza - Roma - facoltà di Ingegneria - Davide Conclusio - "Analisi agli elementi finiti di strutture tensegrali ed applicazioni in campo biomedico" - tesi di dottorato - 2013

Université di Montpellier - Etienne Fest: "Une structure active de type tensegrité" - tesi di dottorato - 2003

Université catholique de Louvain - L. Boucher - "Optimisation des structures de tensegrité composées de modules prismatiques" - tesi di dottorato - 2017

Escola Politecnica da Universidade de São Paulo Deifeld T. E. C., Sobre A. "Analise e os processos construtivos das estruturas tensegrity" - tesi di dottorato - 2005

sitografia:

<https://tensegritywiki.com>

<http://www.kennethsnelson.net/>

<https://www.cassina.com/it/it.html>

<http://www.biagiodicarlo.com/>

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:K%C4%81rlis_Johansons_1920_%22Gleichgewichtkonstruktion%22_\(%22Equilibrium-structure%22\)_a_Study_in_Balance.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:K%C4%81rlis_Johansons_1920_%22Gleichgewichtkonstruktion%22_(%22Equilibrium-structure%22)_a_Study_in_Balance.jpg)

<https://athanailidipanagiota.weebly.com/origins-8232and-evolution-in-tensegrity-systems.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Karlis_Johansons

<https://www.artsy.net/artwork/karl-ioganson-spatial-construction>

<https://www.e-flux.com/announcements/30035/visionary-structures-from-johansons-to-johansons/>

<https://lcca.lv/en/online-shop/visionary-structures--from-johansons-to-johansons--collector-s-box-in-english-/>

<https://www.fondazionefrancoalbini.com/>

<https://codepen.io/slshaw115/full/vGvvoV>

<http://it.knowledgr.com/00062880/Tensegrity#StruttureTensegrityFondamentali>

<https://cupdf.com/document/controversial-origins-of-tensegrity-by-gomez-jauregui.html>

<https://ita.architecturaldesignschool.com/tensegrity-structures-70887>

<https://www.yang-yu.net/tensegrity>

<http://tensegritywiki.blogspot.com/2011/11/kurilpa-bridge-analyzed.html>

https://www.arup.com/Projects/Kurilpa_Bridge.aspx

<https://ecofriend.com/eco-architecture-kurilpa-bridge-the-world-s-largest-solar-powered-footbridge.html>

<https://pdfcoffee.com/the-meseturm-in-rostock-a-tensegrity-tower-by-schlaich-pdf-free.html>
Mike Schlaich, Il meseturm di Rostock - una torre di tensegrità

[https://www.solaripedia.com/13/129/kurilpa_solar_powered_bridge_\(brisbane_australia\).html](https://www.solaripedia.com/13/129/kurilpa_solar_powered_bridge_(brisbane_australia).html)

https://en.wikipedia.org/wiki/Kurilpa_Bridge

<https://www.slideshare.net/DhruvSeth/dhruvin-kurilpa-bridge>

<https://www.fernandofraternalierearch.com/>

<https://cupdf.com/document/controversial-origins-of-tensegrity-by-gomez-jauregui.html>

<https://www.archilovers.com/projects/62561/restauro-del-museo-nazionale-di-reggio-calabria.html#info>

sitografia:

<https://www.mero.de/>

<https://www.fastcompany.com/1662554/teagues-2020-headphones-fit-perfectly-thanks-to-buckminster-fullers-genius>

<https://teague.com/>

<https://www.designboom.com/design/>

<https://www.coroflot.com/dkrieger/2020-Headphone-Concept>

<https://www.lagranjadesign.com>

<https://www.designisthis.com/blog/en/post/pallucco-bucky-lamp-lagranja-design>

<https://thetremag.com/strange-tensegrity-table-2-di-ddaa/>

<https://www.archiproducts.com/it/prodotti/>

<http://www.paoloulia.it/accortezze.html>

Expressive furniture collection of wood and textile | L + W Furniture Design (lanzavecchia-wai.com)

<https://www.nlm.nih.gov/> biblioteca nazionale di medicina

www.kennethsnelson.net

www.munart.org

<https://www.archilovers.com>

<https://www.abitare.it/>

<https://www.domusweb.it/it/progettisti/richard-buckminster-fuller.html>

<https://design-milk.com/tensegrity-michal-maciej-batosik/>

<https://www.arch2o.com/underwood-pavilion-gernot-riether-andrew-wit/>

<https://stamparein3d.it/un-robot-morbido-a-forma-di-stella-marina-stampato-in-3d-una-struttura-tensegrity>

<https://parametrichouse.com/tensile-configurations/>

<https://parametrichouse.com/membrane-tensegrity/>

<https://www.food4rhino.com/en/app/tie-tensegrity-integration-element-rhino> sito tie for rhino

<https://publish.illinois.edu/tie4rhino/>

https://mediaspace.illinois.edu/media/t/1_wi5mqjec/215397163

<https://wewanttolearn.wordpress.com/category/resources/inspiration/structures/tensegrity/>

www.nasa.gov/niac

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2019.00007/full>



Il design non è un gioco per chi non sa giocare seriamente.
Il design è social perché media tra chi progetta, chi produce e chi usa.
Il design non accetta la superficialità: un progetto trascurato è un insulto al mondo.
Il design non ammette l'approssimazione: per progettare è necessario sapere (tanto) e sperimentare (tanto tanto).
Il design non usa algoritmi.
Il design non è per esibizionisti, meglio saper scomparire nelle forme.
Il design è relazione.
Il design accetta il provocatorio ma non l'immotivato.
Il design non è irrilevante.
Il design è saper fare, sapere di saper fare e sapere se fare.

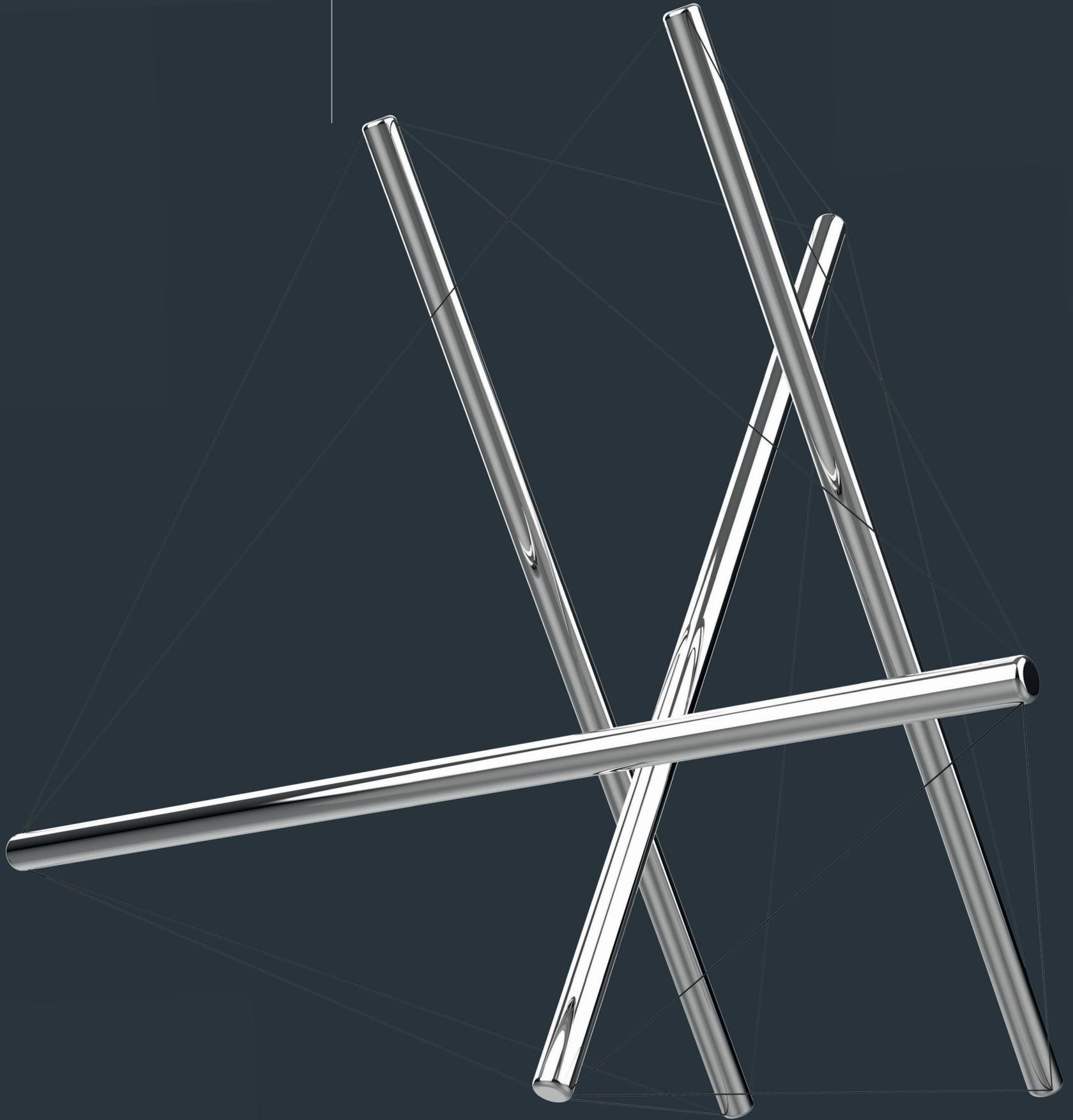
(Libero adattamento dal Manifesto della Scuola di scrittura Belleville)

leggerezza

Un design "leggero" non funziona per addizione ma per sottrazione, non toglie forza al pensiero, è un percorso tra ricerca e sperimentazione in cui la leggerezza è il risultato di un equilibrio tra segno, forma e materia. Ottenerla non è affatto semplice, forse perché appare più creativo e brillante progettare forme complesse.

resistenza

Ottimizzare al meglio le forme strutturali, mantenendo la resistenza necessaria ad assolvere la funzione per cui essa è stata progettata riduce considerevolmente la quantità di materiale impiegato e di conseguenza i relativi sprechi.



Kennet Snelson
Sun river
1967
Collezione Whitney Museum
of American Art - NY

tensione

Nella progettazione occorre seguire dei criteri per la scelta del materiale e il dimensionamento. È necessario scegliere un materiale che abbia una resistenza sufficiente per non rompersi e una rigidità sufficiente per non deformarsi più del dovuto. Lo sforzo non è una grandezza effettivamente misurabile, ma solo un'astrazione elaborata per facilitare il compito al progettista.

in-stabilità

Nel design molti oggetti stupiscono per la loro capacità di resistere alle forze a cui sono sollecitati, assolvendo alla funzione per cui sono stati progettati, ingannando percettivamente la loro stabilità. Gli oggetti che comunicano, ingannando, un'immagine complessiva instabile, non sono accettati o facilmente metabolizzati dalla nostra cultura.



S A A D

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

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale | A.A. 2020/2021

Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

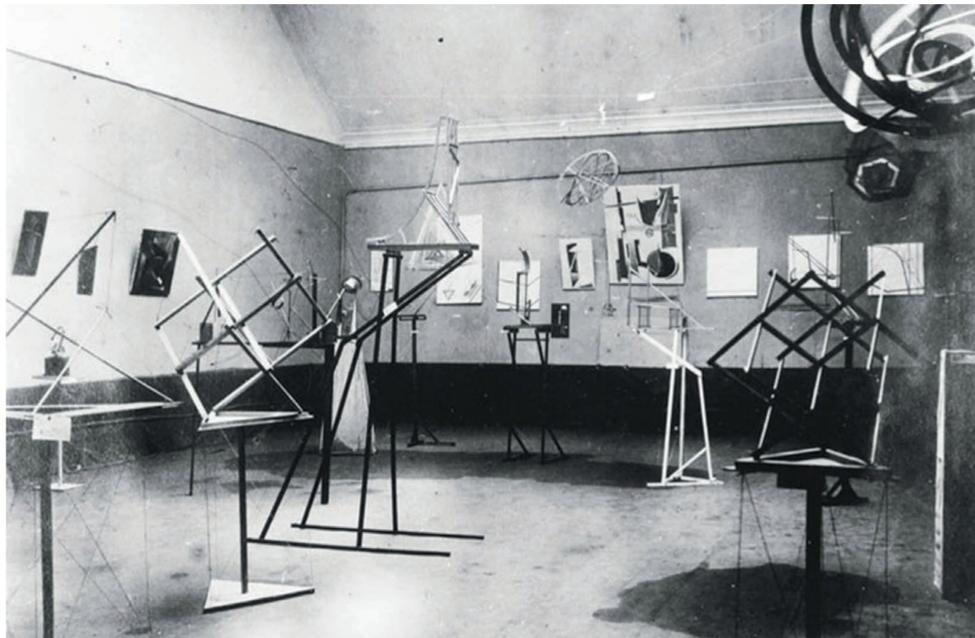
Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

A

Tensegrity

origini e storia



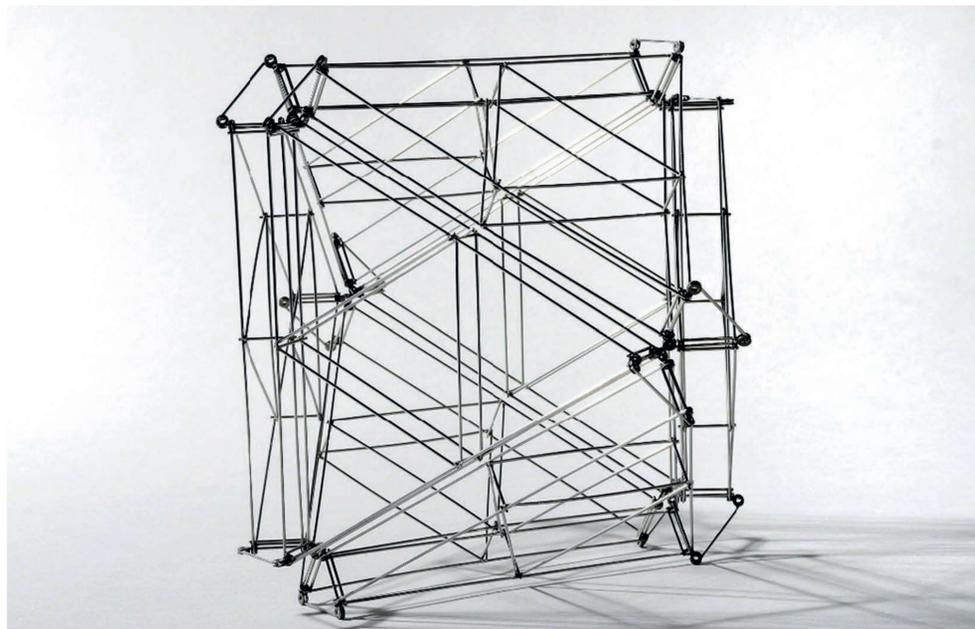
Nel 1921 i Costruttivisti espressero le loro idee in un'ambiziosa mostra sotto il patrocinio della Società dei Giovani Artisti, la OBMOKhU. Quattro artisti, Alexander Rodchenko, i fratelli Georgii e Vladimir Stenberg, Konstantin Medunetskii e Karlis loganson esposero un totale di 25 costruzioni spaziali. Le strutture tridimensionali di loganson, definite "costruzioni autostabilizzanti", mostravano gli innovativi principi di sollecitazione di tipo tensegrale.

La tensegrità (tensional integrity o floating compression), è un principio strutturale basato sull'utilizzo di componenti isolati in compressione all'interno di una rete di tensione continua, in modo tale che gli elementi compressi non si tocchino e gli elementi in tensione delineino il sistema spazialmente.

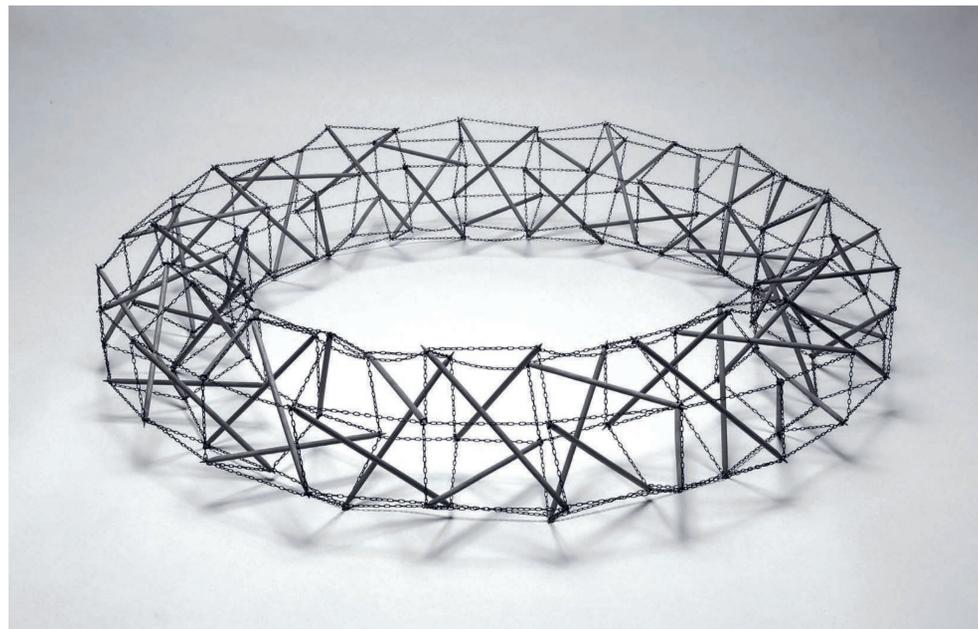
La prima struttura collocabile nella categoria del sistema prototensegrale trova riferimento nella ricerca condotta dai costruttivisti russi, mentre la scoperta delle tensegrali viene attribuita a tre studiosi: Richard Buckminster Fuller, Kenneth Duane Snelson e David Georges Emmerich.

Fuller ed Emmerich hanno concentrato i loro studi in ambito costruttivo ed architettonico, Snelson invece sull'aspetto artistico ed estetico, proponendo sculture estremamente complesse.

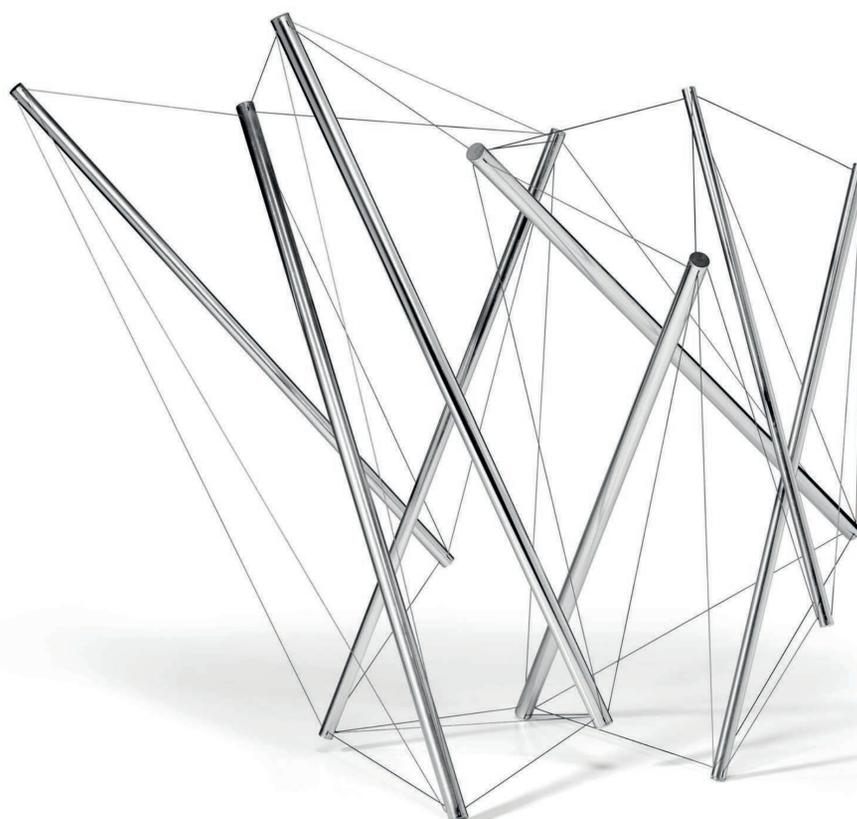
Richard Buckminster Fuller
(USA 1895-1983)



David Georges Emmerich
(FR 1925-1996)



Kenneth Duane Snelson
(USA 1927-2016)



S A A D

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

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale | A.A. 2020/2021

Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

B

Tensegrity

classificazioni e tipologie

Un sistema tensegrale è una connessione stabile di componenti assialmente caricati, detto di classe k se al massimo " k " componenti a compressione sono collegati a qualsiasi nodo.

La rigidità meccanica cresce al crescere della classe.

In funzione del numero di puntoni impiegati nel sistema tensegrale si configurano diverse classi di tensegrali ognuna delle quali è caratterizzata da una rigidità meccanica maggiore della precedente classe.

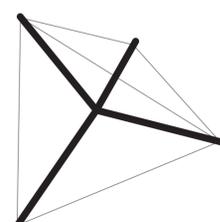
struttura tensegrale di classe 1



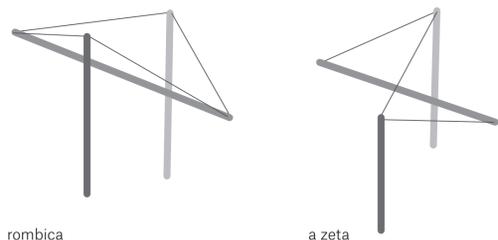
strutture tensegrali di classe 2



struttura tensegrale di classe 3



tipologie di disposizione degli elementi



rombica

a zeta



circuito

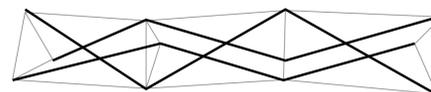
tipologie di assemblaggio



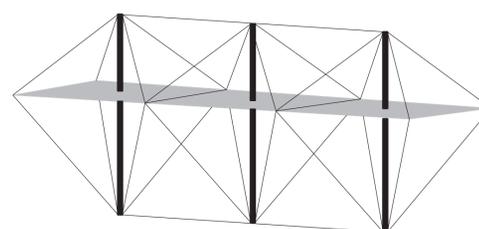
semplice



alternato



Le false strutture tensegrali si hanno quando non è possibile individuare gli elementi compressi separati fra loro o quando i bordi della struttura sono delimitati da elementi rigidi.



falso tensegrale

Cellule elementari

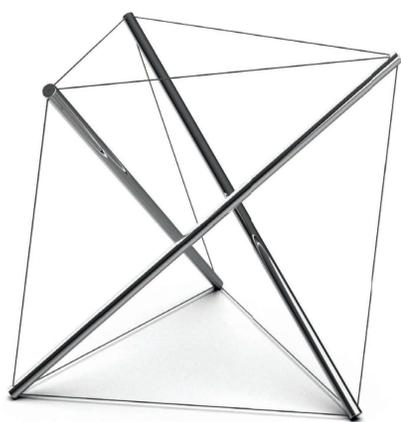
Sono tutte quelle strutture che non sono ulteriormente divisibili in singole cellule stabili. Le cellule elementari sono, per la maggior parte, strutture prismatiche classificate secondo la loro forma geometrica complessiva.

I moduli elementari più comuni sono composti da una base poligonale regolare e possono essere formati da 3, 4, 5, ...n elementi compressi. A seconda del numero delle aste, presentano diversi angoli di rotazione tra le basi.

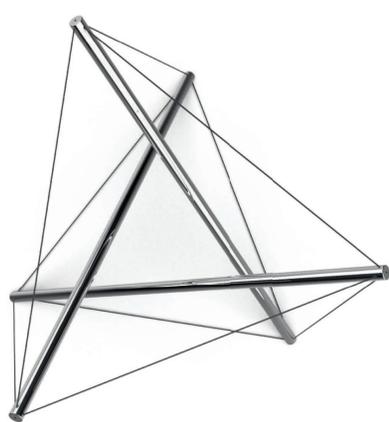
Gli angoli di rotazione si possono calcolare grazie alla formula $\alpha = 90^\circ - (180^\circ/n)$ da cui si ottiene:

- per il simplex $\alpha = 30^\circ$
- per il prisma a base quadrata $\alpha = 45^\circ$
- a base pentagonale $\alpha = 54^\circ$
- a base esagonale $\alpha = 60^\circ$

simplex $\alpha = 30^\circ$
vista laterale



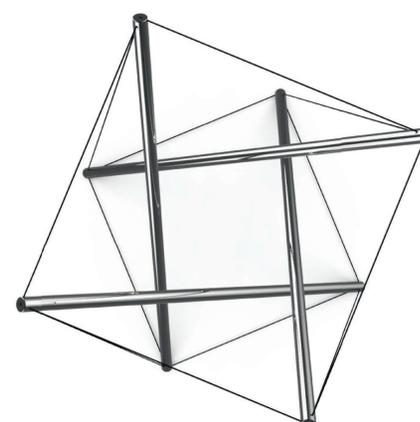
vista dall'alto



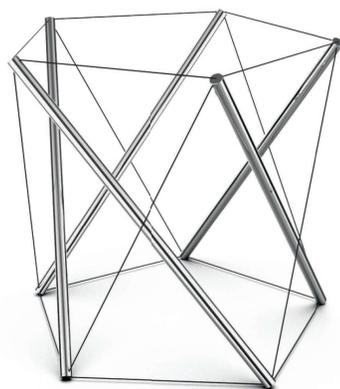
quadruplex $\alpha = 45^\circ$
vista laterale



vista dall'alto



pentaplex $\alpha = 54^\circ$
vista laterale



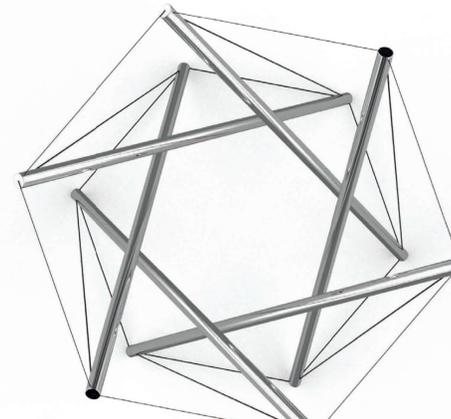
vista dall'alto



esaplex $\alpha = 60^\circ$
vista laterale



vista dall'alto



S A A D

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

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale | A.A. 2020/2021

Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

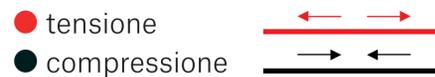
C

Tensegrity

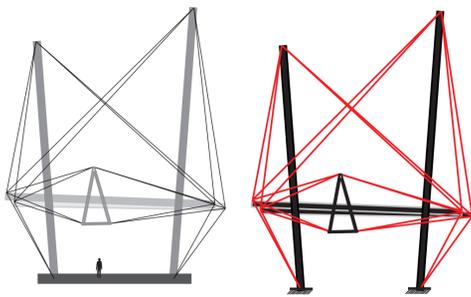
applicazioni e analisi

Le applicazioni di tensegrity si declinano in ingegneria, architettura e design presentando il medesimo meccanismo di risposta alle sollecitazioni e gli elementi in costante equilibrio reciproco.

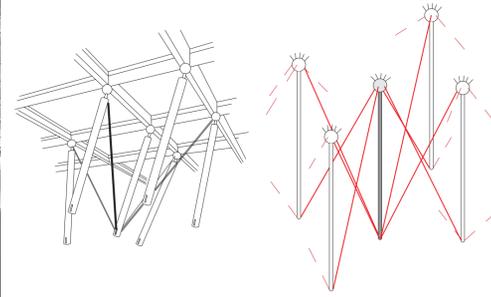
azioni di risposta alle sollecitazioni:



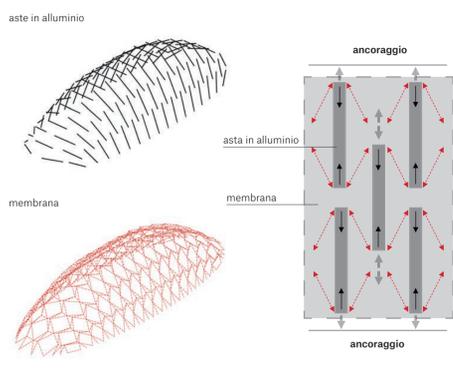
Kurilpa Bridge - ponte pedonale
Brisbane - Australia
Designer Arch. Cox Rayner, Ing. Arup
anno 2009



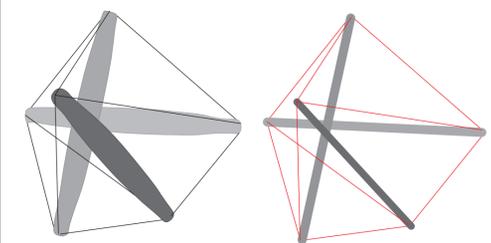
Copertura pedonale del
Museo di Storia Naturale di Reggio Calabria
Designer Studio ABDR Roma
anno 2013



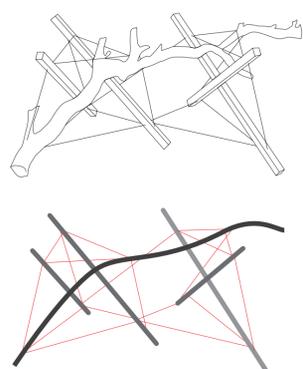
MOOM padiglione temporaneo
Tokio
C+A Coelacanth and Associates
Designer Kazuhiro Kojima
anno 2011



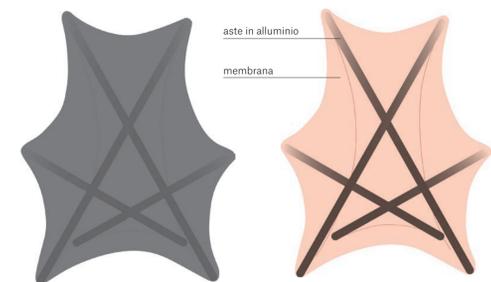
Bucki Lamp
Studio Lagranja Design - Spagna
produzione Pallucco
anno 2011



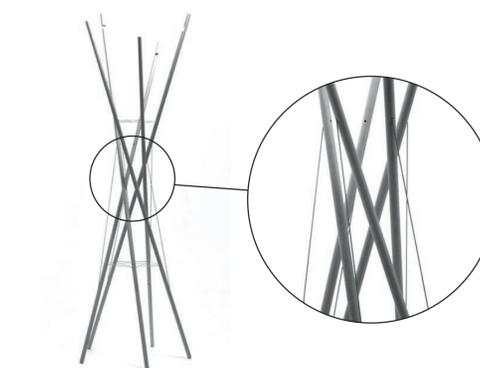
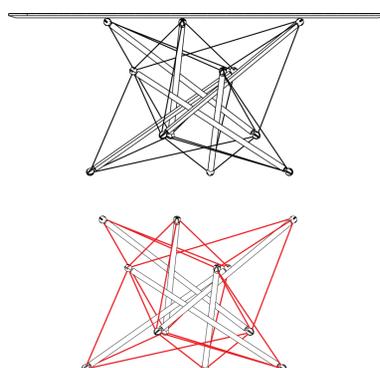
Strange Tensegrity Table 3
Designer DDAA
anno 2017 - 2019



Bag Chair
Designer James Piatt
anno 1998



Tavolo 714
Designer Theodore Waddell
produzione Cassina
anno 1973



Coat hanger tree
Design Naruse Inokuma Architects
anno 2009



S A A D
Scuola di Ateneo
Architettura e Design "Eduardo Vittoria"
Università di Camerino

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale I A.A. 2020/2021
Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

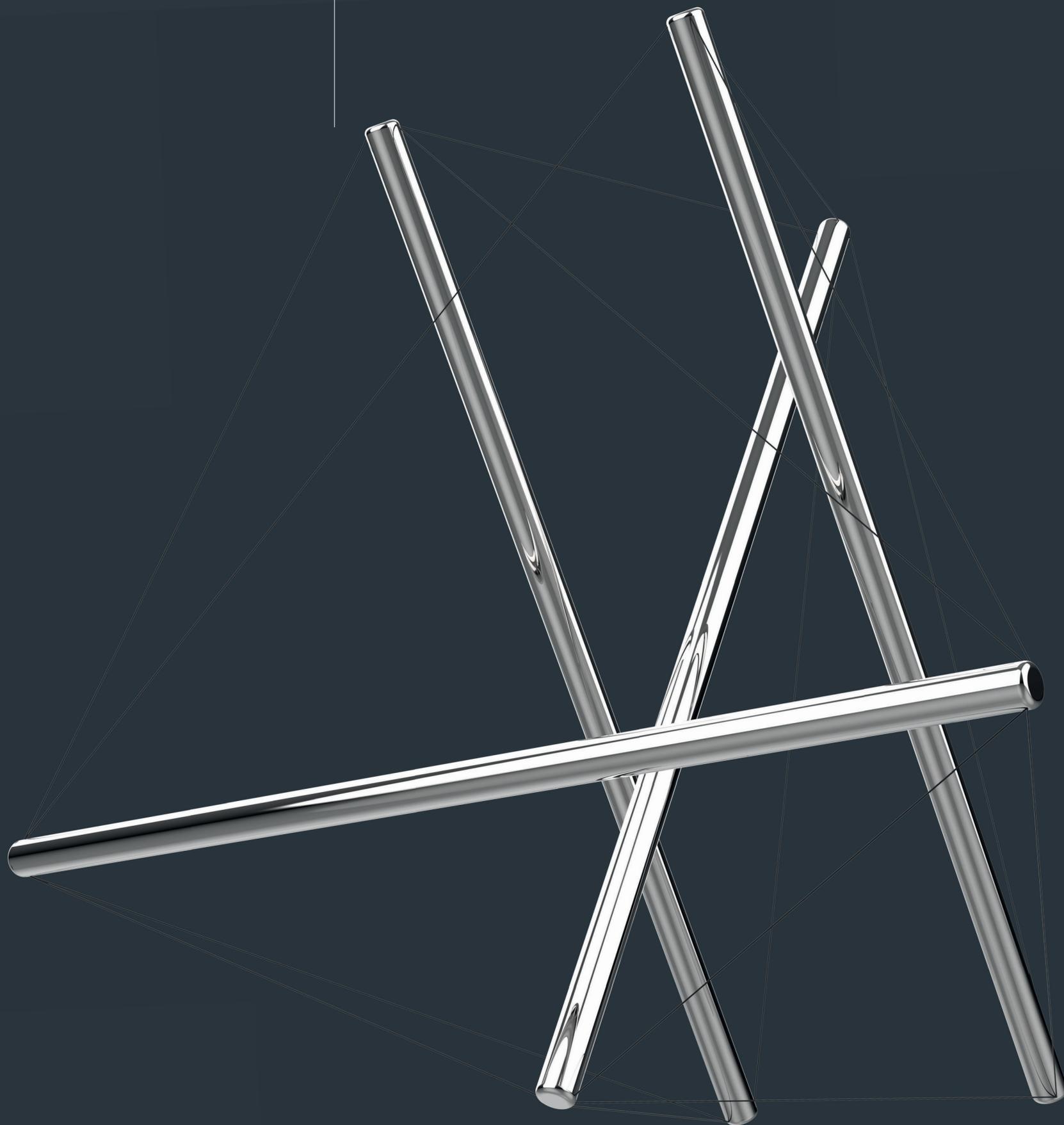
D

leggerezza

Un design "leggero" non funziona per addizione ma per sottrazione, non toglie forza al pensiero, è un percorso tra ricerca e sperimentazione in cui la leggerezza è il risultato di un equilibrio tra segno, forma e materia. Ottenerla non è affatto semplice, forse perché appare più creativo e brillante progettare forme complesse.

resistenza

Ottimizzare al meglio le forme strutturali, mantenendo la resistenza necessaria ad assolvere la funzione per cui essa è stata progettata riduce considerevolmente la quantità di materiale impiegato e di conseguenza i relativi sprechi.



Kennet Snelson
Sun river
1967
Collezione Whitney Museum
of American Art - NY

tensione

Nella progettazione occorre seguire dei criteri per la scelta del materiale e il dimensionamento. È necessario scegliere un materiale che abbia una resistenza sufficiente per non rompersi e una rigidità sufficiente per non deformarsi più del dovuto. Lo sforzo non è una grandezza effettivamente misurabile, ma solo un'astrazione elaborata per facilitare il compito al progettista.

in-stabilità

Nel design molti oggetti stupiscono per la loro capacità di resistere alle forze a cui sono sollecitati, assolvendo alla funzione per cui sono stati progettati, ingannando percettivamente la loro stabilità. Gli oggetti che comunicano, ingannando, un'immagine complessiva instabile, non sono accettati o facilmente metabolizzati dalla nostra cultura.



S A A D

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

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale | A.A. 2020/2021

Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

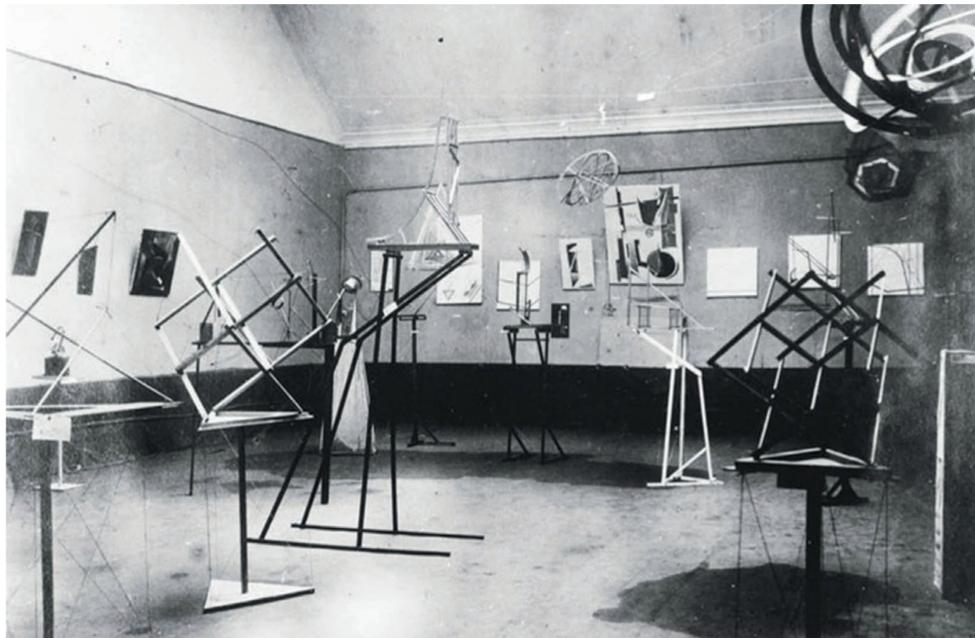
Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

A

Tensegrity

origini e storia



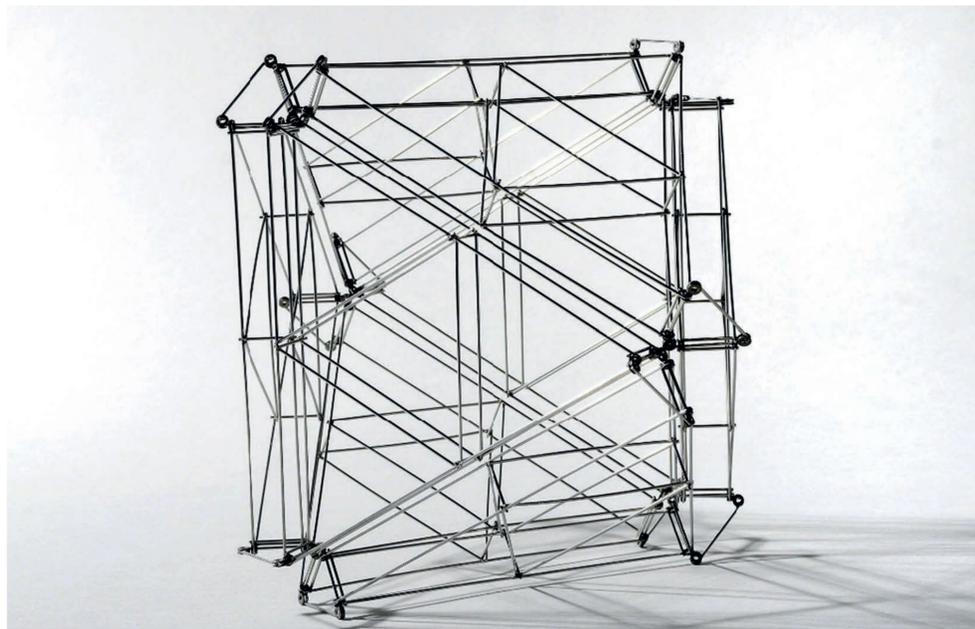
Nel 1921 i Costruttivisti espressero le loro idee in un'ambiziosa mostra sotto il patrocinio della Società dei Giovani Artisti, la OBMOKhU. Quattro artisti, Alexander Rodchenko, i fratelli Georgii e Vladimir Stenberg, Konstantin Medunetskii e Karlis loganson esposero un totale di 25 costruzioni spaziali. Le strutture tridimensionali di loganson, definite "costruzioni autostabilizzanti", mostravano gli innovativi principi di sollecitazione di tipo tensegrale.

La tensegrità (tensional integrity o floating compression), è un principio strutturale basato sull'utilizzo di componenti isolati in compressione all'interno di una rete di tensione continua, in modo tale che gli elementi compressi non si tocchino e gli elementi in tensione deliniscano il sistema spazialmente.

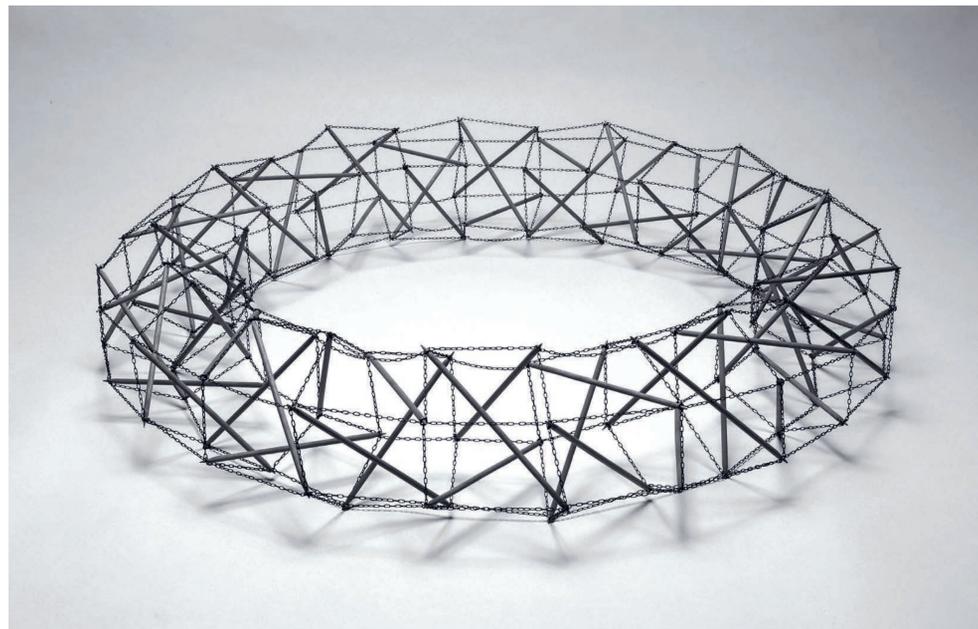
La prima struttura collocabile nella categoria del sistema prototensegrale trova riferimento nella ricerca condotta dai costruttivisti russi, mentre la scoperta delle tensegrali viene attribuita a tre studiosi: Richard Buckminster Fuller, Kenneth Duane Snelson e David Georges Emmerich.

Fuller ed Emmerich hanno concentrato i loro studi in ambito costruttivo ed architettonico, Snelson invece sull'aspetto artistico ed estetico, proponendo sculture estremamente complesse.

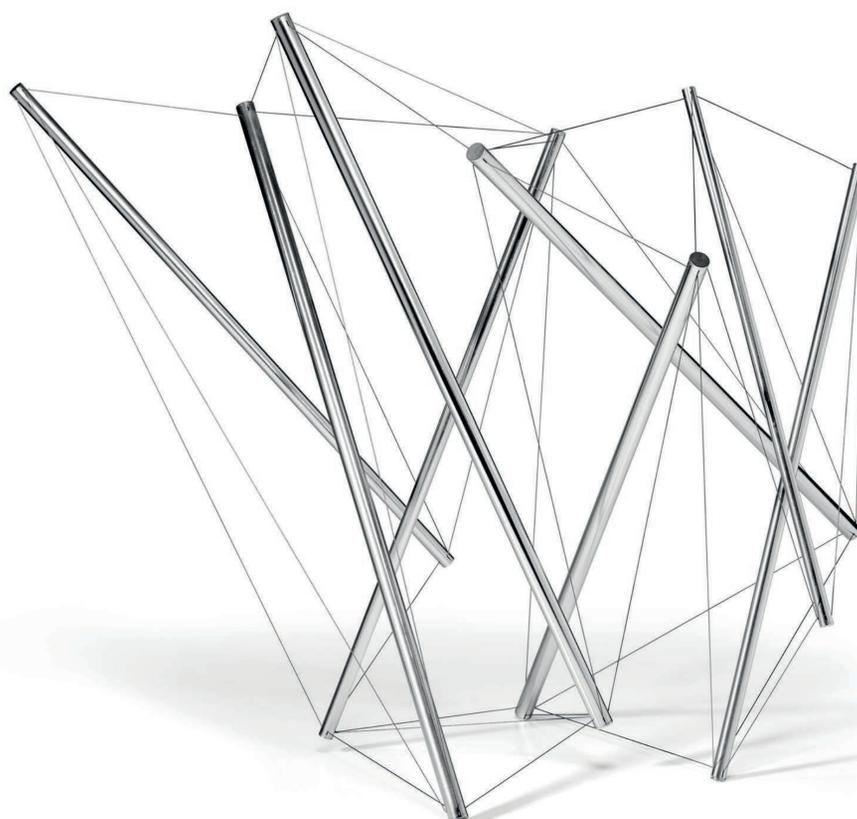
Richard Buckminster Fuller
(USA 1895-1983)



David Georges Emmerich
(FR 1925-1996)



Kenneth Duane Snelson
(USA 1927-2016)



Tensegrity

classificazioni e tipologie

Un sistema tensegrale è una connessione stabile di componenti assialmente caricati, detto di classe k se al massimo " k " componenti a compressione sono collegati a qualsiasi nodo.

La rigidità meccanica cresce al crescere della classe.

In funzione del numero di puntoni impiegati nel sistema tensegrale si configurano diverse classi di tensegrali ognuna delle quali è caratterizzata da una rigidità meccanica maggiore della precedente classe.

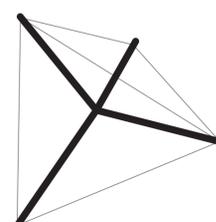
struttura tensegrale di classe 1



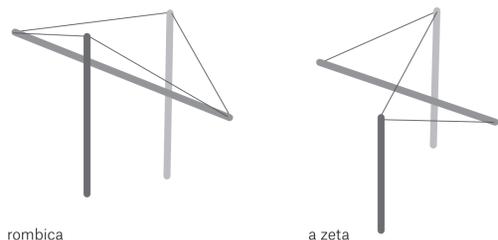
strutture tensegrali di classe 2



struttura tensegrale di classe 3



tipologie di disposizione degli elementi



rombica

a zeta



circuito

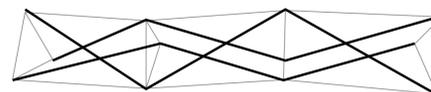
tipologie di assemblaggio



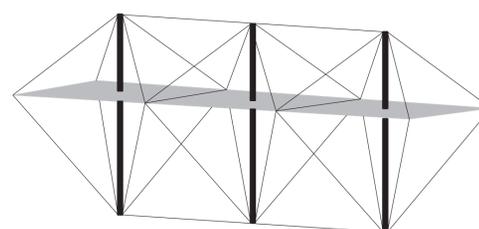
semplice



alternato



Le false strutture tensegrali si hanno quando non è possibile individuare gli elementi compressi separati fra loro o quando i bordi della struttura sono delimitati da elementi rigidi.



falso tensegrale

Cellule elementari

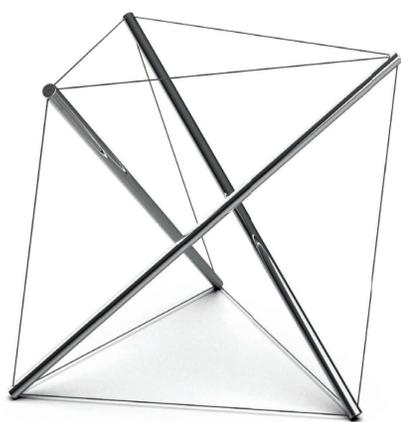
Sono tutte quelle strutture che non sono ulteriormente divisibili in singole cellule stabili. Le cellule elementari sono, per la maggior parte, strutture prismatiche classificate secondo la loro forma geometrica complessiva.

I moduli elementari più comuni sono composti da una base poligonale regolare e possono essere formati da 3, 4, 5, ...n elementi compressi. A seconda del numero delle aste, presentano diversi angoli di rotazione tra le basi.

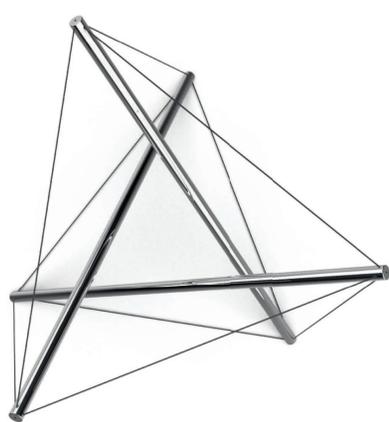
Gli angoli di rotazione si possono calcolare grazie alla formula $\alpha = 90^\circ - (180^\circ/n)$ da cui si ottiene:

- per il simplex $\alpha = 30^\circ$
- per il prisma a base quadrata $\alpha = 45^\circ$
- a base pentagonale $\alpha = 54^\circ$
- a base esagonale $\alpha = 60^\circ$

simplex $\alpha = 30^\circ$
vista laterale



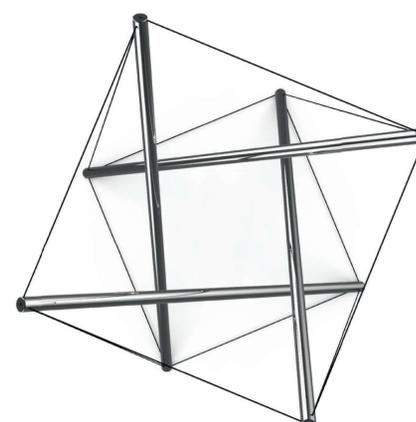
vista dall'alto



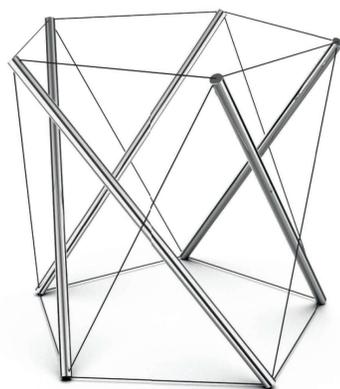
quadruplex $\alpha = 45^\circ$
vista laterale



vista dall'alto



pentaplex $\alpha = 54^\circ$
vista laterale



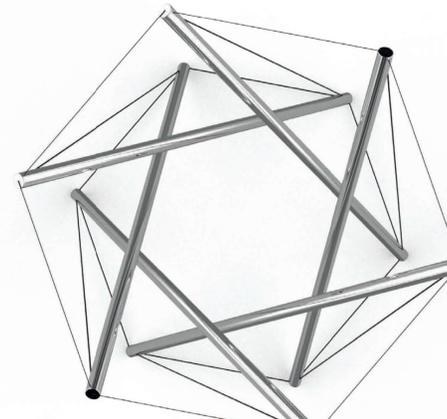
vista dall'alto



esaplex $\alpha = 60^\circ$
vista laterale



vista dall'alto



S A A D

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

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale | A.A. 2020/2021

Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

C

Tensegrity

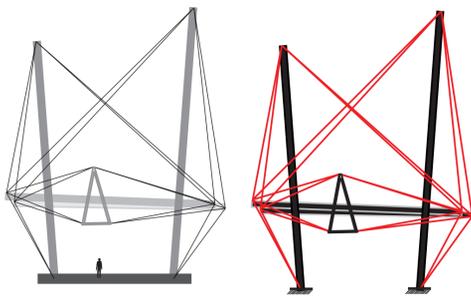
applicazioni e analisi

Le applicazioni di tensegrity si declinano in ingegneria, architettura e design presentando il medesimo meccanismo di risposta alle sollecitazioni e gli elementi in costante equilibrio reciproco.

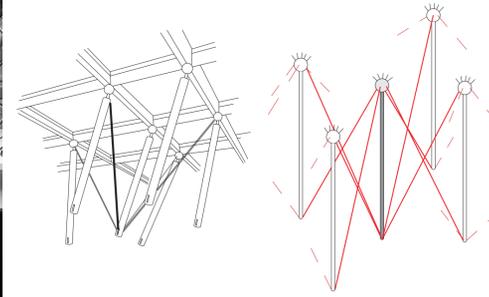
azioni di risposta alle sollecitazioni:



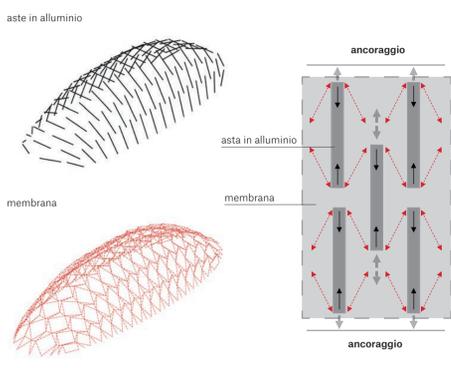
Kurilpa Bridge - ponte pedonale
Brisbane - Australia
Designer Arch. Cox Rayner, Ing. Arup
anno 2009



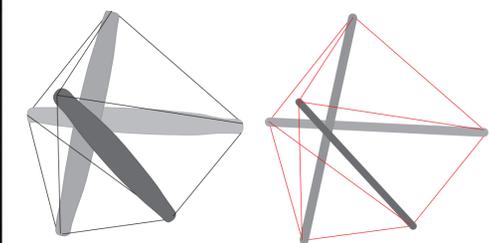
Copertura pedonale del
Museo di Storia Naturale di Reggio Calabria
Designer Studio ABDR Roma
anno 2013



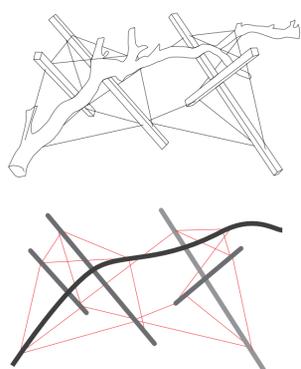
MOOM padiglione temporaneo
Tokio
C+A Coelacanth and Associates
Designer Kazuhiro Kojima
anno 2011



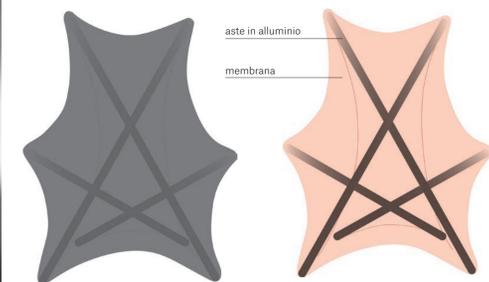
Bucki Lamp
Studio Lagranja Design - Spagna
produzione Pallucco
anno 2011



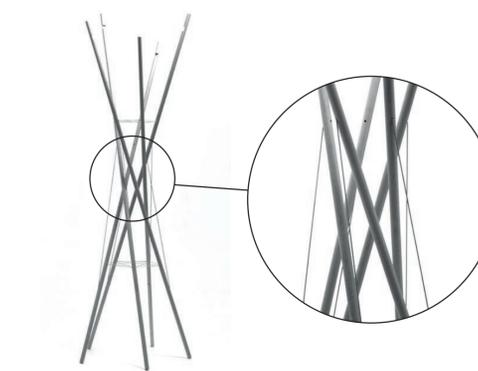
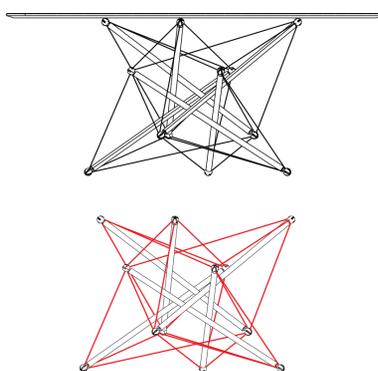
Strange Tensegrity Table 3
Designer DDAA
anno 2017 - 2019



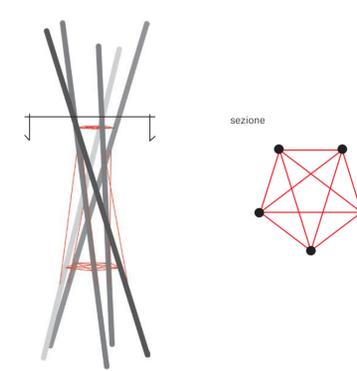
Bag Chair
Designer James Piatt
anno 1998



Tavolo 714
Designer Theodore Waddell
produzione Cassina
anno 1973



Coat hanger tree
Design Naruse Inokuma Architects
anno 2009



S A A D
Scuola di Ateneo
Architettura e Design "Eduardo Vittoria"
Università di Camerino

Laurea in Disegno Industriale
e Ambientale I A.A. 2020/2021
Relatore: Prof. Alessandro Zona
Correlatore: Prof. Jacopo Mascitti
Laureanda: Laura Veccia

Tensegrity: 60 anni di esperienze
e prospettive per il Design

tavola

D