



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA

DOTTORATO DI RICERCA IN TECNOLOGIA DELL'ARCHITETTURA E RILIEVO E  
RAPPRESENTAZIONE DELL'ARCHITETTURA E DELL'AMBIENTE \_XXVIII CICLO



*Le strutture Tensegrali e la loro applicazione  
in Architettura*

tutor  
Prof. Arch. Sergio Pone

dottoranda  
Claudia Sicignano

in copertina  
il “*Kulirpa Bridge*”, Brisbane, Australia.





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II  
DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA



DOTTORATO DI RICERCA IN TECNOLOGIA DELL'ARCHITETTURA E  
RILIEVO E RAPPRESENTAZIONE DELL'ARCHITETTURA E  
DELL' AMBIENTE  
XXVIII CICLO

*Le strutture Tensegrali e la loro applicazione  
in Architettura*

tutor  
Prof. Arch. Sergio Pone

dottoranda  
Claudia Sicignano



*a zio Antonio,  
prematamente scomparso,  
in sua perenne memoria.*





## **Indice**

<b>Premessa</b> .....	8
-----------------------	---

### **Capitolo 1**

<b>Cosa sono le strutture tensegrali</b> .....	11
1.1 Definizione di tensegrale .....	12
1.2 Perché una tesi di dottorato sulle strutture tensegrali .....	16

### **Capitolo 2**

<b>Contesto e storia</b> .....	20
2.1 Le origini .....	21
2.2 La controversia sull'invenzione tra Fuller e Snelson .....	25
2.3 Brevetti, sviluppi e divergenze .....	27
2.4 Definizioni scientifiche in ordine cronologico .....	36

### **Capitolo 3**

<b>Precedenti studi</b> .....	41
3.1 Introduzione .....	42
3.2 Alcuni precedenti studi .....	44
3.3 Coperture sospese e tensostrutture .....	50
3.3.1 Cable - Domes .....	63

### **Capitolo 4**

<b>Campi di applicazione e stato della ricerca</b> .....	67
4.1 Campi di applicazione .....	68

4.1.1	Le Tensegrali nell'arte.....	68
4.1.2	Le Tensegrali in natura.....	74
4.1.3	Le Tensegrali in biologia.....	77
4.1.4	Le Tensegrali in ingegneria.....	80

## **Capitolo 5**

<b>Proprietà e caratteristiche dei sistemi tensegrali.....</b>	<b>86</b>
5.1 Problema di ricerca della forma.....	87
5.2 Proprietà.....	91
5.2.1 Vantaggi.....	94
5.2.2 Svantaggi.....	96
5.3 Classificazione.....	97
5.4 Proprietà di ripiegamento/dispiegamento.....	100

## **Capitolo 6**

<b>Tipologie costruttive e principali realizzazioni.....</b>	<b>107</b>
6.1 Introduzione.....	108
6.2 Coperture tensegrali.....	109
6.2.1 Il Museo Archeologico di Reggio Calabria [2011].....	111
6.2.2 La Plata Stadium, Buenos Aires, Argentina [2003].....	118
6.2.3 Blur Building, Yverdon-les-Bains, Svizzera, [2002].....	123
6.3 Ponti tensegrali.....	128
6.3.1 Kurilpa Bridge, Brisbane [2009].....	128
6.3.2 Ponte pedonale nel Campus di Tor Vergata.....	132
6.3.3 La passerella tensegrity di En Dorigny [2013].....	135
6.4 Torri tensegrali.....	140

6.4.1 Warnow Tower, Rostock, Germania [2003] .....	140
6.4.2 Instant Skyscraper [2009] .....	146
6.4.3 Dubai Tensegrity Tower [2011] .....	150
6.5 Il London Eye [2001].....	153

## **Capitolo 7**

<b>Le coperture trasformabili</b> .....	161
7.1 Le prime strutture mobili .....	162
7.1. Il velarium.....	170
7.2 Lo Stadio Nazionale di Varsavia [2012].....	185

<b>Conclusioni</b> .....	199
--------------------------	-----

APPARATO 1 .....	208
------------------	-----

APPARATO 2 .....	209
------------------	-----

<b>Bibliografia</b> .....	212
---------------------------	-----

<b>Tesigrafia</b> .....	216
-------------------------	-----

<b>Sitografia</b> .....	218
-------------------------	-----



## **Premessa**

Lo studio di ricerca presentato ripercorre la storia e l'evoluzione delle strutture tensegrali tracciando una linea nel tempo e sottolineando gli autori più rilevanti, gli specialisti e le relative pubblicazioni non solo legati all'architettura ma anche ad altri settori che potrebbero fungere da guida.

Studia le origini delle strutture tensegrali, i brevetti originali e tende a far luce su alcuni aspetti circa la paternità di tale sistema strutturale innovativo; stabilisce una definizione chiara e generalmente accettata di strutture tensegrali elencando una classifica generale per questi sistemi; analizza l'utilizzo di strutture simili alle strutture tensegrali in precedenti studi, lavori o brevetti e le confronta con alcune delle proposte suggerite per attestarne la fattibilità.

Definisce altresì le caratteristiche strutturali ed i concetti fondamentali delle sollecitazioni di compressione/tensione e del problema di ricerca della forma, descrivendo le loro caratteristiche e mettendo in evidenza i vantaggi indicando al contempo criticità e punti deboli.

Il progetto di ricerca tassonomica è incentrato sullo studio degli aspetti di natura costruttiva, strutturale, funzionale, tipologica e formale relativi alla progettazione ed alla sperimentazione di campo di sistemi tensegrali da applicare in architettura. È stato dimostrato, infatti, che una progettazione basata su tali sistemi tensegrali può essere una valida proposta di architettura innovativa. Le strutture tensegrali sono innanzitutto molto leggere, sono modulari e possono essere applicate nel campo dell'architettura stabile - permanente, trasformabile e/o transitoria.

È stato dimostrato che le architetture tensegrali garantiscono la minima massa strutturale per una varietà di condizioni di carico, che includono strutture soggette a carichi eccentrici, di compressione, di trazione (sotto un dato vincolo di rigidità), di torsione, e strutture semplicemente appoggiate (ad es. i ponti), senza collasso per compressione o per instabilità. Inoltre una speciale capacità delle architetture tensegrali consiste nell'integrazione delle funzioni di controllo nel progetto delle strutture: nei sistemi tensegrali controllati la meccanica del controllo e la struttura possono naturalmente cooperare, attraverso il cambiamento della configurazione di equilibrio della struttura, in modo opposto a quanto avviene nel controllo tradizionale dove spesso la meccanica e la logica del controllo non interagisce facilmente con l'equilibrio della struttura o addirittura andare in conflitto con lo stesso. In architettura le strutture sono generalmente progettate per soddisfare passivamente criteri quali la sicurezza, la stabilità e la facilità di manutenzione in modo che le costruzioni abbiano la resistenza necessaria per evitare il collasso e per assorbire le forze sismiche oltre a garantire lo svolgimento delle funzioni in modo soddisfacente. Oggi le tipologie costruttive nel panorama dell'edilizia mondiale hanno un comportamento prevalentemente statico fatta eccezione di diversi ponti o coperture dinamiche, esempi in cui il movimento è limitato ad una sola direzione. Le tecnologie tensegrali vengono impiegate nella progettazione di strutture attive integrate con attuatori e sensori in un unico sistema di controllo. Quando i sensori rilevano un eventuale disturbo, il sistema di controllo utilizza attuatori per cambiare proprietà strutturali come la forma o la tensione dei cavi per ottenere il cinematismo ricercato. La struttura può quindi continuare a

soddisfare i criteri di sicurezza e facilità di manutenzione, rimanendo in tal modo operativa. Trasformazioni di forma sono comuni nelle strutture rimovibili, ovvero nei sistemi strutturali che variano la loro forma da una configurazione compatta ad una configurazione di servizio espansa. Tali sistemi di solito sono costituiti da moduli elementari che possono essere uniti per formare strutture più complesse. Le strutture tensegrali dispiegabili attualmente hanno due principali campi di applicazione: l'ingegneria civile e l'ingegneria aerospaziale con applicazioni come ponti, rifugi temporanei, strutture morphing e riflettori pieghevoli o antenne. La progettazione di una struttura dispiegabile comprende compiti aggiuntivi e vincoli come la pianificazione di un percorso di ripiegamento in base alle forze agenti. Di conseguenza la sfida alla progettazione di strutture dispiegabili e dunque di sistemi tensegrali è chiaramente più complessa di quella per le strutture tradizionali. Essi si identificano come sistemi vantaggiosi per applicazioni di controllo attivo di elementi strutturali ed elementi attivi che possono essere combinati. Anche se il concetto di strutture tensegrali è stato studiato in diverse discipline come l'ingegneria aerospaziale, la biologia, la robotica, alcuni esempi di strutture tensegrali sono stati utilizzati per scopi legati al mondo delle costruzioni ed in particolare all'architettura contemporanea.

L'obiettivo al quale punta la presente tesi di dottorato è quello di ottenere una maggiore consapevolezza tecnica e scinetifica e cercare di incoraggiare la scelta di sistemi strutturali tensegrali in architettura e ingegneria come applicazione fattibile per strutture di copertura sia per opere ex novo, sia di protezione del costruito storico ed antico.

# Capitolo 1

## Cosa sono le strutture tensegrali

*< ...il comportamento di un sistema nella sua interezza, integrato, aggregato, non è prescindibile dal comportamento delle sue componenti, o da quello dei costituenti delle sue componenti, prese separatamente dall'intero.>*

Richard Buckminster Fuller

## 1.1 Definizione di tensegrale

La parola tensegrale deriva dalla crasi di due parole inglesi “*tensional*” ed “*integrity*” e significa: “*strutture integrali nella tensione*”. La prima definizione di struttura tensegrale è stata data da Richard Buckminster Fuller [13]: “*Assemblaggio di elementi tesi e compressi in cui gli elementi tesi sono continui e quelli compressi discontinui*”. Questa definizione sottolinea la leggerezza delle strutture tensegrali. Gli elementi compressi (aste), costituiscono un insieme discontinuo, quelli tesi (cavi), un insieme continuo; vengono privilegiati gli elementi tesi che non avendo problemi di instabilità possono essere più leggeri. La quantità di materiale impiegato viene dunque ottimizzata implicitamente.

Le sollecitazioni di tensione continua/discontinua sono già un principio fondamentale in natura. La maniera più semplice e diretta per capire questo sistema strutturale è osservare esempi di strutture già realizzate o rappresentazioni grafiche/compositive. Osservando qualche tipologia di struttura tensegrale si rimane letteralmente affascinati dall’assemblaggio originale di queste aste apparentemente fluttuanti nell’aria. Nonostante la loro leggerezza, le strutture tensegrali grazie all’effetto sinergico dei puntoni e dei tiranti risultano essere stabili e resilienti.

Sono definiti come strutture reticolari spaziali che conservano la loro forma e sostengono carichi in virtù di uno stato di autosollecitazione (pre-sollecitazione o self-stress).

La struttura tensegrale descrive un principio di relazione strutturale nel quale la forma delle strutture è garantita dai comportamenti tensionali del sistema, che sono limitatamente chiusi e comprensivamente continui, e non dai comportamenti dei membri di compressione, che sono discontinui ed esclusivamente locali. Le strutture tensegrali hanno l'abilità di "cedere sempre di più, senza però rompersi o separarsi". In altre parole, il termine tensegrale, si riferisce all'integrità delle strutture come basate su una particolare sinergia tra componenti di tensione e di compressione, che si bilanciano vicendevolmente. La sinergia è uno dei principi base delle strutture tensegrali, ed è stata definita anch'essa da Richard Buckminster Fuller nella stessa opera *Synergetics* [14], dove si spiega che: *<il comportamento di un sistema nella sua interezza, integrato, aggregato, non è prescindibile dal comportamento delle sue componenti, o da quello dei costituenti delle sue componenti, prese separatamente dall'intero>*.

Una definizione non scientificamente riconosciuta che però descrive bene i sistemi tensegrali è quella utilizzata da Fuller [13] ed è la seguente: *<isole di compressione in un oceano di tensione>*. Tale definizione poetica fa rientrare al proprio interno diverse tipologie di strutture, fra cui per esempio anche i pneumatici, dove l'aria compressa è contenuta all'interno di una membrana continua in tensione e sottolinea un'interessante caratteristica comune a tutti i sistemi tensegrali, cioè la disposizione degli elementi compressi all'interno della maglia tensionale.



Fig. 1.1.1 – Esempio di sistema tensegrale.

La definizione più recente ed ufficialmente riconosciuta è stata redatta dal Prof. Renè Motro dell'Università di Montpellier [22] e afferma:

*<si dice tensegrale un sistema in uno stato di auto-equilibrio stabile comprendente una serie discontinua di componenti compressi all'interno di un continuum di componenti tesi.>*

Per stato di auto-equilibrio stabile si intende che la struttura, prima ancora di essere soggetta a qualsiasi carico esterno, compreso il peso proprio, deve essere in uno stato di presollecitazione che garantisce la stabilità, ovvero la capacità di tale sistema di ripristinare la posizione iniziale dopo una qualsiasi perturbazione esterna.

Un'altra definizione è quella derivante dall'analisi dei brevetti, detta appunto *patent based*: *<I sistemi tensegrali sono sistemi reticolari spaziali in stato di presollecitazione. Tutti i loro elementi hanno andamento rettilineo e hanno dimensioni equivalenti. Gli elementi tesi non hanno resistenza a compressione e costituiscono una maglia continua. Gli elementi compressi costituiscono un insieme discontinuo. Ogni nodo riceve uno ed un solo componente compresso>*.

Questa definizione è però troppo restrittiva in quanto, secondo la definizione corrente, è possibile anche avere sistemi definibili come tensegrali in cui sul nodo converge più di un elemento compresso. Esistono inoltre sistemi in cui alcuni nodi collegano solamente elementi tesi. Nulla vieta tra l'altro di avere componenti dall'andamento curvilineo e di dimensioni diverse fra loro.



Fig. 1.1.2–“*Sleeping dragon*”, esempio di scultura tensegrale, Snelson, Parigi.

## **1.2 Perché una tesi di dottorato sulle strutture tensegrali**

Oggi l'uso delle strutture tensegrali è confinato principalmente al mondo dell'arte e della scultura, con poche applicazioni nel campo dell'architettura e dell'ingegneria. Manca un approccio metodologico sperimentato e collaudato così come accade in altri sistemi costruttivi capace di garantire una concreta applicazione nell'architettura contemporanea.

Lo studio di ricerca presentato ripercorre la storia e l'evoluzione di questo tipo di struttura, tracciando una linea nel tempo e sottolineando gli autori più rilevanti, gli specialisti e le relative pubblicazioni, non solo legati all'architettura, ma anche ad altri settori che potrebbero fungere da guida; studia le origini delle tensegrali, i brevetti originali e tende a far luce su alcuni aspetti circa la paternità di tale sistema strutturale innovativo; stabilisce una definizione chiara e generalmente accettata di tensegrale elencando una classifica generale per questi sistemi; analizza l'utilizzo di strutture simili alle tensegrali in precedenti studi, lavori o brevetti e le confronta con alcune delle proposte suggerite per attestarne la fattibilità. Si definisce altresì le caratteristiche strutturali e i concetti fondamentali delle sollecitazioni di compressione/tensione e del problema di ricerca della forma, descrivendo le loro caratteristiche e mettendo in evidenza i vantaggi indicando al contempo criticità e punti deboli.

Il progetto di ricerca tassonomica è incentrato sullo studio degli aspetti di natura costruttiva, strutturale, funzionale, tipologica e formale

relativi alla progettazione e alla sperimentazione di campo di sistemi tensegrali da applicare in architettura.

È stato dimostrato, infatti, che una progettazione basata su tali sistemi tensegrali può essere una valida proposta di architettura innovativa.

Le strutture tensegrali sono innanzitutto molto leggere, sono modulate e possono essere applicate nel campo dell'architettura trasformabile e/o transitoria. La metodologia di progettazione prevede l'utilizzo di geometrie modulari che derivano dall'impiego di un numero finito o infinito di ripetizioni di geometrie modulari elementari [36-9].

Un tratto fondamentale di tali metodologie consiste nella ricerca di geometrie tipologiche di strutture tensegrali, che assicurino elevate prestazioni meccaniche, leggerezza strutturale e qualità estetica. L'approccio modulare alla ricerca di forma apre la strada a una effettiva applicazione del "paradigma" tensegrale nell'ambito della moderna architettura parametrica. È stato dimostrato che le architetture tensegrali garantiscono la minima massa strutturale per una varietà di condizioni di carico, che includono strutture soggette a carichi eccentrici; di compressione; di trazione (sotto un dato vincolo di rigidità); di torsione; e strutture semplicemente appoggiate (ad es. i ponti), senza collasso per compressione o per instabilità [3-9]. Inoltre, una speciale capacità delle architetture tensegrali consiste nell'integrazione delle funzioni di controllo nel progetto delle strutture: nei sistemi tensegrali controllati la meccanica del controllo e la struttura possono naturalmente cooperare, attraverso il cambiamento della configurazione di equilibrio della struttura, in modo opposto a quanto avviene nel controllo tradizionale, dove spesso il controllo preme contro l'equilibrio della

struttura [4].

In architettura le strutture sono generalmente progettate per soddisfare passivamente criteri quali la sicurezza e la facilità di manutenzione in modo che le costruzioni abbiano la resistenza necessaria per evitare il collasso e per assorbire le forze sismiche oltre a garantire lo svolgimento delle funzioni in modo soddisfacente. Oggi le tipologie costruttive nel panorama dell'edilizia mondiale hanno un comportamento prevalentemente statico fatta eccezione di diversi ponti o tetti dinamici, esempi in cui il movimento è limitato a una sola direzione.

Tecnologie tensegrali vengono impiegate dagli ingegneri nella progettazione di strutture attive integrate con attuatori e sensori in un unico sistema di controllo. Quando i sensori rilevano un disturbo, il sistema di controllo utilizza attuatori per cambiare proprietà strutturali come la forma o la tensione dei cavi per ottenere il cinematismo ricercato [4-11]. La struttura può quindi continuare a soddisfare i criteri di sicurezza e facilità di manutenzione, rimanendo in tal modo operativa.

Trasformazioni di forma sono comuni nelle strutture rimovibili, ovvero nei sistemi strutturali che variano la loro forma da una configurazione compatta a una configurazione di servizio espansa (Pellegrino 2001). Tali sistemi di solito sono costituiti da moduli elementari che possono essere uniti per formare strutture più complesse. Attualmente le strutture tensegrali dispiegabili hanno due principali campi di applicazione: l'ingegneria civile e l'ingegneria aerospaziale con applicazioni come ponti, rifugi temporanei, strutture morphing e riflettori pieghevoli o antenne. La progettazione di una struttura dispiegabile

comprende compiti aggiuntivi e vincoli come la pianificazione di un percorso di ripiegamento in base alle forze agenti.

Di conseguenza, la sfida alla progettazione di strutture dispiegabili e dunque di sistemi tensegrali è chiaramente più complicata di quella per le strutture tradizionali. Si identificano come vantaggiosi sistemi per applicazioni di controllo attivo di elementi strutturali ed elementi attivi che possono essere combinati [38]. Anche se il concetto di tensegrale è stato studiato in diverse discipline come l'ingegneria aerospaziale, la biologia, la robotica, alcuni esempi di strutture tensegrali sono state utilizzate per scopi legati al mondo delle costruzioni e in particolare all'architettura contemporanea.

L'obiettivo al quale punta la presente Tesi di Dottorato è quello di ottenere una maggiore sistematizzazione delle conoscenze intorno a un argomento che può consentire di raggiungere livelli prestazionali superiori a quelli delle strutture comunemente in uso e cercare di incoraggiare la scelta di sistemi strutturali tensegrali in architettura e ingegneria come applicazione fattibile sia per opere moderne e contemporanee sia per strutture di copertura e di protezione del costruito antico.

## Capitolo 2

### Contesto e storia

*<...ho semplicemente scoperto che l'Universo è discontinuo in maniera compressa e continuo in maniera tensionale. L'integrità strutturale dell'Universo è tensionale come scoprì Keplero. Ho dato a questi fenomeni il nome "tensegrale".>*

Richard Buckminster Fuller

## 2.1 Le origini

La scoperta delle tensegrali viene attribuita a tre studiosi: **Richard Buckminster Fuller**, **Kenneth Snelson** e **David Georges Emmerich**. Sebbene tutti e tre hanno affermato di essere i primi inventori, Emmerich riferisce che il primo sistema proto-tensegrale, denominato "*Gleichgewichtskonstruktion*" (fig. 2.1.1), fu creato da un certo **Karl Ioganson**<sup>1</sup> nel 1920. Essa era una struttura costituita da tre barre, sette cavi e un ottavo cavo senza tensione che serviva a cambiare la configurazione del sistema, ma mantenendo l'equilibrio.

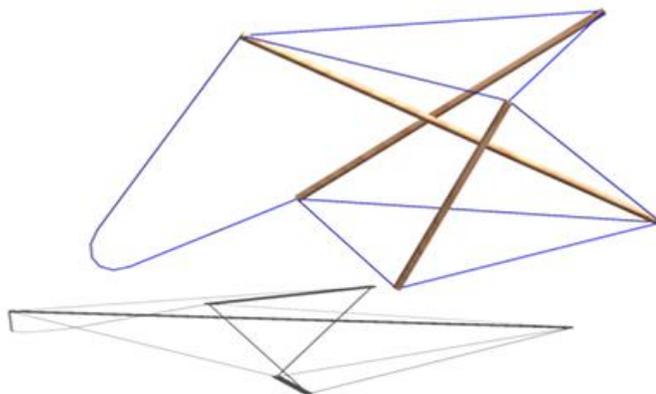


Fig. 2.1.1 – Struttura di Karl Ioganson.

Questa configurazione è molto simile al proto-sistema inventato da lui, la "*Elementare Equilibrium*", con tre montanti e nove cavi.

---

<sup>1</sup>Lo scultore russo Karl Ioganson viene considerato il fondatore del primo Gruppo Costruttivista in Russia. Il costruttivismo è un 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.

Il punto più controverso concernente l'origine delle tensegrali è stato la disputa personale, durata più di 30 anni, tra R.B. Fuller (Milton, Massachusetts, Stati Uniti, 1895-1983) e K. Snelson (Pendleton, Oregon, Stati Uniti, 1927). Una lettera indirizzata a R. Motro [22], durante l'estate del 1948 accerta che il primo a realizzare una struttura tensegrale tridimensionale fu nel 1948 lo studente di arte presso il Black Mountain College (North Carolina, USA) Kenneth Snelson [45] che si ispirò alle lezioni sui sistemi geometrici dello stesso Fuller.

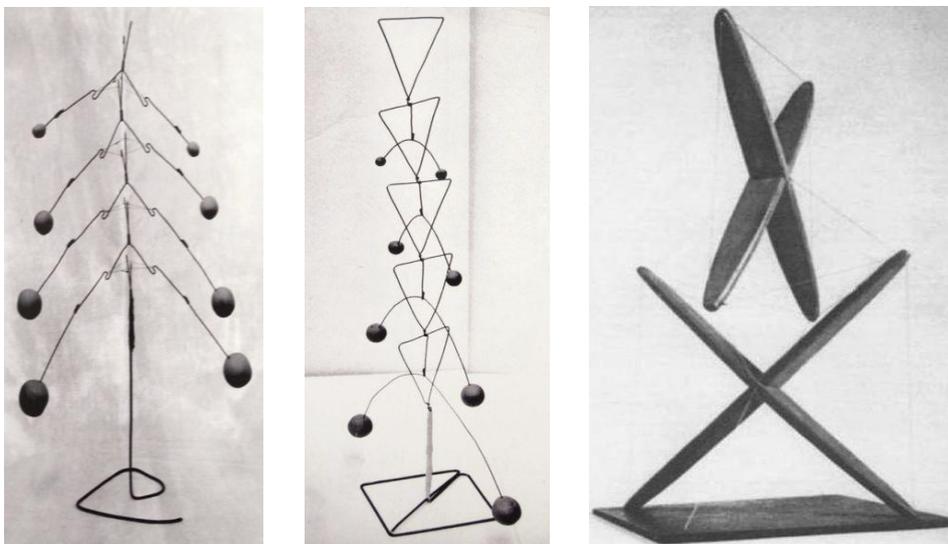


Fig. 2.1.2 – Sculture realizzate nel 1948 da Snelson.

Egli nel descrivere le sue opere parlò di “*floating compression*”, cioè di compressione flottante, piuttosto che utilizzare il termine tensegrale. Dunque l'origine del concetto di “*sistema tensegrale*” è riconosciuta a Snelson, il quale, ancora studente iniziò a lavorare alla realizzazione di tre sculture (fig. 2.1.2), poi ufficialmente riconosciute come i prototipi

del modello tensegrale. Tali sculture erano costituite da fili tesi ed elementi compressi, con la particolarità di avere un numero ridotto di elementi compressi (punti), mai contigui l'uno all'altro e collegati tra loro tramite un sistema continuo di elementi tesi (tiranti). Fuller all'epoca era un nuovo professore del Mountain College (North Carolina, USA), oltre ad essere anche architetto, ingegnere, matematico, cosmologo e inventore (più di 25 brevetti registrati con il suo nome). Egli si rese immediatamente conto dell'importanza dei lavori di Snelson e si affrettò a sviluppare le sue teorie coniando, inoltre, una definizione della sua scoperta/invenzione (il termine tensegrale appunto) per attribuirsi la paternità dell'intuizione. Nel 1961 Fuller scriveva:

*<For twenty-one years, before meeting Kenneth Snelson, I had been ransacking the Tensegrale concepts. (...) Despite my discovery, naming and development of both the multi-dimensional vectorial geometry and the three dimensional Tensegrale, I had been unable to integrate them, thus to discover multi-dimensional four, five and six axes symmetrical Tensegrale>.*

Che in italiano corrisponde:

*<Per 21 anni, prima di incontrare Kenneth Snelson, mi ero messo ad indagare sui concetti tensegrale. (...) Nonostante la mia scoperta, l'individuazione e lo sviluppo sia della geometria vettoriale multi-dimensionale che le tensegrali tridimensionali, ero incapace di integrarle, e quindi di scoprire le tensegrali simmetriche e multidimensionali a quattro, cinque e sei assi>.*

Allo stesso tempo, ma in modo indipendente, David Georges Emmerich (Debrecen - Ungheria, 1925-1996), probabilmente ispirato dai modelli di Ioganson, iniziò a studiare diversi tipi di strutture, come prismi

in tensione e sistemi tensegrali più complessi. Come risultato brevetta il suo “*structures tendues et autotendants*” (fig. 2.1.3), ossia lo stesso tipo di strutture che sono state oggetto di studio da Fuller e Snelson.



Fig. 2.1.3 – Struttura autotendente, David Georges Emmerich, 1962.

Le definizioni date nei tre 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 [58].

## 2.2 La controversia sull'invenzione tra Fuller e Snelson

Come anticipato nel Capitolo 1 Richard Buckminster Fuller coniò il termine tensegrale come una contrazione tra i vocaboli “*tensile – integrity*” menzionando il suo allievo Snelson come l'autore della scoperta [50].

“*La creazione di questo strano nome era la sua strategia per appropriarsi dell'idea come sua*”, sostiene Snelson in varie pubblicazioni.

Di conseguenza, il suo ex studente d'arte Snelson, fu certamente confuso dal parziale riconoscimento dell'invenzione da parte del suo professore. Alla fine del 1949 Fuller scrisse a Snelson dicendo che il suo nome sarebbe rimasto nella storia, ma qualche anno dopo cambiò idea, chiedendo al suo ex studente di rimanere anonimo per un certo tempo. Questa situazione spinse Snelson ad insistere sul suo riconoscimento durante una mostra dell'opera di Fuller nel 1959, presso il Museo di Arte Moderna (MOMA) di New York. Pertanto il suo contributo alle Tensegrale fu riconosciuto pubblicamente.

Un paio di anni più tardi, Fuller scrisse a Snelson:

*<(…) Uno straordinario intuitivo contributo in un importante momento della mia ricerca, di strutture così scoperte sulla discontinuità - compressione, continuità – tensione, mi è stato dato da un collega,*

*Kennet Snelson, e deve essere ufficialmente citato nella mia formale relazione sulle tensegrale>.*

In realtà, non ha mai menzionato Snelson in una delle sue più opere più importanti e rinomate sui sistemi tensegrale, “*Synergetics*” [14].

La controversa diatriba tra i presunti inventori continuò quando nel 1980 Fuller scrisse una lettera di 28 pagine a Snelson, in risposta ad una lettera di Snelson di una sola pagina. Secondo **Vesna**<sup>2</sup> (2000) in quelle lettere essi cercarono di chiarire la paternità della scoperta, e non l'inventore, perché Fuller sosteneva che gli inventori non possono inventare le leggi dei principi cosmici dell'universo. Paradossalmente, egli aveva brevettato quelle leggi universali nel 1962 [50].

Non è chiaro al mondo della ricerca chi abbia inventato realmente questo innovativo sistema strutturale, di sicuro il concetto di “sinergia” (una parola spesso usata da Fuller) ha determinato l'origine delle tensegrali.

Stephen Kurtz scrive a riguardo: *<Se Fuller riconosce il suo debito verso Snelson per l'invenzione del principio tensegrale, Snelson riconosce altresì il proprio debito al lavoro visionario di Fuller>* (1968).

---

<sup>2</sup> Victoria Vesna è un'artista e professore presso l'Università UCLA (Dipartimento di Design e Media Arts) e direttore dell'Art|Sci Center presso The School of the Arts e il

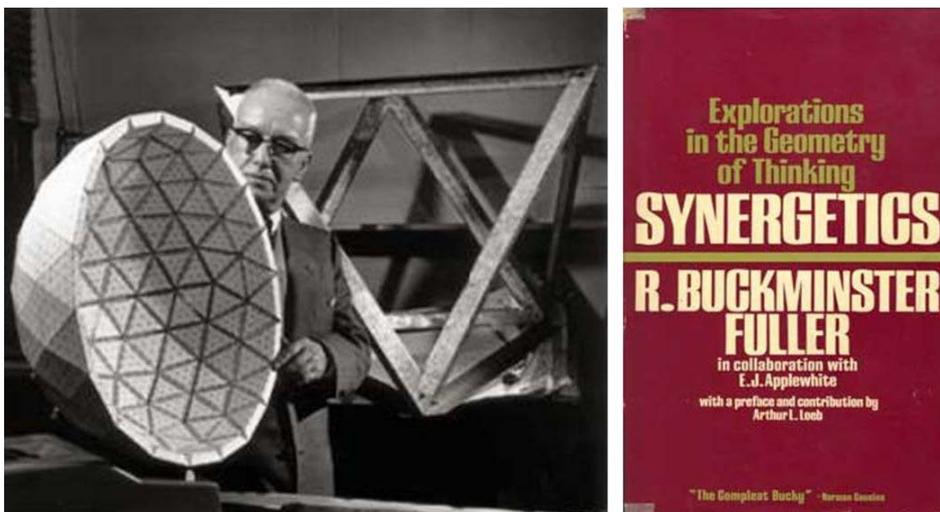


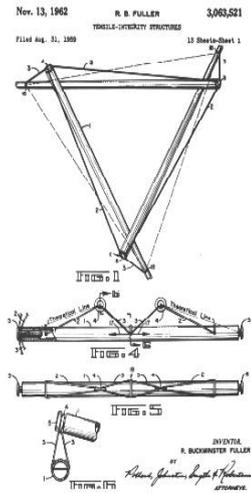
Fig. 2.2.1 – “*Synergetics*”, 1975, R. Buckminster Fuller e la sua opera.

### 2.3 Brevetti, sviluppi e divergenze

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. In ordine cronologico furono registrati i seguenti brevetti: Fuller “*Tensile - Integrity Structure*” 13 Novembre 1962, Emmerich “*Construction de réseaux autotendants*” 28 Settembre 1964, Emmerich “*Structures linéaires autotendants*” 28 Settembre 1964, Snelson “*Continuous tension, discontinuous compression structures*” 16 Febbraio 1965 (fig. 2.3.1).

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.



REPUBLIQUE FRANÇAISE  
MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE  
SERVICE DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
P.V. n° 931.099  
N° 1.377.290  
Classification internationale : E 04 b

Construction de réseaux autotendants.

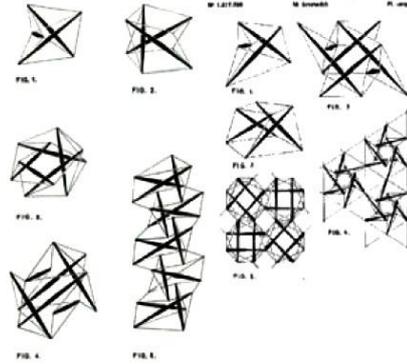
M. DAVID GEMOND EMMERICH résidant en France (Suisse).

Demandé le 10 avril 1962, à 15<sup>h</sup> 50', à Paris.

Divulgué par arrêté du 23 septembre 1964.

(Bulletin officiel de la Propriété industrielle, n° 52 de 1964.)

(Brevet d'invention dont la durée est à 40 ans à compter de la date de l'octroi de l'arrêté du 23 septembre 1964, de la loi du 5 juillet 1964 modifiée par la loi du 7 avril 1962.)



Feb. 16, 1965 K. D. SNELSON 3,169,611  
CONTINUOUS TENSION, DISCONTINUOUS COMPRESSION STRUCTURES  
Filed March 14, 1960 9 Sheets-Sheet 1

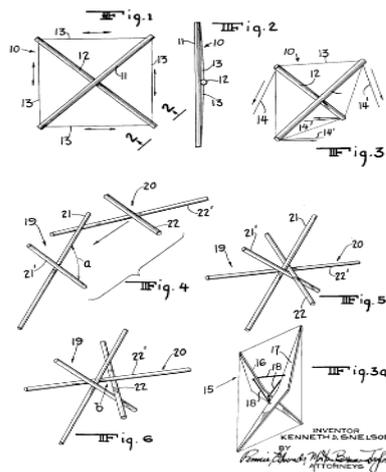


Fig. 2.3.1 – I primi brevetti tensegrali (in senso orario Fuller '62, Emmerich '64, Snelson '65).

Successivamente alla registrazione dei brevetti gli studi sui sistemi tensegrali presero strade differenti: il giovane Snelson, dopo il breve momento di riconoscimento al MOMA, si dedicò allo studio di tali strutture dal punto di vista artistico e compositivo, in quanto, essendo scultore, aveva un'inclinazione professionale orientata principalmente verso produzioni scultoree. Tutt'oggi, avendo perfezionato le tecniche di montaggio e le caratteristiche dei materiali utilizzati, continua a produrre complesse sculture di tipo tensegrale. Anche se iniziò a studiare i concetti fondamentali delle strutture tensegrali, evitò gli aspetti di fisica e gli approcci matematici, grazie alla sua formazione artistica. Ciò gli ha dato la possibilità di sviluppare molte e diverse configurazioni, asimmetriche e non convenzionali, applicando la sua conoscenza intuitiva e realizzare così sculture impressionanti sparse in tutto il mondo.

Il processo vero e proprio con cui Snelson erige le sue opere è in realtà un mix di scienza e arte.

Buckminster Fuller, invece, iniziò i primi esperimenti sulle strutture tensegrali nel 1927, e solo nel 1953, riuscì ad ultimare la sua prima realizzazione tensegrale rigida, caratterizzata da 270 aste non identiche, brevettata poi nel 1962. Negli anni successivi continuò a lavorare su nuovi progetti, applicazioni e metodi di costruzione. Fece diversi tentativi nel progettare cupole geodetiche tensegrali e portò a termine diversi brevetti di alcune delle sue opere, senza riuscire, suo malgrado, a produrre strutture dalla resistenza statica accettabile. Invitato alla realizzazione della geodetica dell'Expo di Montreal<sup>3</sup> del 1967, ipotizzò

---

<sup>3</sup> L'Esposizione universale e internazionale Montréal 1967, più brevemente Expo 1967, si svolse a Montréal (Canada) dal 28 aprile al 27 ottobre 1967. L'evento fu organizzato

inizialmente di produrre una cupola tensegrale, idea, però, abbandonata a causa del tempo e del budget. Quindi ripiegò su una più tradizionale struttura reticolare.

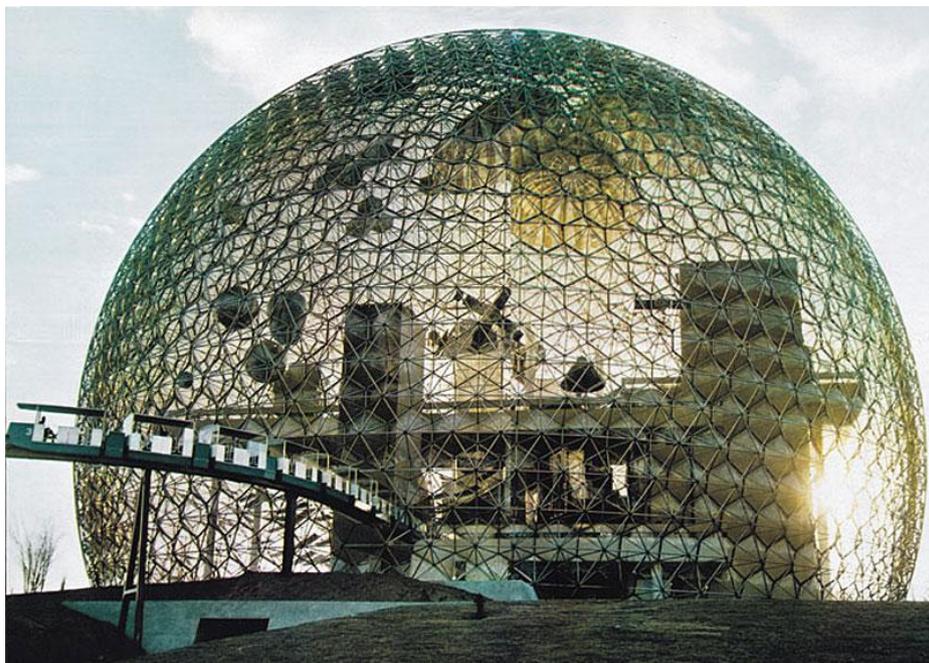


Fig. 2.3.2 – Padiglione americano all’Expò di Montreal del 1967, Fuller.

Richard Buckminster Fuller, nel corso degli anni, produrrà una grandissima quantità di modelli di studio, tra cui anche il progetto di una struttura tensegrale in bamboo dal diametro di 14 metri per il Long Beach State College [68]. Scrisse molti testi inerenti i sistemi tensegrali e le loro analogie con la natura paragonando quest’ultime all’albero, supporto essenziale di vita sulla terra, esempio di sistema tensegrale in natura.

---

in concomitanza con il centenario della proclamazione della Federazione del Canada. L’Expo era composto da 90 padiglioni tematici che rappresentavano le nazioni, le società e le industrie, fra i quali la cupola geodetica di Richard Buckminster Fuller.

Da allora poi, alcuni studiosi, influenzati dal lavoro di Fuller, hanno iniziato a esplorare questo nuovo sistema strutturale, alla ricerca di qualsiasi applicazione all'architettura. Ad esempio, J. Stanley Black (1972) è stato autore di studi e ricerche inedite sulle strutture tensegrali che evidenziavano in particolare le possibili configurazioni di tali sistemi.

Il pioniere David Georges Emmerich, dall'altra parte del mondo, continuò gli studi sul prototipo da lui inventato, definito "sistema autotendente", dando vita ad uno filone di studio ultimato dal ricercatore René Motro [22] all'Università di Montpellier, tale ricerca dimostrò la possibilità di poter adattare i sistemi tensegrali nel campo.

**René Motro**, iniziò a studiare il comportamento meccanico delle strutture tensegrali pubblicando le sue ricerche sul tema nel 1973 presso il Laboratorio di Ingegneria Civile della Università di Montpellier (Francia). Tale laboratorio, nel corso degli anni, è diventato un punto di riferimento per la ricerca in campo strutturale delle tensegrali.

Alcuni anni più tardi, nel 1976, **Anthony Pugh** [14] e **Hugh Kenner**<sup>4</sup>, presso la University of California (Berkeley), continuarono questo lavoro con diverse linee di azione. Da un lato, Pugh scrisse "*introduzione alla tensegrale*" [32], testo interessante per la varietà di modelli che delineò la sua rigorosa classificazione tipologica. D'altra parte, Kenner sviluppò l'utile "*geodetica matematica*", che dimostrò come calcolare "con qualsiasi grado di precisione" i dettagli pertinenti le strutture geodetiche e tensegrali, la geometria delle strutture regolari, ed esplorò le loro

---

<sup>4</sup> William Hugh Kenner - (7 Gennaio 1923 - 24 Novembre 2003), è stato uno studioso, critico e docente canadese.

potenzialità. Tuttavia, entrambi gli autori si resero conto che, a parte alcuni scritti di Fuller, poche informazioni attendibili erano state pubblicate sull'argomento.

Durante il 1980, alcuni studiosi e ricercatori hanno ampliato il campo aperto dai loro predecessori. **Robert Burkhardt** ha avviato un'indagine approfondita e ha mantenuto una corrispondenza con Fuller per ottenere maggiori dettagli sulla geometria e sulla matematica delle tensegrali. L'esito finale, 20 anni dopo, è il libro "*Practical Guide to Tensegrale Design*" [1] (Burkhardt, 1994-2004), un lavoro molto completo, utile e continuamente aggiornato.

Altri ricercatori importanti sono stati **Ariel Hanaor** (1987, 1992), che definì i principali gruppi bidimensionale di celle elementari auto-equilibrate e **M. Nestorovic** (1987) con la sua proposta di una cupola metallica integralmente in tensione.

Recentemente altri lavori si sono aggiunti al corpus di conoscenze scientifiche a riguardo: **Robert Connelly** e **Allen Back** (1998) hanno lavorato all'obiettivo di ricercare una corretta generalizzazione tridimensionale per le tensegrali. Utilizzando gli strumenti matematici della teoria dei gruppi e di teoria della rappresentazione e le straordinarie capacità di resa grafica al computer, è stato redatto un catalogo completo di tensegrali con dettagliate tipologie di stabilità e di simmetria, tra cui alcune mai state viste prima.

Altri autori (S. Pellegrino, A.G. Tibert, A. M. Watt, W. O. Williams, D. Williamson, R. E. Skelton, Y. Kono, M. Pedretti, ecc...) hanno anche studiato la Fisica, la Matematica, la Geometria, Topologica ed Algebrica e la Meccanica di Strutture Tensegrali. Tuttavia, a parte gli autori di cui

sopra, Motro e il suo gruppo a Montpellier, non ci sono state molte opere che hanno applicato questa nuova conoscenza.

**Buckminster Fuller** vedeva i sistemi tensegrali come qualcosa di più universale ed astratto, qualcosa che sarebbe stato in grado di pervenire ad un'importante legge universale. A suo parere la struttura tensegrale era la base dell'Universo: il macrocosmo e il microcosmo, i sistemi solari e gli atomi, sono stati strutturati secondo i principi tensegrali.

Nel suo libro *Synergetics* [14], ha scritto:

*<All structures, properly understood, from the solar system to the atom, are tensegrale structures. Universe is omnidimensional integrity> (Fuller, 1975b, 700.04)*

*<This structural scheme of islanded spheres of compression, which are only mass attractively cohered, also characterizes the atomic nucleus's structural integrities. Tensegrale discoveries introduce new and very different kinds of structural principles which seem to be those governing all structuring of Universe, both macrocosmic and microcosmic.> (ibid, 713.08)*

*<I simply found that the Universe is compressionally discontinuous and only tensionally continuous. The structural integrity of Universe is tensional as Kepler discovered. I gave this phenomena the name "tensegrale."> (Fuller, 1982)*

Che in italiano si traduce:

*<Tutte le strutture, correttamente intese, dal sistema solare all'atomo, sono strutture tensegrali. L'universo è una integrità omnidimensionale >. (Fuller 1975).*

*<Questo schema strutturale di sfere come isole in compressione, che sono soltanto legate alla massa secondo la forza di trazione, caratterizza anche l'integrità della struttura atomica del nucleo. Le scoperte sulle tensegrali introducono anche nuovi e molti differenti tipi di principi strutturali che sembrano essere quelli che governano tutta la strutturazione dell'universo, sia alla scala macrocosmica che microcosmica>. (ibidem, 713.08)*

*<Ho semplicemente scoperto che l'universo è discontinuo in maniera compressa e continuo in maniera tensionale. L'integrità strutturale dell'Universo è tensionale come scoprì Keplero. Ho dato a questi fenomeni il nome tensegrale>. (Fuller, 1982)*

Su un'altra scala Fuller era convinto che l'attrazione atomica (in particolare l'interazione invisibile tra atomi, nuclei ed elettroni) fosse un altro tipo di sistema tensegrale, dove la compressione e la tensione fossero sempre separati e sempre coesistessero.

Infine, è interessante capire come egli abbia cercato di spiegare tutto secondo il principio tensegrale applicandolo anche al genere umano riferito al rapporto uomo - donna.

*<I also then point out to you the difference between the male and the female. The male then becomes discontinuous. He becomes islanded. He is a hunter. The female and her young and so forth are the great continuity of that family, but the male goes off to be the hunter and the fighter. He is the island. She is central. This is really very fundamental in social behaviour. Now, I just, personally find then that the woman is tensile. Just fundamentally. Just the sex act. She pulls in. And a man is compressive. He thrusts, she pulls. And it's just very fundamental. What we call being female is to pull—to walk away, to attract. I find the male tending to do this—to punch. She does the other way>. (Fuller, 1981)*

Che in italiano si traduce:

*<Ho fatto anche notare la differenza tra il maschio e la femmina. Il maschio diventa discontinuo. Diventa un'isola. Egli è un cacciatore. La femmina, suo figlio e così via sono la grande continuità di quella famiglia, ma il maschio va fuori per essere cacciatore e combattente. Egli è isolato, lei è centrale. Questo è davvero molto fondamentale nel comportamento sociale.*

*Ora, io personalmente trovo quindi che la donna è tensiva. Proprio fundamentalmente nell'atto sessuale. Lei tira dentro e l'uomo comprime. Lui spinge, lei tira. Ed è molto fondamentale.*

*Ciò che noi chiamiamo essere femminile è la capacità di tirare dentro e andar fuori, di attrarre. Trovo che l'uomo tende a fare questo. Lei fa nell'altro modo>. (Fuller, 1981).*

Seguendo la linea di pensiero di Buckminster Fuller, altri autori (**Wilken**, 2001) confrontarono questa strategia dello “spingi e tira” con gli organismi viventi in natura (compresi vegetali e piante) per descrivere le tre possibili classi di vita alla ricerca della tensegrale, nei duplici rapporti: fotosintesi - radiazioni, dove il sole spinge e le piante tirano; in prede - predatori, dove la donna attrae continuamente e il maschio è attirato in maniera discontinua ed alla fine in studente - insegnante, dove il primo tira in nuova conoscenza, mentre il secondo spinge portando fuori le informazioni a qualcun altro.

Furono studiati successivamente altri esempi di tensegrali in natura: le strutture cellulari e i loro comportamenti (**Ingber** 1993, 1998, 2003); la struttura interna dei radiolari (protozoi marini); sistema di supporto della colonna vertebrale e di altri componenti dello scheletro (**Levin** 1982).

Un altro buon esempio di estensione del termine tensegrale ad altri settori fu la partecipazione di René Motro in un seminario presso il

Collège International de Philosophie<sup>5</sup> di Parigi. Il corso fu chiamato “tensegrale” ed ebbe il contributo di biologi, storici e studiosi dell’Ellenismo.

In conclusione, si può affermare che in base alla definizione del termine tensegrale, è possibile far partecipare questi tipi di principi a una vasta gamma di fenomeni. Strutture, sistemi, sculture, organismi anatomici, le relazioni e le interazioni tra diversi elementi nell’ambiente possono essere considerati come tensegrali [14].

## 2.4 Definizioni scientifiche in ordine cronologico

**Richard Buckminster Fuller** (1961) ha spiegato molto abbondantemente i concetti principali che governano i sistemi tensegrali, pur non avendo egli mai dato alcuna precisa definizione. Nel suo brevetto, egli descrive questo tipo di strutture, come:

*<a plurality of discontinuous compression columns arranged in groups of three nonconjunctive columns connected by tension elements forming tension triangles> (Fuller, 1962)*

che tradotto in italiano è :

*<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>.*

---

<sup>5</sup> Il Collège international de philosophie è un'associazione riconosciuta come organismo di ricerca dai Ministeri della Ricerca e della Ricerca francesi.

**Kenneth Snelson**, invece, ha dato una definizione chiara e concisa. Nel suo brevetto, ha spiegato:

*<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>.*

Anche se egli preferisce chiamarli “*strutture flottanti in compressione*”, li descrive come segue:

*<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>.*

L'altro “padre” delle tensegrali, è **David George Emmerich**, il quale ha 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 il difficile compito di dare una descrizione rigorosa.

Alcuni anni dopo, **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 >.*

Agli inizi degli anni '90 **Daniel Schodeck** (1993) 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 un livello di ripetitività dei componenti.

**Bin - Bing Wang** (1998) è andato al di là della 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 e Kenneth).

La più ampia definizione fu data da **Mingsheng Wang e Dange Liu** (1998, 2003) ed è la seguente:

*<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 ristretta: *<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 del punto di vista degli autori. **Narongsak Kanchanasaratool e Darrell Williamson** (2002) 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** (2003), invece, ha cercato di distinguere due concetti differenti. Egli fa 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 aggiunta: gli elementi compressi sono inclusi all'interno di un insieme continuo in tensione e il sistema ha stabilità autonoma in equilibrio. Precisamente, René Motro propose la seguente definizione estesa: *<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> [50].*

## Capitolo 3

### Precedenti studi

*<...forse il mondo ha bisogno di un nome diverso per questo tipo di cerchio solido a struttura esoscheletrica? Credo di no, è lo stesso della ragnatela.>*

Kenneth Snelson

### 3.1 Introduzione

Nei sistemi strutturali tensegrali la ricerca di materiali resistenti a trazione risulta essere di fondamentale importanza in quanto il sistema statico strutturale è basato essenzialmente sul concetto di tensione continua.

Molti studiosi, tra cui lo stesso Fuller, ritenevano che le strutture resistenti a trazione fossero innovative nel panorama dell'architettura mondiale (Fuller scriveva "*La tensione è una cosa nuova*" [14]). Questa affermazione non è del tutto esatta; infatti non va dimenticato che i primi ponti sospesi basati su un concetto strutturale di trazione, sono stati inventati molti secoli fa. Anche se essi erano fatti di corde e di legno le loro capacità portanti erano ridotte. Certamente erano i primi sistemi che sfruttavano la resistenza a trazione dei materiali. Un esempio sono i ponti di corda Inca<sup>6</sup> situati sopra a canyon, valli e gole naturali per permettere gli spostamenti all'interno del territorio dell'impero Inca.

Anticamente le strutture basate sulla resistenza tensionale erano ritenute non solide a causa dell'inefficacia dei materiali sollecitati a trazione. Lo era in parte solo il legno (principalmente nella costruzione delle navi), in ogni caso la sua resistenza a trazione non era

---

<sup>6</sup> I ponti di corda Inca erano ponti sospesi semplici situati sopra a canyon e ponghi per permettere gli spostamenti all'interno dell'impero inca. La costruzione di questi ponti prevedeva l'uso di una coppia di massi che bloccavano le corde su ogni lato del canyon, e massicci cavi in erba intrecciata che univano tra loro i due piloni. Altri due cavi fungevano da parapetto. I cavi che formavano il pavimento erano rinforzati con rami intrecciati. Questo sistema rendeva i ponti talmente resistenti da permettere il passaggio anche agli spagnoli a cavallo. I ponti erano pesanti, tanto da tendere ad afflosciarsi nel mezzo, permettendo così al vento forte di farli oscillare.

assolutamente paragonabile a quella a compressione del sistema costruttivo lapideo e della muratura in pietra

Dalla seconda metà del XIX secolo a seguire, con la produzione industriale prima della ghisa, poi del ferro e quindi dell'acciaio, si sono aperte nuove possibilità di applicazioni strutturali. In seguito alla costruzione del Crystal Palace si è avviata nell'architettura e nell'ingegneria civile un'era nuova. In ogni caso, è evidente che lo sviluppo di acciai ed altre leghe ha portato a risultati imprevedibili in termini di resistenza, peso e prestazioni dei materiali. Tutto ciò ha permesso ad ingegneri e architetti di ripensare al progetto e a nuove concezioni strutturali.

All'inizio del XX secolo il dibattito sul valore artistico dell'ingegneria in generale e sull'architettura dell'acciaio (iron style) in particolare, fu molto acceso e controverso e coinvolse ingegneri, architetti ed artisti. Opere innovative di seguito analizzate, considerate al vertice dell'architettura trovano convinti sostenitori in coloro che ritengono che la forma derivi dalle caratteristiche di resistenza del materiale e che l'abilità non consista nel nascondersi dietro ridondanti decorazioni superficiali.

Questi nuovi materiali non sono solo serviti per aumentare la resistenza dei componenti, ma anche per ridurre la sezione trasversale e, di conseguenza, il loro peso. Al contrario quando lo stesso elemento viene messo in tensione nella stessa direzione, esso tende a diventare più sottile. Per questo motivo la ricerca nel campo dell'ingegneria strutturale e dei materiali è essenziale per il futuro delle strutture i cui elementi

compressi devono essere più resistenti alla deformazione e i cui componenti tesi devono meglio resistere alle forze di trazione.

### 3.2 Alcuni precedenti studi

Le prime coperture nelle quali gli elementi tesi della struttura superano quelli compressi sono state progettate da Vladimir Grigoryevich Shukhov<sup>7</sup> che nel 1895 brevettò la sua prima “copertura a rete”. Si trattava in realtà di una tecnologia nella quale attraverso l’impiego di semplici ed economici elementi metallici (barre piatte o “piattini” da 50/60mm ed angolari leggeri) formanti maglie romboidali, si potevano costruire coperture sospese e gusci reticolari. Per la prima volta in ambito strutturale non vi era una distinzione tra elementi principali e secondari, ma tutti gli elementi avevano un uguale ruolo (*“Gli iperboloidi di Shukhov sono generalmente considerati come le prime strutture in cui la membrana di copertura e la struttura sono la stessa cosa.”* Frei Otto).

---

<sup>7</sup> Vladimir Grigoryevich Shukhov (28/08/1853 – 02/02/1939) è stato un ingegnere, architetto e scienziato russo. Famoso per i suoi lavori pionieristici sui nuovi metodi di analisi per l’ingegneria strutturale che ha portato a scoperte in disegno industriale di prime strutture iperboloide del mondo, di strutture a guscio, tensostrutture e strutture gridshell.

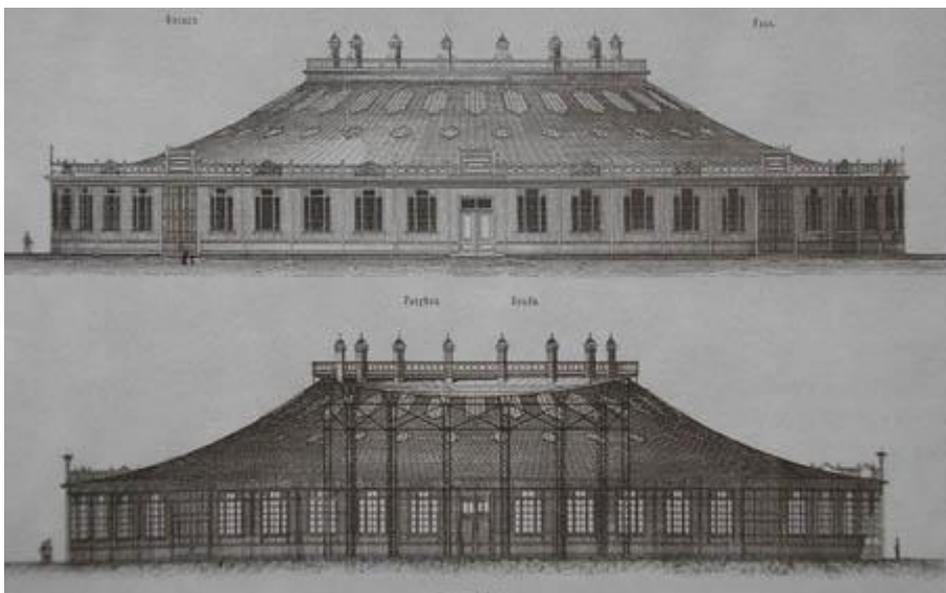


Fig. 3.2.1 – La prima copertura a membrana a struttura in acciaio, 1895

Shukhov Rotunda, Nizhny Novgorod,.

In seguito a questo primo tentativo, alcune altre strutture sono state proposte nel corso del 1930, ma esse erano di secondaria importanza.

Queste coperture erano due, tre volte più leggere di quelle tradizionali, con un manto di copertura in lamiera e lucernari e telai in legno e vetro.

Dopo alcuni esperimenti di prova le nuove coperture furono presentate al pubblico all'esposizione panrusa di Niznij Novgorod (Gorkij) del 1896.

I nuovi materiali hanno portato ad un vero e proprio modo di pensare in termini di progettazione architettonica e strutturale. Prima e dopo la scoperta delle tensegrali nel 1948, alcune opere sono state concepite adottando i materiali più recenti e sfruttando le loro migliori proprietà, in particolare la resistenza a trazione.

Tra le opere della modernità e italiane non possiamo non citare le **Cartiere Burgo a Mantova, del 1962 di Pier Luigi Nervi**.

Il profilo dello stabilimento delle Cartiere Burgo a Mantova appare come un enorme ponte sospeso e i depuratori sono disegnati come monumentali fontane. In questa opera Nervi coniuga ai massimi livelli ingegneria e architettura, sviluppando le sue teorie sperimentali e di ricerca sul cemento armato, utilizzato come duttile “pietra fusa”.

L’edificio doveva essere un supporto e un involucro alla macchina continua più grande d’Italia in un percorso di oltre 100 m. L’impianto trasformava la pasta legno in carta da giornale e la avvolgeva in grosse bobine a una velocità di quasi mille metri al minuto. Per tutta la lunghezza della facciata, di oltre 160m, non si dovevano creare interruzioni a sostegno della struttura. Inoltre il progetto doveva prevedere la possibilità di affiancare un’altra macchina delle stesse dimensioni, con conseguente raddoppio dell’area necessaria.

Si pensò di costruire l’edificio come un ponte che coprisse la struttura, ma i costi delle fondazioni sarebbero stati troppo elevati e dunque Nervi progettò due sistemi indipendenti: un basamento a due livelli che supportava la macchina continua, e incorporava tutti gli impianti.

La copertura, interamente in acciaio, di dimensioni 250x30x2 metri, fu costituita da una struttura composta da un sistema di travi principali longitudinali collegate ortogonalmente da un’orditura secondaria, con travi diagonali di controventamento. Essa fu vincolata in corrispondenza dei cavalletti attraverso piastre di bloccaggio longitudinali e trasversali che ne impedivano la traslazione. Il pacchetto di copertura d’estradosso, disposto su incavallature con elementi distanziatori per le idonee

pendenze trasversali, fu costituito da una lamiera grecata ancorata a pannelli prefabbricati di cemento e fibre di legno, previa interposizione di cartonfeltro bitumato, mentre all'interno una controsoffittatura di pannelli ondulati in vetroresina caratterizza la finitura d'intradosso. Tra il basamento e la copertura fu "tessuta" la facciata continua di acciaio e vetro.



Fig. 3.2.2 - Cartiere Burgo 1962, P.L. Nervi, Mantova, Italia.

Nel 1951, appena tre anni dopo la scoperta ufficiale delle tensegrali, ha avuto luogo a Londra il Festival of Britain<sup>8</sup>. In quella occasione, è

---

<sup>8</sup> Il Festival of Britain fu un'esposizione nazionale che venne aperta a Londra e poi viaggiò per tutta la Gran Bretagna, nel maggio 1951. A quel tempo, subito dopo la fine della seconda guerra mondiale, la gran parte di Londra era ancora in rovina e la ricostruzione era un'urgente necessità. Il Festival fu un tentativo di dare ai cittadini

stato organizzato un concorso per erigere un "Feature Vertical", un elemento simbolico per le mostre internazionali. Progettata da Hidalgo Moya, Philip Powell e Felix Samuely la Skylon tower era una struttura tensegrale in acciaio, definita futuristica grazie alla sua particolare forma e l'apparente assenza di sostegni. Questa struttura simbolo venne selezionata come la migliore proposta e costruita nei pressi del Dome of Discovery. Alcuni autori (Cruickshank, 1995; Burstow, 1996) affermano che questa struttura a forma di ago era un monumento senza alcuno scopo funzionale, ed è diventato un simbolo per il festival, un faro di potenzialità tra tecnologia e sociale e, infine, un punto di riferimento per il futuro degli ingegneri e degli architetti.

---

britannici la certezza della ricostruzione abbinata all'idea di ricostruire delle città più moderne ed efficienti.



Fig. 3.2.3 – Tensegrale Skylon 1951, London.

La guglia alta circa 92 metri era un corpo in alluminio rivestito a forma di fuso sospeso invisibilmente sostenuto da soli tre cavi. Sembrava galleggiare a 40 metri da terra<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> *"It had no visible means of support"* - Una storia popolare dell'epoca raccontava che come l'economia britannica del 1951 lo Skylon *"non aveva mezzi visibili di sostegno"*.

### 3.3 Coperture sospese e tensostrutture

Per “tensostruttura”, “*hanging roof*” si intende: “qualsiasi struttura dove siano preponderanti gli elementi sollecitati esclusivamente a trazione, che vengono realizzati, nella realtà costruttiva, con cavi di acciaio; con le tensostrutture si possono realizzare reti di funi, coperture di grandi spazi aperti, impalcati di ponti sospesi”.

Si tratta quindi di un sistema statico-resistente composto da elementi sottili (funi o membrane) sollecitati unicamente da uno sforzo di trazione tale da garantire il comportamento stabile e resistente della struttura. Impiegate soprattutto nelle grandi coperture, si propongono come strutture molto leggere e, in caso di deformabilità, per effetto di carichi asimmetrici, non si vengono a determinare effetti pericolosi.

Grazie all'utilizzo di un sistema di supporti rigidi di varia forma e dimensione, sottoposti a sollecitazioni di compressione, il peso delle strutture è nettamente inferiore al peso portato.

Questa leggerezza consente di ottenere notevoli spazi liberi con il minimo impiego di materiali. Inoltre offre una scelta molto ampia di possibili configurazioni e si presta ad ottenere suggestivi effetti plastico - formali.

La scoperta di questo sistema strutturale ha origini antichissime. Infatti le prime testimonianze documentali relative ad alcune proto-tensostrutture si riferiscono a costruzioni realizzate tra il I e il V secolo d.C. dai popoli indigeni dell'Asia, del Sud America e dell'Africa Equatoriale. Si tratta di strutture relativamente semplici, le prime che siano state realizzate con un sistema di cavi in tensione: i ponti sospesi.

I primi esemplari di ponti sospesi non erano altro che passerelle sui fiumi o sui fossati tra le montagne, realizzate con semplici corde di fibre naturali intrecciate, con sistemi a corda singola, doppia, oppure tripla (questi ultimi avevano la classica forma a V), alle quali con il tempo vengono aggiunte traverse formate da assi o canne di bambù [18].

In Europa e nel mondo Occidentale in genere la costruzione di ponti sospesi è molto più tardiva e risale al XVIII secolo, molto probabilmente con l'influenza dei modelli cinesi. I primi esempi di una certa importanza sono la passerella sull'Oder River realizzata dall'Armata Sassone nel 1734 e il Winch Bridge, costruito in Inghilterra sul fiume Tees nel 1741. Si trattava però di strutture flessibili costruite con un impalcato in legno sorretto da catene ad anelli contigui in ferro battuto, che presentavano diversi problemi di resistenza al vento e, in ogni caso, consentivano solo il passaggio pedonale a causa sia della resistenza sia della larghezza ridotta.

Si poneva quindi la necessità di trovare un sistema per ottenere un impalcato rigido tale da garantire il passaggio di mezzi pesanti. Lo si fece all'inizio del secolo successivo, nel 1801, con la costruzione del **ponte sul Jacob's Creek (West Pennsylvania)** ad opera del giudice James Finley. Si tratta del primo ponte sospeso in ferro battuto con piano carrabile (fig. 3.3.1).

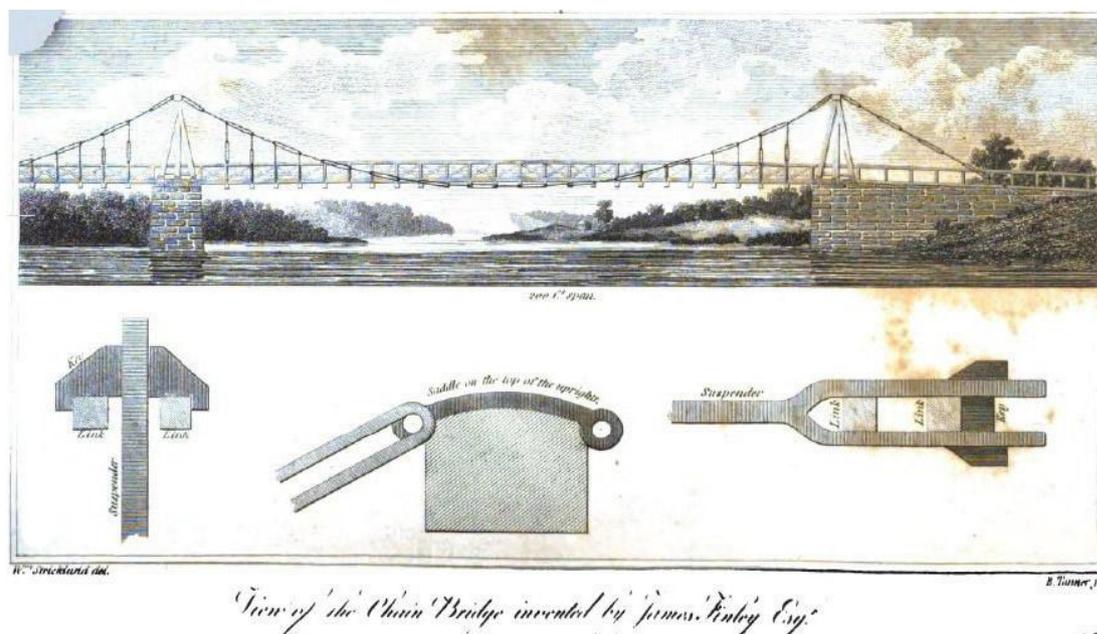


Fig. 3.3.1 – Jacob's Creek Bridge, 1801, South of Mount Pleasant, Pennsylvania.

Nel Febbraio del 1828 Francesco I di Borbone, Re del Regno delle Due Sicilie, incaricò l'ingegnere di Stato Luigi Giura di provvedere alla costruzione di un **ponte sospeso in ferro sul Garigliano**, che all'epoca rappresentava il confine tra due Stati: quello Pontificio a Nord e quello del Regno delle Due Sicilie a Sud.

Già ne esistevano degli esemplari del genere in Inghilterra, Francia ed Austria. Giura pertanto iniziò un viaggio di studio per osservare, studiare e disegnare i progetti dei ponti già esistenti ed il 14 Aprile 1828 era già in grado di presentare il suo elaborato completo e dettagliato in tutte le sue parti compresi rilievi, i sondaggi del terreno ed il costo totale. Giura aveva studiato il materiale da utilizzare e per aumentare la resistenza del ferro dolce fece produrre dalle fonderie di Mongiana una lega al nichel.

Le travi così composte furono irrigidite meccanicamente con trafilamento a mezzo di una apposita macchina “astatesa” progettata da lui stesso.

Questo doppio trattamento, chimico e meccanico, conferì al materiale caratteristiche meccaniche impensabili per quei tempi, ed anche una notevolissima resistenza alla corrosione ed all’invecchiamento. Questo ponte resistette fino al 1943 quando l’esercito tedesco, dopo averci fatto transitare il 60% della propria armata in ritirata compresi carri e panzer, lo fecero saltare.

Il ponte è stato recentemente restaurato ma è solo una passerella pedonale.



Fig. 3.3.2 - Ponte sul Garigliano, 1828-30, Minturno, Latina, Italia. Luigi Giura

**Il Ponte Leopoldo II a Poggio a Caiano a Prato fu costruito nel 1833 da Alessandro Manetti per volontà del Re Leopoldo II. Fu il primo ponte sospeso della Toscana ed il primo realizzato in Italia con il metodo delle funi sospese, di cui oggi restano i piloni in pietra, mentre sono andati perduti, durante la Seconda Guerra Mondiale sia i cavi di sospensione, sia il tavolato ligneo.**



Fig. 3.3.3 - Ponte Leopoldo II, 1833, Poggio a Caiano, Prato, Italia. Alessandro Manetti

Il ponte fu realizzato con impalcato di quercia, a travi e tavolato per marciapiede e corsia carrabile. Il sistema di sospensione era formato da sei copie di funi alle quali era sospeso l'impalcato mediante funi a due cavi.

In agguato erano i tipici problemi delle eccessive oscillazioni verticali e orizzontali. Le prime, dovute ai carichi mobili, sono particolarmente pericolose se ripetitive e ritmiche. Il problema fu risolto distribuendo i carichi su sei diverse funi per lato che ricevono i carichi uno dopo l'altra in serie, impedendo così che i veicoli, facessero sommare tra di loro i movimenti in verticale. Le oscillazioni orizzontali, dovute al vento, vennero ostacolate con incroci sotto l'impalcato ovvero con la rigidità della trave di parapetto (teorizzata da M. Seguin), fatta da robusti elementi in legno giuntati con incastri e perni metallici.

Il 27 Maggio 1937, esattamente ottanta anni fa, veniva inaugurato il Golden Gate Bridge, il grande **ponte sospeso sul Golden Gate, sullo stretto tra la Baia di San Francisco e l'Oceano Pacifico**. Si tratta di una delle attrazioni più famose della città di San Francisco, negli Stati Uniti e anche uno dei posti più trafficati della città, con le sue tre corsie per ogni senso di marcia può essere attraversato da auto, a piedi o in bicicletta. Attraverso il ponte, passa una delle più lunghe autostrade del paese, la U.S. Route 101.



Fig. 3.3.4 - Golden Gate Bridge, 1933, S. Francisco, Stati Uniti, Joseph Baermann Strauss

Il progetto venne intrapreso dall'ingegnere (e poeta) americano Joseph Baermann Strauss aiutato notevolmente dall'ingegnere Charles Alton Ellis, da Leon Moisseiff (autore del Manhattan Bridge a New York), e dall'architetto Irving Morrow.

Dopo più di quattro anni di costruzione, il ponte fu completato e inaugurato dal Presidente Franklin D. Roosevelt nel 1937.

Grazie al suo colore rosso, enormi torri e cavi oscillanti, il Golden Gate Bridge è stato presto considerato come icona mondiale di San Francisco.

Negli anni successivi numerose furono le innovazioni che vennero apportate per la costruzione di ponti sospesi. L'attenzione cominciò a focalizzarsi sullo sviluppo di sistemi di irrigidimento del piano e quindi

poi nella progettazione e costruzione dei cosiddetti ponti strallati. Il sistema costruttivo dei ponti strallati prevede l'impiego di elementi lineari soggetti a soli sforzi di trazione, prevedendo il caso dello schema detto “a sospensione diretta” (con i cavi inclinati di sospensione i quali viene direttamente appoggiato un impalcato) o “indiretta” oppure “a sospensione integrale” che prevede una conformazione a maglia sospesa, composta da membrane ancorate tramite supporti verticali. Il sistema strallato si presta ottimamente per quelle costruzioni che richiedono la copertura di vaste aree con il minor numero di appoggi, come le aviorimesse il cui requisito fondamentale è disporre dello spazio perché sia completamente libero per il movimento dei velivoli [73].

Per tale ultimo sistema costruttivo in realtà i risultati furono piuttosto scarsi, certamente all'inizio, in quanto molti ponti strallati crollarono a causa del peso eccessivo o di fenomeni meteorologici avversi (forti venti, tempeste ecc). La struttura a stralli quindi fu abbandonata per diversi decenni a favore della struttura sospesa, e fu ripresa soltanto all'inizio del Novecento, quando cominciarono ad essere utilizzati più di frequente acciai ad alta resistenza. Le analisi e gli studi progettuali quindi si diressero verso le strutture sospese che cominciarono a diffondersi sempre di più. Fu nella seconda metà dell'Ottocento che vennero realizzati veri e propri capolavori in questo settore, tra i quali il più noto è certamente il **Ponte di Brooklyn, progettato da John A. Roebling** e la cui costruzione terminò nel 1883.



Fig. 3.3.5- Ponte di Brooklyn, 1883, New York, Stati Uniti, John A. Roebling

E' un ponte lungo circa 1800 metri e largo più di 24 metri, con un impalcato sostenuto da quattro cavi sospesi tra due torri di calcare e granito alte circa 84 metri, notevolmente più alte rispetto a qualsiasi altra struttura nello skyline della New York di fine '800. Le torri furono appoggiate sulla roccia, che si trovava a una profondità di 12 metri sotto la linea di galleggiamento sul lato di Brooklyn e 22 metri sotto la linea di galleggiamento sul lato di New York.

Le pile di nessun ponte al mondo erano mai state costruite a tale profondità. I cavi di sospensione del ponte sono stati rivoluzionari, per la prima volta essi sono stati realizzati interamente in acciaio.

Parallelamente ai diversi tentativi di realizzazione di ponti sospesi, gli studi sulle tensostrutture cominciarono ad interessare anche il campo dell'architettura, e precisamente quello delle coperture.

Dopo il 1952 l'architettura tensile conobbe un rapido sviluppo non più basato su sperimentazioni empiriche, come era accaduto fino a quel momento, ma attraverso una serie di studi e pubblicazioni relative ai criteri di progettazione. La prima monografia specifica sull'argomento, *“Das Hangende Dach”*, nella quale si illustravano i risultati ottenuti durante quei primi anni di sperimentazione, fu pubblicata nel 1958 da Frei Otto.

È dalla metà del Novecento che le tensostrutture di copertura cominciano ad avere un rapido sviluppo e ad essere progettate e realizzate in diverse modalità e con un'attenzione sempre maggiore nel panorama architettonico mondiale. Proprio in quegli anni le strutture tensegrali hanno conosciuto un miglioramento dal punto di vista scientifico grazie allo studio di elementi come membrane e tessuti.

Un rinnovato interesse per tale tecnologia si è avuto nel Secondo Dopoguerra a partire dalla costruzione del **Sidney Myer Music Bowl (Melbourne 1958)**, la cui copertura consisteva in una membrana sorretta da una tensostruttura. Questo concetto è stato in seguito evoluto dall'architetto tedesco Frei Otto, che scelse questa tecnica per la costruzione del Padiglione Tedesco all'Expo '67 e inoltre per lo Stadio Olimpico di Monaco di Baviera per le Olimpiadi del 1972, la cui struttura è stata calcolata da Jörg Schlaich. Dopo aver fondato a Berlino l' Institut für Leichte Flächentragwerke nel 1964 è entrato nell'Istituto di Strutture Superficiali presso l'Università di Stoccarda, per implementare ulteriormente la ricerca sulle architetture con strutture sollecitate a trazione.



Fig. 3.3.6 – Sidney Myer Music Bowl, Melbourne, 1958.

Importanti lavori sono stati sviluppati sfruttando le proprietà di resistenza a trazione dei materiali, in particolare l'acciaio, ma anche di tessuti come il PVC, il poliuretano, il poliestere, la fibra di vetro, pannelli acrilici, il misto cotone -poliestere, ecc. Tra questi progetti ricordiamo il prototipo di tenda a quattro punti, ovvero il padiglione musicale del Bundesgartenschau a Kassel (Germania) nel 1955, la prima grande struttura a rete in cavi, con rivestimento in tessuto.

Questi progetti hanno una grande rilevanza per lo sviluppo delle strutture tensegrali in quanto tipologie simili di membrane saranno adottate come elementi di trazione tensegrale.

Il rapido progresso tecnico delle tensostrutture ha reso molto popolare questa tecnica costruttiva. I materiali leggeri rendono la costruzione molto semplice ed economica, soprattutto per la copertura di vaste aree. Il Pontiac Silverdome, il Millennium Dome di Londra, l'Aeroporto

internazionale di Denver e l'Aeroporto de La Mecca risultano essere le ultime più famose tensostrutture.

La fibra di vetro coperta di Teflon per le travature e il poliestere per le tele, costituiscono i materiali maggiormente usati.

Le tensostrutture si possono suddividere principalmente in due categorie: strutture con funi (strutture strallate, sistemi sospesi, travi e reti di funi) e strutture con membrane. Quest'ultime si richiamano alle tessiture a funi sospese e considerando che la membrana altro non è che una rete formata da sottilissime funi. Per la concezione statica l'accostamento al comportamento della tenda è ampiamente giustificato. È possibile realizzare delle tensostrutture nelle quali la membrana assolve contemporaneamente ai compiti di supporto portante e di copertura. Per complessi edilizi molto impegnativi si è ricorso all'uso di membrane metalliche formate dall'intrecciarsi di sottilissime lamine in acciaio o in alluminio. Per quanto riguarda l'impiego di membrane in materiale sintetico, come le fibre di vetro o il poliestere rivestito di PVC, è da rilevare il loro diffusissimo impiego per le elevate caratteristiche tecnico-prestazionali. Nell'ambito delle diverse categorie che si richiamano ai principi della tensostruttura, numerosi sono i casi nei quali esse vengono congiuntamente applicate, utilizzando, ad esempio, stralli e membrane.

Un episodio recente è fornito dal **Millennium Dome di Greenwich, di Richard Rogers**, una immensa cupola di tessuto sorretta da stralli e che ha salutato l'avvento del nuovo millennio [73].

Le coperture costituite da reti di funi dalla libera forma sono in grado di creare forme plastiche altamente suggestive. Questa tipologia sostituisce il sistema rigido di bordo con funi e palificazioni sistemate

anche all'interno della copertura. Tra gli esempi, notevole fu la copertura del **Parco Olimpico di Monaco progettato nel 1972 da Frei Otto, insieme a Günther Behnisch, Jörg Schlaich e Günther Grzimek**, all'interno di un sito devastato dai bombardamenti bellici e successivamente bonificato. L'area infatti fu sede per l'addestramento dell'aviazione militare tedesca e divenne deposito delle macerie degli edifici della città bombardati e distrutti, presenze che imposero ai progettisti la riflessione sulla persistenza nella trama urbana dei segni lasciati dal conflitto bellico. Il loro obiettivo fu la progettazione di una struttura che potesse rappresentare una risposta architettonica contemporanea, da contrapporre al ricordo del classicista, quanto autoritario, Stadio Olimpico di Berlino, ridisegnato da Albert Speer durante il Nazismo. Il risultato fu una tensostruttura sospesa che mediante membrane iperboliche fungesse da collegamento tra gli edifici simbolo di quei Giochi, quali il Natatorium, la palestra e lo stadio principale da 80.000 posti a sedere. Tale superficie continua di connessione, soggetta ad un sistema strutturale gerarchico retto da 58 pali verticali strallati in acciaio (dei quali solamente 8 per lo Stadio), permise selle a doppia curvatura, garantendone i cambi di forma e di dimensione, anche grazie alle differenti sezioni.



Fig. 3.3.7 – Parco Olimpico di Monaco, 1972, Frei Otto.

### 3.3.1 Cable - Domes

Le origini della tensegrale sono legate alla scultura ed alle arti plastiche. Solo successivamente esse sono state legate all'architettura e alla scienza e attualmente ingegneri prevalentemente civili e meccanici stanno effettuando ricerche circa le loro proprietà e le loro applicazioni.

La definizione di tensegrale è stata estesa per includere qualsiasi tipo di struttura connessa con perni nel quale gli elementi del sistema sono cavi in tensione ed aste soggette solo a compressione. Questo è il caso del **“Cable - Domes”** o **“Wire Wheel Cupole”**, **progettato da David Geiger nel 1986**. Da allora in poi varie cupole sono state costruite seguendo questa tecnica nella quale gruppi di fasci radiali sono collegati ad un anello esterno sollecitato a compressione ma intimamente collegato all'anello interno. Tale tipologia di coperture è basata sul sistema definibile come “falso tensegrale”. Geiger, facendo proprie le concezioni dei sistemi tensegrali promossi dai suoi precursori, brevettò un tipo di

copertura fondato su una semplificazione della logica delle strutture tensegrali di Fuller che utilizza nella realizzazione di due grandi impianti sportivi, costruiti per le Olimpiadi di Seul in Corea nel 1989, e per la Suncoast Dome, costruita a Saint Petersburg in Florida nello stesso periodo. Questa copertura di basa sul principio della ruota della bicicletta, caratterizzata da una trave circolare di bordo in compressione, realizzata in cemento armato alla quale vengono ancorati i cavi radiali. La presenza del bordo compresso non permette alle coperture di Geiger di essere annoverate tra quelle tensegrali.



Fig. 3.3.1.1 – “Georgia Dome”, Atlanta, Georgia [1992]

Nonostante ciò, vi sono numerose analogie con le strutture tensegrali a livello tecnologico e geometrico e da considerare come opere oggetto di

ricerca. Il successo di queste coperture è dovuto principalmente alla loro funzionalità, e alla loro capacità di coprire grandi superfici.

Nel 1992 David Geiger completò la Georgia Dome ad Atlanta, in Georgia.

La Georgia Dome ha un diametro massimo di 290m ed è caratterizzata da una configurazione ellittica con un'area di 400.000m<sup>2</sup> estendendosi per 193m lungo l'asse minore e 240m lungo l'asse maggiore. Nella letteratura tecnica viene definita come la prima cupola Hyper - Tensegrale poiché la sua superficie comprende sezioni di un paraboloide iperbolico. Il corrente inferiore della struttura è posizionato nell'ultimo anello di tensione e si erge verticalmente dando la sensazione che il traliccio sia galleggiante nello spazio come il resto della struttura. Questo traliccio a causa della sua speciale condizione di carico è sollecitato in modo tale che la parte inferiore e i membri diagonali siano tutti in tensione mentre solo gli elementi verticali sono in compressione. Ogni cerchio trasporta 26 membri di compressione verticale (la metà delle 52 colonne a terra) che si estendono verticalmente da un cerchio all'altro. Tali elementi compressi sono poi stabilizzati da cavi diagonali e sono posizionati, come ogni struttura tensegrale in modo che non si toccano per dare l'illusione di fluttuare nello spazio. L'anello di compressione alla base della cupola è costituito da una struttura in cemento armato di 8 metri di profondità sostenuto da 52 colonne. I connettori delle precedenti "dome" furono costruiti in acciaio fuso, ma in questo caso particolare essi sono stati fabbricati con parti in acciaio saldato.

La copertura è composta da una membrana tesa sopra la rete di cavi di acciaio; il materiale utilizzato è fibra di vetro spalmata di teflon a forma

di diamante lungo il profilo della superficie paraboloidale iperbolica [67-52]. Anche se Geiger non ha mai fatto direttamente riferimento a Fuller, si deve ricordare che Fuller (1964) ha brevettato un simile tipo di struttura, definito “*Aspension*”. Il giovane Snelson invece non li considerava veri e propri sistemi di “compressione flottante”. Quando gli venne chiesto, il grande scultore rispose in modo chiaro:

*<Le (...) cupole che Lei cita, non possono essere considerate tensegrale, indipendentemente da come le persone vogliono chiamarle. Esse sono, in sostanza, ruote di bicicletta. Forse il mondo ha bisogno di un nome diverso per questo tipo di cerchio solido a struttura esoscheletrica? Credo di no, è lo stesso della ragnatela>.*

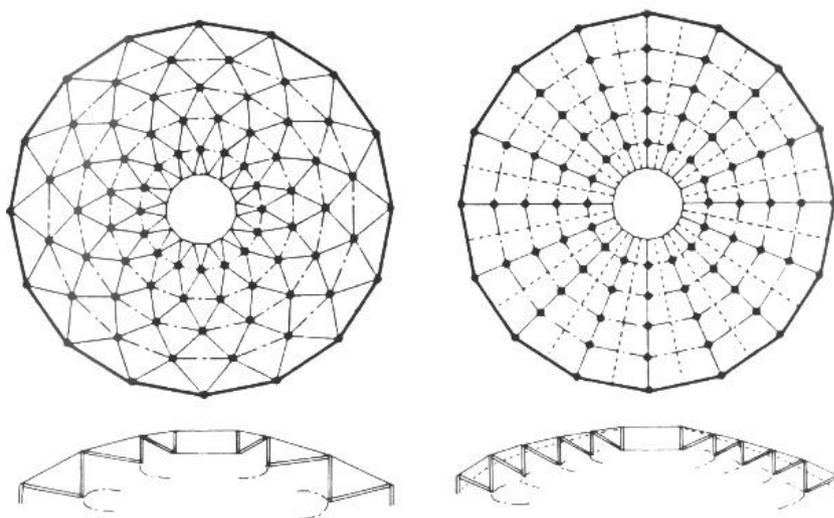


Fig. 3.3.1.2 – Confronto cupola di Fuller (sinistra) e la cable dome di Geiger (destra)

## Capitolo 4

### Campi di applicazione e stato della ricerca

*<...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.>*

Kennet Snelson

## **4.1 Campi di applicazione**

Come accennato nei capitoli precedenti le origini dei sistemi tensegrali sono legate al mondo dell'arte, mentre è in una fase successiva che sono nate le prime realizzazioni in architettura. In realtà le tensegrali trovano applicazione in diverse realtà tra le quali possiamo citare l'anatomia, l'astrologia, la chimica, la biologia, piuttosto che l'arte, l'architettura, l'ingegneria.

Nel presente lavoro si analizzano principalmente le possibili applicazioni dei sistemi tensegrali nel campo architettonico ponendo l'accento sulla componente tecnologica e sulla metodologia di progettazione.

Di seguito si riportano alcuni tra i più rilevanti campi di applicazione di tali sistemi riferiti allo stato della ricerca attuale.

### **4.1.1 Le Tensegrali nell' arte**

Una struttura è generalmente definita come un insieme di elementi e di relazioni che esistono tra essi. Considerando diversi materiali, questi costituiranno una struttura, una volta definita la loro forma, la disposizione geometrica e le loro mutue relazioni. Molte volte si tiene conto solo della meccanica e della tecnologia dei materiali, senza pensare anche agli aspetti estetico - formali. La stessa geometria ha un particolare tipo di "bellezza" tutta sua, capace di semplificare e far percepire oggetti complessi tramite linee dritte e curve. Le tensegrali sono state fonte d'ispirazione di molti scultori, tra cui uno dei più noti è lo stesso Snelson, il quale le studiò 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. Tra le sue sculture più importanti, che si rifanno proprio al concetto di tensegrali, ricordiamo il “*Soft Landing*”, creato nel 1974 (fig. 4.1.1.1) e le “*Torri*” (riportate nella fig. 4.1.1.2). Snelson ottenne un grande successo ed anche se possedeva un sapere limitato in campo scientifico riusciva a conseguire la bellezza attraverso opere d’arte di straordinaria caratura. L’opera d’arte “traduce” il concetto scientifico e diventa un “volo” della mente umana. Da questo si può dedurre che l’arte sta dall’altra parte della scienza e viceversa. Con l’arte si può comunicare e trasmettere ad un più disparato e profano pubblico e al contempo l’artista sperimenta e crea.

Mentre 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.

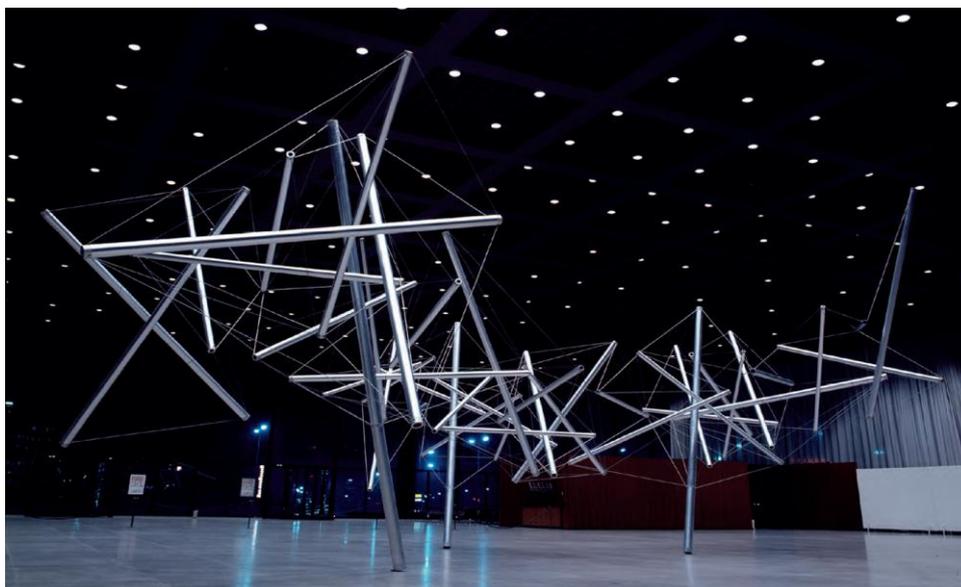


Fig. 4.1.1.1 – *Soft Landing*, Kenneth Snelson Exhibition, Nationalgalerie, Berlin, Germany 1977.

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>.*

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 visibile manifestazione 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. Il concetto di bellezza come espressione di purezza strutturale è rappresentato anche tra le più notevoli innovazioni architettoniche dell'era moderna. Tra i tanti esempi della modernità vi è la Torre Eiffel, completata nel 1887, che ha offerto una rivelazione simile, ovvero la bellezza della pura struttura a parte i quattro arconi di base che non hanno una vera e propria funzione strutturale ma furono aggiunti per venire incontro al “gusto dell'epoca”.

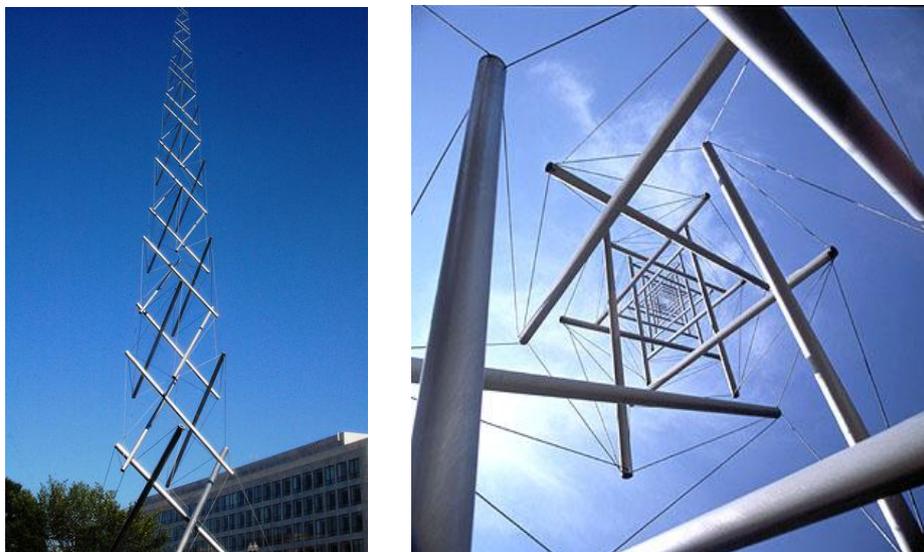


Fig. 4.1.1.2 – “Needle Tower”, scultura di K. Snelson, Washington D.C., USA.

Snelson fa suo il concetto di bellezza della struttura al di fuori del regno dell'architettura ma rievocando il mondo della fisica, della chimica e della biologia. Non è un caso che le sue opere ricordano ed evocano costellazioni, organismi cellulari e strutture atomiche. Come i sistemi studiati dalle scienze fisiche e biologiche, così come le sculture creano un equilibrio dinamico che è necessario per tutte le parti del sistema strutturale.

Nonostante l'apparente semplicità del principio, Snelson ebbe 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 geometrie irregolari. La loro struttura sembra spingersi verso l'alto in una serie di moduli decrescenti come se fosse protesa verso l'infinito e si snodano orizzontalmente sopra il terreno a dispetto della gravità.

La TensegriTree è una scultura progettata in occasione del 50° anniversario dell'Università di Kent e del 10° della fondazione della Kent School of Architecture. Una rappresentazione della scultura realizzata è mostrata in Figura 4.1.1.3.

Il progetto è stato concepito da Don Gray, professore della Kent School of Architecture nei primi mesi del 2013 come un progetto simbolo. Oltre a fornire un memoriale sorprendente la TensegriTree ha creato un nuovo spazio di aggregazione out-door per l'utilizzo da parte degli studenti e del personale presso l'Università di Kent - Città universitaria. Il responsabile del progetto è Don Gray mentre il team di progetto comprende anche l'imprenditore ES Global e consulenti gli accademici Andrea Micheletti e Simon Guest.

Nel corso di un iniziale workshop sono stati coinvolti gli studenti della Kent Architecture University, ed insieme al team di progetto hanno studiato le possibili ipotesi geometriche per un albero tensegrale.

I criteri fondamentali che hanno guidato il design sono l'intenzione di creare una struttura tensegrale di forma innovativa, un simbolo di design contro il vandalismo e con un budget relativamente piccolo.

Il team di progettazione ha lavorato a stretto contatto con il contraente incaricato di consegnare la scultura, ESGlobal, sin dalle prime fasi dello studio di fattibilità. Questo ha permesso al progetto di valutare i principi di edificabilità, la robustezza, la sicurezza, la riduzione al minimo dei costi di costruzione, il montaggio e la definizione delle fasi di costruzione fin dall'inizio.



Fig. 4.1.1.3 – “*TensegriTree*”, University of Kent, UK.

### **4.1.2 Le Tensegrali in natura**

Le collaborazioni ed i rapporti tra i contractors, i progettisti, gli esperti del mondo accademico e il client si sono rivelati all'altezza nella creazione di un nuovo tipo di geometria tensegrale e traducendo il disegno in una scultura completa montata in tempi brevissimi.

Per utilizzare il sistema tensegrale in un campo diverso da quello relativo a soggetti materiali è necessario stabilire alcuni concetti importanti. Questi modelli possono essere generalmente considerati come principi strutturali sottoposti 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 gravitazionale e atomico [40].

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).

Per comprendere al meglio un modello tensegrale, lo stesso può essere approssimato ad un sistema che già esiste in natura. Sono presenti molti esempi di elementi naturali che si possono ricondurre ai principi di base delle strutture tensegrali.

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.

Il contributo scientifico più importante sui sistemi tensegrali in anatomia è stato dato dal medico Stephen M. Levin<sup>10</sup> con la stesura del testo *"Continuous Tension, Discontinuous Compression. A Model for Biomechanical Support of the Body"* [66], nel quale egli analizza le analogie tra le tensegrali e il sistema statico della colonna vertebrale umana e del corpo in generale. Le sue teorie sostengono 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.

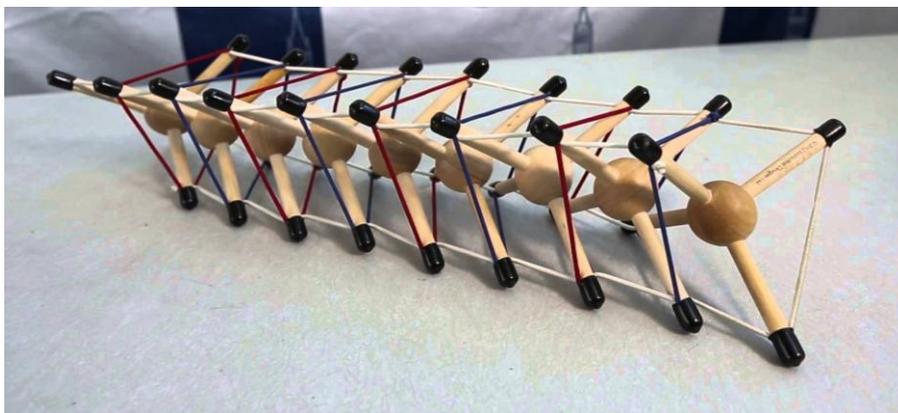


Fig. 4.1.2.1 – Modello di tensegrali spine.

<sup>10</sup> Dr. Stephen Levin, ortopedico e pioniere del Biotensegrali. Le sue tesi concernono lo studio della colonna vertebrale basato sul principio tensegrali.

Alcuni studi hanno dimostrato che anche il sistema nervoso centrale reagisce secondo un principio tensegrale. Infatti i neuroni sensoriali sono sempre informazioni in movimento (sottoposti a sforzi di trazione), mentre i motoneuroni sono solo occasionalmente coinvolti in qualche azione motoria (comportamento a compressione).

Un altro esempio di struttura tensegrale che si può trovare in natura è la tela dei ragni. In particolare, come si può vedere dalla Figura 4.1.2.2, la ragnatela del *Nephila Clavipes*<sup>11</sup>, che possiede una resistenza a trazione pari a  $4 \cdot 10^9$  N/m<sup>2</sup>, molto superiore a quella dell'acciaio.

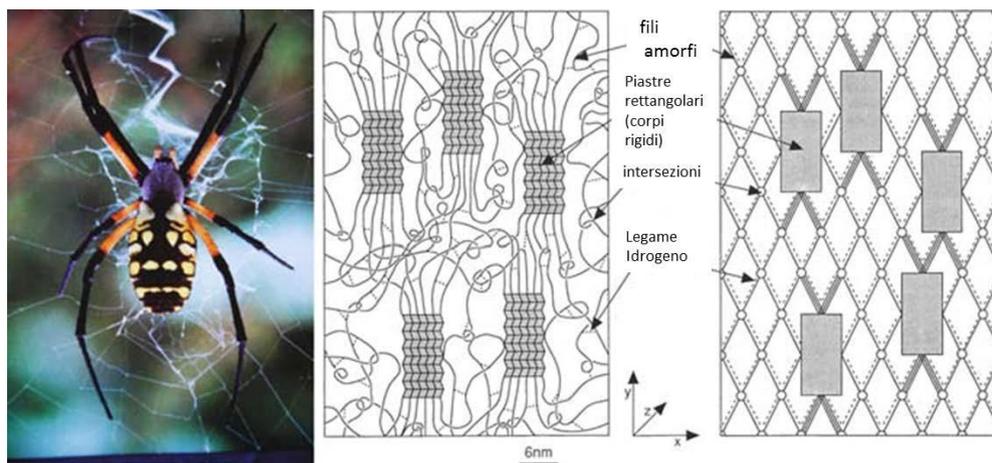


Fig. 4.1.2.2 – Ragnatela del *Nephila Clavipes*: foto (sinistra) e struttura (destra).

In sintesi, si può concludere che dal punto di vista di alcuni specialisti il modello tensegrale, va al di là della scientifica definizione strutturale essendo già di per sé principio fondamentale della natura.

<sup>11</sup> *Clavipes Nephila* è l'unica specie di ragni indigeni del nord continentale e Sud America. Negli Stati Uniti è comunemente noto come "banana ragno". La seta di *clavipes Nephila* è stato recentemente studiato per valutare la sua utilità nel migliorare chirurgicamente la rigenerazione neuronale dei mammiferi.

La ragnatela è una proteina complessa composta principalmente da due aminoacidi: la glicina e l'alanina. Le alanine sono allineati in due forme: piastre rettangolari e fili amorfi. Le piastre rettangolari possono essere considerate come i corpi rigidi delle strutture tensegrali, mentre i fili amorfi costituiscono le parti in trazione. Poiché le piastre non sono a contatto tra di loro, la ragnatela è stabilizzata dai fili amorfi in trazione [52].

### 4.1.3 Le Tensegrali in biologia

Un esempio di sistema tensegrale in biologia può essere la 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.

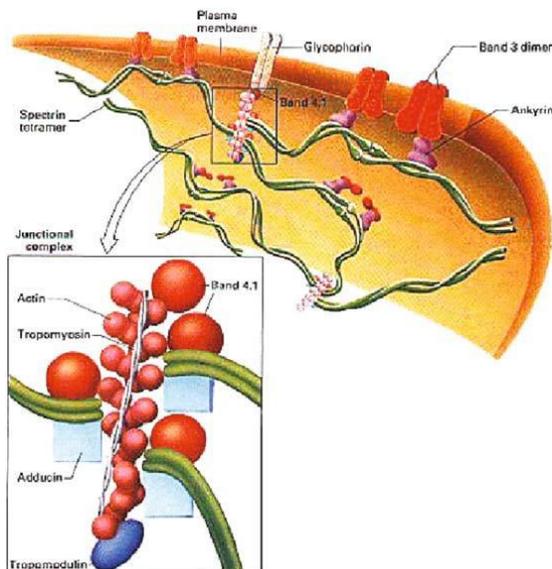


Fig. 4.1.3.1 – Struttura della membrana dei globuli rossi.

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 si può associare ad un modello tensegrale (Fig. 4.1.3.1).

La principale proposta avanzata nel campo della biologia e della chimica porta il nome di Donald E. Ingber<sup>12</sup>, docente di Patologia alla Harvard Medical School, secondo il quale il principio tensegrale può essere utilizzato per l'elaborazione delle informazioni, per la regolamentazione morfogenetica e per la trasduzione meccanica - chimica. Nel 1981 pubblica insieme a J.A. Madri e JD Jamieson una teoria sul comportamento elastico della cellula in analogia al sistema tensegrale. "Il modello tensegrale", spiega Ingber, "suggerisce che la struttura del citoscheletro della cellula può essere modificato alterando l'equilibrio delle forze fisiche trasmesse attraverso la superficie della cellula".

Quest'ipotesi, anche se generica, è stata confermata da diversi lavori sperimentali e da nuove scoperte nel campo della teoria cellulare. 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<sup>13</sup> [49]. Ingber ha scoperto che non solo le cellule ma anche

---

<sup>12</sup> Ingber, D.E., "*The Architecture of Life*". Scientific American Jan 1998.

<sup>13</sup> Ingber nella sua opera "Keynote Speech, Dartmouth Medical School Class Day", (2009) ha scritto: "As my art professor spoke, he pushed this round sculpture flat, and when he let go, it leapt up in the air. This was interesting, because I had seen the same behavior just days before when I first learned how to culture cells across the campus in a medical school laboratory. Cells flatten when they adhere to a culture dish, but when

un'incredibile varietà di sistemi naturali sono costruiti secondo il sistema/principio tensegrale: acqua, molecole, atomi di carbonio, proteine, virus, tessuti, e altre forme di organismi sistemi viventi.

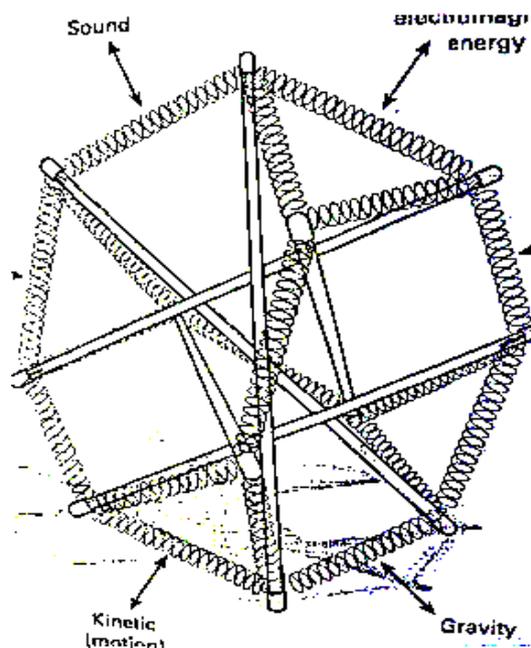


Fig. 4.1.3.2 – “Springs Model”.

Oltre al campo della biologia anche la chimica organica (cellule, virus, polline, le molecole di acqua, atomi di carbonio, vitamine, proteine, ecc.) è basata sui principi tensegrali. Anche se apparentemente le materie inorganiche non godono di questi principi fisici, è interessante sottolineare che, secondo alcune nuove scoperte, anche tali sostanze

---

you detach them, they round up and jump off the dish just like this toy. This was in the mid 1970s when people still thought of cells like water balloons filled with molasses. But scientists had recently discovered that all cells have an internal skeleton made of molecular ‘acto-myosin’ filaments that generate mechanical tension, as in muscle. So I just assumed that cells must be tensegral structures”.

possono essere basate sulla “floating compression” [40]. Alcuni autori, infatti, hanno proposto come nuovo modello di tensegrale un silicone amorfo costituito da agenti di trazione e compressione che ridimensiona a livello globale i difetti creati localmente [52].

#### **4.1.4 Le Tensegrali in ingegneria**

Oggi il tema dell’ottimizzazione topologica e parametrica delle strutture tensegrali ha assunto un interesse sempre maggiore nel campo della ricerca scientifica. La possibilità di poter sfruttare le caratteristiche di tali sistemi nel campo dell’automazione degli edifici, la capacità di garantire configurazioni di minima massa strutturale in base alle condizioni di carico, la possibilità di guadagnare energia attraverso la conversione dell’energia meccanica immagazzinata nella struttura in energia elettrica sono tutte caratteristiche che rispondono ad esigenze dell’ingegneria civile.

I recenti studi di Robert E. Skelton dell’University of San Diego (California, USA), hanno riguardato la progettazione di torri tensegrali. Tali modelli geometrici sono da annoverare tra gli esempi più validi di applicazione tensegrale in ingegneria [35-39].

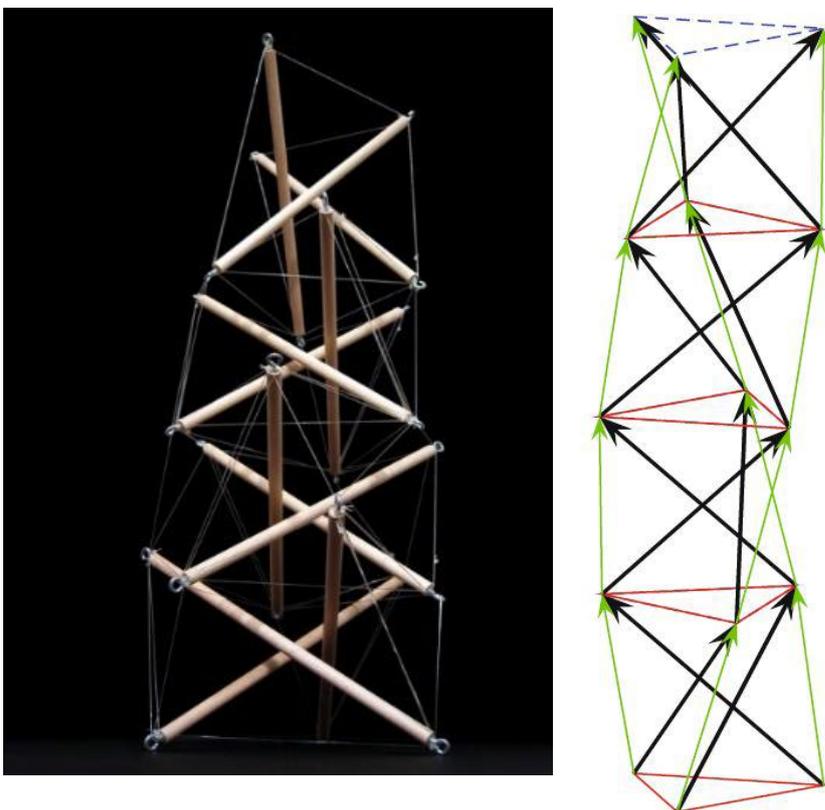


Fig. 4.1.4.1 – Colonna tensegrale generata dalla sovrapposizione di prismi regolari

Partendo da un singolo modulo di base tensegrale di minima massa, si può notare che un prisma - tipo può essere assemblato verticalmente secondo un andamento levogiro o destrorso a seconda della scelta della torsione (caratteristica di enantiomorfismo). È stato dimostrato inoltre che si può ottimizzare la quantità di materiale impiegato in termini di minimizzazione della massa, agendo solo sulle dimensioni degli elementi (diametro o lunghezza delle barre e dei cavi) e non sulle caratteristiche dei materiali.

La struttura mostrata in fig 4.1.4.2 è stata realizzata utilizzando differenti tipi di cavi per le stringhe orizzontali e verticali. Le stringhe verticali

sono rigide e non elastiche, mentre le stringhe diagonali sono fili di nichel-titanio. Queste ultime sono di lunghezza variabile, regolabile mediante l'applicazione di un certo valore di corrente. In particolare la lunghezza può arrivare ad un valore finale che si discosta di circa il 4% da quello scarico. Inviando una corrente di 2 A con una tensione di 40 volt, ciascun prisma ruota di  $4^\circ$  rispetto al prisma inferiore. Se si considera una colonna composta da dieci prismi, la torsione tra la parte superiore e quella inferiore della colonna sarà, quindi, di  $40^\circ$ . Lo scopo di questo sistema è quello di controllare la torsione dall'alto verso il basso, mentre l'altezza rimane costante.

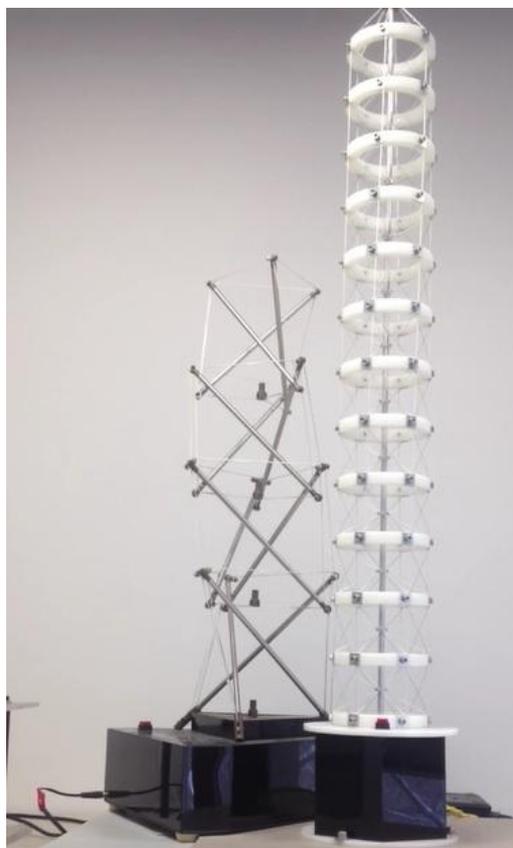


Fig. 4.1.4.2 – Colonna Nichel – Titanio.

Questa sperimentazione potrebbe essere applicata ad esempio ad un grattacielo, con lo scopo di alterare gli effetti del sole e del vento sul riscaldamento e condizionamento dell'edificio.

Oltre al modello di tensegrale "tower" in ingegneria si può far riferimento a strutture da ponte di minima massa per le quali la riduzione della massa riveste particolare importanza, soprattutto se applicate a strutture di grande luce.

Nei primi del '900 l'ingegnere australiano Anthony Michell<sup>14</sup> esaminò il problema di ricerca della forma di una struttura reticolare di volume minimo i cui elementi, costituiti da uno stesso materiale omogeneo, sono sollecitati alla tensione limite di snervamento del materiale. Michell analizzò una struttura costituita da una porzione di circonferenza, DE, centrata in un dato punto C; due segmenti uguali DA ed EB che giacciono lungo le tangenti in D ed E all'arco DE, con A, B e C allineati ed un certo numero di raggi che dividono il settore circolare CDE in parti uguali (Fig. 3.1.7). A questa struttura si può far corrispondere lo schema statico di una trave orizzontale incernierata agli estremi A e B caricata centralmente da una forza F applicata in C, perpendicolare al segmento AB e diretta verso il basso. Questa struttura può essere considerata in due versioni, l'una simmetrica dell'altra, collocate o al di sopra o al di sotto del segmento AB, con la differenza che, nel primo caso gli elementi dell'arco ADEB, chiamato "arco di Michell", sono puntoni e i raggi convergenti in C sono tiranti, mentre nel secondo caso gli elementi dell'"arco di Michell" sono tiranti ed i raggi sono puntoni. Si può notare dalla

---

<sup>14</sup> <http://www.fernandofraternaliresearch.com/>

figura che l'angolo centrale del settore circolare CDE cresce sempre più, man mano che l'angolo  $\alpha$  (o  $\beta$ ) si avvicina al valore di 90 gradi.

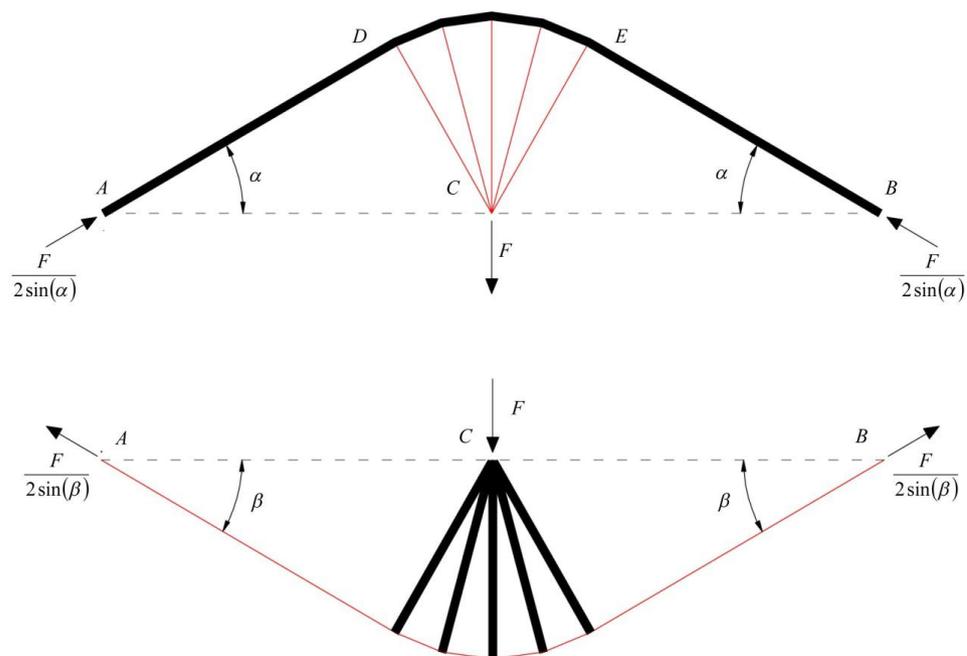


Fig. 4.1.4.3 – Struttura di Michell. Gli elementi in compressione, i puntoni, sono rappresentati da linee nere; gli elementi a trazione, i tiranti, sono rappresentate da linee rosse più sottili.

Il modello parametrico di ponte tensegrale è ottenuto attraverso n suddivisioni ripetitive di un modulo base formato da un singolo “arco di Michell”, che è formato da  $p$  raggi posizionati al di sopra dell’impalcato e due archi con un numero  $q = p$  di raggi posizionati al di sotto dell’impalcato. Il ponte è vincolato con una cerniera fissa ad una

estremità dell'impalcato ed un carrello all'altra estremità. Nel modulo di base (Fig. 15) si ha  $n = p = 1$ . In tale elemento gli angoli  $\alpha$  e  $\beta$  possono assumere valori arbitrari e gli elementi orizzontali al livello dell'impalcato possono fungere sia da puntoni che da tiranti (elementi bidirezionali). Tali elementi forniscono le componenti orizzontali delle forze laterali dell'"arco di Michell". L'elemento di base esibisce un singolo arco compresso al di sopra dell'impalcato, due cavi in trazione al di sotto ed una suddivisione dell'impalcato in quattro elementi di uguale lunghezza [9-59].

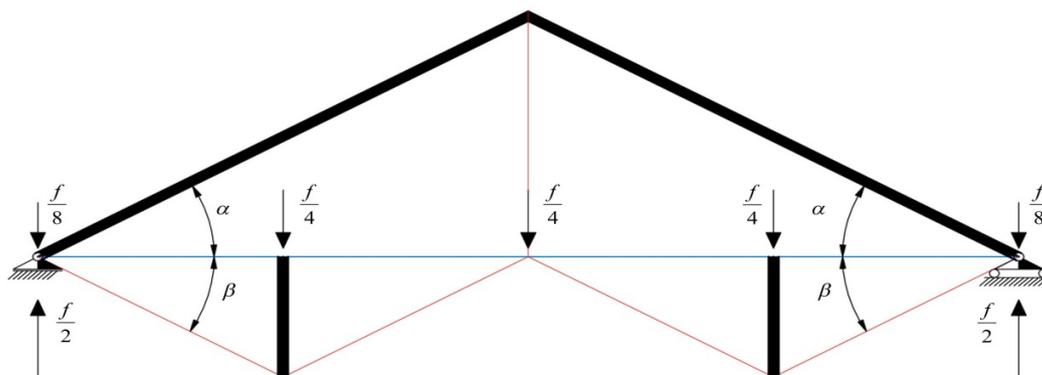


Fig. 4.1.4.4 – Modulo ponte tensegrale

## Capitolo 5

# Proprietà e caratteristiche dei sistemi tensegrali

*<...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.>*

Renè Motro

## 5.1 Problema di ricerca della forma

Un dato insieme di corpi rigidi (di seguito denominati semplicemente barre) forma una “configurazione tensegrale” nel caso in cui trovi un reticolo di stringhe tese in grado di stabilizzare tali membrature.

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

La classe di una struttura tensegrale coincide con il numero massimo di barre che concorrono nei suoi nodi.

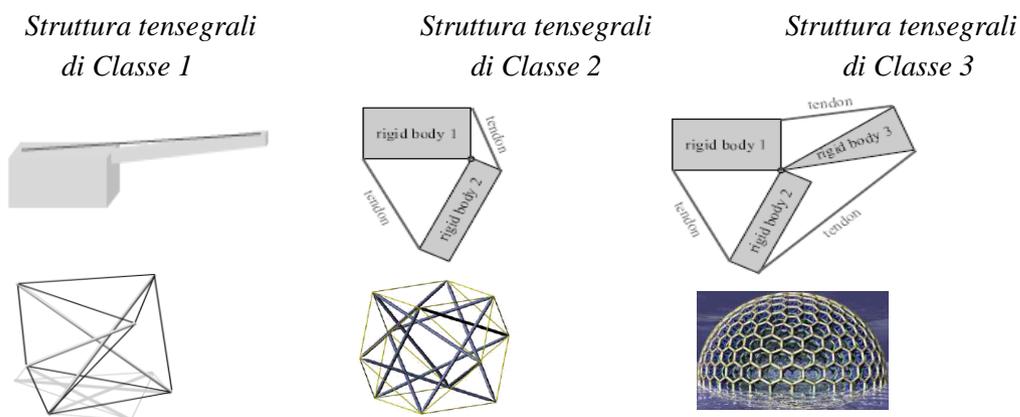


Fig 5.1.1 – Classificazione delle strutture tensegrali.

In virtù di tale definizione 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 convergono in uno stesso nodo si dice di classe  $k$ .

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 [53].

È utile osservare che le definizioni fin qui fornite implicano che una struttura tensegrale possa essere in equilibrio sotto uno stato di presollecitazione interna (a cavi tesi), in assenza di forze esterne (configurazione di assemblaggio). Dal punto di vista matematico pertanto una struttura tensegrale si configura come una struttura reticolare spaziale di tipo staticamente indeterminato.

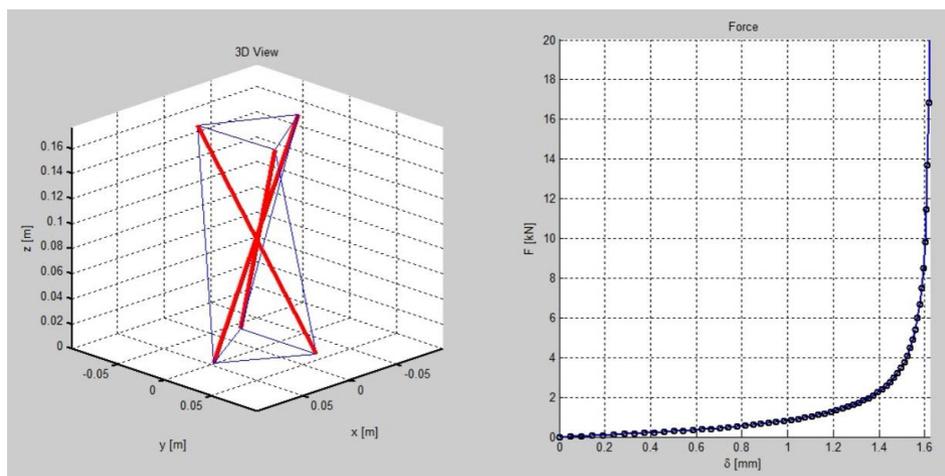


Fig 5.1.2 – Grafico forza-spostamenti relativo ad un prisma tensegrali.

Il valore di pre - tensionamento del sistema influenza direttamente la resistenza alle sollecitazioni esterne e costituisce il parametro principale per il controllo della dinamica.

La resistenza ai carichi esterni, come è possibile osservare dal grafico in fig. 5.1.2, non è lineare e varia in base al tipo di carico applicato. Un eventuale allentamento dei cavi (anche solo di un cavo) comporterebbe

conseguenzialmente un inevitabile calo che, in casi estremi, potrebbe rendere la struttura labile.

Il livello di pre-stress risulta essere di fondamentale importanza per discernere i veri sistemi tensegrali da quello che non lo sono.

Come enunciato da Renè Motro [12], *“si dice tensegrale un sistema in uno stato di auto-equilibrio stabile comprendente una serie discontinua di componenti compressi all’interno di un continuum di componenti tesi”*. Possiamo anche affermare che in generale i sistemi tensegrali sono strutture reticolari spaziali, formate da componenti compressi (aste) e tesi (cavi), che si trovano in uno stato di auto-equilibrio, garantito appunto dal valore di pretensionamento dei cavi.

Per stato di auto - equilibrio intendiamo appunto la stabilità strutturale e geometrica del sistema tensegrale in fase zero ovvero prima ancora di essere soggetta a qualsiasi carico esterno compreso il peso proprio.

La stabilità è definita come la capacità di un sistema di tornare nella posizione iniziale dopo una perturbazione. Tale definizione ammette qualsiasi possibilità e vale tanto per le tensegrali quanto per le membrane e non solo. Ammette anche l’impiego di fluidi (aria). L’analogia con il “pallone” precedentemente accennata è molto utile per spiegare il concetto di pre - stress.

Un pallone può trovarsi in tre diversi stati: sgonfio, gonfio con una pressione interna nulla, gonfio con una certa pressione interna. Nel primo caso è evidente che il pallone non possiede alcuna forma particolare; o meglio se sollecitato da forze esterne può assumere un numero imprecisato di forme per cui è possibile affermare che si trova in uno stato non stabile. Nel secondo caso il pallone prende la sua forma perché

il volume di aria presente al suo interno è esattamente pari al volume che il pallone è in grado di contenere. Sollecitato però da azioni esterne non è in grado di mantenere la propria conformazione perché non ha alcuna rigidità. Nel terzo caso invece, viene immessa all'interno del pallone più aria di quella che il pallone è in grado di contenere e questo genera una pressione interna. Questa pressione interna può essere vista come una forza costante di compressione la quale agisce sulle pareti del pallone che a loro volta per resistere a tale spinta si trovano in uno stato di tensione.

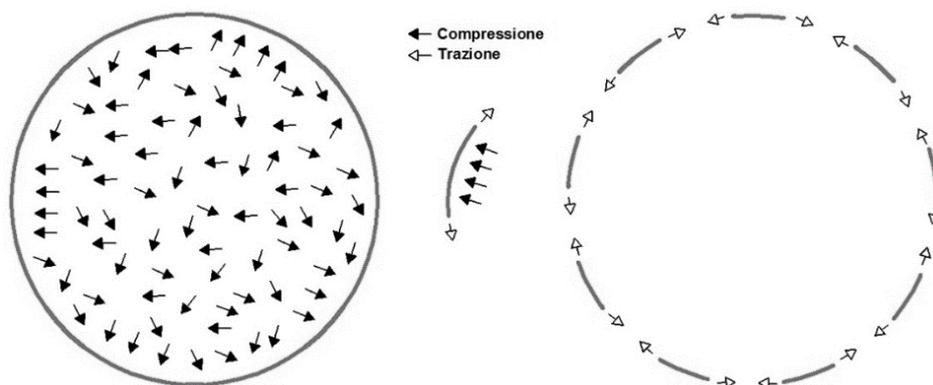


Fig. 5.1.3 – Analogia compressione/trazione del pallone.

Nelle strutture tensegrali, la forza stabilizzante è data dall'allungamento dei puntoni o dall'accorciamento dei tiranti. Se i puntoni sono troppo corti o i tiranti troppo lunghi il sistema 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 pre-sollecitazione nulla. Da questo punto in poi se invece tentiamo di allungare i puntoni o accorciare i tiranti allora imponiamo al sistema uno

stato di pre-stress interno che stabilizza la struttura e la rende resiliente alle azioni esterne [51]. Il valore di pre-stress può variare all'interno di un intervallo che, se oltrepassato, porta al collasso della struttura o per cedimento dei tiranti o per cedimento dei puntoni [52].

## **5.2 Proprietà**

Da sempre il principio alla base della costruzione in senso lato è stato quello della legge di gravità: l'equilibrio dell'edificio è garantito grazie al peso proprio della struttura, ovvero attraverso forze di compressione di elementi verticali che trasmettono il peso della costruzione in fondazione. Le strutture tensegrali hanno invertito questo principio costruttivo. Infatti esse non dipendono dalla legge di gravità grazie alla loro auto-stabilità e si configurano come stabili in qualsiasi posizione. La forza di gravità, fondamento storico dell'ingegneria strutturale, assume qui un ruolo di secondo piano. L'approccio progettuale è invertito: l'equilibrio statico è ottenuto dalla creazione di uno stato autonomo di equilibrio attraverso barre (sollecitate prevalentemente a compressione) e cavi in trazione e, quindi, per essere in equilibrio non necessita del principio gravitazionale.

Il sistema di compressione discontinua/trazione continua, la capacità di auto-equilibrio e la precompressione conferiscono proprietà/caratteristiche tensegrali molto interessanti ed originali rispetto alla maggior parte delle strutture di ingegneria. Le strutture tensegrali sono:

- leggere rispetto ad altre tipologie costruttive con materiali di pari resistenza;

- strutture reticolari che non presentano taglio, momento flettente e momento torcente ma solo sollecitazione di compressione e trazione;
- assemblate a secco;
- enantiomorfi, cioè che sotto carico assiale, sono soggetti ad una rotazione intorno al loro asse con direzione che dipende dal senso di rotazione del sistema. Possono essere generate coppie specularmente simmetriche e sovrapponibili, "destrorsa" (destrogiro) e "sinistrorsa" (levogiro);



5.2.1 – Esempio di pretensionamento di un modello tensegrali.

- molto sensibili alle vibrazioni sotto carichi dinamici;
- ripiegabili e dispiegabili;
- progettate per essere assemblate ed unite per generare diverse configurazioni partendo da una cellula base. Maggiori sono le triangolazioni presenti nella configurazione di progetto maggiore è la rigidità della struttura;

- preposte ad avere un grado di tensione dei componenti precompressi proporzionale alla quantità di spazio che occupano;
- capaci di rispondere globalmente in modo da trasmettere ed assorbire uniformemente le sollecitazioni locali;

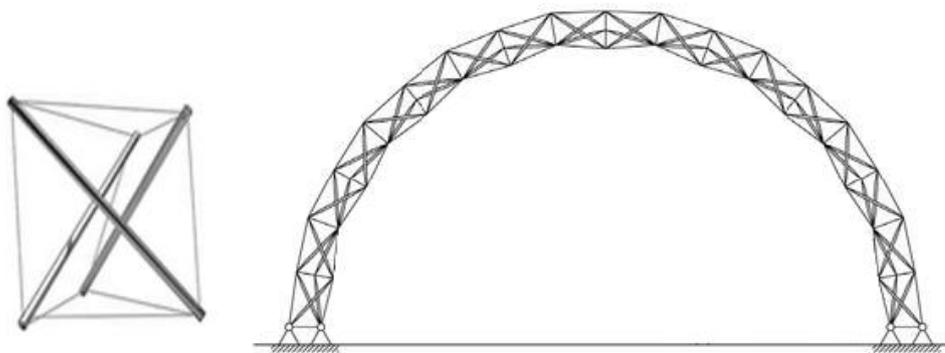


Fig. 5.2.2 – Esempio assemblaggio monodimensionale di un arco tensegrale di classe 1.

- inclini a rispondere nel loro insieme così che le sollecitazioni locali sono trasmesse uniformemente e assorbite su tutta la struttura;
- disposte ad avere un assemblaggio modulare. Possono infatti essere progettate per essere assemblate ed unite per generare diverse configurazioni partendo da una cellula base. Maggiori sono le triangolazioni presenti nella configurazione di progetto, maggiore è la rigidità della intera struttura.



Fig. 5.2.3 – Esempio della capacità ripiegamento di una torre tensegrale di classe 1.

### 5.2.1 Vantaggi

I principali vantaggi che sono stati riscontrati in seguito a ricerche e studi teorici e di laboratorio risultano essere i seguenti:

- l' applicazione in ingegneria sismica per la capacità di assorbimento di urti e vibrazioni sismiche (forze orizzontali, ecc...);
- la caratteristica di autostabilità dei singoli moduli tensegrali garantisce la possibilità di creare sistemi attraverso il loro assemblaggio modulare. Questa caratteristica comporta la possibilità di reiterazione del modulo base prescelto.
- la possibilità di costruire facciate tensegrali controllabili, ali e pareti ventilate attorno l'edificio;

- la facile integrazione delle strutture tensegrali con i pannelli acustici e solari, i quali possono essere identificati con membrature rigide speciali della struttura;
- il principale vantaggio di tali strutture è la minimizzazione della massa. È stato infatti dimostrato che le architetture tensegrali garantiscono la minima massa strutturale per una varietà di condizioni di carico;
- la caratteristica di autostabilità dei singoli moduli tensegrali che garantisce la possibilità di creare sistemi attraverso il loro assemblaggio modulare. Questa caratteristica comporta la possibilità di reiterazione del modulo base prescelto;
- la capacità di cooperazione tra la struttura e la meccanica del controllo. Ciò avviene attraverso il cambiamento della configurazione di equilibrio della struttura, in modo opposto a quanto avviene nel controllo tradizionale;
- la potenzialità di acquisire energia dall'ambiente (come ad esempio energia eolica e sismica), attraverso la conversione dell'energia meccanica immagazzinata nella struttura in energia elettrica;
- la probabilità di costruire facciate tensegrali controllabili, ali e pareti ventilate attorno l'edificio;
- la facile integrazione delle strutture tensegrali con i pannelli acustici e solari, i quali possono essere identificati con membrature rigide speciali della struttura;

- la impossibilità a subire l'effetto di coppia. Infatti l'instabilità, causata dalla snellezza è molto rara a causa della ridotta lunghezza dei loro componenti sollecitati a compressione;

### **5.2.2 Svantaggi**

I punti di debolezza dei sistemi tensegrali invece sono:

- la difficoltà di messa in opera di strutture tensegrali di particolare configurazione geometrica;
- l'esigenza di manodopera altamente specializzata comporta un aumento dei costi di realizzazione rispetto alle tradizionali strutture in carpenteria metallica;
- la scarsa diffusione dei codici di calcolo e strumenti di progettazione adeguati (negli ultimi anni sono stati creati codici di calcolo "ad hoc" inerenti la progettazione topologica ottimale dei sistemi tensegrali (Tensopt\_Matlab) dove è implementato l'algoritmo di minimizzazione della massa. Altri codici di calcolo sono stati creati dall'Ing. Micheletti per progettare e calcolare sistemi tensegrali. 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;
- la complessità della progettazione (Burkhardt, 2004);
- la difficoltà di produzione in serie di elementi prefabbricati di forme curvilinee;
- la necessità di risolvere il problema della confluenza (o nodi) di più barre in acciaio [26].

### 5.3 Classificazione

Nei primi decenni successivi alla scoperta dei sistemi tensegrali si è progettato, nei vari campi di applicazione, esclusivamente strutture di classe 1, ovvero costituite da un unico elemento rigido convergente in un nodo.



Fig. 5.3.1 – “Dragon”, scultura tensegrali “pura” (di classe 1) di K. Snelson.

Per anni Fuller, Snelson ed Emmerich, i pionieri dei sistemi tensegrali, hanno progettato strutture e sculture tensegrali di questa tipologia (strutture tensegrali pure), senza considerare le altre possibili configurazioni. In realtà la definizione ufficialmente riconosciuta di tensegrale non definisce il numero di elementi che possono comporre le

barre compresse e di conseguenza è possibile avere strutture tensegrali caratterizzate da un set di  $k$  componenti compressi collegati tra di loro e schematizzabili come un unico elemento. Tali tipologie vengono classificate come strutture tensegrali di classe 2, 3, 4, etc. in base al numero di barre che convergono in un nodo.

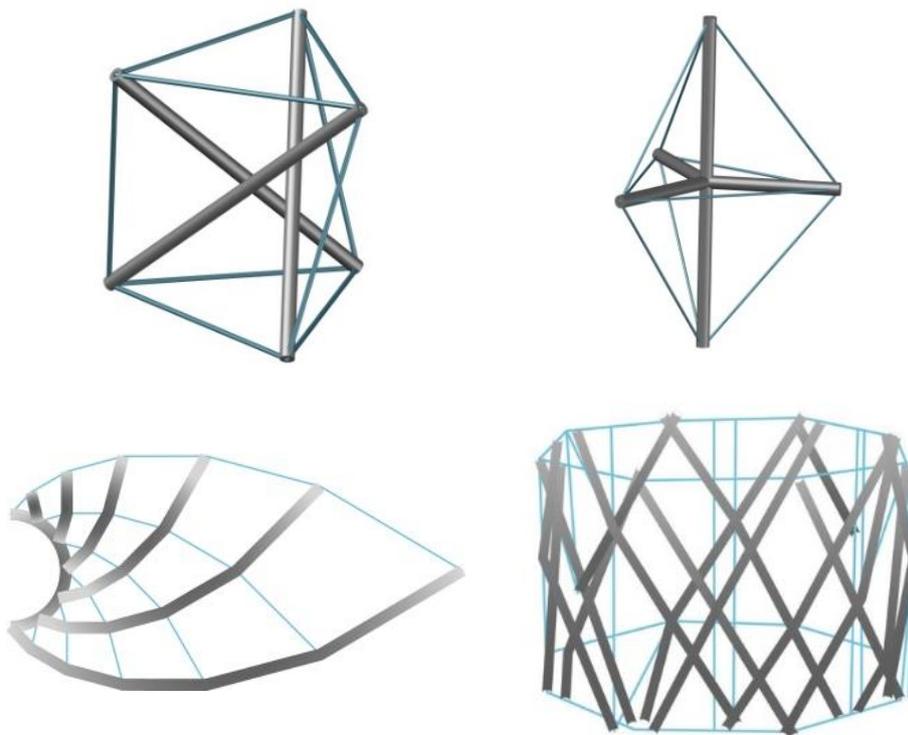


Fig. 5.3.2 – Esempi di strutture tensegrali classe 1 e classe  $k$  (figure restanti).

Gli sviluppi scientifici portati avanti parallelamente da vari gruppi di ricerca in tutto il mondo, hanno generato diverse “tipologie di nomenclatura” per descrivere le varie configurazioni.

Un sistema di classificazione ufficialmente riconosciuto è stato proposto da René Motro [22] e consiste nella nomenclatura che segue:

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

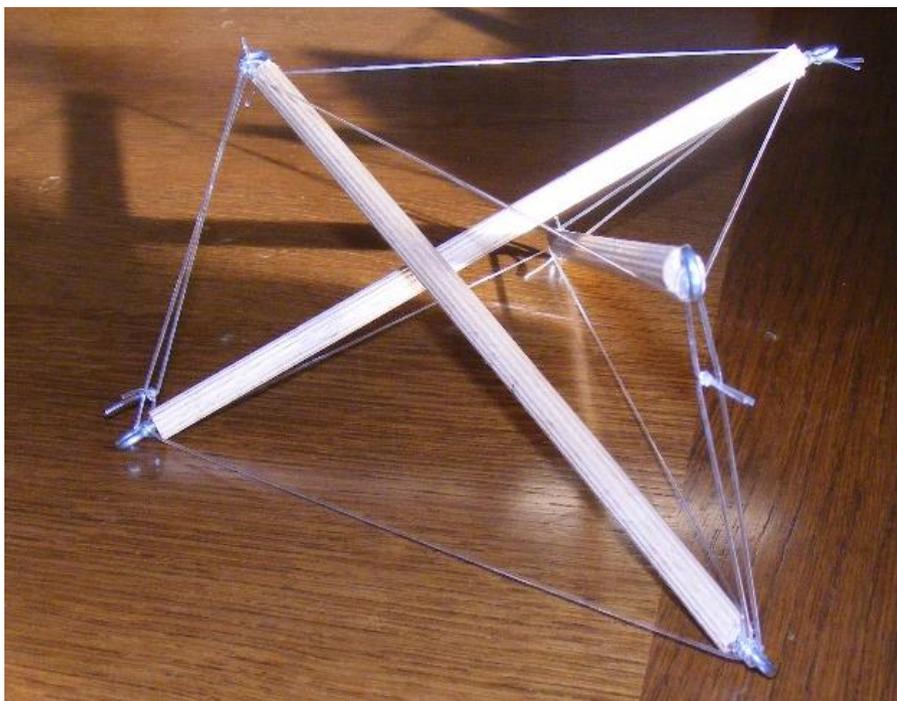


Fig. 5.3.3 – Il modulo base "Simplex" n6-S3-C9-R-SS.

Facendo riferimento a questo sistema di classificazione il prisma base avrebbe la seguente definizione: n6-S3-C9-R-SS.

Altre definizioni posso essere: prisma a 3 aste, 3 aste e 9 cavi, 3 aste a strato singolo, equilibrio elementare, twist element, etc.

Nel codice di riferimento, inoltre, viene riportato il senso destrogiro o levogiro dell'elemento.

## 5.4 Proprietà di ripiegamento/dispiegamento

Come si è già visto nei precedenti capitoli, per tensegrale si intende un particolare tipo di sistema reticolare spaziale dove gli elementi in tensione, i cavi, non hanno resistenza alla compressione e costituiscono una rete continua, mentre gli elementi in compressione, le aste, non hanno resistenza alla tensione e costituiscono una serie di elementi discontinui. Quindi le barre di tali strutture non si toccano mai e sono collegate tra di loro esclusivamente da una maglia di cavi in tensione.

La rigidità dei cavi di valore maggiore rispetto ad una semplice struttura reticolare, permette di conferire a tali strutture proprietà dinamiche. I sistemi tensegrali infatti si possono definire come sistemi trasformabili ovvero in grado di cambiare la propria configurazione tridimensionale.

Sistemi tensegrali dispiegabili si possono ottenere o modificando la dimensione delle barre utilizzando aste telescopiche oppure modificando la lunghezza o il grado di tensione dei cavi. La seconda modalità è quella più facile da realizzare in quanto fa riferimento ai principi della scienza delle costruzioni. Un sistema meccanizzato regola la crescita/diminuzione di tensione all'interno dei cavi controllando di conseguenza il ripiegamento/dispiegamento di essi.

Gli studi che hanno sviluppato questi modelli dinamici sono stati elaborati principalmente da M. Bouderbala che applicò le prime idee di mobilità a delle strutture a cellula singola di tensegrali (un'unità a quattro aste) e successivamente a delle griglie piane a doppio strato composto da moduli-unità base.

Strutture tensegrali sono già state usate in architettura e nell'arredamento, ma le "tipologie dinamiche" sono ancora a livello di studio e sono principalmente utilizzate in campo aerospaziale. Le ricerche pratiche e teoriche nel settore delle costruzioni però stanno aumentando e la possibilità che vengano realizzate strutture estensibili in architettura è un trend innovativo ma fondato su tecnologie già sufficientemente sperimentate.

Gli esempi più interessanti che riguardano le proprietà di ripiegamento/dispiegamento provengono dal campo delle applicazioni spaziali. Infatti i problemi di spazio, leggerezza e costi di trasporto hanno maggior rilevanza in funzione di un utilizzo aerospaziale.



Fig. 5.4.1 – Modello di struttura pieghevole tensegrale con aste telescopiche.

Esempi di oggetti realizzati sono prototipi di antenne paraboliche caratterizzati da una configurazione di base compatta che poi si distende al momento. Nelle torri tensegrali dispiegabili, mostrate in fig. 5.4.1,

sono state utilizzate aste telescopiche in grado di allungarsi contemporaneamente evitando quindi problemi di “intreccio” (“entanglement”) dei cavi. Esistono diversi metodi per rendere una struttura tensegrale dispiegabile e tutti fanno riferimento al controllo delle aste, dei cavi oppure di entrambi gli elementi.

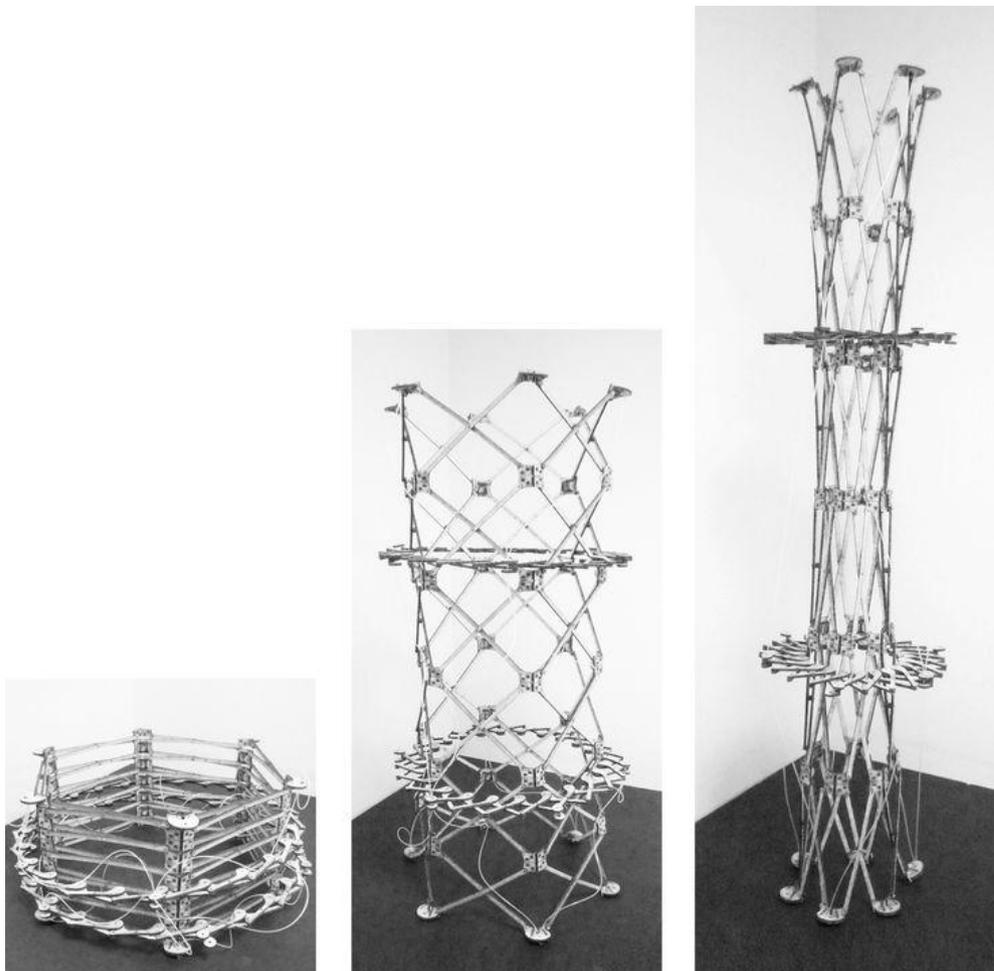


Fig. 5.4.2 – Esempio ripiegamento griglia tensegrale.

Il Laboratoire Génie Civil a Montpellier, coordinato dal Prof. Motro, ha realizzato prototipi di torri tensegrali dispiegabili che presentano giunti tra le aste in modo da ottenere una maggiore rigidezza globale della struttura. Questa tipologia di giunto ad onor del vero, contraddice la definizione intrinseca di tensegrali anche in quanto presenta alcuni cavi privi di tensione e aste in contatto tra di loro. Anche il Caltech di San Diego, con Robert E. Skelton, d'altro canto, ha svolto un' interessante ricerca sul tema del dispiegamento/ripiegamento di sistemi intelligenti a geometria variabile. Tali studi, a differenza di quelli sopra citati, si sono basati su prototipi privi di giunti tra le aste e quindi congruenti con la definizione estesa di tensegrale.

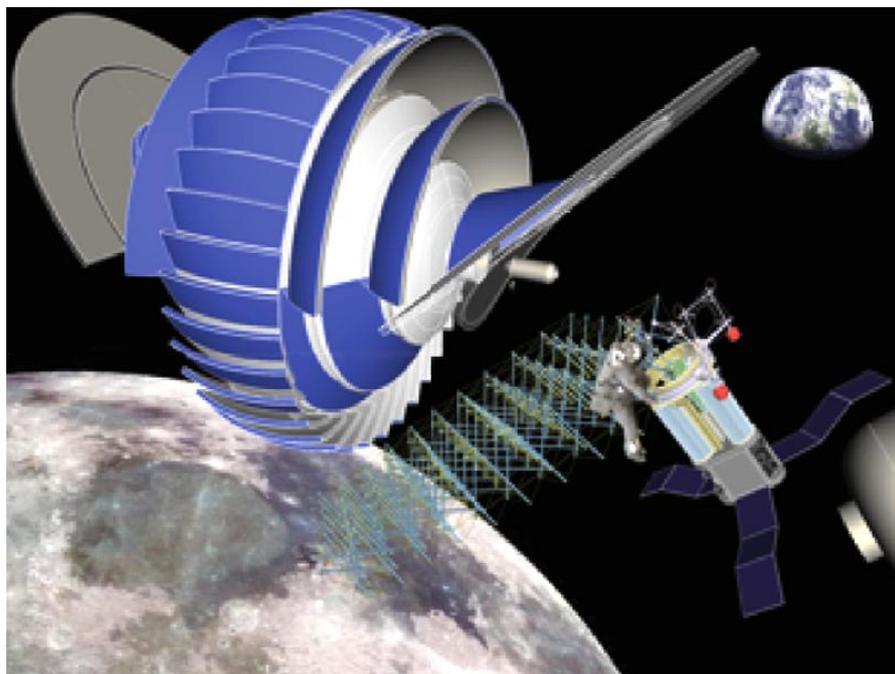


Fig. 5.4.3 – Satellite tensegrale dispiegabile, Robert E. Skelton.

Un interessante esempio di struttura tensegrale dinamica è stato studiato da Robert E. Skelton e riguarda la progettazione di un sistema di copertura tensegrale di minima massa dispiegabile atta a coprire i canali d'acqua e supportare allo stesso tempo pannelli solari rigidi. La struttura risulta essere un'efficiente sistema tensegrale che garantisce un livello di complessità ottimale (cioè un numero ottimale di membri) per la minima massa.

La progettazione di strutture a ponte con la tecnologia tensegrale ha dimostrato risultati ottimi in funzione del materiale prescelto e dei carichi esterni applicati, in particolare per un carico distribuito (dal peso di pannelli solari e carichi da vento), soggetto a deformazione e cedimento dei vincoli. L'esito finale ottenuto attraverso l'applicazione dell'algoritmo di minimizzazione della massa è una struttura tensegrale di classe 1 (si fa riferimento sempre alla sola struttura di supporto sotto il ponte).

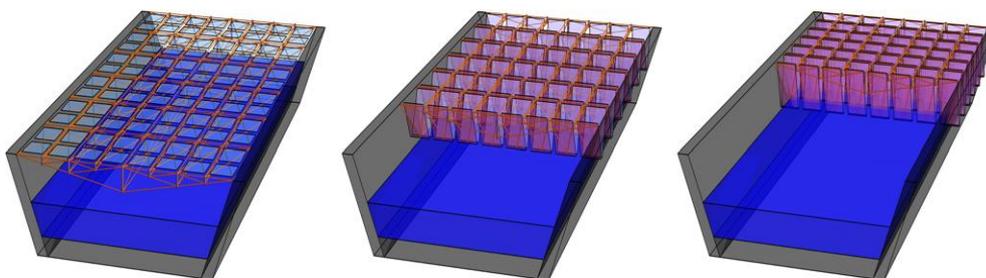


Fig. 5.4.4 – Differenti configurazioni di una copertura solare dispiegabile per canali idrici.

Queste strutture composte da membri assialmente-caricati (sollecitate solo a trazione e compressione), possono essere facilmente

implementabili e consentono applicazioni valide per le piccole luci. Il progetto si basa sulla dimostrazione che sistemi tensegrali di minima massa possono essere sfruttati come dispositivi di ombreggiatura per prevenire o ridurre una perdita di evaporazione, mentre la generazione di energia elettrica è garantita dai pannelli solari in copertura.

In ingegneria civile, molti tipi di strutture a ponte sono noti ed in uso, quali, ad es.: ponti trave, ponti a sbalzo, ponti ad arco, ponti sospesi, e ponti strallati, per citarne solo alcuni esempi. Purtroppo molto spesso nella progettazione di tali ponti non si tiene conto dell'ottimizzazione della minima massa. Per fermare le perdite per evaporazione gli studi effettuati hanno dimostrato i benefici anche di natura economica della copertura degli acquedotti che portano l'acqua in California dal Fiume Colorado. Per determinare il beneficio economico di tale opera si deve progettare in primis il sistema di supporto tale da utilizzare la minima quantità di materiale possibile, e poi riconsiderare le proiezioni economiche. L'analisi scientifica portata avanti dai ricercatori ha dimostrato che strutture tensegrali di minima massa come supporto ai pannelli solari sono molto efficienti e tendono a fornire valide soluzioni sotto determinate condizioni di carico.

## Capitolo 6

# Tipologie costruttive e principali realizzazioni

*<...le Tensegrali sono ora applicabili all'architettura come un sistema strutturale fondato.>*

Kenichi Kawaguchi

## 6.1 Introduzione

La scarsa conoscenza della sofisticata tecnologia strutturale tensegrale, la sua peculiare complessità e la mancanza di un approccio unitario e preciso sull'argomento sono tutti elementi da considerare come responsabili della poca diffusione delle tensegrali nel panorama dell'architettura contemporanea.

Kennet Snelson nel suo libro "Force Made Visible (2009)" asseriva che i sistemi tensegrali difficilmente potessero avere una concreta applicazione nel campo dell'ingegneria civile e dell'architettura. In base alla sua lunga esperienza e collaborazione con architetti e tecnici di tutto il mondo ha riscontrato che le numerose proprietà di questo sistema costruttivo sono incompatibili con le istanze e le esigenze dell'edilizia del XXI secolo.

E' bene sottolineare che oggi, motivi architettonici realizzati con il principio della tecnologia tensegrale non sono sporadici. Infatti, soprattutto nel campo delle coperture edilizie, sta nascendo una sensibilità sempre più crescente nei confronti di quest'innovativa tipologia strutturale.

Anche se le opinioni di Snelson trovano riscontri storici, non cambierebbe il fatto che numerosi ricercatori stanno lavorando sull'argomento, e tantissime sono le pubblicazioni, i saggi, gli articoli e le conferenze dedicate alla materia.

*"Le Tensegrali sono ora applicabili all'architettura come un sistema strutturale fondato"* concludeva il professore giapponese Kenichi

Kawaguchi<sup>15</sup>, Presidente IASS (Associazione Internazionale per la Shell e strutture spaziali), nella prefazione dell'ultimo libro di Renè Motro<sup>16</sup>.

Nel presente capitolo saranno illustrate le opere di architettura realizzate secondo la tecnologia tensegrale a livello sia nazionale che internazionale. Saranno inoltre mostrati numerosi concepts progettuali in fase di realizzazione ed infine analizzate le principali proprietà tecnologiche e costruttive facendo riferimento in particolar modo al campo dell'architettura trasformabile e delle coperture contemporanee.

## 6.2 Coperture tensegrali

Il funzionamento delle tensegrali (come suggerisce l'etimologia del termine) si fonda sul concetto di tensione che agisce all'interno di una struttura reticolare spaziale di concezione contemporanea. Il principio di compressione discontinua/trazione continua, assume un ruolo fondamentale soprattutto per la realizzazione di strutture di copertura.

I primi studi per la progettazione di coperture tensegrali sono stati eseguiti da Snelson ma non hanno mai trovato applicazioni diverse dalle sculture. Il vero motivo per cui le strutture tensegrali in architettura sono state raramente utilizzate è da attribuire al lento sviluppo tecnologico riguardante la possibile applicazione di materiali innovativi nelle strutture tensionali. Queste strutture hanno il vantaggio di reggersi grazie alla tensione dei cavi di acciaio, materiale che resiste straordinariamente alla trazione, ma lo svantaggio è che lo stesso acciaio ha la caratteristica

---

<sup>15</sup> Kenichi Kawaguchi, Institute of Industrial Science, University of Tokyo.

<sup>16</sup> René Motro, *"Tensegrali – Structural Systems for the Future"*, Hermes Penton; Uitgawe edition (1 Jun. 2003).

di cedere, cioè di allungarsi per elasticità; nel momento in cui si allunga perde tensione e quindi il sistema diventa labile fino a poter collassare.

Oggi giorno, i recenti progressi nel campo della scienza e tecnica delle costruzioni hanno comportato la nascita di nuovi materiali compositi che garantiscono una maggiore resistenza a trazione nelle strutture di copertura di grande luce.

La sollecitazione nelle aste reticolari avviene sempre nella stessa direzione in campo gravitazionale e, attraverso la costruzione del diagramma di Cremona riferito alle forze sollecitanti, si può facilmente arrivare ad individuare quali sono le aste tese e quali quelle compresse. Il principio strutturale che viene applicato è quello di trasformare le aste sollecitate a tensione in tiranti, o, in altre parole, bisogna fare in modo che questi cavi siano talmente in tensione da determinare una sufficiente ed equilibrata compressione nelle altre aste.

Le proposte attuali presenti nel campo della ricerca internazionale fanno riferimento a studi che riguardano configurazioni di prismi tensegrali assemblati, definibili come griglie - cuscinetto dalle elevate capacità di carico. Altri ricercatori invece hanno sviluppato “tipologie tensegrali piatte sovrapposte” in modo da generare reti a doppio strato contiguo.

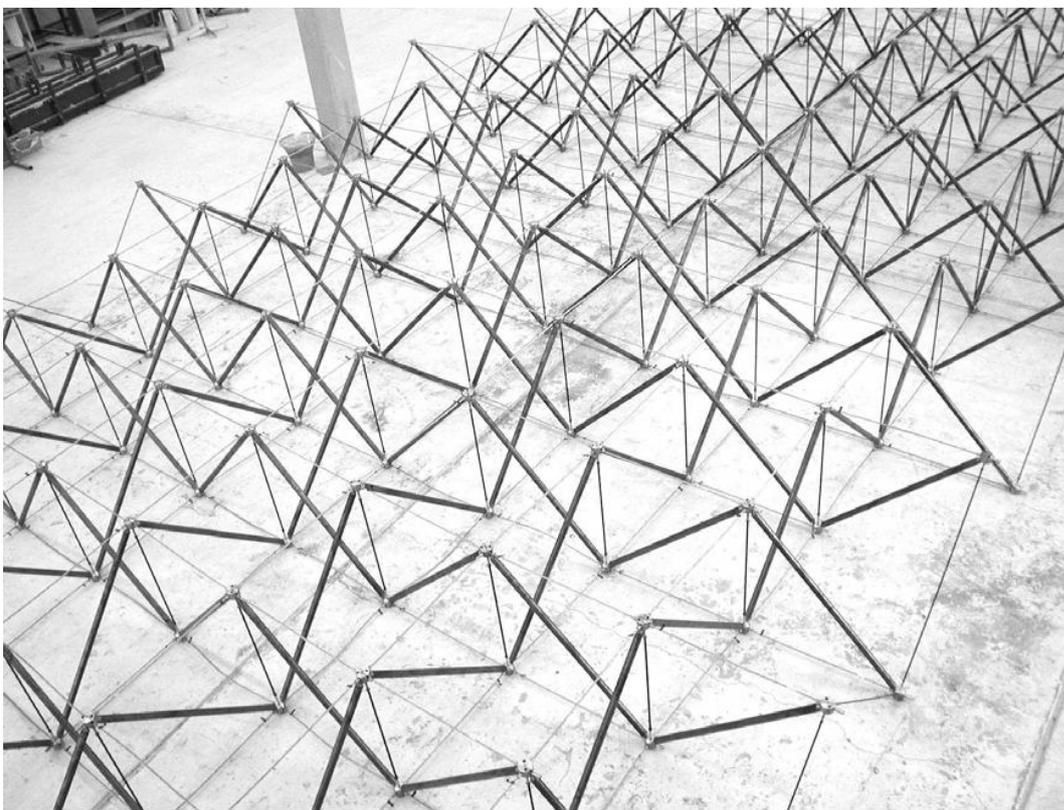


Fig. 6.2.1 – Prototipo di griglia realizzata al LMGC di Montpellier.

### **6.2.1 Il Museo Archeologico di Reggio Calabria [2011]**

Il Museo Archeologico nazionale di Reggio Calabria o Museo Nazionale della Magna Grecia è uno storico ed importante ente di conservazione della cultura italiana, in possesso di una delle più ragguardevoli collezioni di reperti provenienti dalla Magna Grecia. Le collezioni archeologiche del museo comprendono materiali di scavo da siti della Calabria (tra cui i più famosi Bronzi di Riace), della Basilicata,

e della Sicilia, esempi di arte e storia della Magna Grecia (VIII secolo a.C).

L'edificio che ospita il museo è denominato comunemente "Palazzo Piacentini", dal nome del progettista, o più propriamente "Museo Nazionale di Reggio Calabria" e rappresenta un esempio paradigmatico di architettura "Piacentiniana" oltre ad essere uno dei rari esempi di edificio museale progettato e realizzato esclusivamente per tale destinazione funzionale.

Il progetto per il restauro, l'ampliamento ed i nuovi allestimenti, è stato inserito nel programma per le celebrazioni dei 150 anni dell'Unità di Italia e rappresenta l'opera pubblica di maggiore rilevanza tra quelle realizzate nel Mezzogiorno.

La progettazione architettonica, a firma dello studio ABDR architetti associati, ha perseguito principalmente l'obiettivo di restaurare lo storico edificio progettato da Marcello Piacentini negli Anni '30 e ha provveduto alla sua messa a norma per quanto attiene agli aspetti antisismici ed impiantistici.

L'elemento strutturale innovativo che ha caratterizzato il restauro dell'edificio Piacentini è proprio la copertura vetrata dell'antica corte centrale. Essa è stata realizzata attraverso l'utilizzazione del paradigma strutturale tensegrale. L'area di base da coprire aveva una dimensione di 28 x 13 m e l'obiettivo ricercato era quello di coprire tale superficie attraverso una tipologia strutturale in grado di sopportare un doppio piano di lastre in vetro (delle dimensioni di circa 2,00m x 2,60m ciascuna) ipotizzato in fase di progettazione architettonica. L'ipotesi iniziale era orientata verso la realizzazione di un complesso sistema

strutturale composto da un doppio cassettonato di travi in acciaio sovrastante il cortile centrale, dall'impatto estetico estremamente pesante ed invasivo.

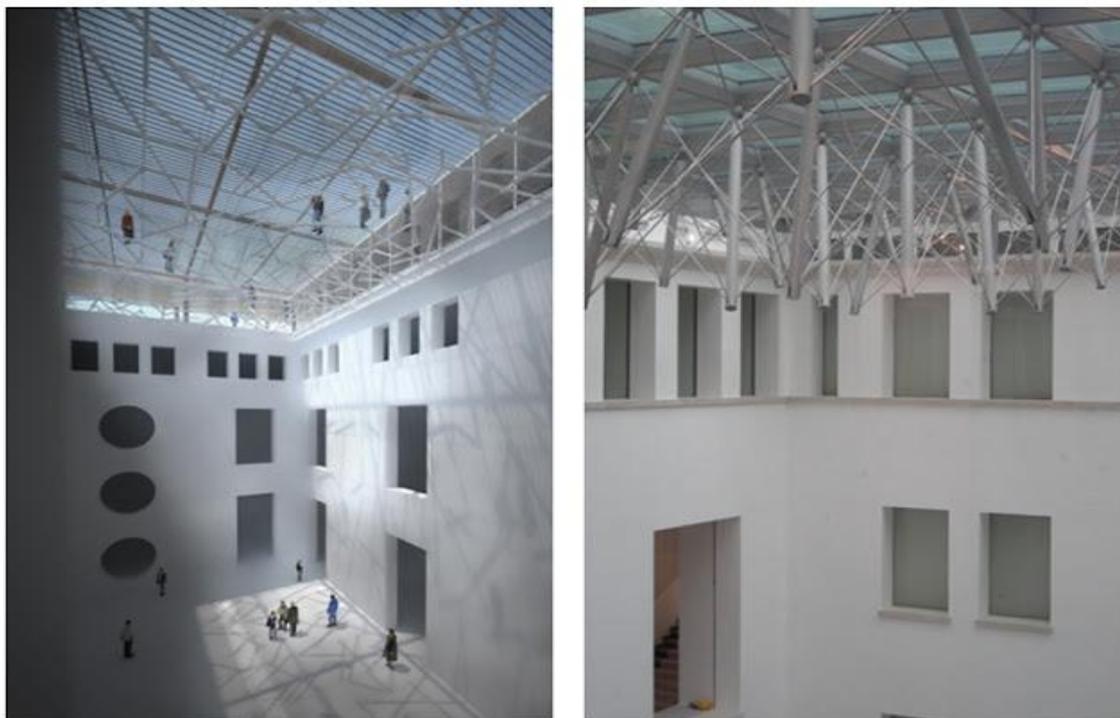


Fig. 6.2.1.1 – Vista interna del solaio tensegrale, Museo Archeologico di Reggio Calabria, [2011]

L'architetto Paolo Desideri, progettista della struttura, racconta di essere venuto a conoscenza di un sistema brevettato di auto-tensionamento dei cavi sospesi in seguito ad un incontro con l'ingegner Andrea Vallicelli.

Nel sistema adattato la perdita di tensione non è legata ai cavi, ma all'allentarsi dei capo-corda, per cui lo strutturista ha studiato e brevettato

uno straordinario sistema che potesse risolvere questo fondamentale problema tecnologico. Grazie ad un accurato trasferimento tecnologico (derivante dallo studio di cavi per la velistica), si è scoperto poi che questo sistema avrebbe potuto consentire di realizzare la struttura trasparente in acciaio e vetro e certificarla da un punto di vista normativo. Il risultato è stato un grande successo in termini di ingegneria strutturale.

I terminali delle aste compresse, osservati in sezione, sono attraversati da quattro cavi (tondi e di uso principalmente nautico) schiacciati in testa e non capo-cordati. Questa finezza tecnologica del nodo ha garantito la possibilità di un ancoraggio in trazione per strozzamento con dei grandi “bulloni” terminali attraverso macchine a controllo numerico. I cavi creano una configurazione caratteristica grazie al loro orientamento non regolare orientato verso diverse direzioni senza una logica compositiva bensì strutturale (l’effetto creato ricorda una sequenza di aghi sospesi in modo random).

L’aspetto interessante di questo processo costruttivo è quello che riguarda il modello matematico di calcolo dell’ impalcato tensegrale. Nel caso di un perimetro regolare di forma quadrilatera (come nel caso della geometria della corte del complesso museale), le barre tensegrali possono assumere un numero  $n$  di direzioni infinite, ma devono rispettare le condizioni per poter garantire ad un sistema fortemente irregolare di aste a perimetro rettangolare, le stesse sollecitazioni di compressione. Nei perimetri circolari, ovvero radiali o polari, le aste rigide sospese starebbero sinergicamente in posizione simmetrica rispetto al centro di convergenza. La figura del rettangolo viene interpretata dal codice di calcolo come una geometria irregolare, disponendo le barre sospese in

modo automatico e random attraverso algoritmi di ottimizzazione statica che conferiscono flessibilità di allungamento e accorciamento. In questo modo si ha un connubio tra scienza, tecnica, arte e forma che interagiscono seguendo un concept progettuale definito a priori in fase iniziale.

I progettisti attraverso questa emblematica applicazione ingegneristica hanno voluto dimostrare che sia il progetto, sia la morfologia possono essere visti come elementi atti a doversi fare carico della risoluzione dei problemi dell'architettura contemporanea. La loro visione è rivolta al "problem solving" e non al "problem adding" (come spesso accade nel mondo della progettazione), ovvero la minimizzazione dei problemi attraverso l'impegno di risorse creative.

Viene sottolineato che si tende sempre ad allontanarsi da quella tecnologia troppo vincolante, preferendo a quest'ultima la forma. La progettazione strutturale deve andare di pari passo con la progettazione architettonica e viceversa e tutte le criticità vanno risolte congiuntamente fin dall'inizio.

Il grande e probabile rischio che comporta l'autoreferenzialità della forma è quello di portare eventualmente alla mancanza di controllo strutturale e, nei casi estremi, al probabile collasso.

La conoscenza della scienza e tecnica delle costruzioni deve essere la base culturale dei progetti onde evitare che problemi di autoreferenzialità della forma producano strutture labili. A tal proposito il progettista così afferma:

*<...bisogna avere la sensibilità sufficiente per essere in grado di suonare anche quello strumento. Per essere bravi direttori d'orchestra non si*

*deve essere necessariamente solisti di nessuno strumento, ma bisogna conoscere tutti gli strumenti, anche se non da virtuosi>.*



Fig. 6.2.1.2 – Vista inferiore, Museo Archeologico di Reggio Calabria, [2011]

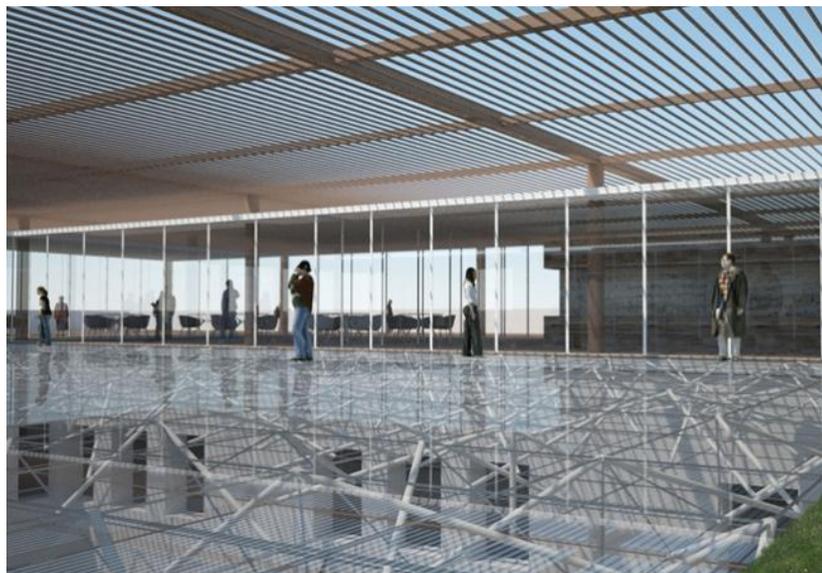


Fig. 6.2.1.3 – Render di progetto, Museo Archeologico di Reggio Calabria, [2011]

L'applicazione del solaio vetrato resa possibile grazie alla tecnologia tensegrale ben si sposa con le esigenze della sostenibilità riguardanti l'efficientamento energetico del patrimonio edilizio esistente.

Come si evince dalle figure il cortile centrale grazie al solaio vetrato, riesce a garantire trasparenza e quindi produzione di aria calda in estate grazie al fenomeno dell'irraggiamento solare con consecutivo effetto serra. Quest'ultimo non è di per se dannoso in quanto l'aria non staziona in modo permanente nel cortile ma viene intercettata dai camini estrattori realizzati nella rifoderatura del perimetro esterno e portati in sommità del piano aggiuntivo (realizzato in carpenteria) mentre, di contro, viene richiamata dai piani di base aria fredda trattata con una macchina di raffreddamento e umidificazione. Si innesca dunque un ciclo di aria convettivo che, alimentato dall'irraggiamento solare, si sviluppa in condizioni di calma di vento, favorito dalla trasmittanza del solaio in vetro.

In sommità vi è un piano progettato completamente ex novo caratterizzato da una sequenza di elementi metallici di oscuramento che ospita una caffetteria ed una terrazza che con vista sullo Stretto di Messina.

Le facciate del cortile interno vantano la rimozione di tutti gli infissi, riportando la geometria degli imbotti alla luce. Questo intervento concretizza una rivitalizzazione della tendenza metafisica di Marcello Piacentini e più in generale del Razionalismo Italiano. La composizione delle pareti centrali della corte sono state riviste da Alfredo Pirri, celebre artista contemporaneo di origini calabresi che ha realizzato su tre delle

quattro pareti del grande ingresso delle suggestive opere d'arte create con materiali innovativi.

La grande installazione artistica dialoga e si integra con il nuovo atrio di ingresso che corrisponde al vecchio cortile interno e che si configura, appunto, come una nuova piazza monumentale aperta alla città. Essa consiste in una ulteriore foderatura realizzata in cartongesso, discosta di circa 8 cm e che è verniciata in rosso nella parte interna nascosta. L'effetto nell'orario diurno (ossia quando abbiamo una illuminazione zenitale) è quello di una ombra rossa che varia intensità e profondità fino al crepuscolo, ora in cui scompare definitivamente [77].

### **6.2.2 La Plata Stadium, Buenos Aires, Argentina [2003]**

La Plata Stadium di Buenos Aires (Argentina) costituisce l'esempio internazionale di maggior rilievo strutturale nel campo delle coperture tensegrali. Lo stadio è stato inaugurato nel 2003 ed ha una capacità di 53.000 posti a sedere. La copertura tensegrale de La Plata Stadium ha una forma in pianta derivante dall'intersezione di due cerchi di 85m di raggio, con distanza di 48m tra i due centri. La copertura dello stadio si estende longitudinalmente per 240m e 180m per il lato trasversale ed è stato realizzato utilizzando la tecnologia innovativa dei sistemi tensegrali i cui elementi principali sono costituiti da barre metalliche sospese da una rete di cavi d'acciaio ricoperta da una membrana traslucida composta da una fibra di vetro con copertura in teflon.

La trave perimetrale in acciaio genera un anello di compressione formato da un reticolo triangolare di tubi di acciaio.



Fig. 6.2.2.1 – Vista interna, “La Plata Stadium”, Buenos Aires, Argentina [2003]

Il corrente superiore dell'anello è la linea di partenza per la cupola formata da una rete triangolare di cavi, tipici per questo tipo di copertura. Il sistema è tridimensionale e ha quindi il vantaggio della triangolazione di elementi strutturali, migliorando la capacità di sopportare carichi e consentendo di adattarsi in modo convenzionale alle geometrie tipiche degli stadi. Sulla struttura di copertura sono montati i pannelli costituiti da una membrana formata con fibra di vetro rivestiti con Teflon che non contribuisce strutturalmente. Una caratteristica della cupola è che la struttura del cavo è completamente stabile e la loro stabilità non dipende dalla membrana, che è semplicemente una copertura. Il sistema tensegrale grazie alla pretensione riduce la deformazione della struttura e,

conseguentemente, la copertura è estremamente rigida, come se si trattasse di un tamburo.

Caratteristica peculiare dello stadio è la forma della copertura che può essere sia parzialmente che completamente chiusa permettendo di ospitare eventi e gare in qualsiasi tipo di condizioni atmosferiche.

La geometria della cupola brevettata con il nome "Twinstar" è il primo adattamento del concetto di copertura tensegrali Tenstar Dome con un contorno a doppio picco. Questa particolarità strutturale ha conferito il primato a La Plata Stadium come il primo stadio in tessuto coperto in Sud America e il primo stadio del Sud America progettato per essere anche parzialmente coperto grazie ai sui 312.545 metri quadrati di membrana in fibra di vetro PTFE.

L'organizzazione complessiva della struttura è caratterizzata da due percorsi che attraversano diagonalmente il campo e da una tortuosa strada, ondulata ed organica che lo avvolge come una cintura. La sovrapposizione di questi due elementi e il loro rapporto con i confini del campo producono una ricca sequenza di settori o zone differenziate che permettono la creazione di luoghi per i diversi eventi del programma.

L'intero progetto è integrato in un grande parco urbano, comprese le aree di parcheggio che si trovano in grandi aree boschive parte del complesso. Un eliporto e zona di parcheggio bus garantiscono l'accessibilità a tutti i tipi di utenti e spettatori.

Il Parco Urbano e il complesso sportivo nella città di La Plata vanta anche una pista di atletica con una capienza di 6.000 spettatori, varie strutture sportive all'aperto e una piscina.

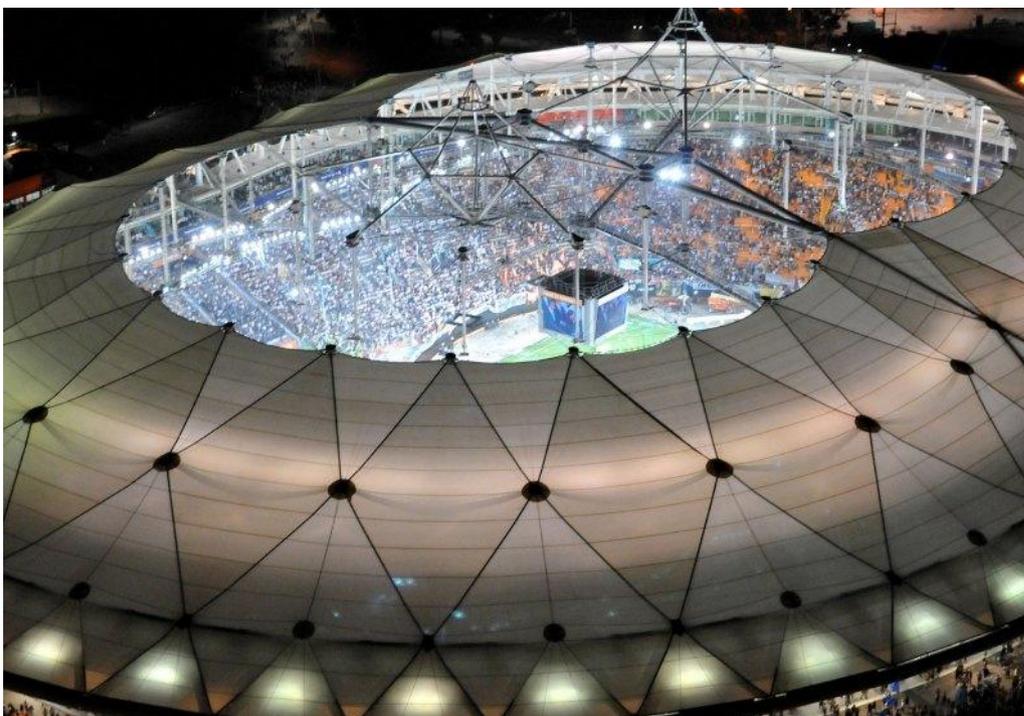


Fig. 6.2.2.2 – Vista esterna, “La Plata Stadium”, Buenos Aires, Argentina [2003]

Gli strutturisti sono Weidlinger Associates<sup>17</sup> i quali hanno anche lavorato sull'analisi strutturale di alcune opere artistiche di Snelson e nel "Georgia Dome" di Atlanta. Il progetto architettonico porta la firma dell'architetto Roberto Ferreira<sup>18</sup> e si è aggiudicato il premio di progetto eccezionale per le strutture internazionali di oltre \$ 100 milioni presso il Consiglio Nazionale delle Associazioni strutturali Engineers (NCSEA).

---

<sup>17</sup> Weidlinger Associates ha sede negli Stati Uniti ed è società di ingegneria strutturale che progetta e riabilita edifici, ponti e infrastrutture e fornisce servizi speciali nel campo della scienza applicata, medicina legale e sicurezza fisica.

<sup>18</sup> Roberto Ferreira, 6/12/1960 Rio de Janeiro. Architetto brasiliano contemporaneo dalla poetica informale e metafisica.

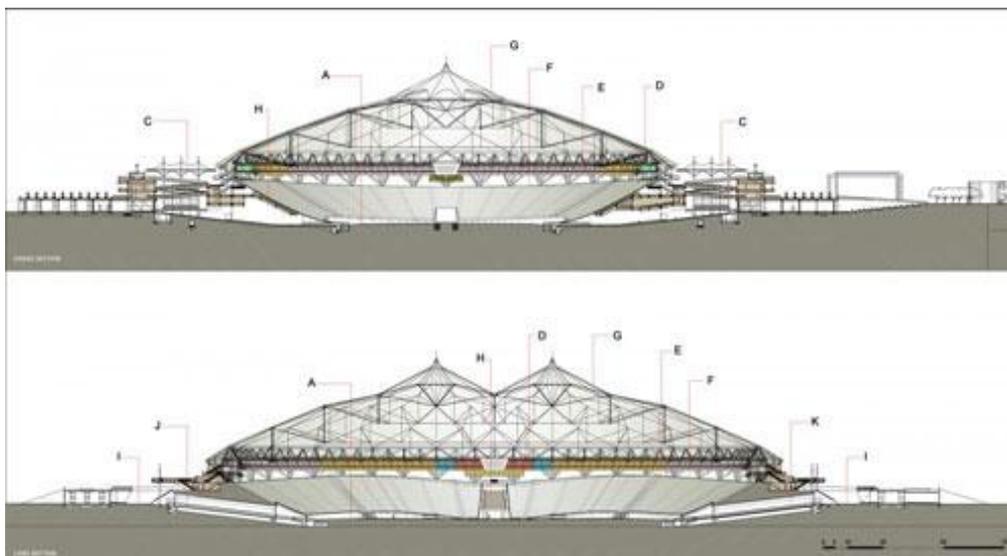


Fig. 6.2.2.3 – Sezione, “La Plata Stadium”, Buenos Aires, Argentina [2003]

Infine, è importante sottolineare altri meritevoli consensi che ha ottenuto il progetto de La Plata Stadium, ovvero il riconoscimento Engineering Excellence Platinum Award<sup>19</sup> 2012 da parte del Consiglio Americano di Società di Ingegneria di New York e, sempre nel 2012, il prestigioso Outstanding Struttura Award dalla International Associazione per Bridge e ingegneria strutturale.

<sup>19</sup> Ingegneria Excellence Awards è un concorso annuale (EEA) di ACEC e rende omaggio alle migliori realizzazioni nel campo dell'ingegneria strutturale di tutto il mondo. Dal 1967, le società di ingegneria degli Stati Uniti hanno presentato i loro progetti e i loro studi più innovativi nel programma annuale di Ingegneria Excellence Awards di ACEC (EEA) - "Academy Awards del settore engineering".



Fig. 6.2.2.4 – Particolare della copertura, “La Plata Stadium”, Buenos Aires, Argentina [2003]

### 6.2.3 Blur Building, Yverdon-les-Bains, Svizzera, [2002]

Realizzato sul lago Neuchatel in occasione dell’Expò 2002 di Yverdon-les-Bains, in Svizzera, il Blur Building è una piattaforma temporanea sospesa da una struttura tensegrale in acciaio avvolta da una scenografica nuvola di nebbia.

L’opera è stata progettata dagli architetti Elizabeth Diller e Ricardo Sconfidio e viene annoverata tra le opere simbolo della contemporaneità grazie alla sua performante creatività effimera che mette in risalto la spettacolarizzazione dell’architettura moderna. Una struttura che

sorprende realizzata con materiali nuovi che contaminano l'architettura fino a trasformarla.

Composta da ottaedri ibridi tensegrali che sorreggono l'intero impalcato a sbalzo, l'innesto architettonico consiste in una piattaforma, sollevata a 20 m dal livello dell'acqua, lunga circa 100 m e larga 60, che ha solo una mera funzione artistica basta su un sistema di ugelli dai quali fuoriesce l'acqua nebulizzata del lago [67].

Un sistema tecnologico che ha sintetizzato con efficacia molti elementi della ricerca scientifica più avanzata. La struttura sospesa in acciaio rompe tutte le convenzioni precedenti dell'architettura e si propone come un vero e proprio nuovo paradigma per l'architettura del futuro. Il Blur Building non è mai uguale a sé stesso. La grande palafitta ovale di 90 m di larghezza è caratterizzata da un complesso sistema di sensori, l'edificio muta costantemente al variare di alcuni parametri di lettura delle situazioni esterne. Il grado di umidità, la temperatura, il vento sono rilevati da un insieme di sensori che, attraverso programmi di trasformazione, comandano migliaia di ugelli che spruzzano in vario modo acqua nebulizzata. La nuvola entra in costante mutazione con l'edificio, lo cambia continuamente facendo emergere ora una prua, ora una terrazza, ora un ponte, ora nulla. Senza la lettura e la trasformazione delle informazioni ambientali, ci sarebbe solo la pura ossatura metallica di una piattaforma panoramica (che richiama l'architettura di Richard Buckminster Fuller).

La stazione meteorologica integrata controlla l'uscita della nebbia in risposta alle mutevoli condizioni climatiche come umidità, temperatura, direzione e velocità del vento. Utilizzando il monitoraggio e la posizione

rilevata dai sensori, ogni singolo profilo viene identificato, riconosciuto e distinto rispetto a qualsiasi altro visitatore. In questa stanza circondata da vetri i visitatori sperimentano un *"senso di sospensione fisica accresciuta da una apertura occasionale nella nebbia"*.

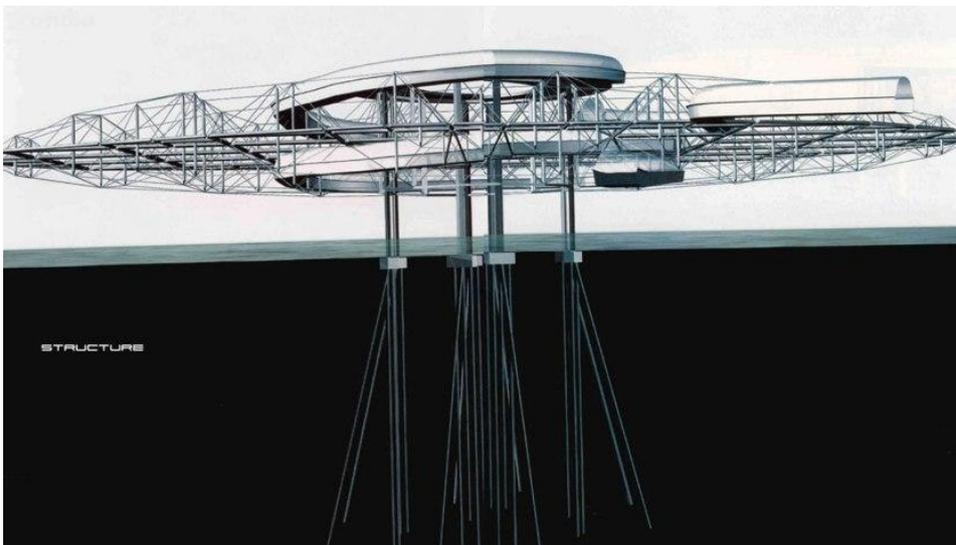


Fig. 6.2.3.1 – Sezione, “Blur Building”, Yverdon-les-Bains, Svizzera [2002]

La nube può ospitare fino a 400 visitatori avendo una capacità di carico molto elevata rispetto alla quantità di materiale impiegato. Questo progetto riveste un ruolo di notevole importanza nel campo della ricerca, in quanto utilizza tecnologie costruttive idonee alla realizzazione di sistemi tensegrali a sbalzo.

Tale opera poggia su quattro pilastri adagiati sul fondale del lago, dai quali si sviluppano le strutture ibride-tensegrali. Si definiscono “ibride” in quanto trattasi di un “falso” tensegrale poiché alcuni dei componenti

compressi si trovano sui bordi del sistema e non “all’interno” come richiesto dalla intrinseca definizione stessa.

Alcuni ricercatori francesi [22], successivamente alla realizzazione di tale opera, hanno studiato una ipotetica soluzione per renderla “pura”, ovvero per evitare il falso tensegrale attraverso la sostituzione delle travi di bordo con dei cavi tesi ad elevata resistenza. Una tale modifica progettuale farebbe rientrare il sistema strutturale nella definizione ufficialmente riconosciuta di tensegrali.

La modellazione tridimensionale è il fulcro del progetto, tema che ha una diretta relazione con una base geometrico-matematica e fa riferimento ad unità di studio e ricerca specificamente dedicate alla modellazione e parametrizzazione. Il Blur è un esempio di avanguardia nel settore di modellazione rigidamente matematica dell’architettura e quindi nell’ottimizzazione topologica di sistemi strutturali.



Fig. 6.2.3.2 – “Blur Building”, Yverdon-les-Bains, Svizzera [2002]

Dalla fondazione del loro studio nel 1979, Elizabeth Diller e Ricardo Scofidio hanno incentrato il loro lavoro basandolo su una stretta

integrazione tra architettura, progettazione urbana, paesaggio, arte e spettacolo realizzando molti progetti, che includono performance, installazioni d'arte e libri, oltre a edifici e spazi pubblici.

Al centro di questo progetto emerge la capacità e la volontà di mettere in discussione le certezze e i principi che da tempo conformano la definizione di architettura, cercando di ampliarla, di espanderla fino a trasformare la natura e la nozione stessa di spazio e di percezione all'interno di una visione modernista.

Cambia totalmente il rapporto tra struttura e paesaggio, tra costruito e ambiente, tra uomo e architettura e proprio le loro opere diventano dei meccanismi/strumenti che riescono ad attuare la globale interazione tra questi elementi.

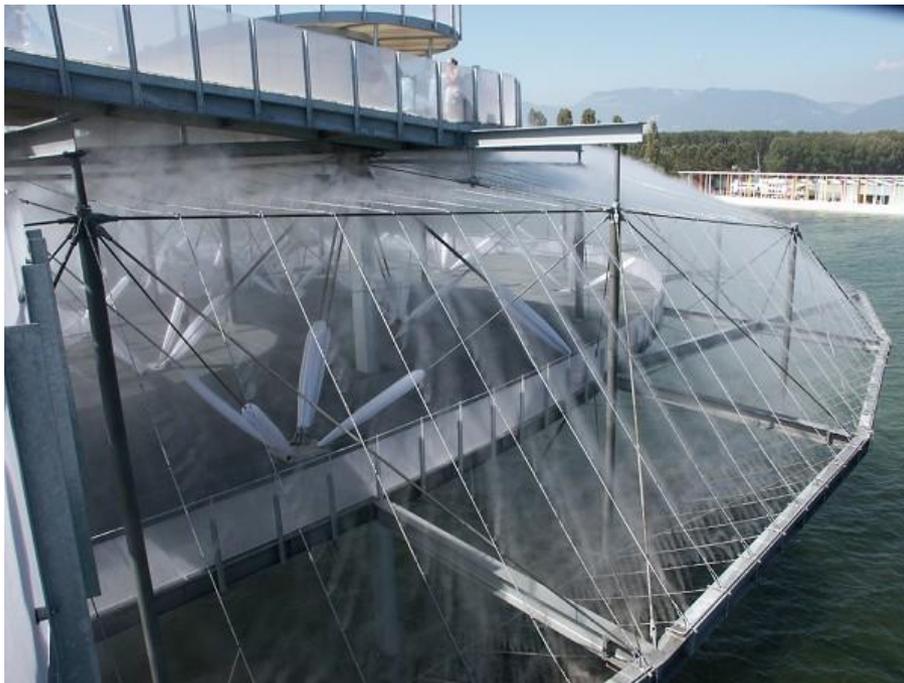


Fig. 6.2.3.3 – Particolare di struttura tensegrale, “Blur Building”, Yverdon-les-Bains, Svizzera [2002]

## 6.3 Ponti tensegrali

### 6.3.1 Kurilpa Bridge, Brisbane [2009]

Il Kurilpa Bridge è il più grande esempio di ponte tensegrale realizzato al mondo. Ha una struttura ibrida tensegrali in quanto solo i longheroni orizzontali sono conformi a tale principio che produce una sinergia tra i componenti di tensione e compressione creando una struttura leggera e al tempo stesso incredibilmente robusta.

La Baulderstone Queensland Pty Ltd<sup>20</sup> ha costruito il ponte con il team di progettazione della società insieme alla Cox Rayner Architects e Arup Engineers.



Fig. 6.3.1.1 – “Kurilpa Bridge”, Brisbane, Australia.

Il ponte ha una luce di 470 metri con una campata principale di 128 metri. Si stima che siano state impiegate circa 560 tonnellate di acciaio strutturale tra cui 6,8 km di trefoli di acciaio per gli elementi tesi.

<sup>20</sup> Lendlease’s Engineering business è un’azienda leader nel settore delle infrastrutture civili.

La struttura a ponte comprende 18 impalcati di ponte in acciaio strutturale e 16 longheroni orizzontali. Il sistema di cablaggio complessivo dispone di 80 principali cavi zincati di filo elicoidale e 252 cavi tensegrali che sono fatti da acciaio inossidabile superduplex. La messa in opera di tali elementi ha costituito la fase più delicata e rischiosa del progetto, dove un errore nella dimensione di uno degli elementi avrebbe fermato il percorso critico del progetto. Un'altra importante sfida per i tecnici coinvolti nella progettazione è stata la costruzione della sovrastruttura posizionata verticalmente al centro del ponte.

Il ponte è illuminato con un sofisticato sistema di illuminazione a LED, che può essere programmato per produrre una serie di diversi effetti luminosi come è possibile vedere dalle fig. 6.3.1.1 e 6.3.1.2. A seconda delle configurazioni di illuminazione, circa il 75% - 100% della potenza richiesta è fornita dall'energia solare.



Fig. 6.3.1.2 – “Kurilpa Bridge”, Brisbane, Australia.

Il progetto del Kurilpa Bridge è stato l'occasione non solo per fare un nuovo collegamento ciclo-pedonale attraverso il fiume di Brisbane, ma anche per dar vita a nuove forme di spazio pubblico e per ridisegnare l'identità di una città elevandosi a simbolo di scienza, arte e tecnologia. Concepito solo come ponte pedonale e ciclabile abbraccia lo spirito di una rilassata città subtropicale che cerca di dare la priorità ai pedoni e ai ciclisti portatori di uno stile di vita sano. Allo stesso modo, la progettazione della struttura e dei suoi spazi è stata concepita per celebrare Brisbane come città del design contemporaneo a livello internazionale. L'intento alla base della progettazione del Kurilpa Bridge è stato quello di rafforzare e incarnare la natura rilassata e informale

intrinseca della città e il suo ambiente subtropicale. Dopo aver studiato in fase progettuale varie tipologie di ponti convenzionali da proporre al relativo concorso di architettura (ad arco, a trave, sospesi, etc), i progettisti hanno optato per una tipologia tensegrale ottenendo un grande successo e numerosi riconoscimenti. Il sistema tensegrale proposto è stato visto come un potenziale per arricchire il carattere e la vitalità di questa città, per celebrare la sua identità artistica emergente, e dare un senso di diversità architettonica andando oltre le tradizionali tipologie di ponte.

*“La progettazione strutturale raggiunge l'aspetto insolito con una serie apparentemente casuale di elementi Tensegrali”* – (Ian Ainsworth, Arup direttore del progetto).

La geometria del ponte non deriva da una rappresentazione meramente artistica in quanto i cavi (in tensione) e le aste (in compressione) sono disposti con un ritmo puramente strutturale. Questo fornisce la solidità e la resistenza necessaria per una struttura che porta migliaia di pedoni e ciclisti. Il ponte è dotato di due grandi piattaforme di osservazione e di relax, due aree di sosta e una zona coperta per tutte le stagioni. Il lato Nord si erge su una superstrada, mentre il lato Sud fluttua a spirale attraverso la riva del fiume prima di atterrare presso la nuova Galleria d'Arte Moderna.



Fig. 6.3.1.3 – Particolare vista frontale, “Kulirpa Bridge”, Brisbane, Australia.

Il Kulirpa Bridge è di proprietà del governo dello Stato del Queensland. La consegna del progetto, gestito dal Dipartimento dei Lavori Pubblici, è stata effettuata nel mese di settembre e aperto ai pedoni in ottobre 2009. Nel 2011, il ponte è stato giudicato World Transport Building of the Year al World Architecture Festival.

### **6.3.2 Ponte pedonale nel Campus di Tor Vergata**

Il Prof. Ing. Andrea Micheletti, del Dipartimento di Ingegneria Civile dell’Università di Roma Tor Vergata, ha ideato e studiato, presso i laboratori del suo Dipartimento, la progettazione di una passerella pedonale e ciclabile tensegrale nel Campus Tor Vergata [11]. La struttura

tensegrale oggetto di ricerca è costituita da vari moduli ottaedrici assemblati longitudinalmente ed è stata analizzata dal punto di vista statico secondo le normative nazionali ed europee. Oltre all'aspetto strutturale, tecnologico e architettonico/compositivo la ricerca è stata corredata da un'analisi di fattibilità economica. Ulteriori approfondimenti scientifici hanno dimostrato che attraverso algoritmi genetici di ottimizzazione geometrica del modulo di base è possibile ottenere risposte statiche di maggiore efficienza sfruttando una quantità minore di massa impiegata.



Fig. 6.3.2.1 – Prospetto laterale, Passerella pedonale, Campus Tor Vergata, Roma.

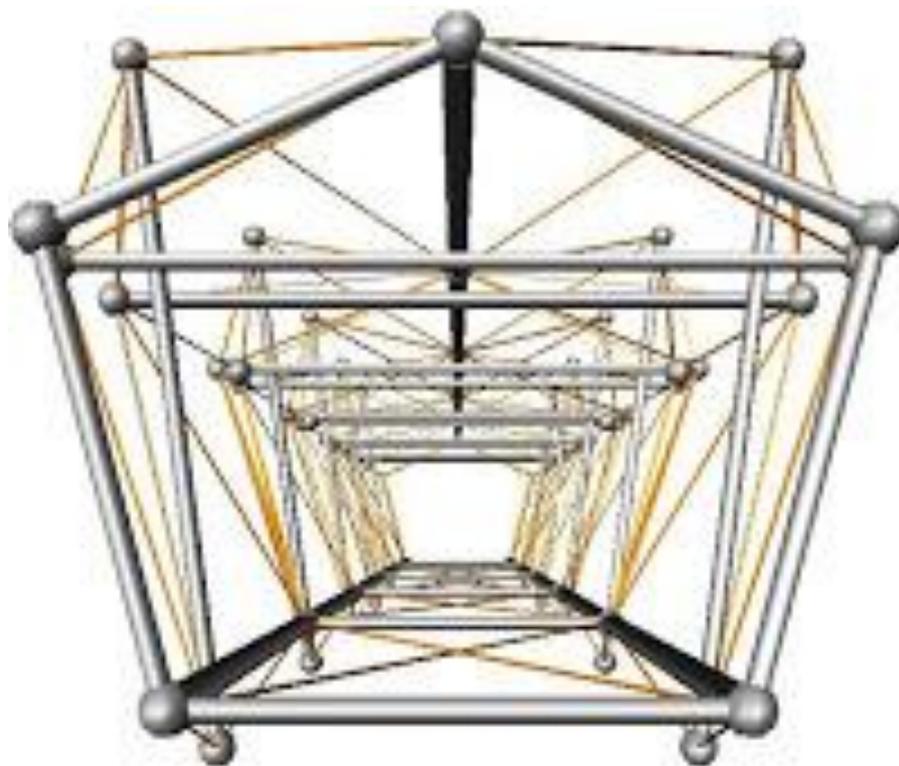


Fig. 6.3.2.2 – Rendering, Passerella pedonale, Campus Tor Vergata, Roma.

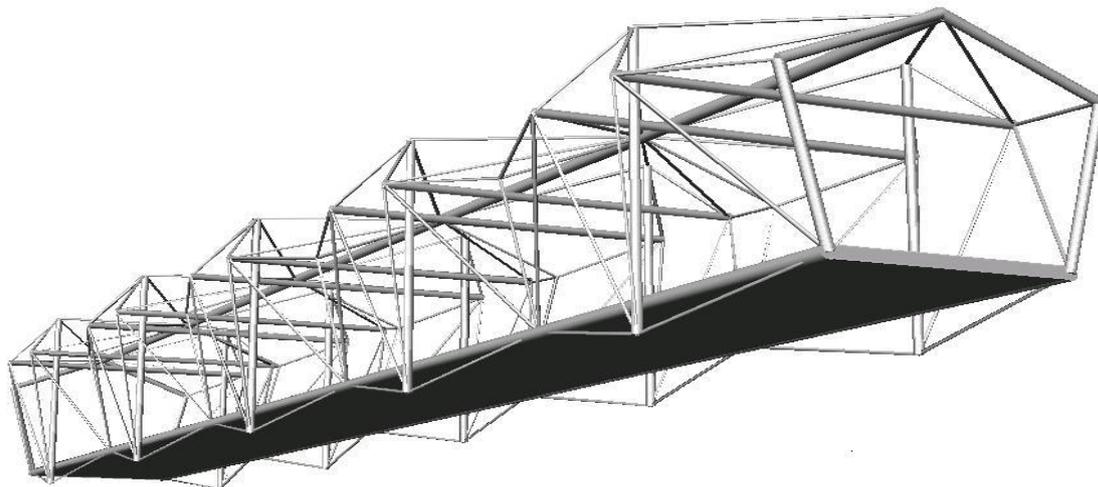


Fig. 6.3.2.3 – Vista tridimensionale, passerella pedonale, Campus Tor Vergata, Roma.

### **6.3.3 La passerella tensegrity di En Dorigny [2013]**

Il progetto della Passerella Pedonale tensegrale di En Dorigny è stato redatto nel corso dell'anno accademico 2012-2013 da un gruppo di ricerca costituito e guidato dal Prof. Attilio Pizzigoni, formatosi all'interno del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Bergamo. Tale progetto è stato presentato al Concorso Internazionale per una Passerella pedonale En Dorigny bandito dalla Municipalità di Chavannes-près-Renens (CH) e si basa su una riconversione funzionale della colonna tensegrale di Buckminster Fuller presentata al MOMA nel 1959.

L'obiettivo primario del progetto è stato quello di verificare l'applicabilità pratica e costruttiva delle strutture tensegrali nella progettazione di una architettura significativa, ovvero per la realizzazione di un'infrastruttura. Nel corso degli ultimi decenni è stato constatato che le strutture tensegrali non sono in grado di superare quella pur affascinante dimensione artistica e simbolica entro cui vengono lette e percepite tante opere di Buckminster 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.

L'architettura contemporanea è andata oltre la concezione di tensegrale come mera applicazione artistica, superando il pregiudizio di puro gioco della mente, "food for thought", per citare la definizione dell'ingegnere Jörg Schlaich, progettista di una delle opere più note mai realizzate nel campo delle tensegrali, ovvero la Warnow Tower di Rostock in Germania.

Lo studio di tali sistemi strutturali è stato da poco inserito in alcuni corsi universitari, e vengono presentate apposite sessioni in convegni specializzati in strutture di rilevanza internazionale. Ciò è dovuto principalmente ad una crescente diffusione delle applicazioni tensegrali. Infatti si vanno moltiplicando le realizzazioni che, anche quando non sono perfettamente rispondenti alla definizione ufficialmente riconosciuta di “tensegrale pura”, contribuiscono tuttavia a diffonderne la conoscenza di tale principio strutturale. Basti pensare alle già citate infrastrutture come il Kulirpa Bridge a Brisbane o la Plata Stadium di Buenos Aires per la sua leggerezza, adattabilità ed innovazione.

Il progetto proposto dal Dipartimento di Ingegneria dell’Università degli Studi di Bergamo si ispira al “*Tensegrity Mast*” presentato da Buckminster Fuller per l’esposizione al MOMA del Settembre 1959 [14]. Tale proposta si viene a configurare come il primo esempio in cui viene applicata questa particolare configurazione tensegrale per realizzare una complessa infrastruttura urbana. La struttura è ottenuta assemblando una serie di otto tetraedri (Fig. 6.3.3.1). Ciascun tetraedro costituisce la cellula di base del sistema, ed è composto da quattro aste e sei cavi [14]. La struttura nel suo insieme richiama la forma di una colonna vertebrale umana da cui il nome che è stato attribuito all’opera: “*Vertèbre*”.

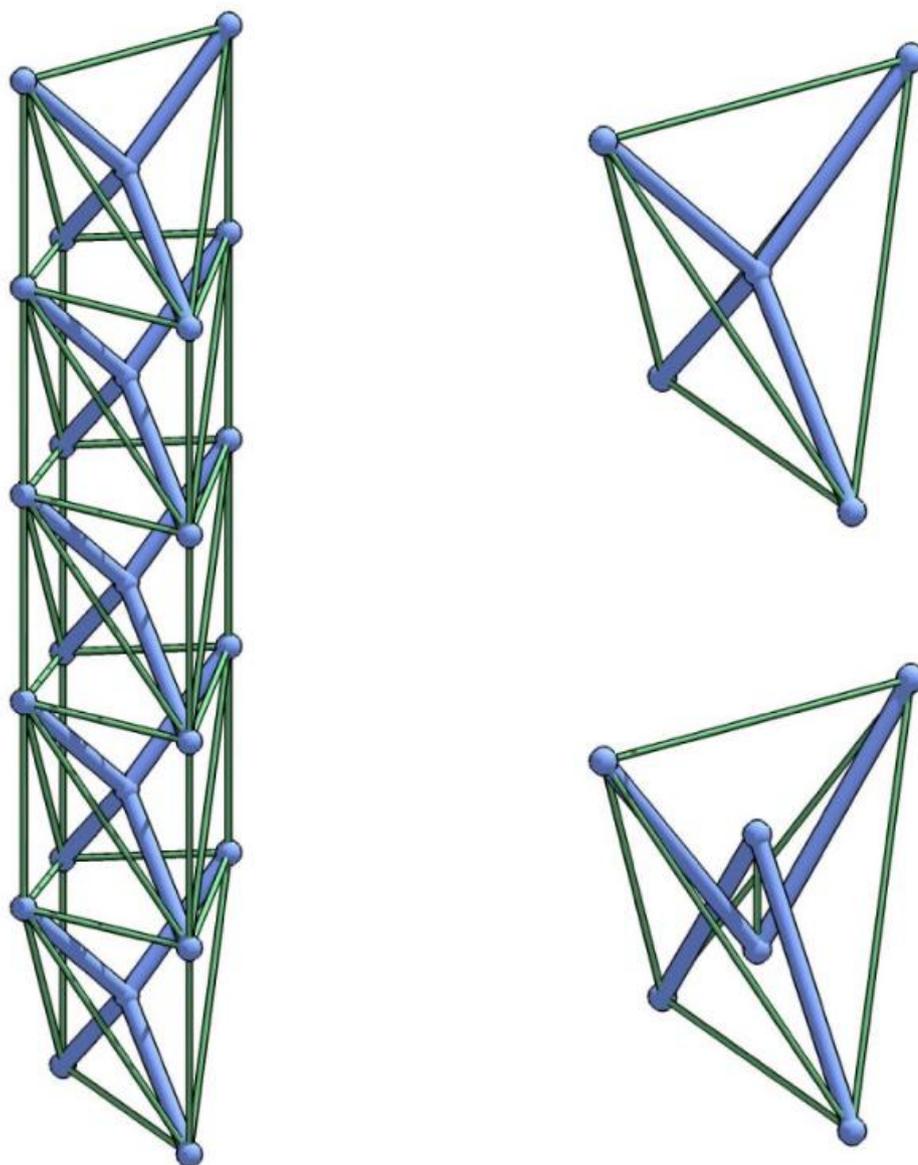


Fig. 6.3.3.1 – “Tensegrity Mast” proposto da R. Buckminster Fuller e due versioni degli otto moduli tetraedrici che compongono la struttura.

La struttura di riferimento costruita anni addietro da Buckminster Fuller è generalmente intesa e rappresentata come una struttura da applicare secondo uno sviluppo verticale, mentre qui viene utilizzata orizzontalmente e si identifica come il telaio portante della passerella pedonale. In fase di analisi progettuale sono state effettuate alcune modifiche geometriche al modulo di base prescelto; in particolare sono state variate le lunghezze dei cavi e delle barre metalliche. Inoltre, per adattare la concezione della torre fulleriana alla finalità funzionale di questo progetto sono stati modificati anche gli angoli formati tra questi elementi. E' stata molto perfezionata la distanza tra i moduli per venire incontro ad esigenze di carattere strutturale.



Fig. 6.3.3.2 – passerella tensegrale di En Dorigny, 2013

Come per un qualsiasi sistema tensegrale è stato applicato uno stato di pre-sollecitazione iniziale in grado di garantire l'equilibrio statico della struttura. Inoltre sono state eseguite verifiche statiche e dinamiche tenendo conto dell'analisi dei carichi permanenti e variabili.

Considerando il singolo modulo tetraedrico di base, sono state configurate diverse varianti, alcune delle quali mostrate in fig. 6.3.3.1. Nella prima proposta le aste compresse vengono collegate tra loro mediante cerniere sferiche o da giunti rigidi; nella seconda tipologia il

modulo tensegrale si modifica passando da un sistema di aste e cavi a quello di un sistema di corpi rigidi e cavi. In relazione a questo aspetto di ricerca, come suggerisce lo stesso autore del progetto, hanno fatto scuola particolari ricerche come quelle di Pellegrino [42] incentrate sulle valutazioni e sui meccanismi degli stati di sollecitazione che definiscono la rigidità e la stabilità del sistema [31].



Fig. 6.3.3.3 – render illustrativo (a sinistra), sezione trasversale (a destra)

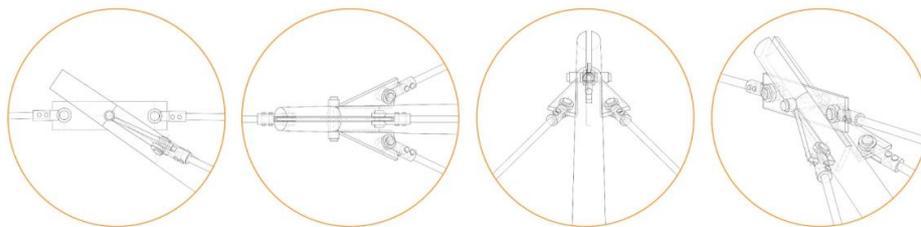


Fig. 6.3.3.4 – particolari costruttivi

## 6.4 Torri tensegrali

Tipologie di torri tensegrali hanno trovato spazio principalmente nel campo dell'ingegneria delle telecomunicazioni essendo state applicate come strutture di sostegno per antenne, radiotrasmittenti, ricettori, trasmettitori di telefonia mobile, etc. Progetti in fase di sviluppo riguardano la realizzazione di pali eolici tensegrali che garantiscono una discreta qualità estetica minimizzando al tempo stesso l'invasività percettiva degli elementi. Di seguito saranno trattate realizzazioni e concepts progettuali di torri tensegrali di maggiore rilevanza nel panorama dell'architettura contemporanea.

### 6.4.1 Warnow Tower, Rostock, Germania [2003]

Una azienda nota a livello mondiale ha progettato la Warnow Tower per il polo espositivo della Fiera Anseatica del 2003, noto anche come la Fiera di Rostock, IGA Park, Germania. La torre è stata sollevata in soli dieci giorni e viene considerata la più grande realtà tensegrale mai realizzata nel campo delle strutture in elevazione.

L'opera è stata progettata dallo studio Von Gerkan, Marg and Partners, mentre il progetto strutturale è stato effettuato dallo studio Schlaich Bergermann and Partner.

La torre aveva un diametro di 5 metri ed era composta da 6 prisma tensegrali a 3 barre e 6 cavi, chiamati "elementi twist" da parte dell'azienda produttrice. Ogni prisma era alto 8,30 metri. Un prisma era composto da tre membri di compressione in tubolari di acciaio; tre cavi diagonali pesanti e tre cavi orizzontali sottili. Ogni prisma impilato

superiormente presentava una rotazione di 30 gradi rispetto al modulo sottostante. Per consentire alla torre di raggiungere un'altezza ancora maggiore, gli architetti hanno pensato di aggiungere una punta a forma di ago in acciaio inossidabile, appesa da funi in tensione al prisma superiore. Ciò ha permesso di aumentare l'altezza di ulteriori 12,50 m alla torre. Le fondazioni della torre erano state progettate in calcestruzzo su pali. La struttura era stata messa in risalto da lampade da terra che la illuminavano durante la notte rendendola visibile da lunghe distanze.



Fig. 6.4.1.1 – Torre per la Fiera di Rostock, Germania.

L'aspetto più complesso delle verifiche strutturali ha riguardato le azioni del vento. Infatti le torri tensegrali risultano essere significativamente esposte ai carichi da vento. La fiera di Rostock, in particolare, è esposta a forti venti accelerati dalla vicinanza alla costa del Mar Baltico. Per ovviare a tale problema sono stati aggiunti materiali ad elevata resistenza oltre ad amplificare il valore di pre - stress agendo direttamente sul proporzionale valore di rigidezza.

Si tratta di una torre tensegrale di classe 2 composta da aste convergenti a due a due in un nodo ed il giunto di collegamento è stato ottenuto con delle piastre di attacco imbullonate (più equivalenti ad un incastro che non ad una cerniera). L'intera struttura pesa circa 50 tonnellate.



Fig. 6.4.1.2 – Particolare del nodo di ancoraggio, Torre per la Fiera di Rostock, Germania.

Le operazioni di saldatura, onde evitare problemi di ritiro dell'acciaio ed imperfezioni dovute al rilassamento dei cavi d'acciaio, sono state effettuate direttamente in cantiere in corso d'opera. In fase di produzione degli elementi metallici sono state valutate le tensioni di pre-stress affinché si evitassero cadute di tensione successive alla messa in opera.

Precisamente gli elementi compressi sono stati scrupolosamente modellati in relazione alle verifiche di instabilità a compressione.

In fase esecutiva il posizionamento delle barre e dei cavi è stato effettuato con un margine di precisione di circa 5 cm inteso come massima deviazione registrata sulla verticale base/cima della torre. Il procedimento di esecuzione che ha ottenuto un risultato ottimale ha richiesto manodopera specializzata ed adeguati accorgimenti tecnici comportando di conseguenza un inevitabile aumento di costi.

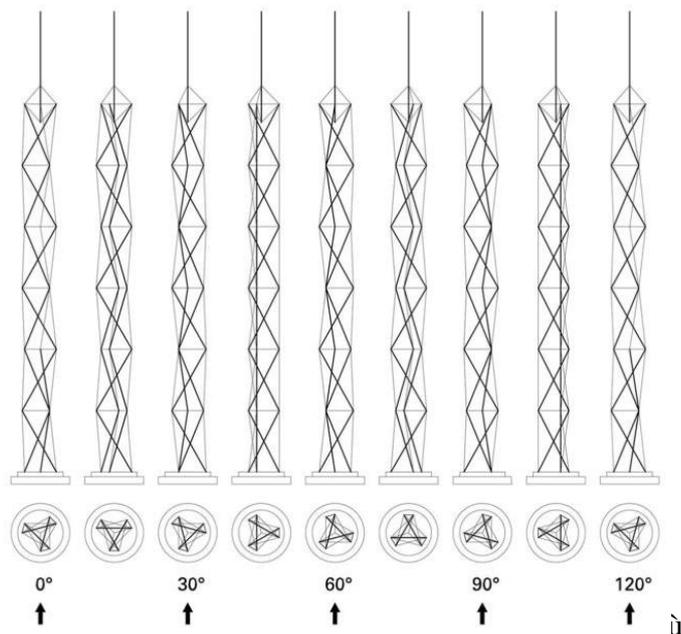


Fig. 6.4.1.3 – Sezioni, Torre per la Fiera di Rostock, Germania



Fig. 6.4.1.4 – Prototipo espositivo, Torre per la Fiera di Rostock, Germania.

Una struttura tensegrale di tale imponenza effettivamente realizzata ha dimostrato che oggi, con adeguati accorgimenti sui materiali utilizzati e con i codici di calcoli disponibili, è possibile realizzare strutture tensegrali di dimensioni notevoli.

I nodi metallici e le membrature realizzate in fase di produzione hanno confermato la possibilità di poter reperire sul mercato strutture modulari tensegrali. L'elevato costo di produzione e di manodopera qualificata è stato ammortizzato dalla minimizzazione di quantità di materiale impiegato offrendo anche dal punto di vista economico una valida risposta.

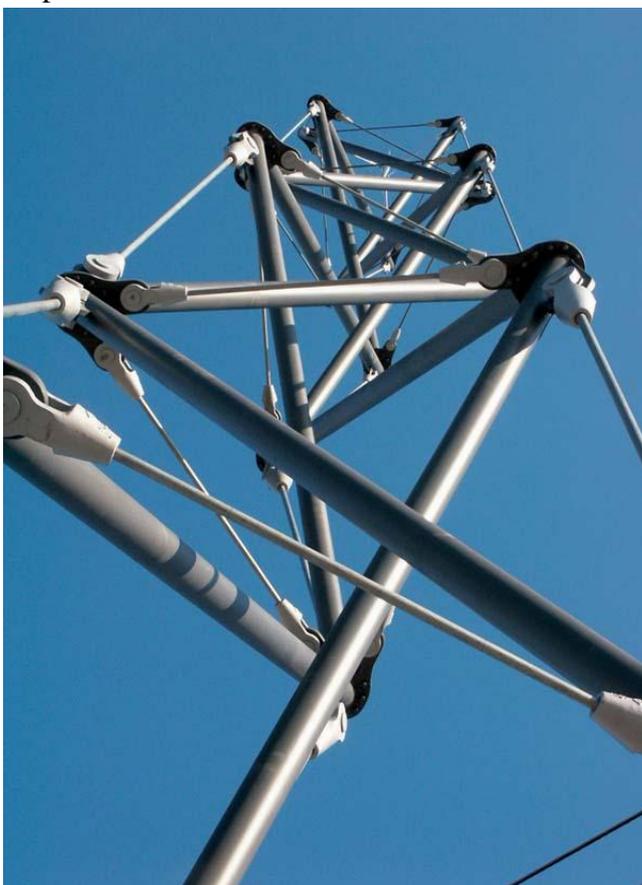


Fig. 6.4.1.5 – Vista dal basso, Torre per la fiera di Rostock, Germania.

Quest'opera innovativa è la dimostrazione che con le tecnologie attuali è possibile realizzare strutture tensegrali, anche di grandi dimensioni che rispondono in maniera perfetta ai requisiti di progetto. Gli stessi tecnici specializzati che hanno progettato la Rostock Tower alla fine dei lavori hanno rilasciato la seguente considerazione: *“il potenziale dei sistemi tensegrali per le strutture di copertura è consistente, in questo campo molte pratiche ed aggraziate strutture possono ancora essere prodotte”*.

#### **6.4.2 Instant Skyscraper [2009]**

Instant Skyscraper è un progetto proposto nel 2009 dagli architetti australiani Farzin Lirfi-jam e Jerome Frumer in occasione dell'Evolo Skyscraper Competition.

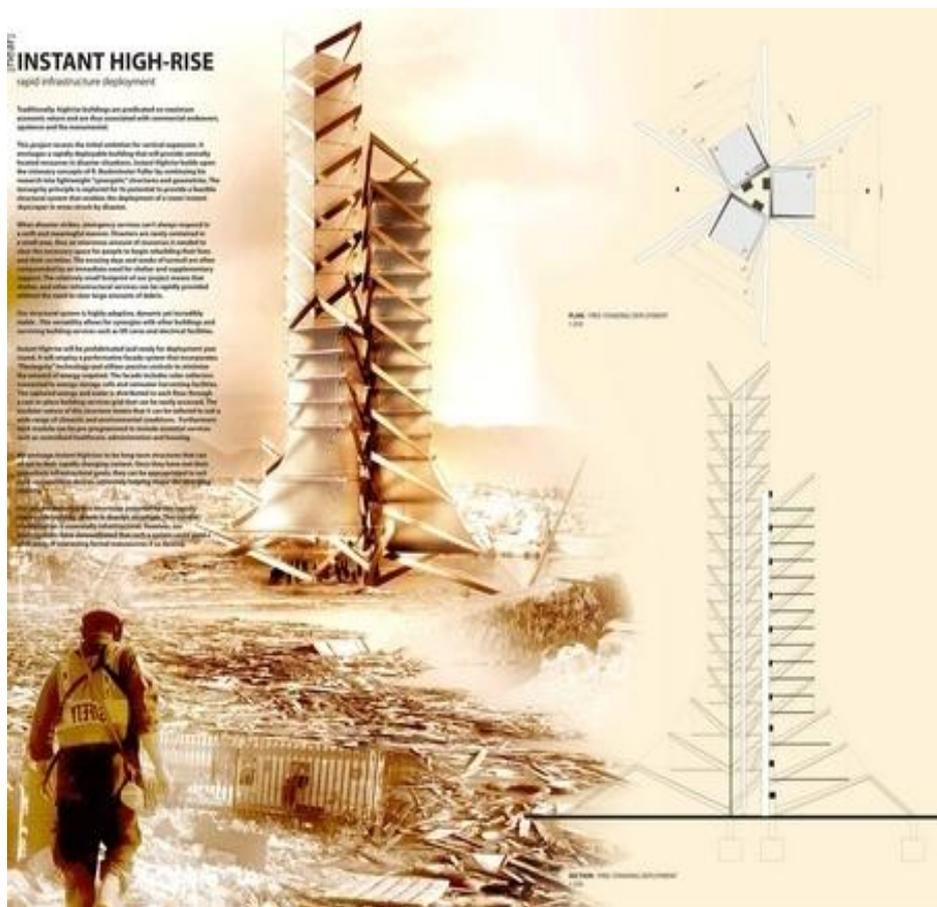
Il progetto fa riferimento ad una torre tensegrale di classe 2 sviluppata in senso verticale da poter realizzare in zone colpite da terremoti, calamità naturali o altre situazioni d'emergenza ambientale.

L'innovazione dell'uso delle tensegrali per scopi di emergenza ha avuto un incredibile successo in quanto sfrutta le proprietà dinamiche di tali tipologie strutturali garantendo una costruzione rapida, adattabile e al tempo stesso resistente.

Il concetto/principio strutturale tensegrale viene adattato al campo dell'architettura mobile come risposta ad eventi temporanei in critici contesti d'emergenza.

Le strutture tensegrali, grazie alla loro capacità di assemblaggio modulare e alla loro flessibilità risultano essere facilmente adattabili in

diverse tipologie di contesto. Vengono annoverate come ottime soluzioni tra le strutture che richiedono rapidità di esecuzione. Nel presente progetto, come è possibile osservare dalla fig. 6.4.2.1 la torre modulare viene montata direttamente in loco grazie alla tensione dei cavi che generano la forma ideata grazie ad un processo automatizzato.



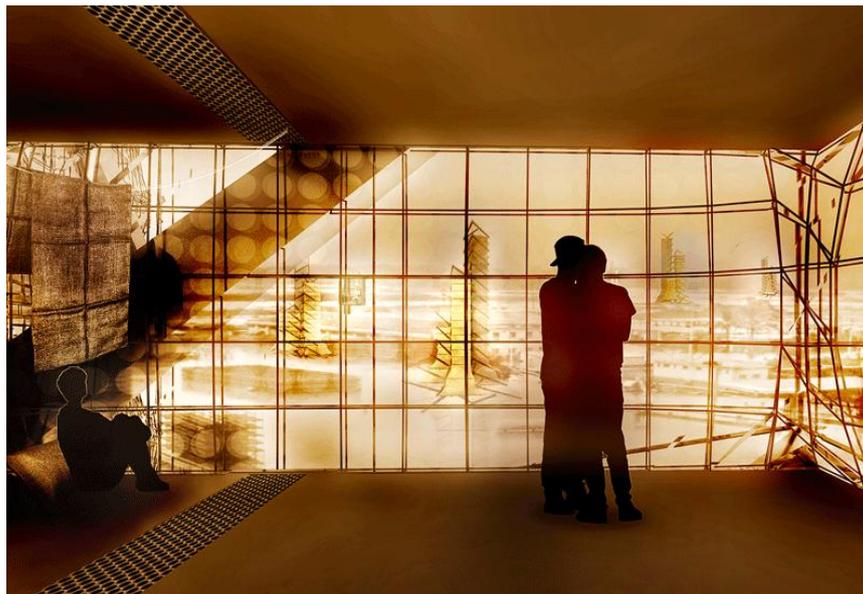


Fig. 6.4.2.2 – Renderings di progetto, Instant Skyscraper [2009]

Dal punto di vista architettonico, il progetto presenta una facciata flessibile composta da collettori solari collegati a celle di stoccaggio di energia e impianti di raccolta dell'acqua piovana. L'acqua e l'energia immagazzinata vengono distribuite ad ogni livello dell'edificio. La composizione modulare di quest'opera garantisce il suo utilizzo in diverse condizioni climatiche, ambientali e spaziali. Inoltre ogni modulo base può essere pre-programmato in fase di progettazione per includere tutti i servizi essenziali come i locali riservati alla sanità, le residenze e gli uffici amministrativi. Lo sviluppo di una struttura reticolare flessibile e leggera è stato coadiuvato da metodi di calcolo scientifici all'avanguardia nel campo dell'ingegneria strutturale. Grazie all'utilizzo di specifici codici di calcolo è stata ottimizzata l'analisi strutturale della membratura metallica al fine di minimizzare la massa impiegata.

Precisamente nella descrizione dell'opera presentata viene citato l'utilizzo del Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) con lo scopo di aumentare la forza di peso di ciascun membro in compressione 3D.



Fig. 6.4.2.3 – Render illustrativo, Instant Skyscraper [2009]

Il modello BESO garantisce un'ottimizzazione strutturale ottenuta da algoritmi che svolgono processi di iterazione della geometria di base verso un modello ottimale rimuovendo il materiale da aree di bassa pressione ed aggiungendo materiale in zone di elevato stress. Il risultato finale è di un vantaggio di circa il 65% rispetto alla massa impiegata inizialmente. I componenti finali ottimizzati hanno solo tre lati, ma

mantengono i quattro vertici tetraedrici critici necessari per indurre uno stato di integrità tensionale.

### 6.4.3 Dubai Tensegrity Tower [2011]

La Dubai Tensegrity Tower è pura esposizione di struttura. Il concept progettuale è stato presentato da Aurel von Richthofen in occasione di un concorso sponsorizzato da una società di ascensori. Nel bando del concorso veniva solo indicato il vincolo di altezza superiore ai 150 metri.

L'edificio consiste in una torre tensegrale di 170 metri di altezza composta dalla presenza di terrazze da cui ammirare il paesaggio e collegate tra di loro da scale mobili.

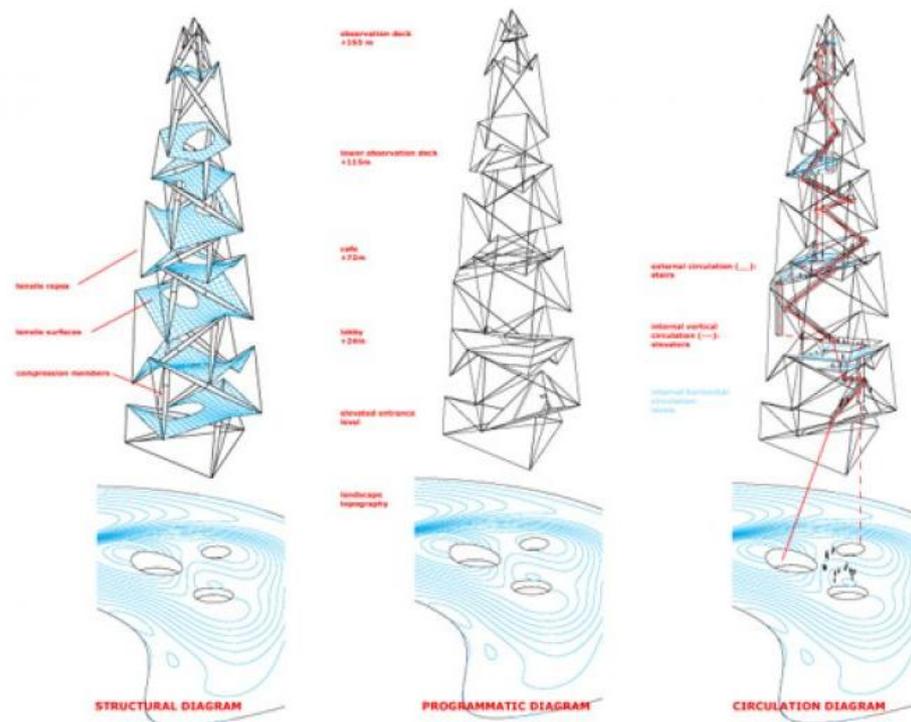


Fig. 6.4.3.1 – Sezioni, Dubai Tensegrity Tower [2011]

La Dubai Tower nel caso di effettiva realizzazione sarà destinata a diventare il prossimo simbolo della città, una sorta di “Torre Eiffel” di Dubai. Il principio tensegrale offre alla struttura un elevato fascino ed una spettacolare ingegnoserità. In questo sistema i membri di trazione sono ridotti al minimo spessore, dove possono agire solo in tensione, mentre le membrature rimanenti sollecitate a compressione sono disposte in modo che esse non toccano, dando l'impressione di una struttura magicamente sospesa in aria.

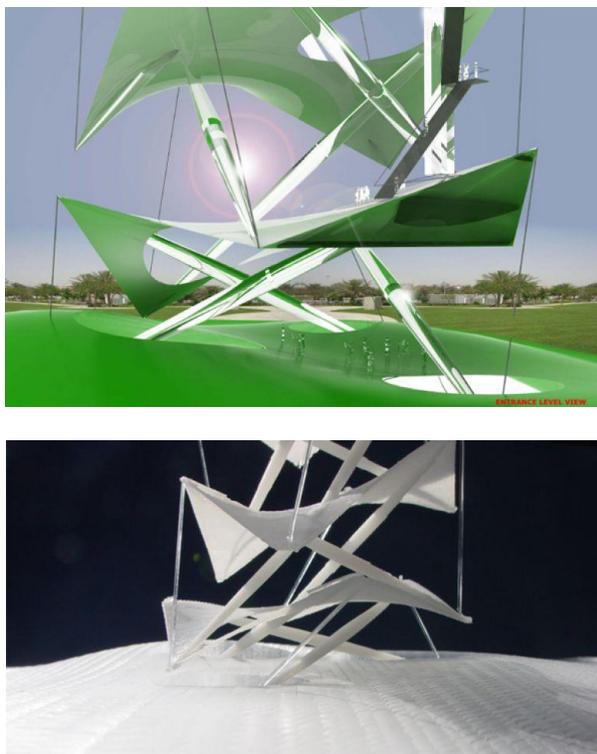


Fig. 6.4.3.2 – Renderings, Dubai Tensegrity Tower [2011]



Fig. 6.4.3.3 – Render, Dubai Tensegrity Tower [2011]

## 6.5 Il London Eye [2001]

Situato sulla riva sud del Tamigi tra il Ponte di Westminster e l'Hungerford Bridge, il **London Eye Ferris Wheel** è stato costruito nel 2000 in occasione della celebrazione del nuovo millennio. Una struttura europea all'avanguardia che si contraddistingue dall'architettura iconica londinese. Il London Eye ha fornito per oltre un decennio una spettacolare vista panoramica di Londra, registrando più di 3,5 milioni di visitatori all'anno ed affermandosi con forza come la più popolare attrazione turistica del Regno Unito.

Dalle capsule panoramiche, in una giornata limpida, si può vedere fino a Castello di Windsor, a 40 miglia di distanza, offrendo una vista a 360°. Con i suoi 135m di altezza ha mantenuto il primato della più alta ruota panoramica del mondo fino al 2006, superata dalla Stella di Nanchang in Cina di 160m di altezza.



Fig. 6.5.1 – Il London Eye, 2000.

Progettato da David Marks e Julia Barfield, il London Eye è stato inaugurato dal primo ministro britannico Tony Blair, il 31 dicembre 1999, ma non è stato aperto al pubblico fino a marzo 2000 a causa di problemi tecnici.

Per la sua costruzione è stata installata una gru galleggiante su otto piattaforme per sollevare il cerchione della ruota gigante. L'operazione di sollevamento è avvenuta lentamente in più fasi con una velocità di 2° all'ora fino a raggiungere i 65°.

La struttura è stata lasciata in questa posizione per una settimana mentre gli ingegneri preparavano la seconda fase di sollevamento. Il peso complessivo dell'acciaio del London Eye è di 1.700 tonnellate.

Questa ruota gigante di 135m di altezza sostiene 32 cabine in vetro che rappresentano i 32 distretti di Londra e può ospitare 25 persone comodamente sedute.

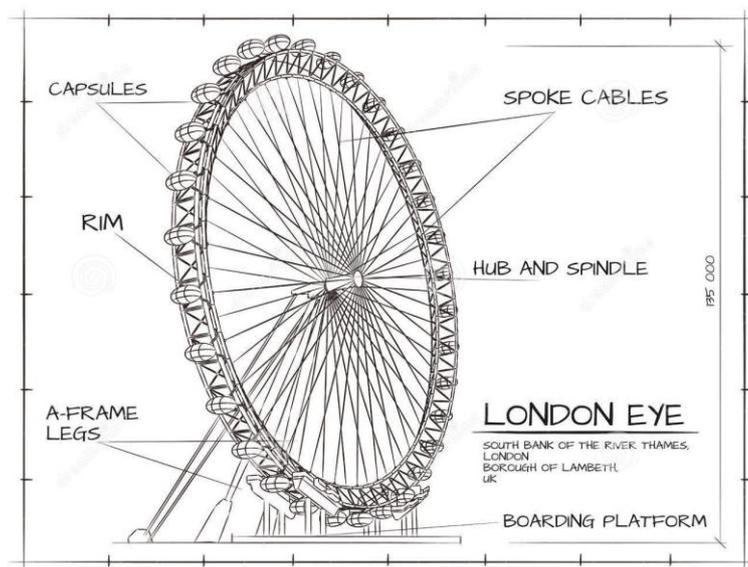


Fig. 6.5.2 – Particolare costruttivo dell'ancoraggio dei cavi radiali, London Eye, 2000.

Un aspetto importante del progetto era la creazione di uno spazio pubblico alla base della ruota che potesse garantire la creazione di aree pubbliche a servizio della comunità.

Il materiale principale impiegato per le componenti strutturali è l'acciaio al carbonio. La struttura è composta da un reticolo esterno circonferenziale che è unito al mozzo centrale tramite trefoli d'acciaio disposti in modo radiale rievocando alla vista degli spettatori l'immagine di una grande ruota di bicicletta.

La ruota di bicicletta a raggi, inventata circa 150 anni fa, viene classificata scientificamente come una struttura tensegrale. Buckminster Fuller descriveva l'evoluzione di tale tecnologia che si è sviluppata inizialmente con fitti raggi di legno poi sostituiti da elementi metallici sottili. La storica Amy Edmondson, nel libro "A Fuller Explanation: The Synergetic Geometry of R. Buckminster Fuller" [55], dà una spiegazione più completa dei "tension wheel spokes":

*<The wheel's use of tension enables a far more efficient and lightweight structure than could be produced with compression spokes. Tension materials are inherently smaller and lighter than compression materials carrying equivalent loads. The wheel was originally an exclusively compression structure starting with the cave man's stone cylinder and progressing to slightly more sophisticated designs like "the old artillery wheel" cited by Fuller in Synergetics>.*

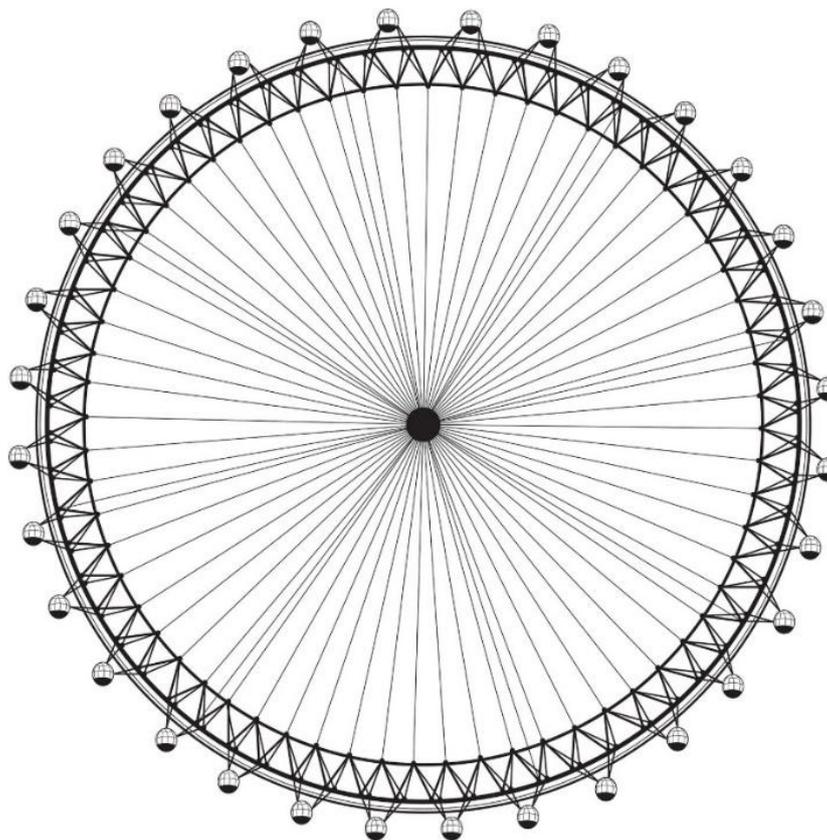


Fig. 6.5.3 – Particolare costruttivo dell'ancoraggio dei cavi radiali, London Eye, 2000.

Che in italiano si traduce:

*<l'uso della ruota in tensione permette di avere una struttura molto più efficiente e leggera che potrebbe essere prodotta con raggi in compressione. I materiali che lavorano in tensione sono intrinsecamente più piccoli e più leggeri dei materiali a compressione che trasportano i carichi della ruota. Il sistema equivalente era in origine una struttura esclusivamente a compressione a partire dal cilindro di pietra dell'uomo*

*delle caverne e progredendo verso disegni un po' più sofisticati come "la vecchia ruota di artiglieria" citata da Fuller in Synergetics>.*

La costruzione del London Eye è diventata un esempio di cooperazione europea attraverso l'utilizzo di elementi strutturali e meccanici provenienti da sei paesi diversi: le cabine panoramiche sono in vetro, acciaio e alluminio e il loro interno è dotato di aria condizionata. Esse sono state costruite in Francia da una ditta specializzata nella costruzione di ascensori; i pannelli in vetro stratificato sono stati tagliati in Italia e ogni cabina è protetta da tre strati di vetro a qualità ottica lamellare curva.



Fig. 6.5.4 – Particolare costruttivo dell'ancoraggio dei cavi radiali, London Eye, 2000.

Il meccanismo di azionamento avanzato è costituito da 32 rulli di guida in acciaio rivestiti con poliuretano, 64 speciali ammortizzatori in acciaio e 28 mescole di gomma; il perno centrale di 23m di lunghezza dal peso di 335 tonnellate è stato prodotto nella Repubblica Ceca, mentre i cuscinetti in Germania; le gambe a forma di A, dal peso di 310 tonnellate e dal diametro esterno di 600mm, che supportano l'intera struttura sono state realizzate in Olanda, mentre la ruota in acciaio in Gran Bretagna.

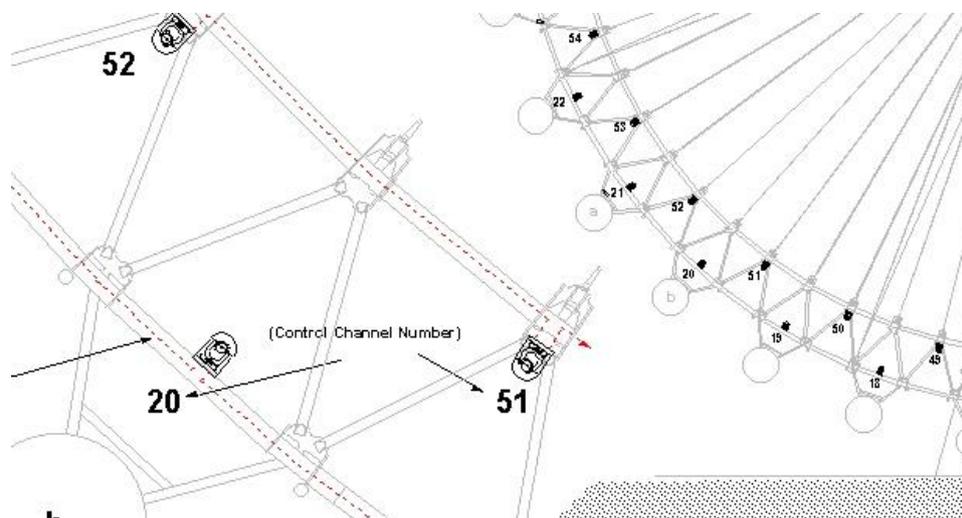


Fig. 6.5.5 – Particolare costruttivo dell'ancoraggio dei cavi radiali, London Eye, 2000.

A 135 metri di altezza, il London Eye si colloca al quarto posto come struttura più alta di Londra, che sovrasta i limitrofi edifici come la Cattedrale di St. Paul, Victoria Tower, e il Tower Bridge. Il London Eye, tuttavia, offre il più alto punto di osservazione pubblica a Londra. Molti famosi punti di riferimento sono chiaramente visibili, tra cui Buckingham Palace, le Houses of Parliament, e molti dei ponti che attraversano il

Tamigi.

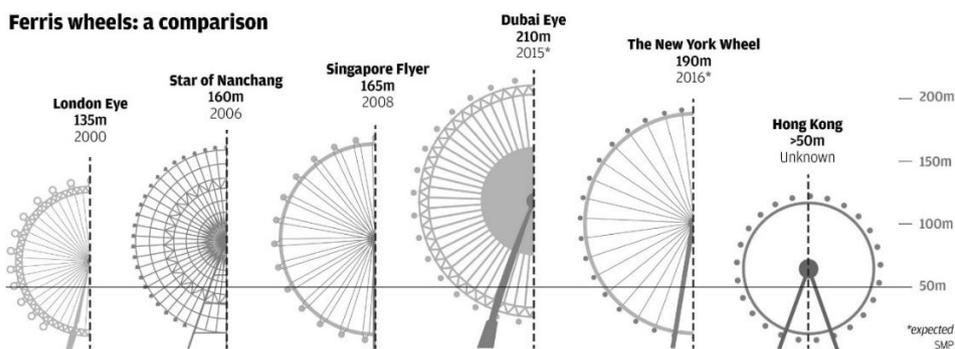


Fig. 6.5.6 – Particolare costruttivo dell’ancoraggio dei cavi radiali, London Eye, 2000.

Quando l'ex primo ministro Tony Blair ha aperto la “Millenium Wheel” il 31 Dicembre 1999, il London Eye era di gran lunga la ruota panoramica più alta del mondo. Oggi, come è possibile osservare dalla figura 6.5.6, è stata superata da altre strutture simili realizzate in città internazionali come Dubai, Singapore e New York.

Il London Eye può ospitare, per ogni giro (con una durata di circa 30 minuti), fino a 800 passeggeri. Avendo una circonferenza di 424m, ogni capsula viaggia ad un ritmo 26cm al secondo o 0,9 km all'ora. La velocità ridotta consente ai passeggeri di salire e scendere senza che la ruota debba fermarsi, anche se di tanto in tanto si ferma per assistere le operazioni di ingresso e uscita dei passeggeri disabili e ad altri che potrebbero avere bisogno di assistenza.

Spesso definito come la versione londinese della Torre Eiffel, il London Eye è rapidamente diventato uno dei simboli più importanti della città.



Fig. 6.5.7 – Particolare costruttivo dell'ancoraggio dei cavi radiali, London Eye, 2000.



Fig. 6.5.8 – Particolare costruttivo dell'ancoraggio dei cavi radiali, London Eye, 2000.

## Capitolo 7

# Le coperture trasformabili

*“Le utopie non sono altro che verità premature”*

Alphonse de Lamartine

## 7.1 Le prime strutture mobili

Le tensostrutture a membrana appartengono a una tipologia costruttiva innovativa e leggera. Nell'architettura tessile la leggerezza rappresenta emblematicamente la massima espressione della costruzione verso l'immaterialità.

Il principio di leggerezza non concerne solo il peso fisico, bensì si traduce nella possibilità di articolare geometrie, spazi e trasparenze.

Le tendostrutture e le tensostrutture sono considerate categorie speciali anche dal punto di vista normativo. Esse si identificano come strutture estremamente leggere che richiedono solidi ancoraggi per evitare il loro sollevamento. Da questo punto di vista risulta di fondamentale importanza la progettazione delle fondazioni che lavorano sotto un regime di trazione e non di compressione.

Architetture flessibili, smontabili e dispiegabili, capaci di configurare dinamicamente e non spazi di carattere permanente o semipermanente senza alterare l'ambiente esterno.

Le origini delle coperture trasformabili a membrana derivano direttamente dall'architettura tessile di tipo permanente. Le tensostrutture di piccole o medie dimensioni sono infatti pensate per garantire in un determinato intervallo temporale una copertura fissa per poi essere successivamente smontate. Il vantaggio invece che deriva dall'uso di un sistema trasformabile di copertura è quello di poter cambiare configurazione senza ricorrere a lunghi processi di montaggio e/o smontaggio.

In merito alle prime strutture mobili si è portati a ipotizzare che nel

Medioevo per gli imponenti lavori di costruzione delle basiliche si ricorresse all'uso di ponteggi mobili facili da montare e smontare.

Riguardo all'epoca rinascimentale, da testimonianze scritte si deduce l'uso di primitive strutture mobili atte a sostenere oggetti. Basti pensare alle invenzioni "Leonardesche": il sistema a pantografo per il sollevamento di pesi; il progetto di un ponte formato da pezzi modulari o l'ala mobile che richiama i primi progetti per il prototipo di aeroplano.

Strutture molto semplici di altri modelli di ponti sono stati modulati da Venanzio, Palladio e Primaticcio. Mentre alla metà del 900', come già precedentemente accennato, innovative strutture mobili vennero proposte da Richard Buckminster Fuller come le cupole geodetiche pieghevoli e le strutture tensegrali.

Tra i pionieri dell'architettura leggera del XX secolo dobbiamo ricordare Frei Otto. Egli ha incentrato i suoi progetti sui principi di leggerezza ed ottimizzazione strutturale, influenzando nel corso dei decenni architetti internazionali come Renzo Piano e Peter Rice. La sua influenza è evidente nell'Architettura Radicale del gruppo Archigram, nella continua ricerca di strutture organiche che sfidano la legge della gravità. Il suo interesse nei confronti della natura e delle sue leggi è stato coltivato grazie alle intense collaborazioni con biologi insieme ai quali ha effettuato ricerche sui processi del mondo naturale. Per lui il legame tra la natura e le costruzioni si riscontra nella leggerezza. Egli definisce la ragnatela come l'emblema dell'architettura flessibile e ricerca nelle tensostrutture il modello artificiale di una struttura biologica.

Ha sempre praticato *"un approccio olistico e collaborativo all'architettura"*: è stato spesso chiamato a lavorare in team e lui stesso

si è avvalso per i suoi progetti dell'apporto di biologi, ambientalisti e filosofi oltre che tecnici. È doveroso affermare che tutte le opere associate a Frei Otto sono state progettate in collaborazione con altre figure professionali.

Il primo prototipo di tensostruttura fu progettato nel 1955 in collaborazione con altri tecnici ed era costituito da una membrana poggiate su bordi esterni di sostegno in acciaio. L'opera, un padiglione per la musica, fu realizzata per la **Federal Garden Exhibition a Kassel**. Una struttura innovativa caratterizzata da una vela quadrangolare in tessuto dalla peculiare forma a sella.



Fig. 7.1.1 – Padiglione della musica, Federal Garden Exhibition a Kassel, Frei Otto, 1955.

Due dei quattro vertici esterni erano tesi verso l'alto ed ancorati a pali di legno di pino, mentre gli altri vertici erano incastrati al suolo. Il tessuto utilizzato per la copertura era una membrana in cotone di 1mm di spessore avente una lunghezza in diagonale di 17,50m. L'eleganza e la

leggerezza della tensostruttura viene messa in risalto dalle tasche di passaggio dei cavi pretesi che rendono invisibile la struttura metallica di supporto.

La progettazione di strutture trasformabili deriva da studi incrociati sulle prime strutture tensili permanenti e le dinamiche degli antichi “*velaria*” romani.

Fu proprio Frei Otto a sostenere in campo accademico lo studio delle tecniche romane per il dispiegamento e ripiegamento dei “*velaria*”, promuovendone successivamente uno straordinario sviluppo. Nel corso degli anni l’evoluzione tecnologica ha incentivato la diffusione di tali sistemi strutturali attraverso nuovi meccanismi automatizzati (meccanici ed elettrici) e l’utilizzo di membrane più performanti dal punto di vista dei tessuti adattati e della resistenza.

Le prime strutture dispiegabili furono realizzate nella prima metà degli anni ’60 e facevano riferimento a membrane retrattili poggianti su un telaio di supporto permanente. Strutture convertibili di grandi dimensioni ma con struttura fissa e non totalmente retrattile. Si fa riferimento quindi a membrane di copertura a carattere fisso e permanente.

Duranti i primi anni di ricerca sperimentale vennero costruite, data la difficoltà di analisi dinamica, coperture non completamente dispiegabili e dunque costituite da elementi metallici statici per il sostegno sui quali veniva posizionata la membratura in tessuto. Il dispiegamento ricordava l’antico “*velarium*” romano e poteva essere parallelo alle travi oppure avere un’apertura radiale partendo da una configurazione sospesa con al centro un punto di raccolta ed ancoraggio terminale.

Tra le principali realizzazioni ricordiamo la **copertura della piscina al Boulevard Carnot di Parigi**, del 1966, composta da un sistema di movimentazione automatizzato elettricamente per mettere in tensione la membrana di copertura.

Il progetto nacque in seguito ad un concorso indetto dal governo francese a Parigi per le coperture dinamiche delle piscine olimpioniche. L'architetto che propose questa soluzione tipologica fu **Roger Taillibert**, all'epoca già collaboratore di Frei Otto a Cannes. La struttura progettata era composta da un albero in acciaio dal qual dipartiva la membratura tessile. L'area coperta era di 1800m<sup>2</sup> con un tempo di chiusura/apertura di circa 12 minuti.

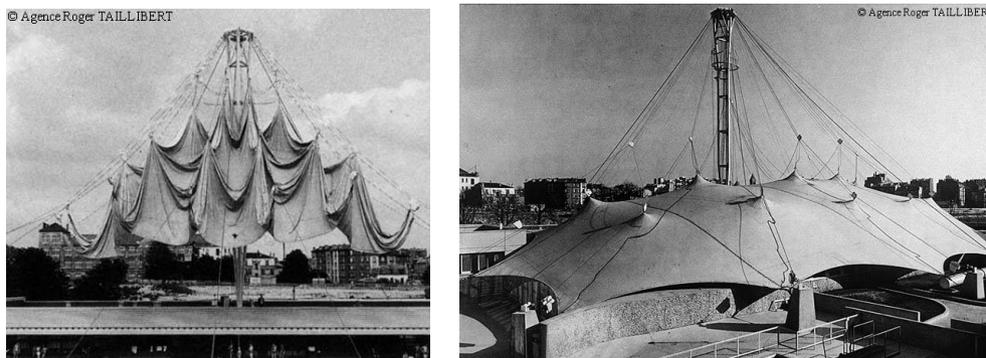


Fig. 7.1.2 – La copertura della piscina al Boulevard Carnot di Parigi, Roger Talliber, 1966.

Un altro concorso fu indetto nel 1959 dalla municipalità di Bad Hersfeld in Germania, per il progetto di una copertura per le rovine del Castello di Kloster al fine di organizzarvi degli eventi e spettacoli teatrali estivi. Il bando chiedeva espressamente ai progettisti di non alterare in

alcun modo le preesistenze storiche del castello e il carattere romanico della costruzione, inoltre era richiesta una copertura temporanea da poter rimuovere completamente una volta terminato il suo utilizzo.

Il progetto esecutivo fu affidato allo studio EL (Entwicklungsstätte für den Leichtbau) dopo circa otto anni dal concorso al fine di ottenere un risultato che fondesse tutte le migliori proposte presentate. Per la realizzazione Otto Frei si ispirò alla copertura del teatro di Cannes del 1965. Il sostegno della membratura è composto da un grande pilastro in acciaio di 32 metri di altezza posizionato esternamente alle mura, in modo da non interferire con le rovine preesistenti. In cima all'albero centrale vi erano ancorate 16 funi in acciaio e 4 cavi di bordo collegati direttamente ai pilastrini esterni di inferiore altezza (11,5 metri) che si trovavano ai vertici dell'area di base. L'area coperta è di 1450m<sup>2</sup>.

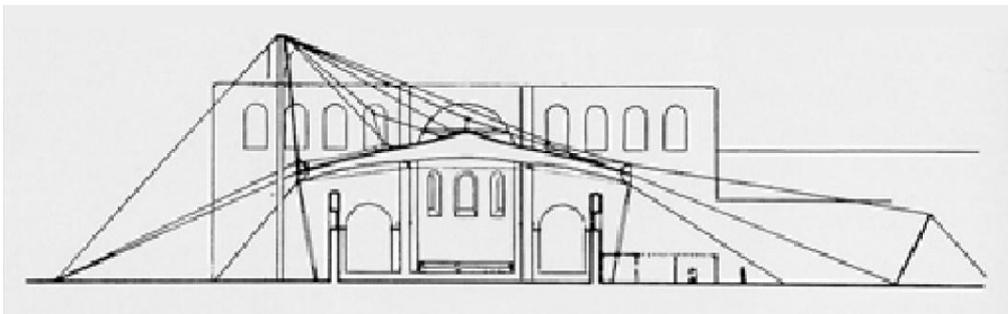


Fig. 7.1.3 – Prospetto principale della copertura della piscina al Boulevard Carnot di Parigi,  
Roger Taillibert, 1966.

La copertura tessile nei punti di bordo, è agganciata ai 14 carrelli, uno per ogni cavo, mentre altri 7 punti di ancoraggio interni, evidenziati da particolari forme a quadrifoglio, sostenevano la parte centrale. I carrelli motorizzati impiegavano quattro minuti per mettersi in posizione e dispiegare la membrana di copertura. Precisamente erano state utilizzate

due tipologie di carrelli: i trattori di bordo, necessari per l'apertura e la chiusura, e i trattori intermedi, con caratteristiche dimensionali differenti, che avevano il compito di mettere nella corretta posizione i punti di sospensione interni. Meccanismi elettrici garantivano il controllo del movimento di ogni singolo carrello. Per quanto concerne i dettagli tecnologici, la membrana adottata era composta da diversi pezzi di cotone uniti tra loro a formare un unico elemento avvolto da un doppio strato di PVC. Tale tessuto fu sostituito solo dopo 25 anni da un unico tessuto in poliestere spalmato in PVC bianco. In tale occasione furono sostituiti anche i cavi metallici di bordo con funi in poliestere ad elevata resistenza a rottura al fine di evitare i problemi connessi alla corrosione e al deterioramento della copertura.



Fig. 7.1.4 – La copertura della piscina al Boulevard Carnot di Parigi, Roger Taillibert, 1966.

La terrazza del casinò Masque du Fer a Cannes viene ricordata come un importante esempio di copertura pieghevole. Costruita nel 1965, la struttura era composta da un imponente elemento reticolare inclinato al quale è collegato un elemento a imbuto rovesciato che aveva il compito di contenere la membrana in fase di piegamento.

La tela aveva un'estensione di  $800\text{m}^2$  e si dispiegava a forma di ragnatela in modo radiale rispetto al centro dividendosi in otto parti triangolari. Il sistema di apertura era costituito da carrucole fisse e carrelli mobili [55].



Fig. 7.1.5 – La copertura della terrazza del casinò Masque du Fer a Cannes 1966.

La progettazione dello Stadio Olimpico di Montreal, realizzato in occasione dei giochi del 1976 ospitati in Canada, porta la firma dell'architetto francese Roger Taillibert.

La composizione strutturale segue la scia proposta negli anni precedenti dagli studi di Frei Otto, basata sul dispiegamento automatizzato della membrana ancorata ad un nucleo centrale sospeso. Nel progetto iniziale

la membrana di copertura doveva essere contenuta all'interno di un'enorme torre inclinata, alta 168m, a fianco dello stadio. La membrana una volta rilasciata sui cavi di acciaio in tensione garantiva la completa copertura dell'arena.

Si trattava di una membrana retrattile di area superiore ai 24.000m<sup>2</sup> e un peso di 400 tonnellate.

A causa del costo eccessivamente elevato e della difficoltà di esecuzione e messa in opera, la proposta di copertura fu abbandonata dopo alcuni anni dall'inizio dei lavori. Quando l'opera fu completata la membrana di copertura fu inevitabilmente sostituita da una copertura a tipologia permanente.



Fig. 7.1.6 – Stadio Olimpico di Montreal in Canada, Roger Taillibert, 1976.

### 7.1.1 Il velarium

Tra le civiltà che maggiormente hanno studiato le tecniche di costruzione e applicazione di membrane retrattili in architettura la più rilevante è certamente quella romana. Di derivazione navale, il “*velarium*” veniva utilizzato nei teatri romani per riparare gli spettatori

dal sole. I romani, infatti, avevano una profonda conoscenza della tecnologia tessile concernente la realizzazione di vele grazie alla grande esperienza nella navigazione e grazie alle maestranze dei “*fabri navales*” (costruttori navali dell’antica Roma) abili nel far proprie le tecniche di costruzione dei popoli conquistati.

I velieri romani erano essenzialmente di due diverse tipologie: le grosse navi da carico (*naves onerariae*), normalmente utilizzate per spedizioni commerciali e in caso di guerra per i trasporti di uomini e materiali; e le più lunghe navi da battaglia (*naves longae*). Entrambe le imbarcazioni a vela erano munite delle caratteristiche *vele quadre*. La vela quadra era una vela di forma rettangolare o trapezia avente un’inclinazione ad angolo retto rispetto al moto della nave. Essa era inferita (cioè legata) ad un pennone orizzontale e i suoi spigoli inferiori erano tesati mediante scotte legate sul ponte o al pennone inferiore. Era costruita cucendo fianco a fianco vari teli di canapa (i ferzi), rinforzati con spesse corde navali al loro perimetro e teli doppi nei punti in cui le sollecitazioni di tensione erano maggiori.

Tali vele quadre a geometria variabile venivano sollevate attraverso una manovra detta “*pedem facere*”, sostituita in un secondo momento dalla vela triangolare della latina (“*alla trina*”). Da quest’ultima, nascerà in seguito la “*vela al terzo*”, che armerà successivamente le imbarcazioni portoghesi e quelle dell’Adriatico, zona dove viene ancora utilizzata al giorno d’oggi. Le vele venivano messe in tensione attraverso delle cime ancorate al ponte, poi opportunamente cerate in modo da garantire un ripiegamento della membrana più rapido attraverso lo scorrimento negli anelli laterali di ferro.

La vela quadra, più maneggevole e sicura, venne riutilizzata issata non più su di un solo albero ma su navi più grandi e con più alberi, consentendo all'uomo di navigare negli oceani più lontani e scoprire nuove terre.



Fig. 7.1.1.1 – Ricostruzione della vela quadra, modellino esemplificativo.

I primi sistemi di ombreggiamento di grandi spazi si basavano sul riuso delle vele dismesse delle navi e sfruttavano l'abilità e la profonda conoscenza del popolo romano nell'uso dei sistemi velistici dispiegabili. Il termine "*velarium*" fu attribuito in epoca augustea a queste coperture da Vitruvio, proprio in riferimento alla loro origine. L'utilizzo

del velarium nella civiltà romana è certificato da numerosi documenti. Plinio nel XIX capitolo del *Naturalis Historia* ricorda la realizzazione di un enorme telo steso a copertura di tutta la piazza del Foro Romano: «*uno spettacolo più stupefacente dei giochi stessi*».

Svetonio, nel suo *Vite dei Cesari*, narra che «*Caligola facesse ritirare il velarium nelle ore più calde, ordinando che nessuno lasciasse l'anfiteatro*».

Anche Lucrezio parla delle «*corde tese sull'arena che, strappatesi, sbattevano fuori controllo tra i pali, rumoreggiando come il tuono*».

Sia Marziale che Properzio riferiscono del velarium dell'anfiteatro di Pompei, che è pure raffigurato nel famoso affresco che ritrae l'episodio tragico della zuffa fra Pompeiani e Nocerini.

Il “*velarium*”, anche se era un elemento secondario, veniva considerato di fondamentale importanza ed era molto apprezzato dal pubblico degli anfiteatri dell'antico Impero Romano tanto che la sua presenza veniva utilizzata come elemento di richiamo negli annunci “pubblicitari” dell'epoca che gli addetti ai giochi ludici facevano incidere sui muri della città (i così detti “*edicta munera*” erano annunci che informavano sullo svolgimento degli spettacoli). Un esempio è il seguente testo ritrovato nei pressi di Pompei:

<*Glad(iatorum) par(ia) XX A(uli) Sueti / [Par]tenionis [e]t Nigri liberti pugna(bunt) / Puteol(is) XVI XV XIV XIII Kal(endas) Ap(riles) venatio et / athletae [vela] erunt*>.

<*Venti coppie di gladiatori di Aulo Suetio, liberti di [Par]tenione e Nigro combatteranno a Puteoli il XVI, XV, XIV e XIII giorno dalle*

*calende di aprile. Ci saranno venationes, atleti e velarium>.*

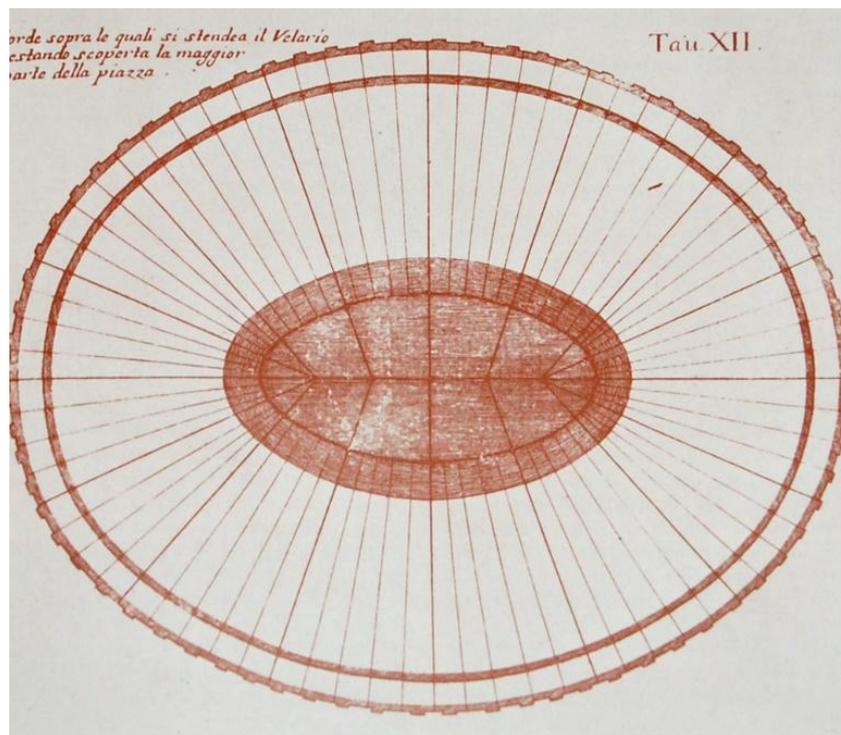


Fig. 7.1.1.2 – Ricostruzione del *velarium* dell’Arena di Verona in un’incisione di Scipione Maffei.

La nascita dei sistemi di oscuramento per i grandi spazi deriva dall’esigenza di creare per gli spazi comuni un elemento di protezione dalla luce del sole durante le ore più calde della giornata. La possibilità di applicare sistemi tensili dispiegabili in grado di aprirsi e chiudersi in caso di pioggia o di forte vento era vista come soluzione ottimale all’epoca. Si riscontrò dunque che i sistemi di ripiegamento delle imbarcazioni a vela avrebbero potuto garantire un’applicazione alternativa ed adeguata all’esigenza.

Lo studio della tecnologia del “*velarium*” fu approfondito ed applicato in tutti i territori dell’Impero Romano, anche in regioni nordiche e nella Gallia, dove venivano applicati materiali impermeabilizzanti (principalmente cera o grasso) per evitare il problema della neve e della pioggia ed andare incontro alle esigenze climatiche tipiche del luogo.

Un’altra classificazione da ricordare è quella basata sulla tipologia di struttura e di membrana. I reperti archeologici presenti sul territorio italiano suggeriscono che le strutture di copertura antiche erano composte da piloni lignei verticali dai quali sporgevano travi a sbalzo o funi sospese di supporto alle membrane tensili.

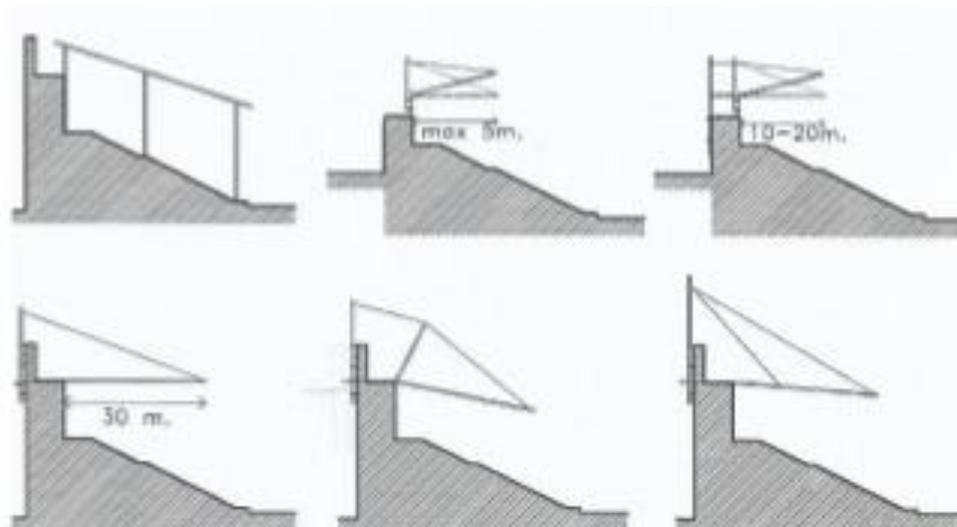


Fig. 7.1.1.3 – Tipologie di strutture di supporto dei “*velaria*”.

Le vele delle imbarcazioni dismesse venivano usate inizialmente nel campo architettonico per ombreggiare gli spazi interni delle città, in

particolar modo le piazze, i fori, le strade o le corti private degli edifici. Tessuti di copertura colorati venivano posti nelle strade principali dell'impero Romano come emblema di magnificenza e ricchezza. Vele ombreggianti colorate furono distese lungo il Foro Romano per rappresentare la potenza dell'Impero in epoca augustea.

La decorazione dei tessuti pregiati come il lino rendeva ancor più grande lo splendore dei "*velarium*" della civiltà romana.

Le tipologie di copertura si possono classificare in funzione del tipo di tela utilizzata.

Le tele di piccole dimensioni erano sospese ed affiancate in successione in funzione dello spazio da coprire. Questa tipologia comportava un maggior numero di elementi di sostegno ed ancoraggi che rendevano più articolata e complessa la messa in opera.

Nel caso di una tela di grandi dimensioni, questa veniva orientata come una cupola rovescia sospesa in modo da coprire tutta la superficie sottostante.

La terza tipologia, infine, era costituita da vele di dimensioni intermedie che venivano tagliate secondo una geometria irregolare ed assemblate mediante cuciture. Quest'ultima forma di copertura garantiva solo una protezione parziale dell'anfiteatro o del teatro (ovvero solo gli spettatori escludendo la cavea del teatro) essendo ancorata tra l'anello esterno superiore e quello interno sospeso. Questa tipologia faceva riferimento all'antica versione delle coperture a tenda dei circhi. La membrana sospesa veniva fissata tramite corde ancorate sui pali perimetrali all'esterno della struttura oppure poggiava su pali lignei infissi all'interno della cavea. L'ancoraggio ad anello, si presume, veniva

usato principalmente nelle aree meridionali in quanto permetteva una maggiore ventilazione e di conseguenza un minor valore di temperatura e umidità. Nei paesi nordici, caratterizzati da un clima più rigido e da frequenti piogge, si optava per una completa copertura dell'intera cavea.

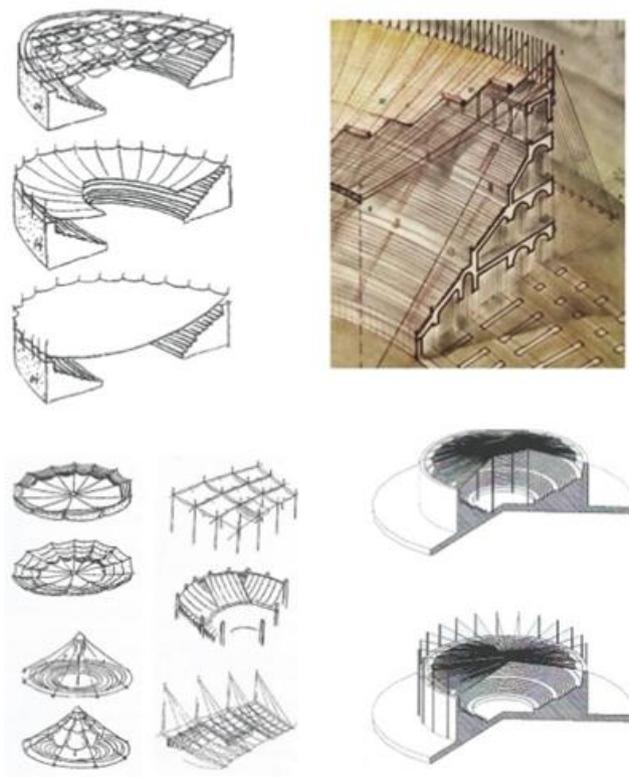


Fig. 7.1.1.4 – Tipologie di “*velaria*” e meccanismi di dispiegamento/ripiegamento del “*velarium*” dell’anfiteatro di Pompei [55].

Per quanto concerne le metodologie di dispiegamento/ripiegamento delle membrature tensili, come già accennato, si faceva riferimento alle maestranze dei “*fabri navales*” che sfruttavano la loro esperienza maturata in campo navale. Le vele ad anello sfruttavano un movimento di

tipo rettilineo grazie all'uso di cavi cerati ed anelli scorrevoli laterali. Per la copertura a cupola rovescia, composta da stoffe di dimensioni maggiori, il movimento di chiusura/apertura era di tipo radiale dall'interno verso l'esterno o viceversa.

Tra gli esempi più significativi di “*velarium*” ad anello possiamo citare il grande anfiteatro di Pompei. Tale vela era costituita da vari lembi squadri di tessuto ancorato a corde laterali (vi erano due ordini di corde sovrapposte di derivazione navale) in modo da permettere lo scorrimento lungo le guide. Gli elementi di sostegno, come è possibile notare dalla fig. 7.1.1.5, erano pali lignei verticali inseriti all'interno di appositi anelli di pietra che sporgevano dalla muratura.



Fig. 7.1.1.5 – Dettaglio tecnologico, ricostruzione della tipologia di “*velarium*” ad anello.

Tra gli esempi più significativi di “*velarium*” ad anello possiamo citare il grande anfiteatro di Pompei. Tale vela era costituita da vari lembi squadrate di tessuto ancorato a corde laterali (vi erano due ordini di corde sovrapposte di derivazione navale) in modo da permettere lo scorrimento lungo le guide. Gli elementi di sostegno, come è possibile notare dalla fig. 7.1.1.5, erano pali lignei verticali inseriti all’interno di appositi anelli di pietra che sporgevano dalla muratura.

Le informazioni pervenute ai giorni nostri relative ai “*velaria*” dell’antico impero romano rivelano che il Colosseo aveva anch’esso una grande copertura di circa 25.000m<sup>2</sup> (quasi quattro campi da calcio) totalmente composta da vele di barca. Le principali notizie concernenti il “*velarium*” dell’anfiteatro, costruito dall’imperatore Vespasiano ed inaugurato dal figlio Tito nell’80 d.C., sono state recuperate dal volume di Enzo Manzione “Il Colosseo”. Tale velario viene considerato uno degli enigmi più spinosi ed affascinanti dell’antico monumento.

Teatri ed anfiteatri, nell’antica Roma erano coperti con un sofisticato sistema mobile di vele, per proteggere gli spettatori dai raggi cocenti del sole durante le stagioni più calde. Secondo recenti teorie all’inizio della stagione primaverile si poneva al centro dell’arena del Colosseo il sistema centrale di ancoraggio del velario, vi si agganciavano le 320 funi di sostegno sulle quali venivano, in fase iniziale, infilati gli anelli metallici a cui si ancoravano gli 80 spicchi trapezoidali del telo di copertura (simili a grandi vele distese) e si sistemavano i tiranti sulle carrucole che servivano alla manovra dei teli. Una volta collegate le parti dell’impianto, si provvedeva a innalzarlo con la manovra simultanea di tutti gli argani posti a terra intorno all’edificio che tendevano

contemporaneamente tutte le funi mantenendo un regime di equilibrio [78]. Questo sistema garantiva ai 50.000 appassionati di combattimenti di gladiatori una riparazione dai raggi del sole. La storia ha dimostrato quindi che più di 2000 anni fa, i Romani potevano coprire le gradinate del Colosseo, e a maggior ragione quelle di dimensioni inferiori ossia circa 300 teatri e anfiteatri sparsi per il vasto impero.

Le membrane utilizzate all'epoca era composte principalmente da teli di lino che si dispiegavano e ripiegavano come dei sipari orizzontali, sostenuti da corde di canapa e appesi a pali di legno inseriti in apposite mensole di pietra forate al centro. Foto e disegni ricostruttivi mostrati in fig. 7.1.1.6 e 7.1.1.7 rendono più chiara ed esaustiva la descrizione. Nella probabile ricostruzione vengono illustrati anche i particolari più curiosi a sostegno di tale tesi, come ad esempio il ritrovamento, nelle vicinanze del Colosseo, di un anemometro, ovvero un antico strumento che serviva ad indicare la direzione e l'intensità del vento.

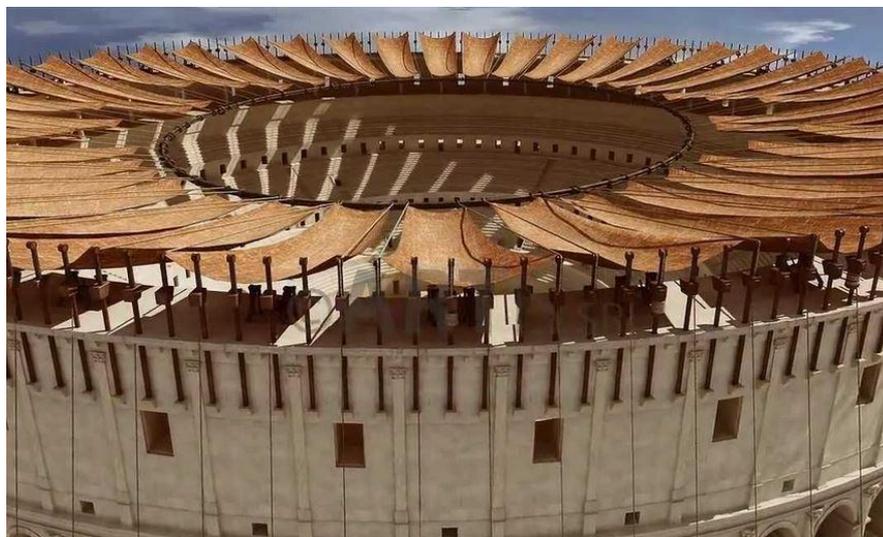


Fig. 7.1.1.6 – Render illustrativo, ricostruzione del “*velarium*” del Colosseo.

L'anemometro era indispensabile per chi si trovava a manovrare vele di una certa dimensione (circa 460m<sup>2</sup> ognuna) ed un peso complessivo che oscillava tra le 15 e le 18 tonnellate.

Solo da circa mezzo secolo gli appassionati di sport hanno la possibilità di avere una protezione dalla pioggia e dal sole assistendo alle manifestazioni sportive sugli spalti degli stadi, in particolare in quei paesi ospitanti le Olimpiadi e i Mondiali di calcio degli ultimi decenni.

Il "*velarium*" del Colosseo era, per la tecnica dell'epoca, un'opera di elevato livello. Era sospeso a 50m di altezza (pari a quella di un edificio di 15 piani) ed era sorretto da ben 240 grandi pali di legno; 50 km di corde di canapa da 8 a 10mm di diametro e 150-200m di corde di canapa di 80mm ad elevato carico di rottura; infine sopra la struttura di supporto si poggiavano i teli di lino ricavati dalle imbarcazioni a vela dismesse.

La lungimiranza degli antichi romani sta nell'aver immaginato un velario sospeso a dei cavi, un concetto questo che sarà reinventato nell'Ottocento per ponti leggeri o di grande portata. Avevano progettato un velario come una gonna a pieghe, che si poteva facilmente aprire e chiudere come un sipario orizzontale prendendo in considerazione, ancor prima della posa della prima pietra di un anfiteatro, il numero di pali da determinare e le loro sezioni, nonché lo spessore dei muri fatto apposta per sostenere il carico e le spinte

L'audacia e l'ingegnosità dei romani risulta essere ancora più impressionante se si pensa che essi non conoscevano le leggi della resistenza meccanica (il valore di resistenza limite), una scienza le cui prime lezioni furono impartite soltanto nel 1842, quando l'ingegnere

Gustave Eiffel iniziò a progettare i primi viadotti e la prestigiosa torre parigina.

I disegni mostrati in fig. 7.1.1.7, illustrano, senza alcun dubbio che l'installazione iniziale poteva essere effettuata senza gru, senza ponteggi, sfruttando esclusivamente la forza delle braccia di un ristretto numero di uomini.

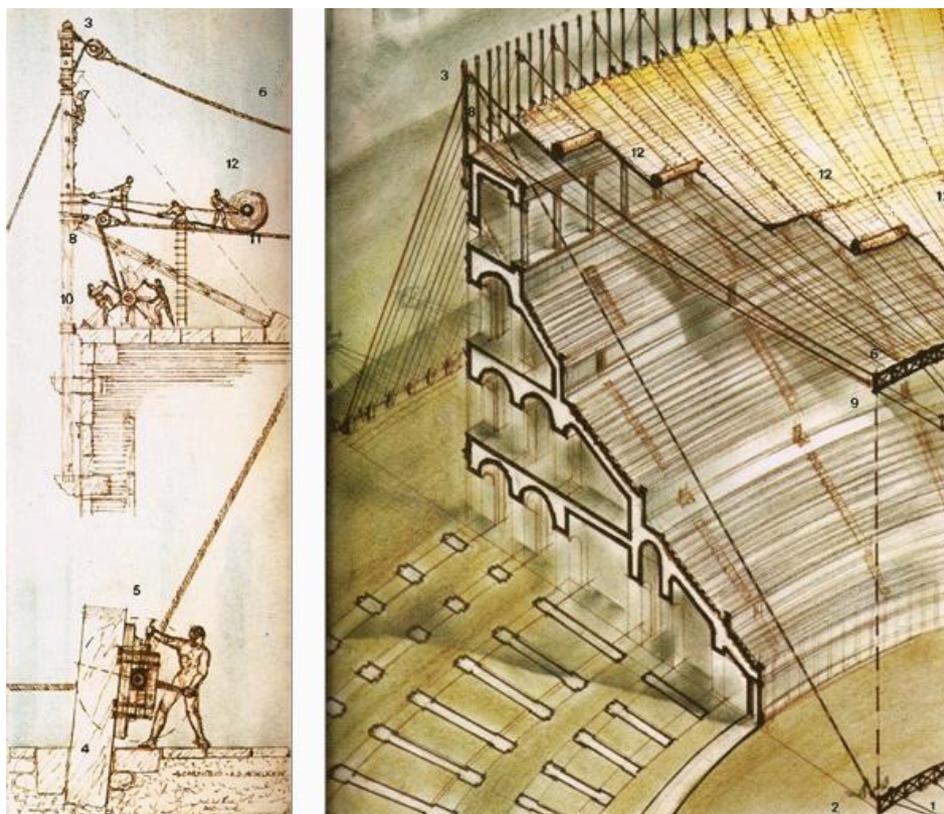


Fig. 7.1.1.7 – Meccanismo di apertura/chiusura manuale del Velarium del Colosseo.

Nel Colosseo erano inoltre ben studiati gli accessi e le vie di esodo per gli spettatori evitando ingorghi e consentendo tempi di evacuazione della folla molto ridotti. Erano stati inventati anche sistemi di sollevamento

(prototipi di montacarichi) per far “sorgere” dal basso contemporaneamente nell’arena le belve feroci.

Nel 2001 il direttore del celebre parco dei divertimenti francese di Puy du Fou affidò all’ingegnere René Chambon, esperto in tecnologia strutturale degli antichi romani, l’arduo compito di progettare ed installare il velario alla romana sul suo “Stadio Gallo Romano”, scommessa vinta nel 2011. Da allora, più di 5 milioni di visitatori hanno avuto la possibilità di osservare e meravigliarsi dinanzi al processo di apertura di 6000m<sup>2</sup> di tela rossa su di essi, uno spettacolo ancora unico al mondo nel 2017.



Fig. 7.1.1.8 – Stadio Gallo Romano del parco di Puy du Fou, 2011.

Realizzando la copertura dello Stadio Gallo Romano nel parco Puy du Fou in Francia, René Chambon ha dimostrato, senza ombra di dubbio,

che 2000 anni fa i Romani potevano coprire gli spalti del Colosseo, e a maggior ragione quelle di dimensioni inferiori dei circa 300 teatri e anfiteatri sparsi per il vasto impero.



Fig. 7.1.1.9 – Velarium di copertura (aperto), Stadio Gallo Romano del parco di Puy du Fou, 2011.

La modellizzazione effettuata da software evoluti nel campo strutturale prende in considerazione, in base ai calcoli di René Chambon, anche l'attrito degli anelli che scivolano sulle corde: *<L'animazione in tre dimensioni realista delle deformazioni del telo e dei cavi nel corso dell'apertura e della chiusura del velario, nonché l'analisi degli sforzi necessari ad ogni istante, finirono con il convalidare che il sistema immaginato mostrava anche che la forza di un uomo bastava per azionare ogni verricello. Lo stesso avveniva nel caso in cui ci fosse stato*

*un problema di sincronizzazione tra coloro che tiravano o la debolezza passeggera di uno degli addetti>.*



Fig. 7.1.1.10 – Velarium di copertura (chiuso), Stadio Gallo Romano del parco di Puy du Fou, 2011.

Alcune costruzioni di oggi, pur beneficiando di una più moderna tecnologia, hanno nei “*velaria*” romani il loro archetipo. Tra le più moderne ed innovative costruzioni, vi è appunto lo Stadio Nazionale di Varsavia.

## **7.2 Lo Stadio Nazionale di Varsavia [2012]**

Lo Stadion Narodowy (Stadio Nazionale) è uno stadio di Varsavia costruito nel 2012 in occasione degli europei di calcio Euro 2012. Viene considerato un esempio di moderno centro multifunzionale oramai simbolo della rinascita della città di Varsavia e di tutta la nazione

polacca. Una struttura che lascia il segno nella storia della progettazione e realizzazione di stadi di interesse internazionale.

Costruito nel cuore nevralgico della nazione europea, il nuovo stadio sorge lungo le rive del fiume Vistula, in un sito che ospitava il precedente stadio limitrofo al centro della città. Lo stadio vecchio fu dismesso nel 2008 dopo più di quaranta anni di attività e diverse proposte di riabilitazione e recupero nel tempo abbandonate verso una definitiva ricostruzione.

La prima pietra fu posta nel 2009 e dopo circa 3 anni, il 30 Novembre 2011, ci fu la sua inaugurazione.

Lo stadio nazionale di Varsavia è stato progettato dallo studio di ingegneria tedesco Schlaich Bergermann and Partners (SBP), leader mondiale nel settore delle tensostrutture, in collaborazione con gli architetti del gruppo Gerkan Marg and Partners (GMP) coadiuvati dal supporto esterno dello studio di architettura polacco JSK Architekci che ha contribuito alla successiva fase di progettazione esecutiva.

La struttura è composta da due parti principali ben distinte: le tribune per gli spettatori realizzate in pannelli di cemento prefabbricato; e la copertura e la facciata esterna composte da una tensostruttura leggera appesa ad elementi metallici di supporto. La copertura è costituita da una membrana tessile retrattile lungo cavi in acciaio disposti a modo di ragnatela. L'imponente facciata, invece, è stata rivestita con lamiere stirate RMIG, alternando pannelli in rosso e in bianco per richiamare i colori della bandiera polacca. Questo tipo di rivestimento è distaccato e risulta essere come un guscio indipendente dal nucleo portante centrale. Si identifica come una vera e propria facciata

innovativa garantendo una buona ventilazione ed un'illuminazione naturale sia per gli spettatori dentro lo stadio che per i fruitori delle infrastrutture interne.

Il concetto sulla base del quale si sviluppa la progettazione dello stadio è quello di una struttura multifunzionale, destinata ad ospitare non solo eventi sportivi, ma anche adatta ad accogliere concerti e manifestazioni in genere, candidandosi così a divenire l'arena principe della nazione polacca. La moderna struttura è in grado di ospitare 58.500 posti a sedere, ed è destinata a lasciare un segno nella costruzione di installazioni di questo genere, per il livello di confort e tecnologia messi a disposizione degli ospiti, con più di 4000m<sup>2</sup> di sale conferenze, 9800m<sup>2</sup> di uffici e 2500m<sup>2</sup> di aree fitness.

La facciata è l'elemento che identifica maggiormente l'intera struttura. Essa ha un andamento continuo circolare e sorregge i pannelli di alluminio colorati che rievocano i colori della bandiera nazionale della Polonia. I pannelli esterni e gli elementi di carpenteria metallica sono illuminati con un sofisticato sistema di illuminazione led che offre una suggestiva scenografia notturna in grado di incantare i passanti e gli spettatori. Una caratteristica che conferisce leggerezza, eleganza e dinamicità all'opera architettonica.

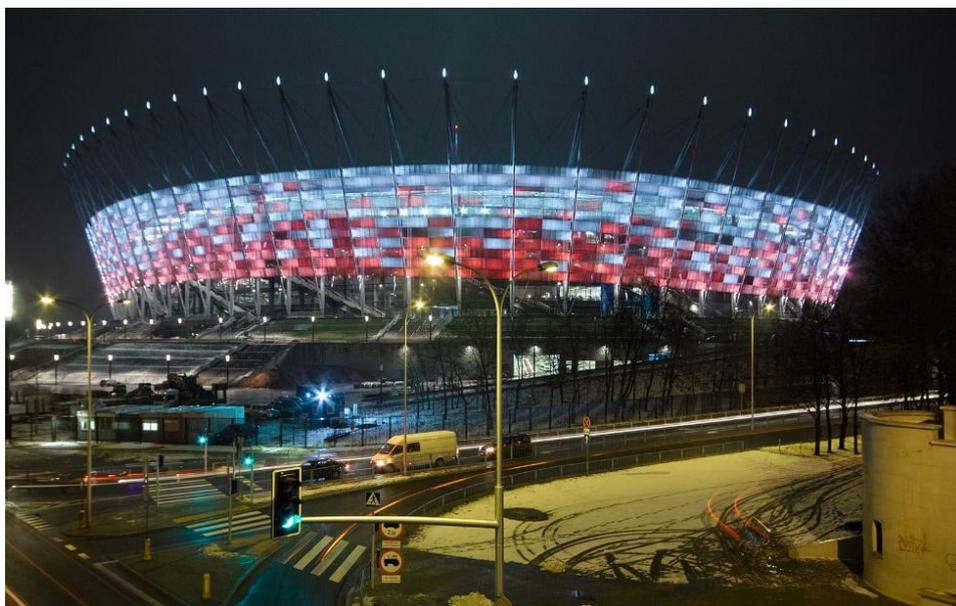


Fig. 7.2.1 – Vista notturna, Stadio Nazionale di Varsavia, Polonia, 2012.

La concezione della struttura di copertura dello stadio nazionale di Varsavia si basa sul principio della ruota della bicicletta: una tensostruttura, composta da travi di funi pretese disposte con simmetria radiale, trasmette sforzi di compressione ad un anello circonferenziale in acciaio che la sorregge, il compression ring, il cui andamento circolare, con valori di quota dal suolo variabili da 28m a 38m, è realizzato tramite la connessione bullonata di elementi tubolari, di diametro pari a 1.820mm e spessore 80mm, suddivisi in conci di lunghezza di circa 12m e del peso di circa 50 tonnellate [15].

Come è possibile osservare dalle figure 7.2.2 e 7.2.3 gli elementi flessibili radiali tesi sono realizzati mediante un sistema piano di funi pretese. Si tratta di funi spiroidali chiuse che dipartono a due livelli dalla circonferenza esterna della struttura, denominati upper e lower radial

cables, con funzione rispettivamente di cavo portante, quello inferiore, e di cavo stabilizzante, quello superiore. I due livelli di cavi radiali, che sono connessi per mezzo di una serie di funi spirodali verticali, denominate hanger cables, vanno ad incrociarsi successivamente nel corpo centrale teso, composto da due anelli di funi disposti su due differenti livelli, i ring cables, mantenuti ad una distanza costante fra loro grazie all'inserimento di una serie di elementi metallici, i flying masts, che seguono allo stesso tempo l'ondulazione dell'intera copertura. La connessione fra ring cables e cavi radiali è realizzata tramite elementi ottenuti per fusione denominati casting, che incorporano le connessioni bullonate per l'attacco dei flying masts.

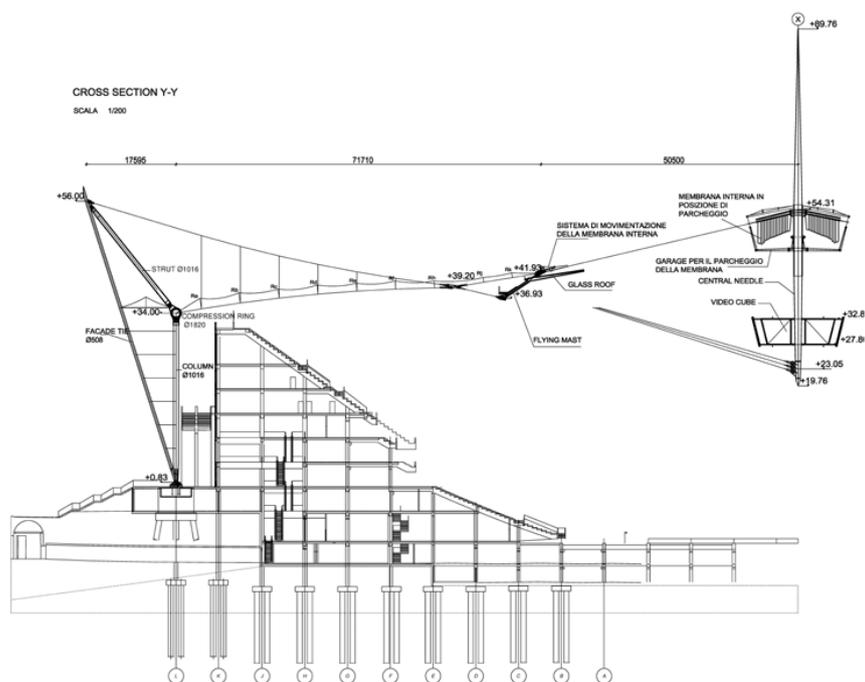


Fig. 7.2.2 – Sezione trasversale, Stadio Nazionale di Varsavia, Polonia, 2012.

Di particolare rilevanza sono i 4 casting inferiori d'angolo: fusioni del peso di circa 14 tonnellate, che raccolgono da un lato la connessione di 4 cavi radiali inferiori, funi spiroidali chiuse del diametro di 110 mm, e dall'altra di 3 funi del diametro di 145mm, i main stay cables, che stabilizzano il "central needle", corpo centrale sospeso della struttura, connesso nella sua parte superiore al ring cable attraverso 60 cavi radiali del diametro di 55 e 60mm (figura 7.2.3).

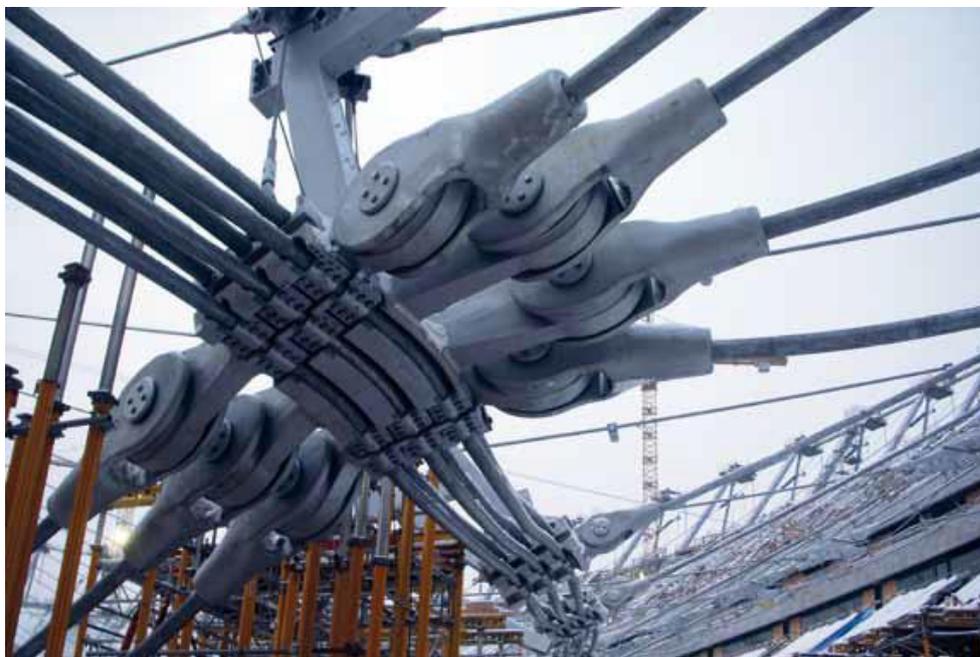


Fig. 7.2.3 – Particolare dell'ancoraggio, Stadio Nazionale di Varsavia, Polonia, 2012.

La tensostruttura sopporta il carico verticale accidentale riducendo la pretensione nei cavi inferiori e aumentando lo sforzo di trazione in quelli superiori e nei ring cables. Questo aumento di tensione nei cavi superiori viene trasformato attraverso un puntone, lo strut, in uno sforzo di compressione radiale sul compression ring, e in uno di trazione che va ad

interessare gli elementi denominati facade ties (figura 7.2.2). Gli strut sono elementi compressi costituiti da tubi del diametro di 1.200mm e spessore pari a 45mm, con lunghezza variabile da 22 a 28m; fra di essi sono predisposti in ogni campitura dei cavi di controvento che riprendono le componenti di sforzo orizzontali. I facade ties sono elementi tubolari snelli di lunghezza variabile dai 48 ai 58 m, di diametro pari 508mm e spessore fino a 70mm. Essi collegano la base della colonna con l'estremità superiore dello strut, dove vanno a connettersi i cavi radiali superiori. La maggior parte del carico viene trasferita, come appena detto, dallo strut al compression ring attraverso una forza radiale, mentre la componente verticale del carico stesso viene trasferita direttamente alla colonna sottostante. Ciò avviene grazie alla connessione fra i due elementi metallici, realizzata tramite un piatto in acciaio posizionato fra le flange del compression ring, che ospita non solo i perni di connessione dello strut con il compression ring, ma anche quelli delle colonne sottostanti e dei cavi radiali inferiori. Le forze orizzontali agenti sulla costruzione sono riprese principalmente dalla facciata esterna. Circa il 50% di tali forze è trasferito direttamente in fondazione, attraverso la struttura esterna di supporto della stessa pannellatura. La parte rimanente del carico orizzontale è trasferita alla copertura metallica principale ed ai sistemi di controventatura denominati main bracings, situati ai quattro angoli della struttura. Questi sono costituiti da funi spirodali chiuse, del diametro di 100 mm, che collegano, con andamento a croce, il compression ring con la base delle colonne e sono soggetti ad uno sforzo di pretensione pari a 5.040 kN. Le 72 colonne, con lunghezza variabile da 28 a 33m, sopportano i carichi e le deformazioni del compression ring e

sono realizzate con elementi tubolari del diametro di 1.016 mm e spessore pari a 70mm. Le strutture sono realizzate in acciaio S355 a grana fine normalizzato secondo EN 10025-3 ed in acciaio S460 a grana fine ottenuto mediante laminazione termo meccanica secondo EN 10025-4.

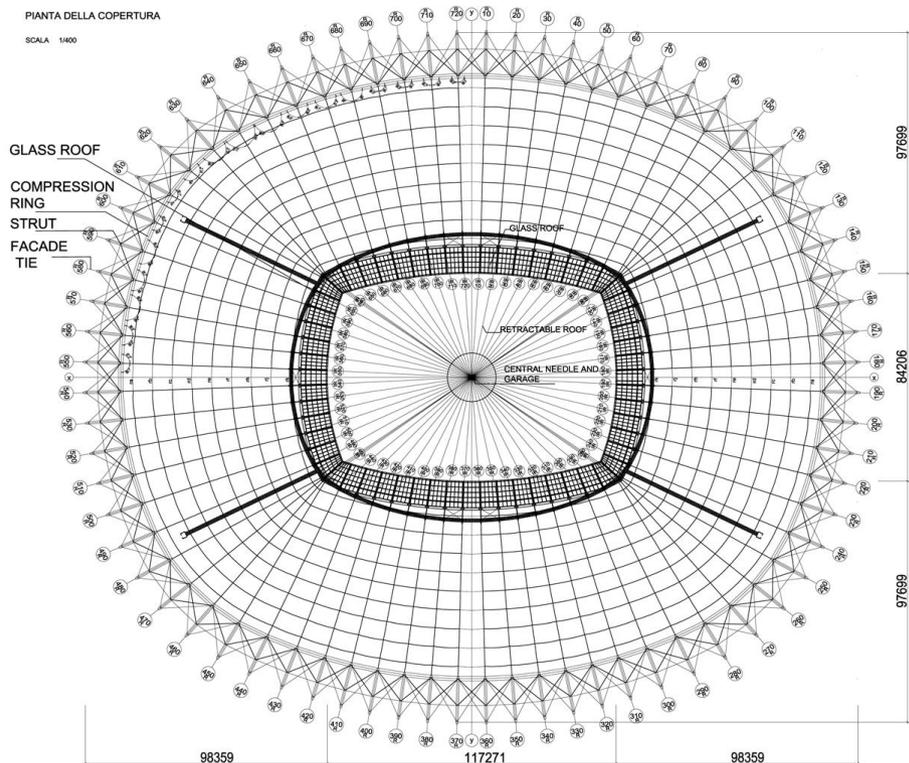


Fig. 7.2.4 – Pianta, Stadio Nazionale di Varsavia, Polonia, 2012.

Per quest'ultimo acciaio è stato richiesto che il valore della tensione di snervamento sia garantito non minore di 460 Mpa anche per spessori superiori a 40mm. Per alcuni elementi strutturali è stato poi impiegato acciaio con caratteristiche di deformazione migliorata in direzione

perpendicolare alla superficie (Z25 e Z35), prodotto in accordo alla normativa europea. I perni che realizzano la connessione a cerniera, di diametro variabile dai 200 ai 250mm, sono realizzati in acciaio legato 34CrNiMo6V mentre i casting sono realizzati per fusione in lega di acciaio NiMoCr36. Le connessioni bullonate ad attrito sono realizzate con l'impiego di bulloni di classe 10.9 e serrati con valori di precarico in conformità alle indicazioni delle normative europee [15].

Il movimento di ripiegamento/dispiegamento della membrana di copertura è ottenuto grazie ad un sofisticato sistema automatico retrattile. Questo sistema è riferito esclusivamente alla parte interna, ovvero quella che sovrasta il campo da gioco, mentre la copertura perimetrale ha una configurazione fissa e circonda gli spalti per tutta la loro superficie.

Il telo dinamico si apre dall'interno verso l'esterno essendo "parcheggiato" in posizione centrale ancorato ad una struttura sospesa sopra il centro del campo, il così detto "central needle", una struttura metallica posizionata a circa 90m di quota dalla linea di terra (fig. 7.2.5).

Gli argani di sollevamento coadiuvati da un sofisticato sistema di ancoraggio consentono il movimento della membrana e, una volta raggiunta la posizione di chiusura finale, la stabilità della struttura.

Il sistema di traslazione fa riferimento anche ad una struttura di supporto dei 4 schermi video, allocati nella parte inferiore del "central needle" come è possibile notare dalla fig. 7.2.5, che consente loro l'abbassamento fino alla quota del campo di gioco.

La membrana di copertura, posta al di sopra delle tribune, è realizzata attraverso l'utilizzo di una membrana in PTFE (fig. 7.2.6). Sul bordo

perimetrale di quest'ultima vi sono posizionati pannelli di vetro per la raccolta ed il drenaggio dell'acqua piovana: una superficie vetrata, definita glass roof, che consente sia il passaggio dei raggi solari naturali sia l'incanalamento dell'acqua proveniente dalla membrana interna. Il drenaggio della parte retrattile ed interna della copertura verso il perimetro esterno è ottenuto grazie ad un'inclinazione di circa  $12^\circ$  dei cavi interni radiali sui quali si dispiega la membrana.

Al fine di evitare il ristagno dell'acqua piovana all'interno di avvallamenti del tessuto di copertura che avrebbero comportato conseguenti sovraccarichi alla struttura, sono stati calcolati accuratamente i valori di pretensione della membrana. Precisamente le sollecitazioni di pretensionamento sono state indotte nella membrana grazie all'uso di un sistema idraulico posizionato centralmente rispetto al ring cable.

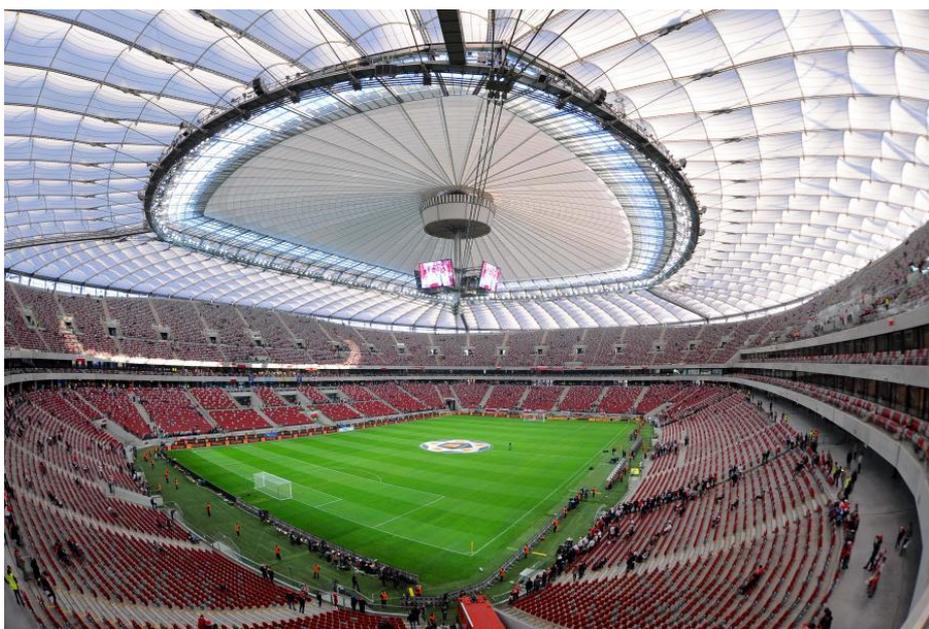


Fig. 7.2.5 – Copertura chiusa, Stadio Nazionale di Varsavia, Polonia, 2012.

Il materiale utilizzato per realizzare il tessuto di copertura retrattile è il PVC che ha elevato valore di flessibilità e resistenza ai carichi sollecitanti. Inoltre tale materiale, ha una discreta resistenza all'usura evitando rotture e/o piegature che potrebbero causare danneggiamenti irreversibili alla membrana retrattile.



Fig. 7.2.6 – Copertura aperta, Stadio Nazionale di Varsavia, Polonia, 2012.

La struttura portante principale in acciaio è stata progettata secondo un approccio agli stati limite ultimi dove tutte le combinazioni di carico sono state definite considerando le normative nazionali ed europee. L'aspetto più delicato ha riguardato le verifiche da carico da vento dove è stata eseguita una simulazione in galleria del vento che ha tenuto conto della morfologia della copertura esterna e della facciata, ed i valori sperimentali ottenuti successivamente sono stati confrontati con i valori da normativa. Analisi di maggior dettaglio sono state eseguite per la determinazione delle oscillazioni del blocco centrale sospeso sottoposto all'azione del vento.

Nella fase di progetto e verifica sono state considerate sia le imperfezioni globali, come ad esempio l'inclinazione sul piano orizzontale o verticale dell'anello circolare di compressione; sia le imperfezioni locali presenti in ogni singolo elemento come ad esempio la tolleranza di inclinazione delle colonne in acciaio o del corretto posizionamento dei cavi radiali.

Le sollecitazioni di pretensione sui cavi metallici sono state applicate attraverso una macchina servo idraulica Instron da 10 MN, adottata anche per eseguire la successiva prova di rottura di alcuni elementi, in particolare sulla fune spiroidale chiusa del diametro di 95mm.

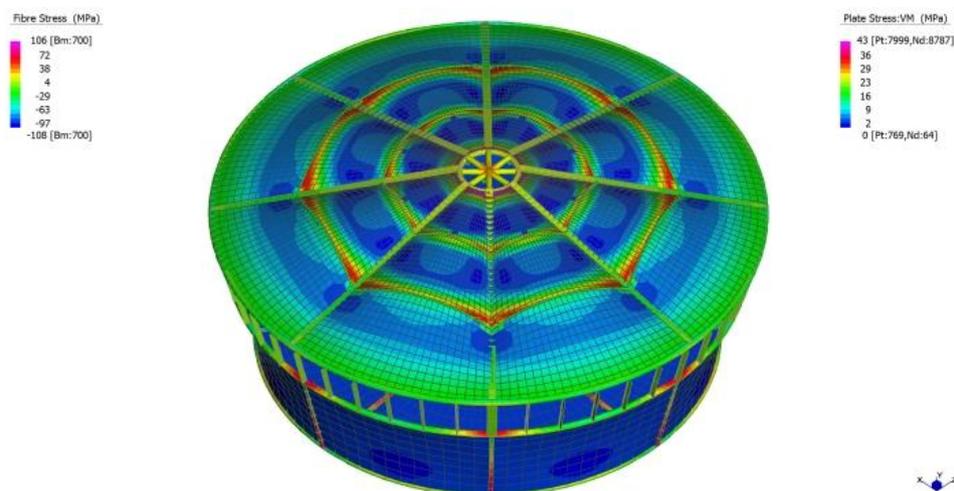


Fig. 7.2.7 – Analisi non lineare della interazione membrana/struttura della copertura del Garage.

Una fase importante della progettazione esecutiva è stata l'applicazione della protezione dalla corrosione delle strutture principali in acciaio che è stata attuata applicando un ciclo di verniciatura opportunamente scelto al fine di garantirne un ciclo di vita superiore ai 15 anni di durata in

funzione delle condizioni ambientali più gravose (classe di corrosività C4). Lo studio tecnico dell'azienda costruttrice ha eseguito, in fase iniziale, verifiche statiche a fatica delle giunzioni saldate e bullonate ed analisi locali basate sulla modellazione agli elementi finiti. In particolare, sfruttando software di modellazione ad hoc, sono stati realizzati diversi modelli tridimensionali della struttura dai quali estrapolare le informazioni necessarie per la realizzazione e progettazione dei dettagli costruttivi (fig.7.2.7).

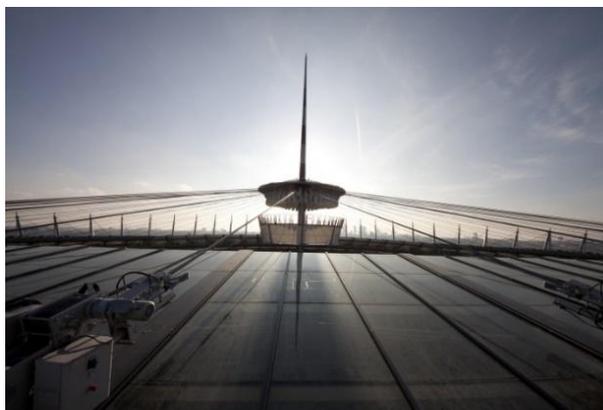


Fig. 7.2.8 – Copertura retrattile in fase open/close.

In fase di organizzazione del cantiere, la messa in opera del blocco centrale sospeso (central needle), ha rappresentato una vera e propria sfida per gli ingegneri. Tale struttura sospesa è stata progettata e verificata con analisi statica e dinamica non lineare in modo da ridurre al minimo il peso proprio. La corretta collocazione dell'elemento metallico in sospensione è stata effettuata dalla Cimolai Technology, azienda costruttrice, leader nella realizzazione di strutture speciali di movimentazione e sollevamento che ha eseguito anche la progettazione dei relativi sistemi di movimentazione degli elementi di garage, del video cube e del sistema retrattile della membrana interna di copertura [15].

## Conclusioni

La presente tesi di dottorato espone una metodologia per lo studio, l'analisi, le scelte e la progettazione di sistemi strutturali tensegrali in architettura.

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 cellulare passando per le realizzazioni in campo architettonico ed aerospaziale fino ai possibili impieghi nell'ingegneria biomedica.

L'obiettivo auspicato è quello di raggiungere una maggiore consapevolezza nell'uso di tale tecnologia e cercare di incoraggiare la scelta di sistemi strutturali tensegrali in architettura e ingegneria come possibili applicazioni sia per opere ex novo sia per interventi sull'esistente come ad esempio per coperture di aree archeologiche, rifacimento di spazi di grande luce quali impianti sportivi, palestre, luoghi di culto, teatri, auditorium, ecc... sia per strutture di protezione temporanea in zone colpite da calamità naturali e situazioni d'emergenza.

Trattandosi di un lavoro di ricerca, numerosi riferimenti progettuali presenti in tale elaborato sono ben noti in letteratura. In fase di analisi iniziale, un primo obiettivo è stato quindi quello di riorganizzare il materiale a disposizione allo scopo di avere una base teorica solida e abbastanza completa per poter affrontare un percorso di ricerca sulla tecnologia tensegrale e cercando altresì di evidenziare sia i vantaggi che le principali problematiche.

L'analisi e la risoluzione degli aspetti empirici e sperimentali concernenti il comportamento strutturale dei sistemi tensegrali è stato opportunamente rimandato a futuri approfondimenti in quanto l'obiettivo di tale tesi di dottorato è stato quello di verificare le potenzialità e le principali caratteristiche di tale tecnologia in architettura.

Il progetto di ricerca proposto ha tentato di sottolineare peculiarità e limiti dell'architettura tensegrale mettendo in risalto possibili realizzazioni tecnologiche basate su tale innovativo sistema costruttivo. Paragonate ad altre tipologie oggi in uso esse sono di eguale fattibilità se non valida alternativa essendo strutture leggere e moderne.

Per quanto concerne gli aspetti che in questa tesi di dottorato sono stati affrontati solo in maniera parziale e che sono meritevoli di ulteriori approfondimenti, si citano i seguenti spunti di sviluppo futuro:

La possibilità di sfruttare materiali diversi dall'acciaio come, ad esempio, il vetro, il legno, il bambù, l'alluminio o i materiali compositi (CFRP, FRP), che si basano su parametri strutturali differenti (modulo di elasticità, peso specifico, resistenza a trazione) i quali potrebbero garantire vantaggi dal punto di vista della leggerezza, economicità e risposta alle sollecitazioni verticali e/o orizzontali. Una novità nel campo della ricerca sulla tecnologia tensegrale meritevole di citazione è -tanto per fare un esempio- il brevetto del nuovo sistema costruttivo TVT (travi vitree tensegrali) presentato dal prof. Maurizio Forli dell'Università di Pisa (Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni). Tale tecnologia strutturale risponde alla richiesta di un'ideale smaterializzazione degli edifici proveniente in misura crescente dall'architettura contemporanea. Si tratta di un prodotto da costruzione in

vetro strutturale precompresso e acciaio, attualmente unico a livello internazionale nel settore High Tech, che apre le porte alla possibilità di costruire strutture in vetro di grande luce ed elevate capacità portanti anche in zona sismica garantendo gli stessi standard di sicurezza che oggi possiedono altri materiali da costruzione tradizionali [C1].



Fig. C.1 – Trave vitrea tensegrali (Tvt).

Strutture tensegrali possono essere applicate nel campo dell'architettura transitoria come tecnologia innovativa leggera sfruttando l'utilizzo di materiali ecologici come il bambù ad esempio. Quest'ultimo è un materiale da costruzione di gran lunga più resistente di qualsiasi essenza vegetale in natura e più leggero del cemento armato e dell'acciaio, flessibile ed adattabile. In caso di terremoto il bambù si dimostra un buon materiale da costruzione per le sue ottime proprietà di flessibilità. Negli Stati Uniti, precisamente alle Hawaii, terra altamente sismica e dove i vulcani sono ancora attivi, è stato impiegato persino nella costruzione di edifici governativi con ottimi risultati formali.

Dal punto di vista dell'innovazione tecnologica, l'uso del bambù apre le porte a diversi sviluppi futuri e potrebbe consentire la realizzazione di opere molto economiche, ecosostenibili nella lavorazione, energeticamente efficienti e, aspetto da non sottovalutare, adatto per l'autocostruzione di manufatti leggeri.

I Paesi in Via di Sviluppo hanno bisogno di milioni di case per la loro popolazione in crescita, gran parte della quale è senza casa, inoltre il tasso di crescita rapida richiede la dotazione e lo sviluppo di infrastrutture e servizi oltre che uffici, industrie, opifici, ricoveri e depositi agricoli, ecc... Pur riconoscendo la necessità di costruire più strutture, è di fondamentale importanza mantenere le questioni ambientali in prima linea.

Il bambù è un materiale disponibile prevalentemente in Asia, Africa e America. La combinazione del concept tensegrali e del bambù come materiale da costruzione ha un grande potenziale dal punto di vista economico ed è in grado di realizzare composizioni strutturalmente ottimali, ecologiche, leggere, resistenti, trasportabili e conservabili. Tale connubio consente di realizzare rifugi o strutture, anche permanenti, realizzate con un risparmio economico notevole e ancor più essere eco-friendly. Trai i tanti studi ed applicazioni in figura C.2 è rappresentato un prototipo di passerella tensegrale i bambù progettata dall'architetto Martin A. Basigalup in Argentina. L'ipotesi progettuale prevede puntoni di bambù e corde di juta a costituire il modulo di base tensegrali.

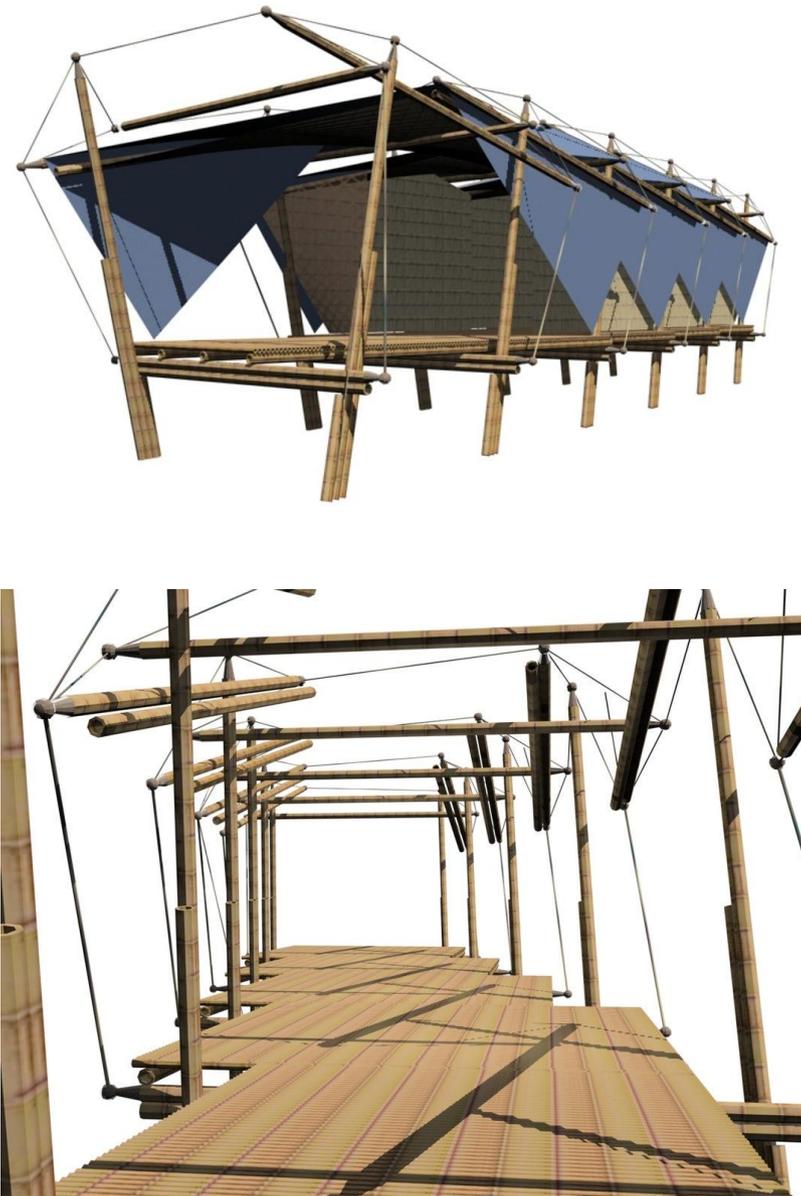


Fig. C.2 - Tensegrali and Bamboo Project, Martin A. Basigalup.

La leggerezza tipica della tecnologia tensegrali, la presenza di elementi rigidi incernierati e la capacità di assemblaggio modulare sono tutte caratteristiche tipiche delle strutture dispiegabili. I vantaggi che ne derivano evidenziano le molteplici possibilità di applicazioni basate principalmente sulla facilità di montaggio/smontaggio e sulla velocità di trasporto. Nel capitolo 5, paragrafo 5.4 si è visto che tale proprietà (ripiegamento/dispiegamento) comporta numerosi vantaggi nel campo dell'architettura transitoria. Infatti le strutture smontabili necessitano di elementi tesi facilmente ripiegabili per essere messi in opera. È stato osservato che altre tipologie strutturali simili presentano componenti di dimensioni maggiori. Sfruttando la tipologia strutturale tensegrale è possibile ridurre l'ingombro dei componenti in fase di ripiego fino ad ottenere l'unità di misura base della struttura (matrice dimensionale). Infine il processo di dispiegamento non richiede particolari difficoltà ed attrezzi specifici che potrebbero rendere difficoltosa l'operazione.

Esempi di strutture dispiegabili possono essere moduli tensegrali per edifici a risparmio energetico [C2] costituiti da una configurazione di base compatta che si distende nel momento desiderato. Moduli tensegrali dispiegabili, sono stati progettati mediante elementi rigidi ed aste telescopiche in grado di allungarsi contemporaneamente in modo da evitare consequenziali problemi di "intreccio" ("entanglement") dei cavi. Il controllo della cinematica dei sistemi tensegrali avviene mediante la regolazione della tensione dei cavi, agendo sulle barre oppure su entrambi gli elementi. Ricerche scientifiche e di laboratorio hanno dimostrato che agendo sui cavi viene garantito un miglior controllo della

struttura evitando anche possibili entanglement devi cavi in fase di rilascio (fase di slack).

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 comportano ridotti effetti di attrito tra le parti e richiedono un limitato consumo di energia per la loro attuazione.

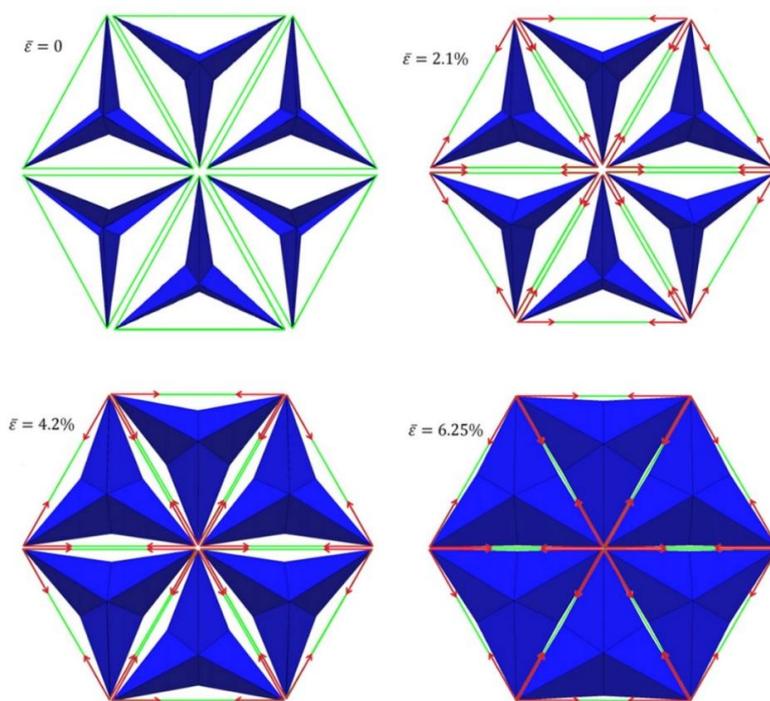


Fig. C.3 – Meccanismo di azionamento di schermi solari “mashrabiya” con architettura tensegrale.

Possibili applicazioni future di strutture tensegrali dovranno sicuramente basarsi su un approccio indirizzato verso la funzionalità di tali sistemi in relazione alle principali caratteristiche che le contraddistinguono, ovvero la leggerezza, la dispiegabilità e l'elevata valenza estetica. Nel campo della ricerca aspetti quali ecosostenibilità, funzionalità e minima massa dovranno essere i concetti chiave per la progettazione di strutture tensegrali.

Oltre alle proprietà finora elencate ricordiamo anche la facilità di trasporto, la modularità e la semplicità degli strumenti di montaggio. Essendo, tali strutture, molto leggere e tipicamente applicate secondo moduli di dimensioni ridotte, il loro volume risulta notevolmente riducibile in fase di ripiegamento. Questi aspetti garantiscono un'analisi semplificata della struttura, che può essere vista come una reiterazione dello stesso modulo di base.

La tecnologia tensegrale, inoltre, a discapito di una difficile ed articolata messa in opera (le operazioni di montaggio richiedono un elevato livello di precisione) necessita di un numero ridottissimo di strumenti specifici necessari. Infine future ricerche scientifiche potrebbero essere indirizzate verso la realizzazione di prototipi in scala di specifici materiali (legno, cfrp, alluminio, acciaio, etc). e su verifiche di maggiore dettaglio inerenti la resistenza al vento (galloping, flutter, instabilità aeroelastica) e le verifiche strutturali dei nodi tecnologici.

La presente tesi di dottorato ha fatto emergere sia le potenzialità che le criticità dei sistemi tensegrali nel panorama della tecnologia edilizia. Sebbene molte delle idee e soluzioni tensegrali citate in questo lavoro di

ricerca necessitano di ulteriori prove di validità per la loro realizzazione, soprattutto per quanto riguarda la scelta dei materiali e le variabili strutturali, le analisi e gli studi effettuati hanno dimostrato che tecnologie tensegrali non si limitano ad essere delle suggestive strutture architettoniche o affascinanti opere d'arte, ma grazie alle loro proprietà possono costituire in diversi ambiti di architettura ed ingegneria una valida alternativa ai tradizionali sistemi e tipologie costruttive.

## APPARATO 1

<b>MATRICE DELLE TIPOLOGIE E DELLE PRESTAZIONI DELLE TENSEGRALI PURE</b>					
<b>CARATTERISTICHE</b>  <b>TIPOLOGIA</b>	<b>A</b> coperture	<b>B</b> ponti	<b>C</b> torri	<b>D</b> strutture trasformabili - dispiegabili	<b>E</b> involucro edilizio - facciate
<b>1</b> minima massa	•		•	•	•
<b>2</b> leggerezza	•	•	•	•	•
<b>3</b> autostabilità strutturale - sismo resistenza	•		•	•	
<b>4</b> possibilità di coprire grandi luce	•	•		•	
<b>5</b> modularità	•	•	•	•	•
<b>6</b> trasformabilità				•	•
<b>7</b> reversibilità				•	•
<b>8</b> dispiegabilità				•	
<b>9</b> controllabilità	•	•	•	•	•
<b>10</b> componibilità - aggregabilità - integrabilità con elementi di sub sistemi edilizi				•	•
<b>11</b> qualità estetica	•	•	•	•	•

## APPARATO 2

TIPOLOGIE ED ELENCO CRONOLOGICO - I PIONIERI DELLE STRUTTURE TENSEGRALI -						
<b>ponti sospesi</b>	<b>I - V sec. d.C.</b> proto- tensostrutture Sud America, Africa equatoriale, realizzate da <i>popoli indigeni</i>	<b>1801</b> Jacob's Creek Bridge South of Mount Pleasant, Pennsylvania. <i>James Finley</i>	<b>1828-30</b> Ponte sul Garigliano, Minturno, Latina, Italia. <i>Luigi Giura</i>	<b>1833</b> Ponte Leopoldo II Poggio a Caiano, Prato, Italia. <i>Alessandro Manetti</i>	<b>1933</b> Golden Gate Bridge S. Francisco, Stati Uniti. <i>Joseph Baermann Strauss</i>	
<b>coperture a cavi sospesi</b>	<b>1883</b> Ponte di Brooklyn, New York. <i>John A. Roebling</i>	<b>1895</b> Shukhov Rotunda Nizhny Novgorod, Russia. <i>Vladimir Grigor'evič Šuchov</i>	<b>1962</b> Cartiere Burgo a Mantova, Italia. <i>P.L. Nervi</i>			
<b>coperture sospese tensostrutture</b>	<b>1955</b> Padiglione della musica. Federal Garden, Kassel, Germania. <i>Frei Otto</i>	<b>1958</b> Sidney Myer Music Bowl. Melbourne, Australia. <i>Barry Patten</i>	<b>1972</b> Parco Olimpico di Monaco, Germania. <i>Frei Otto</i>	<b>1981</b> Aeroporto di Jeddah, Arabia Saudita. <i>Skidmore, Owings &amp; Merrill</i>	<b>1987</b> Stadio Internazionale di Riyadh, Arabia Saudita. <i>I. Fraser J. Roberts &amp; Partners</i>	<b>2000</b> Millenium Dome a Greenwich Gran Bretagna. <i>Richard Rogers</i>
<b>coperture con strutture mobili</b>	Coperture di Arene ed Anfiteatri romani: il Velarium	<b>1966</b> Boulevard Carnot di Parigi, Francia. <i>Roger Tallibert</i>	<b>1966</b> Copertura della terrazza del casinò Maque du Fer a Cannes, Francia			
<b>coperture tensegrali MISTE</b>	<b>1964</b> Palazzo Sport Genova, Italia. <i>Finzi, Martinoja, Pagani, Sironi</i>	<b>1989</b> Georgia domenica Georgia, Atlanta. <i>David Geiger</i>	<b>1964</b> National Gymnasium Tokio, Giappone. <i>Kenzo Tange</i>	<b>1968</b> Aviorimessa Alitalia per Boeing 747 Fiumicino, Roma, Italia. <i>Riccardo Morandi</i>	<b>1972</b> Palestra- Gymnasium di Desenzano Italia. <i>Bruno Fedrigolli</i>	

<b>ANALOGIE CON LE STRUTTURE TENSEGRALI</b>				
<b>strutture tensegrali nell'arte</b>	<b>1978</b> Easy Landing Baltimore, Stati Uniti. <i>Kenneth Snelson</i>	<b>1980</b> Sculture in blocchi di marmo e cavi di acciaio. <i>Santiago Calatrava</i>	<b>2013</b> TensegriTree Kent, Inghilterra. <i>University of Kent</i>	
<b>strutture tensegrali nel design</b>	Elementi di arredo tensegrali	Utensili ed oggetti con supporto tensegrale		
<b>strutture tensegrali in natura</b>	Sistema osseo-muscolare umano ed animale. <i>Stephen M. Levin</i>	Ragnatela del Nephila Clavipes		
<b>strutture tensegrali in biologia</b>	<b>1981</b> Struttura della membrana dei globuli rossi. Harvard Medical School. <i>Donald E. Ingber</i>			
<b>strutture tensegrali in ingegneria</b>	Strutture sismo resistenti - isolatori di energia sismica	Strutture e materiali per «Energy Efficient Buildings» (EEB), per pareti ventilate di spessore adattabile	Pannelli solari termici o fotovoltaici orientabili	Strutture connesse a generatori in grado di catturare l'energia eolica (“tensegrity wings”)

<b>STRUTTURE TENSEGRALI PURE</b>				
<b>coperture tensegrali</b>	<b>2002</b> Blur Building Yverdon - les - Bains, Svizzera. <i>E. Diller e R. Sconfidio</i>	<b>2003</b> La Plata Stadium Buenos Aires, Argentina. <i>Hugo Larotonda</i>	<b>2011</b> Museo Archeologico di Reggio Calabria, Italia. <i>ABDR Associati</i>	
<b>ponti tensegrali</b>	<b>2002</b> Ponte pedonale nel campus di Tor Vergata, Italia. <i>Andrea Micheletti</i>	<b>2009</b> Kurilpa Bridge Brisbane, Australia. <i>Arup Enhineers e Cox Rayner Architects</i>	<b>2013</b> Passerella tensegrale di En Dorigny, Svizzera. <i>Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Bergamo</i>	
<b>torri tensegrali</b>	<b>2003</b> Warnow Tower Rostock, Germania. <i>Schlaich Bergermann partner</i>	<b>2009</b> Instant Skyscraper Australia. <i>Farzin Lirfi-jam e Jerome Frumer</i>	<b>2011</b> Tensegrity Dubai. <i>Tower Aurel von Richthofen</i>	
<b>strutture trasformabili</b>	Satellite dispiegabile tensegrale	Antenne paraboliche tensegrali con aste telescopiche	Torri tensegrali dispiegabili	Coperture tensegrali con solari dispiegabili per canali idrici

## Bibliografia:

- [1] **Burkhardt R.W.**, *A practical guide to tensegrity design*, Cambridge, U.S.A., 2005.
- [2] **Burkhardt R.W.**, *A Technology for Designing Tensegrity Domes and Spheres*, Cambridge, U.S.A., 2004.
- [3] **Carpentieri, G., Skelton, R.E., Fraternali, F.** A minimal mass deployable structure for solar energy harvesting on water canals. STRUCTURAL AND MULTIDISCIPLINARY OPTIMIZATION (ISSN: 1615-147X), In corso stampa, 2016
- [4] **Di Carlo B.**, *Tensegrity World*, Pescara 2012.
- [5] **Deifeld T. E. C./De Oliveira Pauletti R. M.**, *Sobre o projecto e a construçao de estruturas tensegrity*, Mendoza, XXXI Jornadas sudamericanas de ingegneria estructural, 2004.
- [6] **Falk A./Samuelsson S.**, *Timber-plates in tensile structures*, Stockholm, Sweden, KTH Royal institute of Technology, 2004.
- [7] **Fraternali, F., Carpentieri, G., Amendola, A.** On the mechanical modeling of the extreme softening/stiffening response of axially loaded tensegrity prisms. JOURNAL OF THE MECHANICS AND PHYSICS OF SOLIDS, 74, 136-157, 2015. ISSN: 0022-5096 DOI: 10.1016/j.jmps.2014.10.010.
- [8] **Fraternali, F., Carpentieri, G., Skelton, R.E, Micheletti, A.** Progettazione parametrica di ponti tensegrity (Parametric design of tensegrity bridges). STRUCTURAL, 201, paper 02 (11pp), 2016. ISSN 2282-3794. DOI: 10.12917/Stru201.02.

- [9] **Fraternali, F., De Chiara, E., Skelton, R.E.** On the use of morphing and wind stable tensegrity structures for shading facades of smart buildings. *SMART MATERIALS AND STRUCTURES*, 24, 105032 (10pp), 2015. ISSN: 0964-1726, DOI:10.1088/0964-1726/24/10/105032.
- [10] **Fuller R. B.**, “*Tensegrity*” - *Portfolio and Art News Annual*, No.4., 1961.
- [11] **Fuller R. B./Applewhite E. J.**, *Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking*, New York, MacMillan Publishing Co. Inc., 1975.
- [12] **Gomez Estrada G./Bungartz H. J./Mohr dieck C.**, *Numerical form-finding of 2D tensegrity structures*, Max Planck Institute.
- [13] **Gomez Estrada G./Bungartz H. J./Mohr dieck C.**, *On cylindrical tensegrity structures*, Max Planck Institute.
- [14] **Gómez Jáuregui V.**, *Tensegridad - estructuras tensegríticas en ciencia y arte*, Santander, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 2007.
- [15] **Hans-Joachim Schock**, *Atlante delle tensostrutture*, Utet, 2007
- [16] **KURTZ, S.A.** (1968) “Kenneth Snelson: The Elegant Solution”. *Art News*. October, 1968.
- [17] **Lorena Sguerri**, *Storia e tecnica delle tensostrutture: dai ponti sospesi alle architetture in legno lamellare*, Biblioteca di Galileo, Padova, 1995
- [18] **Micheletti A.**, *Modular tensegrity structures: the TorVergata footbridge*, Roma, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Roma “Tor Vergata”, 2003.
- [19] **Motro R.**, *Tensegrity – Structural Systems for the Future*, London, UK, Kogan Page Science, 2003.

- [20] **Motro R./Maurin B./Silvestri C.**, *Tensegrity rings and the hollow rope*, Montpellier, France, L.M.G.C., 2006.
- [21] **Motro R./ Bouderbala M.**, *Tensegrity Systems; Folding Examples*, Seminario sulle strutture pieghevoli, CISM, Udine 1999
- [22] **Motro R., Maurin B., Silvestri C.**, *Tensegrity rings and the hollow rope*, Montpellier, France, L.M.G.C., 2006.
- [23] **Nagase K. and Skelton R.**, *Journal of the international association for shell and spatial structures, Minimal mass tensegrity structures*, 2014.
- [24] **Oppenheim, I.J., Williams, W.O.**, *Geometric Effects in an Elastic Tensegrity Structure*, Journal of Elasticity, Vol.59 No.1, 2000
- [25] **Oppenheim, I.J., Williams, W.O.**, *Tensegrity Prims as Adaptive Structures; Adaptive and Material Systems*, AMSE, AD-ol.54, 1997
- [26] **Podio Guidagli P.**, *The tensegrity arch at TorVergata*, Roma, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di TorVergata, 2003.
- [27] **Popovic O./Sakantamis K.**, *A novel approach to physical modeling formfinding of tensegrity systems*, IASS.
- [28] **Pizzigoni A./Ruscica G.**, *Tensegrity: da gioco per la mente a nuova tecnologia costruttiva*, Università degli Studi di Bergamo, Dipartimento di Ingegneria.
- [29] **Pugh Anthony** - *An Introduction to Tensegrity* - (1976). University of California Press
- [30] **Schlaich M.**, *The messeturm in Rostock – A tensegrity tower*, IASS.
- [31] **Setzer S.W.**, *Georgia Dome. Raise High the Record Roof*, [online], New York, Columbia University, 1992.

- [32] **Skelton R. E./Mauricio C. De Oliveira.**, *Tensegrity Systems*, Springer, New York, 14 June 2015.
- [33] **Skelton R.E., F. Fraternali, G. Carpentieri, A. Micheletti**, *Minimum mass design of tensegrity bridges with parametric architecture and multiscale complexity*, Mechanics Research Communications, 2013.
- [34] **Skelton R. E./Helton J. W./Adhikari R./Pianud J. P./Chan W.**, *An introduction to the mechanics of tensegrity structures*, San Diego, CA, U.S.A., University of California, CRC Press LLC, 2002.
- [35] **Skelton R. E./Masic M./De Jager B.**, *Optimal topology and geometry for controllable tensegrity systems*, University of California, Eindhoven University of Technology.
- [36] **Skelton R. E./Williamson D./Han J.**, *Equilibrium conditions of a class I tensegrity structure*, Volume 112, Advances in the Astronautical Sciences Spaceflight Mecahnics 2002, AAS 02-177, San Diego, CA, U.S.A., University of California, 2002.
- [37] **Snelson K.**, *Kenneth Snelson*, [on-line], New York, U.S.A., 2004.
- [38] **Tibert G.**, *Optimal design of tension truss antennas*, Norfolk, U.S.A., 44<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference and Exhibit, 7-10 April 2003.
- [39] **Tibert G./Pellegrino S.**, *Form-Finding of Tensegrity Structures—A Review*, International Journal of Space Structures, 2001.
- [40] **Tibert G./Pellegrino S.**, *Deployable Tensegrity Masts*, Norfolk, U.S.A., 44<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference and Exhibit, 7-10 April 2003.

[41] **Tibert G./Pellegrino S./Kukathasan S./Watt A.**, *Small satellite deployment mechanisms*, Cambridge, UK, University of Cambridge, 2000.

[42] **Tibert G./Falk A.**, *Plate based tensegrity structures*, Stockholm, Sweden, Luleå Technical University – KTH Royal institute of Technology, 2005.

[43] **Wagner R.**, *The virtual world of “Tensional Integrity”*, Munich, Germany, University of applied science.

[44] **Williamson D./Whitehouse D.**, *Visualization of Tensegrity Structures*, [online], Australia, 2000.

[C2] **Fraternali, F., De Chiara E., R. Skelton**, *On the use of morphing and wind stable tensegrali structures for shading facades of smart buildings*. SMART MATERIALS AND STRUCTURES, 24, 105032 (10pp), 2015. ISSN: 0964-1726, DOI:10.1088/0964-1726/24/10/105032.

## Tesigrafia:

[45] **Deifeld T.E.C.**, *Sobre a analise e os processos construtivos das estruturas tensegrity*, tesi di dottorato, Escola Politecnica da Universidade de São Paulo, 2005.

[46] **Genovese D.**, *Metodi di analisi e ricerca di forma*, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università delle Marche, 2008.

[47] **Gómez Jáuregui V.**, *Tensegrity Structures and their Application to Architecture*, tesi di dottorato, Queen's University, School of Architecture, Belfast, Northern Ireland, 2004.

- [48] **Micheletti A.**, *Strutture pieghevoli che ricercano una forma di equilibrio*, tesi di laurea, in Ingegneria Civile, Roma, Università di “Tor Vergata”, 1999.
- [49] **Micheletti A.**, *Torri Tensintegre*, tesi di dottorato, Roma, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di “Tor Vergata”, 2003.
- [50] **Miranda R.**, *Progettazione topologica ottimale di sistemi di copertura tensegrity di minima massa: una proposta per il campus di Fisciano*, tesi di laurea, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno, 2015.
- [51] **Mucedola M, Paradiso S.**, *Passerella ciclo-pedonale sopra il fiume Sesia*, Tesi di laurea, Università degli Studi di Torino, 2012.
- [52] **Nishimura, Y.**, *Static and Dynamic Analyses of Tensegrity Structures*, PhD Thesis, University of California at San Diego, La Jolla, CA, USA, 2000.
- [53] **Ponzi L.**, *Una passerella tensintegra nel campus di Tor Vergata*, tesi di laurea, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di TorVergata, Roma, 2002.
- [54] **Silvestrini A.B.**, *Dinamica di un Sistema Tensintegro Tridimensionale*, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di “Tor Vergata”, Roma, Italia 2010.
- [55] **Zhang J.Y., Ohsaki M.**, *Adaptive force density method for form-finding problem of tensegrity structures*, Department of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University, Japan.
- [56] **Zoli Lorenzo**, *Tecnologie innovative leggere applicate all'architettura transitoria - l'ipotesi delle strutture tensegrali*, tesi di dottorato, Dipartimento dell'Università degli Studi di Firenze, 2007.

## Sitografia:

- [57] <http://www.fernandofraternaliresearch.com/>
- [58] <http://www.kennethsnelson.net/>
- [59] <http://www.tensegridad.es/links.html>
- [60] [http://anusf.anu.edu.au/Vizlab/viz\\_showcase/williamson\\_darrell/](http://anusf.anu.edu.au/Vizlab/viz_showcase/williamson_darrell/)
- [61] <http://www.rwgrayprojects.com/rbfnote/fpapers/tensegrity/tenseg01.html>
- [62] <http://maeresearch.ucsd.edu/skelton/recent.htm>
- [63] <http://www.edilizianews.it/articolo/18359/travi-stratificate-a-parete-discontinua- e armatura-attiva-le-travi-vitree-tensegrity>
- [64] [http://www.biotensegrity.com/danieles\\_models.php](http://www.biotensegrity.com/danieles_models.php)
- [65] [http://issuu.com/emiliolonardo/docs/strutture\\_tensegrali\\_pubb](http://issuu.com/emiliolonardo/docs/strutture_tensegrali_pubb)
- [66] <http://www.rwgrayprojects.com/rbfnote/toc.html>
- [67] <http://code.algorithmicdesign.net/>
- [68] <https://tensegrity.wikispaces.com/>
- [69] [http://mathlab.cit.cornell.edu/visualization/tenseg/in\\_progress/short\\_top.html](http://mathlab.cit.cornell.edu/visualization/tenseg/in_progress/short_top.html)
- [70] [http://www.architetturatessile.polimi.it/membrane\\_scoche/prodotti\\_mem/21\\_monocomp\\_edile/2-1\\_PTFE\\_espanso/PTFE\\_espanso.html](http://www.architetturatessile.polimi.it/membrane_scoche/prodotti_mem/21_monocomp_edile/2-1_PTFE_espanso/PTFE_espanso.html)
- [71] <http://www.arketipomagazine.it/>
- [72] <http://www.prefabbricatisulweb.it>
- [73] <http://www.federica.unina.it/>
- [74] <https://www.architetturaecosostenibile.it/>
- [75] <http://albertotomassi.blogspot.it>
- [C1] <http://www.edilizianews.it/articolo/18359/travi-stratificate-a-parete-discontinua-e armatura- attiva-le-travi-vitree-tensegrali>