



Ricerca diretta e coordinata dal Prof. Ing. Placido Munafò. Gli autori hanno equamente contribuito alla stesura del testo. L'Ing. Francesco Marchione ha attivamente partecipato alla sperimentazione.

Classificazione Decimale Dewey:

690.17 (23.) EDILIZIA. ELEMENTI STRUTTURALI. Soffitti

FRANCESCO MARCHIONE

PLACIDO MUNAFÒ

SOLAIO CON STRUTTURA DI SOSTEGNO TENSEGRALE E IMPALCATO IN VETRO

**VERIFICA SPERIMENTALE
DELLE PRESTAZIONI E DEL SISTEMA COSTRUTTIVO**





©

ISBN
979-12-218-1132-2

PRIMA EDIZIONE
ROMA 7 FEBBRAIO 2024

INDICE

7	<i>Nomenclatura</i>
9	<i>Introduzione</i>
13	Capitolo I Principio tensegrale: definizioni e cenni storici
51	Capitolo II Verifica sperimentale preliminare di modelli di impalcati in vetro applicati su due profili metallici
71	Capitolo III Prototipo di solaio <i>tensegrity smart</i>
79	Capitolo IV Il prototipo
91	Capitolo V Valutazione sperimentale del comportamento meccanico del giunto adesivo tra acciaio e vetro per il prototipo di solaio tensegrale in scala 1:2
125	Capitolo VI Ottimizzazione del sistema costruttivo

6 *Indice*

139 *Bibliografia*

147 *Indice delle figure*

153 *Indice delle tabelle*

NOMENCLATURA

Adesivi

<i>EPX</i>	Adesivo epossidico
<i>ACR</i>	Adesivo acrilico
<i>MET</i>	Adesivo metacrilato
<i>PU</i>	Adesivo poliuretano
<i>SIL</i>	Silicone
<i>S.SUPP.</i>	Semplice appoggio

Modalità di crisi

<i>AF</i>	Modalità di crisi adesiva
<i>CF</i>	Modalità di crisi coesiva
<i>GF</i>	Modalità di crisi per rottura dell'aderendo in vetro
<i>MF</i>	Modalità di crisi mista

Parametri meccanici

E_t	Modulo elastico a trazione
F_{max}	Carico di rottura

8 Nomenclatura

α	Coefficiente di espansione termica
\mathcal{E}_t	Allungamento a trazione
d	Spostamento a compressione (freccia)
σ_t	Tensione di rottura a trazione
σ_c	Tensione di rottura a compressione
σ_{yk}	Tensione di snervamento
τ	Tensione di rottura a taglio
k	Rigidezza
γ	Scorrimento angolare a rottura
s	Spostamento a rottura
ν	Modulo di Poisson

Parametri chimici

A_t	Temperatura di applicazione dell'adesivo	T_{cc}	Invecchiamento artificiale in camera climatica
T_0	Maturazione in condizioni di laboratorio	T_g	Temperatura di transizione vetrosa
S_t	Temperatura di servizio	W_t	Tempo di servizio

Tecniche di misurazione

$LVDT$	Trasduttore induttivo di spostamento	OSM	Sistema di misurazione ottico
--------	--------------------------------------	-------	-------------------------------

INTRODUZIONE

Il presente lavoro riguarda la sperimentazione condotta su un solaio con impalcato in vetro collaborante con una struttura portante di tipo tensegrale, particolarmente indicata per edifici con destinazione d'uso commerciale, espositivo e terziario in generale, nonché per applicazioni in aree archeologiche. Verranno affrontati in particolare gli aspetti legati alle prestazioni meccaniche e di fattibilità tecnico-costruttiva. I principali elementi strutturali in acciaio della struttura tensegrale sono: i nodi su cui sono applicate le lastre di vetro dell'impalcato con giunzioni adesive, barre filettate o trefoli passanti tra i nodi opportunamente pretensionati in modo che il contorno esterno della struttura sia teso quando il solaio è scarico. Il sistema costruttivo messo a punto può essere prodotto in serie (industrializzabile). Il solaio si caratterizza per: le alte prestazioni meccaniche con la possibilità di controllare le deformazioni, la leggerezza, il design, la trasparenza, la rapidità di assemblaggio, la relativa facilità di montaggio in opera, la versatilità di impiego, nonché i costi contenuti grazie al numero ridotto di componenti (con conseguente riduzione delle emissioni di gas serra in fase di produzione e di trasporto).

Viene ripercorso il processo di sviluppo del solaio partendo dalla verifica sperimentale sull'applicabilità (fattibilità) della giunzione adesiva per l'unione dell'impalcato in vetro e sottostruttura in acciaio. Tale tipo

di giunzione, oltre a permettere un'adeguata collaborazione strutturale tra impalcato e la sottostruttura, consente al solaio di raggiungere quelle qualità che abbiamo elencato come caratterizzanti.

La tecnologia adesiva può considerarsi una soluzione innovativa nel settore delle costruzioni ed in particolare per la realizzazione di chiusure orizzontali di tipo tensegrale.

Il solaio in questione è quello del brevetto denominato “Solaio tensegrale”, n. 0001426973 del 14/10/2014 (di proprietà dell'Università Politecnica delle Marche, inventore Prof. Placido Munafò) [1].

La peculiarità del sistema è la collaborazione strutturale tra impalcato in vetro e la sottostruttura e l'impiego di una struttura di tipo tensegrale che può essere prodotta industrialmente. Questa tecnologia consente di ottenere un solaio adeguatamente rigido anche per luci di notevoli dimensioni, in grado di contenere le deformazioni sollecitate dai carichi di esercizio, contrariamente alle chiusure orizzontali usualmente utilizzate con impalcato in vetro non strutturalmente collaborante.

Fasi della ricerca e della sperimentazione

Lo sviluppo del solaio tensegrale ha previsto più fasi:

- test di taglio su giunti adesivi *double-lap* tra aderenti in vetro e acciaio secondo il *setup* sperimentale indicato dalla normativa ASTM D3528–16 [2]. In questa fase si sono anche valutate le prestazioni meccaniche dei giunti adesivi con diversi tempi di maturazione del giunto e di invecchiamento artificiale in camera climatica; [tali risultanze sono riportate nell'opera *Caratterizzazione meccanica dei giunti adesivi*⁽¹⁾, degli stessi autori]
- test di compressione ciclica su giunti adesivi con aderenti in alluminio, per valutare le prestazioni meccaniche dell'adesivo per carichi ripetuti nel tempo;
- test di flessione su sistemi strutturali ibridi acciaio–vetro realizzati con due profili scatolari a sezione quadrata in acciaio

(1) P. MUNAFÓ and F. MARCHIONE, *Caratterizzazione meccanica di giunti adesivi*, 1st ed. Palermo: Dario Flaccovio Editore, 2023. [Online]. Available: <https://www.darioflaccovio.it/libri-di-calcolo-strutturale/2167-caratterizzazione-meccanica-di-giunti-adesivi.html>.

opportunamente distanziati su cui è stata applicata una lastra quadrata di vetro temperato, sia nella configurazione semplicemente appoggiata, che vincolata con giunzioni adesive (vetro collaborante) in modo da verificare l'apporto in termini di rigidezza globale fornito dal giunto;

- progettazione strutturale e realizzazione di prototipo in scala 1:2 del solaio *Tensegrity Smart*, descritto nel brevetto [1]. La fase di assemblaggio del sistema tensegrale ha evidenziato alcune criticità costruttive relative alla messa in opera dei trefoli che ha portato a ridefinire alcuni particolari costruttivi in modo da rendere più funzionale la costruzione ottimizzando allo stesso tempo il processo costruttivo;
- test di carico sul prototipo di solaio tensegrale, secondo diverse combinazioni di vincolo dell'impalcato in vetro (i.e., semplicemente appoggiato e vincolato adesivamente), di carico e di tipologia di adesivo impiegato (i.e., adesivi epossidici, siliconici).

CAPITOLO I

PRINCIPIO TENSEGRALE: DEFINIZIONI E CENNI STORICI

La definizione di *tensegrity* è ancora oggi oggetto di discussione, come riportato in Ref. [3]. Da un lato vi è la definizione matematica, secondo cui una struttura tensegrale è composta da cavi (elementi soggetti a sola trazione), *struts* (puntoni) resistenti solo a compressione; dall'altro è diffusa l'idea per cui una struttura tensegrale è tale se possiede elementi in compressione non in contatto tra loro, come riportato da Connelley e Withley [4].

Il termine *tensegrity* è stato coniato da Richard Buckminster Fuller⁽¹⁾ e rappresenta la crasi delle parole *tensional* e *integrity*, come riportato dallo stesso Fuller nella sua opera *Synergetics: Explorations in the geometry of thinking* [5]. In tale accezione, il termine *tensegrity* sottende alla integrità di una struttura, ottenuta per mezzo di elementi continui (cavi) sollecitati a trazione e di elementi compressi (*struts*) discontinui. È possibile dunque distinguere tra elementi continui e flessibili ed elementi discreti e rigidi [6], secondo una configurazione strutturale che ottimizza in modo intrinseco l'uso dei materiali.

(1) Richard Buckminster Fuller (1895–1983) è stato un inventore, architetto, designer, filosofo, scrittore e conduttore televisivo statunitense. Fu anche professore alla Southern Illinois University.

Una ulteriore definizione qualitativa è fornita dallo stesso Fuller [7]: «isole di compressione in un oceano di tensione». Tale espressione abbraccia diverse tipologie di configurazioni strutturali; un esempio è rappresentato dagli pneumatici, in cui l'aria compressa è confinata all'interno di una membrana continua tesa. La definizione più recente si deve a Motro [8]: «si definisce 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 "auto-equilibrio" si intende la presenza di una configurazione di equilibrio stabile della struttura, ottenuto mediante presollecitazione della stessa prima di essere soggetta, sia ad azioni esogene (carichi esterni) che endogene (peso proprio).

L'ideazione del concetto di *tensegrity* risale al 1948, in seguito alla elaborazione da parte di Kenneth Snelson⁽²⁾ — allora allievo di Fuller — di una prima configurazione geometrica spaziale, riconducibile alla concezione della *floating compression* [9] (Figura 1).

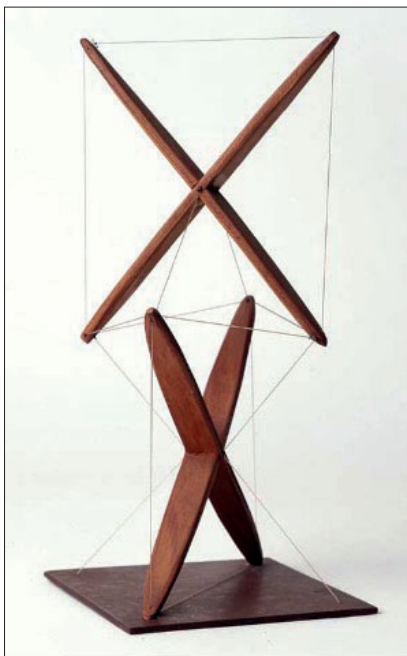


Figura 1. La colonna "X" di Snelson.

(2) Kenneth Snelson (1929–2016) è stato uno scultore e fotografo contemporaneo americano.

La scultura “X” *column* è costituita da un numero ridotto di elementi compressi (puntoni) circondati da fili tesi continui (tiranti). Questa realizzazione esprime l’idea di tensione continua e compressione discontinua e rappresenta — come affermato dallo stesso Snelson — un primo modulo piano tensegrale, composto da due puntoni e quattro cavi continui, in cui gli elementi compressi non sono in contatto tra loro.

Nella sua attività di scultore, Snelson continuò a creare strutture con elementi compressi “fluttuanti”, migliorando la soluzione proposta con il modulo “X”. Un esempio è la Needle Tower di Washington (Figura 2), struttura caratterizzata dalla sovrapposizione di sottostrutture tensegrali modulari.

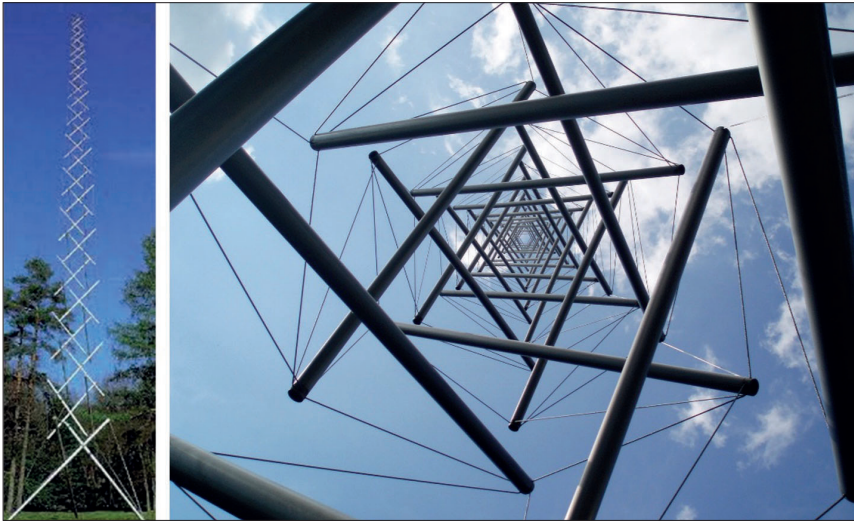


Figura 2. Needle Tower, vista globale e particolare.

L’ungherese David Georges Emmerich condusse autonomamente studi su alcune strutture tridimensionali definite tese ed autotendenti, ispirandosi ai modelli prototensegrali di Loganson noti come *Gleichgewichtkonstruktion*, esposti a Mosca nel 1921 (Figura 3 e Figura 4).

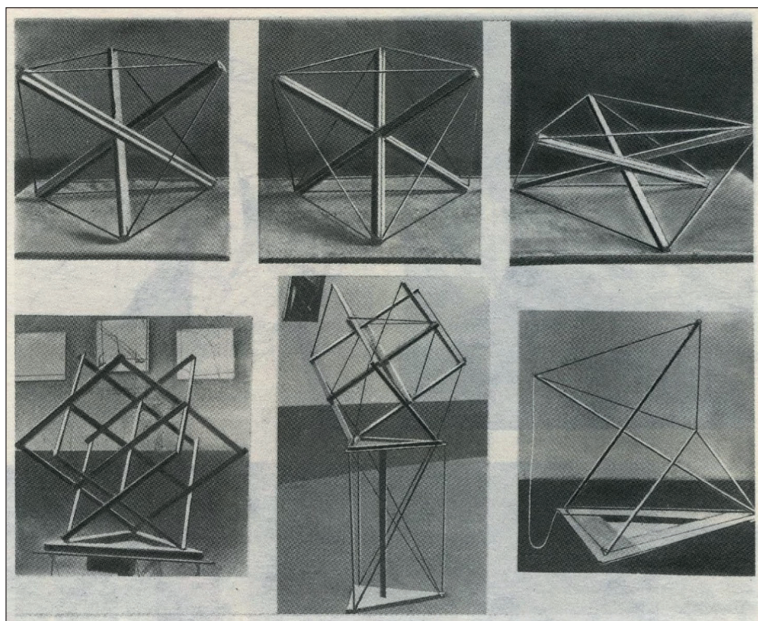


Figura 3. Iogansen, Costruzioni spaziali, 1921.

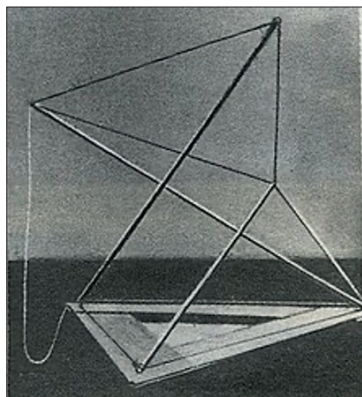


Figura 4. Ioganson, struttura proto-tensegrale.

La struttura di Iogansen, nota come struttura proto-tensegrale, conosciuta anche come *Elementare Equilibrium*, si compone di quattro barre e di sette cavi. L'ottavo cavo non sollecitato ha la funzione di modificare la configurazione geometrica del sistema strutturale.

L'opera di Emmerich si è concentrata sullo studio di prismi in tensione e di sistemi tensegrali composti, Figura 5. Questi studi saranno poi alla base dei successivi brevetti industriali descritti nel seguito.



Figura 5. Emmerich accanto alla sua struttura tensegrale a Varsavia, 1981.

Brevetti e sviluppi

Le prime domande di brevetto risalgono agli inizi del 1960 (Francia e USA), a firma di D. G. Emmerich Figura 6 e di Fuller Figura 7. Tuttavia, le prime pubblicazioni relative alle invenzioni di strutture tensegrali sono ad opera di Fuller (1962).

I brevetti di Fuller ed Emmerich [10]–[13] si collocano, più precisamente, in un periodo compreso tra il 1959 ed il 1964, ma è anche opportuno citare la domanda di brevetto di Snelson [10] risalente al 1965. Il primo brevetto di Emmerich riguarda un primo sistema chiamato *Pearl Frameworks* all'INPI (Istituto Nazionale di Proprietà Industriale) [10]–[15]. Un suo secondo brevetto del 1965 è denominato *Construction de reseaux autotendant* (n. 1377290) Figura 6.

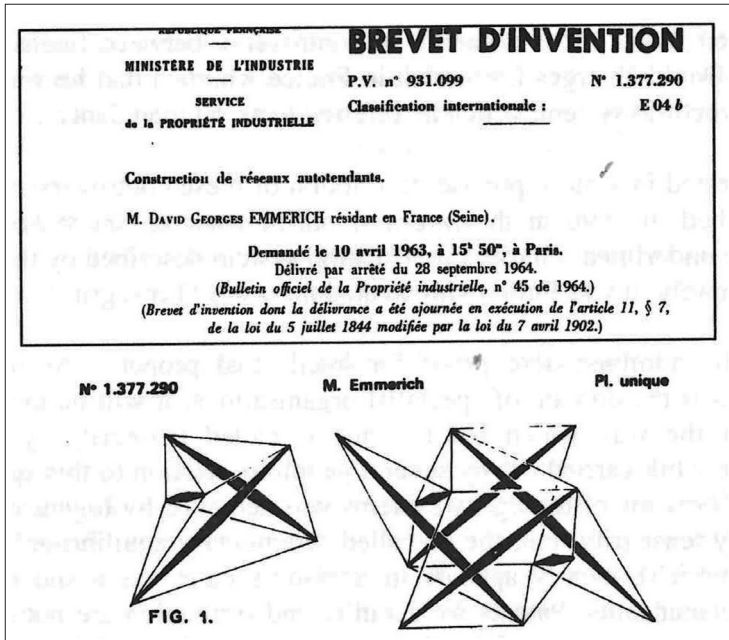


Figura 6. Il brevetto di Emmerich, 1963.

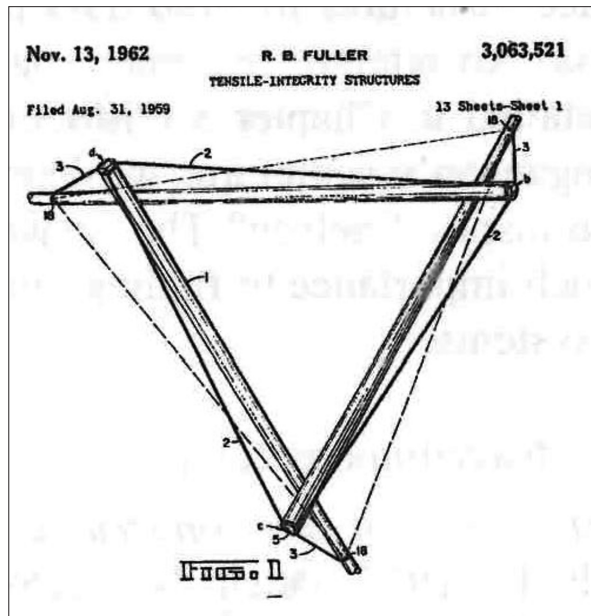


Figura 7. Il brevetto di Fuller, 1962.

Il brevetto di Snelson *Continuous tension, discontinuous compression structures* risale al febbraio 1965 (N. 3169611) ed è riportato in Figura 8.

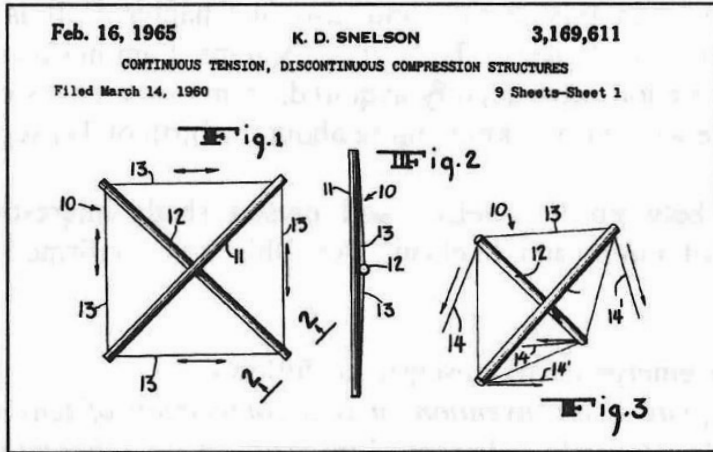


Figura 8. Il brevetto di Fuller, 1965.

Con questa invenzione, Snelson indaga i principi base della teoria tensegrale, approfondendo il loro aspetto artistico. Invece Fuller ed Emmerich studiano applicazioni con l'utilizzo di modelli geometrici e matematici, ma i loro studi si limitarono alle sole modellizzazioni teoriche.

Si deve a loro la prima classificazione delle principali famiglie e di tipologie di strutture tensegrali:

- torri e cupole tensegrali;
- icosaedro tensegrale a sei aste isolate;
- tetraedro tensegrale a sei aste isolate.

Gli studi sui sistemi tensegrali avranno sviluppi differenti.

Snelson proseguì nello studio del principio tensegrale applicandolo alla sua produzione artistica e compositiva, costruendo forme complesse con l'impiego di differenti materiali con diverse tecniche di assemblaggio.

Fuller, depositato il brevetto nel 1962, approfondì lo studio di cupole tensegrali di grandi dimensioni. Le cupole ideate non avevano

però un'adeguata rigidezza per consentirne l'applicazione nel campo architettonico. Per questo motivo ripiegò nello studio di una struttura geodetica per la realizzazione del padiglione americano all'*Expo di Montreal*⁽³⁾ nel 1967, Figura 9.



Figura 9. Padiglione americano all'Expo di Montreal, 1967.

Dopo questa esperienza, Fuller proseguì nella sua ricerca, concretizzandosi in numerosi casi di studio sul sistema costruttivo tensegrale [5], [16].

La tecnologia tensegrale ha da sempre suscitato un notevole interesse in particolare da parte degli artisti (opere scultoree). Gli studi sulle diverse configurazioni geometriche delle strutture tensegrali sono proseguite ancora per diversi decenni, ai lavori di Emmerich [17] e Fuller [5], si aggiunsero quelli di Pugh [18] in cui il poliedro è la geometria su cui si sono basati questi studi.

I primi approcci sullo studio del comportamento meccanico delle strutture tensegrali sono rintracciabili nei lavori di Calladine [19], Pellegrino [20], Roth and Whiteley [21].

(3) L'Expo 1967 di Montreal si svolse dal 28 aprile al 27 ottobre 1967. L'evento, il cui tema fu "Terre des Hommes", vide la partecipazione di 62 paesi. Tra i padiglioni il più celebre fu quello degli USA, realizzato su progetto di Fuller. La famosa cupola geodetica sarà nota come Biosfera.