

TENSEGRITY: DA GIOCO PER LA MENTE A NUOVA TECNOLOGIA COSTRUTTIVA

TENSEGRITY: FROM FOOD FOR THOUGHT TO A NEW BUILDING TECHNOLOGY

Attilio Pizzigoni, Giuseppe Ruscica
Università degli Studi di Bergamo
Dipartimento di Ingegneria
Dalmine (BG), Italia
attilio.pizzigoni@unibg.it, giuseppe.ruscica@unibg.it

ABSTRACT

This study demonstrates that a design based on particular tensegrity structures can be a viable alternative for the architectural challenge of innovative design. Tensegrity structures are very lightweight, demountable, safe, suitable for temporary constructions like those of great durability, achievable with newest materials in terms of efficiency of performance and sustainability, and therefore also the cheapest in relation to the achieved results and the aesthetic quality that we can get by them. Here are presented two architectural designs whose structural concept is based on two famous tensegrity shapes: the Fuller's tensegrity mast of 1959 and the T4, the basic shape of the spatial tensegrity structures consisting in 4 bars and 12 cables.

SOMMARIO

Questo studio dimostra che una progettazione basata sulle strutture tensegrali può essere una valida proposta di design innovativo. Le strutture tensegrali sono innanzitutto molto leggere, sono smontabili e rimontabili, sono sicure, adatte per strutture temporanee come quelle di lunga durabilità. Esse sono realizzabili con i materiali più nuovi dal punto di vista dell'efficienza prestazionale, e quindi anche economiche in relazione al loro peso e ai risultati conseguiti e, non da ultimo per la loro qualità estetica. Qui vengono presentati due progetti architettonici il cui concetto strutturale è generato su due famose strutture tensegrali: la colonna tensegrale di Buckminster Fuller presentata al MOMA nel 1959 e il cosiddetto "T4", il modulo spaziale di base della tensegrity costituito da 4 aste compresse e 12 cavi tesi.

1 INTRODUZIONE

Presentiamo qui due progetti redatti nel corso dell'ultimo anno (2012-2013) e redatti da un gruppo costituito e guidato da Attilio Pizzigoni, formatosi all'interno del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Bergamo.

Il primo progetto è stato elaborato per un concorso a inviti bandito dalla Curia di Bergamo per la realizzazione di una nuova Chiesa nel Comune di Cavernago. Il secondo progetto è stato

invece presentato al Concorso Internazionale per una Passerella pedonale En Dorigny bandito dalla Municipalità di Chavannes-près-Renens (CH).

L'obiettivo primario che accomuna questi due progetti è stato quello di verificare l'applicabilità pratica e costruttiva delle strutture tensegrali nella progettazione di una architettura significativa: un edificio utilizzabile e una infrastruttura. Ci sollecitava in questo l'aver troppe volte constatato come spesso le strutture tensegrali non siano 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.

Il mondo dell'ingegneria e dell'architettura è andato oggi ben oltre quella compiacente attenzione con cui esso nei decenni passati ha guardato alle tensegrity come puri giochi per la mente, *food for thought*, per citare la definizione che ne diede Jörg Schlaich, il grande ingegnere di Stoccarda, che pure progettò una delle opere più note realizzate con tale tecnologia: appunto la Tensegrity Tower di Rostock. Oggi il loro studio è stato inserito in alcuni corsi universitari, vengono presentate in apposite sessioni dei convegni specializzati in strutture, ma soprattutto si vanno moltiplicando esempi di realizzazioni che anche quando non sono perfettamente rispondenti alla dizione canonica di tensegrity, come le definirono Buckminster Fuller, David Emmerich o Kenneth Snelson, contribuiscono a diffonderne la conoscenza, vuoi per il grande fascino della loro immagine (valga per tutti il recente Kurilpa Bridge a Brisbane in Australia), vuoi per la leggerezza e le grandi luci raggiungibili (vedi il Georgia Dome ad Atlanta).

Siamo convinti che questa doppia potenzialità delle tensegrity, sia dal punto di vista simbolico e rappresentativo, come da quello tecnico ed economico, proprio per la loro leggerezza, adattabilità e facilità di montaggio, le renderà sempre più attuali e presenti nel panorama costruttivo e nella formazione professionale delle nuove generazioni.

Oggi viviamo inoltre un passaggio tecnologico legato alla produzione di nuovi materiali che forniscono altissime prestazioni di resistenza, sia a compressione che a trazione, e che, proprio per questo, permettono e favoriranno sempre più la possibilità di realizzare strutture più leggere ma anche più resistenti e durevoli.

L'ingegneria dell'avvenire si esprimerà realizzando monumenti alla leggerezza, capaci di soddisfare livelli di efficienza strutturale e di durabilità del tutto impensabili fino ad oggi. Il massimo dell'efficienza con il minimo dei materiali; questa è la parola chiave che permetterà di costruire edifici in grado di resistere alle più violente scosse sismiche e ai più drammatici disastri ambientali. Edifici che dovranno necessariamente assumere principi compositivi del tutto differenti da quelli adottati fino ad oggi, edifici la cui concezione formale e strutturale enfatizzerà i concetti di adattabilità, di indeterminatezza, di complessità, di reversibilità. E questi monumenti del futuro saranno costituiti da coperture sempre più ampie, da involucri protettivi capaci di creare microclimi abitabili anche nelle condizioni ambientali peggiori. Un giorno forse potremo vivere in paradisi artificiali con climi controllati artificialmente in una sorta di eterna primavera generata da fonti rigenerabili come il sole e il vento, ma i monumenti che come ingegneri saremo chiamati a pensare e a progettare già in un futuro più prossimo, non saranno soltanto cupole geodetiche e grandi coperture, ma anche le infrastrutture, le antenne, i padiglioni temporanei e smontabili, e soprattutto i ponti: carichi di valori simbolici in quanto luoghi di connessione e di comunicazione, capaci di connettere tra loro spazi diversi.

2 «VERTÈBRE»: LA PASSERELLA PEDONALE – TENSEGRITY MAST

Il progetto presentato in questo documento si ispira al *Tensegrity Mast* presentato da Buckminster Fuller per l'esposizione al MOMA del settembre 1959 [3]. Per quanto a nostra conoscenza, il nostro è il primo progetto in cui viene applicata questa particolare configurazione tensegrale per realizzare una complessa architettura urbana. La struttura è ottenuta assemblando una serie di otto tetraedri (Fig. 1). Ogni tetraedro costituisce la cellula di base del si-

stema, ed è composto da quattro aste e sei cavi [3]. La struttura nel suo insieme richiama la forma di una colonna vertebrale umana da cui il nome che abbiamo dato al progetto.

Il fulleriano *Tensegrity Mast* è generalmente inteso e rappresentato come una struttura verticale, mentre qui viene utilizzato orizzontalmente e costituisce la struttura principale portante del ponte pedonale. Per adattare la concezione di Fuller alla finalità funzionale di questo progetto, sono state applicate alcune modifiche geometriche, sia riguardo alle lunghezze delle aste e dei cavi, sia modificando gli angoli formati tra questi elementi, e regolando la distanza tra le celle per migliorarne la stabilità.

I comportamenti statici e dinamici della struttura devono essere analizzati tenendo conto dei carichi permanenti e variabili e, come per qualsiasi sistema tensegrity, definendo uno stato di presollecitazione adeguato. Considerando la sola cella tetraedrica di base, diverse varianti sono possibili, due delle quali sono mostrate in Fig. 1 (a destra). Le aste compresse vengono collegate tra loro mediante cerniere sferiche o da giunti rigidi. Nel secondo caso il concetto di struttura tensegrale si modifica passando da un sistema di aste e cavi a quello di un sistema di corpi rigidi e cavi. In questo campo hanno fatto scuola particolari ricerche come quelle di Pellegrino [6] sulle valutazioni e sui meccanismi degli stati di sollecitazione che definiscono la rigidità e la stabilità del sistema.

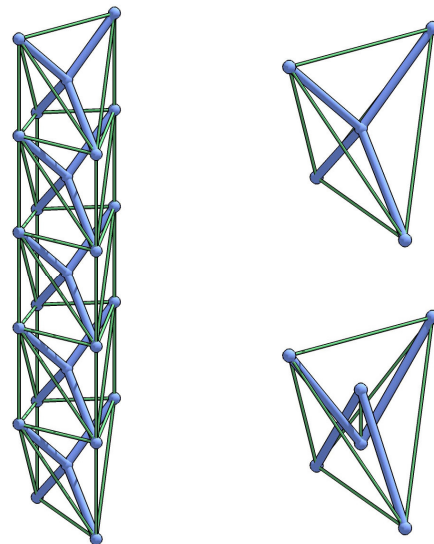


Fig. 1: Il Tensegrity Mast proposto da R. Buckminster Fuller e due versioni degli otto moduli tetraedrici che compongono la struttura



Fig. 2: La proposta architettonica per la passerella tensegrale di En Dorigny (2013)

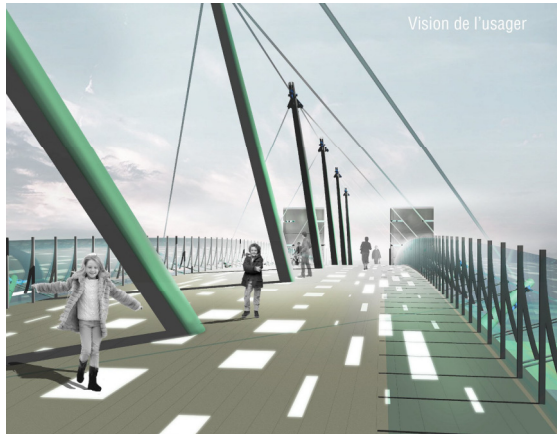


Fig. 3: Vista sul deck

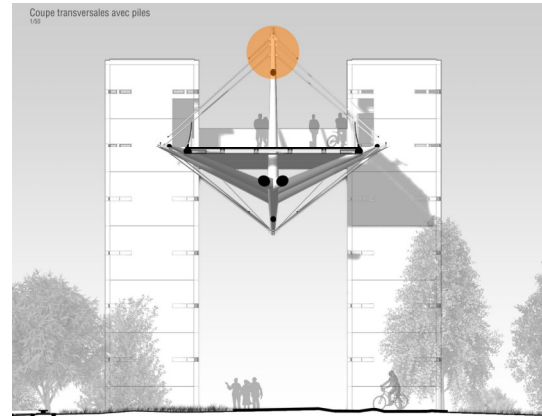


Fig. 4: Sezione trasversale sulle pile

Details

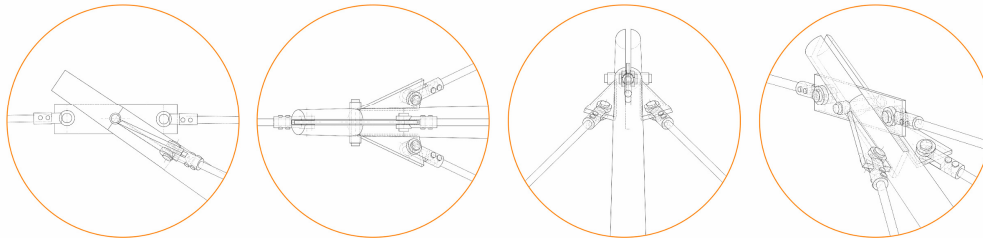


Fig. 5: Dettagli dei giunti aste/cavi

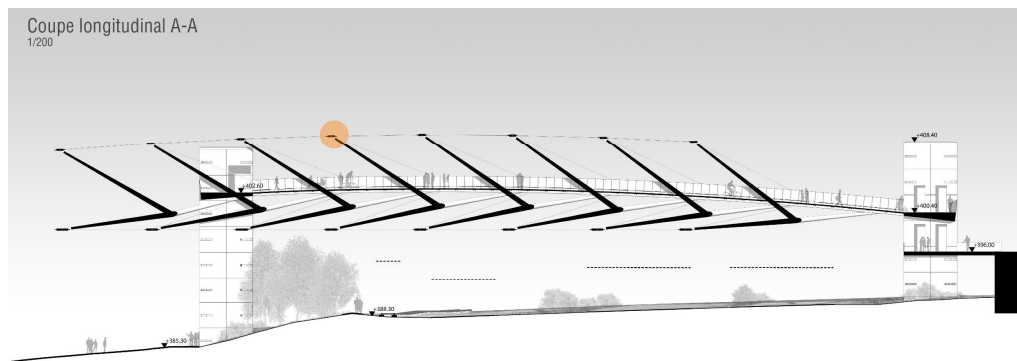


Fig. 6: Sezione longitudinale

2.1 Leggerezza e innovazione

Non ha senso parlare di innovazione tecnologica se non riferendoci a una maggiore efficienza e controllo dei costi. La leggerezza è un prerequisito per tali obiettivi. Basta dire che è proprio la leggerezza che permette a una struttura come questa di poter essere messa in opera senza dover fermare il traffico. Il pre-montaggio della struttura può infatti essere realizzato con l'uso di una gru che la sostiene verticalmente durante l'assemblaggio, per poi appoggiarla sui due cardini portanti ed infine accompagnarla, con l'aiuto di una seconda gru, fino all'alloggiamento tra le due torri sul lato opposto dell'autostrada. Le finiture e la costruzione del

deck vengono realizzate in seguito, sulla struttura già fissata e adeguatamente messa in sicurezza da una rete anticaduta.

3 «SKENOO»: LA CHIESA - T4 IL MODULO BASE TENSEGRITY

Skenoo (σκηνώω) parola di Giovanni (1-14). Parola che significa il venire ad abitare di Dio tra gli uomini, piantando una tenda. La 'tenda' esprime una simbologia diffusa e ricorrente nella tipologia delle chiese, (valga per tutti l'esempio di Ronchamp), ma anche della casa, dell'abitare. L'idea progettuale nasce da qui: dall'ipotesi che l'immagine biblica della chiesa-tenda possa trovare la forma più convincente proprio nelle suggestive geometrie di una struttura tensegrale.

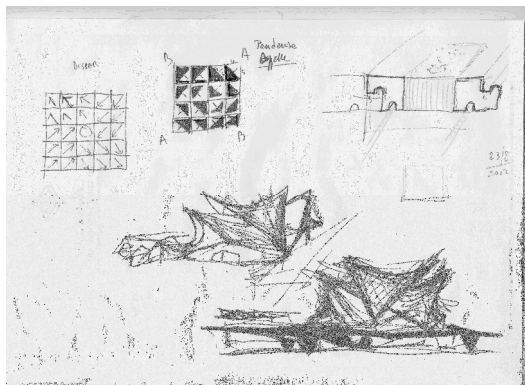


Fig. 7: Bozzetti di studio



Fig. 8: Modello di studio

La chiesa presenta un sistema di copertura avente caratteristiche innovative. Si tratta infatti di una struttura tensegrale, composta da quattro elementi compressi e 12 elementi tesi, in costante equilibrio reciproco. Variando la disposizione e la lunghezza di questi elementi la struttura si presta ad essere utilizzata in forme anche assai diverse. Ad esempio le aste compresse definiscono due quadrilateri sghembi che sottendono due tele sovrapposte; oppure una sola vela rettangolare fa da copertura dell'aula religiosa mentre le altre sue aste tese vengono lasciate libere a svolgere la loro mera funzione stabilizzatrice. Il progetto presentato ha voluto mantenere aperte queste possibilità indicando diverse varianti, pur conservando l'impianto strutturale del modulo base T4. I quattro elementi compressi possono inoltre differenziarsi tra loro per dimensioni, soprattutto in lunghezza, in modo da organizzare uno spazio coperto variabile e come meglio si adatti al layout funzionale; oppure possono fare da sostegno a due tende a doppia curvatura di materiale traslucido o semitrasparente, tra loro sovrapposte, che producono all'interno giochi di trasparenze e di ombreggiamenti. Nella soluzione in cui la copertura viene sostenuta da due soli puntoni, gli altri due oltre alla loro funzione strutturale possono essere utilizzati come strumenti di illuminazione, di allestimento o anche simbolici incrociandosi ad esempio nel segno esterno di una grande croce. Si può capire, dai disegni allegati, che questo progetto offre possibilità assai maggiori di quanto non traspaia dalla soluzione individuata come proposta per il concorso. Quanto alle condizioni di equilibrio di questa struttura e la sua adattabilità a diverse forme, la suggestione progettuale ci è stata fornita inizialmente dagli studi condotti su di essa da Zhang, Guest, Ohsaki e Connelly [10]. Va reso merito a questi studi di aver individuato possibili organizzazioni del modulo a quattro aste con sistemi di cavi tesi in fogge diverse rispetto ai noti schemi delle tensegrity tradizionali: sono schemi completamente nuovi, in grado di agevolare aspetti inattesi di automontabilità della struttura e cambiamento di forma della struttura base, con possibili e suggestivi adattamenti a diverse dimensioni e organizzazioni spaziali del modulo base (Fig. 9).

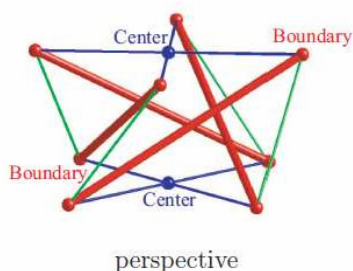


Fig. 9: Zhang e altri [10]: struttura tensegrale a stella con quattro puntoni

3.1 Il contributo strutturale della copertura

Nel progetto presentato la vela di copertura è stata pensata come parte integrante della struttura. Infatti pur essendo costituita da una superficie rigata a doppia curvatura con una maglia incrociata di doppi cavi postesi e pannelli traslucidi (sull'esempio e riferimento delle vele di Frei Otto a Monaco 1970, ma utilizzando, al posto del policarbonato, pannelli di cemento I-Light prodotti da Italcementi), ancorati lungo i puntoni tubolari compressi in una direzione e conglobante le aste tese nell'altra. La forma e il materiale utilizzato per la progettazione di tale copertura si sono rivelati adatti a fornire un contributo positivo alla statica della struttura in quanto la vela, costituita da una rete di cavi stabilizzante secondo una superficie a doppia curvatura, rappresenta un sottosistema strutturale secondario collaborante con il sistema tensoriale dei cavi. Inoltre i meccanismi di autotensione necessari a raggiungere l'equilibrio dell'insieme sono stati utilizzati per pensare questa struttura come automontabile, in grado cioè di essere eretta semplicemente dallo scorrimento dei cavi che nello stesso tempo in cui vengono tensionati, mediante l'uso di martinetti per conferire l'equilibrio statico alla tensegrity, sollevano anche e danno forma all'intero edificio.

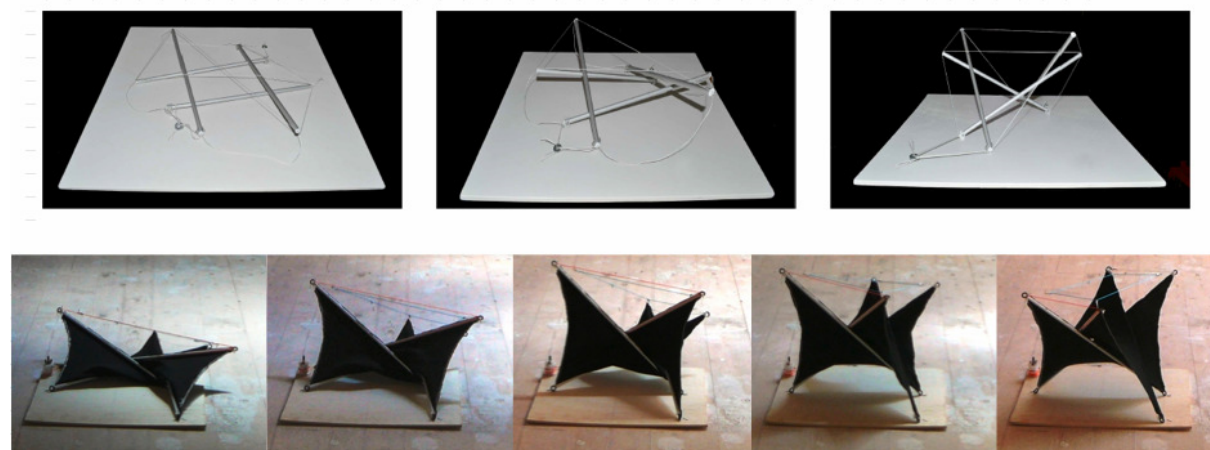


Fig. 10: Studi sulle modalità di sollevamento della struttura e del sistema di copertura

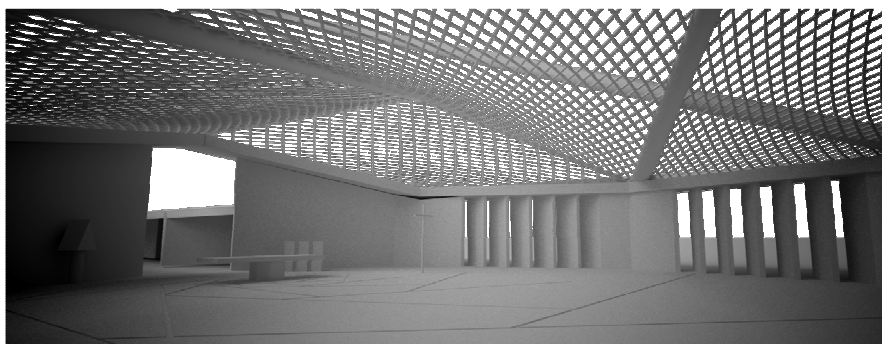


Fig. 11: Vista interna del modello 3D

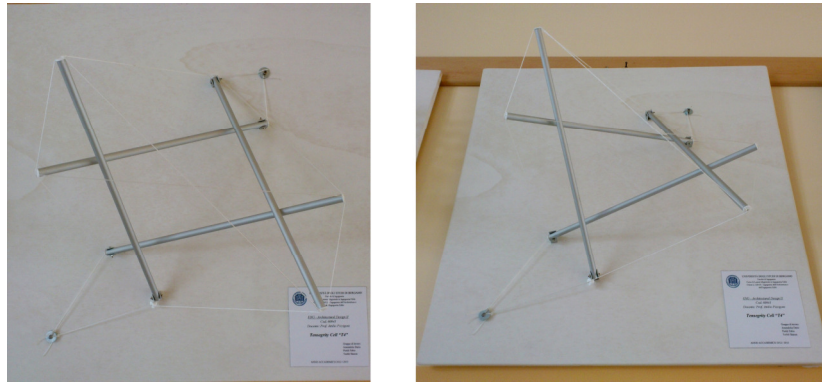


Fig. 12: Modello fisico della struttura elaborato dagli studenti

4 CONCLUSIONI

Questo studio dimostra che una progettazione architettonica che assuma come fondamento concettuale le strutture tensegrali rappresenta una valida risposta alla sfida progettuale della contemporaneità, sia sul piano dell'immagine sia perché esse richiedono l'utilizzo e la ricerca di materiali innovativi che uniscono il massimo dell'efficienza al minimo consumo di energia. In questo senso la leggerezza, che costituisce il carattere più significativo delle tensegrity, costituisce un valore che è sempre stato al centro della ricerca e del progresso tecnologico in tutti i campi. La tecnologia dei cavi in acciaio armonico ad alta resistenza, l'uso di materiali superleggeri, come il kevlar e le aste in fibra di carbonio, fanno ormai parte della produzione standardizzata.

Anche nelle costruzioni il futuro della tecnologia è legato al raggiungimento di obiettivi di efficienza e di efficacia che solo la leggerezza può esprimere. Questo è ciò che ci rivelano le strutture tensegrali con la meraviglia delle loro forme.

La natura stessa sembra riflettersi nel fascino di queste strutture superleggere che simulano persino i processi biologici: la crescita per autosimilarità dei moduli costruttivi, il parallelismo che evocano con il mondo naturale delle piante, degli animali e con quello inorganico dei cristalli.

Eraclito di Efeso scriveva che il mondo si riflette nell'armonia di tensioni opposte: è una verità che traspare dalle cose e in tutti gli aspetti della vita, e le strutture tensegrali sembrano enfatizzarlo.

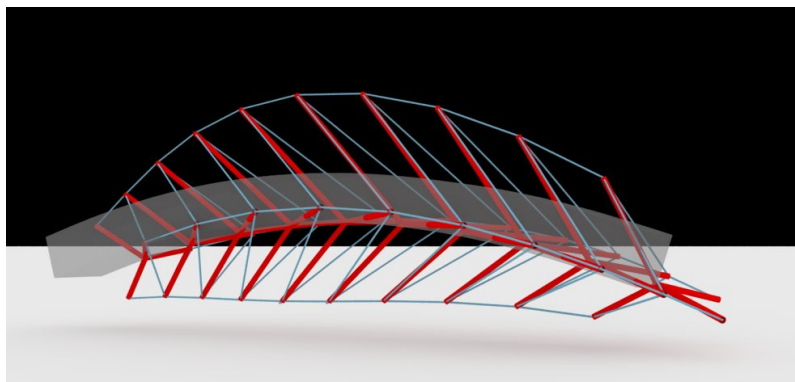


Fig. 13: Elaborazione parametrica del modello con Rhino+Grasshopper (Vittorio Paris)

RINGRAZIAMENTI

Il primo riconoscimento va a Vittorio Paris e a Barbara Ventura, che hanno concretamente collaborato alla redazione dei progetti per la Chiesa di Cavernago (ottobre 2012) e della Passerella pedonale di En Dorigny-CH (gennaio 2013). Un particolare ringraziamento va ad An-

drea Micheletti, che da anni ha aiutato con i suoi consigli queste ricerche sulle tensegrity che andiamo conducendo all'Università di Bergamo. Ma l'avanzamento di questi nostri studi è avvenuto soprattutto nell'unità tra didattica e ricerca, realizzata grazie al lavoro degli studenti che negli ultimi anni hanno svolto tesi e workshop sui temi delle strutture superleggere.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Connelly R., *Tensegrity structures: why are they stable?*, in Rigidità Theory and Applications, Thorpe and Duxbury (eds.), Kluwer/Plenum Publishers, 1999, pp. 47-54.
- [2] Connelly R., Terrel M., *Globally rigid symmetric tensegrities*. Structural Topology No. 21 (1995), pp. 59-77.
- [3] Fuller R.B., *Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking*, MacMillan Publishing Company, 1975.
- [4] Gough M., *Backyard Landing: Three Structures by Buckminster Fuller*, In New Views on R. Buckminster Fuller, Chu Hsaio-Yun and Trujillo Robert Eds, Stanford University Press, 2009.
- [5] Motro R., *Tensegrity: Structural Systems for the Future*. London, UK. Kogan Page Science, 2003.
- [6] Pellegrino S., Calladine C.R., *Matrix analysis of statically and kinematically indeterminate frameworks*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 22 (1986), No. 4, pp. 409-428.
- [7] Ruscica G., Micheletti A., Pizzigoni A., *Tensegrity: from didactical tasks to innovative marketing proposals*, in Proceedings of International Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS): Spatial Structures-Temporary and Permanent, Shanghai, China, China Architecture & Building Press, 2010, pp. 2405-2415.
- [8] Pizzigoni A., *Spazio+Forma+Struttura*, Introduzione al Catalogo della mostra di progetti didattici alla Sala Carbonari del Comune di Seriate (BG), Mostra n. 126, novembre 2012.
- [9] Skelton R.E., de Oliveira M.C., *Tensegrity systems*, Springer, New York, 2009.
- [10] Zhang J., Guest S., Ohsaki M., Connelly R., *Multi-stable Star-shaped Tensegrity Structures*, in Taller, Longer, Lighter: meeting growing demand with limited resources: IABSE-IASS Symposium 2011, London, Hemming Group Ltd., 2011.

PAROLE CHIAVE

Tensegrity structures; passerella pedonale; strutture a cambiamento di forma; applicazioni architettoniche delle strutture tensegrali; strutture automontanti di copertura