

# Tensegrity : un concetto strutturale in continua evoluzione

Autor(en): **Paronesso, Antonio / Passera, Rinaldo**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning**

Band (Jahr): - **(2002)**

Heft 6

PDF erstellt am: **09.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-132473>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Tensegrity: un concetto strutturale in continua evoluzione

Antonio Paronesso,  
Rinaldo Passera  
Passera&Pedretti - Consulting Engineers

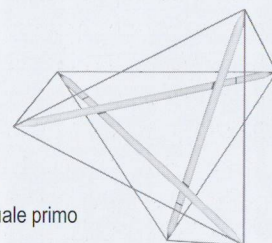
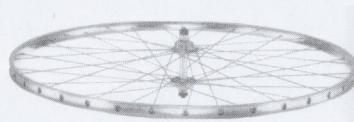
## 1. Introduzione

Il concetto di Tensegrity fu introdotto da R. B. Fuller negli anni Cinquanta.

Secondo la definizione classica fornita dal proprio ideatore, un sistema Tensegrity è individuato allorché il risultato del collegamento fra un insieme discontinuo d'elementi in compressione (per esempio dei puntoni) e un insieme continuo d'elementi in trazione (per esempio dei cavi) è un volume stabile dello spazio<sup>1</sup>.

Fuller individua nella ruota di bicicletta (fig. 1) con i raggi in trazione e il mozzo in compressione il primo esempio di Tensegrity<sup>2</sup>.

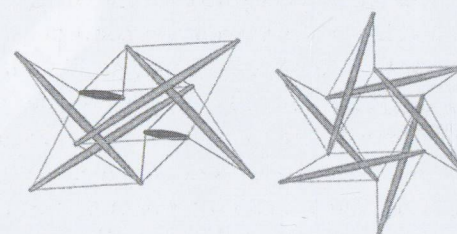
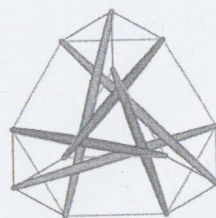
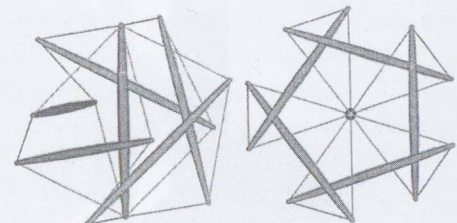
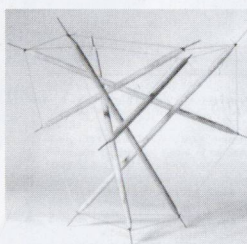
La figura 2 illustra la prima cellula elementare del sistema Tensegrity ottenuta dal Fuller collegando le estremità di tre puntoni rigidi non in contatto fra loro con nove cavi in tensione. Accanto alla definizione classica sono sorte molte altre caratterizzazioni per lo più basate sulle proprietà esibite da questo sistema strutturale. Ad esempio, la condizione di non contatto fra gli elementi compressi è spesso associata al concetto di isole di compressione (puntoni compressi isolati) in un mare di tensione (sistema continuo di cavi). Il fatto che in una Tensegrity per equilibrare le tensioni nei cavi sono sufficienti le sole compressioni nei puntoni ha indotto gli studiosi ad introdurre per esse la definizione di reti di cavi autostabili *free-standing cable networks* che, a differenza delle tensostrutture, non richiedono per la loro stabilizzazione alcun cavo d'ancoraggio al suolo. Derivato quale contrazione delle parole inglesi *tensile integrity* (tensione integrale), il termine Tensegrity indica quindi quella particolare categoria di sistemi nei quali l'equilibrio fra forze esterne e forze interne è realizzato grazie alla nascita di tensioni interne di pura compressione in porzioni discontinue (non interconnesse) del sistema e di tensioni interne di pura trazione nella restante porzione continua (interconnessa) del sistema. Fin dalla loro prima apparizione le Tensegrities hanno destato un forte interesse sia dal punto di vista scientifico sia dal punto di vista artistico. La non immediata comprensione del loro funzionamento statico e



1 - La ruota di bicicletta indicata da R. B. Fuller quale primo esempio di Tensegrity

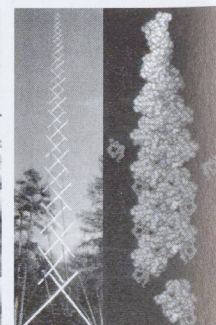
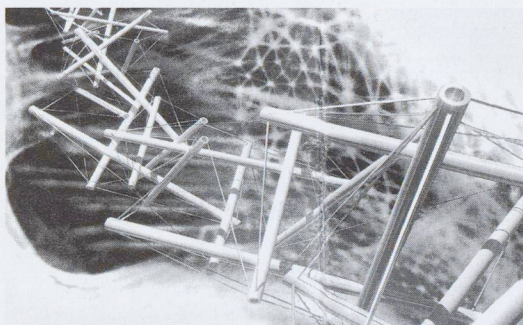
Fonte: J. Krausse and C. Lichtenstein, *Your Private Sky*<sup>2</sup>

2 - Prima cellula elementare del sistema Tensegrity ideata da R. B. Fuller



3 - Alcuni esempi di cellule base del sistema Tensegrity

Fonte: R. Motro, A. Smaili and O. Foucher, *Form controlled for tensegrity formfinding Snelson and Emmerich examples*<sup>3</sup>



4.

5.

4 - Cytoscheletro di cellula vivente comparato ad una scultura dell'artista K. Snelson

5 - Modello molecolare di un microfilamento di cytoscheletro e torre di Tensegrity di K. S.

Fonte: D. Ingber, *L'architecture de la vie. Pour la Science* no. 245<sup>4</sup>



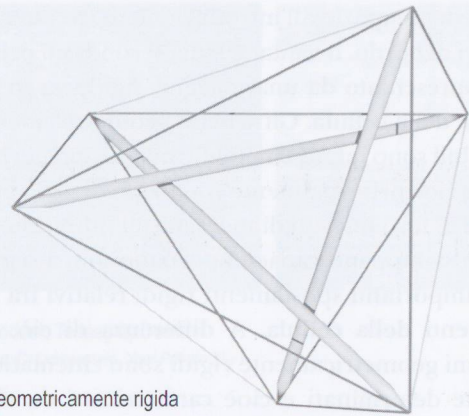
l'effetto di trasparenza e leggerezza creato dal loro particolare aspetto estetico hanno sedotto molti ricercatori ed artisti che nel tempo ne hanno studiato il comportamento e ideato nuove forme sempre più complesse ed attraenti (fig. 3<sup>a</sup>).

Negli ultimi tempi un interesse sempre crescente verso questo tipo di strutture è stato manifestato anche nel settore della biologia molecolare. Recenti studi hanno dimostrato che le Tensegrity possono essere assunte quali modelli matematici capaci di rappresentare le forze di trazione e compressione che sono alla base dei principi d'organizzazione ed aggregazione delle cellule di un organismo vivente.

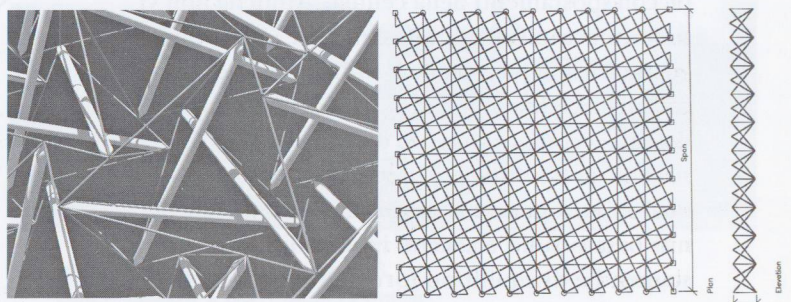
Nelle figure 4 e 5<sup>a</sup>, il citoscheletro di una cellula vivente formato da filamenti e microtubi fra loro collegati e rispettivamente il modello molecolare di un microfilamento di citoscheletro sono paragonati a sculture dell'artista Kenneth Snelson formate da cellule base del sistema Tensegrity.

## 2. L'evoluzione del concetto

Dal punto di vista strutturale i sistemi Tensegrity sono costituiti da un reticolo d'elementi lineari fra loro collegati con cerniere sferiche nel quale un sistema continuo (connesso) di cavi o tiranti in trazione è preteso contro un sistema discontinuo (disconnesso) di puntoni in compressione. Più in generale, questi sistemi possono essere ottenuti partendo da cellule base che una volta collegate verificano la precedente condizione costitutiva. Nel concepire una Tensegrity, il numero di puntoni introdotti dovrebbe essere sempre ridotto al minimo al fine di garantire in questi elementi uno stato di compressione per qualsiasi carico applicato. Ciò è in accordo con quanto asserito da Fuller e da Emmerich che considerano la Tensegrity un'ottima forma strutturale che non presenta sprechi di materia poiché esente da esuberi di materiale in compressione. Nelle intenzioni dei cultori delle Tensegrity dovrebbe essere possibile estendere a questo tipo di strutture i campi e la scala delle applicazioni che oggi sono di prerogativa delle tensostrutture, e trarre così vantaggio dall'eliminazione dei costosi ancoraggi al suolo che sono necessari per la stabilizzazione di quest'ultime. Nel perseguire quest'obiettivo i ricercatori del settore hanno sviluppato nuove cellule e nuovi schemi d'assemblaggio che tendono sempre più a migliorare l'efficienza funzionale degli elementi presenti in una Tensegrity e a ridurre quindi il peso della struttura. In termini di cellule base si è passati da schemi geometricamente flessibili come quello di fig. 2, a schemi geometricamente rigidi come quello di fig. 6 ottenuto dal



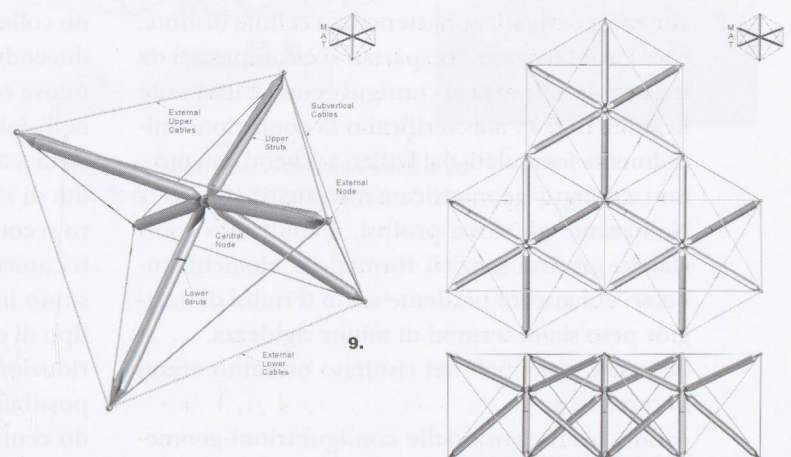
6 – Cellula base geometricamente rigida



7 – Collegamento a puntoni non contigui geometricamente flessibile

8 – Collegamento a puntoni contigui geometricamente rigido

Fonte: B. B. Wang, L. Yan-Yun, *From Tensegrity Grids to Cable-strut Grids* <sup>5</sup>



9 – Cellula base del sistema Tensegrity con nodo centrale

10 – Collegamento geometricamente rigido con puntoni contigui

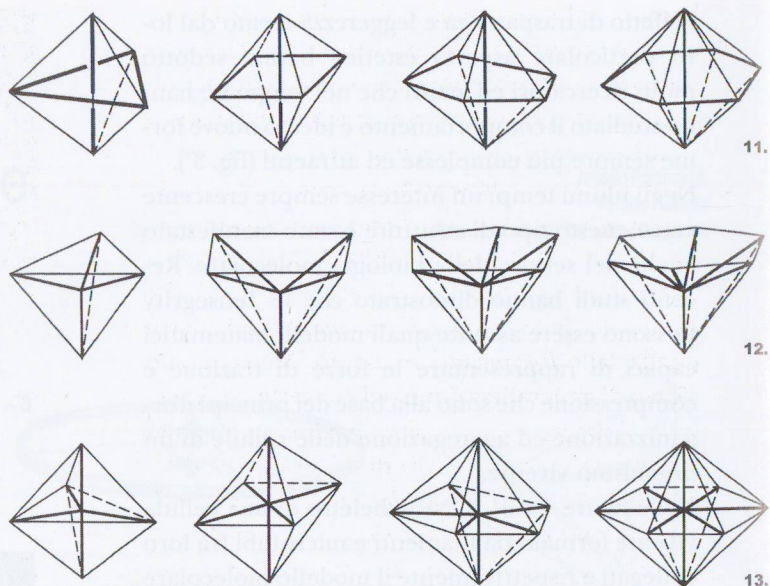


precedente grazie all'introduzione di tre ulteriori cavi di bordo. Il vantaggio dei secondi sui primi è rappresentato da una maggior rigidità strutturale della cellula. Gli schemi geometricamente flessibili sono infatti cinematicamente indeterminati e cioè principalmente condizionati dalla presenza al loro interno di meccanismi infinitesimali che sviluppano capacità portante solo a seguito d'importanti spostamenti rigidi relativi fra gli elementi della cellula. A differenza di ciò, gli schemi geometricamente rigidi sono cinematicamente determinati e cioè caratterizzati da uno sviluppo della rigidità e quindi della capacità portante basato sulle sole deformazioni elastiche degli elementi che in generale sono associate a piccoli spostamenti della cellula. Affinché non vi siano meccanismi infinitesimali in uno schema geometricamente rigido è sufficiente che tutti i cavi della cellula siano in trazione. In queste condizioni, il comportamento del sistema può essere studiato con sufficiente precisione utilizzando un qualsiasi programma strutturale agli elementi finiti basato sulle classiche ipotesi di piccoli spostamenti e di equilibrio formulato nella configurazione indeformata. Una prima evoluzione del concetto strutturale di Tensegrity si è avuta quale risposta al problema di come collegare fra loro in modo efficiente le cellule base del sistema. Dagli studi effettuati emergeva con chiarezza che al fine d'ottenere strutture sufficientemente rigide era necessario rilasciare la condizione di assenza di contatto fra gli elementi compressi del sistema almeno per quelli appartenenti a cellule distinte. Nel settore dei graticci spaziali si è così passati da schemi a puntoni non contigui geometricamente flessibili (fig. 7), che verificano la condizione inizialmente formulata dal Fuller, a schemi con puntoni contigui geometricamente rigidi (fig. 8, <sup>5</sup>). Nonostante gli sforzi profusi, il confronto con i classici graticci spaziali formati da elementi tubolari era ancora perdente sia in termini di maggior peso sia in termini di minor rigidità.

Le cause principali del risultato ottenuto erano imputabili a:

- ridotta efficienza delle configurazioni geometriche del collegamento fra cellule;
- eccessiva densità dei puntoni;
- ridotta altezza strutturale dei puntoni causata dalla loro inclinazione;
- eccessiva lunghezza dei puntoni causata dalla loro inclinazione.

Nel caso di schemi con puntoni non contigui oltre alle precedenti cause interveniva anche il problema d'introdurre nel sistema un elevato livello di pretensione necessario per incrementare la rigi-



11 - Cellule base T.C.S., alias Tensegric, alias RPS, alias Moduli bipiramidali  
 12 - Cellule base CPs  
 13 - Cellule base DPps

Fonte: B. B. Wang, L. Yan -Yun, *From Tensegrity Grids to Cable-strut Grids* <sup>5</sup>

dezza della struttura. Una seconda evoluzione si è avuta rilasciando l'ipotesi di non contatto anche per puntoni appartenenti alla stessa cellula base. Ad esempio, i tre puntoni della cellula di fig. 6 sono collegati fra loro come indicato in fig. 9 introducendo un ulteriore nodo centrale<sup>6</sup>. Queste nuove cellule sviluppate da Passera & Pedretti SA nell'ambito del mandato conferitogli dalla società EXPO.01 per lo studio preliminare di fattibilità di strutture Tensegrity, sono collegate fra loro secondo schemi con puntoni contigui geometricamente rigidi come ad esempio quello illustrato in fig. 10<sup>6</sup>. Wang denomina<sup>5</sup> questo nuovo tipo di cellule Anti-Prism APS. In questi schemi la riduzione della lunghezza libera dei puntoni e la possibilità di variare la posizione relativa del nodo centrale rispetto ai piani d'appartenenza dei cavi orizzontali superiori ed inferiori del graticcio spaziale si traduce in una riduzione di peso di circa il 30% rispetto ai classici graticci spaziali formati da soli profili tubolari. Un'ulteriore vantaggio associato alla precedente soluzione è la non assoluta necessità d'introdurre nel sistema uno stato di pretensione al fine di garantirne la stabilità e la sufficiente rigidità. Nell'ambito del nuovo concetto di Tensegrity che consente il contatto dei puntoni sia all'interno della singola cellula

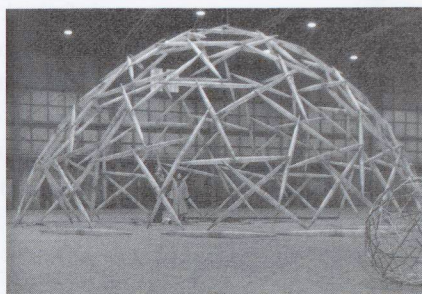


base sia nel collegamento fra cellule, accanto al precedente esempio sono sorti nuovi tipi di moduli base concepiti con lo scopo di migliorare ulteriormente l'efficienza strutturale del sistema e ridurre la complessità in vista di una sempre più semplice applicazione tecnica. Sono così sorte le nuove famiglie delle *Truss Structure Stabilized by Cable Tension* T.C.S.<sup>7</sup>, alias *Tesegric*<sup>8</sup>, alias *Reciprocal Prism Simplexes* RPS<sup>5</sup>, alias *Moduli bipiramidali*<sup>9</sup>, fig. 11, quella delle *crystal-cell pyramid* CPS<sup>5</sup>, fig. 12 e quella delle *di-pyramids* DPS<sup>5</sup>, fig. 13. Wang<sup>5</sup> nel suo sforzo di generalizzazione del concetto di Tensegrity classifica tutti i tipi di moduli sin qui descritti (compresa la cellula di fig. 2) sotto la categoria strutturale dei *Cable-strut simplex* ridefinendo di fatto la tipologia della *String Strut Structure* S3 coniata in precedenza da M. Saitoh<sup>8</sup> per questo tipo di strutture. Inoltre raccoglie i tipi APS, RPS, CPS e DPS nella sottocategoria dei *strut in contact in both simplex and grids*.

In<sup>5</sup> sono descritte riduzioni di peso rispetto ai graticci spaziali formati da soli tubolari dell'ordine del 40% per il tipo RPS e dell'ordine del 50% per il tipo CPS entrambi ottenute senza alcuna introduzione della pretensione nel sistema. Inoltre, sempre in<sup>5</sup>, è intravista la possibilità di realizzare graticci di tipo DPS con luci di 200 metri e peso unitario non superiore a 30-40 kg/m<sup>2</sup>.

### 3. Applicazioni tecniche del concetto Tensegrity

È importante sottolineare che a fronte dei molti studi consacrati alle Tensegrity e all'evoluzione del loro concetto strutturale, gli esempi d'applicazioni tecniche rimangono pochi e per lo più limitati al settore delle coperture leggere di forma circolare che utilizzano le membrane quale elemento di chiusura orizzontale. Oltre al famoso modello di *Geodesic Tensegrity Dome* di R. B. Fuller, fig. 14<sup>2</sup>, è importante citare l'*Aspension Dome*, brevettato dallo stesso Fuller nel 1964 e sviluppato e realizzato da D. Geiger nel 1986 con il nome di *Cable Dome*, l'*Hyper Dome* in Georgia (1992), fig. 15, di M. Levy e il *Tension Strut Dome* di M. Saitoh costruito nel 1991 ad Amagi in Giappone. Sino al 1999 la gran parte delle applicazioni nel campo dei graticci spaziali era limitata a più o meno complessi prototipi in scala ridotta utilizzati per testare la fattibilità tecnica dei nuovi tipi strutturali, fig. 16<sup>10</sup> e fig. 17. Solamente dal 2000 il nostro ufficio ha intrapreso la progettazione su scala reale di strutture che utilizzano il modulo bipiramidale. La 'Nuvola' di Yverdon e il velodromo di Aigle descritti nei successivi paragrafi rappresentano, secondo le nostre conoscenze attuali, i primi esempi al mondo d'utilizzazione di questo tipo di cellula.

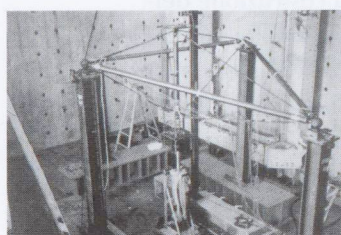


14 – Modello di Geodesic Tensegrity Dome

Fonte: J. Krausse, C. Lichtenstein, *Your Private Sky*<sup>2</sup>

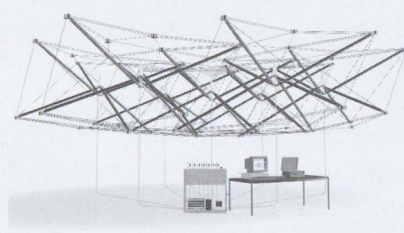
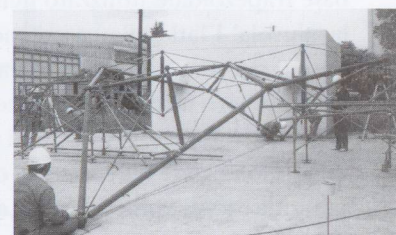


15 – Georgia Dome



16 – Modello per lo studio di cellule base T.C.S.

Fonte: K. Kawaguchi, K. Oda, Y. Hangai, *Experiments and Construction of Truss Structure*<sup>10</sup>



17 – Modello sviluppato presso Passera & Pedretti SA per lo studio di cellule base con nodo centrale



In generale nelle nostre applicazioni, al fine di semplificare la costruzione e le operazioni di montaggio e regolazione del sistema, gli elementi tesi sono costituiti da tiranti piuttosto che da cavi. Ciò comporta un leggero incremento di peso della struttura a causa del maggior rapporto peso/resistenza offerto dal tirante rispetto al cavo.

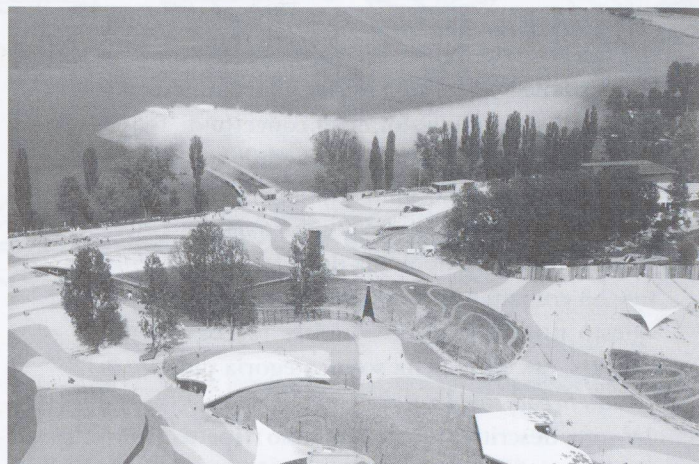


### 3.1 La 'Nuvola' di Yverdon

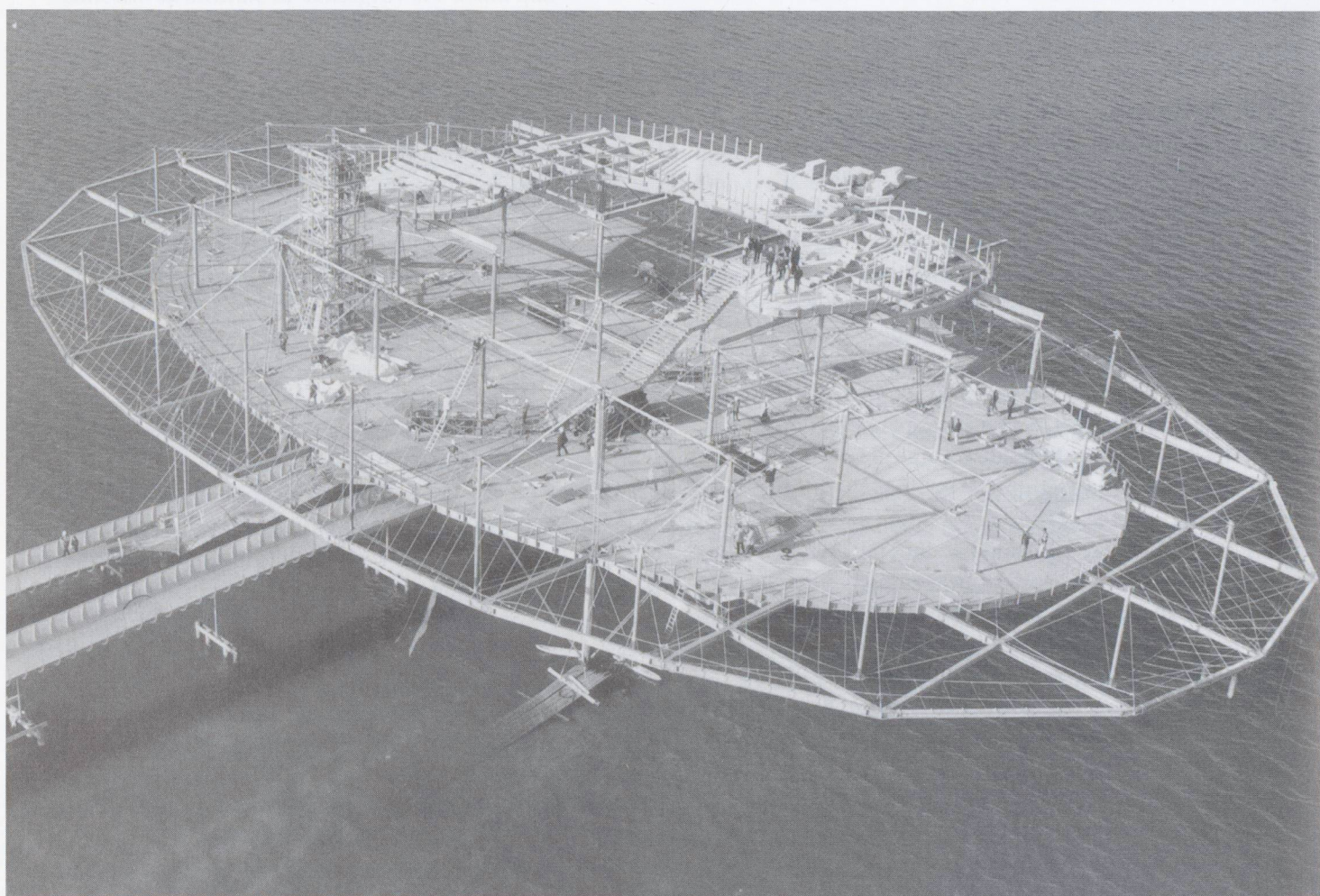
La 'Nuvola' progettata dal nostro ufficio per l'Arteplage di Yverdon sulle rive del lago di Neuchâtel nell'ambito dell'esposizione Nazionale Svizzera di EXPO.02 fornisce un primo esempio concreto d'applicazione del modulo bipiramidale senza l'ausilio della pretensione (fig. 18 e 19).

Frutto dell'immaginazione creativa degli architetti dello studio Diller & Scofidio di New York, l'idea alla base del progetto è quella d'offrire ai visitatori di EXPO.02 un itinerario all'interno di un'immensa nuvola artificiale prodotta da un circuito di 32'000 ugelli ('fog system') sospesi fra acqua e cielo sulle rive del lago di Neuchâtel a Yverdon (fig. 18). In fig. 20 è rappresentato il modulo bipiramidale a base trapezoidale utilizzato nella costruzione della 'Nuvola'. I lati della base condivisi dalle due piramidi del modulo sono formati da quattro travi unite fra loro attraverso nodi centrali rigidi. I vertici opposti delle due piramidi sono congiunti da un puntone verticale situato al centro della base. Il puntone è a sua volta collegato ai nodi centrali della base per mezzo di tiranti diagonali superiori ed

inferiori. Il modulo così ottenuto è una variante dell'elemento a base trapezoidale della famiglia di cellule RPS di fig. 11. Nella nostra soluzione, i puntoni e le cerniere di collegamento che formano la cellula RPS sono sostituiti da travi e nodi indeformabili, ciò che conferisce al modulo una maggiore



18 - Expo.02 Arteplage di Yverdon Les Bains



19 - La «Nuvola» in costruzione, Diller e Scofidio Architetti, New York

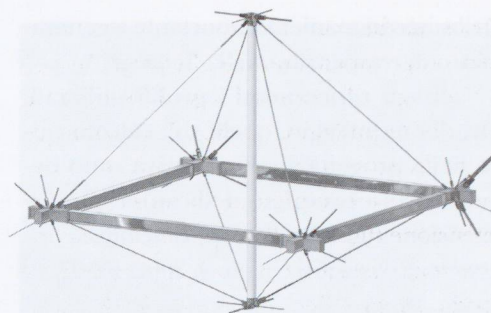


rigidezza. La struttura in acciaio, (fig. 19), è collegata al suolo con sole quattro colonne che poggiano su pali infissi per circa 43 m nel fondo del lago. Ha forma ellissoidale con dimensioni in pianta di 60x100 m ed altezza massima di circa 23 m. La parte centrale compresa fra le quattro colonne portanti è composta da 4x4 moduli di tipo bi-piramidale a base quadrata di 10 m di lato, situati ad un'altezza di 10.85 m sul livello medio del lago.

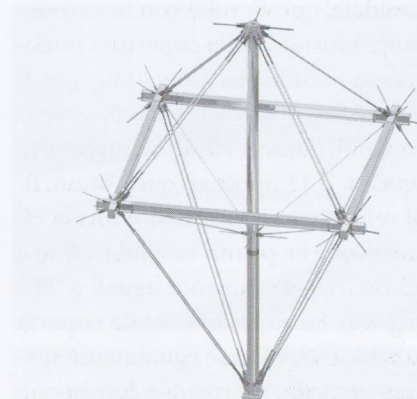
Al fine di migliorare il comportamento statico dell'opera e incrementare lo spazio libero messo a disposizione del pubblico, le piramidi superiori d'ogni cellula hanno un'altezza maggiore di quella delle piramidi inferiori (6.5 m contro 3.5 m, ciò che corrisponde ad una lunghezza totale dei puntoni verticali pari a 10 m). Le zone della nuvola che si trovano in aggetto rispetto agli assi delle colonne sono realizzate utilizzando dei moduli a base trapezoidale. Presentano un'estensione massima lungo il diametro principale dell'ellissoide pari a 35 m. I nodi superiori e rispettivamente inferiori di tutti i moduli della Tensegrity sono collegati fra loro per mezzo di barre orientate secondo le due direzioni principali orizzontali dell'ellissoide. Queste barre formano il piano dei tiranti superiori e rispettivamente inferiori del sistema. Le colonne portanti sono ottenute prolungando fino al suolo i puntoni verticali di quattro cellule della Tensegrity (fig. 21). Il controventamento della struttura è ottenuto collegando i quattro nodi centrali della cellula di ogni colonna (fig. 22) al piede di fondazione e al nodo superiore della colonna stessa (fig. 23), utilizzando coppie di tiranti (fig. 21).

Dal punto di vista statico l'aspetto innovativo più importante del progetto è l'utilizzazione del modulo bi-piramidale che grazie alle sue proprietà permette la realizzazione di un sistema rigido senza la necessità d'introdurre sforzi di precompressione al suo interno. Infatti, la rigidezza di una Tensegrity dipende dal numero dei tiranti che sono in tensione. Nel nostro caso, la forma della struttura e il peso proprio sono tali che le trazioni in questi elementi generano una rigidezza adeguata alle esigenze d'utilizzazione prescritte per l'opera. Il solo intervento previsto è la semplice regolazione di lunghezza di quei tiranti che a fine montaggio non sono tesi.

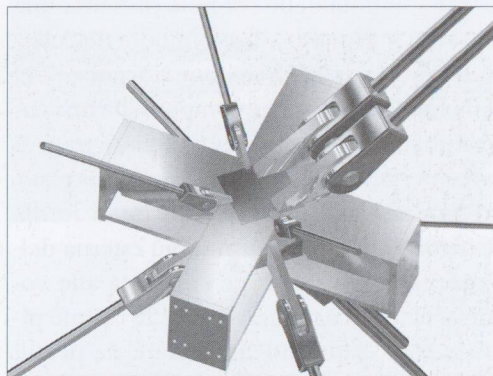
La complessità della struttura rende difficile, anche agli occhi dei più esperti, la comprensione del meccanismo con il quale le forze applicate al sistema sono trasmesse al suolo di fondazione. Inoltre, l'invisibilità dei tiranti a partire da una certa distanza fa apparire i puntoni verticali (talvolta chiamati 'pinceaux volants') come elementi che fluttuano nell'aria, sensazione quest'ultima



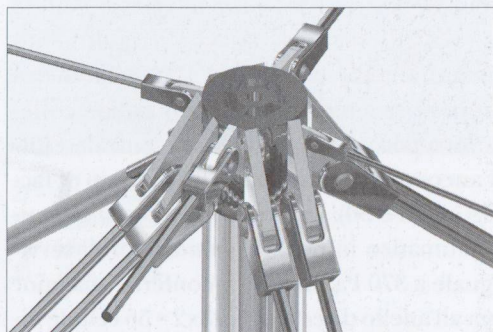
20.



21.



22.



23.

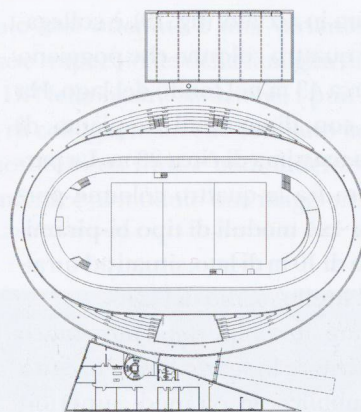
- 20 - Modulo bipiramidale utilizzato nella costruzione della «Nuvola»
- 21 - Cellula tipo delle colonne portanti
- 22 - Nodo centrale attorno alle colonne
- 23 - Nodo superiore delle colonne



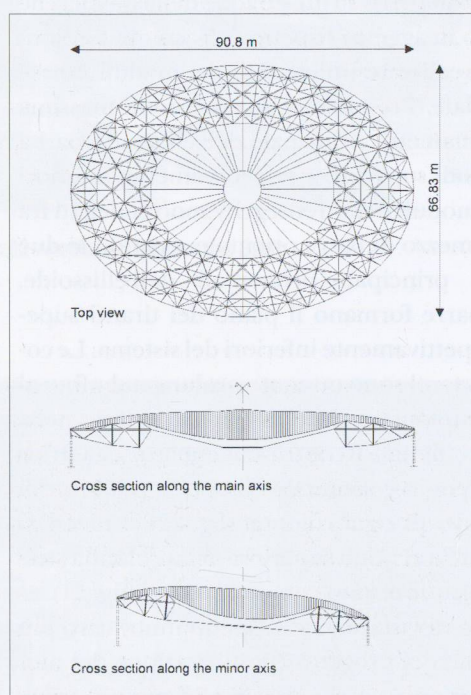
che contribuisce in maniera importante a generare un effetto di trasparenza nella Tensegrity. Ulteriori dettagli concernenti i profili utilizzati, gli aspetti del montaggio, quelli del calcolo numerico e della progettazione esecutiva sono descritti nell'articolo completo dedicato a quest'opera pubblicato in: A. Paronesso, *Una nuvola ticinese a Yverdon*. Rivista «Archi» n. 3, 2002, 92-97.

### 3.2 Il Centro Mondiale del Ciclismo a Aigle

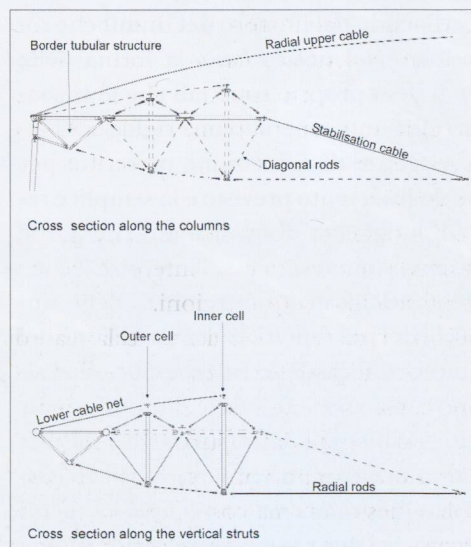
Un secondo esempio d'applicazione tecnica del modulo bipiramidale, questa volta con intervento della pretensione, è fornito dalla copertura pneumatica che il nostro studio ha progettato per il Centro Mondiale del Ciclismo a Aigle (VD) in Svizzera per conto dell'Unione Ciclistica Internazionale UCI, inaugurato il 14 aprile di quest'anno, figure 24 e 25. Il velodromo ha la classica forma ellittica con dimensioni in pianta secondo gli assi maggiore e minore rispettivamente uguali a 90,8 m e 66,83 m (fig. 25). La superficie totale coperta è di circa 5'000 m<sup>2</sup>. Le 28 colonne egualmente spaziate lungo il bordo della costruzione forniscono il supporto necessario per il sostegno della copertura e delle facciate del velodromo. Il piano passante per le sommità delle colonne presenta una pendenza di 6,5° rispetto all'asse minore dell'ellisse. L'altezza media delle 28 colonne è di circa 17,40 m. L'elemento di copertura è composto da un cuscin pneumatico costituito da un doppio strato di membrane in PVC collegato ad un anello d'acciaio, formato da due strutture concentriche di forma anulare (figg. 25, 26). La struttura più esterna dell'anello (di bordo in fig. 26) è collegata alle colonne di facciata ed è realizzata con 28 cellule piramidali a base trapezoidale formate da profili tubolari. La struttura più interna (Tensegrity bipiramidale) è formato da 28 x 2 = 56 cellule bipiramidali. I puntoni verticali di queste cellule fungono da supporto per i cavi d'irrigidimento della membrana inferiore (figg. 27, 28). La membrana superiore è tenuta da 28 cavi radiali collegati fra loro per mezzo di un cavo centrale ellittico ed ancorati alle sommità delle colonne di facciata (figure 29 e 30). La pressione interna del cuscin pneumatico in normali condizioni di servizio è uguale a 370 Pa. Al fine di conferire maggior rigidità all'anello d'acciaio, le 28x2 = 56 cellule bipiramidali della Tensegrity sono precomprese. Ciascuno dei 28 nodi centrali situati fra coppie contigue di cellule bipiramidali è composto da una piastra fissa inferiore e da una piastra mobile superiore (figg. 31, 32). I quattro tiranti inferiori che convergono nel nodo composito sono collegati alla piastra fissa mentre quelli superiori sono collegati



24 – Centro mondiale del ciclismo a Aigle (vd) Svizzera, Pierre Grand e Pascal Grand Architetti, Losanna



25 – Pianta e sezioni della copertura del velodromo



26 – Sezioni dell'anello in acciaio



alla piastra mobile. Durante il montaggio della struttura la distanza fra le due piastre di ciascuno dei 28 nodi compositi è fissata pari ad un valore precalcolato diverso da zero. Lo stato di pretensione che garantisce trazioni non nulle in tutti i tiranti del sistema per ogni condizione di carico è indotto attraverso la chiusura simultanea dei 28 nodi compositi effettuata per mezzo di martinetti idraulici (fig. 32). Per una descrizione più dettagliata della struttura, delle diverse fasi del montaggio e del calcolo numerico della Tensegrity e delle membrane pneumatiche si rinvia il lettore all'articolo pubblicato in<sup>11</sup>.

#### 4. Conclusioni

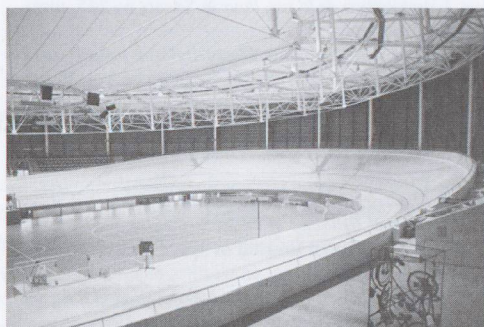
La continua ricerca di nuove cellule e di nuovi schemi d'assemblaggio caratterizzati da una sempre migliore efficienza funzionale del sistema Tensegrity hanno contribuito a far evolvere il concetto strutturale originariamente concepito dal loro ideatore R. B. Fuller. Nella loro accezione più classica, le Tensegrity più che definire l'involucro esterno di uno spazio costruito tendono ad individuare con la loro geometria un volume nel quale sono immerse e del quale fanno parte integrante. Sfruttando al meglio questa loro particolarità, è possibile concepire soluzioni architettoniche di grande effetto, molto leggere e trasparenti. Allo stato attuale delle nostre conoscenze, le Tensegrity classiche sembrano particolarmente adatte per opere di carattere artistico ed ornamentale o per speciali applicazioni che traggano vantaggio dal particolare rapporto esistente fra la loro struttura ed il volume che sanno mettere a disposizione dell'utente. Accanto alla definizione classica che non prevede il contatto fra elementi compressi del sistema, sono sorte estensioni del concetto Tensegrity che meglio si adattano alle esigenze di funzionalità e semplicità costruttiva richieste nel campo delle strutture metalliche leggere. Nel settore delle coperture a sviluppo piano le cellule base di tipo APS, RPS e CPS offrono risultati soddisfacenti che permettono di ridurre il peso dei graticci spaziali formati da soli profili tubolari del 30-50%.

La possibilità di evitare in molti casi il ricorso alla precompressione aumenta l'interesse economico per questo tipo d'applicazioni.

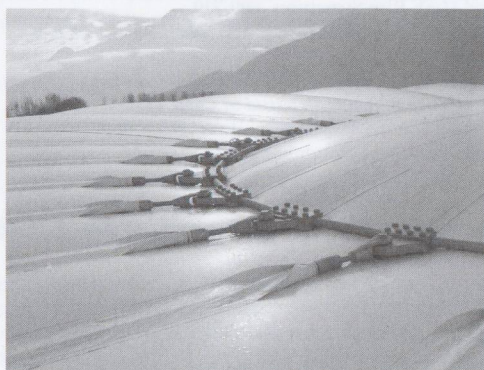
La fattibilità tecnica ed economica su scala reale di carpenterie metalliche che utilizzano il modulo bipiramidale come mattone base del sistema Tensegrity è stata dimostrata dal nostro ufficio mediante la realizzazione d'importanti opere di dimensioni notevoli. Questo sistema costruttivo impiegato nella costruzione di coperture d'impianti sportivi



27.



28.



29.



30.

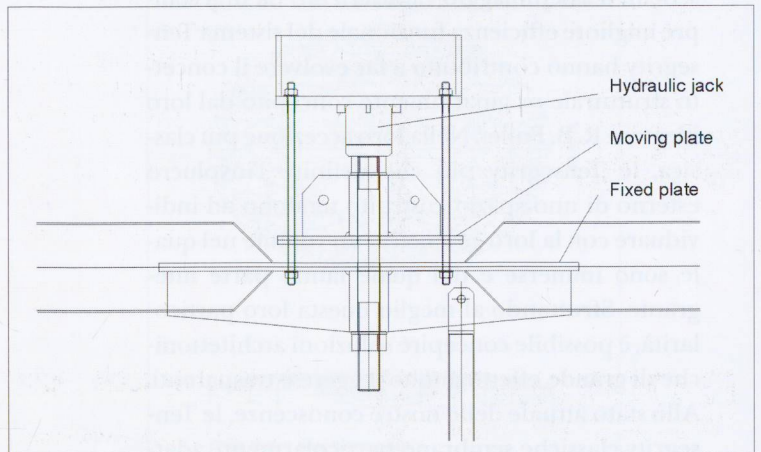
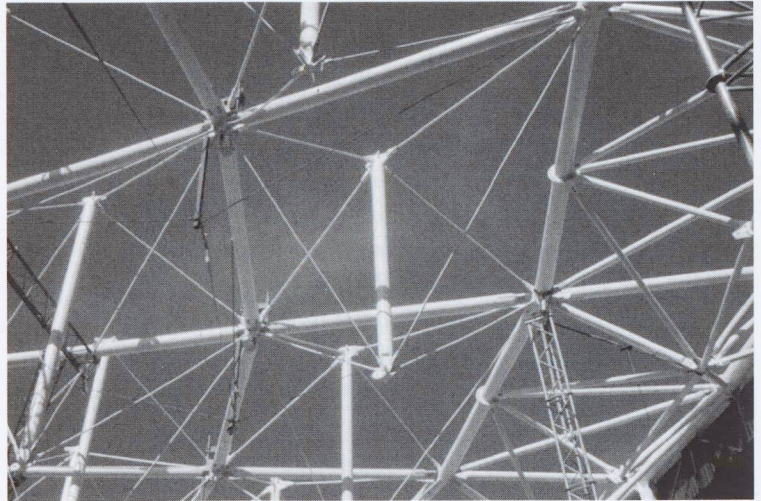
- 27 - Membrana inferiore
- 28 - Vista interna
- 29 - Membrana superiore
- 30 - Vista esterna



e di edifici per esposizioni si propone con forza quale valida alternativa all'utilizzo delle tensostrutture.

#### Bibliografia

1. R. B. Fuller and R. Marks, *The Dymaxion World of Buckminster Fuller*, ANCHOR Books Edition, 1973.
2. J. Krausse and C. Lichtenstein, *Your Private Sky, R. Buckminster Fuller, design als kunst einer wissenschaft*, Verlag Lars Müller 1999.
3. R. Motro, A. Smaili and O. Foucher, *Form controlled for tensegrity formfinding Snelson and Emmerich examples. Proceedings of the International IASS Symposium*, Warsaw, Poland 24 - 28 June, 2002, 243-248.
4. D. Ingber, *L'architecture de la vie. Pour la Science* no 245, mars 1998, 34-45.
5. B. B. Wang and L. Yan-Yun, *From Tensegrity Grids to Cable-strut Grids*, International Journal of Space Structures, Vol. 16 no. 4, 2001, 279-314.
6. Passera & Pedretti Consulting Engineers Switzerland, *Catalogue for designers. Expo.01/Forum, Technical-descriptive report*, release 2.0, 1998.
7. Y. Hangai, K. Kawaguchi and K. Oda, *Self-Equilibrating Stress System and Structural Behavior of Truss Structures Stabilized by Cable Tension*, International Journal of Space Structures, Vol 7 no 2, 1992, 91-99.
8. M. Saitoh, *Role of String: Aesthetics and Technology of Tension Structures. Proceedings of IABSE Symposium Kobe 1998, Long-Span and High-Rise Structures*, 699-710.
9. A. Paronesso, *Una nuvola ticinese a Yverdon*, Rivista «Archi» no. 3, 2002, 92-97.
10. K. Kawaguchi, K. Oda and Y. Hangai, *Experiments and Construction of Truss Structure Stabilised by Cable Tension*, Proceedings of IASS International Symposium '97 on Shell & Spatial Structures: 10-14 November 1997, Singapore.
11. A. Paronesso, *The 2002 World Cycling Centre Arena, Aigle, Switzerland*. Proceedings of International IASS Symposium, Warsaw, Poland 24 - 28 June, 2002, 910-917.



31 - Montaggio dei moduli bipiramidali

32 - Dispositivo per l'applicazione della pretensione

MARCO  
**MB**  
BLAESI  
MANAGEMENT  
CONSULTING

Unsere Auftraggeberin ist ein führendes Ingenieur - Planungsbüro im Hoch - Brücken - Grund - und Tunnelbau. Wir sind mit der Suche eines

### Projektleiters Tunnelbau Tessin beauftragt.

Im Rahmen einer Nachfolgeplanung übernehmen Sie die Verantwortung für ein bestehendes interessantes und namhaftes Projekt im Tunnelbau.

Sie sind von der Bauprojektierung über die Ausführungsprojekte bis zum Bauleitungsmandat verantwortlich und werden im Tessin als Leiter eine Niederlassung eröffnen und ausbauen.

Kontaktpersonen:  
Marco Blaesi  
oder Linda Gyger  
091/922.25.35

Gute Mitarbeiterführung, Teamfähigkeit, organisatorisches Talent, Ausbau der Geschäftsbeziehungen in der Region sowie unternehmerisches Denken sind grundlegende Voraussetzungen für den Inhaber dieser Position.

Sie verfügen als Ingenieur ETH über mehrjährige Erfahrung in der Leitung wichtiger Projekte und haben ein gutes Kommunikationsflair. Sie sind mindestens 35 jähig und sprechen und schreiben fließend Italienisch und Deutsch.

Wenn Sie einen solides und langfristiges Arbeitsverhältnis in einem dynamischen

Umfeld, vorteilhafte Bedingungen und interessante Karriereperspektive suchen, freuen wir uns Sie kennen zu lernen, Diskretion ist absolut zugesichert.