

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

**Herausgeber:** Società Svizzera Ingegneri e Architetti

**Band:** - (2002)

**Heft:** 3

**Artikel:** Una nuvola ticinese a Yverdon

**Autor:** Paronesso, Antonio

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-132437>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 18.12.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Una nuvola ticinese a Yverdon

Passera & Pedretti, Grancia-Lugano  
testo di Antonio Paronesso

## Introduzione

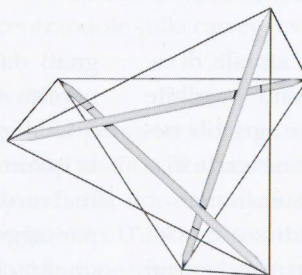
La nostra società opera ormai da qualche tempo nel settore della progettazione delle carpenterie metalliche leggere di tipo tensegrity.

Note per il loro particolare aspetto estetico, la loro leggerezza e trasparenza, queste strutture trovano applicazione nei nostri progetti come elementi principali del sistema portante, come elementi di copertura combinati con membrane semplici e pneumatiche, come elementi di chiusura verticale di supporto per pareti vetrate.

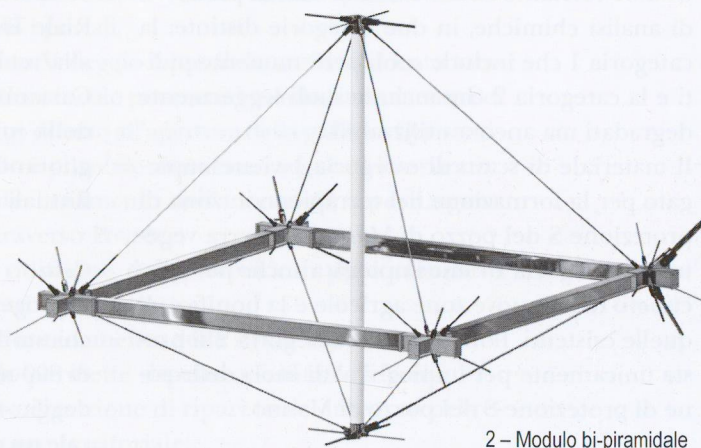
Una caratteristica che distingue le tensegrity dalle costruzioni di tipo tradizionale è il particolare rapporto esistente fra la loro struttura ed il volume che sanno mettere a disposizione dell'utente. Più che definire l'involucro esterno di uno spazio costruito questi sistemi costruttivi tendono ad 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, estremamente leggere e trasparenti.

Secondo la definizione classica di R. B. Fuller, 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 tiranti) è un volume stabile dello spazio. La figura 1 rappresenta la classica cellula ideata da Fuller collegando tre puntoni con nove cavi. Questa definizione classica esclude la possibilità che due o più puntoni possano convergere nello stesso nodo della struttura. Inoltre, per garantire la stabilità dell'insieme, è necessario applicare uno stato di precompressione che assicuri una trazione permanente nei tiranti del sistema. Le condizioni sopra enunciate sono in generale molto difficili da realizzare sia sotto il profilo tecnico sia sotto il profilo economico e rappresentano quindi un serio ostacolo alla costruzione pratica di una tensegrity classica.

Al fine d'ottenere una variante strutturale più semplice da realizzare, ma che offra la stessa attrattiva



1 - Cellula base ideata da R. B. Fuller



2 - Modulo bi-piramidale

estetica e gli stessi vantaggi in termini di leggerezza e trasparenza delle tensegrity classiche, abbiamo intrapreso lo studio una nuova cellula a forma di doppia piramide trapezoidale (modulo bi-piramidale), (fig. 2). 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 'Reciprocal Prism Simplexes' proposte da B. B. Wang nel 1999. Nella nostra soluzione, i puntoni e le cerniere di collegamento che formano la cellula Wang sono sostituiti da travi e nodi indeformabili, ciò che conferisce al modulo una maggiore rigidità.



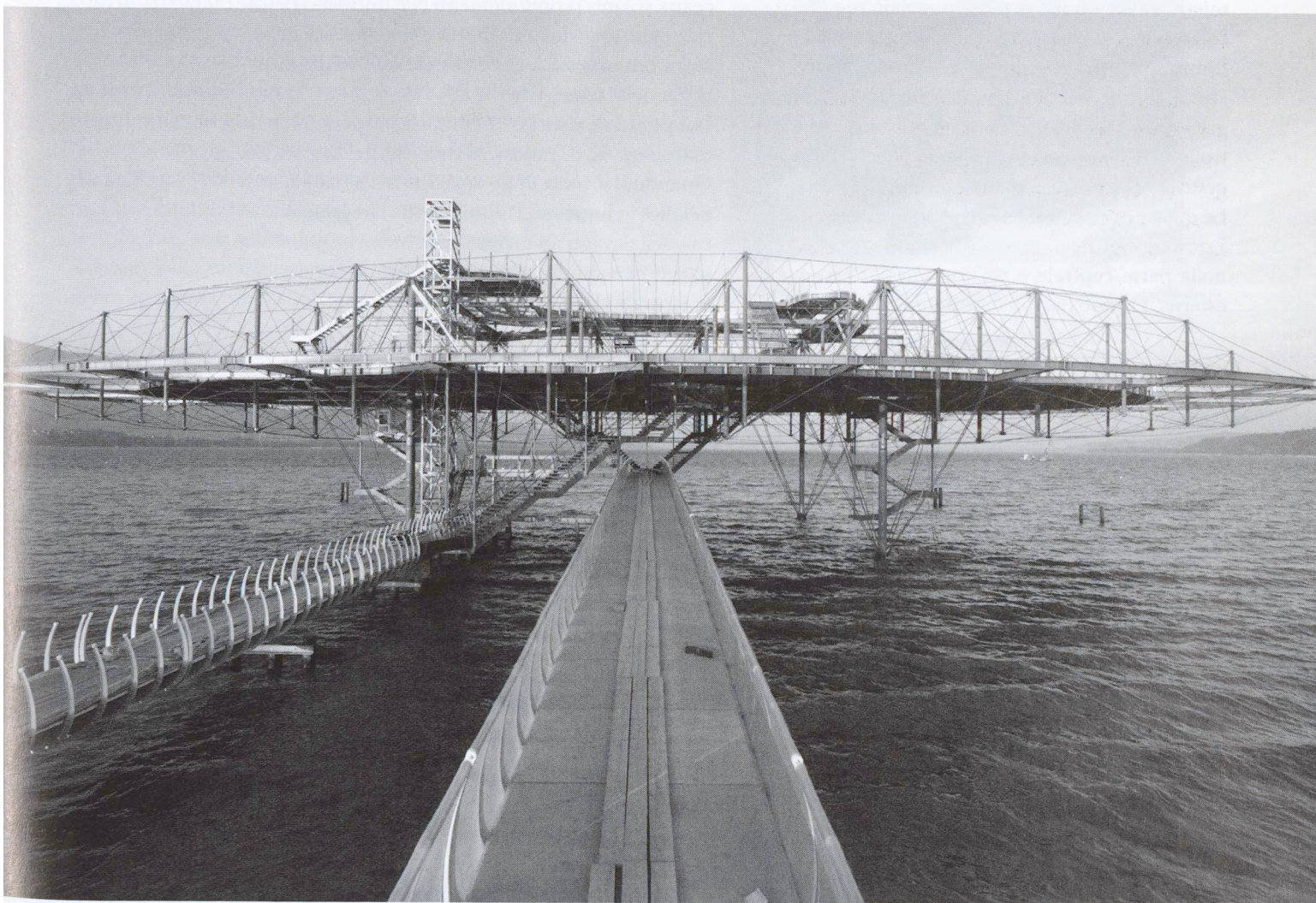
### La struttura portante della nuvola

Motivati dai positivi risultati del nostro studio, abbiamo proposto per la nuvola dell'arteplage expo.02 di Yverdon una struttura tensegrity interamente basata sull'utilizzazione del nuovo modulo bi-piramidale (fig. 3).

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.

La struttura in acciaio 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. 4). Il controventamento della struttura è ottenuto





collegando i quattro nodi centrali della cellula di ogni colonna (fig. 5) al piede di fondazione della colonna stessa, utilizzando coppie di tiranti (fig. 4). Tutto il volume occupato dalla tensegrity è avvolto dal circuito dei tubi del sistema di produzione della nebbia artificiale della nuvola.

La zona del livello 10.85 m aperta al pubblico ha forma ellittica con diametro massimo di 78 m e diametro minimo di 48 m. La superficie orizzontale è costruita con griglie metalliche sostenute da membrature secondarie collegate alle travi delle cellule. Una seconda zona adibita a bar, denominata 'angel bar', è situata al di sopra dei puntoni verticali della parte centrale della tensegrity ad un'altezza di circa 19.20 m sopra il livello medio del lago.

Il sistema portante di questa zona è appoggiato sui nodi superiori delle quattro colonne (fig. 6) e di 16 puntoni verticali della tensegrity (fig. 7).

Le strutture secondarie della nuvola (scale d'entrata, d'uscita e di soccorso, ascensore e relativa passerella d'accesso, locale elettrico) sono completamente isolate dal suolo e sospese alla struttura con puntoni controventati da tiranti.

I profili ed i nodi della carpenteria metallica (lamiere, travi e puntoni) sono in acciaio Fe E 355 C.

I parametri di resistenza d'acciaio impiegato per i tiranti sono  $F_y = 460 \text{ N/mm}^2$  e  $F_u = 625 \text{ N/mm}^2$ .

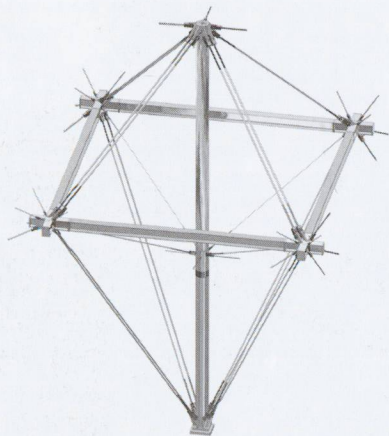
Per la costruzione della zona centrale della tensegrity e dell'angel bar sono state utilizzate delle poutrelle HEB 400 mentre per quella delle zone in aggetto sono state impiegate delle HEA 400 e HEA 280. Le quattro colonne portanti sono tubi ROR 508x20. I puntoni verticali sono costituiti da ROR 323.9x7.1 nella parte centrale e da ROR 219.1x6.3 in quella esterna. I tiranti diagonali superiori delle cellule di

ogni colonna sono fabbricati con coppie di M72 mentre quelli inferiori con coppie di M60. Tutti gli altri tiranti diagonali ed orizzontali hanno diametro variabile fra M30 e M64.

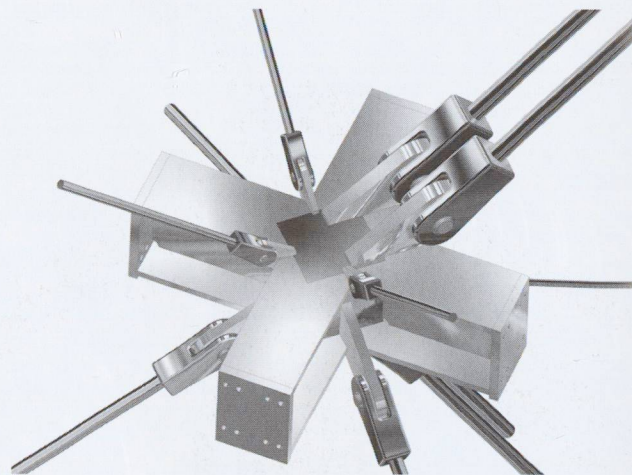
Dal punto di vista statico l'aspetto innovativo più importante del progetto è l'utilizzazione del modulo bi-piramidale che grazie alle sue proprietà permette la realizzazione di un sistema rigido senza la necessità d'introdurre sforzi di precompressione al suo interno. Infatti, la rigidità di una tensegrity 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 rigidità 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 che contribuisce in maniera importante a generare un effetto di trasparenza nella tensegrity.

Dal punto di vista architettonico, l'aspetto globale dell'opera è, a nostro avviso, molto suggestivo. Quando il sistema di produzione della nebbia artificiale è in funzione, il visitatore ha l'impressione di trovarsi davanti ad un'immensa nuvola. Quando la struttura è visibile, sembra una gigantesca navicella spaziale che galleggia sul lago.



4 - Controventamento delle colonne



5 - Nodo centrale attorno alle colonne



### Aspetti del montaggio della struttura

La particolare ubicazione dell'opera, situata sul lago a circa 200 metri dalla riva, ha richiesto per il suo montaggio l'utilizzazione di gru operanti a partire da un pontone mobile galleggiante.

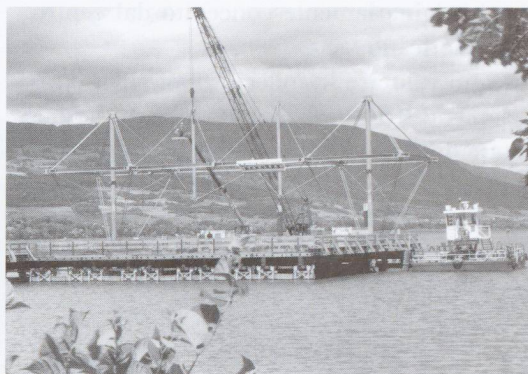
In un primo stadio dell'installazione sono stati messi in opera i moduli della parte centrale della tensegrity compresi fra le quattro colonne (fig. 8). La stabilizzazione del sistema durante questa fase si è ottenuta controventando le due colonne più vicine alla riva con cavi temporanei ancorati al fondo del lago.

In un secondo stadio, con parte centrale ormai completata e quindi autostabile, sono state collegate le rimanenti cellule della tensegrity procedendo in aggetto rispetto agli elementi già montati (fig.9). In un terzo stadio, sono state infine inserite le strutture secondarie (scale, ascensore e relativa passerella di accesso al livello 5.05 m, locale elettrico, l'angel bar e il fog system (fig. 10).

### Aspetti del calcolo numerico e della progettazione esecutiva

Per il calcolo e lo sviluppo dei complessi dettagli costruttivi del progetto il nostro studio si è avvalso dell'impiego di proprio personale altamente specializzato e di mezzi informatici d'avanguardia.

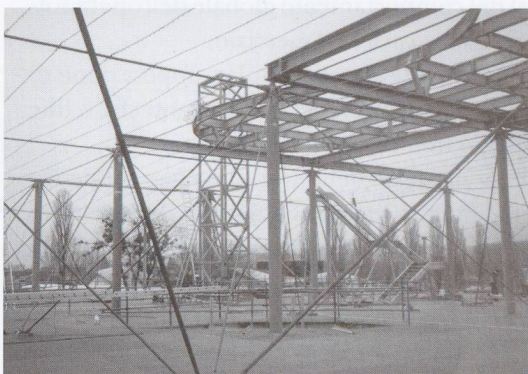
La messa a punto del modello numerico globale (comprendente anche tutte le strutture secondarie) della nuvola, (fig. 8, 9 e 10) e l'analisi del comportamento statico non lineare della struttura sono state effettuate utilizzando il pre-post processore Patran/MSC e il solutore agli elementi finiti NASTRAN/MSC, variante commerciale quest'ultima, del programma NASTRAN (Nasa STRUCTURAL Analysis



8.

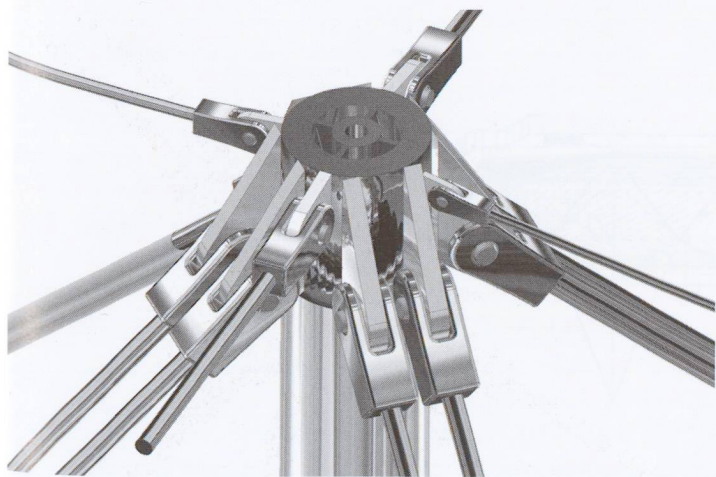


9.

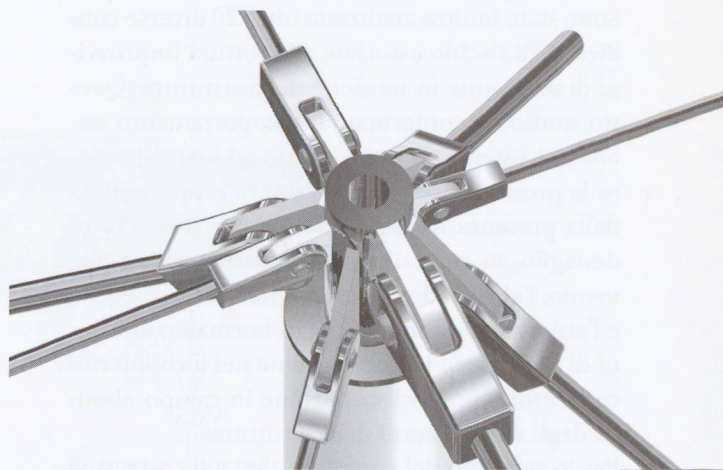


10.

8 – Montaggio dei moduli della parte centrale compresa fra le colonne  
9 – Montaggio in aggetto dei moduli della parte esterna alle colonne  
10 – Montaggio delle strutture secondarie



6 – Nodo superiore delle colonne



7 – Nodo superiore dei puntoni verticali



program) originariamente concepito dal centro spaziale americano NASA.

Per meglio valutare le sollecitazioni all'interno degli elementi strutturali, nel modello numerico sono state descritte le diverse fasi di montaggio dell'opera.

Nella prima fase dello studio sono stati calcolati gli spostamenti prodotti dal peso proprio alla fine del montaggio della sola tensegrity.

Nella seconda parte dell'analisi, questa informazione è stata inserita nel modello per formulare le condizioni di compatibilità cinematica fra le due sottostrutture formate dalla tensegrity e dall'angel bar nell'ipotesi per quest'ultimo di montaggio in condizioni isostatiche. Sono stati quindi calcolati gli spostamenti relativi fra le due sottostrutture per la situazione di fine del montaggio dell'angel bar.

Nella terza fase dello studio, i precedenti spostamenti relativi sono stati introdotti nel calcolo per definire le condizioni di vincolo definitive fra le due sottostrutture da utilizzare nella successiva analisi del comportamento globale dell'opera sotto l'effetto dei carichi d'esercizio.

Nella quarta fase è stata simulata l'operazione di regolazione della lunghezza dei tiranti che a fine montaggio non risultano tesi.

Nella quinta parte dello studio si sono modellizzate in dettaglio le azioni applicate dai cavetti di supporto del sistema di produzione della nebbia artificiale ai tiranti della tensegrity.

Le oltre cento condizioni di carico esaminate per la fase di esercizio sono state ottenute combinando le azioni del vento e della neve con ben più di 30 diverse posizioni del carico utile definito da un'impronta di carico di superficie  $100 \text{ m}^2$ , intensità di  $5 \text{ kN/m}^2$  (per un totale di  $500 \text{ kN}$ ) comunque posizionata rispetto alle aree della tensegrity e dell'angel bar accessibili al pubblico.

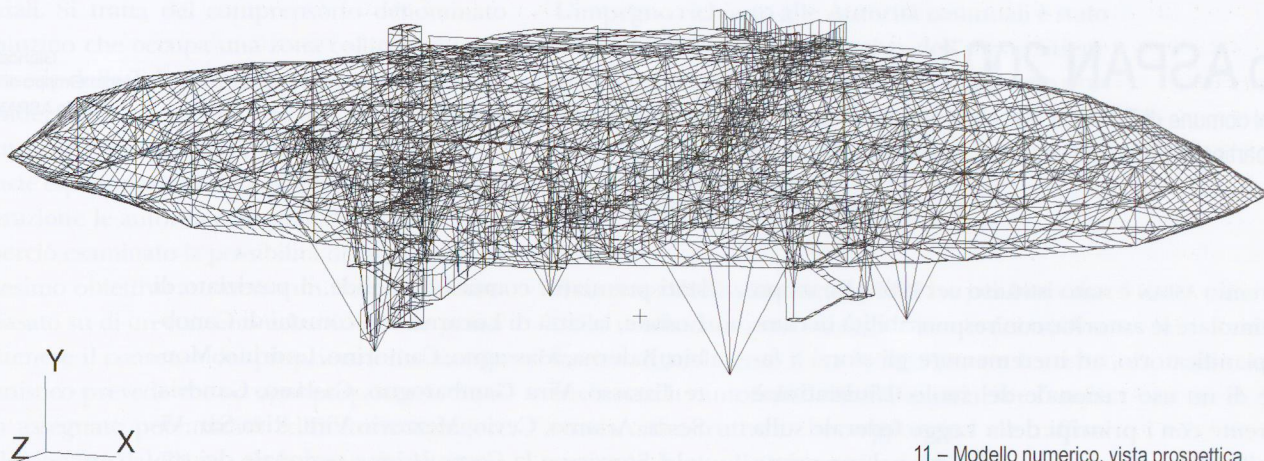
Sono state inoltre analizzate oltre 20 diverse condizioni di rischio associate alla rottura improvvisa di un tirante in tensione della struttura. Questo studio ha confermato il comportamento stabile del sistema da noi adottato ed ha evidenziato la preziosa riserva di resistenza rappresentata dalla presenza in esso di barre non tese. Più in dettaglio, in caso di crisi prematura di un elemento, l'alto grado d'iperstaticità della tensegrity e l'attivazione di tiranti che in normali condizioni di lavoro non hanno tensione nel loro interno consentono una redistribuzione in campo elastico degli sforzi interni della struttura.

Per lo sviluppo dei complessi dettagli costruttivi della carpenteria metallica (nodi centrali, nodi superiori ed inferiori dei puntoni verticali) e per

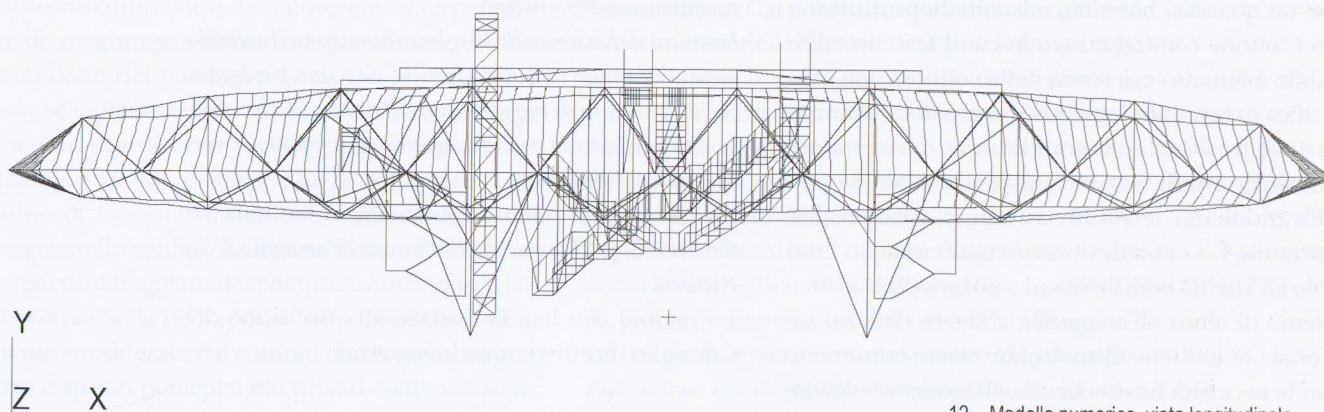
il controllo della compatibilità geometrica fra i diversi elementi ci siamo avvalsi di programmi di progettazione grafica tridimensionale quali Inventor di Autodesk. Ciò ha permesso di ridurre al minimo gli errori di geometria dei pezzi meccanici descritti nei piani d'officina rendendo in questo modo più veloci le successive operazioni d'assemblaggio in officina e di montaggio in cantiere di tutte le componenti del sistema.

La notevole complessità del progetto e le molteplici modifiche delle strutture secondarie d'accesso all'opera richieste dagli architetti ci hanno indotto ad utilizzare, in più occasioni, sofisticati mezzi della computer grafica (ad esempio il programma Explorer di Alias/Wavefront) che ci hanno consentito di verificare in modo sufficientemente rapido la compatibilità geometrica fra le diverse parti strutturali della tensegrity. Grazie all'impiego dei potenti software sopra citati e all'impegno costante dei nostri collaboratori è stato possibile mantenere il programma del progetto esecutivo di un'opera in continua evoluzione.

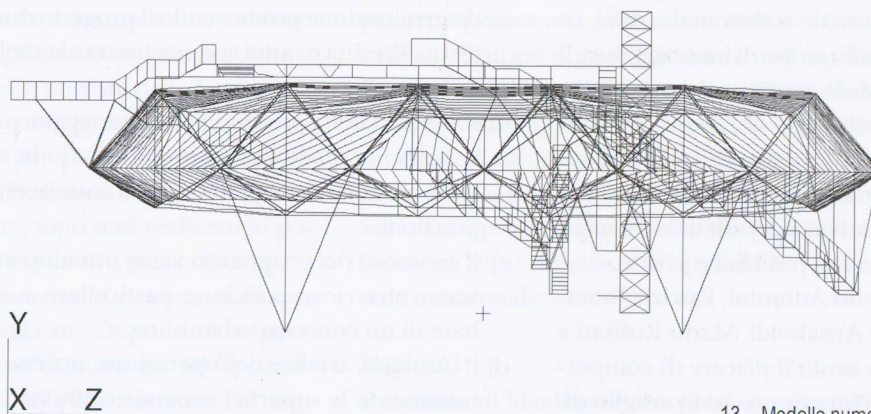




11 – Modello numerico, vista prospettica



12 – Modello numerico, vista longitudinale



13 – Modello numerico, vista trasversale