

la tensostruttura per la fiera di milano

Prof. Ing. Massimo Majowiecki

Premessa

In occasione della Grande Fiera d'Aprile 1986, l'Ente autonomo Fiera di Milano decise di commissionare la progettazione ed esecuzione della copertura di Piazzale Italia. Le ipotesi progettuali principali individuate nella fase di analisi di fattibilità imponevano di raggiungere i seguenti obiettivi: la possibilità di coprire globalmente il piazzale senza ostacoli intermedi, forte immagine e caratterizzazione architettonica accompagnata ad una relativa leggerezza fisica strutturale, convertibilità, rapidità di esecuzione e montaggio.

Con le suddette ipotesi vincolanti di progetto è stato indetto un Concorso per idee. Il progetto vincente, scelto dall'Ente Fiera, sintetizzato formalmente in un modello architettonico (fig. 1), proponeva come soluzione del problema progettuale una tipologia strutturale leggera. Si tratta di una tensostruttura (*) che è stata assunta quale nuova immagine della manifestazione espositiva 1986. Con la costruzione eseguita per la Fiera di Milano si è voluto, indirettamente, cogliere l'occasione di comunicare un'immagine rappresentativa dell'innovazione tecnologica o, ancor meglio, di una nascente tradizione «leggera» nel costruire, caratteristica e caratterizzante il nostro tempo, in antitesi con la dominante tradizione «massiva».

I sistemi strutturali leggeri permettono di raggiungere un rapporto tra *peso portante* (peso proprio strutturale) e *peso portato* (carichi accidentali di esercizio) molto minore dell'unità; essi sono diretta conseguenza dello sviluppo scientifico e dell'innovazione

tecnologica anche se l'intuizione fisica degli schemi strutturali leggeri risale ai primordi della civiltà. Le realizzazioni moderne più significative che impiegano sistemi strutturali leggeri (vedi i ponti sospesi, gli impianti olimpici di Tokio-Monaco, e i costruendi di Seul, l'Haj Terminal, ecc.), infatti, richiedono materiali con alto rapporto resistenza-peso, schemi ad alta efficienza strutturale che permettono di impiegare i materiali al massimo delle proprie caratteristiche meccaniche, instaurando esclusivamente sforzi di trazione (tensostrutture) e mezzi di progetto e analisi numerica assistita da elaboratori elettronici disponibili solo da alcuni decenni.

La costruzione ha avuto inizio alla metà di gennaio 1986 ed è stata terminata ai primi di aprile 1986.

Descrizione del sistema strutturale

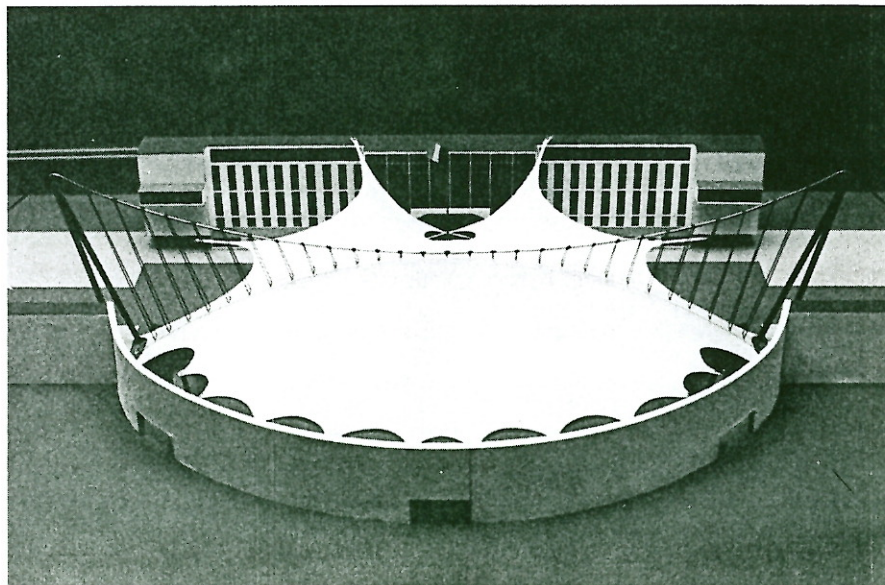
La copertura di Piazzale Italia ha una proiezione in pianta di circa 6 000 m² e presenta una configurazione perimetrale molto varia eseguita con tratti curvi.

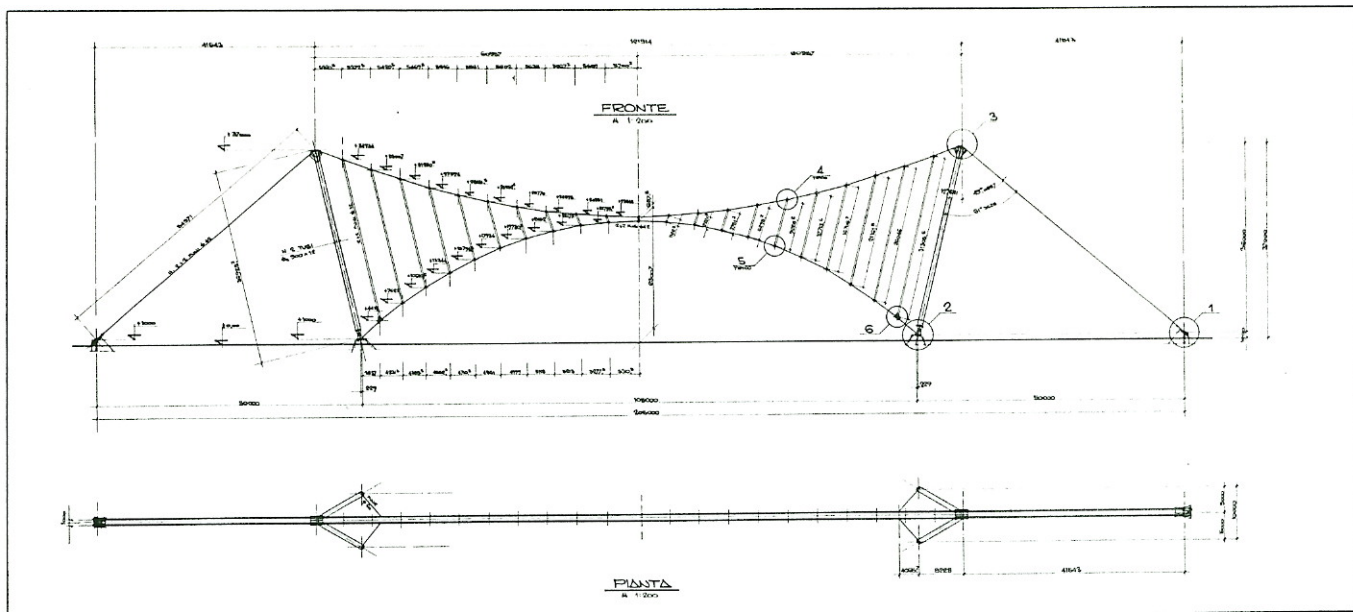
La copertura è dotata di un asse di simmetria trasversale e si estende, collegandosi ad essi, tra il Palazzo delle Nazioni ed il Palazzo Nervi delimitanti il Piazzale Italia, superando una distanza di circa 80 m. L'asse longitudinale della copertura, parallelo al Viale dell'Industria, è di 105 m di lunghezza.

La struttura portante principale è costituita da una tensostruttura piana formata da quattro funi portanti e quattro funi stabilizzanti a curvature contrapposte. Le funi portanti hanno una luce libera di 122 m ed una freccia di 14 m circa; le funi

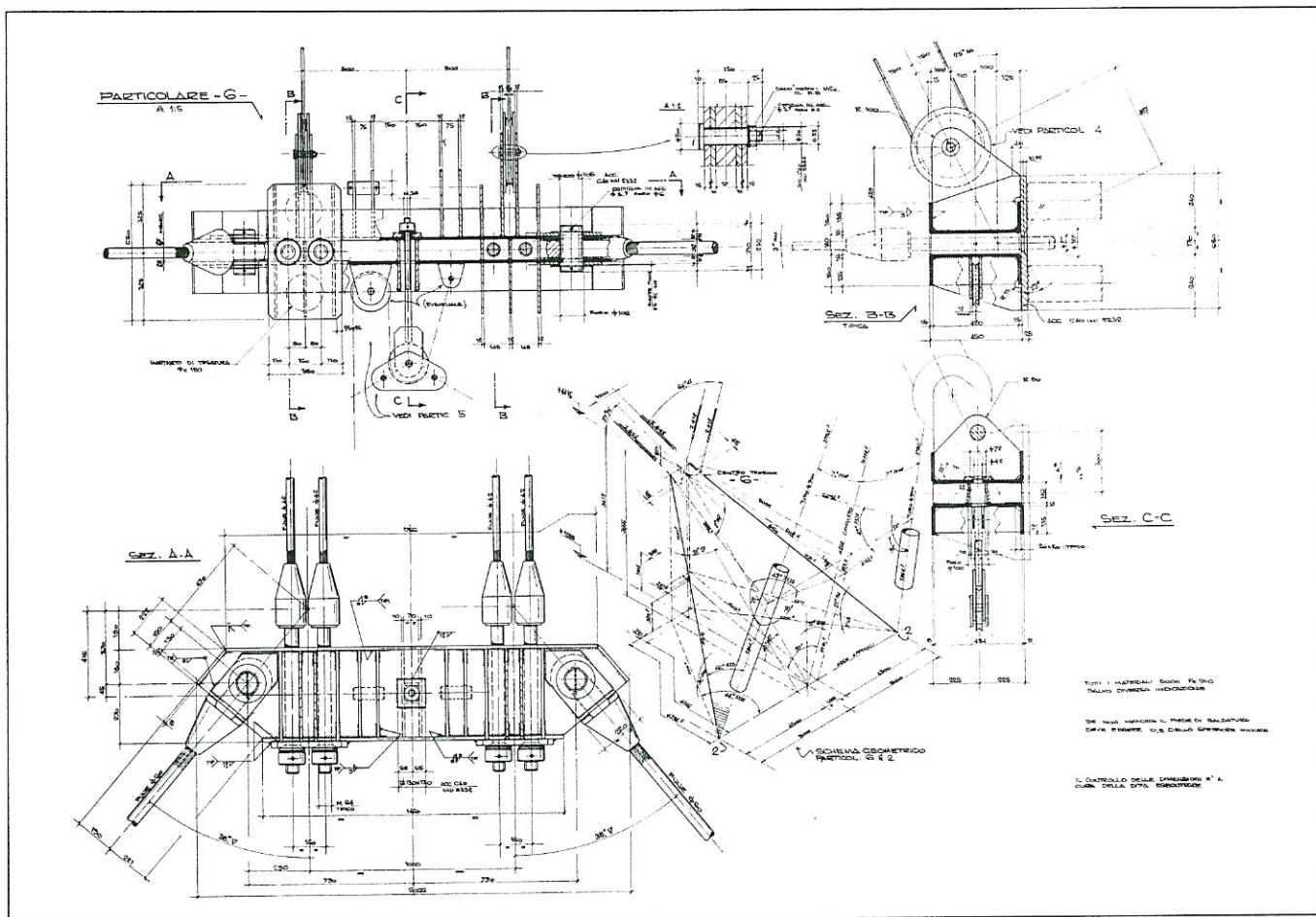
(*) Riferimento volume M. Majowiecki: «Tensostrutture: progetto e verifica», distribuito da Siderservizi.

Fig. 1. Modello del progetto di *massima*.





2



3

stabilizzanti, di 105 m di luce, hanno una freccia di 22 m. Tutte le funi portanti e stabilizzanti hanno un diametro nominale di 42 mm, costruzione spiroidale con 127 fili elementari di 3,2 mm di diametro, resistenza a rottura minima di 1 600 N/mm² e protezione anticorrosione mediante zincatura su tutti i fili elementari di tipo B (fig. 2). Il collegamento tra funi portanti e stabilizzanti è costituito da tiranti doppi realizzati con funi \varnothing 12 mm

fissate ad esse mediante speciali giunti ad attrito. La tensostruttura principale è dotata di un sistema strutturale d'ancoraggio a cavalletto formato da due colonne d'acciaio Fe 510 B, disposte a V, con vertice verso l'alto e 10 m d'apertura alla base, di diametro esterno 900 mm, 12 mm di spessore. Il cavalletto è stabilizzato dal tirante esterno che parte dal vertice e si ancora a terra a 50 m di distanza. Questo tirante, esecutivamente, è

formato dalle stesse funi portanti che proseguono, senza interruzione materiale, disponendosi in corrispondenza della testa del cavalletto su una sella di 85 cm di raggio. Le teste d'ancoraggio delle funi portanti e stabilizzanti sono di tipo regolabile a barra filettata per permettere l'introduzione mediante martinetti idraulici, nel sistema tensostrutturale, dello stato di pretensione iniziale (stato «0») (fig. 3).

La superficie della membrana di copertura, eseguita con un materiale sintetico, è dotata di curvatura totale o gaussiana negativa e la configurazione geometrica è stata ottenuta imponendo: l'equilibrio di ogni suo punto in stato di presollecitazione e le condizioni di vincolo geometrico al contorno. Questi vincoli sono rappresentati dalle quote degli attacchi disposti all'intradosso della tensostruttura centrale ed agli ancoraggi disposti sul Palazzo Italia, Nervi ed a terra.

I materiali

- Acciaio per carpenteria:
Fe 360 $\sigma_{amm} \leq 160 \text{ N/mm}^2$
- Acciaio per carpenteria:
Fe 510 $\sigma_{amm} \leq 240 \text{ N/mm}^2$
- Collegamenti bullonati:

viti classe 8.8	secondo UNI 3740
dadi classe 6.5	
- Funi in acciaio spirodali zincate:
classe B $\sigma_r \geq 1\,600 \text{ N/mm}^2$
- Membrana di copertura:
 - natura del supporto:
PES (Poliestere) DIN 60001
 - tipo di tessitura:
P 2/2 DIN 61101
 - peso del supporto:
370 gr/m² DIN 53854
 - natura della spalmatura:
2 - facce PVC DIN 4102
 - peso totale:
1 050 gr/m² DIN 53352
 - resistenza alla trazione in trama:
5 750 N/5 cm DIN 53354
 - protezione al fuoco: classe 1
DIN 4102 B1

per quanto riguarda la legge costitutiva del materiale ci si è avvalsi dei seguenti diagrammi σ - ϵ ottenuti con prove biassiali.

Analisi dei carichi

È inoltre importante notare che la costruzione è soggetta esclusivamente al carico del vento

intendendo la copertura ad uso estivo in accordo col punto 6.3 della CNR-10012-85.

A favore della sicurezza e per tenere conto di carichi aleatori o distribuzioni di carico vento anormali in pressione si è tenuto conto di un carico gravitazionale equivalente uniformemente distribuito.

Carichi permanenti

Peso proprio copertura: 10 N/m²

Carichi accidentali

Carico accidentale aleatorio gravitazionale equivalente: 300 N/m²
 Vento (pressione base): 800 N/m²
 Coefficiente aerodinamico medio: C = -0,8

Azioni termiche

$\Delta T = \pm 25^\circ\text{C}$.

Condizioni e combinazioni di carico

Le condizioni di carico considerate per la membrana di copertura sono:

1. Pretensione
2. Peso proprio della copertura
3. Carico accidentale gravitazionale equivalente
4. Carico del vento.

Le condizioni di carico per la tensostruttura sono:

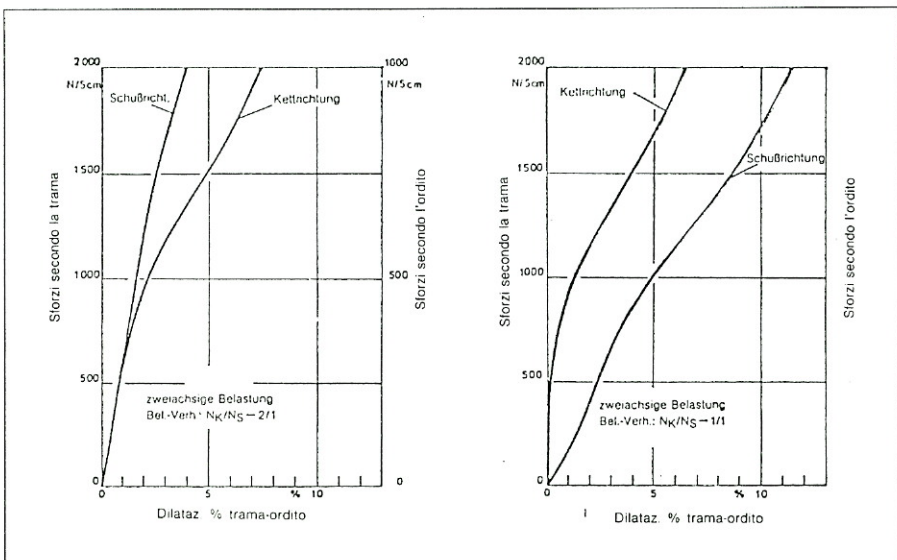
1. Pretensione
2. Peso proprio della copertura + tensostruttura
3. Carico accidentale gravitazionale equivalente
4. Carico del vento
5. Variazioni termiche: a) 0°C; b) 25°C.

Le combinazioni di carico per la membrana sono:

- A - 1
- B - 1 + 2 + 3
- C - 1 + 2 + 4

Fig. 2. Fronte e pianta della tensostruttura.

Fig. 3. Particolari costruttivi: ancoraggio della fune stabilizzante.



Legge costitutiva del materiale sintetico (poliestere e PVC) della membrana di copertura.
 Zweiachsiges Belastungs-Verh. = Storzo biassiale. Belastungsverhältnis = Rapporto dei carichi.

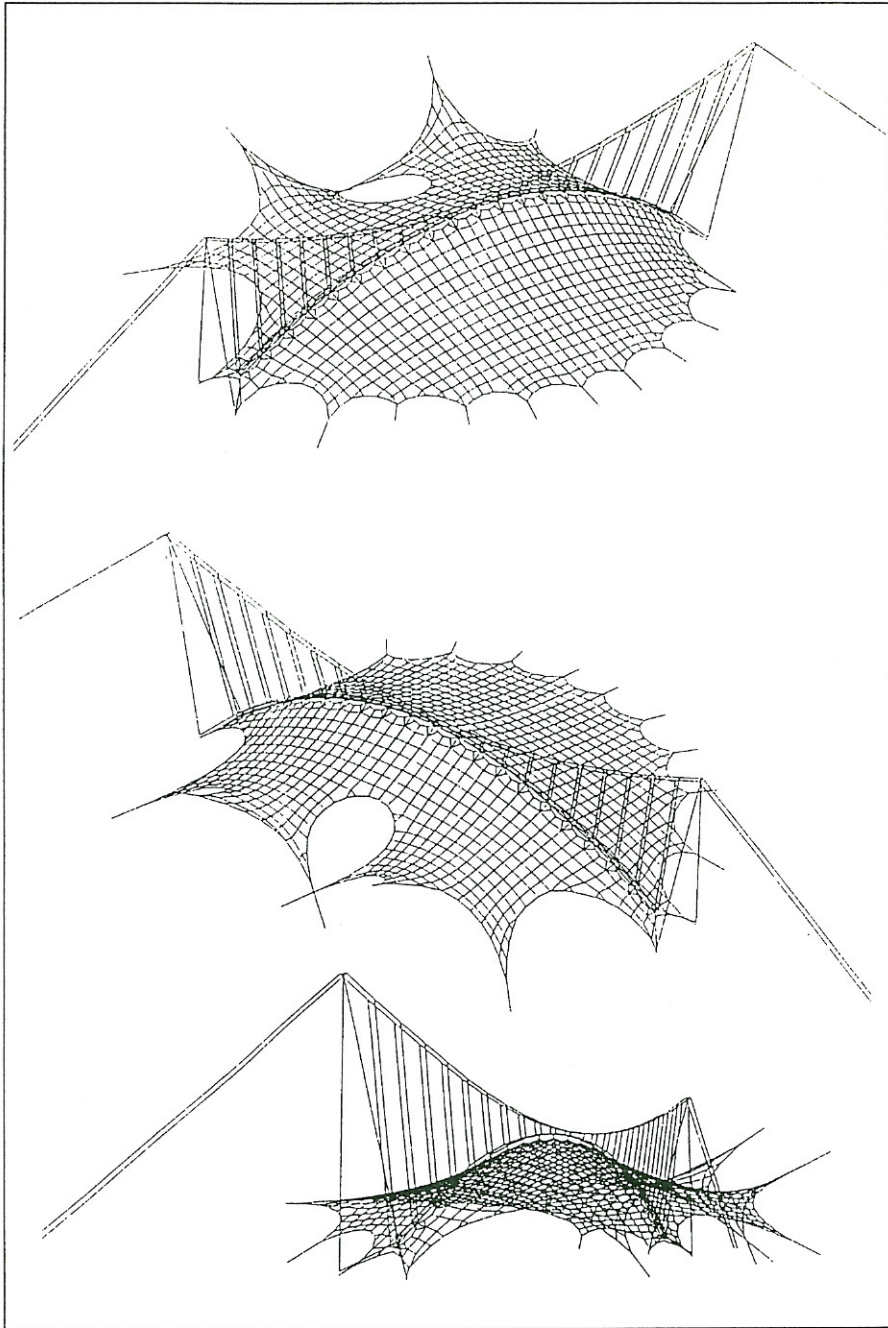


Fig. 4. Sequenza interattiva di progetto.

Fig. 5. Sistema di riferimento globale e locale dell'elemento finito fune.

Le combinazioni di carico per la tensostruttura sono:

- A - 1
- B - 1+2+3+5a
- C - 1+2+3+5b
- D - 1+2+4+5a
- E - 1+2+4+5b

Calcolo delle tensostrutture

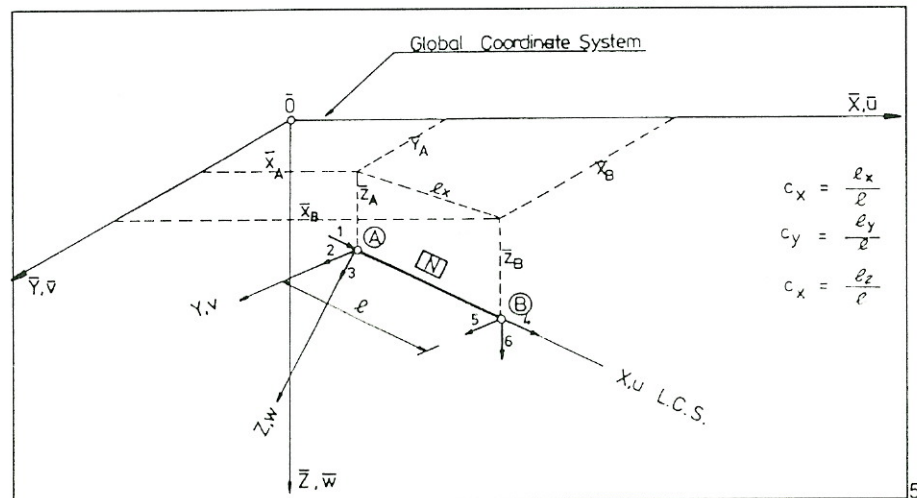
Il calcolo delle tensostrutture comprende la ricerca della geometria iniziale e la verifica successiva delle varie fasi di caricamento. Il calcolo viene condotto nel discreto, considerando la struttura come un insieme di nodi-aste.

Lo stato «0»

La tensostruttura ha una forma conseguente ad uno stato di presollecitazione iniziale ed alle condizioni geometriche al contorno.

La ricerca di questo stato iniziale di partenza viene fatta usufruendo delle condizioni di equilibrio scritte per ogni nodo della schematizzazione nodi-aste

della struttura continua, in accordo con la teoria illustrata nel volume cui si fa riferimento nella nota della Premessa.



Il modello matematico che risolve il problema dello stato «0» è rappresentato dalla (1)

$$\sum \bar{S}_{ki} + P_k^0 = 0 \quad (1)$$

dove:

\bar{S}_{ki} = sforzo nell'asta k_i generica in stato «0»

P_k^0 = carico applicato al nodo k in stato «0»

La sommatoria è estesa a tutte le aste concorrenti del nodo generico k .

La ricerca di stato «0» ha richiesto una modellazione strutturale con 1320 nodi a 3 G.D.L. e 2468 aste. Con il programma interattivo grafico RETE sono stati ottenuti e graficati i risultati della sequenza interattiva di progetto (fig. 4).

Lo stato di caricamento

La variazione di stato di sollecitazione nella tensostruttura, in conseguenza delle varie fasi di carico considerato, è stata ottenuta mediante il programma TENSO che risolve il modello matematico basato sul metodo dell'equilibrio seguendo la procedura iterativa alla Newton-Raphson espressa in forma sintetica dalla (2)

$$[k] \times \{\delta_k\}^r = \{P_k\} - \{P_k^*\}^{r-1} \quad (2)$$

dove:

$[k]$ = matrice di rigidezza globale ($[k] = [k_G] + [k_E]$)

$\{\delta_k\}^r$ = vettori degli spostamenti ottenuti alla r -esima iterazione

$\{P_k\}$ = carico applicato al nodo k

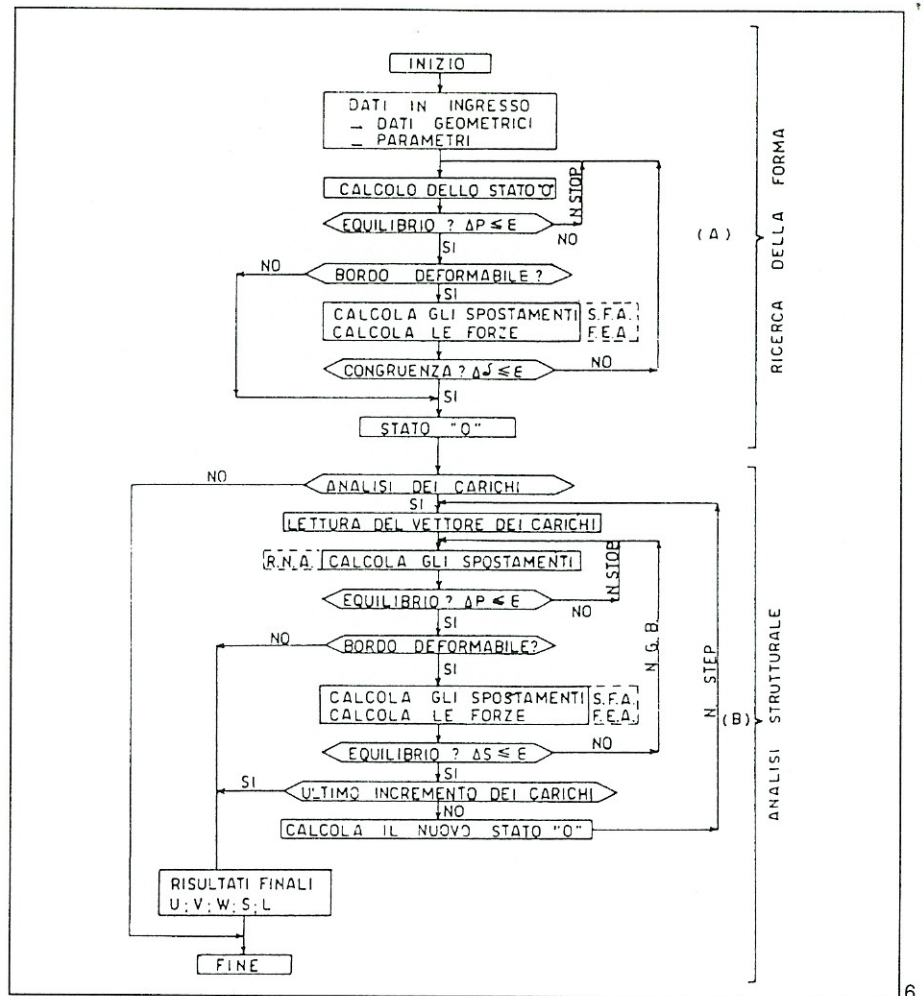
$\{P_k^*\}^{r-1}$ = carico fittizio dei termini non lineari.

La matrice di rigidezza riferita al sistema globale è espressa dalla relazione riportata a piè pagina, dove:

S^0 = sforzo di presollecitazione

c_x = coseno direttore dell'asta secondo x

E = modulo elastico dell'asta



A = area dell'asta
l = lunghezza dell'asta

Fig. 6. Schematizzazione del flusso logico del programma di calcolo.

Il procedimento numerico di risoluzione adottato per il sistema di equazioni non lineari che deriva dall'assemblaggio delle matrici elementari (1) è di tipo semi-incrementale per quanto riguarda i carichi e la non linearità materiale; mentre è di tipo iterativo per quanto attiene alla non linearità geometrica. La tensostruttura per definizione non ammette stato di sollecitazione di

$$[\bar{k}^G + \bar{k}^E] = \frac{AE}{l} \begin{bmatrix} \frac{S^0}{AE} + c_x^2 & c_x c_y & c_z c_x & -\frac{S^0}{AE} - c_x^2 & -c_x c_y & -c_z c_x \\ c_x c_y & \frac{S^0}{AE} + c_y^2 & c_z c_y & -c_x c_y & -\frac{S^0}{AE} - c_y^2 & -c_z c_y \\ c_z c_x & c_z c_y & \frac{S^0}{AE} + c_z^2 & -c_x c_z & -c_y c_z & -\frac{S^0}{AE} - c_z^2 \\ -\frac{S^0}{AE} - c_x^2 & -c_x c_y & -c_x c_z & \frac{S^0}{AE} + c_x^2 & c_y c_x & c_x c_z \\ -c_x c_y & -\frac{S^0}{AE} - c_y^2 & -c_z c_y & c_x c_y & \frac{S^0}{AE} + c_y^2 & c_z c_y \\ -c_z c_x & -c_z c_y & -\frac{S^0}{AE} - c_z^2 & c_x c_z & c_y c_x & \frac{S^0}{AE} + c_z^2 \end{bmatrix}$$

compressione ($S < 0$). Ad ogni incremento di carico il programma controlla le sollecitazioni per ogni asta e, in caso di $S_{ki} < 0$, l'asta viene tolta con opportuna modifica della matrice locale di rigidità tangente. Il programma di calcolo perciò è strutturato in modo da seguire l'andamento carichi-deformazioni in regime unilaterale di sforzi. Il flusso logico del programma di calcolo è schematizzato nella Flow-Chart di figura 6.

La modellazione strutturale per l'analisi statica è stata eseguita su una mesh ridotta usufruendo, quando possibile, delle condizioni di simmetria. La configurazione hardware sulla quale sono stati implementati i programmi interattivi di analisi strutturale è la seguente:

CPU Olivetti - AT & T 3B2-400 mini computer
 Video Display Olivetti - AT & T DMD 5620
 Plotter Calcomp 1042.

I risultati di calcolo

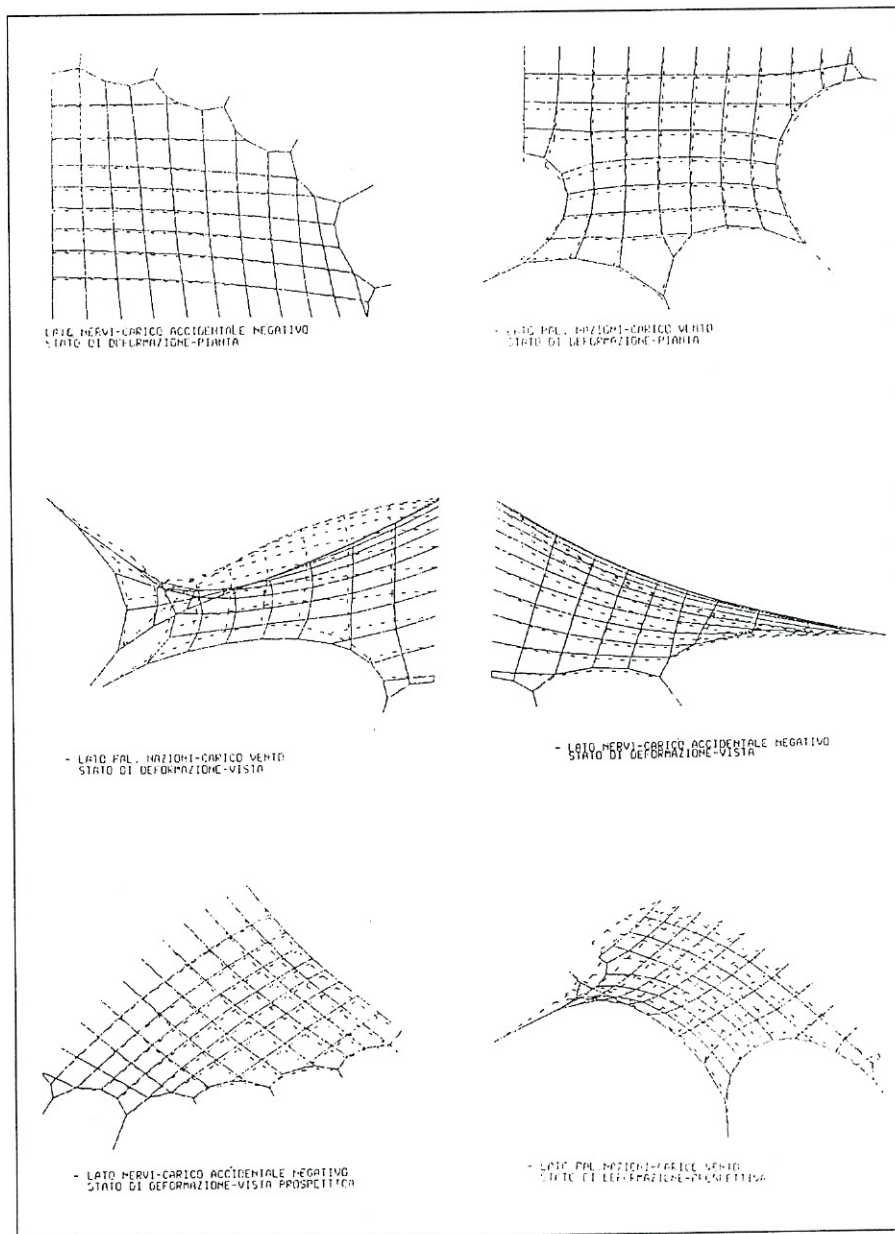
I risultati di calcolo, ottenuti per le combinazioni di carico considerate, sono qualitativamente valutabili, in termini deformativi, dalle graficazioni di figura 7.

Allo scopo di svolgere le verifiche di resistenza si raccolgono nella seguente tabella gli sforzi massimi ottenuti negli elementi strutturali:

dove:

- SP = Sforzo fune portante nell'asta n. 35
- SS = Sforzo fune stabilizzante nell'asta n. 34
- SS' = Sforzo nell'asta di collegamento tra fune stabilizzante e ancoraggio (L = locale)
- ST = Sforzo nei tiranti di collegamento
- SC = Sforzo nella colonna (L = locale).

Combinazione	SP [kN]	SS [kN]	SS' [kN]	ST [kN]	SC [kN]
A	2 305 / 35	1 296 / 34	890 / L	96 / 22	-1 163 / L
B	2 644 / 35	197 / 34	135 / L	127 / 22	-1 319 / L
D	2 316 / 35	1 330 / 34	914 / L	95 / 22	-1 176 / L



Nelle foto a corredo dell'articolo è possibile seguire la sequenza costruttiva e di montaggio, ed è inoltre illustrato il risultato finale che ha pienamente rispettato gli obiettivi previsti nelle ipotesi iniziali di progetto.

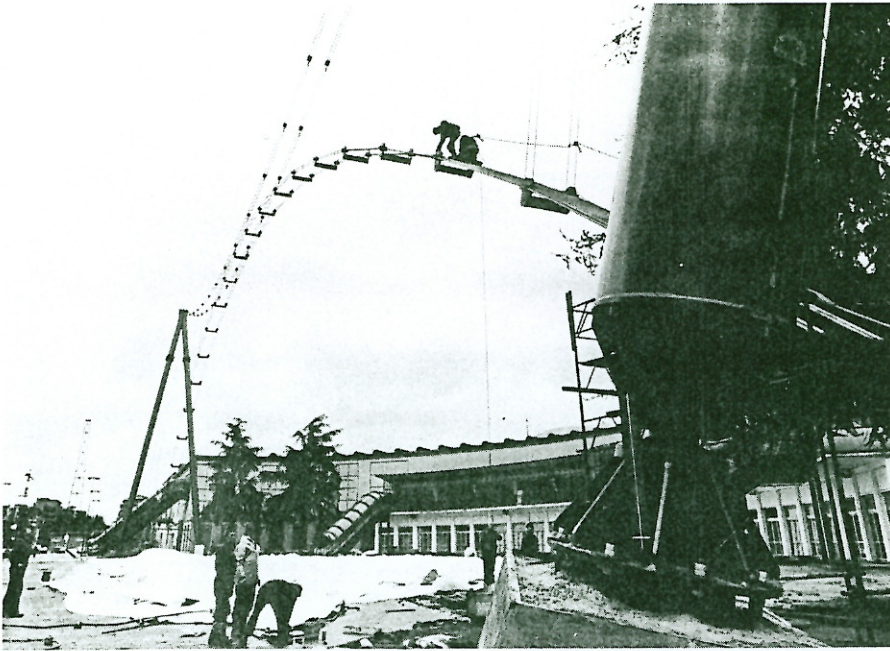
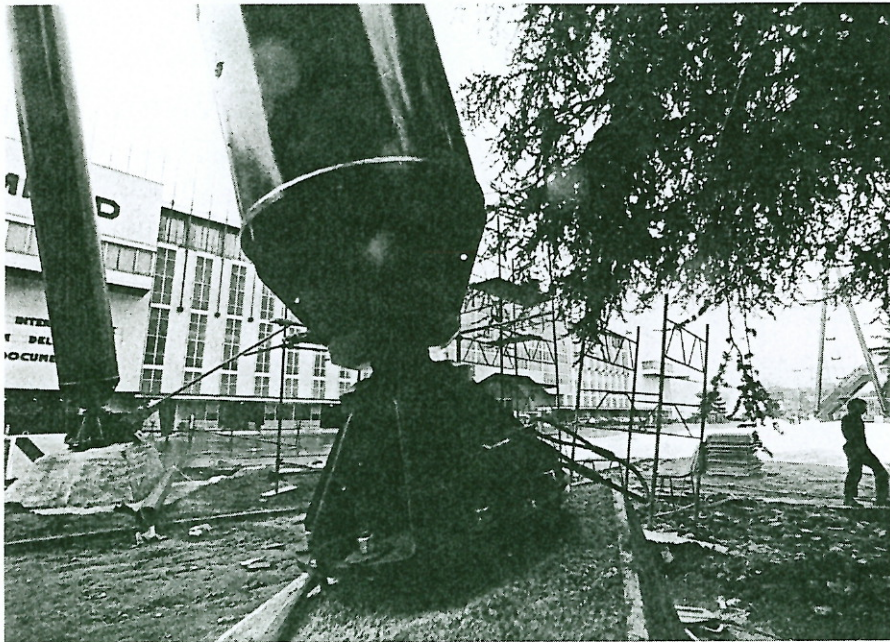


Fig. 7. Plotterizzazione dello stato di deformazione della membrana.

Fig. 8. Montaggio del sistema strutturale principale: tensostruttura e cavalletti di ancoraggio.

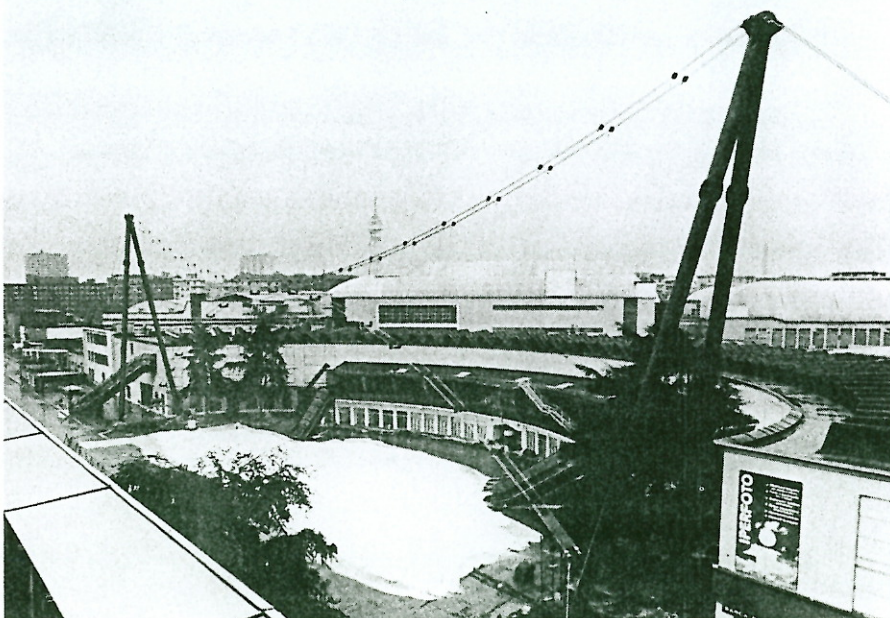
Fig. 9. Base dei piloni con vincolo a cerniera sferica.

Fig. 10. Distensione a terra della membrana.



8

9



10

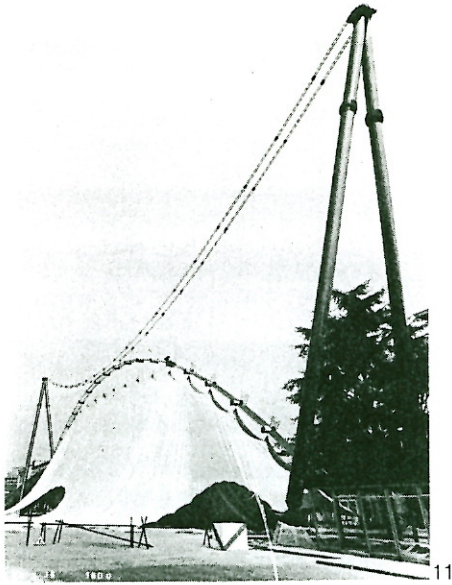


Fig. 11. Sollevamento centrale della membrana.

Fig. 12. Collegamento della membrana in corrispondenza dei punti di ancoraggio sul Palazzo delle Nazioni.

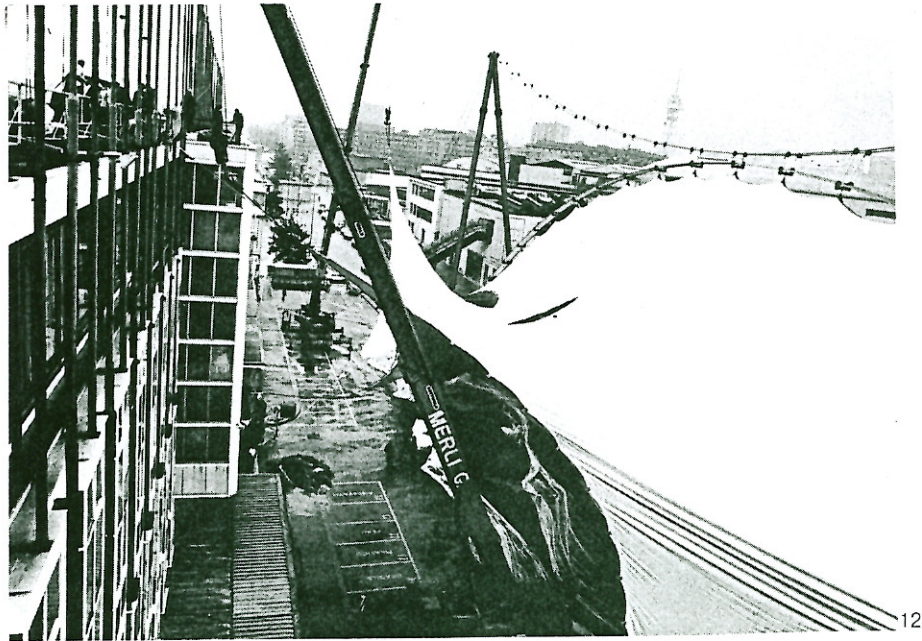


Fig. 13. Montaggio eseguito e particolare di tiro delle funi stabilizzanti.

Fig. 14. Particolare di ancoraggio delle funi portanti.

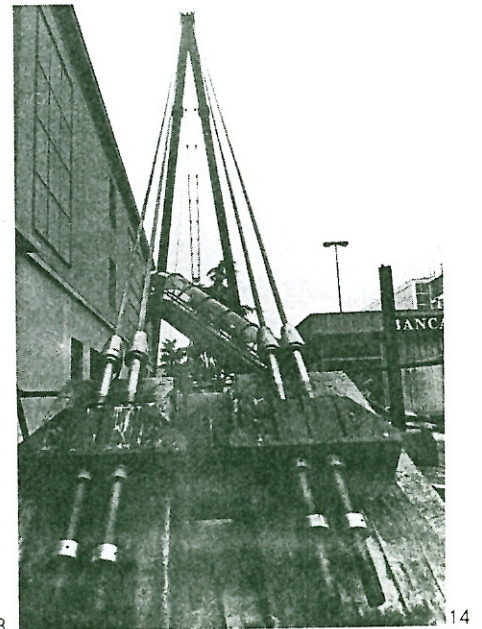
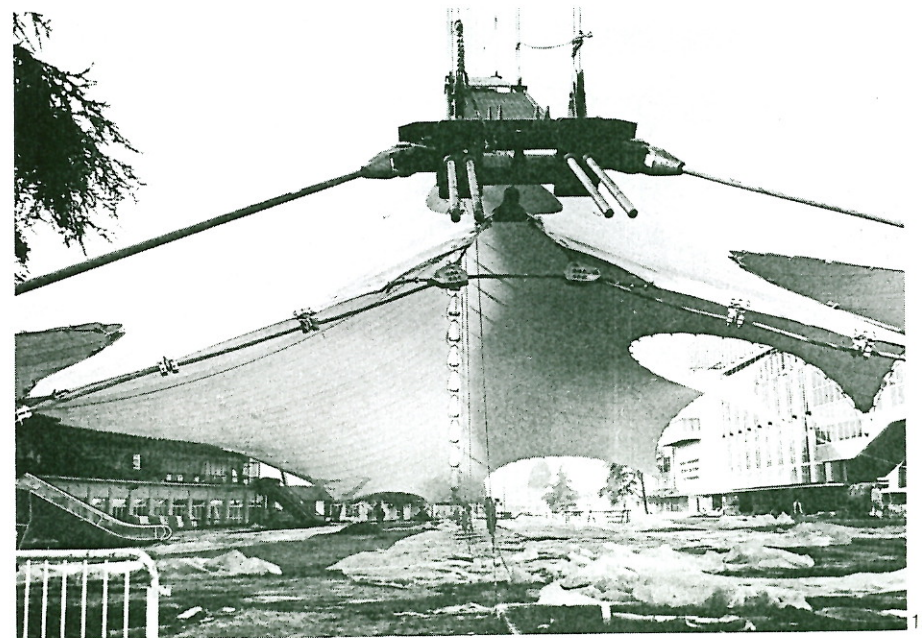
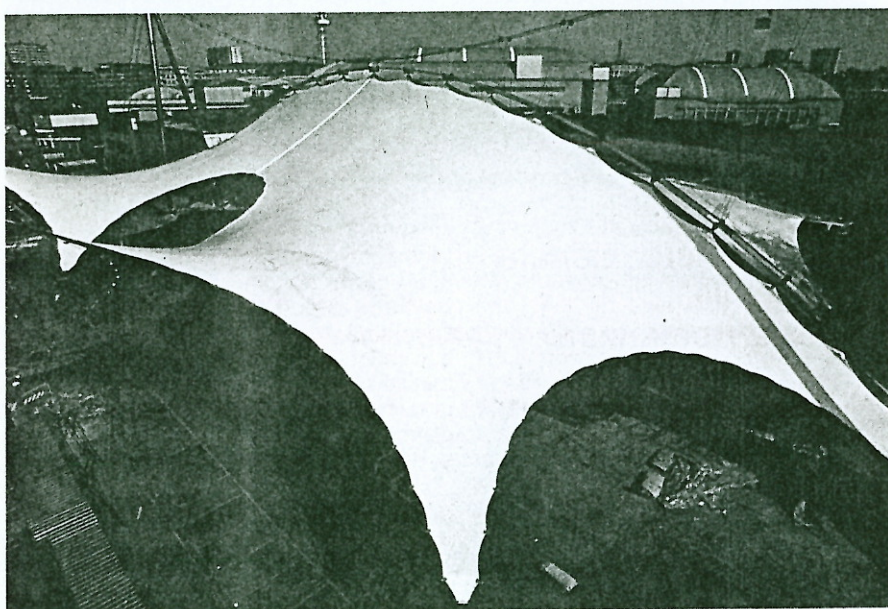




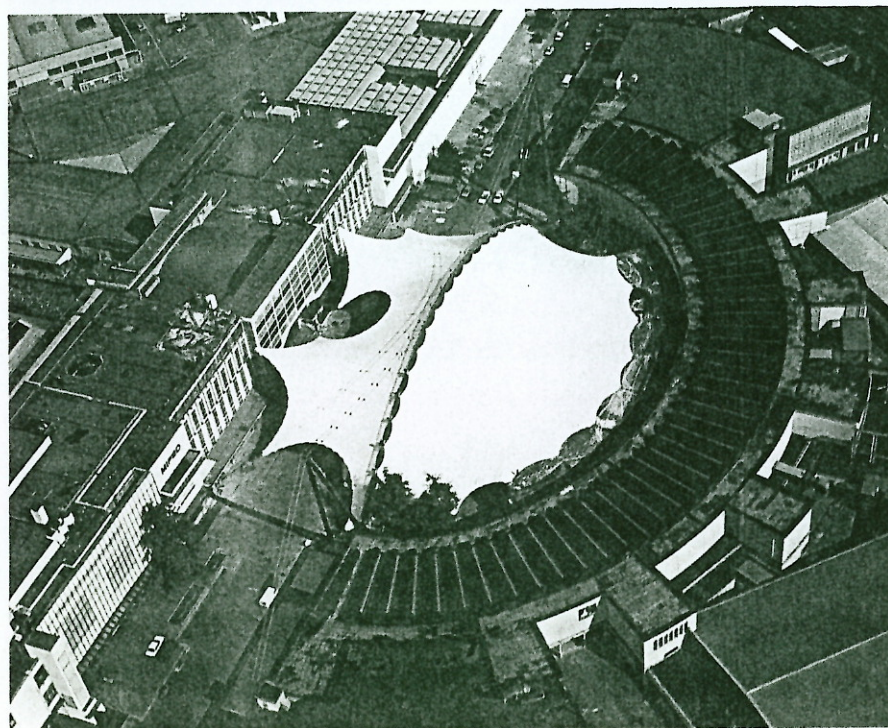
Fig. 15. La tensostruttura copre i 6 000 m² del Piazzale Italia.

Fig. 16. La soluzione adottata riprende la tecnica costruttiva dei ponti sospesi. La membrana della copertura è infatti appesa ad un ordito di cavi contrapposti e presollecitati, che a loro volta gravano su un sistema di ancoraggio contrapposto da due coppie di piloni in tubi di acciaio.

Fig. 17. Vista aerea. La tensostruttura della Grande Fiera d'Aprile costituisce un significativo modello progettuale reso possibile da un razionale impiego dell'acciaio quale materiale da costruzione.



15



16

Progetto ed esecuzione

Committente: Ente Autonomo per la Fiera di Milano.

Progetto vincente del Concorso per idee: Plasteco S.p.A., Milano - Studio tecnico Majowiecki & Associati, Bologna.

Coordinatore per conto dell'Ente Fiera: arch. Luciano Sgalbazzi, Milano.

Progettazione strutturale: ing. Luigi Antoniotti (c.a.), Milano - prof. ing. M. Majowiecki (strutture metalliche e tensostrutture).

Direzione lavori: ing. Luigi Antoniotti.

Collaudatore statico: prof. ing. Pietro Matildi, Bologna.

Appaltatore generale e costruttore della membrana: Canobbio S.p.A., Milano (Consulente: H. Muhlberger).

Tensostrutture: Redaelli Tecna S.p.A., Cologno Monzese (Milano).

Installazione: Tensotec S.r.l., Cologno Monzese (Milano).

Tubi saldati per le due coppie di piloni: Nuova Italsider, Genova (produzione Taranto).

Carpenteria metallica: CO.ME.F. Prefabbricati S.r.l., Garbagnate

17 Milanese (Milano).