

Coperture a tenda in acciaio e tessuto ad alta resistenza: aspetti della progettazione ed esempi di realizzazioni

Ing. Massimo Majowiecki, Bologna

Premessa

Negli ultimi tempi si è notata una diffusione sempre maggiore d'impiego di strutture leggere per coperture ad uso sportivo, industriale e fieristico.

I motivi principali dello sviluppo di questo tipo di strutture sono: il basso costo rispetto alle strutture tradizionali e la rapidità d'esecuzione.

La struttura a tenda si colloca tra le strutture convenzionali e le strutture pneumatiche.

Dalle prime ha adottato le strutture in acciaio altamente prefabbricabili e di rapido montaggio, dalle seconde il materiale che costituisce il manto di copertura.

Con questa combinazione si è potuto ottenere una struttura notevolmente leggera e versatile; basti pensare che il materiale costituente la struttura di copertura pesa 1 kg/m^2 e che la struttura in acciaio pesa da 5 a 10 kg/m^2 , a seconda delle dimensioni e schemi strutturali.

I pesi e, in questo caso, anche i volumi ridotti, facilitano il trasporto ed inoltre accelerano e semplificano il montaggio. La leggerezza della copertura per di più dona una importante caratteristica a questo tipo di strutture: la convertibilità.

Diversi progetti, specialmente nel campo sportivo, sono stati molto apprezzati dando l'opportunità di coprire e scoprire stagionalmente gli impianti.

Nel campo sportivo questo tipo di strutture è destinato a sostituire le strutture pneumatiche largamente usate per il loro basso costo.

Il maggior onere delle strutture a tenda viene compensato dalla mancanza di costi di gestione rispetto a quelle pneumatiche e dalle migliori condizioni ambientali.

Nel campo industriale le strutture a tenda vengono frequentemente usate per deposito merci.

Altro campo di larga applicazione è quello fieristico e turistico-alberghiero.

Nella presente nota si illustra qualche applicazione di queste strutture impiegate per coperture di caselli autostradali, coperture per campi da tennis e mostre di autoveicoli.

Caselli autostradali. Descrizione

Il progetto architettonico è stato sviluppato dallo studio B.B.P.R. di Milano.

Il progetto è risultato vincitore, dopo l'esame della commissione appaltante della Società Autostrada della Valdastico, per le sue caratteristiche economiche, estetiche e di rapidità d'esecuzione e di montaggio.

Da quanto si può osservare dalla figura 1, la struttura di sostegno della copertura è costituita da archi metallici parabolici, di sezione variabile per meglio assorbire gli sforzi flessionali, ed incastrati alle imposte.

L'interasse degli archi è di 5,80 m.

Gli archi sono realizzati mediante l'accoppiamento di 2 UNP 180.

Le caratteristiche geometriche variabili della sezione resistente sono state ottenute distanziando i due UNP mediante due piatti disposti nel piano dell'arco, sagomati e saldati alle ali dei profilati.

La sezione è, così, di tipo chiuso, idonea anche ad assorbire eventuali momenti torcenti.

Lateralmente gli archi vengono stabilizzati collegandoli in chiave ed alle reni con dei profilati tubolari sagomati, anch'essi ad arco di parabola, di luce 5,80 m e freccia 0,60 m.

La copertura vera e propria che ha come sostegno i suddetti archi è costituita da una membrana a doppia curvatura (curvatura totale o Gaussiana negativa), realizzata con rete in poliestere ad alta resistenza ricoperto di PVC sui due lati di colore verde all'estradosso e bianco all'intradosso.

La forma della membrana determinata e plotterizzata mediante l'impiego di un calcolatore elettronico C.D.C. 6600, è stata ottenuta imponendo l'equilibrio nel discreto di un sistema di aste e nodi che hanno come condizione al contorno la quota d'appoggio sugli archi parabolici.

Le densità degli sforzi di membrana sono state fissate nel rapporto 1-4 tra strisce stabilizzanti e portanti.

La curva di bordo sghemba viene realizzata con una fune di acciaio $\varnothing 12 \text{ mm}$ zincata.

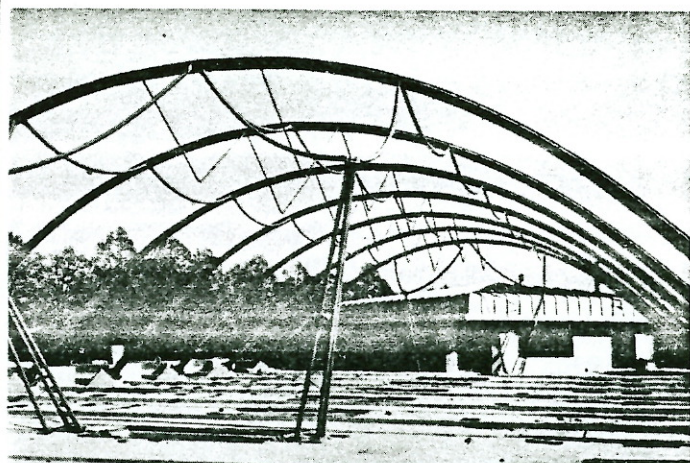


Fig. 1. La struttura metallica dei caselli dell'autostrada della Valdastico: archi parabolici collegati tra loro con profilati tubolari, anch'essi parabolici, puntoni inclinati.

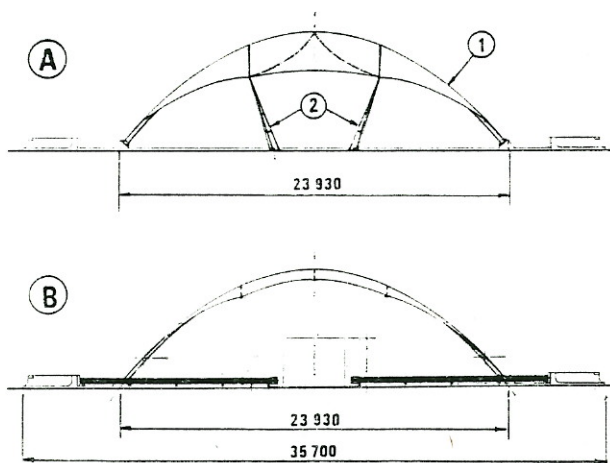


Fig. 2. Schema della struttura. (A) Alzato di un arco terminale. (B) Sezione di un arco intermedio. (1) Arco metallico parabolico. (2) Puntoni.

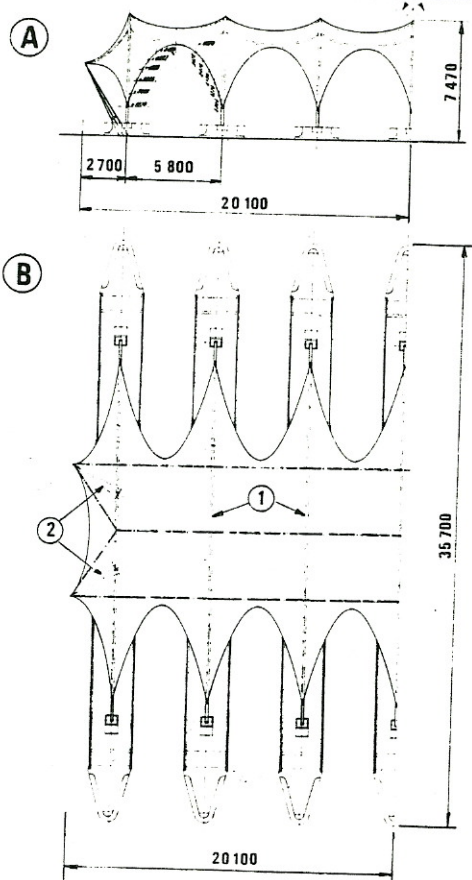
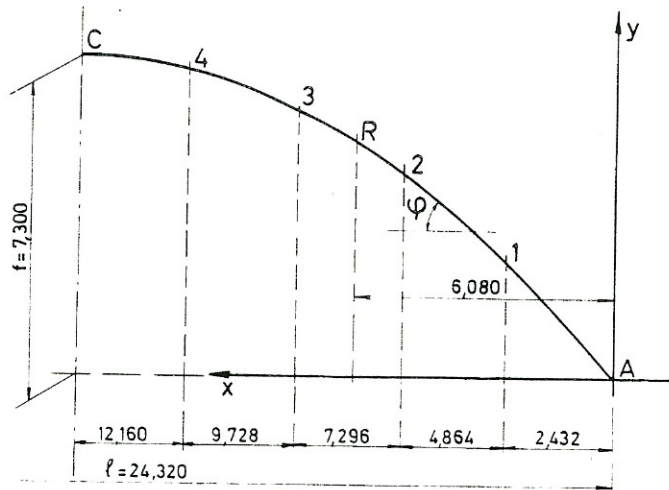


Fig. 3. Schema della struttura. (A) Semi-alzato laterale. (B) Semi-vista in pianta. (1) Archi parabolici. (2) Puntoni.



	A	1	2	R	3	4	C
x	0	2,432	4,864	6,080	7,296	9,728	12,16
y	0	2,628	4,672	5,475	6,132	7,008	7,30
φ	$50^{\circ}12'$	$43^{\circ}50'$	$35^{\circ}45'$	$30^{\circ}59'$	$25^{\circ}38'$	$13^{\circ}30'$	0°
$\sin \varphi$	0,7683	0,6926	0,5842	0,5148	0,4326	0,2334	0
$\cos \varphi$	0,6401	0,7214	0,8116	0,8573	0,9016	0,9724	1
$\operatorname{tg} \varphi$	1,2002	0,9601	0,7199	0,6005	0,4798	0,2401	0

Fig. 4. Caratteristiche geometriche di un arco parabolico.

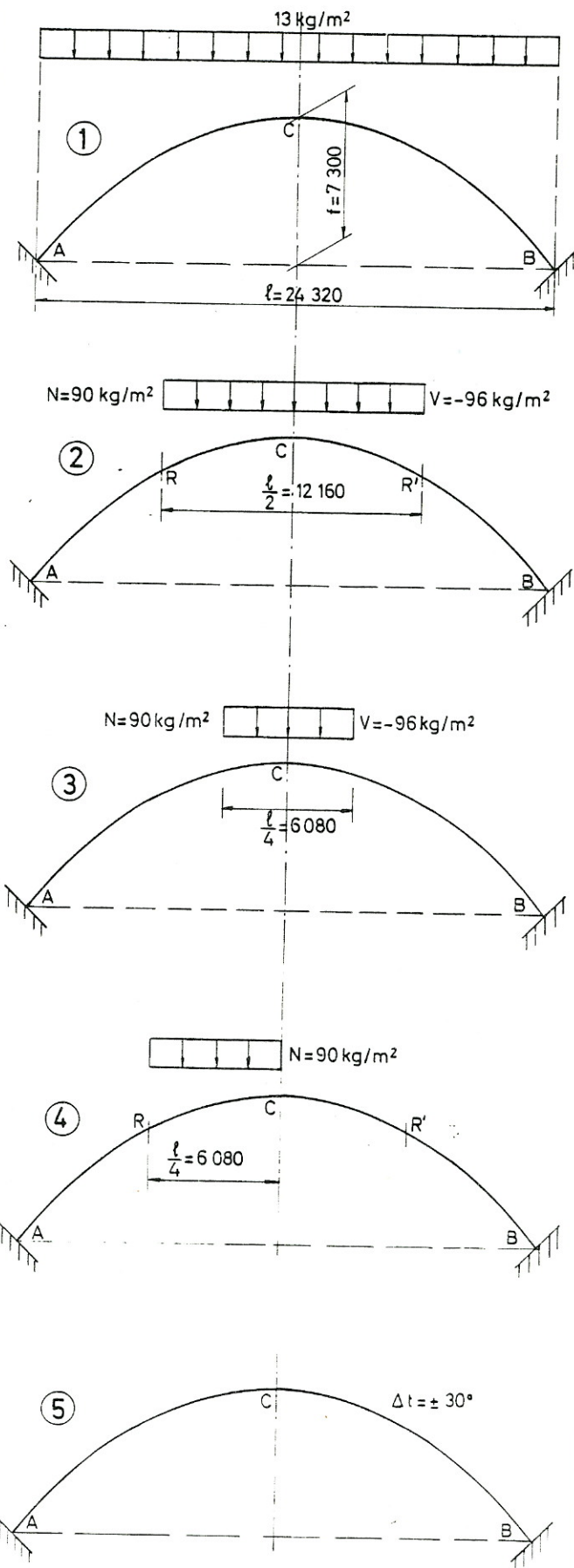


Fig. 5. Condizioni di carico degli archi parabolici. (1) Peso proprio (arco 10 kg/m^2 + membrana 3 kg/m^2). (2) Neve (N) o vento ($V = -1,2 \times 80 \text{ kg/m}^2$) sulla metà superiore dell'arco. (3) Neve (N) o vento (V) sul quarto superiore. (4) Neve (N) dissimmetrica. (5) Variazioni di temperatura. Vedere la combinazione di questi carichi nella Tabella 1.

Risultati del calcolo e ricerca automatica della configurazione geometrico-tensionale della membrana sono allegati alla presente relazione.

La copertura termina da ambo i lati con un elemento sempre a doppia curvatura che si appoggia all'arco metallico e si ancora poi a due mensole realizzate in traliccio tubolare.

L'elemento modulare terminale è stato anch'esso calcolato automaticamente ed i risultati sono allegati.

Gli sforzi trasmessi dalle strutture in elevazione vengono portati a terra mediante fondazioni in cemento armato calcolate in modo da evocare piccoli spostamenti e perciò tensioni modeste sul terreno di riporto.

Le fondazioni dell'arco (4,00 × 2,00 × 0,95 m), sempre cautelativamente sono state collegate con un tirante Ø 22 protetto con calcestruzzo armato.

Le mensole terminali portano a terra gli sforzi mediante una fondazione di 4,50 × 2,00 × 1,35 m d'ingombro.

Il calcolo degli archi metallici

Lo schema teorico di calcolo adottato è quello di arco parabolico a sezione variabile incastrato alle imposte.

L'incastrato alla base permette la stabilizzazione fuori dal piano dell'arco e ciò si traduce in un fattore di grande utilità per il comportamento di insieme e per la rapidità di montaggio.

I risultati nelle varie fasi di calcolo sono illustrati nella seguente tabella dove compare la combinazione dei carichi accidentali che produce il massimo momento nelle sezioni di calcolo.

Ottenuti questi risultati si è eseguita la verifica statica dell'arco.

In definitiva, l'arco è stato realizzato con 2 UNP 180 formanti una sezione scatolare (□) collegati (figg. 7 e 8), mediante saldatura, direttamente dalla sezione di chiave fino a quella delle reni, e quindi fino alla sezione d'imposta, mediante l'interposizione di due piatti di 8 mm di spessore in modo da avere all'imposta fra intradosso ed estradosso la distanza di 300 mm.

Calcolo della membrana di copertura

La copertura sospesa sugli archi è costituita da una rete di poliestere rinforzato, ricoperto da ambo i lati con PVC colorato di verde all'estradosso e bianco all'intradosso.

La resistenza a rottura (trazione) di questo materiale è di 350 kg/5 cm con spessore di 0,9 mm ed un peso di 1100 g/m².

La membrana di copertura che si appoggia lungo le fron-

tiere trasversali, paraboliche degli archi, e sulle curve di bordo perimetrali è stata definita geometricamente mediante l'ausilio di un calcolatore elettronico che, dopo aver risolto il sistema di equazioni non lineari derivanti dalle condizioni di equilibrio dell'insieme nodi-aste schematizzante la struttura membranale, ci fornisce i risultati plotterizzati (fig. 9).

La superficie membranale presenta in ogni punto una curvatura totale negativa che instaura in ogni punto ed in ogni condizione di carico uno stato di equilibrio di soli sforzi di trazione.

I tamponamenti laterali ottenuti nello stesso modo, graficati dal calcolatore, sono illustrati nella figura 10.

Le equazioni di equilibrio che risolvono il nostro problema si presentano nella seguente forma:

$$\begin{cases} \sum_1^{m_k} \frac{S_{ki}^0}{L_{ki}^0} \Delta x_{ki}^0 = p_{xk}^0 \\ \sum_1^{m_k} \frac{S_{ki}^0}{L_{ki}^0} \Delta y_{ki}^0 = p_{yk}^0 \\ \sum_1^{m_k} \frac{S_{ki}^0}{L_{ki}^0} \Delta z_{ki}^0 = p_{zk}^0 \end{cases} \quad (1)$$

dove:

$$\Delta x_{ki}^0 = x_k^0 - x_{ki}^0, \quad \Delta y_{ki}^0 = y_k^0 - y_i^0, \quad \Delta z_{ki}^0 = z_k^0 - z_i^0$$

$$L_{ki}^0 = \sqrt{(\Delta x_{ki}^0)^2 + (\Delta y_{ki}^0)^2 + (\Delta z_{ki}^0)^2}$$

x_k^0, y_k^0, z_k^0 = coordinate del punto interno generico k nella fase 0,

S_{ki}^0 = sforzi nell'asta k_i nella fase 0,

L_{ki}^0 = lunghezza dell'asta k_i nella fase 0,

$p_{xk}^0, p_{yk}^0, p_{zk}^0$ = componenti del carico nella fase 0 secondo le direzioni x, y e z rispettivamente.

Le relazioni (1) vengono scritte per ogni nodo interno dandoci così $3n$ equazioni, essendo n il numero di nodi interni « liberi ». Globalmente in tutta la struttura abbiamo in maniera compatta:

$$[A]\{S\} = \{P\} \quad (2)$$

dove S è il vettore degli sforzi, A è la matrice dei coseni direttori degli elementi (aste) e P è il vettore dei carichi. Le incognite globali del problema sono gli m_k valori degli

Tabella 1. Combinazione dei carichi che forniscono i momenti massimi nelle diverse sezioni degli archi parabolici.

Sezione	M_{\max} (kgm)	Condizioni di carico	N (kg)	T (kg)
A	3 780	① + ②(vento) + ④ + ⑤ (-30°)	+ 1 190	+ 1 500
1	1 140	① + ④ + ⑤ (-30°)	- 4 270	- 720
2	1 660	① + ②(vento) + ⑤ (+30°)	+ 4 610	- 130
R	2 240	① + ③(vento) + ④	- 800	- 910
3	2 800	① + ③(vento) + ④ + ⑤ (-30°)	- 420	- 580
4	2 170	① + ④ + ⑤ (-30°)	- 2 920	+ 500
C	1 820	① + ③(vento) + ⑤ (-30°)	+ 1 730	-

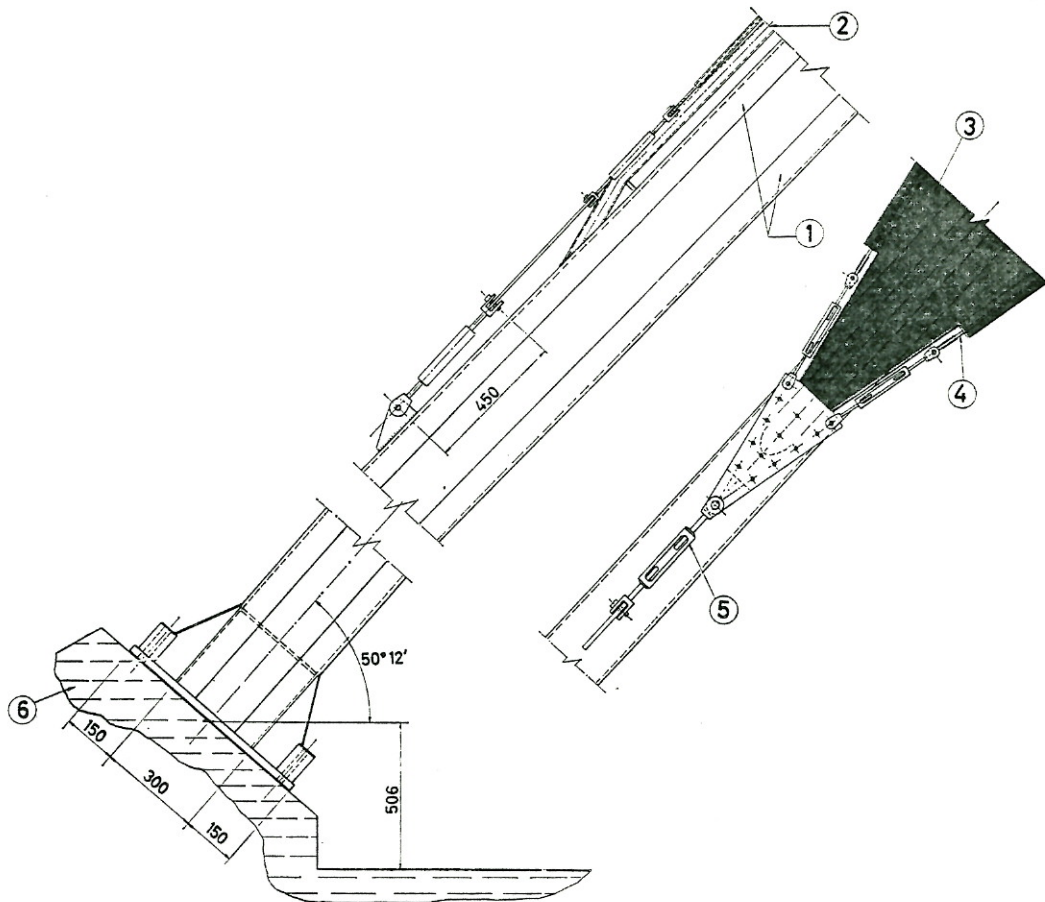


Fig. 6. Dettaglio della parte iniziale di un arco. Vista frontale e laterale. (1) Due UNP 180 collegati da piatti. (2) Tubo ovale $80 \times 40 \times 3$, sostenente la membrana di copertura. (3) Membrana. (4) Fune $\varnothing 12$ zincata. (5) Tenditore di acciaio inossidabile Hasselfors da $3/4''$.

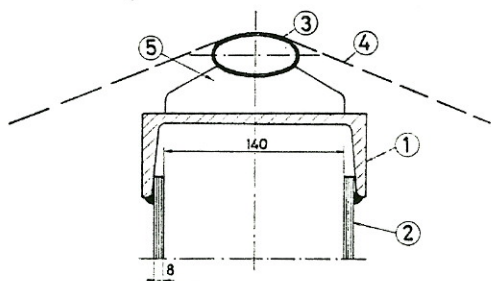


Fig. 7. Particolare dell'arco (semi-sezione trasversale) tra le reni e l'origine. (1) UNP 180. (2) Piatto da 8 mm di spessore. (3) Tubo ovale. (4) Membrana in PVC. (5) Sella d'appoggio del tubo, spessore 8 mm.

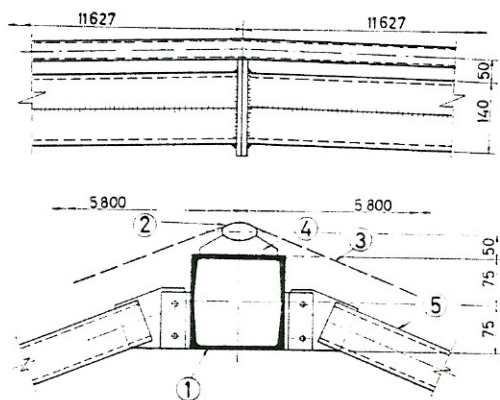


Fig. 8. Sezione trasversale dell'arco in chiave. (1) Due UNP 180 collegati testa a testa. (2) Tubo ovale. (3) Membrana. (4) Sella d'appoggio. (5) Tubo stabilizzatore collegante un arco con l'altro onde assicurare la stabilità laterale.

sforzi S_{ki} nelle aste e le $3n$ coordinate dei nodi interni. Le equazioni (1) possono essere risolte, una volta fissati gli sforzi S_{ki} nelle aste, richiedendo da un sistema di $3n$ equazioni non lineari le $3n$ incognite coordinate dei nodi.

Questo tipo di risoluzione è molto indicato per la ricerca della configurazione geometrica iniziale, quando le condizioni al contorno sono libere, ma incontra difficoltà nella risoluzione numerica, data la non linearità del sistema da risolvere.

Per facilitare la convergenza del procedimento iterativo un primo valore delle coordinate dei nodi può essere ottenuto dando dei valori arbitrari al rapporto $S_{ki}/L_{ki} = q_{ki}$. In questo modo si risolve un sistema lineare di equazioni ottenendo i valori della prima iterazione. Si ottiene così una notevole accelerazione della convergenza.

Il metodo iterativo usato per risolvere le equazioni di equilibrio si presenta come segue:

Ottenuto il primo risultato con la risoluzione del sistema linearizzato

$$[\Delta]\{q\} = \{p\},$$

dove con $[\Delta]$ si è indicata la matrice formata dalle differenze

$$\Delta x_{ki}^0; \Delta y_{ki}^0; \Delta z_{ki}^0 \quad \text{e con} \quad q_{ki} = \frac{S_{ki}}{L_{ki}}$$

il rapporto tra sforzo e lunghezza dell'asta k_i , si passa alla fase iterativa con a disposizione il primo set di soluzioni $(x^0; y^0; z^0; S^0; L^0)$.

Le ulteriori iterazioni sono ottenute col metodo delle successive sostituzioni. Con questo metodo il vettore dei carichi viene incrementato passo a passo e i termini non lineari vengono aggiornati ad ogni iterazione. In una iterazione (r) generica si avrà:

$$[A]^r\{S\}^r - \{P\} = \{\Delta P\}^r.$$

La sequenza iterativa viene continuata fino a quando lo squilibramento risulta $\{\Delta P\}' < \varepsilon$.

Nella pratica corrente sono frequenti dei vincoli di progetto nella definizione della rete formata dalle aste. Le condizioni restrittive più frequenti sono quelle di imporre sforzi o lunghezze costanti in un insieme di aste.

Nel caso specifico di una rete di funi significa avere delle funi dimensionate all'ottimo della resistenza nel caso di prescrizione di sforzi costanti lungo una linea e di prefabbricazione agevolata e facilità di montaggio nel caso di lunghezze costanti.

Se dopo aver ottenuto la geometria e lo stato di sollecitazione desiderati si vogliono introdurre delle condizioni restrittive sugli sforzi o sulle lunghezze delle aste cambian-

do il minimo possibile la geometria stessa di partenza, un metodo vantaggioso è quello di trovare la soluzione di compromesso mediante programmazione non lineare. Considerando di introdurre $r < m$ condizioni sulle lunghezze e sugli sforzi di r aste il problema di programmazione non lineare può essere presentato come segue:

— variabili: $\{x, y, z, S\}$

— funzione obiettivo:

$$f = \sum [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2] \rightarrow \min.$$

— vincoli: $g(x, y, z, S) = 0; S > 0$

dove x, y, z coordinate dei nodi (incognite)

x_0, y_0, z_0 coordinate dei nodi nella situazione iniziale nota

S sforzo nelle aste.

La funzione obiettivo ed i vincoli sono non lineari rispetto alle variabili e perciò la soluzione viene trovata mediante una sequenza di minimizzazione con l'opportuna scelta della funzione di penalizzazione.

I vincoli sono rappresentati dalle $3n$ equazioni di equilibrio e dalle r condizioni imposte agli sforzi ed alle lunghezze delle aste.

La progettazione interattiva calcolatore-ingegnere

Nella ricerca della superficie delle membrane è di notevole aiuto per la progettazione ottenere i risultati (output) plotterizzati dal calcolatore, rendendo così immediatamente visibile il risultato dei calcoli compiuti. Un vantaggio ancora maggiore è ottenibile usando un video-display che permette di visualizzare istantaneamente, mediante cine-scopio, quando un programma invia in output. Il vantaggio di un tale dispositivo è notevole se l'organizzazione strutturale del programma gode di un'appropriata organizzazione bidirezionale (può cioè ricevere informazioni e fornire risultati). Un programma elettronico, «strutturato bidirezionalmente», durante l'esecuzione delle operazioni che elaborano i valori noti può interrompere momentaneamente il calcolo, apportare modifiche ai dati e ripartire elaborando i nuovi valori.

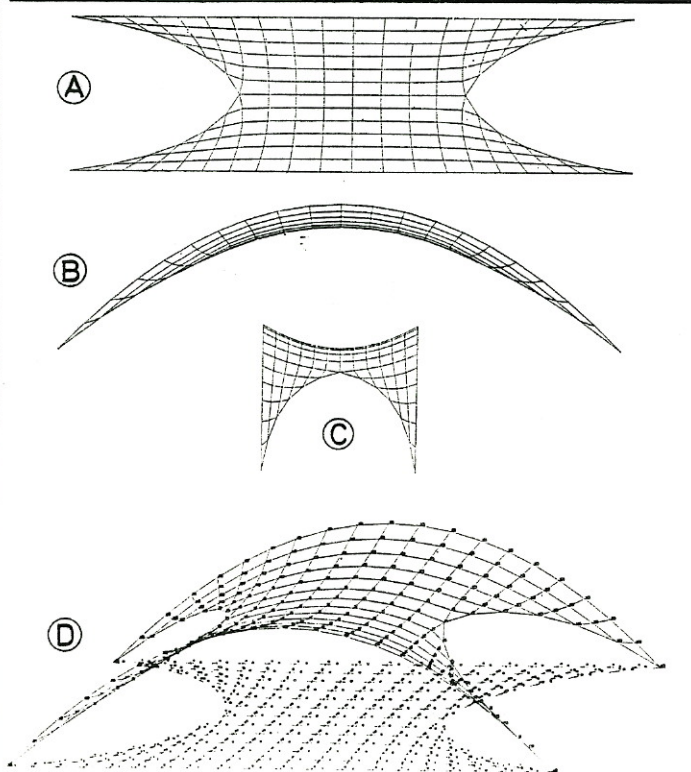


Fig. 9. Disegni della membrana di copertura tra due archi ottenuti al «plotter». (A) Vista in pianta. (B) Vista prospettica. (C) Vista di lato. (D) Prospettiva assonometrica.

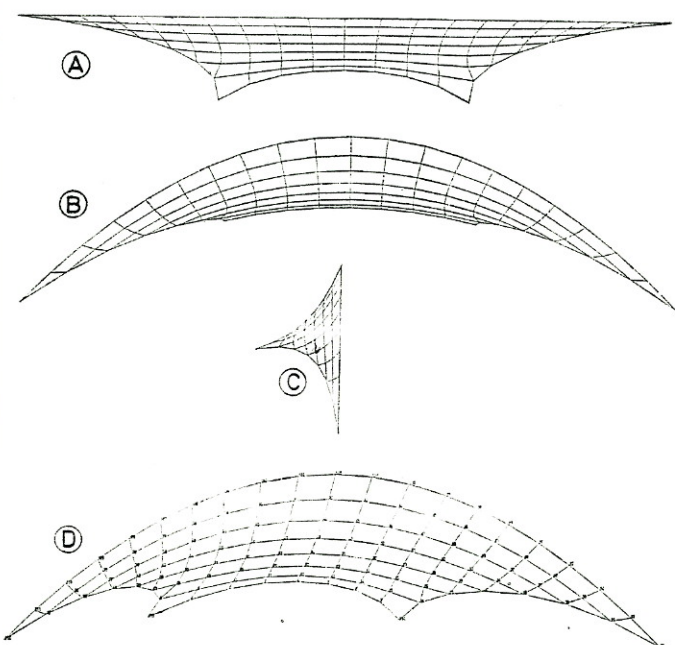


Fig. 10. Sagome analoghe della membrana relativa ai puntoni obliqui di estremità. (A), (B), (C) e (D). Vedere la figura 9.

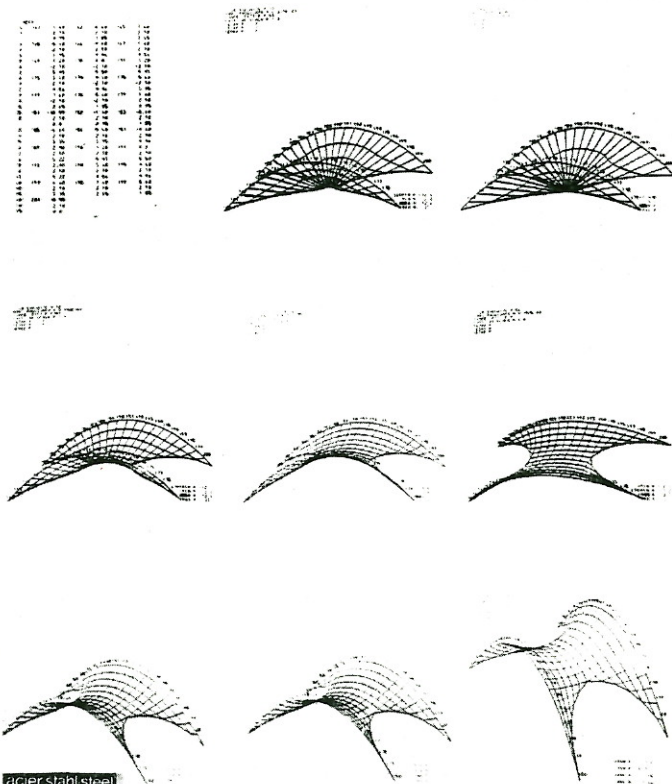


Fig. 11. Fasi successive (viste al video-display) della definizione della membrana in una sequenza interattiva.

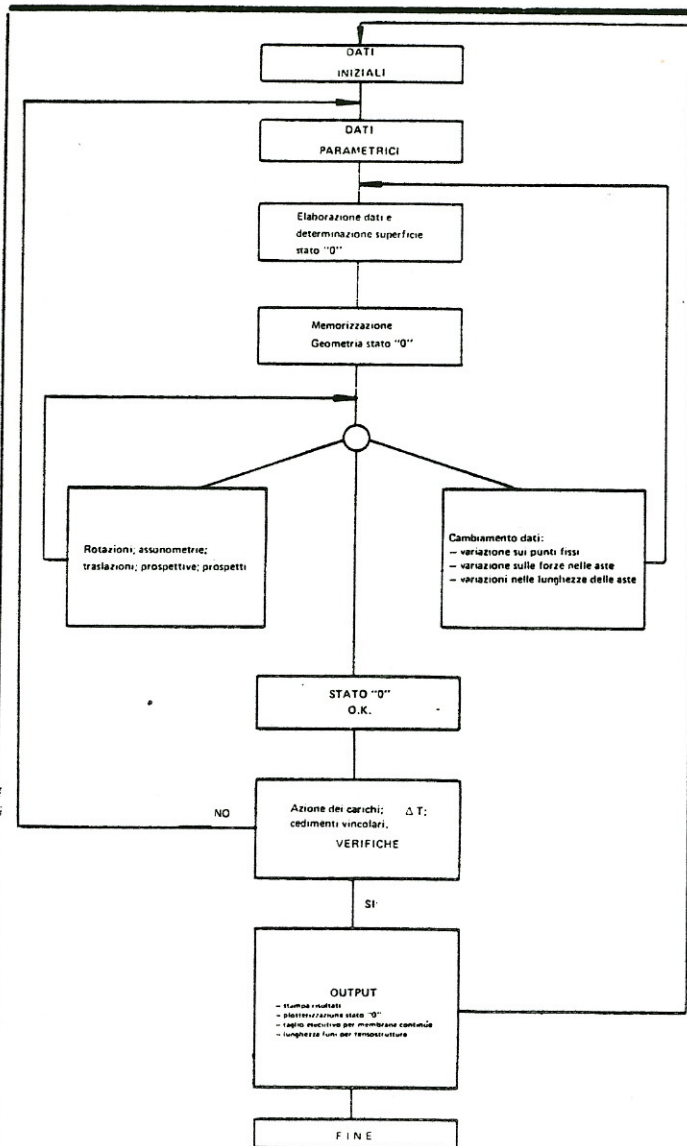


Fig. 12. Diagramma del programma elettronico utilizzato per il calcolo delle strutture leggere descritte in questo articolo.

Perché un tale programma possa funzionare, deve poter essere introdotto in un calcolatore interattivo, tale cioè che consenta di agire dall'esterno intervenendo su di esso quando lo si ritenga opportuno, secondo una tipica operazione di correzione, tentativo o verifica progettuale.

I calcolatori corredati di tali programmi non sono più solo degli strumenti, ma assumono la possibilità di essere interattivi in senso progettuale, divenendo aiuti intelligenti per pensare e risolvere un problema di ingegneria o di architettura. Il video-display diviene così il prolungamento strumentale e mentale dell'operatore, aumentando enormemente la capacità di progettazione ed offrendo inoltre la possibilità di trovare facilmente la soluzione ottimale. La progettazione della struttura dopo diversi tentativi è ottenibile in pochi minuti di progettazione interattiva con il calcolatore (fig. 12). Con il diagramma a blocchi della figura 11 si è schematizzato il funzionamento interattivo del programma di calcolo. Per illustrare una sequenza interattiva è stata visualizzata sul video la struttura modificata secondo le esigenze del progetto. La prima sequenza è riferita ad una struttura formata da contorni ad archi parabolici paralleli e dalla superficie d'equilibrio poggianti ad essi, dotata di due bordi liberi.

La seconda sequenza illustra la ricerca della superficie in equilibrio ancorata a punti discreti a differenti altezze. Nelle sequenze sono visualizzate alcune fasi interattive del calcolo, la scelta finale della forma geometrica con eventuali rotazioni. Su plotter si è ottenuta anche la graficazione delle sagome dei teli piani che, assemblati, forme-

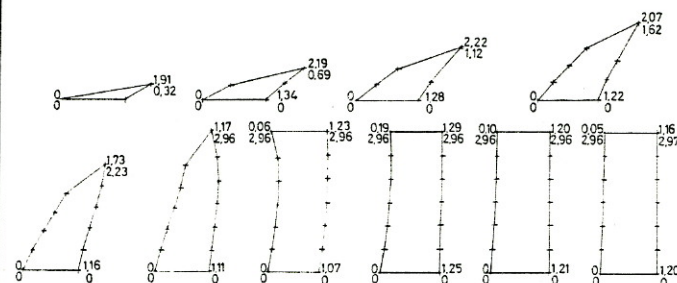


Fig. 13. Tracciamento dei diversi pezzi della membrana di copertura ottenuto automaticamente al «plotter».



Fig. 14. Copertura di campi da tennis.



Fig. 15. Padiglione per esposizione montato al Salone dell'Automobile di Torino.

ranno la superficie spaziale non sviluppabile della struttura (fig. 13).

Altre realizzazioni

Copertura per campi da tennis

Un impiego delle strutture a tenda che si è dimostrato più che soddisfacente è quello fatto nelle coperture di impianti sportivi e particolarmente per campi da tennis. La struttura, in questo caso, è di notevole portata: 45 m di luce e 18 m di interasse.

La struttura completa si presenta come nella figura 14.

Copertura smontabile per mostre

Un padiglione completamente prefabbricato e di facile montaggio è stato studiato per mostre di autoveicoli FIAT. Uno di questi padiglioni è stato montato al Salone dell'Automobile di Torino (fig. 15).

Progetto ed esecuzione (caselli autostradali)

Committente: Autostrada della Valdastico.

Progetto generale: Studio B.B.P.R., Milano.

Calcolo delle strutture: Ing. M. Majowiecki, Bologna.

Direzione dei lavori: Technital, Verona.

Impresa appaltatrice: Tensoitalia S.p.A., Fontanellato (Parma).