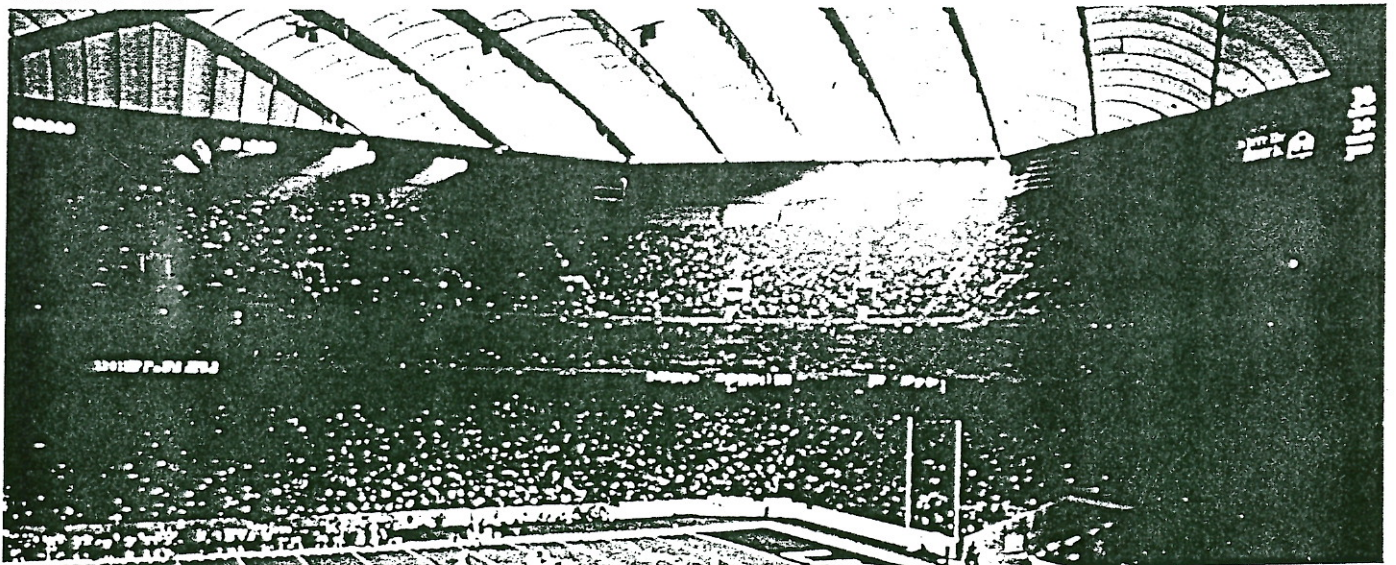
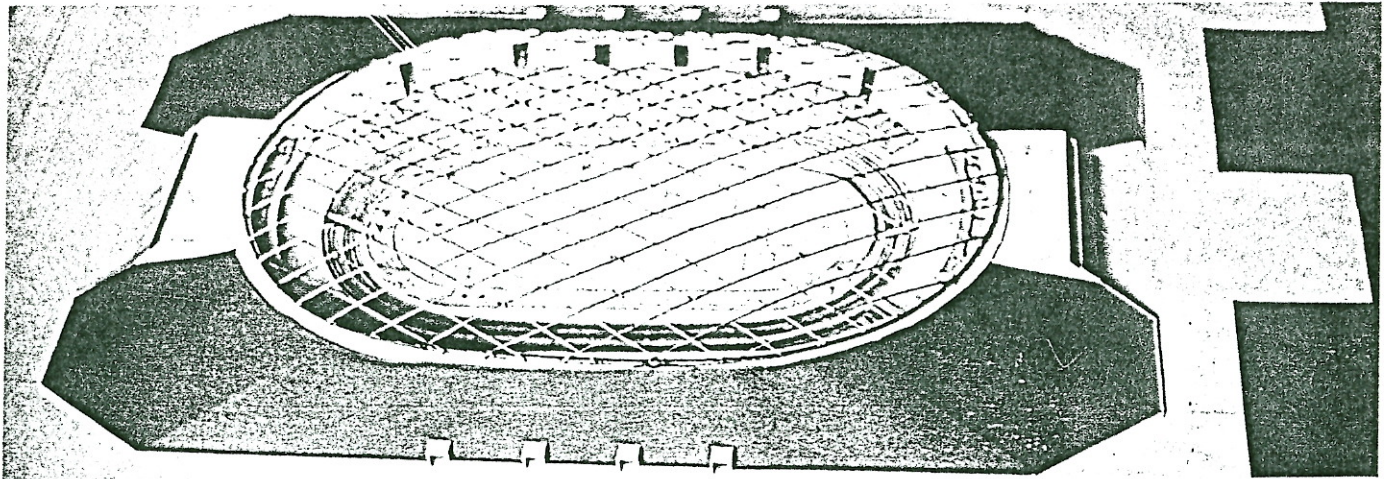
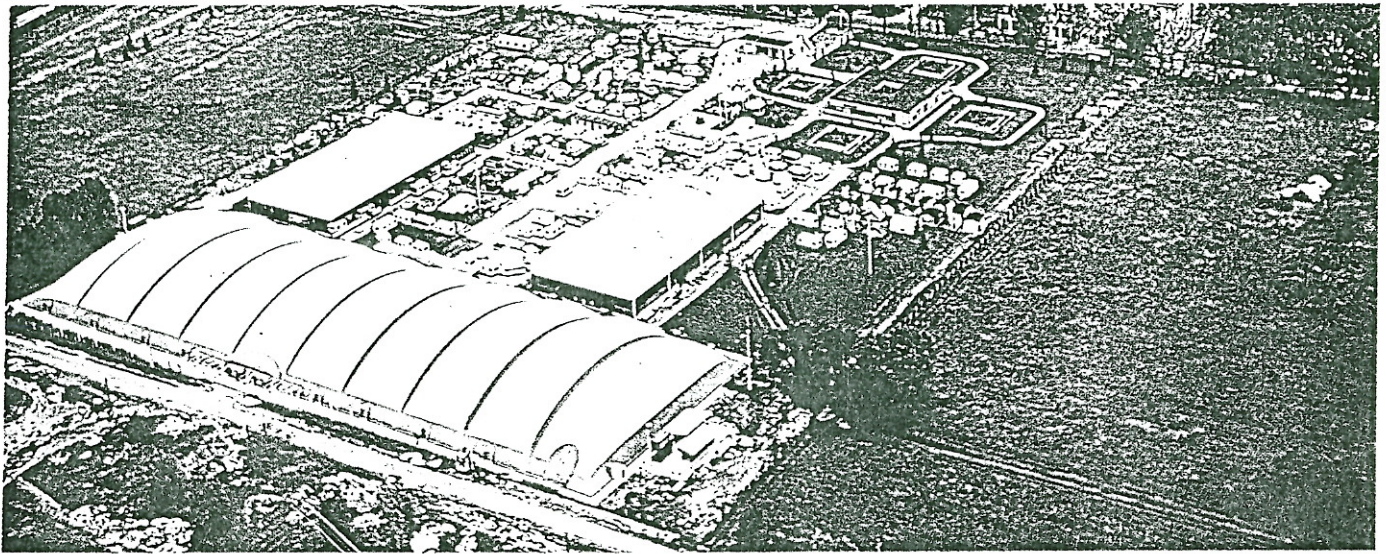


acciaio

edizione italiana di

acier-stahl-steel

9/1977



Strutture pneumatiche con funi di contenimento in acciaio per la copertura di grandi luci

Prof. David H. Geiger,
Geiger Berger Associates,
New York
Prof. Ing. Massimo Majowiecki,
Facoltà di Ingegneria,
Università di Bologna

Introduzione

In concomitanza con il Congresso Internazionale sulle strutture pneumatiche tenuto a Venezia dal 13 al 18 giugno 1977, con la presenza dei più autorevoli esponenti del campo, è scaturita l'intenzione degli Autori del presente articolo di procedere ad una illustrazione di alcune delle costruzioni più rappresentative realizzate negli ultimi anni.

Nella prima parte dell'articolo viene esposto brevemente un metodo teorico di progetto delle strutture pneumatiche.

La progettazione delle strutture pneumatiche viene affrontata con l'ausilio di macchine interattive quali il video display Tektronik 4010. Programmi di calcolo (*Pneuss*), anch'essi interattivi, sono stati strutturati in modo da permettere la preparazione automatica dei dati (*Prepne*) e out put grafici (*Pneuss Plot*).

Nella seconda parte dell'articolo vengono descritti diversi progetti e costruzioni già eseguite di notevole importanza in campo mondiale, quale la più grande copertura pneumatica del mondo realizzata a Detroit negli U.S.A.

A. Ricerca della configurazione geometrico-tensionale equilibrata della struttura pneumatica

A.1. Schematizzazione del problema (il modello discreto)

Per ovviare agli inconvenienti di convergenza e alle difficoltà di formulazione delle condizioni al contorno del modello continuo, offerti dalle equazioni di equilibrio in regime di membrana di un elemento infinitesimo di superficie, è opportuno riferirsi ad un modello matematico basato su elementi discreti piani assemblati in modo da formare la superficie pneumatica equilibrata.

A.2. L'elemento di superficie

Consideriamo un nodo generico $K = (X_k; Y_k; Z_k)$ appartenente alla superficie di equilibrio e prendiamo in esame gli elementi triangolari che hanno un vertice in K (fig. 1).

Di questi elementi ne isoliamo uno

generico (1, 2, 3) (fig. 2), riferito a coordinate locali. Si ipotizza che lo stato tensionale in esso sia costante. Considerando le forze F_1, F_2 e F_3 , staticamente equivalenti al campo di tensione costante, dirette secondo i lati del triangolo abbiamo che:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T] \cdot \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

dove

$$[T] = \frac{2}{t} \begin{pmatrix} \frac{l_{12}^2}{h_3} & \frac{l_{23}^2}{h_1} & \frac{l_{31}^2}{h_2} \\ m_{12}^2 & m_{23}^2 & m_{31}^2 \\ \frac{l_{12} m_{12}}{h_3} & \frac{l_{23} m_{23}}{h_1} & \frac{l_{31} m_{31}}{h_2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

t = spessore della membrana
 $h_1; h_2; h_3$ = altezze del triangolo misurate dai vertici 1, 2 e 3 rispettivamente

l_{kj} e m_{kj} sono i coseni direttori del lato KJ .

La schematizzazione fatta considerando l'elemento a tensione costante permette di considerare il nodo generico K come sottoposto agli sforzi presenti in equivalenti aste fittizie concorrenti nel nodo.

E' perciò possibile considerare, a maggior ragione in questa fase di ricerca della superficie equilibrata dove, per la natura del procedimento, non si mette in gioco lo stato di dilatazione della struttura, un insieme fatto di nodi e fittizie aste, anziché l'effettiva struttura continua.

La struttura equivalente che ne risulta è quindi una reticolare formata dai lati dei triangoli, e le aste sono formate dalla unione dei lati adiacenti dei triangoli.

Questa considerazione ci permette inoltre di risalire, dopo avere trovato le forze F e attraverso le (1), allo stato tensionale e quindi ad individuare le tensioni principali nel materiale continuo consistente l'involucro portante.

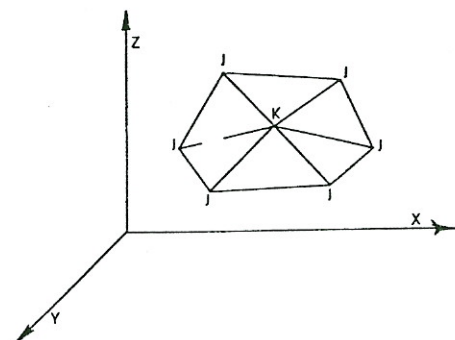


Fig. 1. La struttura pneumatica è scomposta in elementi triangolari. K è un nodo qualunque di coordinate X_k, Y_k, Z_k .

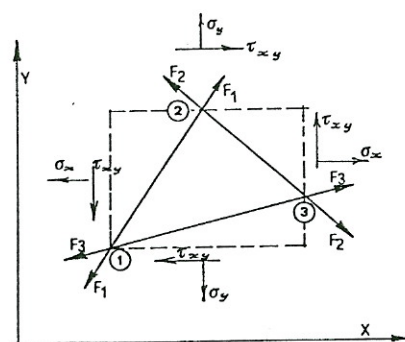


Fig. 2. Elemento triangolare (1, 2, 3) sottoposto a sforzi diretti secondo i tre lati.

A.3. L'equilibrio dell'insieme

Procedendo ad assemblare tutti gli elementi l'equazione di equilibrio, legame che risolve il nostro problema, è data vettorialmente dalla:

$$\sum_{j=1}^{NA} \bar{S}_{kj} = p \sum_{j=1}^{NA} \bar{n} A_{kj} \quad K = 1, N \quad (3)$$

dove

N = numero nodi interni;

NA = numero delle aste concorrenti nel nodo K ;

p = pressione interna;

\bar{S}_{kj} = sforzi equivalenti diretti lungo i lati degli elementi formati dalla somma delle F di due lati adiacenti;

\bar{n} = versore della normale all'area generica di un elemento con vertice in K ;

A_{kj} = area dell'elemento generico con vertice in K .

In forma compatta associata al sistema di riferimento globale abbiamo:

$$[\bar{T}] \{S\} = \{P\} \quad (4)$$

dove

$[\bar{T}]$ = matrice dei coseni degli angoli formati dalle aste con gli assi coordinati del riferimento globale.

A.4. Il procedimento numerico

Dati i valori degli sforzi nelle aste fittizie è possibile risolvere un sistema di equazioni non lineari dove le incognite sono i valori delle coordinate dei nodi interni della struttura.

Consideriamo perciò di avere ottenuto in questa maniera i valori numerici delle seguenti grandezze:

$P_k^0 \equiv (X_k; Y_k; Z_k)$ coordinate dei nodi interni;

$S_{kj}^0 \equiv$ sforzo nell'asta fittizia kj ;

$L_{kj}^0 \equiv$ lunghezza dell'asta kj .

Questo primo risultato, specialmente nella ricerca geometrica delle strutture pneumatiche, non soddisfa le richieste di progetto. Infatti, per strutture con contorno rettangolare, le altezze ottenute in prossimità degli angoli sono molto scarse e perciò il risultato ottenuto manca di interesse applicativo reale.

Per ovviare a questi inconvenienti dovremmo, a parte le condizioni di equilibrio, introdurre degli ulteriori vincoli di progetto.

Il problema da risolvere si presenta in questi termini:

a) Si deve trovare una nuova superficie equilibrata e perciò dei nuovi valori di $P_k^F \equiv (X_k^F; Y_k^F; Z_k^F)$;

b) La superficie sarà soggetta a dei vincoli di progetto quali:

- valori prestabiliti di L_{ki}^F (vincolo non lineare);
- valori prestabiliti di S_{kj}^F (vincolo lineare);
- valori prestabiliti di $X_k^F; Y_k^F; Z_k^F$ (vincolo lineare);

c) La scelta tra le infinite superfici ottenibili con i vincoli suddetti verrà condizionata da una funzione obiettivo. Questa funzione obiettivo, in genere non lineare, ha il compito di farci trovare una superficie la più prossima possibile compatibilmente con i vincoli, alla superficie desiderata in fase di progetto.

Il problema suggerisce una risoluzione mediante un meccanismo automatico di ottimizzazione nella ricerca della superficie finale di progetto.

Si ha così:

variabili: $[X^F, Y^F, Z^F, S^F]$
 vincoli: $g(X^F, Y^F, Z^F, S^F) = 0$;
 $S > 0$

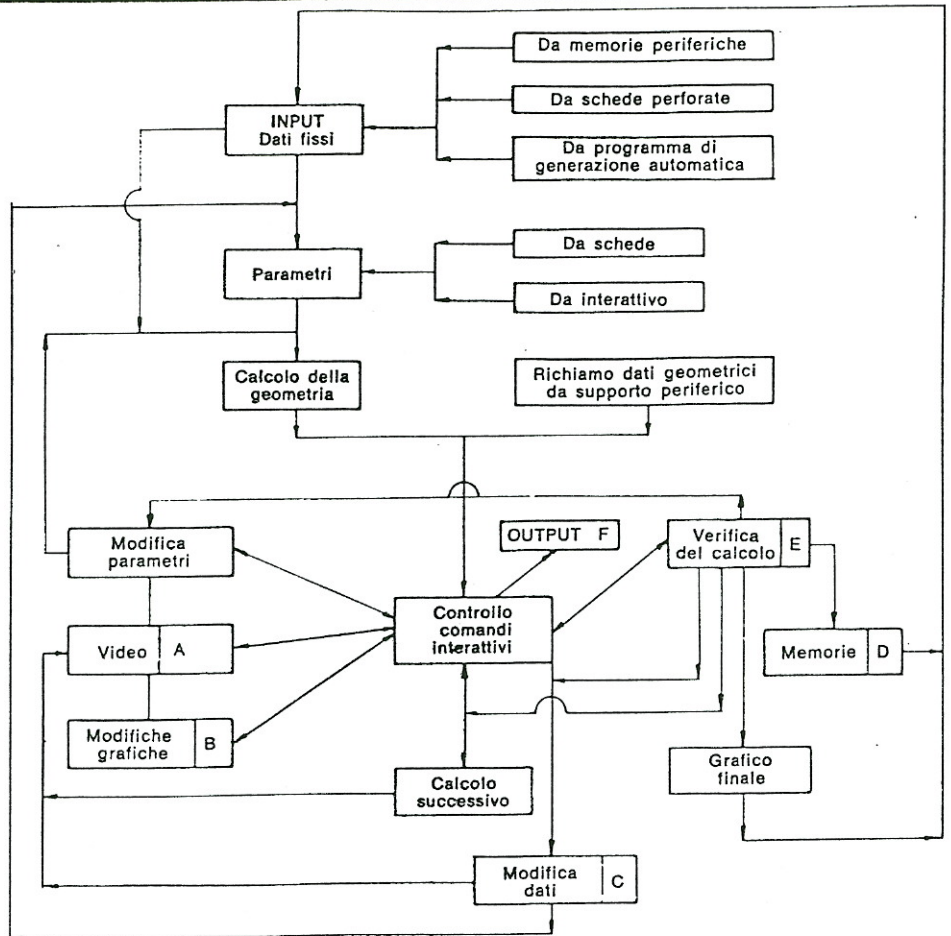


Fig. 3. Diagramma del calcolo interattivo di una struttura pneumatica.

funzione obiettivo:

$$F =$$

$$\sum_1^n C_1 (X_k^F - X_k^0)^2 + (Y_k^F - Y_k^0)^2 +$$

$$+ (Z_k^F - Z_k^0)^2 + \sum_1^m C_2 (S_{ki}^F - S_{ki}^0)^2 \rightarrow$$

$\rightarrow \min$

C_1 e C_2 sono coefficienti di penalizzazione e danno un peso proporzionale al desiderio di ottenere una determinata soluzione dove prevalgono le condizioni geometriche o tensionali. I vincoli sono rappresentati dalle condizioni di equilibrio (4).

Il numero di queste condizioni è $3n$, dove n è il numero dei nodi interni. Altri vincoli aggiuntivi possono essere dati come:

$$\text{- condizioni sugli sforzi} \quad S_{ki}^F = \text{cost.} \quad (5)$$

$$\text{- condizioni sulle lunghezze} \quad L_{ki}^F = \text{cost.} \quad (6)$$

dove

$$L_{ki}^F = \sqrt{\Delta^F X_{ki}^2 + \Delta^F Y_{ki}^2 + \Delta^F Z_{ki}^2} \quad (7)$$

Queste ultime condizioni si sono dimostrate di notevole utilità nella progettazione di strutture con vincoli ri-

gidi di volumetria e altezze utili interne.

La funzione obiettivo ha il compito di minimizzare il divario tra la superficie equilibrata pneumaticamente ammissibile (F) e quella di progetto preliminare (O).

In conclusione si devono trovare $3n + m$ incognite date dalle $3n$ coordinate dei nodi (k) e dagli m sforzi nelle aste (ki).

A.5. La progettazione interattiva e le verifiche dello stato di sollecitazione e degli spostamenti

La tecnica interattiva di calcolo assume particolare importanza nella progettazione delle strutture pneumatiche. I particolari vantaggi, principalmente nel risparmio di tempo e costi di progettazione, possono essere elencati illustrando il diagramma a blocchi della figura 3.

Con questa tecnica è stato possibile ottenere i risultati definitivi di progetto per la struttura pneumatica direttamente plotterizzati su carta (fig. 4). Per quanto riguarda il calcolo degli spostamenti e delle sollecitazioni nelle varie fasi di carico, dovute principalmente all'azione del vento e della neve, si è adottato un metodo che non prende in considerazione l'elasticità del materiale.

Ci troviamo infatti di fronte a un problema che contempla grandi sposta-

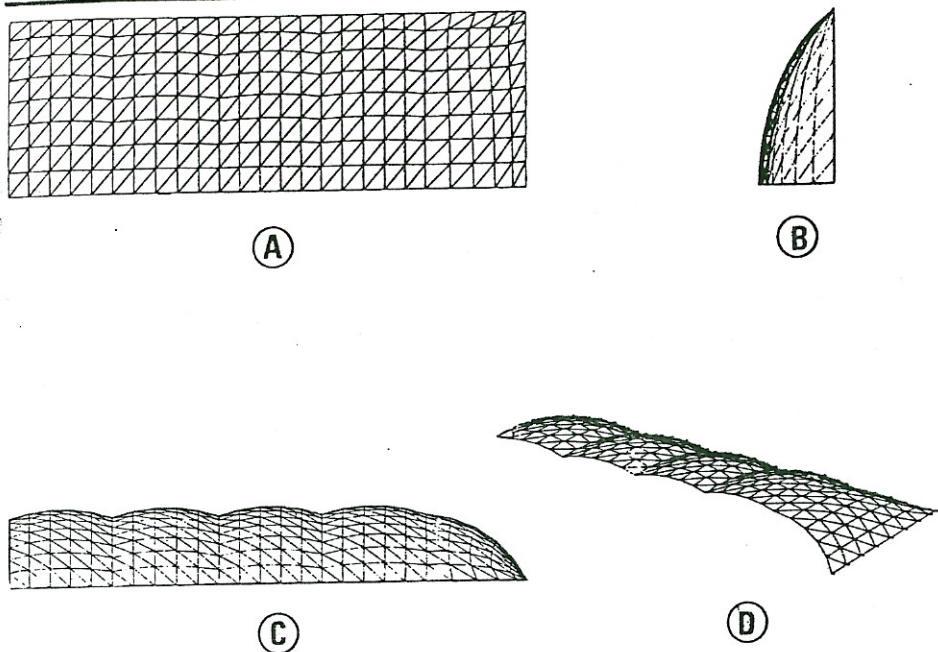


Fig. 4. Plotterizzazione diretta dei risultati del calcolo della superficie di equilibrio allo stato 0 di una struttura pneumatica gonfiata. (A) Pianta. (B) (C) Metà alzato di lato e di fronte. (D) Prospettiva assonometrica.

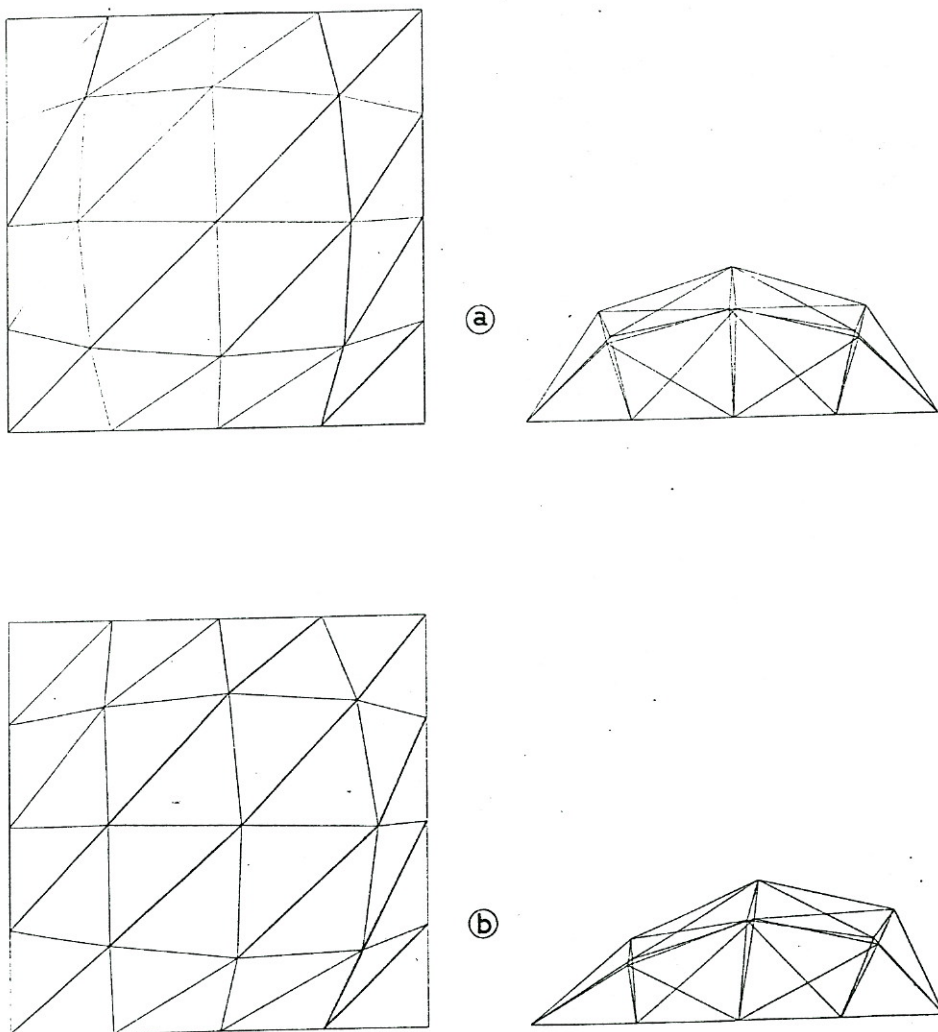


Fig. 5. Rappresentazione grafica (pianta ed alzato) di una struttura pneumatica. (A) Allo stato 0 (peso proprio e pressione interna). (B) Sottoposta inoltre alla spinta del vento che soffia parallelamente ad uno dei lati di base.

menti e piccoli allungamenti e dilatazioni del materiale.

Affrontando l'azione dei carichi col metodo dell'equilibrio in campo non lineare si arriva, con le grandezze in gioco, ad avere problemi di instabilità numerica e risultati non sempre attendibili per quanto riguarda il soddisfacimento dell'equilibrio e della continuità.

Si può rilevare che l'azione dei carichi produce modeste variazioni delle dilatazioni che possono essere trascurate nella ricerca dello stato di sollecitazione e degli spostamenti.

Il problema si presenta perciò nei termini di conservare costanti le lunghezze delle fittizie aste che costituiscono la rete che schematizza la struttura pneumatica, nelle varie situazioni di carico.

Innescando perciò lo stesso procedimento numerico visto nel punto A.4 associato alla condizione (6) sulle lunghezze pote dallo stato iniziale con la sola pressione interna, possiamo determinare cinematicamente la nuova posizione equilibrata della struttura. E' evidente che le aste con $S < 0$ sono tolte automaticamente durante il procedimento iterativo.

Nella figura 5, per semplificare la visualizzazione grafica è riprodotto il risultato di questa operazione di calcolo per un carico del vento in direzione parallela ad uno dei lati della base.

Nella figura 5a in alto, la struttura è caricata con la pressione interna (stato «0»), in basso (fig. 5b) la nuova situazione di equilibrio sotto carico. Su questo argomento una nota è in corso di stampa [9].

B. Copertura di un'area espositiva a Milano. Sistema con funi parallele ed ancoraggio a terra

La struttura pneumatica di moderna concezione copre un'area espositiva di 50×150 m con un'altezza media di 10 m (fig. 6). Nella lunghezza di 150 m vengono disposte ad interasse costante di 15 m funi in acciaio ad alta resistenza in modo da contenere gli sforzi di membrana nel guscio costituente la copertura vera e propria.

L'effetto cerchiante delle funi migliora notevolmente il funzionamento della membrana in poliestere e P.V.C. diminuendo gli sforzi tanto nello strato in cui è presente la pressione interna quanto in quello dove si aggiungono gli sforzi prodotti dai carichi esterni.

Questo tipo di struttura pneumatica richiede una prima fase di progettazione che consiste nella determinazione della configurazione geometrico-tensionale equilibrata in presenza della pressione interna e del peso proprio della struttura stessa. Una seconda fase di progettazione e veri-

fica della struttura sottoposta all'azione dei carichi esterni è stata condotta principalmente in base a regolamenti stranieri in attesa di una apposita normativa italiana [7].

B.1. I materiali

La membrana di copertura è costruita in tessuto di poliestere spalmato su entrambi i lati da PVC auto-estinguente ed anti-UV avente le seguenti caratteristiche:

- tessuto poliestere speciale;
- spalmatura su entrambi i lati con P.V.C. additivato con EN elementi ignifughi, anti-UV ed anti-statici.
- peso complessivo per m²: 1 000 g;
- spessore 0,85 mm;
- carico di rottura verificato su striscia di 50 mm: 430/480 kg;
- carico di rottura a strappo iniziato: 100 kg.

La copertura costituita da teli aventi l'altezza di 200 cm viene saldata a radiofrequenza con elettrodo di 40 mm di larghezza il che assicura che il carico di rottura del materiale sia uniforme anche nei punti di giunzione. Lungo tutto il suo perimetro di base è prevista un'asola rinforzata con tessuto spalmato con carico di rottura di 600 kg entro la quale scorre un tubo in ferro zincato da 1,5" che serve a frangere uniformemente lungo il cordolo l'intera struttura pneumatica.

Per le funi di contenimento sono state usate funi spiriodali con $\sigma_{rott} \geq 160 \text{ kg/mm}^2$ del diametro 28. Queste funi sono dotate di un terminale fisso ed uno regolabile.

B.2. Gli impianti di pressurizzazione e di riscaldamento

Uno degli elementi fondamentali per il buon funzionamento e per la sicurezza della copertura « pressostatica » è costituito dal corretto dimensionamento degli apparecchi destinati alla pressurizzazione dell'impianto. Se è possibile fare un paragone, questo impianto può essere considerato come il « cuore di un organismo » e dal suo specifico comportamento dipendono le condizioni ideali di salute e di lavoro in ogni punto periferico. Assicurare la pressione statica corretta secondo i calcoli prestabiliti al contenimento della stessa, è un elemento fondamentale alla buona riuscita e alla sicurezza di tutto l'impianto.

Per questa ragione sono state studiate con particolare cura le apparecchiature più adatte e sicure.

In questo caso sono stati previsti:

N. 2 elementi generatori di aria calda e fredda rispettivamente disposti in contrapposizione sulle testate della copertura. Il volume d'aria consente 2 ricambi ogni ora ed una pressione statica di 28/30 mm di H₂O. La potenzialità dei 2 generatori è di complessive 2 000 000 Cal/h che consentono un "delta T" di 25 °C ed una umidità relativa del 60% circa.

E' previsto un recupero dell'aria di riscaldamento fino al 50% con un conseguente notevole risparmio di energia ed un migliore controllo della pressione statica che può essere adattata automaticamente secondo le

condizioni atmosferiche del momento. Il gruppo ventilante di ogni generatore è costituito da ventilatori centrifughi a basso numero di giri azionati da un motore trifase della potenza di 25 Hp.

I bruciatori a gasolio sono del modello PG 100 autoalimentanti. L'intera apparecchiatura è corredata da tutti gli accessori adatti al controllo automatico delle condizioni ambientali predisposte nel capannone.

Condizioni atmosferiche eccezionali o la mancanza di alimentazione della corrente della linea esterna, potrebbero causare danni a tutto l'impianto se la pressione statica interna al capannone non fosse assolutamente garantita da speciali impianti di ventilazione, che intervengono automaticamente al primo accenno di necessità.

E' indispensabile la tempestività d'intervento in quanto nel lasso di tempo che potrebbe intercorrere tra l'alimentazione principale e l'alimentazione di emergenza il capannone verrebbe a trovarsi, sia pure per pochi secondi, in balia dell'azione del vento con la conseguenza di possibili lacerazioni.

Per ovviare a questo inconveniente, il nostro sistema di intervento prevede un impianto doppio di cui uno alimentato in C.C. e l'altro da un motore a diesel.

Prevediamo pertanto quanto segue:

a) gruppo di intervento automatico in C.C. - 110 V costituito da ventilatore centrifugo a doppia aspirazione, ad alto rendimento e a basso numero di giri (600 al 1') azionato da motore della potenza di 15 Hp, completo di reostato automatico di avviamento, di raddrizzatore e batteria stazionaria, che consentono un'autonomia di 2 h;

b) impianto di emergenza costituito da ventilatore con caratteristiche come sopra descritto, azionato da motore diesel della potenza di 20 Hp ad avviamento automatico al mancare della corrente principale.

L'apparecchiatura a) ha il compito principale dell'immediatezza di intervento in attesa che l'apparecchiatura b) arrivi al regime ideale di lavoro, dopo di che stacca alla pressione predisposta mentre l'apparecchiatura b) continua a funzionare fino al ritorno della corrente esterna.

Un anemometro situato all'esterno degli impianti a sua volta agisce comandando l'intervento dell'apparecchiatura a) ogni qualvolta il vento supera la velocità prestabilita.

Con la doppia apparecchiatura ad intervento automatico sopra descritta, la possibilità di incidenti dovuti a fattori esterni può essere praticamente considerata nulla.

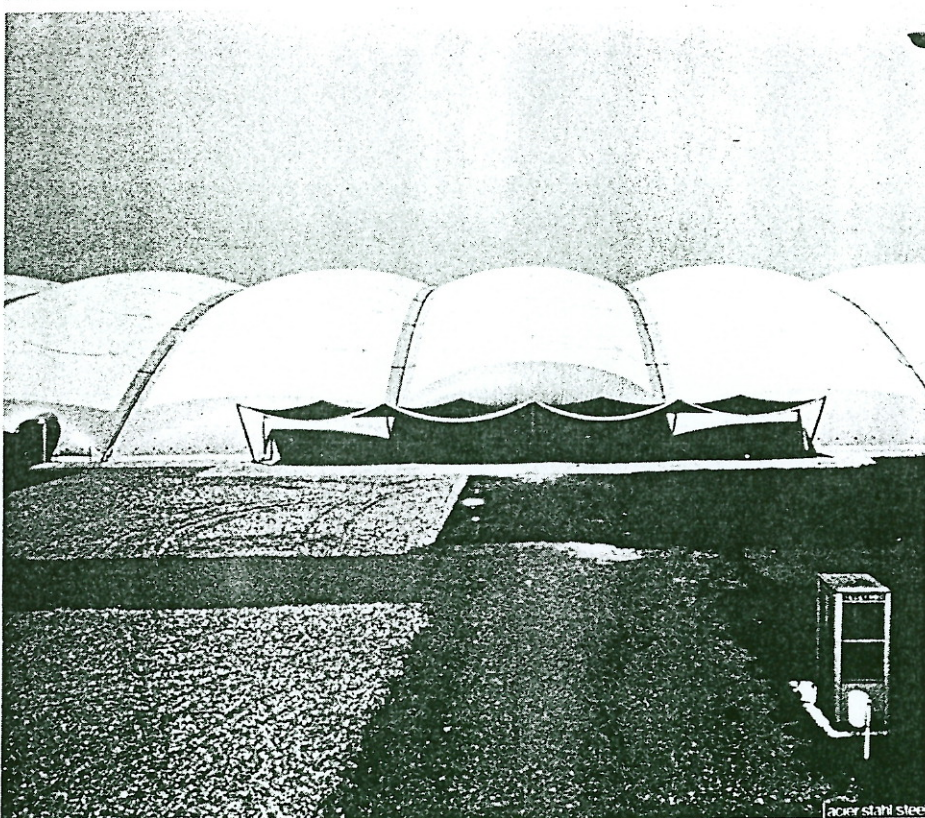


Fig. 6. Sala espositiva a Milano. Vista laterale dell'ingresso. Si notino i cavi paralleli disposti ogni 15 m.

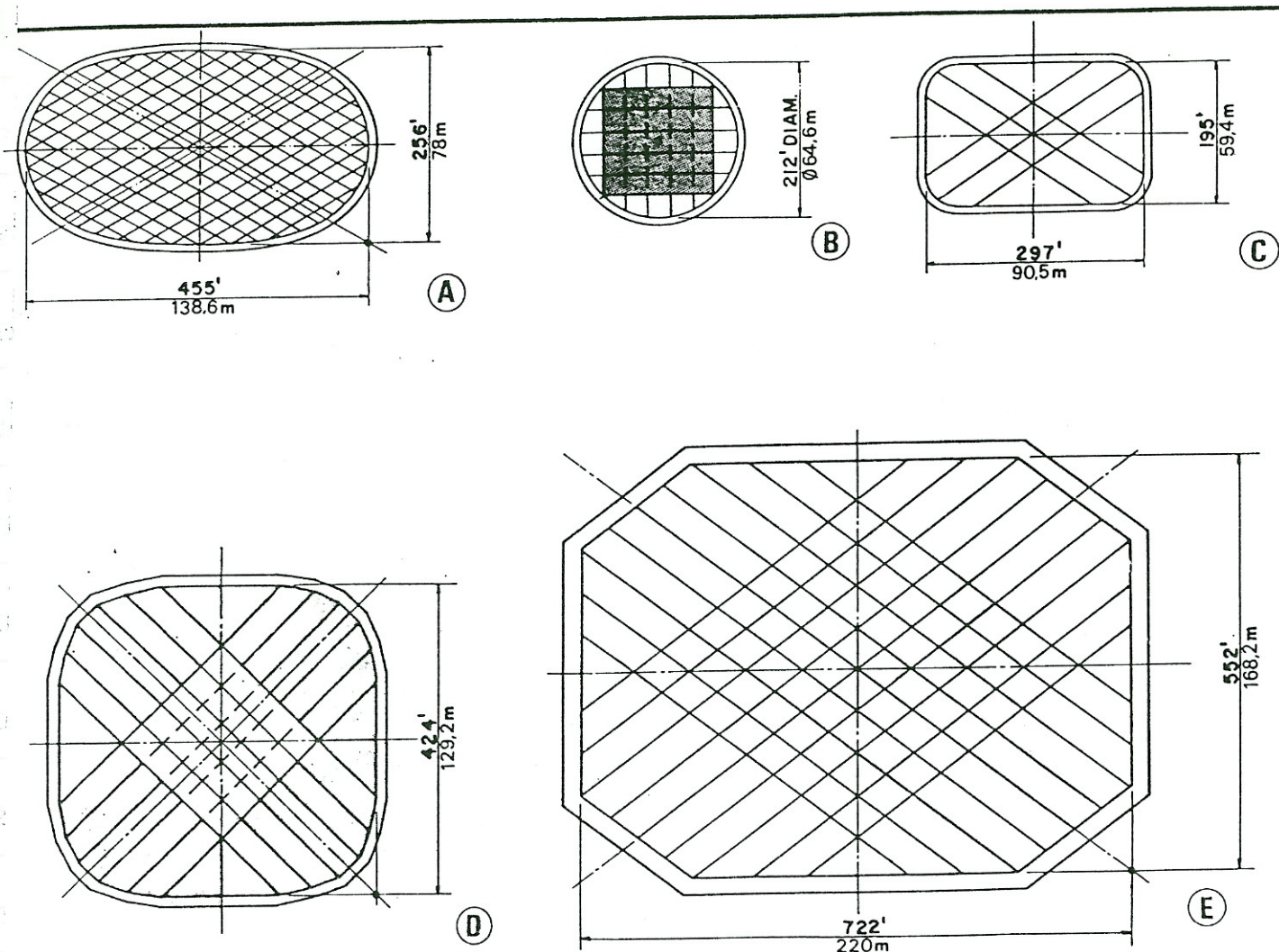


Fig. 7. Diversi esempi di coperture di padiglioni sportivi. (A) Padiglione degli Stati Uniti ad Osaka (Giappone). (B) Milligan College (Tennessee). (C) Università di Santa Clara (California). (D) Università del Nord dello Iowa. (E) Stadio di Pontiac (Michigan).

C. Strutture pneumatiche con funi di contenimento a profilo ribassato

Sin dal progetto e successiva realizzazione del Padiglione degli U.S.A. all'Expo '70 di Osaka (Giappone), le ricerche in questo campo negli Stati Uniti d'America hanno trovato sbocco nella progettazione e nella successiva realizzazione di 6 strutture pneumatiche con funi di contenimento a profilo ribassato.

Tali strutture presentano in pianta delle forme che vanno dalla circolare con diametro di 64 m alla rettangolare troncata di 166 m x 220 m di luce (fig. 7).

Ognuna di queste coperture è provvista di un anello orizzontale compresso mentre la freccia in chiave è dell'ordine di $\frac{1}{10}$ o $\frac{1}{20}$ della luce.

Finché la pressione interna alla costruzione si mantiene a livello dei $20 \div 30 \text{ kg/m}^2$ e il peso della superficie di copertura non supera i $3 \div 5 \text{ kg/m}^2$ la struttura è in tensione. Di conseguenza l'instabilità dell'equilibrio non diventa un problema ed è così possibile ridurre la freccia del-

la struttura al massimo, compatibilmente con il problema imposto dallo smaltimento dell'acqua.

Poiché la freccia è ridotta, le forze del vento diminuiscono.

Finché l'anello giace su un piano orizzontale, la configurazione sgonfiata della struttura diventa la speculare della posizione gonfiata ed è possibile costruire la struttura in modo che essa resti liberamente sospesa in posizione di sgonfiamento così da minimizzare la dipendenza del sistema meccanico verso la sicurezza degli abitanti e/o della proprietà.

Come conseguenza di questa bassa freccia, le forze orizzontali che devono essere assorbite dall'anello di compressione sono notevoli e diventa necessario opporre una resistenza a queste forze il più efficacemente possibile.

Questo si può fare se l'anello è funicolare, per esempio riuscendo ad ottenere una distribuzione di momenti nulli per l'azione della sola pressione interna.

La struttura convenzionale circolare soddisfa in pieno questi criteri se

soggetta a carico radiale di intensità costante; ma se queste forze sono impresse da funi radiali deve esistere un anello di tensione al centro. Il peso di questo anello è tale che in una struttura pneumatica ci sarà una zona di depressione, per esempio dovuta ad un movimento di discesa che provoca accumulo d'acqua. Questo fenomeno tende ad esasperarsi provocando grandi abbassamenti nel vertice della superficie della struttura.

Di conseguenza questa soluzione non ha un carattere pratico.

In alternativa alle funi radiali si ricorre ad un sistema di funi portanti ortogonali con sforzo orizzontale costante (fig. 7).

Questa disposizione di cavi corrisponde alla soluzione classica in regime di membrana per un campo di forze uniformi in direzione ortogonale.

Similarmente se i campi di forze sono uniformi e ortogonali ma disuguali, $6x \neq 6y$, si può stabilire che un anello ellittico con un asse maggiore ed un asse minore a e b rispettivamente, paralleli alle direzioni delle ten-

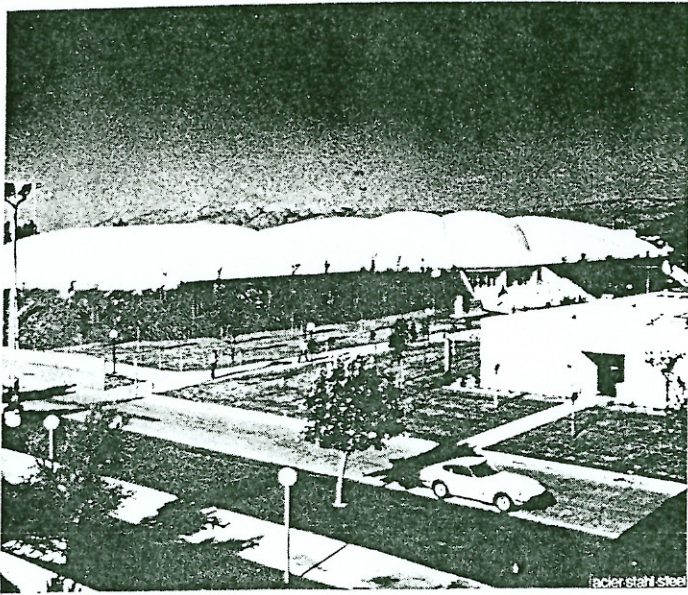


Fig. 8. Padiglione sportivo di Santa Clara. Vista esterna.

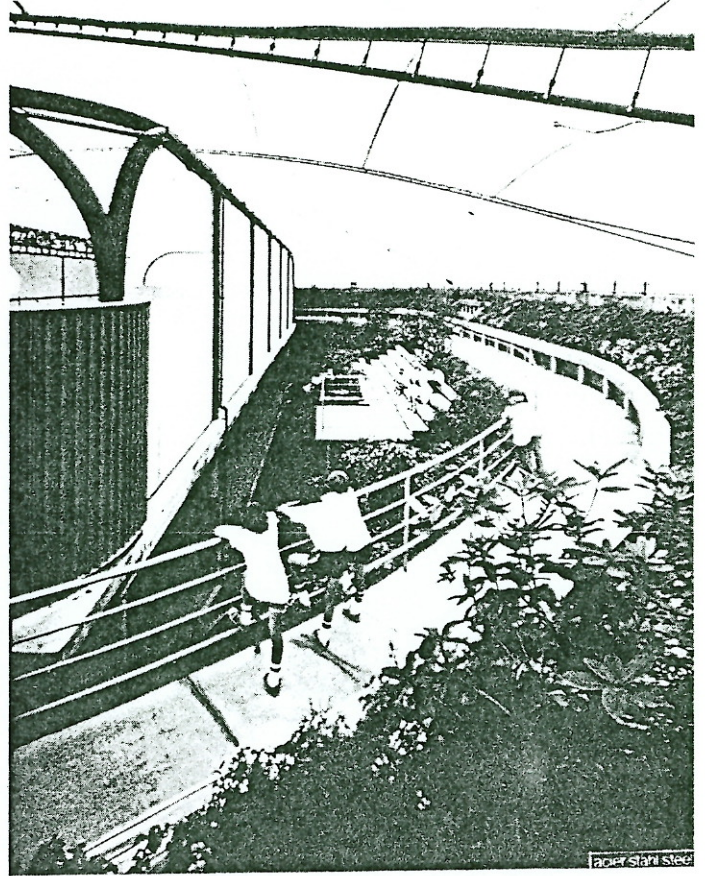


Fig. 9. Padiglione sportivo di Santa Clara. Vista interna.

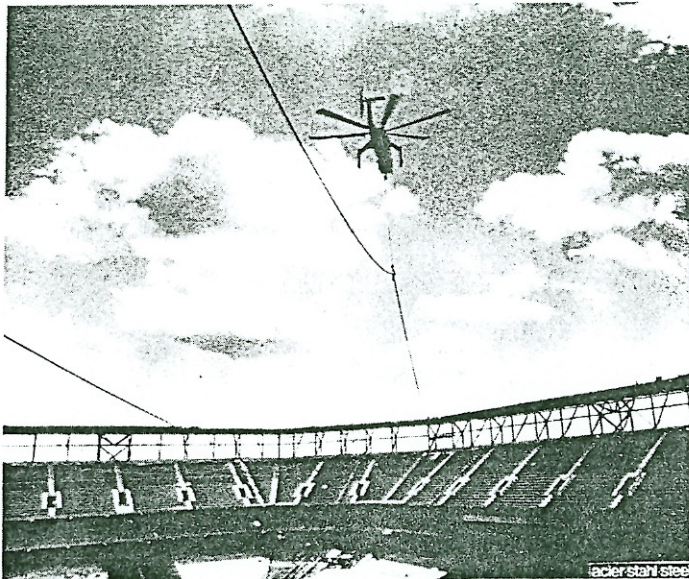


Fig. 10. Stadio di Pontiac. Posizionamento dei cavi.

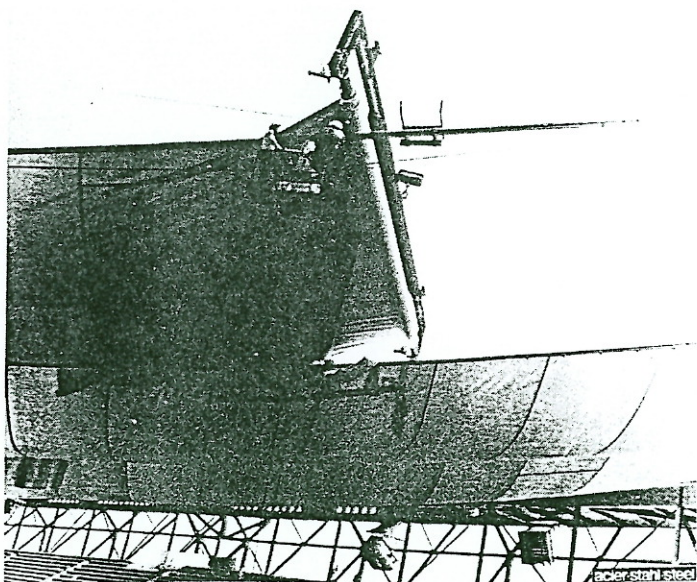


Fig. 11. Stadio di Pontiac. Posizionamento di un pannello rettangolare e fissaggio ai cavi.

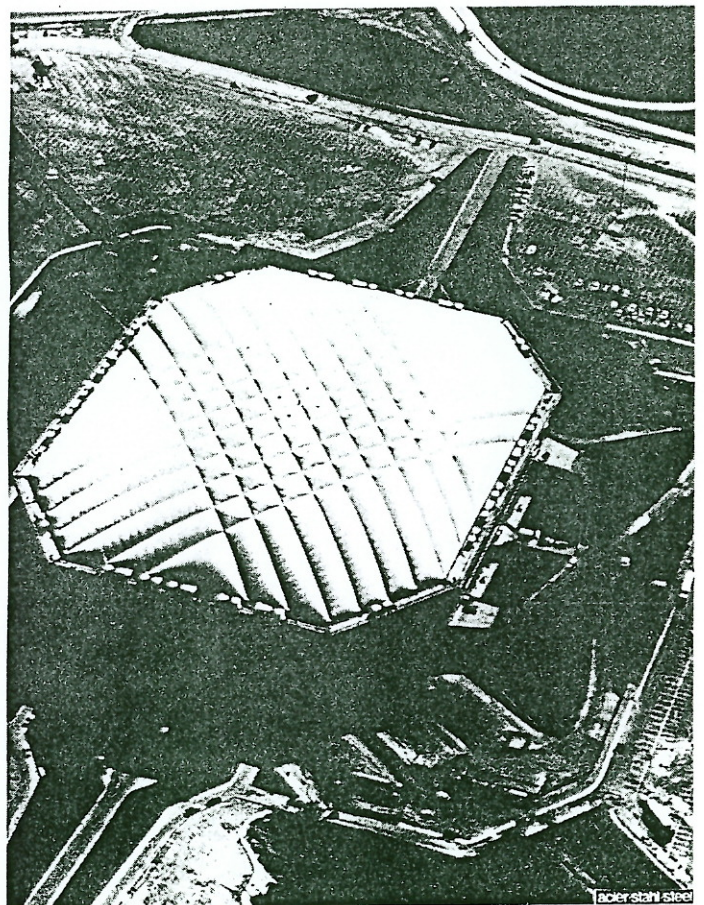


Fig. 12. Stadio di Pontiac. Vista esterna.

Tavola 1. Caratteristiche principali delle strutture pneumatiche a profili ribassati.

Caratteristiche	Padiglione USA Osaka, Giappone	Milligan College Johnson City Tennessee, USA	Università di Santa Clara California, USA	Università Nord Iowa, Cedars Falls Iowa, USA	Stadio Pontiac Pontiac, Michigan USA
Dimensioni (m)	138,6 × 78,0	∅ 64,6	90,5 × 59,4	129,2 × 129,2	220,0 × 168,3
Elevazione in copertura (m)	7,0	4,8	7,2	14,6	15,2
Interasse dei cavi d'acciaio (m)	6,0	9,0	12,0	12,9	12,6
Diametro dei cavi (mm)	38,1 a 57,3	38,1 e 2 di 27,0	47,6	73,0	79,4
Tipo di tessuto	PVC-vetro 1 strato	teflon-vetro doppio, isolato; 1 strato	teflon-vetro 1 strato	teflon-vetro parzialmente doppio	teflon-vetro strato unico
Depressione del vento (lb/ft ²) (N/m ²)	30,0 1 464,6	15,0 732,3	12,0 585,9	15,0 732,3	15,0 732,3
Carico della neve (lb/ft ²) (N/m ²)	12,0 589,9	20,0 976,5	12,0 585,9	30,0 1 464,6	12,0 585,9
Peso della copertura (lb/ft ²) (N/m ²)	1,25 61,0	1,0 48,8	0,9 43,9	1,0 48,8	1,0 48,8
Portata generatori (ft ³ /mn) (m ³ /mn)	120 000 3 398	130 000 3 681	400 000 11 326	370 000 10 477	3 500 000 99 109
Capienza massima	5 000	1 800	5 000	18 000	80 000
Luminosità della copertura	6%	0% e 14%	14%	media 11%	media 8%
Posizionamento	novembre 1969	ottobre 1974	febbraio 1975	luglio 1975	novembre 1975

sioni principali, è funicolare per questo campo di forze se:

$$\frac{6x}{6y} = \frac{a^2}{b^2} \quad (8)$$

In questo caso il problema di progetto si pone nei termini di determinare la forma geometrica dell'anello avendo come dati gli sforzi trasmessi dalla membrana di copertura.

Se l'anello è simmetrico rispetto all'asse x e all'asse y e se i cavi di contenimento o il campo di forze sono paralleli a questi assi, il progettista può stabilire a meno di una costante arbitraria la distribuzione delle componenti orizzontali degli sforzi nei cavi mediante l'uso delle equazioni di equilibrio in ognuno dei quadranti.

Finché i carichi esterni sono verticali o distribuiti simmetricamente, le reazioni orizzontali alle estremità dei cavi sono eguali e opposte, la soluzione funicolare di ciascun quadrante si applica a tutti i quadranti. Una volta che queste componenti orizzontali sono note, se i cavi sono contenuti in piani paralleli, le ordinate verticali della rete di cavi possono essere determinate attraverso la soluzione di un sistema di equazioni simultanee basate sull'equilibrio statico di ciascun nodo.

Se questo procedimento è fatto per un anello circolare o ellittico con applicati carichi superficiali uniformi, è stabilito che la forma delle funi sarà parabolica.

Se, al contrario, questa procedura è utilizzata per una super-ellisse, dove:

$$\left[\frac{x}{a}\right]^M + \left[\frac{y}{b}\right]^M = 1 \quad (9)$$

e con $M > 2$ (fig. 13), allora si può osservare che le dimensioni delle funi sono significativamente aumentate e che le funi più vicine all'asse maggiore e minore vengono ad avere un punto di inflessione e la forma della copertura diventa non ottimale agli effetti dello smaltimento delle acque. A questo punto sorge inevitabilmente la domanda se c'è in alternativa un'altra direzione in cui disporre le funi per cui l'anello si presenti funicolare ma per cui le curvature delle funi non cambino segno.

Un accurato studio matematico stabilisce che tale fatto esiste e succede quando le funi si tendono in direzione parallela alla diagonale del rettangolo di cui sopra si è fatto menzione.

Dopo aver determinato definitivamente le relazioni che intercorrono tra la disposizione dei cavi e la geometria dell'anello nella situazione di carico per la quale risulta funicolare dello

stesso, bisogna determinare gli effetti indotti dai carichi comunque distribuiti.

Dal momento che la rete di funi di contenimento non è a maglia triangolare ed essendo in un campo di grandi deformazioni, sotto l'azione dei carichi accidentali, il problema da risolvere risulta di tipo non lineare. I risultati che si ottengono risolvendo il problema elastico non lineare applicando il metodo dell'equilibrio debbono essere interpretati molto attentamente.

La convergenza alla soluzione mediante il controllo sull'equilibrio non è garante di una soluzione corretta. Anche la compatibilità deve essere soddisfatta e perciò speciale riguardo bisogna osservare nei confronti della possibilità di instabilità numerica dei procedimenti ad elementi finiti.

Dopo aver completato l'analisi non lineare della rete di funi di contenimento, il carico non funicolare agente sull'anello può essere stabilito e si può procedere alla verifica dell'anello anche per effetto dei momenti flettenti.

Il più grande impatto sull'impiego di questa metodologia costruttiva è costituito dal basso prezzo di costruzione e dalla rapidità di esecuzione e montaggio.

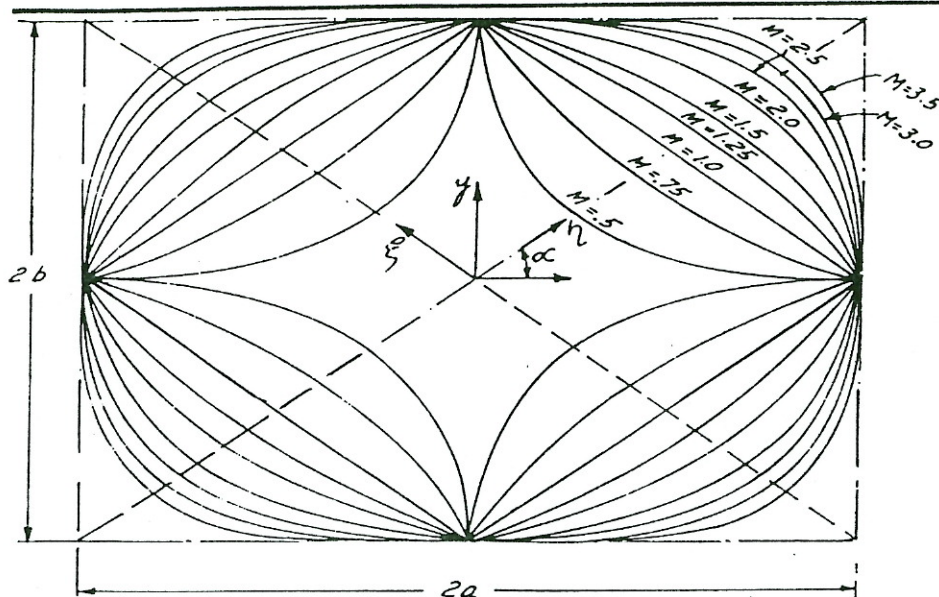


Fig. 13. Una famiglia di super-ellissi. Ricerca della geometria dell'anello di bordo.

Quando i progettisti diventeranno più familiarizzati con le caratteristiche di questa tecnologia e la bellezza degli spazi interni illuminati dalla trasparenza dei materiali di copertura quale il Teflon (fig. 9) e quando i sistemi di recupero dell'energia verranno ottimizzati, altre applicazioni, non solo per grandi luci, potranno diventare attuali.

D. Progetto per lo stadio coperto di Pescara

Nell'ambito dello sviluppo di questo sistema costruttivo si illustra brevemente il progetto eseguito dall'Arch. Rodrigo Fradeani che si è avvalso della consulenza strutturale degli Autori del presente articolo.

I dati di progetto: capienza di 5 000 spettatori (aumentabili con l'occupazione del parterre in caso di riunioni pugilistiche) e possibilità di uso a tempo pieno per il più gran numero di praticanti le diverse discipline. Sono subito emersi complessi problemi sia tecnici che ambientali.

Problemi tecnici quali la natura delle fondazioni su un terreno scarsamente consistente; fondazioni che debbono sostenere una copertura di grande luce che oltre alla ovvia economicità deve essere in grado di resistere con il minimo di manutenzione ad un ambiente marino fortemente corrosivo.

Problemi ambientali quali l'inserimento di un complesso di così grandi dimensioni a contatto con una preesistenza naturale quale la pineta.

Si è giunti così all'adozione di uno schema strutturale dato da un terrapieno e da una membrana superiore. La soluzione è stata cioè poggiare la rete di cavi di acciaio ad alta resistenza che fanno da supporto alla membrana superiore sul colmo di un rilevato di terra ad una altezza di circa otto metri dal piano stradale risolvendo così all'esterno il problema dell'inserimento nell'ambiente essendo il rilevato ricoperto di vegetazione, ed all'interno il problema delle fondazioni, perché le gradinate poggiano direttamente sull'invaso del terreno.

L'anello di cemento è di forma all'incirca superellittica, ha gli assi longitudinale e trasversale rispettivamente di 118,50 m e 74,00 m e la superficie della membrana è di 7 555 m² circa.

I cavi ad orditura parallela distano tra loro circa 6 m ed hanno uno spessore di due pollici.

L'impianto di pressurizzazione sarà costituito da turbine centrifughe più turbine di riserva in caso di guasto; inoltre verranno sistemati due gruppi elettrogeni in caso di mancanza di energia elettrica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Geiger, D. H., «U.S. Pavilion at Expo '70, Features Air-Supported Cable Roof», *Civil Engineering ASCE*, marzo, 1970.
- [2] Geiger, D. H., «Pneumatic Structures», *Progressive Architecture*, agosto, 1972.
- [3] Geiger, D. H., «Largest and Lightest Fabric Roof to Date», *Civil Engineering ASCE*, novembre, 1975.
- [4] Geiger, D.H., «Developments in Incombustible Fabrics and Low Profile Air Structures Including Those with Thermally Active Roofs», *IASS World Congress on Space Enclosures*, Building Research Center, Concordia University, Montreal, luglio, 1976.
- [5] Majowiecki M., Tironi G., «Geometrical configuration of pneumatic and tent structures obtained with interactive computer aided Design», *IASS World Congress on Space Enclosures*, Montreal, luglio, 1976 e *Acciaio*, n. 10/1976, pagg. 421-427.
- [6] Geiger, D. H., «Engineering Aspects of Low Profile Air Structures», *International Symposium on Air-Supported Structures*, Venezia, giugno, 1977.
- [7] Augusti G., Chiarugi A., Spinelli P., «Design Problems and codes of practice for Single-Skin Air-Supported Structures», *International Symposium on Air-Supported Structures*, Venezia, giugno, 1977.
- [8] Majowiecki M., Tironi G., «Interactive Computer Aided Design in the Field of Pneumatic Structures», *International Symposium on Air-Supported Structures*, Venezia, giugno, 1977.
- [9] Chiarugi A., Majowiecki M., Tironi G., «Sul regime degli spostamenti nelle strutture pneumatiche». In corso di stampa.