

A. CHIARUGI - M. MAJOWIECKI - G. TIRONI

Sullo stato di deformazione delle strutture pneumatiche

SULLO STATO DI DEFORMAZIONE DELLE STRUTTURE PNEUMATICHE

A. Chiarugi *, M. Majowiecki *, G. Tironi **

Ricerca effettuata con il contributo del C.N.R.

Premessa

Nella progettazione delle strutture pneumatiche, oltre al fondamentale problema della definizione della forma [1] (tipico d'altronde di tutte le coperture a membrana), risulta di primaria importanza l'individuazione della deformata sotto l'effetto delle azioni accidentali, quali vento e neve. Ricordato infatti che per garantire l'esercizio di questo tipo di costruzioni occorre erogare continuamente energia, appare necessario pervenire all'individuazione dei legami esistenti fra la pressione interna alla membrana e l'intensità caratteristica o attuale delle azioni accidentali al fine di contenere i movimenti dell'involucro, e ciò essenzialmente per un duplice scopo:

- 1) Garantire un sufficiente margine di sicurezza nei confronti del raggiungimento di uno stato limite di utilizzazione (eccessiva deformazione) [2] coincidente talvolta con quello ultimo (basti pensare alle possibili lacerazioni del tessuto, una volta che questo venga a contatto con oggetti contenuti nell'involucro).
- 2) Permettere una conduzione corretta, e quindi economica, della costruzione, mantenendo quanto più bassa possibile la sovrappressione interna in relazione ai valori effettivi delle azioni accidentali.

Questo asservimento del sistema resistente all'intensità delle azioni esterne richiede, seppure in forma deterministica, in primo luogo di definire la distribuzione e l'intensità delle azioni esterne, quindi di disporre di un agile strumento di calcolo che permetta di risalire, assegnati i carichi, alla configurazione deformata della struttura in regime di grandi deformazioni.

Per quanto riguarda il primo aspetto, si osserva che per il carico neve ci si può riferire, con buona approssimazione, a intensità medie e a plausibili distribuzioni, mentre più incerta appare la scelta degli analoghi parametri relativi al vento.

Per individuare infatti la distribuzione della pressione esterna dovuta ad una corrente d'aria incidente sulla struttura si devono affrontare problemi assai complessi, in quanto essi rientrano nel tipico campo dei comportamenti dina-

mici delle strutture. Tuttavia recenti esperienze [3] sulla risposta dinamica di strutture pneumatiche, condotte in gallerie del vento su modelli di forma cilindrica allungata (rapporto fra la massima e la minima dimensione in pianta uguale a 2), sembrano dare indicazioni di sufficientemente semplici schematizzazioni.

E' stata infatti rilevata, per quanto riguarda gli spostamenti, la debole importanza degli effetti dinamici rispetto ai valori determinati con un calcolo quasi-statico basato sulla velocità di punta del vento, soprattutto ad elevate pressioni di gonfiaggio; inoltre, sempre in merito agli spostamenti, la loro previsione teorica, partendo da un campo di pressioni esterne misurato su un modello rigido, ha portato a risultati in soddisfacente accordo con le indicazioni sperimentali anche per situazioni che nel modello simulavano una velocità del vento di 30 m/sec ed una pressione interna (debole) di 18 mm di acqua.

Alla luce di questi risultati sperimentali emerge quindi l'attendibilità di calcoli quasi-statici condotti riferendosi ad una distribuzione di coefficienti di pressione medi.

Pur essendo questo problema ancora oggetto di molte ricerche, ci riferiremo alle indicazioni dianzi riportate per analizzare alcuni problemi di ricerca dell'assetto deformato.

Determinazione del regime deformato nel caso piano

Alcune indicazioni su vari metodi di valutazione

Molti esempi di strutture pneumatiche presentano piante di forma allungata, tali da poter considerare le zone centrali come facenti parte di una membrana di forma cilindrica indefinita, non risentendo eccessivamente dell'influenza delle zone di estremità concluse in genere con raccordi ad unghia.

Appare quindi legittimo affrontare tali casi riconducendo il problema allo studio di una struttura piana.

Numerosi sono i contributi dati alla soluzione di questo problema, in particolare per quanto riguarda gli effetti del vento.

M. Uemura [4] ha affrontato lo studio di strutture cilindriche a direttrice circolare, prive di rigidità flessionale sotto l'azione del vento, trascurando il peso proprio della membrana in rapporto alla pressione interna, tenendo invece conto della deformabilità elastica del materiale. Pensa-

* Istituto di Tecnica delle Costruzioni dell'Università di Bologna.

** Centro di Calcolo Facoltà di Ingegneria di Bologna.

ta la pressione esterna $p(\theta)$ (θ angolo al centro) distribuita normalmente alla superficie indeformata con legge del tipo $p(\theta) = C(\theta) \frac{1}{2} \rho v^2$, tenuto conto che lo sforzo di trazione del materiale S , per le ipotesi fatte, non varia lungo la membrana, perviene all'individuazione della configurazione deformata, sviluppando il carico in serie di Fourier (fino al quindicesimo termine) e adottando un criterio di risoluzione di tipo energetico.

In tale lavoro, supponendo sempre invariata la funzione $C(\theta)$ riferita all'assetto indeformato, vengono analizzati vari casi che mettono in luce, fra l'altro, l'influenza del numero di Reynolds.

Sempre nell'ambito dei problemi piani, di particolare interesse sono i metodi iterativi. R. D. Parbery [5] affronta il problema al continuo in forma assai generale per membrane cilindriche mediante la soluzione numerica delle equazioni differenziali (fig. 1):

$$\frac{d\varphi}{dl_{ind}} = - \frac{f(\sigma)}{S_0 + p_r z} (p - p_r \cos \varphi)$$

$$\frac{dx}{dl_{ind}} = f(\sigma) \cos \varphi$$

$$\frac{dz}{dl_{ind}} = f(\sigma) \sin \varphi$$

dove, a parte l'ovvio significato di alcuni simboli, con $f(\sigma)$ si esprime il rapporto fra la lunghezza del tratto infinitesimo deformato (*def*) rispetto alla lunghezza iniziale (*ind*), cioè $f(\sigma) = dl_{def}/dl_{ind}$.

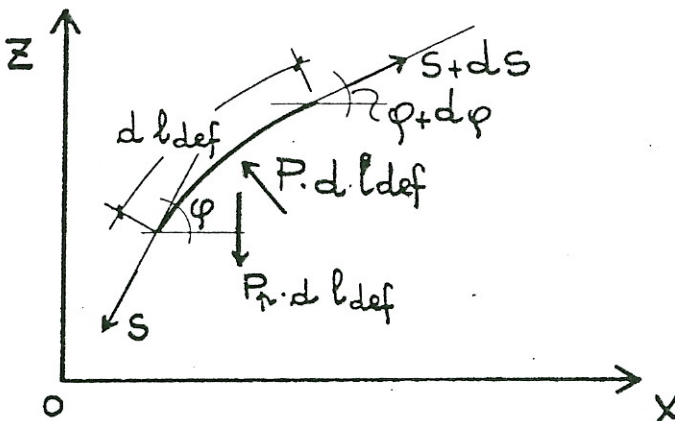


Fig. 1.

La soluzione numerica iterativa ottenuta impiegando il metodo di Runge-Kutta, successivamente affinata mediante il metodo di Newton-Raphson, perviene all'individuazione delle grandezze $\varphi(0)$ e $S(0)$ all'origine tali che, assicurato il rispetto delle condizioni ai limiti iniziali, soddisfino anche le condizioni ai limiti all'altro estremo.

In tale lavoro si opera un interessante confronto con un procedimento iterativo al discreto proposto da B. H. Harrison [6] secondo la stessa tecnica della ricerca di opportuni valori delle grandezze all'origine (fig. 2).

In particolare, per il caso di membrane inestensibili, si riconosce che il metodo al discreto equivale ad un metodo approssimato del secondo ordine, in quanto nelle equazioni di equilibrio del nodo i compaiono gli effetti dei carichi agenti sia sull'elemento $i-1$ sia sull'elemento i , assunti però questi ultimi secondo un'espressione dell'angolo φ , che in prima approssimazione è ricavata in funzione dei parametri meccanici e geometrici dell'elemento i .

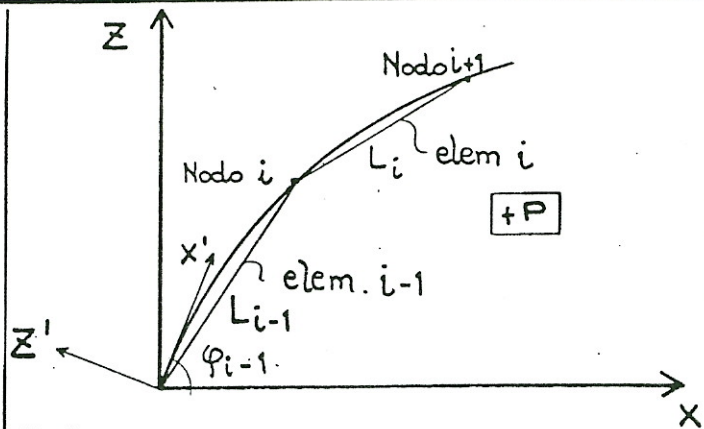


Fig. 2.

Un altro contributo dato da V. V. Yermolov [7] porge la soluzione iterativa, anche per via grafica, di una struttura pneumatica inestensibile, di peso trascurabile sotto l'azione del vento.

Discretizzata la membrana, utilizzando la constatazione che la tensione non cambia lungo il contorno e che la forza P_i agente nel nodo i dovrà risultare sempre, per equilibrio, coincidente con la bisettrice dell'angolo formato dagli elementi $i-1$ e i , procede ancora per iterazione, ad individuare valori di parametri iniziali che soddisfino le condizioni al contorno nell'altro estremo. Tuttavia tale metodo non si presenta così affinato in quanto l'intensità della forza P_i agente nel nodo i è assunta riferendosi al contorno indeformato.

Un sostanziale perfezionamento di questo modo di procedere è quanto proposto da P. Spinelli [9] che, mediante anche l'ausilio di un display graphic, oltre ad analizzare condizioni di carico più generali, perviene alla soluzione del problema operando, in particolare per il carico vento, un continuo aggiornamento delle azioni esterne sia in direzione che intensità.

Il metodo di soluzione proposto

Pur restando nell'ambito di soluzioni al discreto, la soluzione del problema può essere data risolvendo per via iterativa il sistema di equazione che esprimono le condizioni di equilibrio dei nodi, assunti quali incognite i movimenti dei nodi stessi.

Possiamo infatti scrivere per il generico nodo i del sistema, tenendo conto della deformabilità della membrana e trascurate differenze sufficientemente piccole, le seguenti equazioni di equilibrio:

$$(a) \begin{cases} \frac{S_{i-1}}{L_{i-1}^0 + \Delta L_{i-1}} \Delta x_{i, i-1} + \frac{S_i}{L_i^0 + \Delta L_i} \Delta x_{i, i+1} = P_{x, i} \\ \frac{S_{i-1}}{L_{i-1}^0 + \Delta L_{i-1}} \Delta z_{i, i-1} + \frac{S_i}{L_i^0 + \Delta L_i} \Delta z_{i, i+1} = P_{z, i} \end{cases}$$

dove:

$$\Delta x_{i, i-1} = x_i - x_{i-1} \quad (x_i \text{ e } z_i \text{ coordinate del nodo } i)$$

$$\Delta z_{i, i-1} = z_i - z_{i-1}$$

e similari

L_i^0 , lunghezza iniziale dell'elemento i

$$\Delta L_i \equiv \frac{(S_i - S_i^0) L_i^0}{EA_i}, \text{ allungamento elastico dell'elemento } i$$

$S_i(S_i^0)$, forza finale (iniziale) presente nell'elemento i di membrana

$P_{x, i}(P_{z, i})$, componente secondo $x(z)$ del carico nel nodo i , somma dei contributi delle azioni distribuite sugli elementi $i-1$ e positiva se diretta secondo le $x(z)$ crescenti.

La soluzione del sistema non lineare può essere facilmente impostata procedendo iterativamente per sostituzione e provvedendo, nelle varie iterazioni, a modificare i coefficienti delle equazioni sia per il cambiamento della geometria, sia per tenere conto della deformabilità del materiale costituente la membrana, e ad aggiornare il carico in relazione ancora alle modificazioni di geometria della struttura e, nel caso del vento, alla modificazione anche dei coefficienti di pressione, pur dedotti da diagrammi di distribuzione di pressione relativi a strutture rigide [3].

Ovviamente il procedimento sarà arrestato quando le equazioni (a) risultano soddisfatte a meno di un prefissato scarto percentuale ragionevolmente piccolo.

Il metodo di soluzione, impiegando veloci elaboratori, si presenta assai snello anche per raffinate discretizzazioni potendo, fra l'altro, provvedere alla scrittura di un'equazione per volta, senza quindi cadere nell'inconveniente di impegnare vasti settori dei sistemi operativi.

Va inoltre osservato che con questo tipo di impostazione del problema può essere facilmente organizzato un completo ciclo di progettazione automatica interattiva. Infatti è possibile (con l'impiego di un video-display) in una prima fase dello studio procedere alla ricerca della forma della struttura ottimizzandola agli obiettivi funzionali richiesti. Assegnate le condizioni geometriche che deve rispettare la struttura pneumatica (dando ad esempio le coordinate x_i e/o z_i di alcuni nodi) e pensando di trascurare il peso proprio, si possono scegliere dei valori di progetto della pressione interna, nonché dello sforzo della membrana S_i^0 (costante nei tratti di membrana non vincolati) e della lunghezza dei singoli elementi L_i^0 (in sostanza si scelgono gli n valori del rapporto S_i^0 / L_i^0).

Risolvendo una prima volta il sistema di equazione (a), si perviene all'individuazione della forma delle strutture (1) che può essere immediatamente corretta in senso progettuale interagendo con l'elaboratore con una nuova serie di istruzioni.

Raggiunta la configurazione statica desiderata, si può di seguito procedere ad analizzare gli effetti dei carichi, siano essi dovuti a neve, o al vento (con la precisazione fatta in precedenza), risolvendo nuovamente il sistema di equazioni (a); analogamente si può procedere per correggere la configurazione iniziale tenendo conto del peso proprio.

Alcune applicazioni

Al fine di esemplificare quanto precedentemente illustrato si sono risolti alcuni casi.

Nelle figure 3 e 4 è riportata la geometria che assume una struttura pneumatica allorché vengono fissate, oltre alla lunghezza della sua linea direttrice, le condizioni per i punti estremi (1 e 21) e ad esempio una condizione per un punto intermedio (es.: il valore di z_i); in questo caso, per la pressione interna $p = 35 \text{ kg/m}^2$, lo sforzo nella membrana risulta rispettivamente $S_I = 246 \text{ kg/m}$ nel tratto dal punto 1 al punto 8, e $S_{II} = 334 \text{ kg/m}$ dal punto 8 al punto 21. Inoltre nella figura 3 è indicata, sovrapposta alla forma iniziale, la configurazione deformata assunta dalla struttura, senza tener conto della elasticità del materiale, per effetto di un carico verticale tipo neve ($p_n = 15 \text{ kg/m}^2$) fra i punti 11 e 14; come appare evidente dalla configurazione deformata, il punto 8 si sposta orizzontalmente (si è simulato appunto l'effetto di un vincolo a carrello). Ovviamente si trova che il regime degli sforzi si attenua leggermente aumentando la curvatura nella zona non caricata [$S_{\text{min}(1-8)} = 232 \text{ kg/m}$, $S_{\text{min}(8-21)} = 323 \text{ kg/m}$].

Nella figura 4 invece è indicata, sovrapposta alla forma iniziale, la configurazione deformata inestensionale sotto l'effetto di un carico tipo vento ($p_v = 60 \text{ kg/m}^2$) affetto da coefficiente $C(\theta)$ (essendo θ in un punto generico della struttura l'angolo formato dalla tangente alla membrana, rispetto

(1) Da tale configurazione geometrica si può risalire alle lunghezze di costruzione sottraendo alla lunghezza dei singoli elementi l'allungamento elastico per effetto della pressione interna.

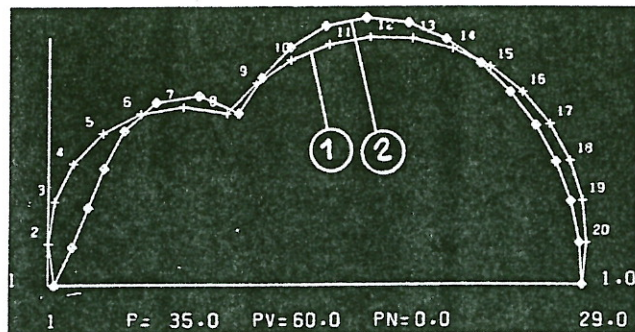


Fig. 3. Membrana cilindrica con punto intermedio vincolato ($z = \text{cost}$); caso con $p = 35 \text{ kg/m}^2$; $p_v = 60 \text{ kg/m}^2$; $p_n = 0$ ed $E \cdot s = \infty$.

all'orizzontale) che, a puro titolo esemplificativo, sono stati desunti dai diagrammi non strettamente pertinenti (2).

In questo caso la modificazione di tensione nella membrana dà: $S_{(1-8)} = 221 \text{ kg/m}$; $S_{(8-21)} = 393 \text{ kg/m}$.

Sempre a titolo di esempio nelle figure 5, 6 e 7 è riportata come base la configurazione iniziale di una struttura pneumatica, per la quale si sono fissate le sole condizioni nei punti estremi: la figura 5 mostra gli assetti deformati, con la pressione interna di 35 kg/m^2 sotto l'azione di un carico di neve di intensità $p_n = 25 \text{ kg/m}^2$, nel tratto compreso fra i nodi 6 e 16, sia nel caso di materiale inestensibile, sia nel caso in cui per il prodotto $E \cdot s$ si è assunto il valore di $5 \cdot 10^4 \text{ kg/m}$.

Nelle figure 6 e 7 si sono invece riportati gli assetti deformati della membrana sotto l'azione di un carico per vento di intensità $p = C(\theta) p_v$, dove p_v è stato assunto pari a 80 kg/m^2 e la funzione $C(\theta)$, secondo quanto indicato da alcuni Autori [4], è quello dedotto da esperienze su modelli rigidi di ugual forma, avendo considerato il materiale sia inestensibile, sia deformabile con i valori di $E \cdot s$ pari rispettivamente a $5 \cdot 10^4 \text{ kg/m}$ e $3 \cdot 10^4 \text{ kg/m}$.

Per mettere tuttavia in evidenza l'influenza che può avere la deformabilità del materiale anche in ordine all'aggravamento della distribuzione delle pressioni in funzione di $C(\theta)$, si è quindi risolto il caso di una struttura più ribassata (fig. 8), sempre soggetta alle stesse condizioni di pressione interna e di vento, assunto ancora $E \cdot s = 5 \cdot 10^4 \text{ kg/m}$. In questo caso l'influenza della deformabilità del materiale si fa risentire in maniera sensibile in quanto, mentre lo sforzo di membrana iniziale vale $S_0 = 703 \text{ kg/m}$, quello finale per $E \cdot s = \infty$ vale $S = 2304 \text{ kg/m}$, che si riduce poi leggermente, per $E \cdot s = 5 \cdot 10^4 \text{ kg/m}$, a $S = 2206 \text{ kg/m}$. Dalla soluzione di questi casi è inoltre possibile pervenire al tracciamento di utili diagrammi che danno, ad esempio, lo spostamento massimo verso l'interno della membrana in funzione dei valori della pressione interna p e di p_v . Nella figura 9 sono appunto riportate le curve, a $p = \text{cost}$, che danno il valore dello spostamento massimo verso l'interno δ_{max} (rapportato alla larghezza L della struttura), in funzione della p_v , per una struttura di forma iniziale come quella di fig. 5.

Fissato il valore massimo accettabile del rapporto δ_{max}/L , è possibile ricavare l'andamento di p in funzione di p_v (in questo caso pressoché lineare nella fascia dei valori pratici di p) utile per impostare il progetto di un servomeccanismo che automatizzi la conduzione della struttura. Va tuttavia osservato che le limitazioni precedentemente indicate non tengono conto di particolari stati di turbolenza della corrente d'aria che possono produrre anche singolari effetti sulla deformata.

(2) Trascendendo lo scopo di questa nota l'individuazione dei coefficienti $C(\theta)$ ci si è riferiti a quelli di una membrana cilindrica a direttrice circolare.

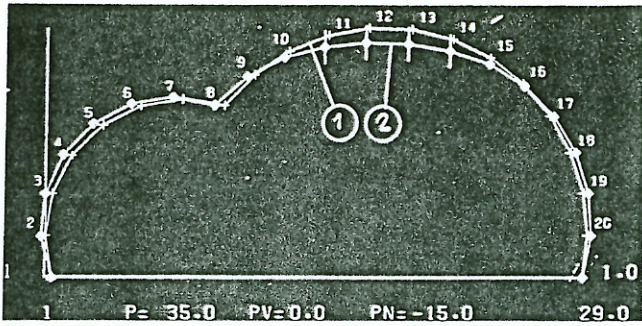


Fig. 4. Membrana cilindrica con punto intermedio vincolato ($z = \text{cost}$); caso con $p = 35 \text{ kg/m}^2$; $p_v = 0$; $p_n = -15 \text{ kg/m}^2$ dal punto 11 al punto 14 ed $E \cdot s = \infty$.

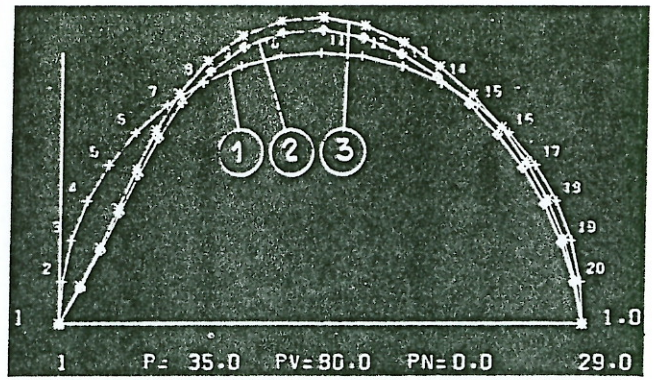


Fig. 6. Membrana cilindrica vincolata solo alle estremità; casi con $p = 35 \text{ kg/m}^2$; (1) Assetto in assenza di carichi esterni. (2) $p_v = 80 \text{ kg/m}^2$; $E \cdot s = \infty$. (3) $p_v = 80 \text{ kg/m}^2$; $E \cdot s = 5 \cdot 10^4 \text{ kg/m}$.

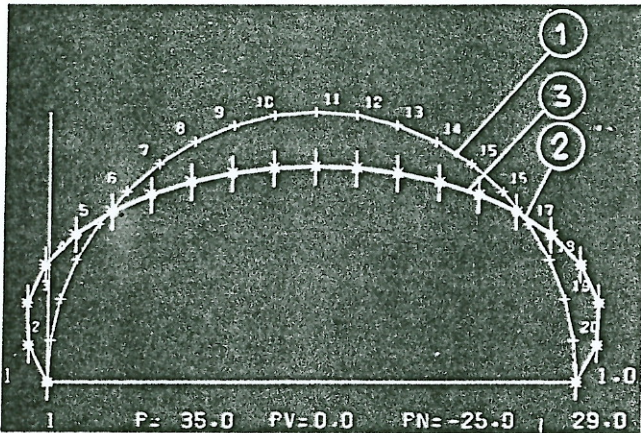


Fig. 5. Membrana cilindrica vincolata solo alle estremità; casi con $p = 35 \text{ kg/m}^2$; (1) Assetto in assenza di carichi esterni. (2) $p_n = -25 \text{ kg/m}^2$ dal punto 2 al punto 20; $E \cdot s = \infty$. (3) $p_n = -25 \text{ kg/m}^2$ dal punto 2 al punto 20; $E \cdot s = 5 \cdot 10^4 \text{ kg/m}$.

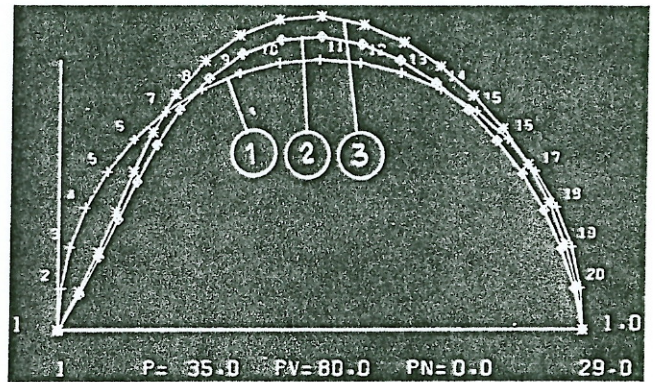


Fig. 7. Membrana cilindrica vincolata solo alle estremità; casi con $p = 35 \text{ kg/m}^2$. (1) Assetto in assenza di carichi esterni. (2) $p_v = 80 \text{ kg/m}^2$; $E \cdot s = \infty$. (3) $p_v = 80 \text{ kg/m}^2$; $E \cdot s = 3 \cdot 10^4 \text{ kg/m}$.

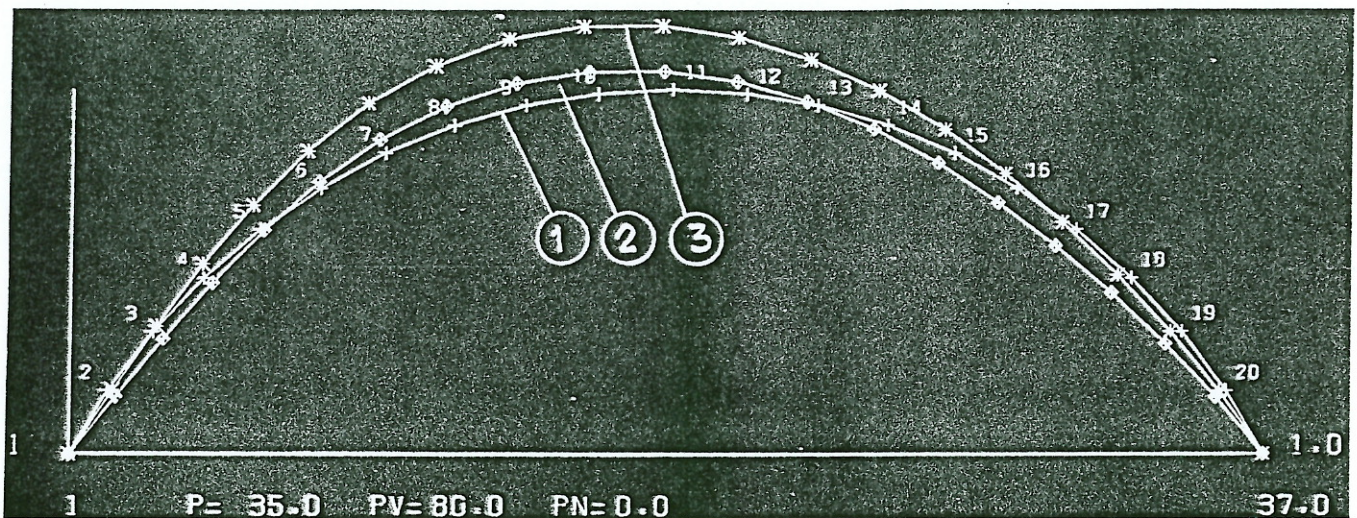


Fig. 8. Membrana cilindrica; casi con $p = 35 \text{ kg/m}^2$. (1) Assetto in assenza di carichi esterni. (2) $p_v = 80 \text{ kg/m}^2$; $E \cdot s = \infty$. (3) $p_v = 80 \text{ kg/m}^2$; $E \cdot s = 5 \cdot 10^4 \text{ kg/m}$.

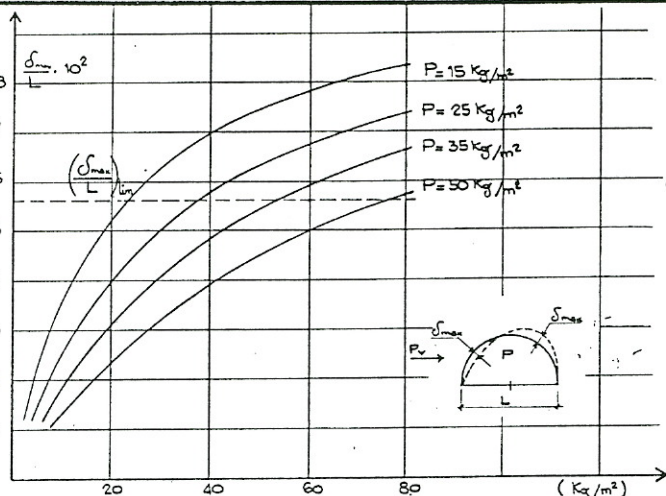


Fig. 9. Curve a $p = \text{cost}$ che danno il valore dello spostamento massimo verso l'interno δ_{max} (rapportato alla larghezza L della struttura) in funzione della p_v .

Il programma di calcolo interattivo

Per la risoluzione di casi piani di pneumostrutture è stato messo a punto un programma interattivo denominato CIL, che opera sul calcolatore CDC Cyber 76 del CINECA, attraverso un terminale grafico Tektronic 4010.

Allo scopo di rendere più « conservativo » il collegamento, il programma permette, grazie ad una serie di opzioni, la modifica di molti parametri anche in corso di elaborazione. In particolare:

- 1) è possibile modificare la precisione richiesta nella individuazione degli stati deformativi;
- 2) possono essere combinati in maniera diversa i valori della pressione interna (p), del carico neve (p_n) e del carico per vento (p_v);
- 3) possono essere modificati i valori delle coordinate dei punti iniziali e finali della sezione trasversale della struttura;
- 4) può essere vincolato, sia in direzione verticale, sia orizzontale, qualunque punto interno della membrana;
- 5) una volta introdotti i valori del modulo elastico del materiale e dell'area della sezione di una striscia unitaria, viene valutato, sotto l'effetto dei carichi, lo stato di deformazione della struttura, tenuto conto appunto della deformabilità del materiale, sovrapponendolo, nella rappresentazione grafica, al corrispondente caso inestensionale.

Sono ovviamente possibili le combinazioni di queste opzioni. Appare quindi evidente come la fase progettuale possa considerarsi effettivamente assistita dall'analisi automatica, secondo cioè quegli orientamenti attuali che tendono a porre l'ingegnere, alleggerito da pesanti oneri computazionali, al centro dell'opera di sintesi.

Il caso spaziale

Il caso più generale di strutture pneumatiche a pianta circolare o quadrata irrigidite o meno da reti di funi può essere affrontato, oltre che con metodi assai onerosi dal punto di vista computazionale [10], ancora nello spirito del procedimento dianzi illustrato per il caso piano, pervenendo alla individuazione sia della geometria dello stato iniziale (in presenza cioè della sola pressione interna), sia dell'assetto deformato in presenza dei carichi esterni.

Schematizzata quindi la struttura con un reticolo di aste fittizie a maglie quadrangolari ⁽¹⁾ per il generico nodo k

⁽¹⁾ La scelta del reticolo può essere fatta indifferentemente, nella prima fase, a maglie triangolari, tuttavia adottando un reticolo a maglie quadrangolari tali che la loro proiezione orizzontale sia costituita da quadrilateri a lati pressoché paralleli, si può facilmente individuare, in prima approssimazione, lo stato tensionale nella membrana senza dover ricorrere a pesanti elaborazioni.

possono essere scritte le seguenti equazioni di equilibrio secondo gli assi del sistema di riferimento generale:

$$(b) \begin{cases} \sum_i \frac{S_{k,i}}{L_{k,i}} \Delta x_{k,i} = P_{x,k} \\ \sum_i \frac{S_{k,i}}{L_{k,i}} \Delta y_{k,i} = P_{y,k} \\ \sum_i \frac{S_{k,i}}{L_{k,i}} \Delta z_{k,i} = P_{z,k} \end{cases}$$

con le sommatorie estese a tutti i nodi i circostanti il nodo k , dove

$$\Delta x_{k,i} = x_k - x_i$$

e similari

$$L_{k,i} = \sqrt{(\Delta x_{k,i})^2 + (\Delta y_{k,i})^2 + (\Delta z_{k,i})^2}$$

essendo

x_k, y_k, z_k le coordinate del nodo k

$L_{k,i}$ la lunghezza dell'asta k, i

$S_{k,i}$ la forza presente nell'asta k, i

$P_{x,k}$ (e similari) la componente secondo x della forza esterna applicata nel nodo k .

Assunti per le fittizie aste opportuni valori iniziali della densità di sforzo $q_{k,i}^0 = S_{k,i}^0 / L_{k,i}$, pari cioè al rapporto fra lo sforzo in un'asta e la sua lunghezza, si può procedere alla soluzione del sistema di equazioni (b), in tal modo linearizzato, di $3n$ equazioni in $3n$ incognite (coordinate dei nodi non vincolati) per via iterativa, ottenendo così una configurazione di primo tentativo che può essere facilmente controllata mediante rappresentazione grafica su cinescopio.

Procedendo quindi nello spirito di una progettazione strutturale automatica di tipo interattivo, si può correggere la forma iniziale ottimizzandola nei confronti di un prefissato obiettivo anche di tipo funzionale ⁽²⁾ (fig. 10).

E' quindi possibile operando sulla struttura iniziale, schematizzata con un reticolo a maglie quadrangolari, dotata cioè di una fittizia capacità di adattamento, pervenire, in prima approssimazione, al calcolo degli effetti deformativi prodotti dai carichi esterni.

Riscritto il sistema di equazioni (b) e modificati i termini noti per tener conto degli effetti dei carichi esterni ⁽³⁾, si procede alla soluzione del sistema di equazioni non lineare

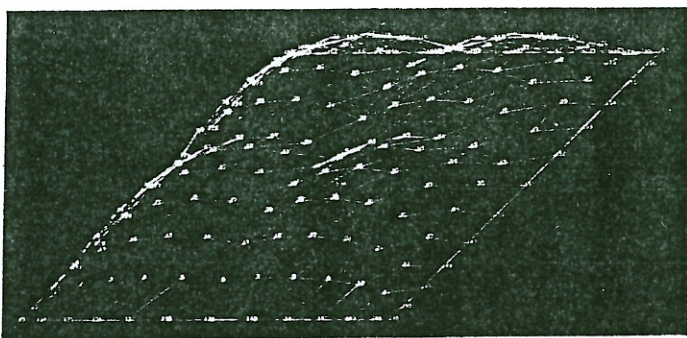


Fig. 10. Assonometria di una pneumostruttura a base quadrata con il punto centrale vincolato secondo z e funi irrigidenti secondo gli assi mediani ($p = 25 \text{ kg/m}^2$).

⁽²⁾ Si potrebbe imporre ad esempio l'uniforme stato di tensione nella struttura, seppur discretizzata, ma una membrana a uniforme stato di tensione a pianta quadrata non presenta apprezzabili requisiti dal punto di vista funzionale specialmente per quanto riguarda l'utilizzazione degli spazi interni in prossimità degli angoli.

⁽³⁾ Più incerte si fanno in questi casi le assunzioni dei coefficienti per individuare le distribuzioni della pressione esercitata dal vento sulla membrana.

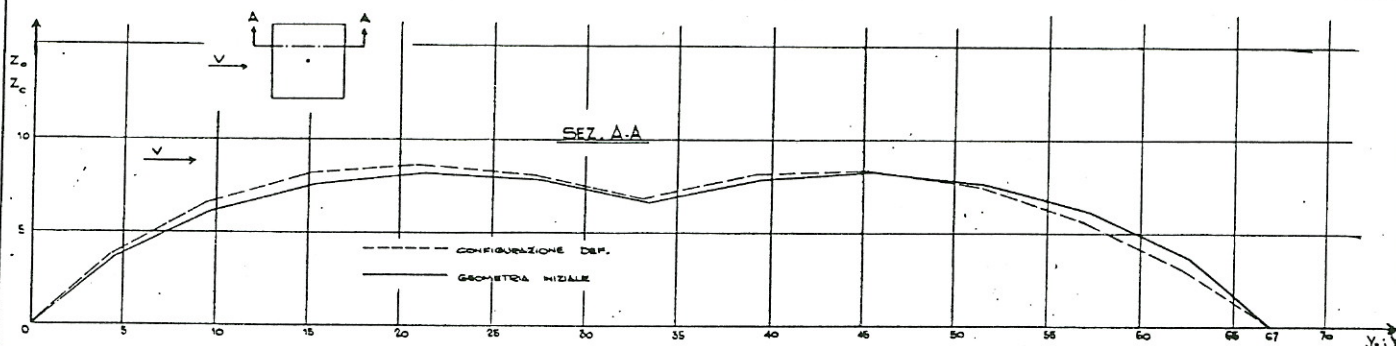


Fig. 11. Sezione della struttura di fig. 10 nelle configurazioni iniziale e deformata ($E \cdot s = \infty$).

imponendo come obiettivo di rendere minima, nell'ambito di una trattazione inestensionale, la differenza fra le lunghezze iniziali e finali delle fittizie aste (fig. 11).

Osservazioni conclusive

Appare evidente dalla trattazione svolta come in questo campo di strutture siano di fondamentale importanza gli ausili di calcolo automatico e come sia possibile in questi casi mettere a punto dei programmi che più di altri forniscano suggestive anticipazioni di una interessante evoluzione della procedura per la progettazione strutturale. Per quanto riguarda lo specifico problema, appaiono ancora assai sfuggenti soprattutto le indicazioni relative al comportamento delle pneumostrutture in presenza di correnti d'aria turbolente, tuttavia le indicazioni acquisibili con i procedimenti di calcolo illustrati costituiscono una base idonea per iniziare alcuni confronti con risultati sperimentali tratti da esperienze su strutture in vera grandezza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Majowiecki M., Tironi G.: « Geometrical configuration of pneumatic and tent structure obtained with interactive computer aided design ». IASS World Congress on Space Enclosures, Montreal, luglio 1976.
- [2] Augusti G., Chiarugi A., Spinelli P.: « Problemi strutturali e normativi nelle strutture aerosupportate a singolo strato ». CIB-IASS Int. Symp. on Air Supported Structures, Venezia, giugno 1977.
- [3] Grillaud G., Gandemer J.: « Etude de la response dynamique d'une structure gonfable: étude en soufflerie ». CIB-IASS Symp. Intern. sur les Structures Gonfables, Venezia, giugno 1977.
- [4] Uemura M.: « Membrane Tension and Deformation in Cylindrical Pneumatic Structures Subject to wind Loads ». IASS Pac. Symp. on Tension Structures, Tokyo, 1971.
- [5] Parbery R.D.: « A Continuous Method of Analysis for the Inflatable Dam ». Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 2, 725-736, dicembre 1976.
- [6] Harrison B.H.: « The Analysis and Behavior of Inflatible Membrane Dams under Static Loadings ». Proc. Instn. Civ. Engrs., 661-676, aprile 1970.
- [7] Yermolov U.V.: « On methods of determining a cylindrical shell's profile deformed by wind action ». CIB-IASS Int. Symp. on Air Supported Structures, Venezia, giugno 1977.
- [8] Geiger D., Majowiecki M.: « Strutture pneumatiche con funi di contenimento in acciaio per la copertura di grandi luci ». *Acciaio* n. 9 - 1977.
- [9] Spinelli P.: « Wind effects on a cylindrical air supported structures ». 3° Coll. on Buildings Aerodynamics Aachen, giugno 1978.
- [10] Haug E., Oelbermann J.: « Numerical design and analysis of pneumatic structures ». CIB-IASS Int. Symp. on Air Supported Structures, Venezia, giugno 1977.
- [11] Majowiecki M., Tironi G.: « Alcune applicazioni di progettazione interattiva mediante calcolatore nello studio di strutture fortemente deformabili ». *Progettazione automatica di strutture - INARCOS* n. 387 - 4-1978.