

# Strutture d'aria

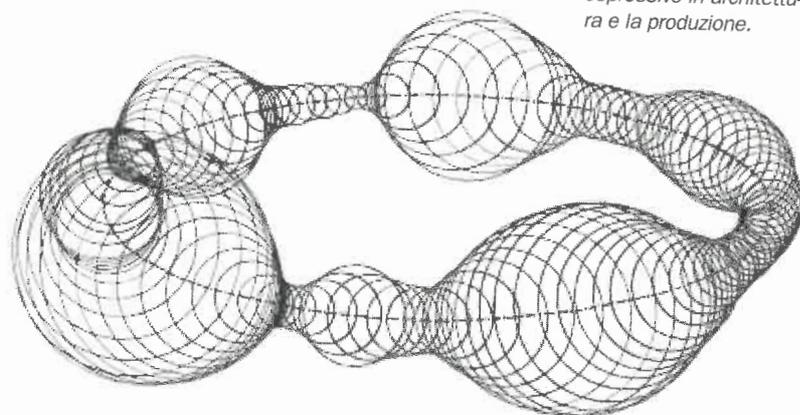
Nate in ambiente militare si sono sviluppate nell'architettura sportiva, fieristico-espositiva e per eventi speciali. Il progetto e le caratteristiche costruttive

*Questa è la prima parte di un articolo sulle strutture gonfiabili. Nel secondo articolo, previsto per settembre, verranno approfonditi gli aspetti sulla sicurezza, l'uso di questa tecnologia come elemento espressivo in architettura e la produzione.*

Giuliana Iannaccone -Cristiana Saboia De Freitas \*

**Q**uesto articolo vuole completare e chiudere il discorso affrontato nei precedenti numeri di Modulo (275, 276, 278) sulle strutture sottoposte a tensione. Le strutture gonfiabili, infatti, sono anch'esse tensostrutture, ed è per questo che sono accomunate a quest'ultime da una serie di caratteristiche, pur rappresentandone una categoria particolare in quanto ai fini della loro stabilità viene sfruttata la differenza tra la pressione interna alla membrana e quella atmosferica.

*\*Sezione Tecnologia e Ambiente del Dipartimento di Progettazione Urbana  
Università degli Studi di Napoli "Federico II"*



*Sviluppo di forme per le strutture pneumatiche. Concettualmente, una struttura può essere realizzata con la tecnologia delle strutture pneumatiche quando la sua forma è definita da una successione di sfere circoscritte, o quando possono essere inserite circonferenze nella sua sezione verticale. Le sfere o le circonferenze che definiscono la struttura possono avere diametro costante o variabile e possono essere dislocate lungo un asse diritto o curvo. Il raggio di curvatura dell'asse di dislocamento non deve essere tuttavia troppo piccolo rispetto ai raggi delle sfere teoricamente inscritte nella struttura. Osservando questi principi costruttivi è possibile investigare un grande numero di forme in relazione alla loro possibilità di diventare una struttura pneumatica (immagine ridisegnata a partire dai disegni in Conrad Roland, Frei Otto: Structures Longman Group, London, 1970).*



# Sviluppo storico

di Giuliana Iannaccone

Il primo ad immaginare la possibilità di utilizzare la pressione dell'aria come sostegno di tende fu l'ingegnere inglese F. W. Lanchester. Nel 1917 pervenne al brevetto di un sistema per la costruzione di ospedali da campo, tende o magazzini (brevetto n° 110339).

Egli non si limitò a pensare ad una semplice membrana sostenuta dalla pressione dell'aria, ma introdusse un sistema di irrigidimento costituito da cavi e reti.

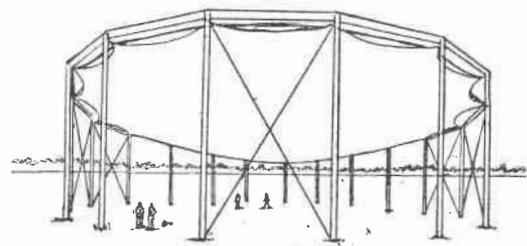
Il brevetto di Lanchester non suscitò tuttavia particolare interesse nell'ambito delle costruzioni e questo probabilmente perché la sua idea di impiegare la pressione dell'aria interna per sostenere tende era certamente rivoluzionaria rispetto ai sistemi tradizionali, e considerata all'epoca poco sicura.

Prima di allora non era mai stata considerata la possibilità di utilizzare l'aria come materiale strutturale ed è per questo che le strutture gonfiabili, che a partire dagli anni Cinquanta cominceranno ad avere particolare importanza per la loro caratteristica di leggerezza, possono essere considerate una delle più importanti innovazioni costruttive degli ultimi 100 anni.

Come si è detto, è proprio negli anni 50 che si hanno le prime realizzazioni di strutture pneumatiche: simultaneamente Walter Bird negli Stati Uniti e Frei Otto a Berlino stavano lavorando su idee simili senza conoscere l'uno l'attività dell'altro ed i progetti di Lanchester.

Nel 1959 l'architetto Carl Koch e l'ingegner Weidlinger progettano la copertura del Boston Art Center. Questa fu concepita come un tetto gonfiato rapidamente smontabile e ad altezza variabile, costituito da due membrane circolari di nylon, del diametro di circa 44m, incernierate ad un anello di acciaio sostenuto da pilastri pure in acciaio. Questa struttura gonfiabile a forma di lente venne anche proposta come cassaforma per il getto di cupole in cemento armato: un'idea che ebbe successo solo anni più tardi con i famosi gusci di Dante Bini.

Il Teatro Smontabile della United States Atomic Energy Commission, 1959, di Walter Bird e Victor Laundy. All'interno del volume principale vi è una cupola pneumatica più piccola che contiene un reattore nucleare sperimentale, con pareti divisorie rigide e schermi di protezione.



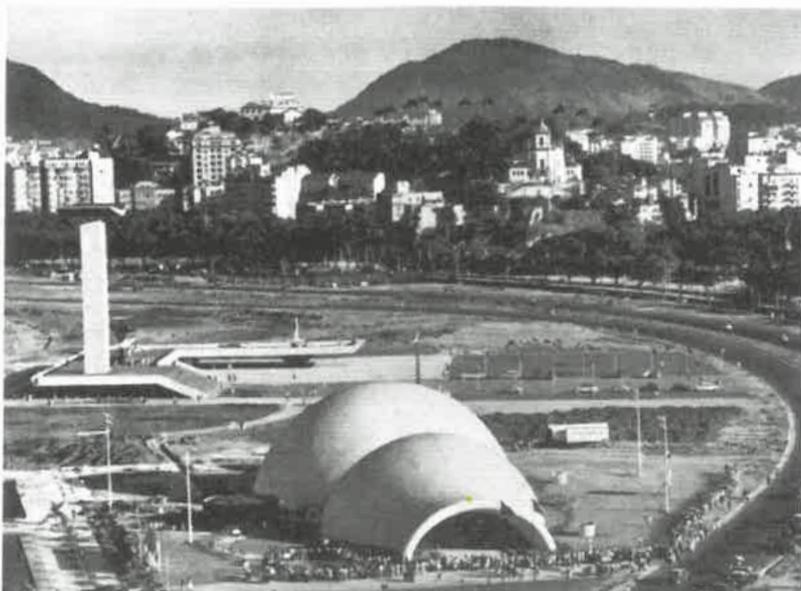
Come in molte altre situazioni la spinta innovativa provenne da esigenze emerse in ambiente militare. Negli anni 50 il governo degli Stati Uniti si stava interessando della protezione dei radar-antenne, di recente invenzione, aventi la forma di piatti fondi con un diametro di 60 metri e oltre. Tali radar erano necessari alla individuazione degli aerei nel nord del continente e dovevano essere posizionati soprattutto in Alaska e Canada, dove però risultavano particolarmente soggetti al vento, alla neve e alla formazione di strati di ghiaccio: andavano cioè protetti al fine di evitare deformazioni indotte sulle loro superfici. Si arrivò perciò alla costruzione delle cosiddette Radoms (da radar domes o cupole per radar) progettate dal team di Buckminster Fuller, e basate sulla combinazione di gusci ottenuti con un graticcio di acciaio o alluminio con una copertura plastica.

La prima Radom fu gonfiata nel 1954. Walter Bird, che partecipò a tale progetto, fondò nel 1956 la sua impresa "Birdair Structures" che divenne in poco tempo un leader mondiale nella produzione di strutture gonfiabili e di tende sostenute da pali.

In questa occasione fu necessario produrre membrane ad alta resistenza: la Owen-Corning pervenne così alla produzione di tessuti in fibre di vetro annegate in 'matrici' di plastica, dando inizio ad ulteriori ricerche nel campo dei materiali per membrane in grado di rispondere alle esigenze più diverse nel campo dell'architettura. Più o meno negli stessi anni (1952) Frei Otto stava sviluppando studi sul gonfiaggio delle membrane di alluminio.

Egli aveva osservato che le tende supportate da pali potevano stare in piedi senza pali se veniva aumentata la pressione interna o attraverso l'aspirazione del vento esterno o attraverso l'impiego di ventilatori in assenza di vento.

Le sue prime ipotesi di tende sostenute dall'aria risalgono al 1956/57: egli progettò due strutture di cui la prima per una fabbrica costituita da tre cupole del diametro di 800m ciascuna e la



seconda per un padiglione espositivo alla Floriade del 1958 di Rotterdam, che non fu mai costruita.

Negli anni compresi tra il 1958 e il 1961 Frei Otto sviluppò, insieme ad alcuni suoi colleghi, una intensiva ricerca di base i cui risultati furono pubblicati nel 1962 in un volume dal titolo *Zugbeanspruchte Konstruktionen Band I*. Questo testo, che ancora oggi rappresenta un importante riferimento, contiene progetti ed idee che contemplano quasi tutte le tipologie di strutture pneumatiche note fino ad oggi.

Tra le opere di Walter Bird possiamo invece ricordare il padiglione smontabile progettato per la US Atomic Energy Commission insieme all'architetto Victor Lundy, installato per la prima volta a Rio de Janeiro nel 1959<sup>1</sup>.

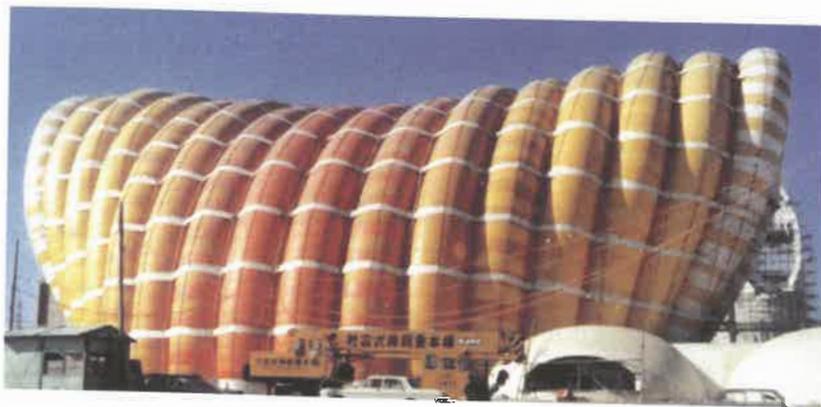
Tale padiglione costituisce un esempio molto importante di struttura pneumatica per la sua complessità. Esso era costituito da due volumi di forma emisferica collegati da un collare a cui si poteva accedere da entrambe le estremità attraverso porticati ad arco. Questi ultimi, che fungono da aero-serrature per l'intero padiglione, a differenza del resto della struttura, non sono sostenuti su un cuscino d'aria, ma sono semplici strutture gonfiate mantenute rigide dalla pressione interna dell'aria.

Il volume principale era invece una struttura pneumatica che, oltre a racchiudere al suo interno un pressione di 49 mm al di sopra di quella atmosferica, è costituita da un doppio involucro, con una certa pressione mantenuta dai due involucri.

Questo accorgimento offrì maggiori garanzie di sicurezza in caso di sgonfiamento improvviso causato da incidenti o atti di vandalismo.

A partire dagli anni '60, in breve tempo, in Europa, Stati Uniti e Giappone furono costruite circa 20.000 strutture pneumatiche per magazzini, attrezzature sportive, serre e padiglioni espositivi, spesso progettate senza adeguate conoscenze. Molte di queste furono infatti distrutte da tempeste: nel 1968 una sola tempesta fu sufficiente a spazzarne via circa 200 nel nord Europa. Altre furono invece distrutte da nevicate, quando l'elettricità per i ventilatori era venuta meno oppure la neve aveva bloccato le bocche di immissione dell'aria<sup>2</sup>.

Lentamente si apportarono miglioramenti a tali strutture permettendo la realizzazione di coperture pneumatiche di grandi dimensioni



anche nei climi più difficili.

Un momento particolarmente importante nella storia delle strutture gonfiabili fu l'Expo di Osaka del 1970. In tale occasione furono presentate due strutture esemplari: la copertura del padiglione degli USA ed il padiglione Fuji.

La copertura del padiglione americano fu concepita nel 1967 da David Geiger. Egli propose una copertura pneumatica tipo Lanchester costituita da Fiberglas rinforzato da una membrana di vinile ancorata a un muro inclinato di cemento armato. Tale membrana ricopriva uno spazio ovale lungo 142 m e largo 83 m, e la curva schiacciata fu resa possibile grazie al sostegno di una rete di 32 cavi.

Yukata Murata fu invece il progettista del Padiglione Fuji, realizzato con 16 salsicce curve, del diametro di 3,7 metri, disposte intorno ad un cerchio di 45,7 metri di diametro per un'altezza di 22,9 metri. Le potenzialità offerte dalle strutture pneumatiche, aprirono il campo ad ulteriori studi. Nei primi anni Settanta Frei Otto, Kenzo Tange e Ove Arup & Partners lavorarono al progetto di una "Città in Antartide", ovvero al progetto di una copertura gonfiabile a climatizzazione completamente controllata in grado di coprire una città di 45.000 abitanti.

Un lavoro di grande attualità, se si considerano tutte le ricerche in corso in merito alle problematiche del clima e del 'global change'.



*Il padiglione Fuji all'Expo 70. La membrana dei tubi era costituita da uno strato di acetato di polivinilico di notevole resistenza, verniciato esternamente di Hypalon e rivestito internamente da PVC. Aumentando opportunamente la pressione all'interno dei tubi era possibile irrigidire la copertura in modo sufficiente per resistere a venti tifonici.*

*Tra le coperture più grandi mai realizzate fino al 1980 non va dimenticata quella del Pontiac Stadium di Pontiac nel Michigan per la particolare membrana, concepita da Geiger come un insieme di pannelli separati uniti l'uno all'altro con cerniere lampo. Questa particolare conformazione permise una veloce riparazione della copertura che fu parzialmente distrutta da un tifone attraverso la semplice sostituzione dei pannelli lacerati (cfr. "Non senza problemi" in Modulo 275, ottobre 2001, pag. 957).*

# I principi strutturali delle pneumatiche<sup>3</sup>

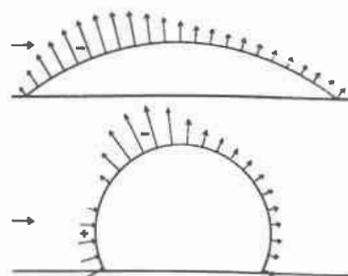
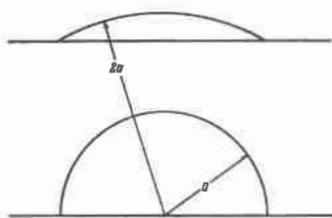
di Cristiana Saboia de Freitas

Le strutture pneumatiche sono una classe di tensostrutture<sup>4</sup> in cui la forma<sup>5</sup> e la stabilità sono ottenute dalla differenza tra la pressione interna della membrana e la pressione atmosferica. Questa differenza di pressione può essere ottenuta con l'ausilio di ventilatori, per l'introduzione di aria calda all'interno della membrana, oppure attraverso altri sistemi simili. L'assenza di elementi di supporto strutturale rigidi - come colonne, muri, archi, ecc. - propria delle strutture sostenute dall'aria, porta alla definizione del tipo di costruzione più leggera mai creata dall'uomo. Una membrana di questo tipo potrebbe in teoria restare sospesa (come le bolle di sapone) e, per questa ragione, non è possibile determinare una luce teorica massima raggiungibile tramite le strutture pneumatiche - si potrebbe addirittura ipotizzare una membrana capace di coprire tutta la superficie terrestre! Consideriamo, ad esempio, una membrana leggermente curva, soggetta ad una pressione interna che produce una tensione uniforme nella sua superficie. Si può osservare che, quando un carico uniformemente distribuito, come la neve, agisce su questa membrana, la tensione prodotta dalla pressione dell'aria diminuisce, arrivando teoricamente a zero, se il suddetto carico fosse uguale a quello della pressione interna. In questo caso, si verifica la condizione teorica in cui le parti della struttura non sono sottoposte ad alcuna tensione e, quindi, non esistono elementi strutturali: in altre parole, il carico della neve è sostenuto dall'aria stessa e la membrana serve soltanto come strato di separazione.

In realtà, mentre la pressione interna è sempre uniformemente distribuita, la neve e il vento producono carichi non simmetrici e, per questo, si verificano tensioni di compensazione nella membrana.

La valutazione ed il dimensionamento di queste compensazioni sono fondamentali nel calcolo strutturale delle pneumatiche.

Quanto maggiori saranno gli sforzi che la strut-



tura dovrà reggere, più alta sarà la pressione interna ad essa applicata. Poiché il tipo, l'intensità e la direzione dei carichi accidentali sono alquanto irregolari e variabili, sarebbe necessario adeguare il livello della pressione interna di volta in volta secondo le necessità. Per evitare il cambiamento continuo dei livelli di pressione interna, viene imposta alla struttura una pressione costante in grado di sostenere il livello di carico massimo presunto e, pertanto, la membrana lavora in uno stato continuo di pretensione per carico massimo. Nelle situazioni in cui il risparmio energetico costituisce l'elemento centrale del progetto, la pressione interna può essere adattata alle condizioni specifiche di sforzo - assumendo che il controllo della pressione sia affidabile. In questo modo sarebbe impiegata soltanto la quantità minima di energia necessaria a mantenere la struttura pneumatica stabile in ogni specifica situazione di sollecitazione. Questo non avviene per le strutture convenzionali in cui è necessario il "consumo unico" di materiale costruttivo, determinato dai carichi massimi che eventualmente essa dovrà sopportare nell'arco di tutta la sua vita utile, indipendentemente dagli sforzi a cui sarà effettivamente sottoposta.

Il consumo costante di energia per mantenere alta la pressione interna alla membrana implica che il costo totale di costruzione di una struttura pneumatica può essere stabilito soltanto in relazione al tempo di vita utile. In questo senso, e anche per la facilità di installazione e dismissione

*I livelli di tensione nella membrana. In una membrana sferica o costituita da una porzione di sfera, sottoposta esclusivamente a pressione interna, la tensione "M" dipende dal raggio di curvatura "r" e della pressione "p", nella relazione  $M = -pr$ . Le due coperture illustrate coprono aree uguali. Il raggio e quindi gli sforzi a cui è sottoposta la membrana più bassa saranno, a parità di pressione interna, equivalenti al doppio di quelli sopportati dalla membrana più alta. Viceversa, la superficie totale della membrana e gli sforzi da sopportare dovuti al carico del vento saranno significativamente inferiori per la cupola più bassa. L'"economia strutturale" per le due cupole è, quindi, relativa. (immagine ridisegnata a partire dai disegni in Conrad Roland, Frei Otto: Structures, Llongman Group, London, 1970).*



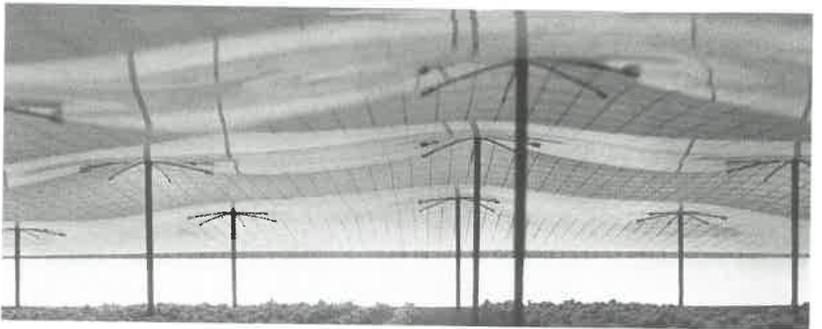
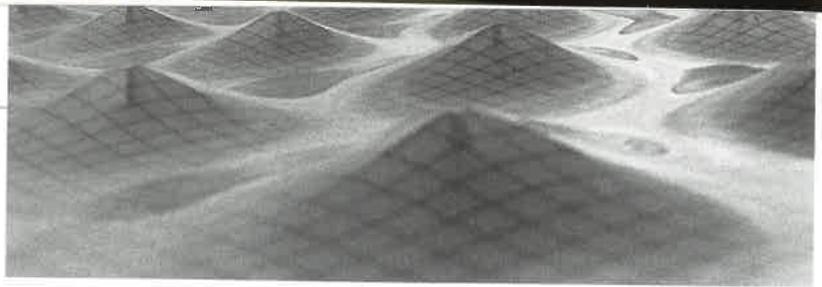
*Modelli di studio della forma di strutture pneumatiche. Partendo da forme sferiche semplici è possibile produrre una incredibile varietà formale e tipologica di strutture pneumatiche attraverso, ad esempio, la suddivisione della struttura di partenza con cavi e maglie di cavi, associata all'applicazione di ulteriori tensioni localizzate (da Frei Otto e Bodo Rasch, Finding Form, Edizioni Menges, 1995).*

Copertura per campo da tennis – programma “Air solid system”- Tsukuba Science Expo'85, Giappone. Una volta gonfiate, le strutture gonfiabili diventano tanto rigide da potere lavorare a compressione e a flessione. Un cilindro gonfiato può sopportare carichi di compressione, come un pilastro, fino al punto in cui la tensione di compressione dovuta al carico si uguaglia alla tensione longitudinale di trazione dovuta alla pressione interna. Quando la compressione si avvicina a questo valore, la membrana cede per instabilità al carico di punta (da K. Shii, Membrane Structures in Japan, SPS Publishing Company, Tokyo, 1995).



Vista Alegre Arena – Madrid 1999 - Con strutture pneumatiche a doppio strato (“cuscini pneumatici”) è possibile definire coperture pneumatiche specifiche, denominate strutture gonfiabili. Quando si progetta una struttura di questo tipo, per evitare che assumano la forma di un pallone, si deve definire lungo il suo perimetro un elemento o un sistema strutturale che imponga ad essa una resistenza tale da sostenere gli alti sforzi di trazione a cui viene sottoposta: anelli di compressione, cavi di bordo legati a colonne, ecc. (da Detail N.5, 2001).

ne, le strutture pneumatiche possono risultare particolarmente vantaggiose qualora vi sia la necessità di una realizzazione della costruzione immediata, quando i cambiamenti delle funzioni implicano cambiamenti dello spazio e nel caso in cui il capitale iniziale destinato alla costruzione sia limitato – in genere il costo iniziale di installazione delle strutture di questo tipo, in rapporto ad altre tecnologie, è basso. Le forme assunte dalle strutture pneumatiche si caratterizzano per la predominanza della doppia curvatura gaussiana positiva – strutture sinclastiche (cfr. Modulo 275, ottobre 2001, pagg. 854-856). Superfici anticlastiche si possono trovare in alcune parti di strutture aventi forma complessa,



Strutture pneumatiche a bassa pressione.

E' possibile garantire la stabilità di una membrana anche con una bassa pressione interna rispetto all'ambiente esterno. Esse lavorano secondo le stesse regole delle strutture sopportate per l'alta pressione interna, ma hanno bisogno di elementi rigidi – colonne, archi, ecc – per garantire lo spazio interno e la curvatura necessaria alla stabilità della struttura (immagine tratta da Frei Otto e Bodo Rasch, Finding Form, Edizioni Menges, 1995).

mentre curvature sottili si hanno soltanto in porzioni di superfici più ampie – in genere non si verificano parti piatte in strutture di questo tipo. La gamma di possibilità formali per le pneumatiche è di gran lunga maggiore se si ammettono livelli variabili di tensione nella membrana o quando si inseriscono altri elementi strutturali lungo la sua superficie - cavi d'acciaio, archi, colonne, ecc. Maglie di cavo d'acciaio vengono normalmente introdotte nelle strutture che coprono aree al di sopra una certa grandezza. Con strutture pneumatiche associate a reti di cavi si possono costruire, con una certa economia, strutture con luce interna variabile dai 100 ai 500 m. Dal punto di vista tecnico sarebbe possibile coprire aree di chilometri di estensione. Molte delle strutture rinforzate e suddivise per mezzo di cavi possono, nell'ambito di piccole e medie luci, essere impiegate nella definizione di strutture rigide come, ad esempio, cassaforma per volte in cemento armato.

Note

1 Reyner Banham nel suo famoso libro “Ambiente e tecnica nell'architettura moderna”: (il progetto) “presenta una totale inversione delle funzioni tradizionali dell'architettura e del controllo dell'ambiente. Invece di un volume rigido al quale si deve applicare energia per correggere le sue insufficienze ambientali, abbiamo in questo caso un volume che diventa rigido solo quando gli viene somministrata energia ambientale” (Reyner Banham, tr.it. di G. Morabito e C. Stanesco, Ambiente e tecnica nell'architettura moderna, Editori Laterza, 1978, pagg. 279-282)

2 Da Frei Otto, Bodo Rasch, Finding Form, Edition Menges, 1995, pagg.117-118.

3 I testi “I principi strutturali delle pneumatiche” e “sicurezza delle pneumatiche” si basano sui concetti contenuti in Roland Conrad, Frei Otto: Structures, Longman Group, London, 1970.

4 Per le informazioni sul funzionamento strutturale delle tensostrutture a membrana si rimanda a “Come lavorano le tensostrutture” in Modulo 275 ottobre 2001, pagg. 854-856, Modulo 276, novembre 2001, pagg. 280-286.

5 Anche se la forma finale di una struttura pneumatica dipende dal suo riempimento con aria, essa è definita dal progetto del taglio del tessuto, dipendente in ogni caso dal progetto strutturale.



Frei Otto ha sviluppato una serie di membrane per il deposito di acqua, combustibili, prodotti chimici, ecc. Tali strutture appartengono formalmente e strutturalmente al gruppo delle strutture pneumatiche ma, in questi casi, non è l'aria a dare la forma alla struttura, ma il liquido o il materiale che essa deve contenere. La costruzione di dighe e sbarramenti con questa tipologia strutturale è stato anche oggetto di studio nel lavoro di Frei Otto (da Frei Otto e Bodo Rasch, Finding Form, Edizioni Menges, 1995)