

Alcune recenti realizzazioni nel quadro dello sviluppo delle strutture leggere

Dott. Ing. Massimo Majowiecki,
Bologna

Premessa

Attualmente è possibile constatare che il periodo pionieristico-epico, nel campo della ricerca teorica ed applicativa delle strutture leggere, è ormai finito.

Specialmente in questo ultimo decennio, dopo le numerose ricerche teoriche e le esperienze tecnologiche costruttive e di montaggio e soprattutto dopo l'osservazione del comportamento nel tempo sulle ormai numerose realizzazioni, è possibile redigere una sintesi consuntiva che, a posteriori, ci permetta di trarre le dovute informazioni e conclusioni sul campo di validità conquistato dalle strutture leggere nelle applicazioni architettoniche, sia dal punto di vista economico sia da quello strutturale. Il campo di validità applicativo conquistato dalle varie tipologie strutturali costituenti le strutture leggere, quali le tensostrutture piane e spaziali realizzate con funi d'acciaio ad alta resistenza, le strutture a mem-

brana e le strutture pneumatiche, nell'attuale sviluppo del proprio stato dell'arte tecnologica è dovuto principalmente alle seguenti caratteristiche tecniche:

- ottimo impiego del materiale lavorando principalmente con soli sforzi di trazione
- assenza del problema dell'instabilità dell'equilibrio e perciò chiarezza del funzionamento degli elementi strutturali che compongono la struttura
- aumento del coefficiente di sicurezza reale evidenziato dal calcolo limite
- sicurezza antisismica, date le ridotte masse in gioco
- facilità di trasporto e montaggio.

Inoltre la letteratura tecnica teorica ed applicativa ha portato a conoscenza di numerosi progettisti tecniche di calcolo e pratiche costruttive sufficienti a rimuovere il tabù della novità e del non noto, permettendo il fiorire di numerosi progetti.

Un ruolo molto importante, nello sviluppo del progetto e verifica di queste strutture, viene giocato dalle moderne tecniche interattive di calcolo (progettazione e calcolo assistiti da computer), particolarmente adatte nel campo delle strutture leggere dove la forma geometrica non è generalmente definibile indipendentemente da considerazioni di equilibrio in stato di tensione unilaterale (solo sforzi positivi di trazione).

Alle caratteristiche tecnico-economiche, essenzialmente legate alla tipologia strutturale in esame, si somma anche un interesse sempre crescente, proporzionalmente all'informazione tecnica, per gli aspetti figurativi legati essenzialmente alla varietà e versatilità formale conseguibile con le strutture leggere.

È possibile fare una divisione tipologica delle strutture che hanno come proprietà comune quella di fare lavorare il materiale ed i suoi elementi costruttivi essenzialmente a trazione.

La divisione più sintetica può essere fatta in base al funzionamento nel piano o nello spazio ed in base al materiale utilizzato. Ne conseguono le seguenti tipologie costruttive:

- tensostrutture piane a cavi con trapposti
- tensostrutture spaziali a rete di funi
- strutture a membrana con soli sforzi di trazione presollecitate
- strutture pneumatiche.

La luce libera è il parametro fondamentale nella scelta della tipologia e dei materiali da impiegare durante la progettazione.

Per quanto riguarda i materiali da costruzione, la fune in acciaio ed i materiali sintetici quali il poliestere, P.V.C., teflon, fiber-glass, ecc. giocano ruoli principali.

Per le piccole luci libere i materiali sintetici possono contemporaneamente diventare struttura portante e materiale di copertura. Strutturalmente il funzionamento avviene per regime di membrana nel continuo, mentre l'impermeabilizzazione è automaticamente ottenuta giacché il guscio definitivo, risultante dalla sagomatura e assemblaggio di elementi di tessuto piano, è realizzato mediante saldatura che genera una superficie di copertura senza soluzioni di continuità.

Per le medie e grandi luci libere l'elemento strutturale portante principale è inevitabilmente la fune d'acciaio.

Dalla collaborazione fune +/- materiali sintetici nasce il sistema strutturale misto dove la capacità portante è assicurata nel discreto da reticoli o famiglie di funi, mentre la struttura secondaria e la copertura sono risolte nel continuo a membrana dai nuovi materiali sintetici. L'accordo è perfetto giacché entrambi i materiali, non avendo rigidità flessionale, per ottenere la loro forma devono seguire la stessa logica costruttiva; la fune deve essere «marcata» e tagliata secondo la ricerca dello stato «0», la membrana, non sviluppabile nel piano, deve essere opportunamente sagomata per ottenere la superficie voluta in fase di presollecitazione.

Lo sviluppo e l'affermazione delle varie tipologie costruttive sopra menzionate si sono potuti determinare in funzione della velocità relativa di sviluppo tecnologico tra struttura e sistema di copertura.

La tipologia costruttiva delle tensostrutture piane ha trovato larga diffusione data la sua particolare facilità costruttiva ed il perfetto accordo con i tradizionali sistemi di copertura.

Le tensostrutture spaziali, costituite generalmente da una rete di funi, permettono una notevole versatilità formale nel campo delle composizioni architettoniche.

Alle notevoli applicazioni di questa tipologia costruttiva in tutto il mondo si devono principalmente le immagini più sofisticate dei sistemi costruttivi che stiamo trattando.

È importante precisare che, anche nel campo delle grandi luci libere, si può notare una semplice e felice applicazione di tensostrutture a rete, in quei casi in cui si è tenuto conto delle esigenze costruttive in fase progettuale e dei tradizionali metodi di copertura.

Nel caso di strutture spaziali a reticoli uniformi ed a modesta curvatura è stato possibile utilizzare semplici metodi di copertura altamente prefabbricabili.

Al contrario, nel caso di applicazioni tecniche oltremodo sofisticate, non c'è stata una omogeneità di sviluppo tecnologico tra schema strutturale e metodo di copertura. Esempio evidente è il sistema di copertura degli impianti olimpici di Monaco, dove il materiale rigido di copertura comportava il montaggio di un notevole numero di pezzi molto diversi fra loro e quindi comportanti giunti notevolmente costosi.

Da quanto sopra ne consegue che, data l'esperienza costruttiva messa a punto negli ultimi anni, è possibile oggi per ogni progettista affrontare con cognizione di causa anche impianti di media e piccola entità.

La messa a punto dei materiali e delle tecnologie di esecuzione e montaggio, ormai, non produce imprevisti ma certezze consuntive rispettate. Nell'ambito di impianti di corrente progettazione, sono qui di seguito presentate alcune moderne realizzazioni nel contesto delle tipologie sopra citate.

Tensostruttura piana. Piscina comunale di Paderno Dugnano (Milano)

Come già accennato in precedenza, questa costruzione, per la quale si è adottata la tipologia di tensostruttura piana (fig. 1), è in perfetto accordo con i tradizionali metodi di copertura. In questo caso la copertura è realizzata con un deck formato da lamiera grecata di altezza 75 mm e 10/10 mm di spessore, zincata e prevenni-

ciata all'intradosso. La coibentazione è fatta con pannelli rigidi e l'impermeabilizzazione con manti bituminosi armati.

La struttura portante è costituita da tensostrutture tipo JAWERTH di 40,5 m di luce libera disposte parallelamente ad interasse costante di 5 m (fig. 2).

Sulle caratteristiche strutturali di questa tipologia già molto è stato detto in articoli precedenti e perciò possia-

mo semplicemente descrivere i risultati ottenuti per le strutture metalliche.

La fune portante è di 38 mm di diametro, mentre la stabilizzante è di 30 mm, con carichi di rottura di 120,8 t e 77,8 t rispettivamente.

I telai d'ancoraggio sono costituiti da un puntone scatolare composto da 2 UNP 200, mentre il tirante superiore è realizzato con 2 UNP 180 e l'inferiore con 2 piatti 130 x 15.

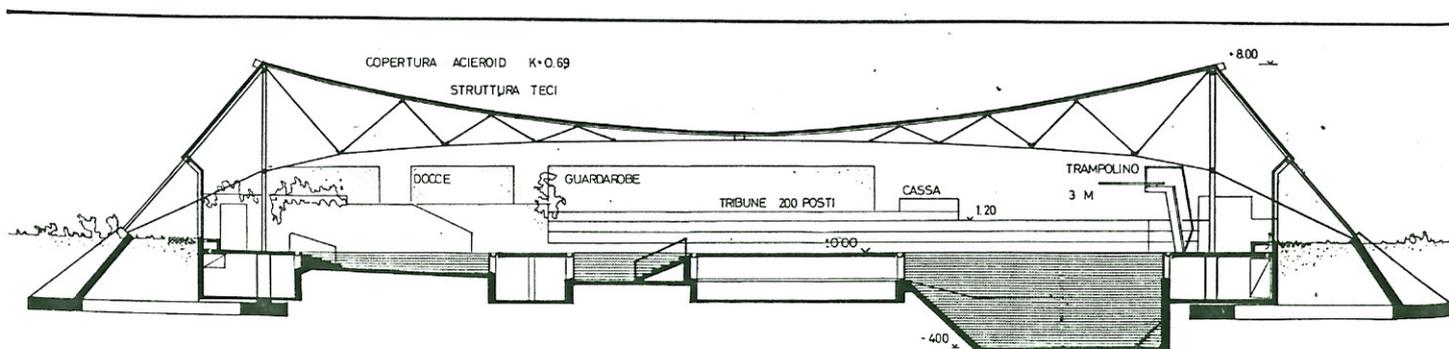


Fig. 1. Tensostruttura piana per la piscina comunale di Paderno Dugnano: sezione tipo della trave di funi.

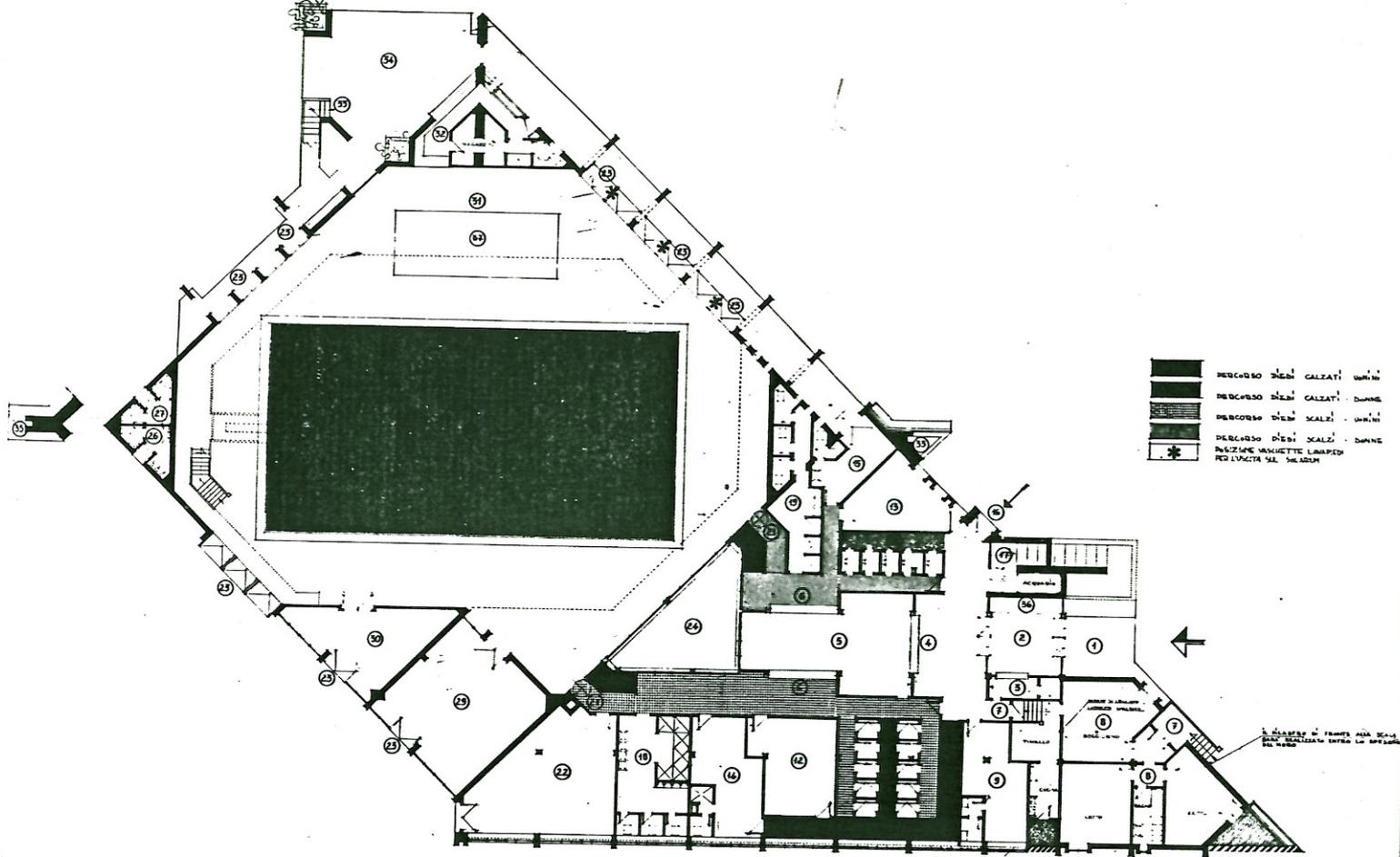


Fig. 6. Piante distributive del complesso. (1) Atrio esterno. (2) Atrio interno. (3) Biglietteria con deposito valori. (4) Ritiro e consegna sacchetti vuoti. (5) Guardaroba. (6) Consegna e ritiro sacchetti con il vestiario. (7) Ingresso alla abitazione del custode. (8) Abitazione custode. (9) Ufficio di direzione con annesso servizio. (10) Cabine a rotazione - uomini. (11) Cabine a rotazione - donne. (12) Spogliatoi comuni - uomini. (13) Spogliatoi comuni - donne. (14) Spogliatoio istruttori con annessi servizi. (15) Pronto soccorso con annessi servizi. (16) Uscita sul giardino pubblico dei non bagnanti. (17) Rampa per il piano superiore. (18) Servizi (docce, W.C., lavabi, orinatoi) uomini. (19) Servizi (docce, W.C., lavabi) donne. (20) Passaggi obbligati con docce e vasche lavapiedi. (21) Passaggio, con senso obbligato verso gli spogliatoi. (22) Impianti tecnologici ed eventuale magazzino. (23) Uscite sul giardino. (24) Patio. (25) Vasca dimensioni 25 x 13. (26) Servizi esterni pubblico (uomini). (27) Servizi esterni pubblico (donne). (28) Rampa per il ballatoio e il trampolino. (29) Palestra pre-natatoria. (30) Magazzino o spazio per eventuale gabinetto medico. (31) Zona bar sottostante la gradinata. (32) Bar con miscita verso la piscina. (33) Rampa per la terrazza solarium. (34) Spazio bar all'aperto sottostante la terrazza. (35) Raccolta e smaltimento acque piovane. (36) Spazio per eventuali distributori tabacchi e giornali. (37) Eventuale vasca pre-natatoria.

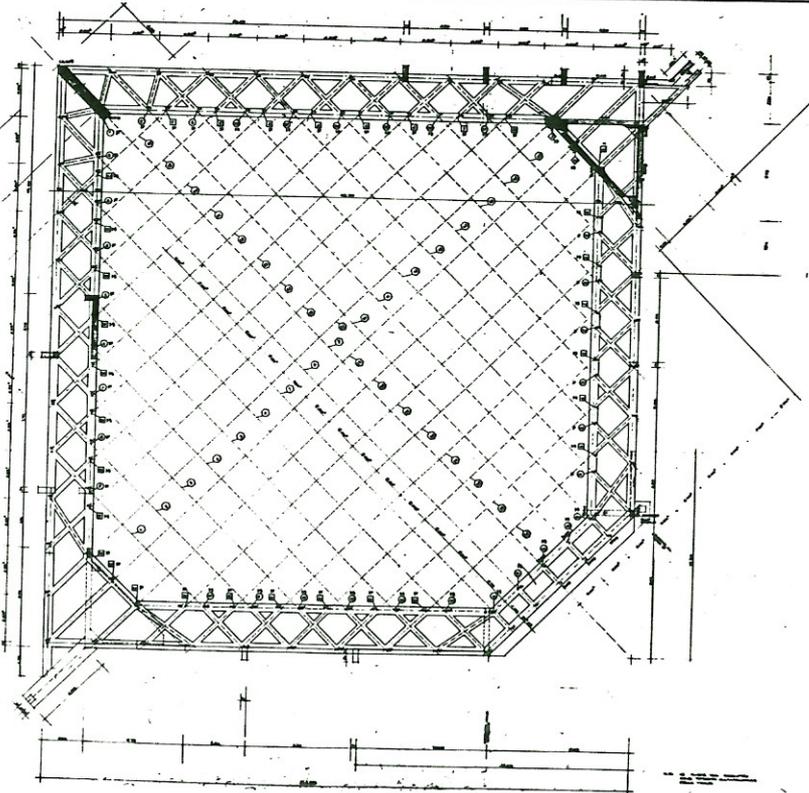


Fig. 7. Pianta delle strutture di copertura.

dei carichi è stato eseguito nell'ambito della non linearità geometrica considerando tre gradi di libertà per ogni nodo della rete ed ha condotto ai seguenti risultati:

— sforzo massimo nelle funi portanti (ottenuto per carico neve + peso proprio + pretensione + ΔT), $S = 28,66$ t

— sforzo massimo nelle funi stabilizzanti (ottenuto per carico vento + peso proprio + pretensione + ΔT), $S = 15,2$ t.

Le massime deformazioni in direzione verticale sono $w = 19,1$ cm e $w = 10,4$ cm per il carico neve e vento rispettivamente.

Nelle stesse condizioni di carico lo spostamento orizzontale in direzione y risulta essere di: $v = 0,96$ cm e $v = 0,30$ cm.

Impiegando funi spirodali zincate a 200 g/m² con carico di rottura a 160 kg/mm², sono risultati diametri rispettivamente di 28 mm e 19 mm per le funi portanti e stabilizzanti.

Per l'ancoraggio delle funi alla struttura di bordo sono stati adottati capicorda fissi direttamente ancorati all'intradosso della trave e regolabili

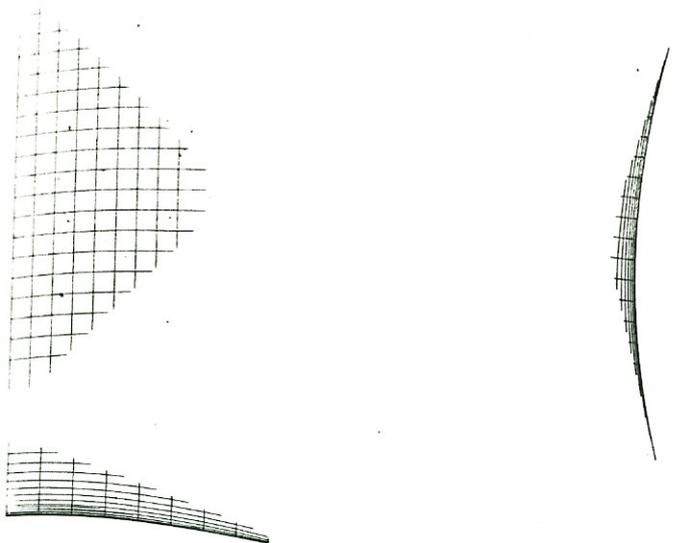


Fig. 8. Plotterizzazione dei risultati geometrici della ricerca dello stato «0».

passanti attraverso la trave e ancorati all'estradosso della stessa in modo da ottenere, per gli incroci più vicini alla trave, la non sovrapposizione delle teste delle funi. Nella figura 7, con la dicitura M=mobile ed F=fisso è illustrata la suddetta disposizione.

I capicorda fissi sono collegati ad una piastra opportunamente ancorata nel c.a.; i capicorda regolabili pas-

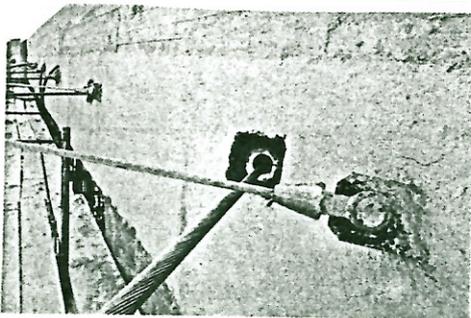


Fig. 9. Particolare dell'ancoraggio delle funi.

santi attraverso la trave di bordo sono filettati e predisposti per consentire di imprimere alla rete, mediante martinetti idraulici, lo stato di pretensione corrispondente allo stato geometrico-tensionale previamente ottenuto (fig. 9).

Il tempo globale di montaggio della tensostruttura comprendente:

- srotolamento funi
 - montaggio funi
 - applicazione morsetti ad attrito
 - pretensione e controllo,
- è stato di 0,12 ore/m².

Progetto ed esecuzione

Progettisti: Arch. C. Fancelli, Prof. P. Montani e Ing. E. Marcucci, Gubbio.

Strutture in c.a. e tensostruttura: Ing. M. Majowiecki, Bologna.

Collaboratori: Ingg. M. Nanni e G. Viognoli, Bologna.

Impresa di costruzione: Geom. Wladimiro Fiorucci, Gubbio.

Fornitura e montaggio tensostruttura: Tensoteci, Milano.

Strutture a membrana presollecitata

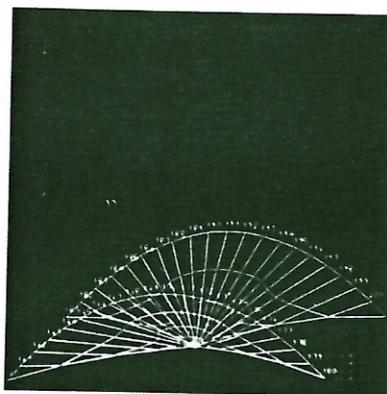
Nel campo delle membrane continue presollecite, la ricerca della forma è senza dubbio il problema più interessante. La sintesi esecutiva esercitata dal progettista che compendia

una ricerca dell'optimum sulle variabili matematiche e non, gioca un ruolo determinante per la qualità del progetto finale. L'esperienza e la pratica costruttiva devono entrare nella funzione obiettivo in qualche modo; questo modo viene offerto implicitamente dalla progettazione interattiva mediante elaboratore che con opportuni dispositivi grafici, specialmente videointerattivi, permette velocemente al progettista di cambiare i parametri in gioco arrivando con alcune iterazioni di progetto-verifica alla soluzione finale.

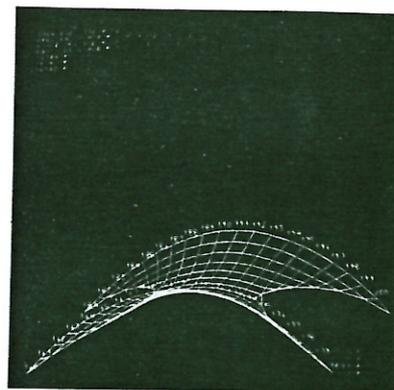
La qualità e la velocità di progettazione visiva è stata determinante nello sviluppo di queste strutture. Le membrane, per propria insita necessità, hanno una geometria spaziale, perciò il disegno e la costruzione di modelli danno scarsa attendibilità e offrono solo indicazioni plastiche e volumetriche di massima.

Il controllo delle curvature, della stabilità, delle concentrazioni di tensioni possibili, imponendo forme e condizioni al contorno progettualmente non idonee, è immediato agendo per via interattiva.

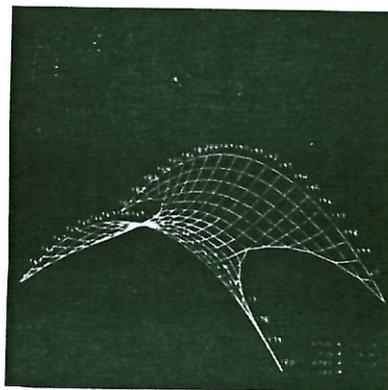
L'analisi strutturale e la sintesi progettuale sono svolte in tempo reale. Il rapporto uomo-macchina è interattivo e così l'elaboratore diventa un prolungamento mentale per velocità dell'operatore, il quale è sempre al centro della sintesi.



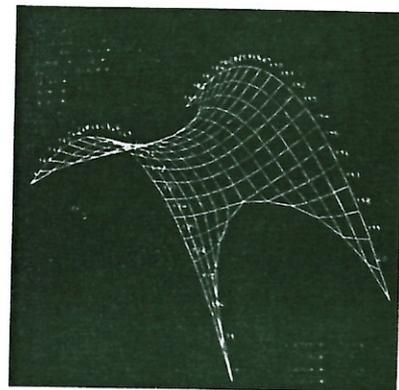
a) Inizio iterazioni



b) Precisione raggiunta



c) Rotazione



d) Rotazione + zoom

Fig. 10. Sequenza interattiva di progetto di membrana presollecitata.

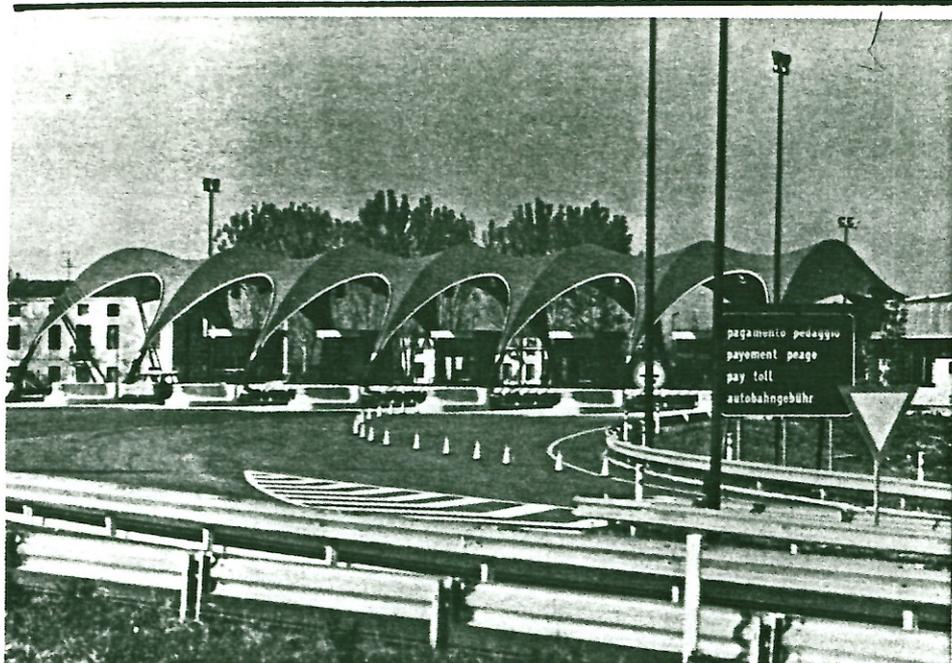


Fig. 11. Caselli autostradali della Valdastico.



Fig. 12. Vista delle strutture della Fiera di Oyem (Gabon).

funi meridiane e parallele costituisce l'ossatura portante.

La membrana di copertura, che acquista la stessa superficie, ha compiti di resistenza secondaria.

L'altezza della costruzione è di 18 m ed il diametro massimo è di 36.

Nella figura 10 è illustrata una sequenza interattiva sul video della ricerca della forma di una membrana che si appoggia a contorni parabolici, che nella realtà sono degli archi metallici, sui quali si appoggia la membrana. Nella figura 11 la costruzione realizzata corrisponde ai caselli autostradali della Valdastico.

Nella figura 12 è visibile la struttura della Fiera di Oyem, realizzata nel Gabon. La costruzione appartiene alle strutture miste dove una famiglia di

	Poliestere + P.V.C.	Fiber-Glass + Teflon
Peso	900 g/m ²	1 275 g/m ²
Resistenza a rottura	300 kg/5 cm	614 kg/5 cm
Spessore	9/10 mm	8/10 mm
Allungamento a rottura	14 ÷ 23 %	—

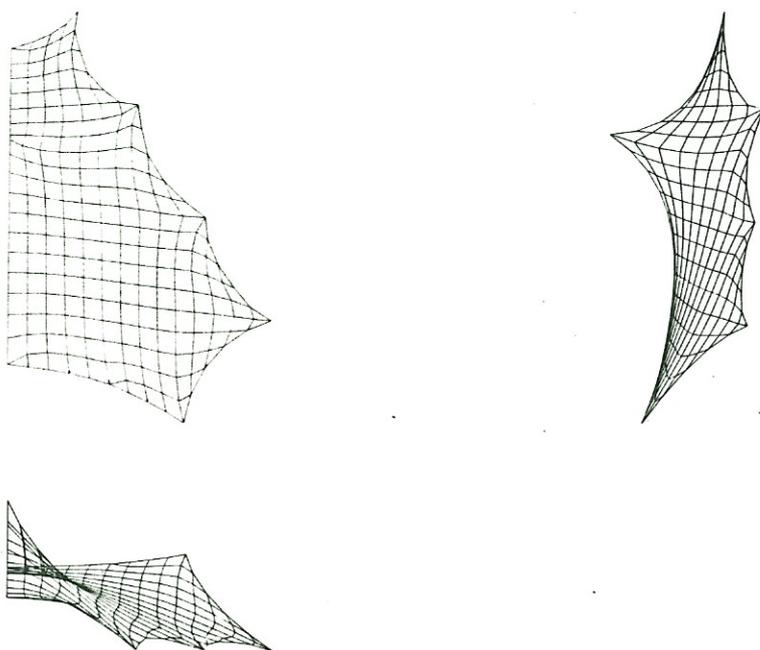


Fig. 13. Plotterizzazione della ricerca geometrico-tensionale.

Una colonna centrale in tubo d'acciaio ed ancoraggi discreti esterni costituisce la condizione geometrica al contorno.

La costruzione è destinata ad uso fieristico.

Per una luce minore (circa 20 m) la stessa tipologia di membrana può essere utilizzata facendo lavorare la copertura in materiale sintetico in regime di membrana.

Il materiale impiegato ha notevoli qualità di resistenza. Alcune caratteristiche meccaniche sono qui sopra riportate.

Una copertura di un palcoscenico facilmente smontabile è stata realizzata solo con materiale sintetico come elemento portante. La stabilizzazione esterna delle strutture metalliche è stata eseguita in funi metalliche (figg. 13 e 14).

Una struttura a membrana completamente prefabbricata è stata messa a punto per un campo da tennis. Archi metallici ad ordito reticolare spaziale sostengono la membrana, che

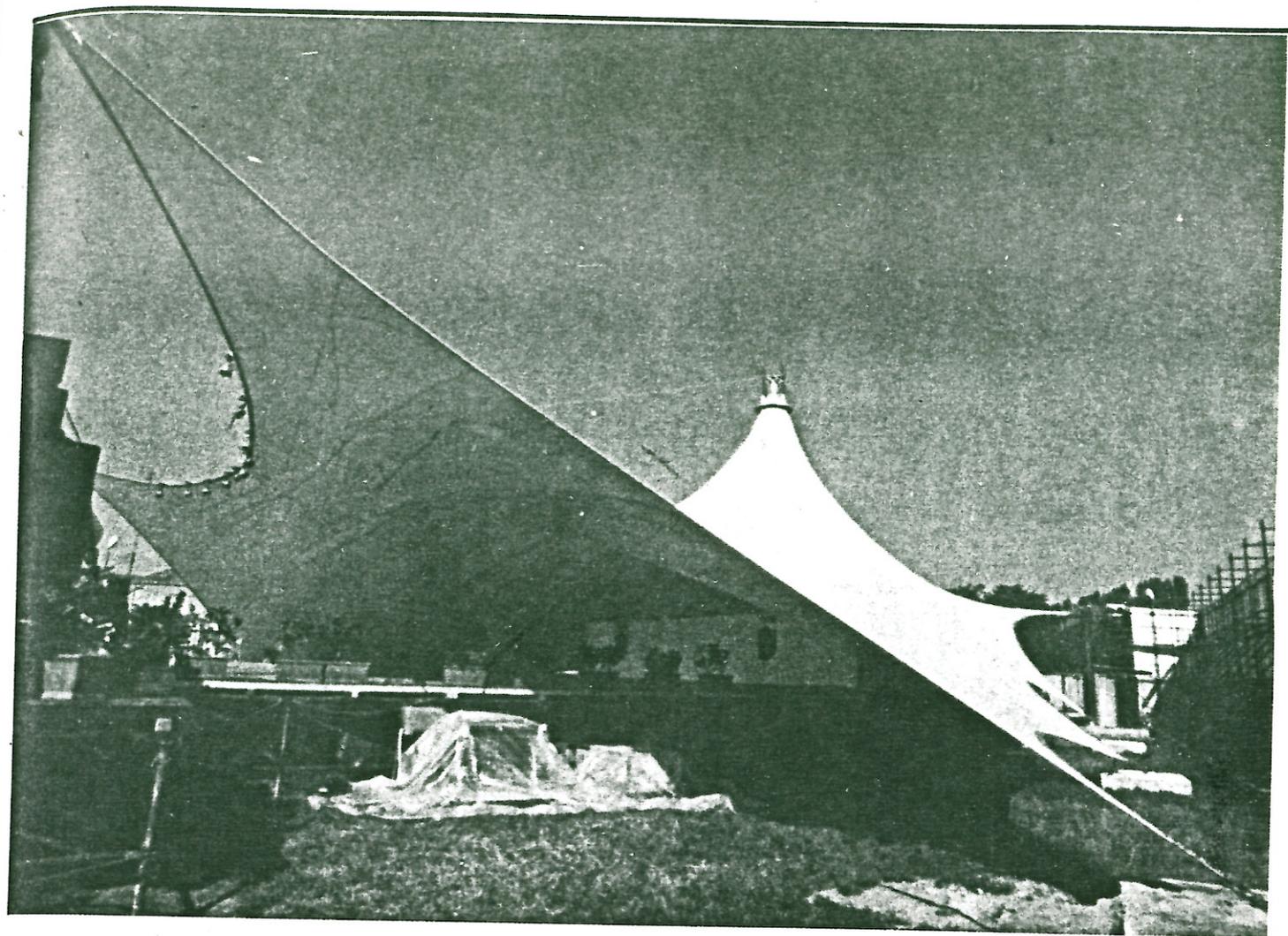


Fig. 14. Teatro tenda.

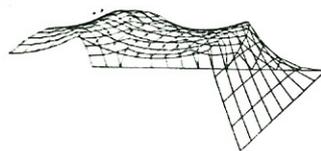
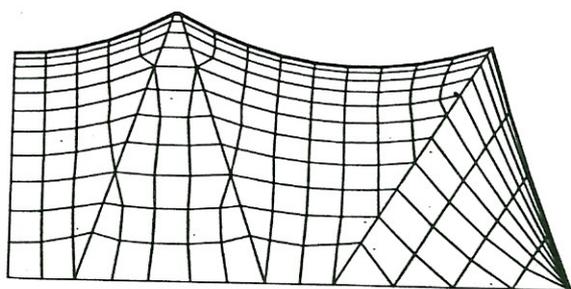
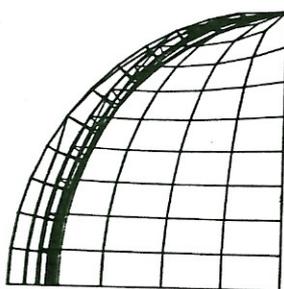
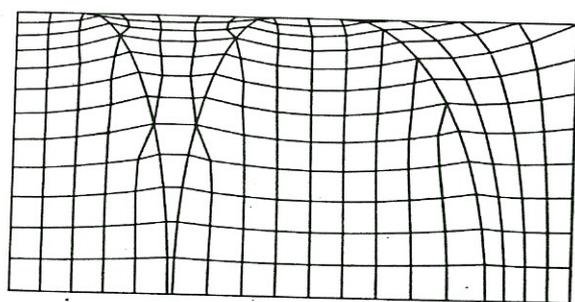


Fig. 15. Pianta, viste ed assonometria del guscio di copertura.

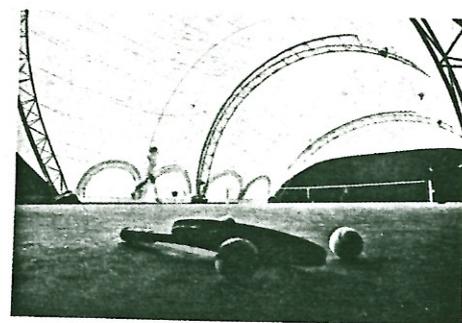


Fig. 16. Vista interna del campo da tennis di Tobbiana.

acquista la forma rappresentata nella figura 15 mediante composizione per saldatura delle sagome piane ottenute automaticamente sul plotter. La costruzione, dopo l'esecuzione, si presenta all'interno come in figura 16.

Progetto ed esecuzione

Strutture: A. Aresi e M. Majowiecki.
Impresa: Plasteco Milano, Senago (Milano).

Strutture pneumatiche

Quando la forma di una struttura è determinata dall'aria compressa si ha una struttura denominata pneumatica. Anche queste strutture, come le membrane presollecitate, possono essere costituite dalla sola membrana od opportunamente irrigidite da cavi metallici.

Strutture di notevoli dimensioni sono state realizzate con questa tipologia strutturale come già illustrato nel n. 12/1978 di ACCIAIO, alla pag. 594. La procedura interattiva è molto utile ed importante anche per queste strutture, come dimostra la sequenza di figura 17.

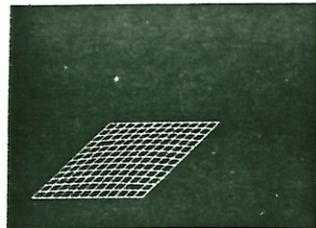
La costruzione è stata progettata ad uso magazzino alla Fiat Rivalta di Torino ed ha una pianta quadrata di 67 m di lato. Un vincolo a tirante centrale di 5 m di altezza e 4 funi mediane del ϕ 38 portano a valori accettabili gli sforzi di membrana nel materiale costituente l'involucro a membrana.

In figura 18 la costruzione finita in esercizio.

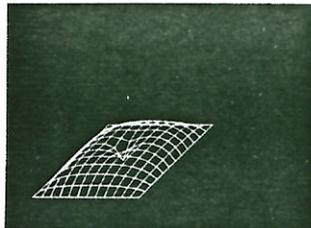
Progetto ed esecuzione

Progetto e strutture: A. Aresi e M. Majowiecki.

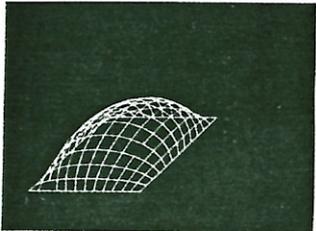
Esecuzione: Plasteco Milano, Senago (Milano).



1. Griglia dati. Pianta assonometrica



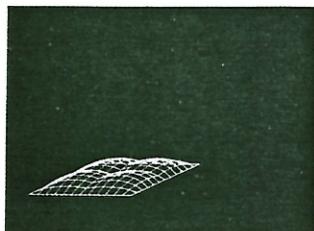
2. Azione della pressione interna



3. Introduzione di un vincolo interno



4. Irrigidimento delle linee mediane mediante funi



5. Rotazione

Fig. 17. Sequenza interattiva di progetto di una struttura pneumatica.

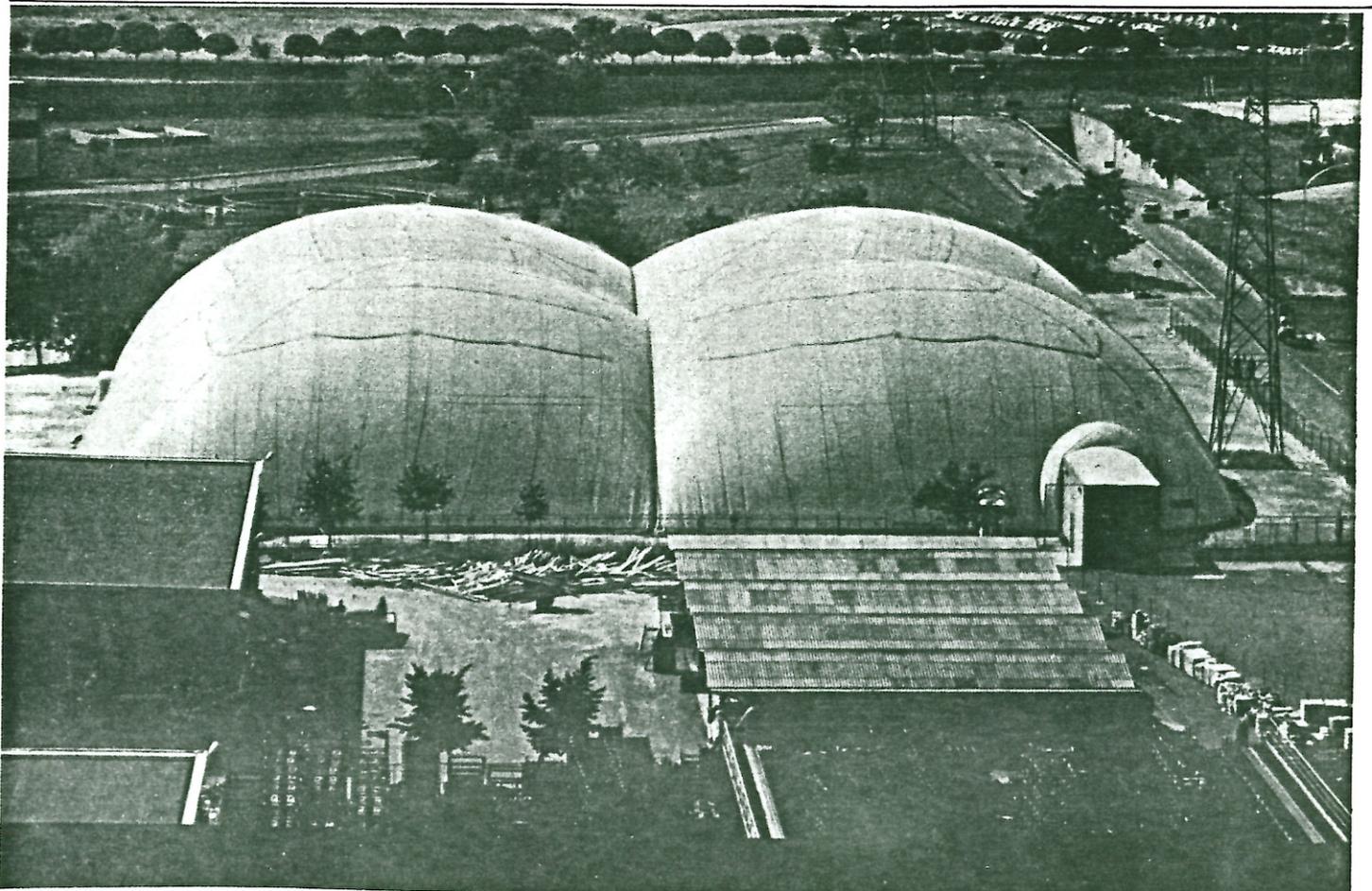


Fig. 18. Magazzino della Fiat Rivalta di Torino realizzato in struttura pneumatica irrigidita da funi d'acciaio.