

# costruzioni metalliche

**rivista dei tecnici dell'acciaio**

edita dalla associazione fra i costruttori in acciaio italiani ACAI

5

anno XXV

settembre - ottobre

1973

# Le tecniche di costruzione e montaggio nella fase progettuale delle tensostrutture

## Nota II (\*)

Giorgio Romaro

*Lezione tenuta il 13 aprile 1973 durante il « Corso di aggiornamento nella progettazione di strutture di acciaio » presso il CTA a Milano.*

### Premessa

Si è riservata questa seconda parte dell'articolo interamente ad una sola struttura poichè l'opera che descriviamo è tale, sia per le dimensioni che per la forma, che il passaggio dal progetto strutturale di massima, implicito nel progetto architettonico, al progetto costruttivo della struttura ha richiesto un numero elevato di scelte tecniche, sia dal punto di vista della costruzione che del montaggio.

All'inizio dei nostri studi il progetto dell'opera, per quanto concerne le strutture della copertura, si presenta con le caratteristiche geometriche, architettoniche, funzionali e statiche che di seguito esponiamo (vedi tav. I).

Si tratta di una copertura di pianta circolare, con andamento altimetrico tale che la superficie stessa è vicina a quella di un paraboloide iperbolico; la copertura poggia su 38 appoggi semplici piani a vincolo verticale bidirezionale ed è pensata come una membrana tesa a forma di sella, in equilibrio su di un bordo rigido compresso e resistente a flessione.

Il bordo di questa superficie ha quindi all'incirca l'andamento della curva intersezione tra un cilindro ad asse verticale ed un paraboloide iperbolico coassiale allo stesso.

Il dislivello massimo tra il punto più basso di questa curva ed il punto più alto è previsto di m 14,54.

Gli appoggi sono disposti in pianta secondo una particolare tracciatura (vedi schema di tavole I e II).

Dato il tipo di tracciatura ne consegue che le mutue distanze tra gli appoggi ed il dislivello tra gli assi in un quarto di cerchio sono una diversa dall'altra, come d'altro canto lo saranno anche nel progetto definitivo.

Il bordo rigido della copertura è previsto realizzato da una trave a sezione trasversale pentagonale con i lati variabili da sezione a sezione e con gli assi principali d'inerzia che ruotano in modo da presentare l'asse forte mediamente tangente alla superficie della vela nel rispettivo punto di attacco.

I momenti di inerzia della trave sono previsti variabili da un massimo di 2,90 m<sup>4</sup> ed un valore minimo di 1,40 m<sup>4</sup> per un'asse principale d'inerzia e da 0,50 a 0,37 m<sup>4</sup> per quello ad esso ortogonale.

### 1. Scelte tecniche di base per la realizzazione del progetto esecutivo.

Fermo il concetto della copertura appoggiata su 38 appoggi disposti secondo il tracciato originario e realizzata con una tensostruttura e sella, il passaggio dalla fase progettuale di massima per le strutture descritte al paragrafo precedente (vedi tav. I) al progetto co-

struttivo (vedi tav. II) è caratterizzato da un insieme di precise scelte in massima parte condizionate dalle tecniche costruttive e di montaggio che si intendono adottare.

Se ne elencano le principali:

1.1. Si è scelto di realizzare la parte tesa della copertura con una rete di funi ortogonali tra loro, con il passo dell'ordine di qualche metro: tra 1,5 - 2 e 2,5 m, si è deciso, anche in funzione della copertura in lamiera grecata, una maglia tipo di m 2 x 2. Le funi parallele alla congiungente l'estremità superiore dell'anello di bordo, e che hanno la concavità rivolta verso l'alto, verranno di seguito chiamate « funi portanti »; le altre con andamento ortogonale alle precedenti e con concavità rivolta verso il basso, invece « funi fascianti ».

1.2. Si sono studiati gli attacchi delle funi e si è deciso di realizzarli come cardani ottenuti da due agganci successivi con perni a 180° tra loro.

1.3. Si è deciso di tendere le funi con martinetti idraulici e prevedere quindi, in prossimità degli attacchi delle funi, le viti di bloccaggio (tenditori).

1.4. Si è deciso di passare dal dislivello massimo tra il punto più basso ed il punto più alto della trave di aggancio da m 14,54 a m 18,54, aumentando le frecce delle funi ed ottenendo il duplice effetto a parità di prestazioni, di ridurre i tiri a metro lineare della parte tesa della copertura ed alleggerire di conseguenza il bordo rigido.

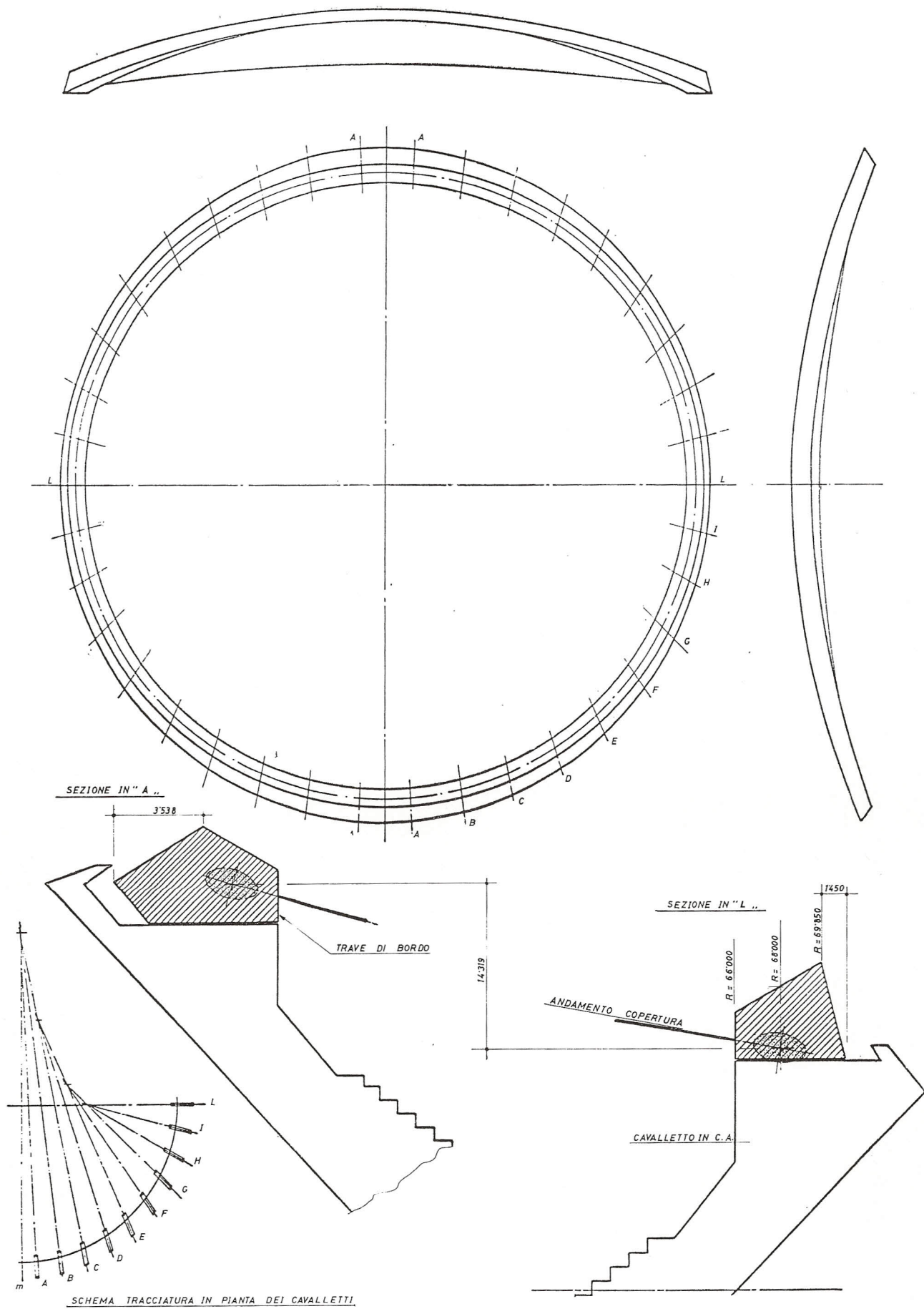
1.5. La trave di bordo è stata prevista a sezione rettangolare con momenti di inerzia costanti pari a  $J_x = 1,4 \text{ m}^4$  ed  $J_y = 0,37 \text{ m}^4$  costruita (vedi punto 2) in conci trasportabili saldati in officina e bullonati tra loro al montaggio.

1.6. L'asse della trave di bordo ha ancora l'andamento vicino a quello di una curva intersezione tra un cilindro ad asse verticale ed un paraboloide iperbolico coassiale allo stesso, ma gli assi principali di inerzia della sezione della trave restano sempre paralleli a se stessi ed in particolare un asse principale è verticale, l'altro orizzontale.

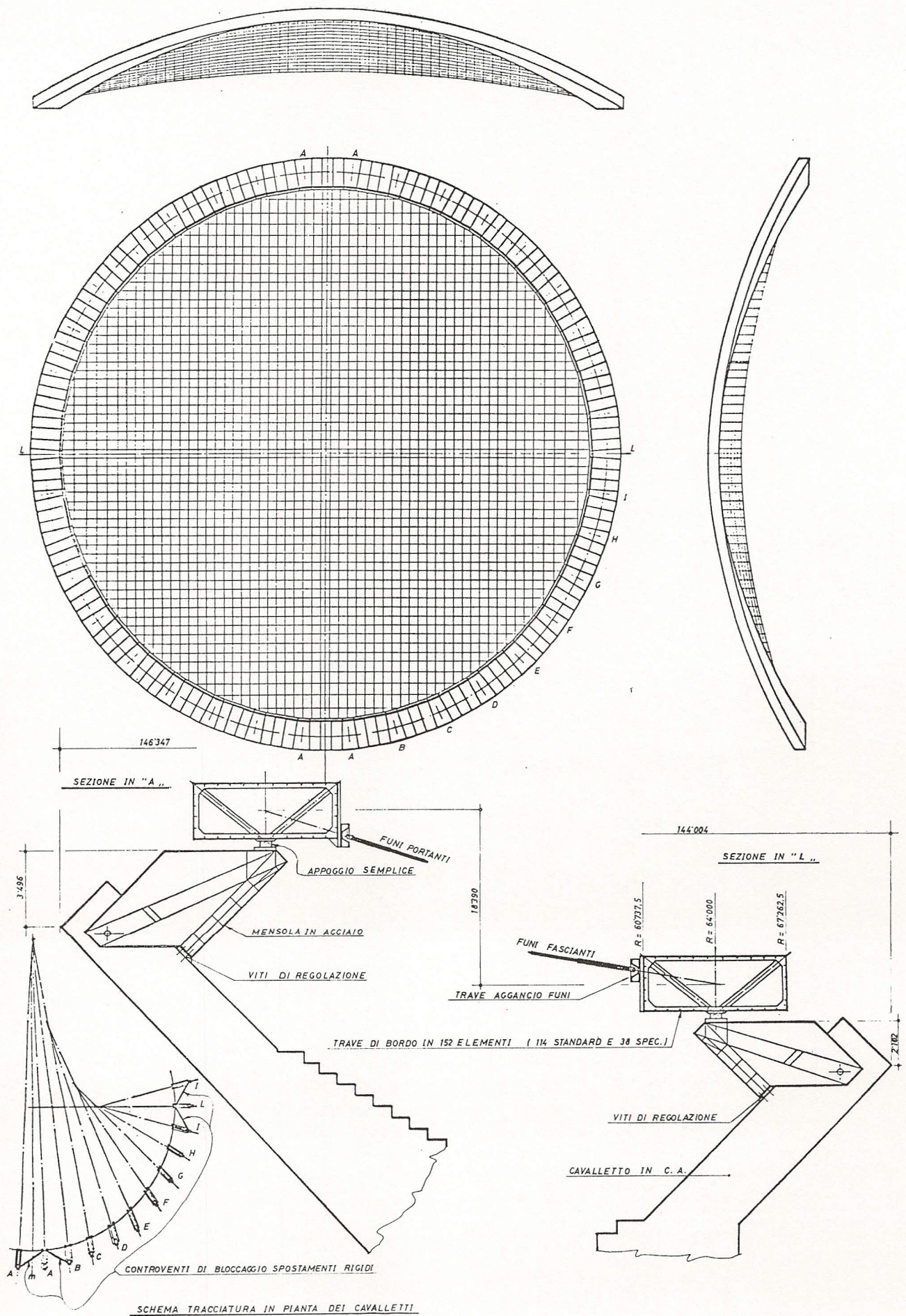
1.7. Si è realizzata una trave ausiliaria come elemento intermedio tra la trave di bordo e la rete di funi; questa trave ausiliaria « trave di aggancio funi » porta nelle posizioni adatte tutti gli agganci previsti sia per le funi portanti che per le funi fascianti ed è fissata alla trave di bordo con passi costanti. Inoltre questa trave ha un andamento altimetrico diverso da quello della trave di bordo e tale da riportare il prolungamento di tutte le funi all'asse della trave di bordo

Dr. Ing. GIORGIO ROMARO - Titolare di Studio Tecnico - Padova.

(\*) V. Nota I - Costruzioni Metalliche 4/73 pag. 245.



Tav. I - Studi di massima per la copertura del Palasport di Milano - S. Siro.



Tav. II - Insieme schematico e particolari della copertura.

stessa. Il creare un elemento intermedio tra la rete e l'anello di bordo permette di costruire quest'ultimo nella forma più standardizzata possibile (vedi punto 2).

1.8. Pur avendo conservato per ogni appoggio la caratteristica fondamentale dell'appoggio semplice su di un piano, si è ritenuto opportuno di bloccare trasversalmente i due assi congiungenti rispettivamente i due punti più alti e quelli più bassi della copertura, in modo da bloccare eventuali spostamenti orizzontali rigidi della copertura.

1.9. Ortogonalmente al piano orizzontale si sono ipotizzati tutti gli appoggi a vincolo unidirezionale, cioè atti a reagire solo a forze verticali di compressione. Si è preferito cioè zavorrare le zone dove sarebbe stato necessario che l'appoggio reagisse anche a trazione. La validità di questo provvedimento deriva, oltre che da ovvie ragioni tecnologiche di semplicità nella realizzazione degli appoggi, dalla ragione statica che il valore dello sforzo di trazione su questi appoggi, una volta raggiunto durante la fase di pretensione delle funi, varia poco durante le fasi di esercizio.

1.10. Si sono infine studiate delle mensole in acciaio come elemento intermedio tra l'anello rigido di bordo della tensostruttura ed i cavalletti in c.a., cosicché l'anello rigido di bordo posa su queste mensole incastrate ai cavalletti ed aggettanti verso l'interno, con sporgenze variabili in modo tale che tutti i punti d'appoggio dell'anello stanno in pianta esattamente su di un cerchio e l'andamento altimetrico è parallelo all'andamento altimetrico dell'asse della trave di bordo. Il creare un elemento intermedio in acciaio tra i cavalletti in c.a. e l'anello di bordo della struttura, ha dato la possibilità di costruire in maniera semplice ed elegante i 38 cavalletti in c.a.

## 2. Particolarità costruttive e di montaggio dei singoli elementi della copertura.

Descriviamo ora le particolarità costruttive e di montaggio dei singoli elementi della copertura.

Si potrà sempre notare la stretta interdipendenza tra progettazione, costruzione e montaggio.

### 2.1. Mensole di appoggio della trave di bordo.

Le mensole sono previste con due facce di lamiera bordata e nervata ad una distanza fra loro di 800 mm ca., pari alla larghezza dei cavalletti, ed abbracciano quindi i cavalletti stessi (vedi fig. 1). Poiché i cavalletti hanno il piede lungo un'elisse e direzioni secondo rette che non convergono nel centro del cerchio (vedi tav. I), nemmeno le mensole hanno direzione radiale rispetto al cerchio di pianta dell'anello ed aggettano dai cavalletti con luci variabili (dai 5 ai 9 m ca.) in modo tale che i punti che sorreggono gli appoggi, sono tutti allineati sul cerchio di raggio 64 m. Le mensole hanno altezze tali (pure una diversa dall'altra) da seguire l'andamento altimetrico dell'anello di bordo.

Sulle mensole stanno i 38 appoggi dell'anello che in conseguenza a quanto detto non dividono l'anello in parti eguali nè lungo l'anello stesso nè in pianta.

L'incastro tra le mensole ed i cavalletti è ottenuto da due vincoli. Il vincolo che deve trasmettere la trazione, che date le opportune scelte progettuali (vincolo verticale unidirezionale) è sempre quello superiore, è costituito da un perno  $\varnothing$  300 mm; mentre il vincolo che deve trasmettere la compressione è un grosso dado in lamiera rinforzata da settori verticali, saldato tra le due anime della mensola e che contrasta sulla faccia

interna del cavalletto in c.a. Il contrasto non è diretto ma ottenuto attraverso viti di regolazione che, a regolazione ultimata, sono state annegate in calcestruzzo espanso. Un altro dado in lamiera rinforzata di analoghe dimensioni costituisce il piano di posa degli appoggi dell'anello.

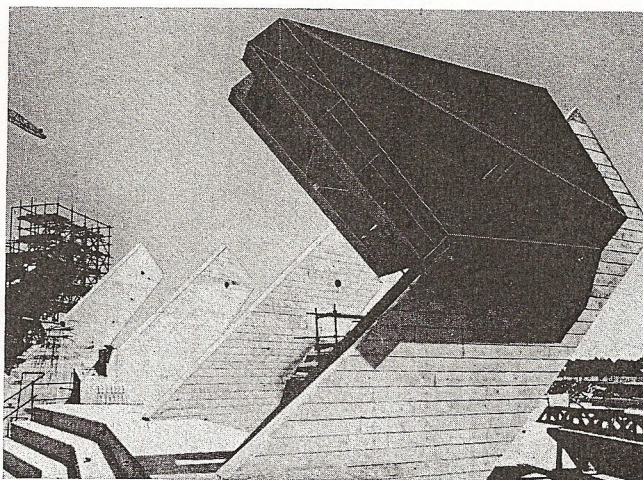


Fig. 1 - Prima mensola messa in opera (mensola L).

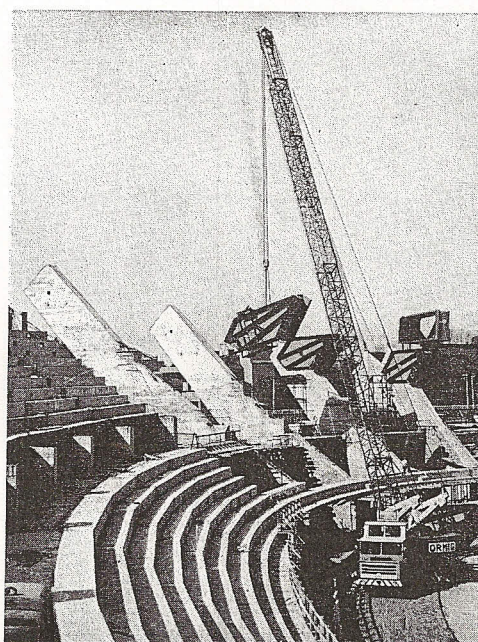


Fig. 2 - Montaggio mensola H; sono già in posto le mensole H, I e l'elemento di trave L.

Per montare le mensole (vedi fig. 2) che sono in struttura saldata monolitica, esse venivano presentate con una gru, poi veniva infilato il perno (manovra che era facilitata da uno scivolo provvisorio saldato su di un lato delle mensole) e quindi venivano regolate le viti inferiori fino a raggiungere la perfetta orizzontalità della zona di appoggio.

### 2.2. Appoggi della trave di bordo sulle mensole.

Gli appoggi della trave di bordo sulle mensole sono essenzialmente realizzati da una superficie orizzontale ricoperta di Teflon e solidale alla trave che scivola su una superficie, pure orizzontale, di opportune dimensioni, in acciaio inossidabile, solidale con le mensole.

Gli appoggi multidirezionali nel piano orizzontale

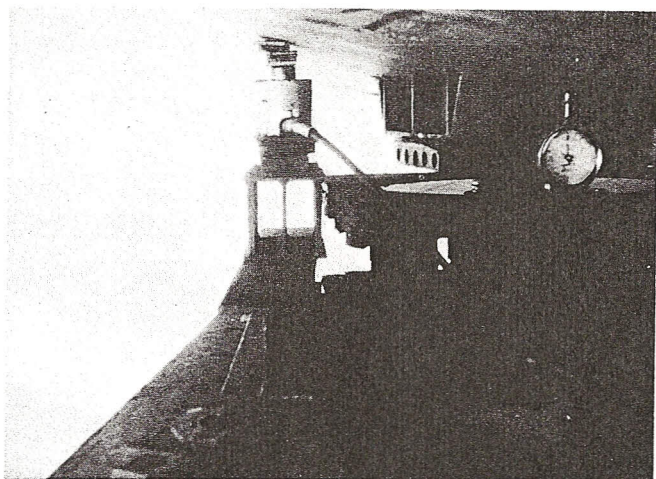


Fig. 3 - Taratura del carico su un appoggio.

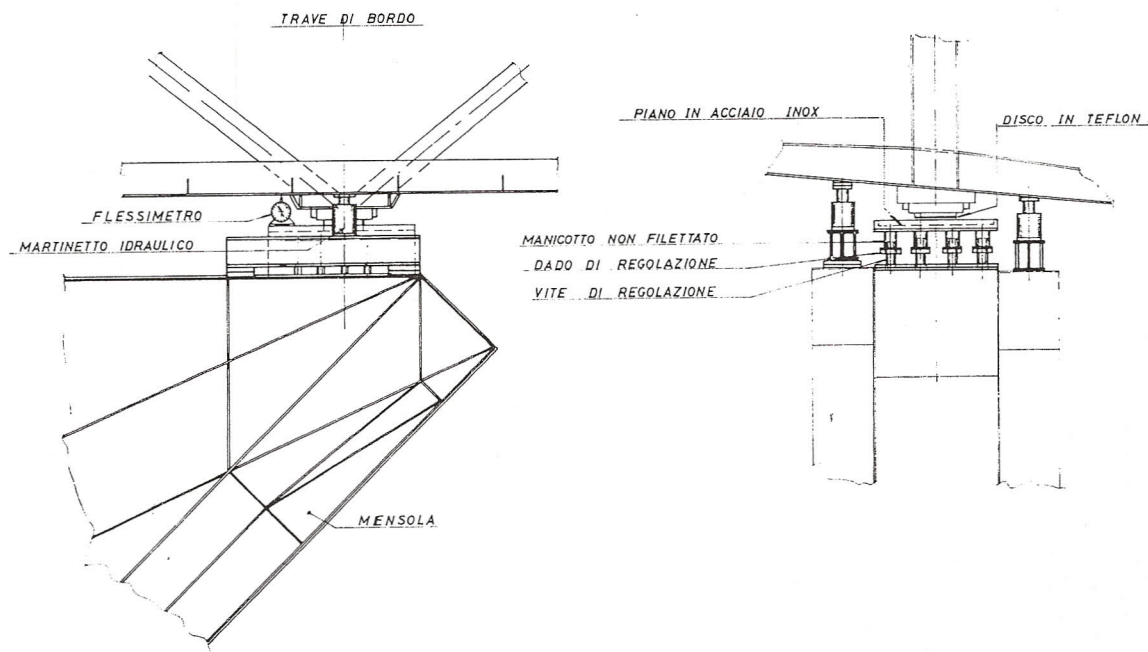


Fig. 3 bis - Dispositivo di regolazione dell'altezza degli appoggi per tarare il carico gravante su ciascuno di essi.

sono realizzati da un cilindro in acciaio ad asse verticale solidale con la trave di bordo la cui base inferiore è ricoperta con Teflon e scivola su di un disco in acciaio inossidabile, di diametro maggiore del diametro del cilindro, solidale alla mensola. Tra il cilindro superiore dell'appoggio e la trave di bordo è interposto un cilindro cerchiato di neoprene che permette gli opportuni adattamenti tra le due superfici. Tra il disco di acciaio inossidabile e la mensola sono interposte due piastre orizzontali in acciaio di grosso spessore collegate tra loro da viti distanziatrici regolabili che permettono (vedi sotto) la messa in opera e la taratura degli appoggi (vedi fig. 3).

Gli appoggi unidirezionali nel piano orizzontale, montati in L ed A, sono realizzati sostanzialmente in modo analogo a quelli già descritti, salvo che le due superfici, che scorrono una sull'altra, invece che con due dischi sono state realizzate con un quadrato che scorre su un rettangolo avente lato minore eguale al lato del quadrato e lato maggiore parallelo rispettivamente agli assi congiungenti i punti più alti e più bassi della copertura, e di lunghezza tale da permettere gli spostamenti lungo questi assi dell'anello nelle varie condizioni di carico.

Nei quattro appoggi L ed A gli spostamenti dovuti a carichi verticali sono sempre paralleli agli assi (vedi fig. 23); le spinte orizzontali dovute al vento di strisciamento sono contrastate dalle spalle degli appoggi e trasmesse direttamente ai cavalletti dalle saette di controvento (vedi tav. II).

Per quanto concerne il montaggio, gli appoggi furono introdotti tra mensole e trave di bordo dopo il montaggio ultimato di quest'ultima.

Si è proceduto poi, per successive approssimazioni, alla taratura dei singoli appoggi, riportandoli il più vicino possibile ai carichi teorici di partenza.

Per aumentare, o diminuire il carico sugli appoggi si è agito sulle viti distanziatrici tra le due piastre sotto gli appoggi stessi: per facilitare la manovra le piastre venivano scaricate mediante due martinetti. La lettura del carico agente si è ottenuta da un grafico fatto sperimentalmente per ogni singolo appoggio por-

tando sull'ascisse le forze agenti sulla coppia di martinetti che sostituivano temporaneamente gli appoggi ed in ordinate gli spostamenti verticali della trave, letti su di un flessimetro (vedi fig. 3). Alla fine si è controllato anche, per mezzo di appositi grafici, che la distribuzione effettiva delle reazioni fosse la più vicina possibile a quella teorica ottenuta dai calcoli.

### 2.3. Trave di bordo.

Come abbiamo già visto sopra, la sezione rettangolare a cassone è costituita da lamiera irrigidita sia da nervature longitudinali che da diaframmi trasversali.

In corrispondenza degli appoggi la trave ha una sezione trasversale (vedi tav. II) particolarmente irrigidita con due travi a cassone disposte a V, che consente di trasmettere gli sforzi dalle pareti dell'anello al punto di appoggio, oltre che costituire dei diaframmi di irrigidimento.

Gli appoggi, come abbiamo visto, sono in numero di 38.

Costruttivamente l'anello è composto da 152 elementi modulari di ingombro  $2,65 \times 6,5 \times 2,5$  circa, costruiti in lamiera saldata, collegati tra di loro con giunti a flan-

gia e bulloni ad alta resistenza. Dei 152 elementi, 114 sono parallelepipedi retti e vengono raggruppati a 3 a 3 per una lunghezza complessiva di m 7,5 e disposti tra gli appoggi. Gli elementi standard sono facilmente

trasportabili a due per volta. Gli altri 38 elementi sono invece atipicizzati, sia dal fatto che in corrispondenza dell'appoggio vi è un setto molto più rigido realizzato con due travi a V, sia per la configurazione geometrica

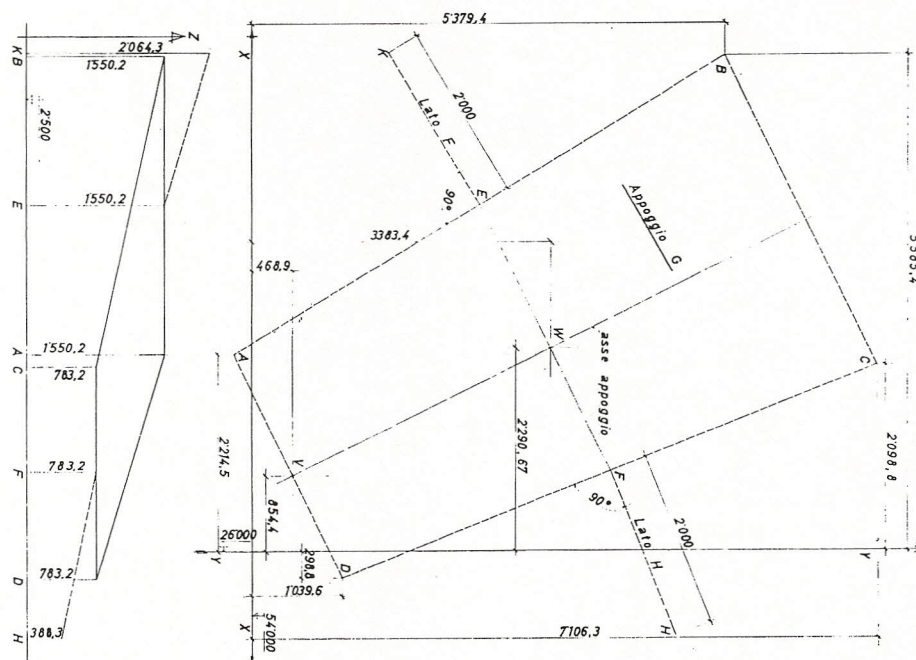


Fig. 4 - Tracciatura tridimensionale del banco dell'elemento G.

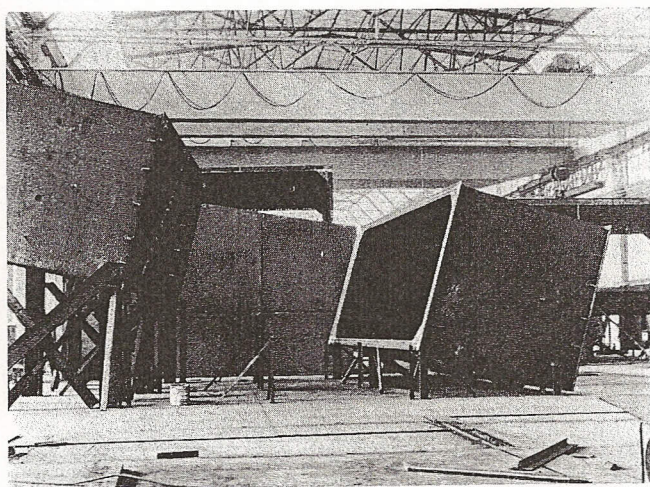


Fig. 5 - Elementi standard, piazzati sul banco secondo il disegno di fig. 4.

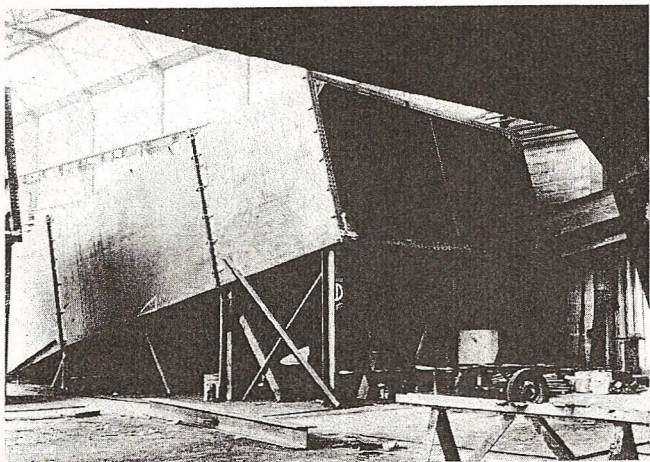


Fig. 6 - Elemento atipico premontato in officina.

che è tale che le uniche due facce rettangolari e piane sono quelle della sezione flangiata, mentre tutte le altre assumono una configurazione tale da dare all'asse della trave sia la curvatura in pianta che l'andamento altimetrico.

Senza dilungarsi sugli ovvi vantaggi costruttivi, di aver previsto una sezione rettangolare di resistenza costante, facciamo notare come questo tipo di struttura ha permesso di produrre la maggior parte degli elementi (114 standard) praticamente di serie, mentre ogni difficoltà costruttiva è stata concentrata sulla tracciatura e sulla costruzione dei 10 tipi speciali: 9 in quattro esemplari ed 1 in due esemplari (elemento L).

La tracciatura di questi elementi è stata realizzata con una serie di disegni. Nella fig 4 si vede il disegno per l'elemento atipico G e nelle figg. 5 e 6 il banco di assemblatura realizzato dalla posizionatura spaziale di due elementi standard secondo il disegno di traccia-

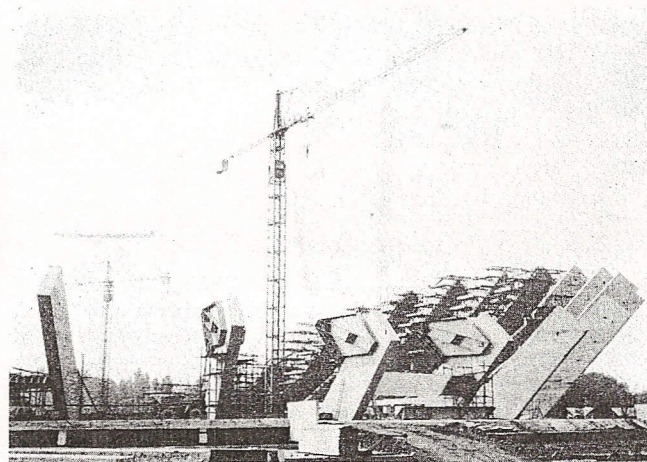


Fig. 7 - Le prime tre mensole montate.

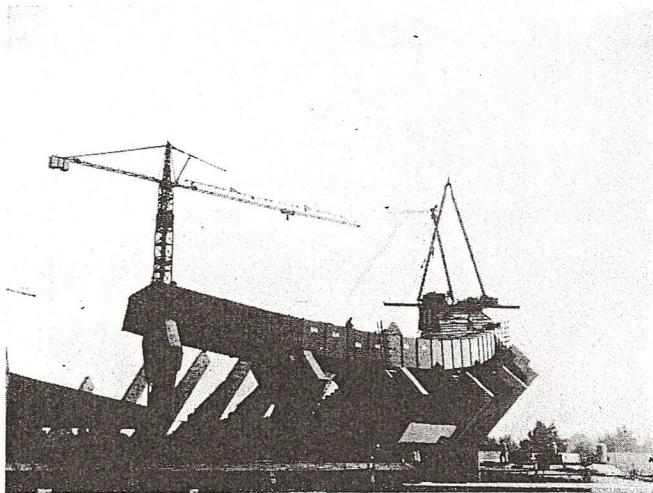


Fig. 8 - Primo quarto di trave di bordo montato.

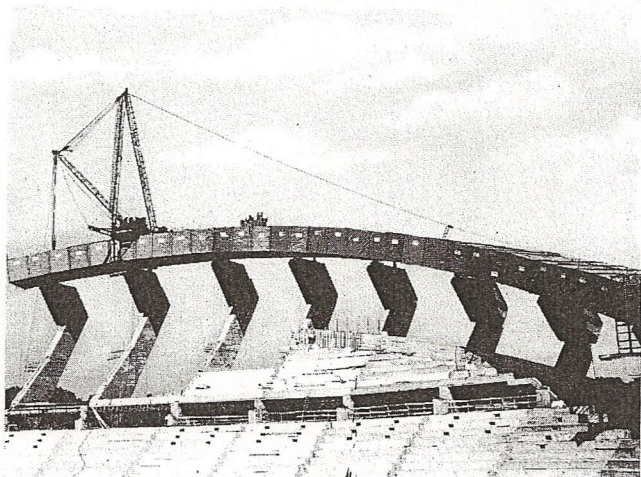


Fig. 9 - Il montaggio prosegue oltre la mensola A.

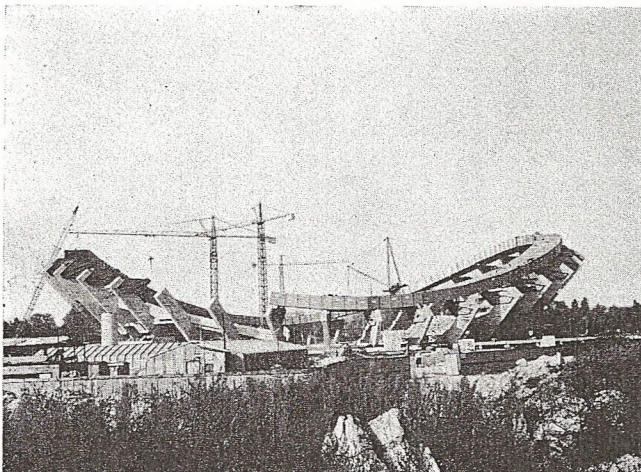


Fig. 10 - Si sta per chiudere la trave di bordo.

tura. In questo modo il banco di tracciatura era anche banco di premontaggio, sicchè si può dire che tutto l'anello è stato premontato a tre a tre elementi in officina. Questo premontaggio ha dato ovviamente i suoi buoni frutti in cantiere all'atto del montaggio.

In cantiere, montate le prime mensole (vedi fig. 7) si sono unite con travi provvisorie le mensole L sud ed I sud-ovest, montandovi quindi sopra i primi 5 elementi della struttura: due pezzi speciali, uno in L ed uno in I e tre standard nella campata. Da questo punto si procedeva applicando concio per concio tutti gli ele-

menti a sbalzo e montando l'anello in senso antiorario con un derrick a slitta rampante sulla trave stessa (vedi figg. 8, 9, 10, 11). Per accelerare il montaggio si iniziò con tecnica analoga, ma con una autogrù da terra, anche dal cavalletto L nord (vedi fig. 2). La metà est dell'anello è stata quindi montata con un derrick da sopra la trave stessa, mentre la metà ovest è stata montata da terra con un autogrù.

#### 3.4. Trave ad omega di aggancio delle funi.

Queste travi hanno anch'esse andamento circolare in pianta ma altimetrico tale che il prolungamento della

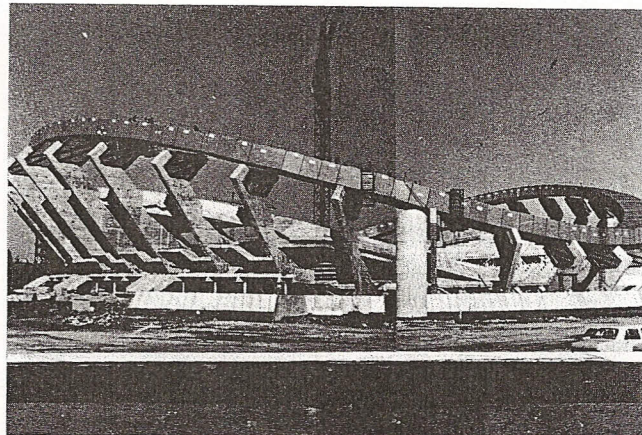


Fig. 11 - L'anello è completamente montato.

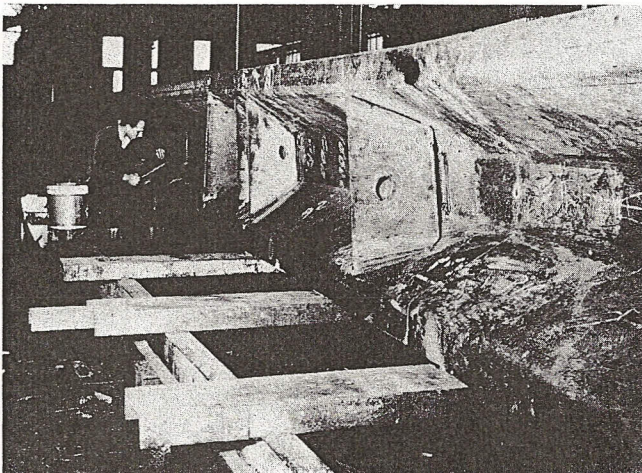


Fig. 12 - Trave ad omega di aggancio delle funi, in costruzione.

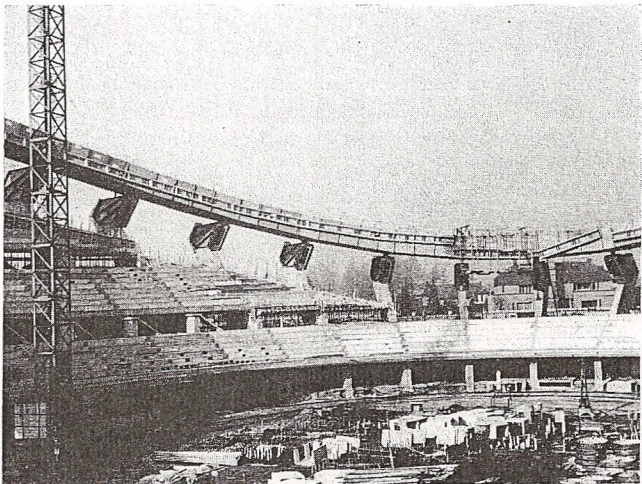


Fig. 13 - Montaggio delle travi ad omega di aggancio delle funi.

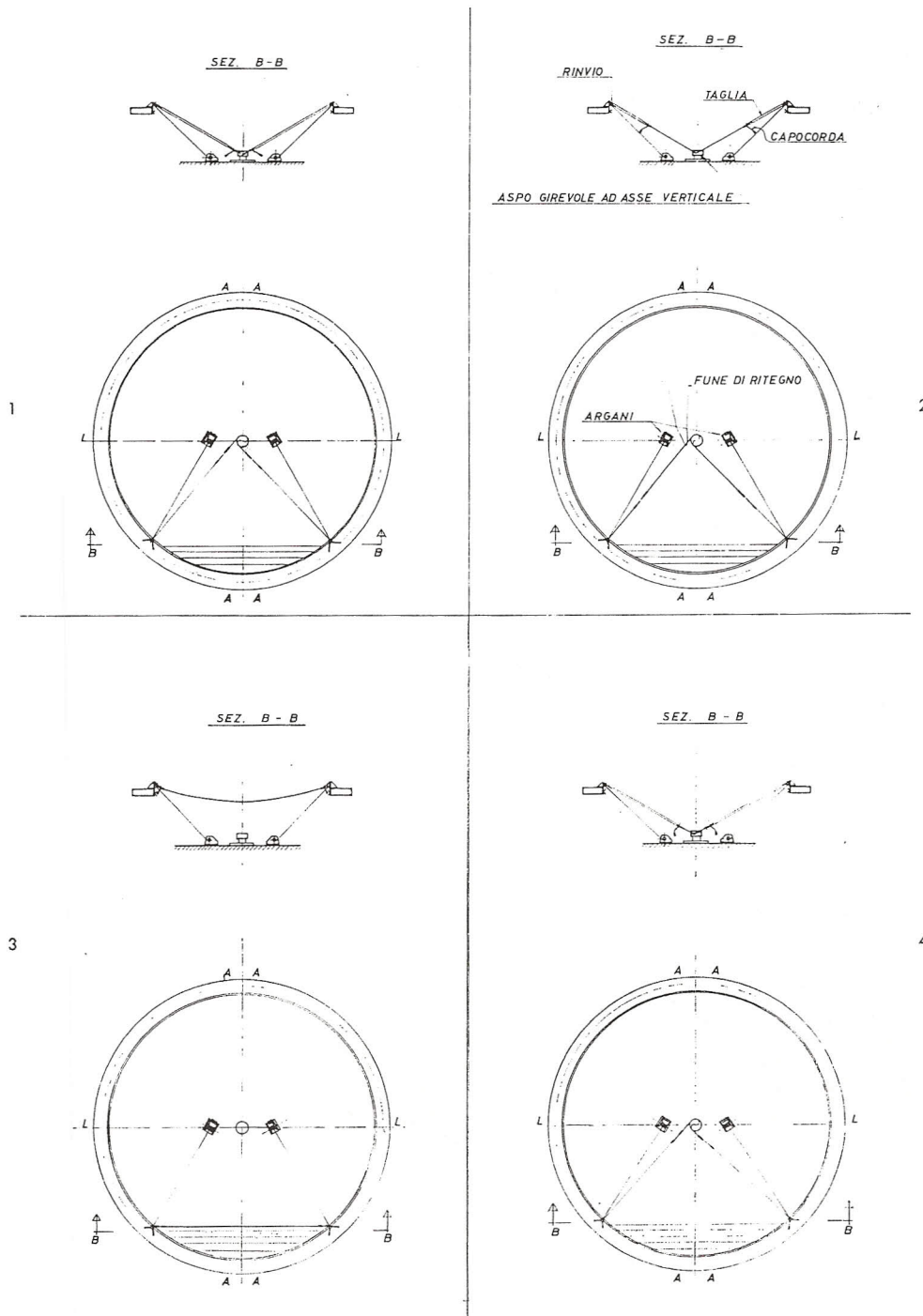


Fig. 14 - Schema del montaggio funi.

rete passi per il baricentro dell'anello di bordo, hanno sezione ad omega (vedi figg. 12, 13 e tav. II) sono bloccate all'anello a mezzo di bulloni ad alta resistenza circa ogni 2,5 m, ed offrono la possibilità di aggancio ai capicorda delle funi su settori in lamiera saldati già forati ed opportunamente orientati.

La loro tracciatura è avvenuta in forma del tutto analoga e contemporaneamente alla costruzione degli elementi della trave di bordo, con la differenza che sono solamente 76 elementi invece che 152: 38 analoghi agli elementi atipici e 38 che sostituiscono gli elementi standard, cioè su ogni campata vi è un'unica travetta lunga ca. 7,5 m, applicata ai tre elementi standard della trave di bordo.

### 3.5. Funi.

Di tipo spiroidale; sono state prestate; i loro attacchi (giunti cardanici) (vedi fig. 16) sono tali da poter

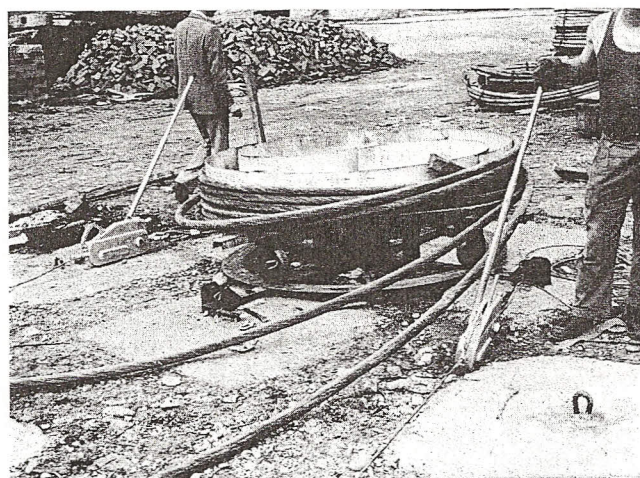


Fig. 15 - L'aspo delle funi e i due tirfor.

pensare di escludere fenomeni di fatica sulle teste fuse. Esse sono dotate di apparecchi di regolazione (tenditori) della lunghezza e quindi della trazione che si possono facilmente regolare dopo averli scaricati con una coppia di martinetti (vedi fig. 20).

Le funi sono state avvolte in speciali aspi (vedi figg. 14, 15 e 16) che permettono di srotolare contemporaneamente i due capicorda. Le funi sono state disposte al centro dell'anello con l'aspo verticale reso girevole da una particolare attrezzatura, con due argani a terra e convenienti rinvii sull'anello. Si sono quindi alzati e portati sulle loro sedi i due capicorda per ogni fune.



Fig. 16 - Le testate dei cavi.

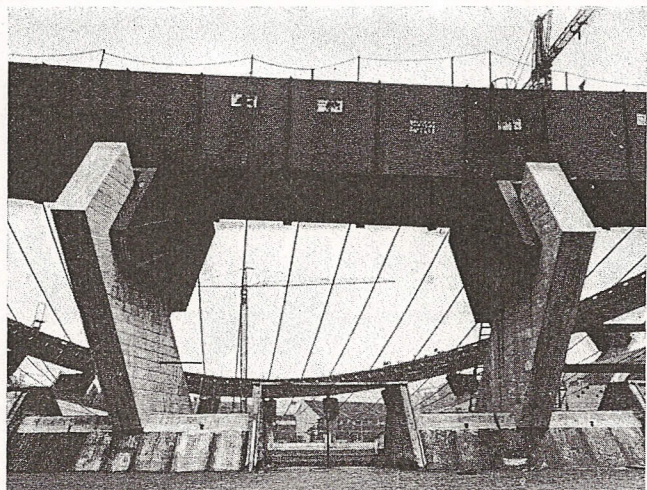
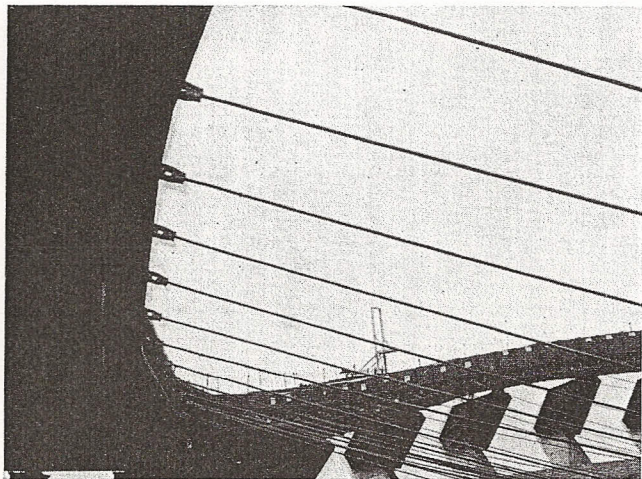


Fig. 17 e 18 - Funi fascianti montate in contro freccia.

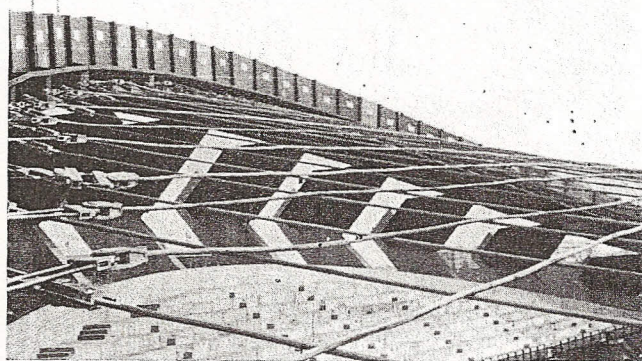


Fig. 19 - Funi portanti e funi fascianti a peso morto.

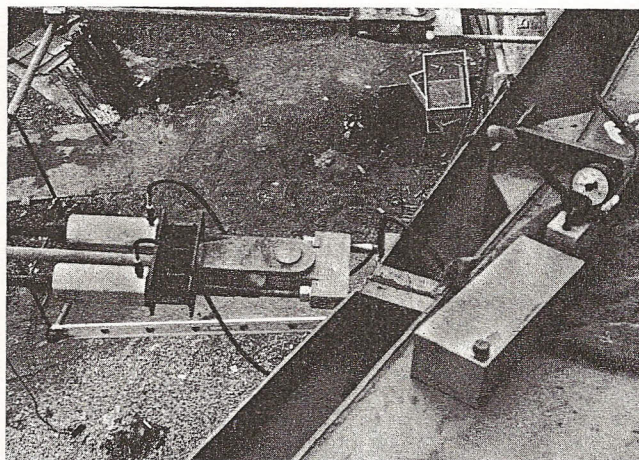


Fig. 20 - Tesatura delle funi.

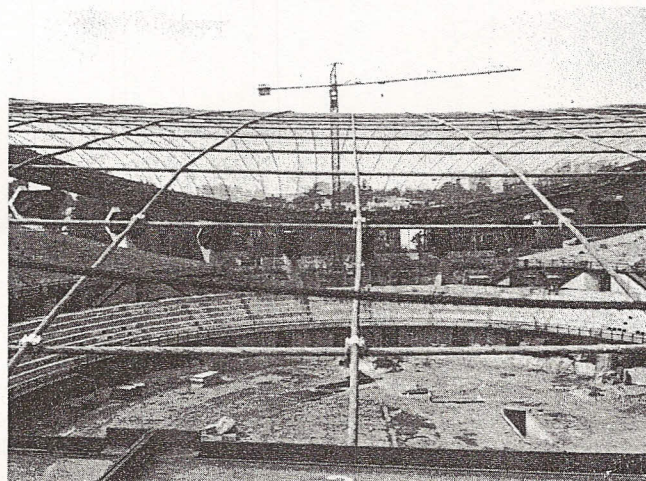


Fig. 21 - I primi morsetti tra le funi.

Per quanto concerne le successioni nella messa in opera delle funi, in una prima fase sono state montate le funi fascianti con la freccia rovescia (vedi figg. 17 e 18), quindi le funi portanti con una opportuna freccia (vedi figg. 19 e 21). In questa fase le funi fascianti hanno gravato a corpo morto sulle funi portanti. Quindi, a mezzo di una coppia di martinetti, (vedi fig. 20) si sono messe in trazione le funi fascianti bloccando con i dati dei tenditori le lunghezze corrispondenti alla trazione imposta. Si sono disposte delle stadiie orizzontali solidali alle mensole e degli indici solidali

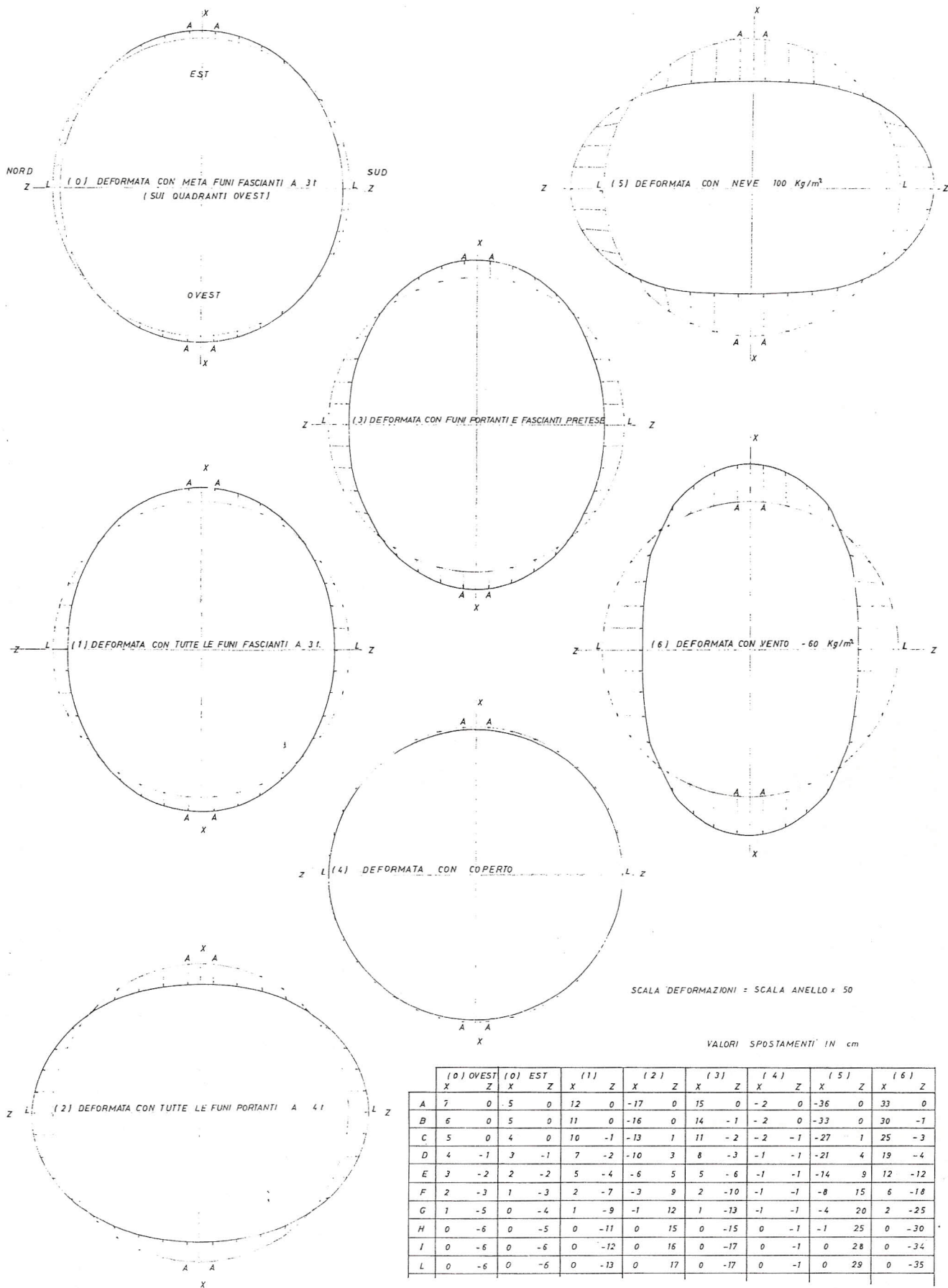


Fig. 22 - Ovalizzazioni teoriche della trave di bordo nelle varie fasi del montaggio, con 100 kg/m<sup>2</sup> di neve e con 60 kg/m<sup>2</sup> di vento.

all'anello (vedi fig. 23), affinché durante il montaggio (ed anche successivamente) si potessero controllare le ovalizzazioni dell'anello e confrontarle con quelle previste nei nostri calcoli per le varie condizioni di carico (vedi fig. 23).

Con riferimento alla figura 22 notiamo:

- configurazione (0): valori dell'ovalizzazione corrispondente al montaggio delle 28 funi fascianti (parallele all'asse L-L) a freccia rovescia sui quadranti ovest; trazione per ogni fune ca. 3 t;
- configurazione (1): valori dell'ovalizzazione a fine montaggio di tutte le fascianti a freccia rovescia — tensione per ogni fune di ca. 3 t; notiamo che il punto L si è spostato diametralmente verso l'interno di 13 cm rispetto al cerchio di partenza;
- configurazione (2): valori dell'ovalizzazione corrispondenti al montaggio delle funi portanti sorreggenti a peso morto le funi fascianti, con freccia predeterminata in funzione della freccia finale — tiro sulle portanti 4 t per fune. Notiamo che in questa operazione il punto L si è spostato di 30 cm verso l'esterno e si trova quindi a 17 cm sempre verso l'esterno rispetto al cerchio di partenza;
- configurazione (3): questa configurazione, che si ottiene pretendendo opportunamente le funi, è studiata in modo tale che il peso proprio del coperto ricentri l'anello (l'anello cioè in fase di esercizio lavora quasi esclusivamente in compressione); la deformata indicata in fig. 23) è quella corrispondente alla successiva posa di un coperto di peso proprio pari a 40 kg/mq. (Si sono studiate altre deformate per coperti di peso proprio diverso). Sempre osservando L, esso si è nuovamente spostato verso l'interno e si trova (dopo 34 cm di corsa) a 17 cm verso l'interno del cerchio di partenza;
- configurazione (4): valori delle deformazioni a fine montaggio del coperto; L è spostato verso l'interno rispetto all'indefornata del cerchio di partenza di 1 cm ca. (come pure tutti agli altri punti dell'anello), per effetto dell'accorciamento dell'anello dovuto al suo stato di compressione.
- configurazione (5): valori della ovalizzazione dell'anello con il coperto montato di peso 40 kg/mq secondo (4) e con l'aggiunta di 100 kg/mq di neve; si nota che il punto L si sposta dalla posizione normale di riposo del coperto (configurazione 4) di 30 cm verso l'esterno;
- configurazione (6): valori della ovalizzazione dell'anello con il coperto montato di peso proprio pari a 40 kg/mq secondo (4) e con l'aggiunta di — 60 kg/mq di vento aspirante; si nota che il punto L si sposta

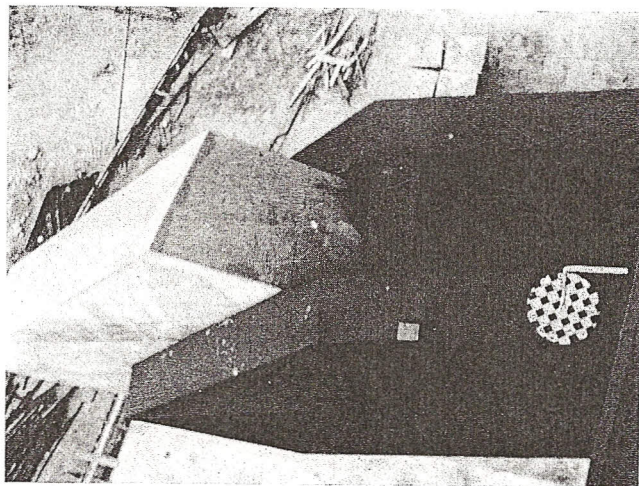


Fig. 23 - Studio del controllo ovalizzazioni della Trave di bordo .

dalla posizione normale di riposo del coperto (configurazione 4) di 36 cm verso l'interno.

Naturalmente, oltre al preventivo calcolo ed al successivo controllo delle deformazioni dell'anello, si sono calcolati per ognuna di queste fasi, e per altre ipotizzate, i valori di tutti i parametri di sollecitazione delle conseguenti tensioni unitarie, della distribuzione di queste sulla sezione resistente della trave cava e si sono condotte le opportune verifiche di resistenza e di stabilità; questi argomenti, insieme ad altri prettamente progettuali, verranno trattati in una prossima nostra nota su questa rivista.

L'opera è in avanzata fase di realizzazione per conto del CONI da parte della Soc. It. Condotte D'Acqua, su progetto architettonico dello Studio Ingg. Arch. Valle di Roma.

Coordinatore del progetto, oltre che progettista delle strutture in c.a., è il Dr. Ing. Renzo Rosi - Ufficio Studi e Progettazioni della Soc. Condotte D'Acqua; consulenti della Soc. It. Condotte D'Acqua i Proff. Ingg. Samuelli-Ferretti e Zingali.

Progettista delle strutture in acciaio è il Dr. Ing. Giorgio Romaro con il quale ha collaborato, in particolare per il calcolo automatico delle strutture, il Dr. Ing. Bernardo Schrefler.

Direttore dei Lavori: Dr. Ing. Veniero Kramer;  
Direttore del Cantiere: Geom. Franco H. Guerci.

Hanno fornito:

- le strutture in acciaio la Soc. « CO.ME.VA » di Vicenza (in opera);
- le funi la Soc. Trafileries di Bourg (in opera);
- gli appoggi la Soc. « F.I.P. » di Padova.

f = 9,30 m

# Trave di bordo della tensostruttura per la copertura del nuovo Palasport di Milano

Dott. Ing. M. Gamba,  
Direttore Società CO.ME.VA.  
Altavilla (Vicenza)

E' in corso di completamento a Milano nella zona di San Siro, il Nuovo Palasport destinato ad accogliere 15 000 spettatori.

La forma del complesso è circolare con diametro esterno di 140 m.

Tutta l'area verrà coperta mediante manto sostenuto da una tensostruttura, senza appoggi intermedi, ancorata alla trave di bordo della quale intendiamo dare alcune notizie nel presente articolo.

Il progetto architettonico fu scelto dall'Ente Committente a seguito di appalto concorso.

Caratteristica preminente dell'opera era la costruzione di una copertura a pianta circolare ad andamento altimetrico a sella.

Tale linea presentava una nota saliente che doveva essere rispettata nella soluzione.

## Concezione dell'anello di ancoraggio

Il problema presentato dall'appaltatore insieme con gli architetti progettisti fu risolto mediante la realizzazione di una copertura sostenuta da funi ancorate ad un anello perimetrale.

Detto anello doveva assorbire tutte le sollecitazioni conseguenti alla copertura senza chiamare in causa le strutture di sostegno dell'anello stesso salvo che per i carichi verticali.

Un primo calcolo delle sollecitazioni fu sviluppato al calcolatore elettronico dai Proff. Samuelli e Zingali.

Su questi dati la Società Appaltatrice fornì gli elementi alle Ditte subfornitrici invitate per la costruzione dell'anello metallico e delle funi.

Per l'anello la soluzione scelta fu quella proposta dalla Società CO.ME.VA. su progetto del Dott. Ing. Giorgio Romaro.

Essa si articola sui seguenti punti fondamentali:

a) Costruzione di elementi fabbricati in officina da unire in can-

- b) Continenimento del numero dei pezzi a profili particolari entro limiti di convenienza sia ai fini della costruzione che del trasporto e della posa in opera;
- c) Possibilità di montaggio senza ostacolare le opere murarie che erano già in parte realizzate permettendo nel contempo l'esecuzione delle restanti senza interferenze;
- d) Soluzione tecnicamente valida e contemporaneamente la più economica per l'ancoraggio delle funi all'anello;
- e) Realizzazione di mensole di sostegno dell'anello tali da garan-

tire, mediante adeguati supporti, il trasferimento dei carichi dell'anello sugli spuntoni in cemento armato (cavalletti) uscenti dal terreno alla distanza variabile di circa 10/11 m uno dall'altro.

## Tecnica costruttiva

Il complesso è costituito da 152 elementi 114 dei quali sono uguali tra loro e 38 speciali.

I pezzi uguali corrispondono ai 3 elementi intermedi di ogni campata compresa tra due elementi speciali.

Essi sono costituiti da cassoni a sezione rettangolare in lamiera,

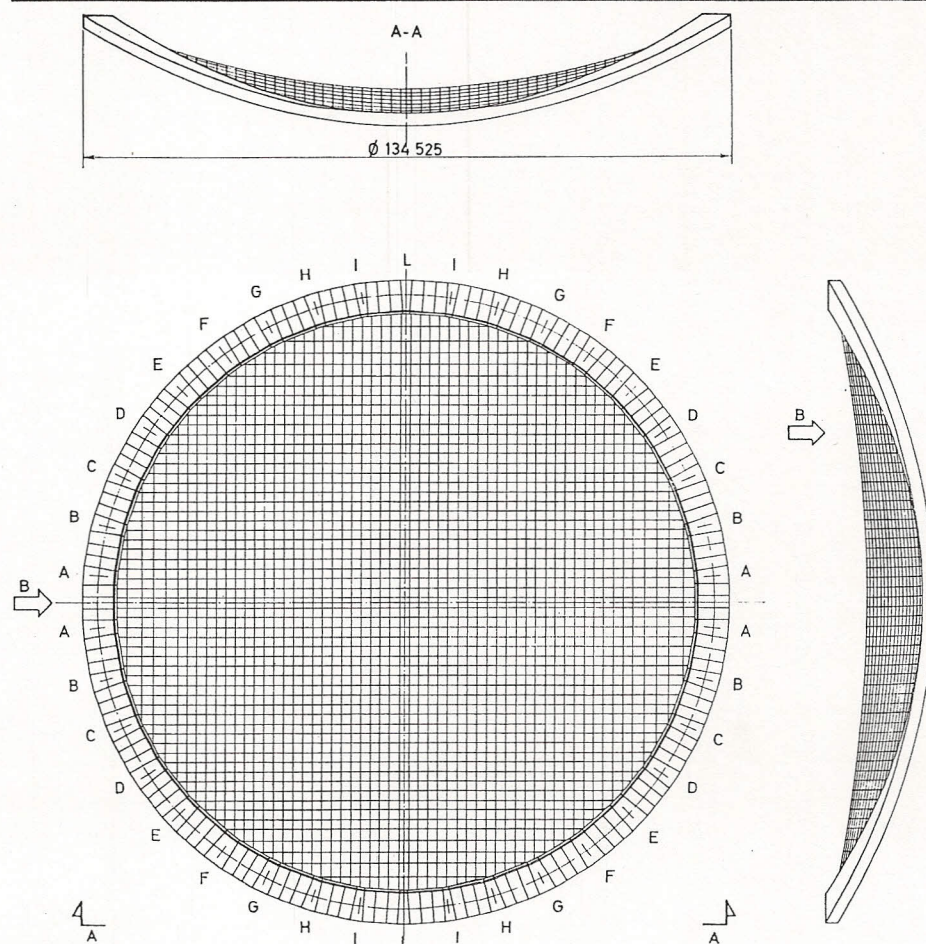


Fig. 1. Schema della pianta e dell'alzato della copertura del Palasport, la cui forma ha un andamento altimetrico a sella.

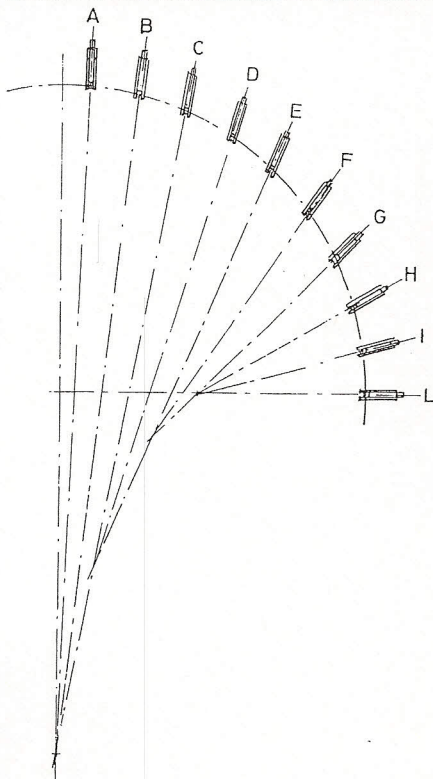


Fig. 2. Sistematica dei supporti dell'anello di ancoraggio dei cavi (un quarto di cerchio; gli altri tre quarti sono simmetrici a questo).

opportunamente irrigiditi con nervature e diaframmi.

I pezzi speciali corrispondono al numero dei cavalletti e sono di foggia tale da garantire l'andamento tridimensionale dell'anello.

Essi sono stati irrigiditi in corrispondenza degli appoggi mediante travi disposte a «V» per la trasmissione degli sforzi sull'appoggio.

Questi elementi hanno rappresentato la parte più difficile da costruire, da trasportare e da porre in opera.

Gli errori, anche modesti, che si fossero verificati in stabilimento avrebbero comportato gravi inconvenienti nella fase di posa.

E' evidente che l'andamento in pratica dell'anello doveva essere garantito da una esatta dimensione del pezzo sia nel progetto che nella costruzione.

La perfetta corrispondenza tra i risultati in cantiere e le previsioni di progetto hanno confermato sia l'esattezza delle quote dei vari pezzi speciali date dal progettista, sia l'accurata e precisa realizzazione degli stessi ottenuta in stabilimento.

A questo punto sarà opportuno rilevare che all'ottenimento degli esatti valori delle quote ha contribuito anche la costruzione fatta precedentemente in stabilimento

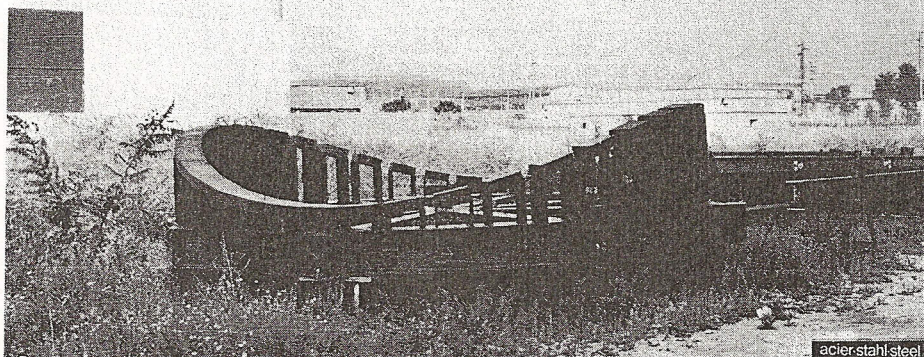


Fig. 3. Modello dell'anello di ancoraggio a scala 1:25.

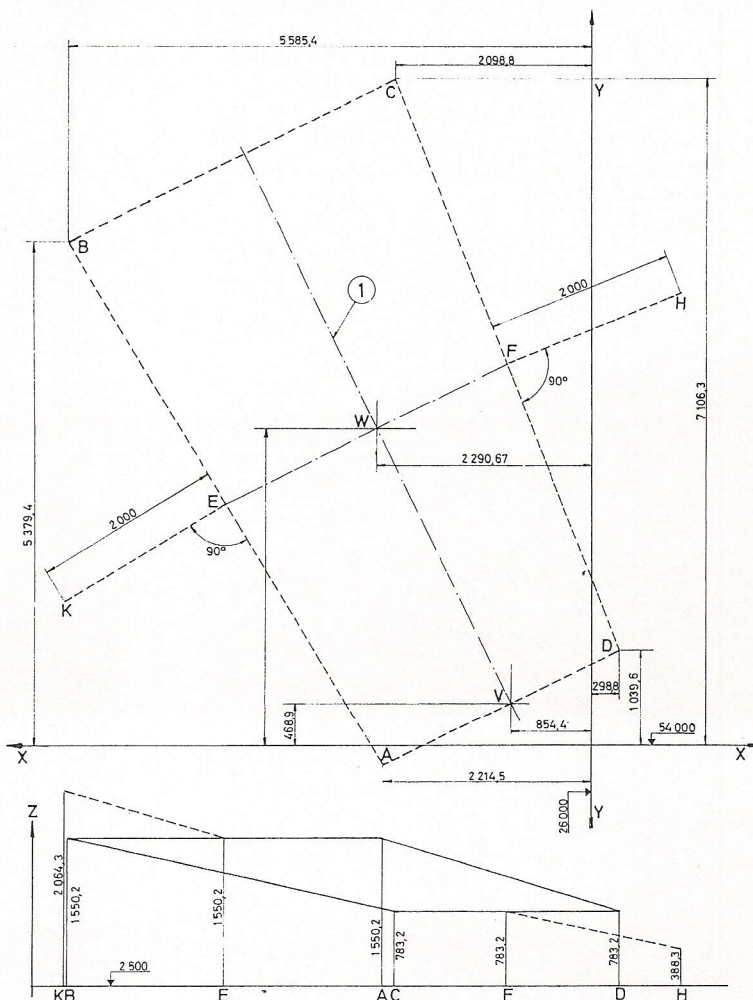


Fig. 4. Rappresentazione tridimensionale dell'elemento speciale dell'anello sull'appiombo del supporto G. (1) Asse dell'appoggio.

di un modello dell'anello su scala ridotta da 1 a 25 (fig. 3).

Dalla figura 5 ci si può rendere conto dell'impostazione costruttiva data in stabilimento e delle conseguenti difficoltà di verniciatura, assiemaggio e sabbiatura.

I pezzi speciali furono costruiti premontando in stabilimento l'elemento standard a monte e quello a valle con le medesime coordi-

nate nello spazio che essi avrebbero poi avuto dopo la posa in opera in cantiere.

Tra questi due elementi veniva costruito il pezzo speciale.

Praticamente così tutto l'anello è stato premontato in stabilimento.

Le giunzioni tra elemento ed elemento furono realizzate con flange da accoppiare mediante bulloni ad alta resistenza.

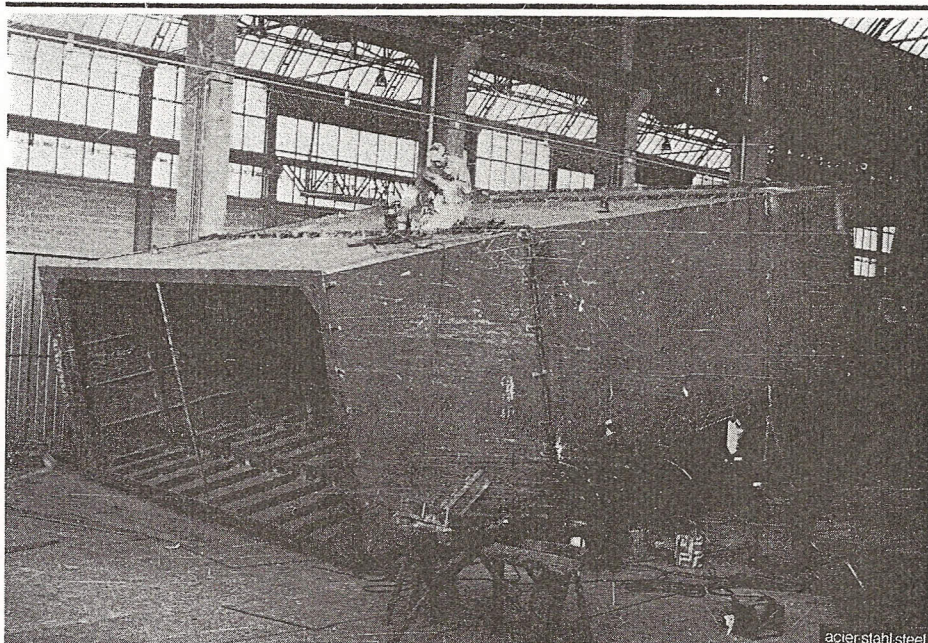


Fig. 5. Fabbricazione in officina di un elemento speciale compreso tra due elementi standard.

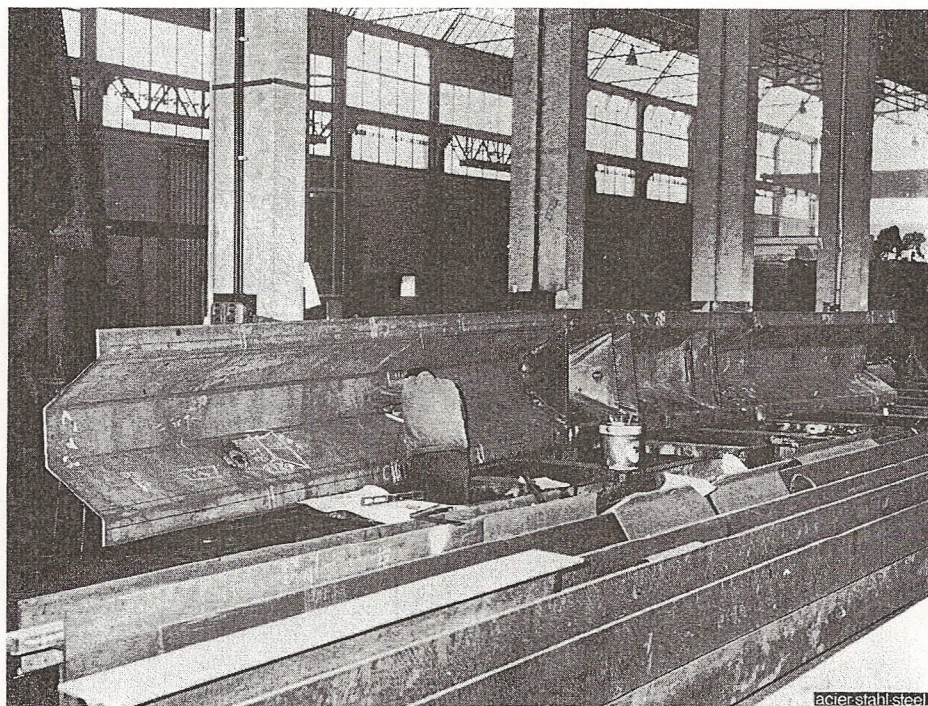


Fig. 6. Fabbricazione di una delle piccole travi di sezione trapezoidale che servono all'ancoraggio dei cavi all'anello. Foto: Ferrini, Vicenza.

Per garantire il combaciamento delle flange sono stati studiati particolari accorgimenti e sequenze di saldatura.

Questa è stata eseguita con elettrodi del 5° gruppo basico da operatori patentati.

### Trasporto e montaggio

Il trasporto dei vari cassoni è stato fatto con autotreni.

Mentre per i 114 elementi eguali si sono potuti realizzare dei carichi normali (due per ogni autotreno), una parte degli elementi

speciali ha richiesto trasporti eccezionali.

La posa in opera in cantiere ha comportato il superamento delle difficoltà inerenti alla contemporaneità dell'avanzamento dell'anello e di quello delle opere murarie relative ai locali perimetrali, all'esterno dello stadio, destinati a servizi.

Si è quindi dovuto, in buona parte, procedere con un montaggio a sbalzo (fig. 9).

La parte rimanente è stata posta in opera con una autogrù di adeguata potenza.

Tutti i bulloni di accoppiamento

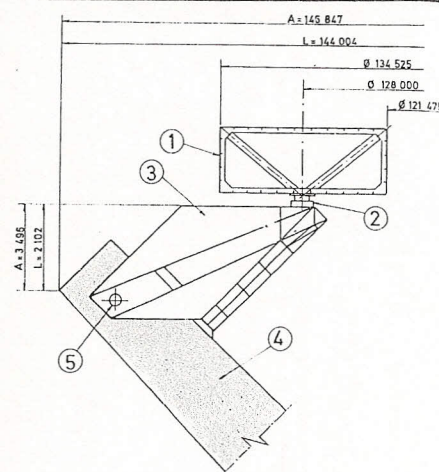


Fig. 7. Schema di un supporto dell'anello. (1) Elemento a cassone. (2) Appoggio scorrevole. (3) Mensola. (4) Montante in c.a. (5) Perno Ø 300 mm.

sono stati chiusi con chiave dinamometrica ad un valore prefissato dal progettista.

### Appoggi

L'anello posa su appoggi mobili che a loro volta sono solidali alle mensole realizzate in lamiera saldata.

Dette mensole sono state costruite in officina in un solo pezzo.

Sono state successivamente rese solidali con i cavalletti mediante grossi perni passanti di 300 mm di Ø e di 800 mm circa di lunghezza.

Gli appoggi sono simili a quelli usati nei ponti con piano inferiore in acciaio inox ed elementi in teflon.

Nella posa in opera essi sono stati opportunamente tarati in modo da sopportare i carichi teorici fissati in progetto.

### Ancoraggio delle funi

Per l'ancoraggio delle funi all'anello si è prevista la costruzione di travette di particolare foggia a sezione trapezoidale.

Anche per questa parte della costruzione le difficoltà di realizzazione sono state notevoli.

E' infatti da mettere in evidenza che l'andamento nello spazio della linea di ancoraggio delle funi dell'anello è diverso da quello della trave di bordo.

Si sono quindi dovute premonere anche tutte le travette in stabilimento con tracciatura indipendente e diversa da quella dell'anello.

In pratica si è trattato di costruire un secondo anello, circa dello stesso diametro, con una se-

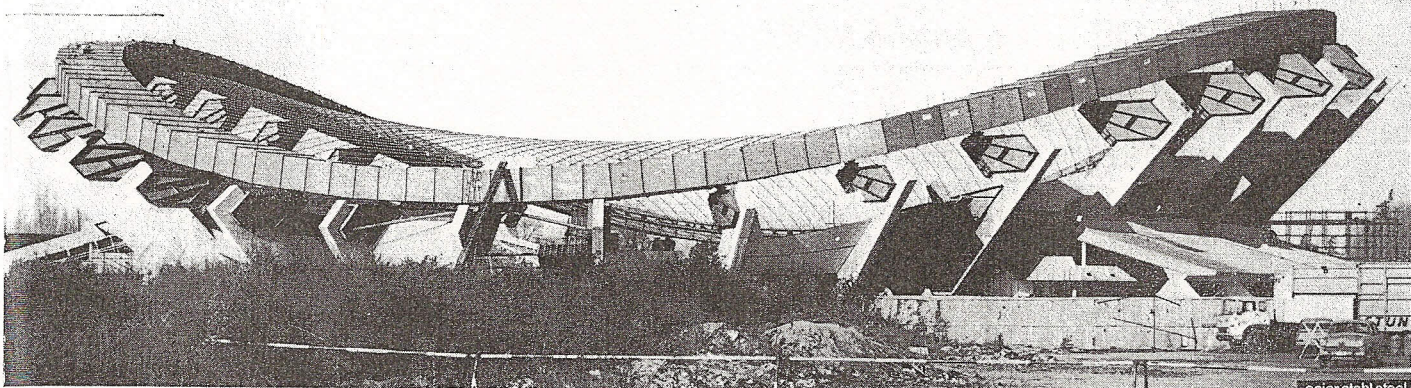


Fig. 8. L'anello completamente montato e i cavi tesi pronti per la posa in opera della copertura. Foto: Ferrini.

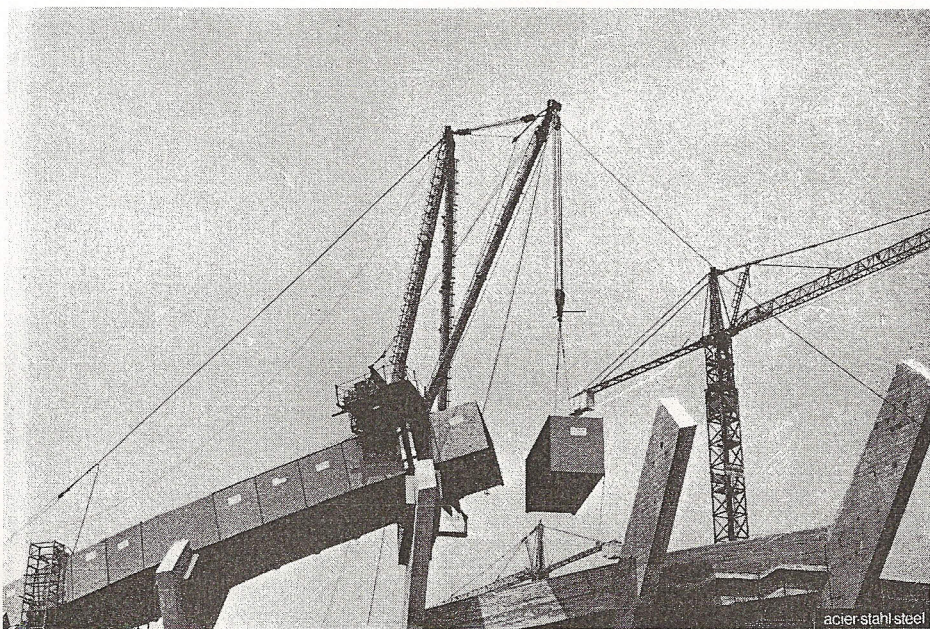


Fig. 9. Messa in opera di un elemento dell'anello di ancoraggio. Montaggio effettuato a sbalzo mediante un derrick.

zione pari a quella della travetta e con coordinate diverse da quelle della trave di bordo.

L'andamento infatti varia secondo tre parametri.

Dal punto di vista della posa le difficoltà furono presentate dalle misure in lunghezza di ogni elemento, diverse rispetto a quella dei cassoni dell'anello principale; ne è conseguita la necessità di un montaggio a parte e non contemporaneo.

Tutta la carpenteria fu sabbiata e verniciata in stabilimento, all'esterno con una vernice antiruggine ed all'interno con un preparato bituminoso.

Come già detto, la perfetta esecuzione in stabilimento è stata co-

ronata dal successo della chiusura dell'anello alla fine dell'operazione di posa, con il perfetto combaciamento del primo e dell'ultimo elemento.

In corrispondenza dei due cavalletti più bassi e dei due più alti furono applicate delle controventature. Esse sono costruite con elementi tubolari opportunamente sagomati in corrispondenza degli attacchi.

La costruzione è stata completata con apparecchi per il controllo degli spostamenti dell'anello nelle varie fasi di tensionatura delle funi.

A conforto dei calcoli sono state fatte con esito molto soddisfacente delle prove particolari per

il controllo dei giunti bullonati per collegamento delle travette di sostegno delle funi all'anello.

Tutta la costruzione è stata realizzata in circa 6 mesi tranne alcuni particolari e lavori supplementari di rifinitura.

#### Dimensioni principali

- diametro esterno dell'anello: 134,5 m;
- diametro interno dell'anello: 121,5 m;
- differenza di quota tra il baricentro della parte alta e della parte bassa della trave di bordo: 18,54 m.

#### Progetto ed esecuzione

**Committente:** Società Italiana Condotte d'Acqua, per conto del CONI.

**Progetto architettonico:** Studio Ingg. Arch. Valle, Roma.

**Coordinatore del progetto e progettista delle strutture in c.a.:** Dott. Ing. Renzo Rosi - Ufficio Studi e Progettazioni della Società Italiana Condotte d'Acqua, con la collaborazione dei Proff. Ingg. Samuelli-Ferretti e Zingali, consulenti della Società Italiana Condotte d'Acqua.

**Progetto delle strutture in acciaio:** Dott. Ing. Giorgio Romaro con la collaborazione (in particolare per il calcolo automatico delle strutture) del Dott. Ing. Bernardo Schrefler.

**Direttore dei lavori:** Dott. Ing. Veniero Kramar.

**Direttore del cantiere:** Geom. Franco M. Guerri.

**Carpenteria metallica:** Società CO.ME.VA., Altavilla (Vicenza).

# Note sulla progettazione strutturale della copertura del Palasport di Milano

Giorgio Romaro

## Sommario

Si espongono le linee generali delle indagini e verifiche statiche relative alla copertura del Palazzo dello Sport di Milano, con particolare riguardo alla trave di bordo. Si mette in risalto la costante ricerca di aderenza, non solo tra le strutture effettive ed i dati di ingresso dei calcoli, ma tra le varie fasi di montaggio e l'impostazione dei calcoli stessi.

Vi è infine un accenno ai criteri adottati nelle verifiche di resistenza e stabilità e delle indicazioni intorno alla progettazione delle travi di ammassaggio delle funi e delle mensole di sostegno dell'anello.

## 1. - Premessa

Si espongono le linee generali delle indagini e verifiche statiche, relative alla copertura del Palazzo dello Sport di Milano, che, insieme alle soluzioni tecnologiche caratterizzanti la struttura, di cui si è scritto nella precedente Nota [1] su questa stessa Rivista, costituiscono il processo di progettazione strutturale.

Nella Nota [1], pagg. 281, 282, 283 tav. I e II, sono state indicate le precedenti scelte di concezione strutturale racchiuse nel progetto architettonico degli Architetti Tommaso e Gilberto Valle, redatto con la collaborazione dell'Ufficio Studi e Progettazioni della Soc. Italiana per Condotte d'Acqua e dei Proff. Samuelli-Ferretti e Zingali. Vi si era stabilita per la copertura, l'adozione di una tensostruttura, appoggiata ad una superficie anticlastica a paraboloide iperbolico, su pianta circolare con diametro di 128 m, sostenuta lungo il bordo da 38 appoggi scorrevoli su cavalletti di cemento armato.

I Proff. Samuelli-Ferretti e Zingali hanno messo a punto un originale metodo di calcolo automatico [2], pubblicato nel febbraio del 1973, con il quale hanno condotto, per conto della Soc. Italiana per Condotte d'Acqua lo studio della copertura, che è stato preso a base delle offerte delle ditte invitate per la fornitura.

Dr. Ing. GIORGIO ROMARO - Titolare di studio tecnico - Padova.

## Summary

The general outlines of the statical analysis of the roof of the Palasport in Milan are exposed, with special regards to its ring beam. The constant research of the correspondence on the one hand, between the real structures and the input data for the analysis, on the other hand between the different moments of erection and the computation methods themselves is emphasized.

A short reference is made to the criteria used for the analysis of stability, to the project of the anchoring beam of the cables and also to the cantilever beams which are supporting the ring beam.

## 2. - Procedimento di calcolo adottato per la valutazione delle sollecitazioni della tensostruttura

2.0. - Il calcolo delle sollecitazioni delle varie parti della copertura è stato da noi eseguito con assoluta aderenza alla realtà strutturale (cfr. fig. 1-2) ed in particolare alla sequenza delle fasi di montaggio della struttura stessa.

2.1. - La prima fase costruttiva è consistita nel montaggio in opera, della trave di bordo e le prime operazioni di calcolo sono state rivolte alla valutazione delle sollecitazioni e reazioni agli appoggi, in tali condizioni e cioè corrispondentemente all'azione del solo peso proprio dell'anello stesso.

La struttura di bordo è costruttivamente una trave il cui asse, chiuso ad

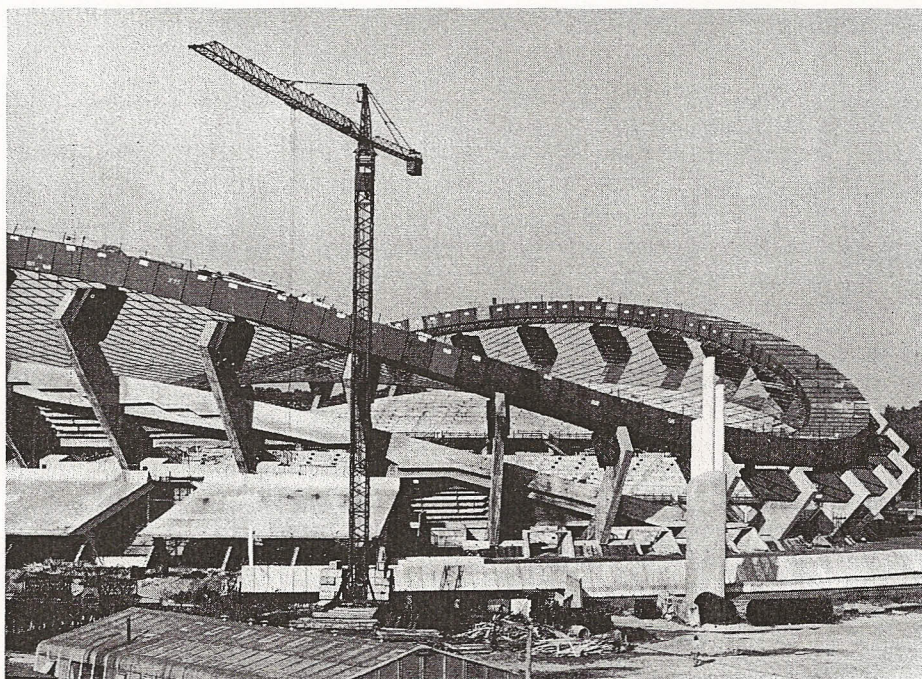


Fig. 1 - Vista d'insieme della copertura prima della posa del manto.

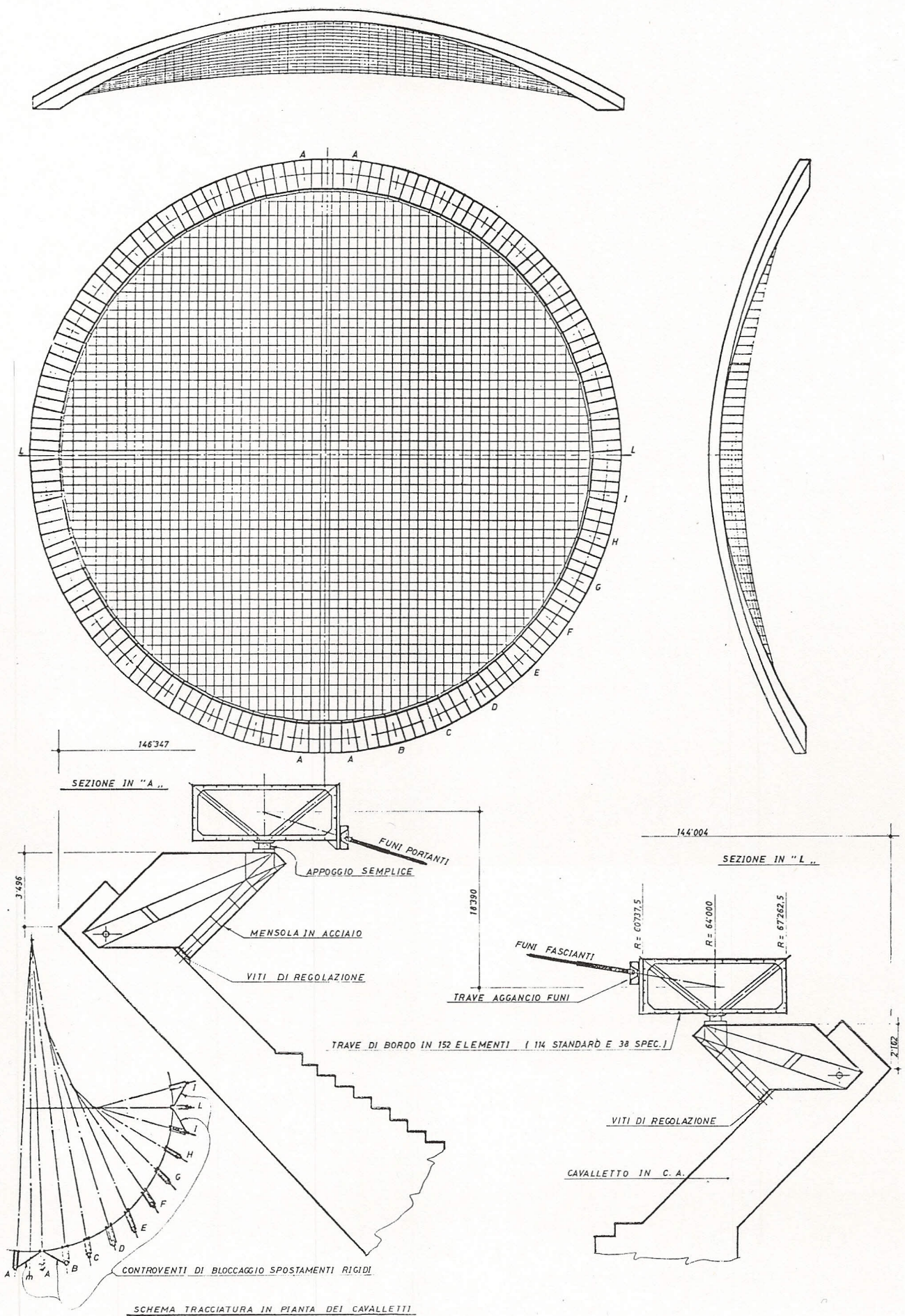


Fig. 2 - Sistema schematico e particolari della copertura.

anello, presenta 116 lati rettilinei (29 per quadrante), non complanari come è indicato nella fig. 3, dotato di 2 piani di simmetria verticali racchiudenti i due diametri orizzontali situati alle quote più alte e rispettivamente più basse. A 38 dei 116 nodi sono applicati vincoli capaci di esercitare reazioni verticali. Le componenti delle forze orizzontali parallele al diametro A-A (cfr. fig. 2) sono contrastate soltanto dai due appoggi in L bloccati nel senso A-A, liberi nel senso L-L. La stessa soluzione è stata adottata per resistere alle componenti delle spinte parallele all'asse L-L.

Ogni asta del telaio è costituita da una trave cava diaframmata con sezione rettangolare, di acciaio tipo 2, con le caratteristiche geometriche seguenti: dimensioni esterne  $6,5 \times 2,65$  m; spessore base della lamiera 12,5 mm;  $A = 2.443 \text{ cm}^2$ ;  $J^x = 135.897.796 \text{ cm}^4$ ;  $J^y = 32.278.719 \text{ cm}^4$ ;  $W^x = 416.544 \text{ cm}^3$ ;  $W^y = 250.544 \text{ cm}^3$ ;  $J^p = 78.464.200 \text{ cm}^3$ .

I diaframmi a struttura reticolare sono di tre tipi. Il più leggero suddivide la sezione cava della trave in tre campi all'incirca quadrati, con diagonali e controdiagonali, ed è utilizzato all'interno dei tronchi rettilinei della trave. Un secondo tipo di forma analoga, adeguatamente rinforzato, è inserito in corrispondenza alle sezioni di spigolo della trave medesima. Il terzo con aste di parete a V, riporta il carico alla zona centrale ed è impiegato nelle 38 sezioni in cui sono disposti gli appoggi.

Con riferimento alla numerazione indicata in fig. 3 che rappresenta un quadrante dell'anello di bordo, gli appoggi sono disposti in corrispondenza dei nodi 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25 e 28.

La determinazione dei parametri delle sollecitazioni sull'anello di bordo, è stata condotta in modo rigoroso ricorrendo al programma «STRUDL» dell'I.C.E.S.

2.2. - La seconda fase della costruzione è consistita nel montaggio delle funi fascianti a freccia rovescia (cfr. figg. 4 e 5) ciascuna applicante alla trave una forza di componente orizzontale pari a 3 t.

Si è ritenuto in questa operazione di calcolo di non tenere conto della ridistribuzione di sforzi operata dalle travi cui sono agganciate le funi (cfr. figg. 2-6) e che riportano gli sforzi delle funi stesse sempre e solo ai diaframmi dell'anello di bordo, consentendo contemporaneamente di farne passare le linee d'azione per il baricentro delle sezioni stesse. Di questo particolare costruttivo si è poi

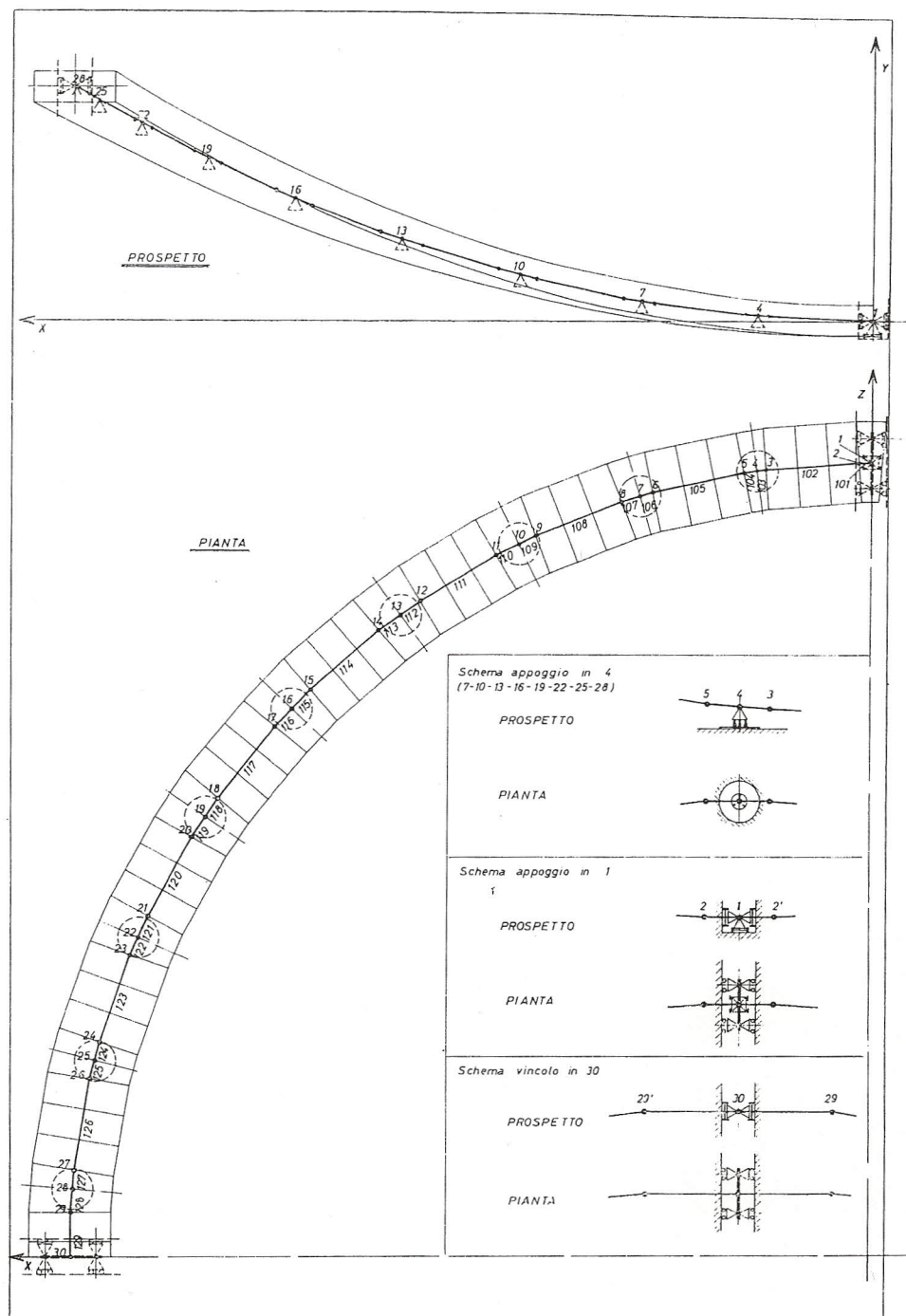


Fig. 3 - Schematizzazione base dell'anello di bordo.

tenuto conto invece nella determinazione delle distribuzioni delle tensioni nella trave principale.

Si è ancora utilizzato il programma STRUDL sia per il calcolo delle sollecitazioni suddette derivanti dall'intera serie di funi, sia per le verifiche condotte nelle condizioni intermedie di montaggio; in base ai risultati di queste verifiche si sono potute semplificare notevolmente le operazioni di montaggio, procedendo con continuità da  $W$  ad  $E$ , ed evitando così onerosi spostamenti di attrezzature.

2.3. - La terza operazione è consistita nel montaggio delle funi por-

tanti con freccia tale da indurre al loro attacco alla trave di bordo sforzi con componenti orizzontali uguali di 4 t per fune. Al termine di questa fase le funi portanti risultavano caricate oltre che del loro peso da quello delle funi fascianti ora sollevate, ma non tese.

Il calcolo è analogo a quello indicato nel punto 2.2.

2.4. - La quarta operazione di montaggio è consistita nell'applicare alle funi tensioni tali da predeformare l'anello in maniera conveniente rispetto all'azione dei carichi futuri.

L'operazione è stata attuata per cicli successivi di controllo ed aggiu-

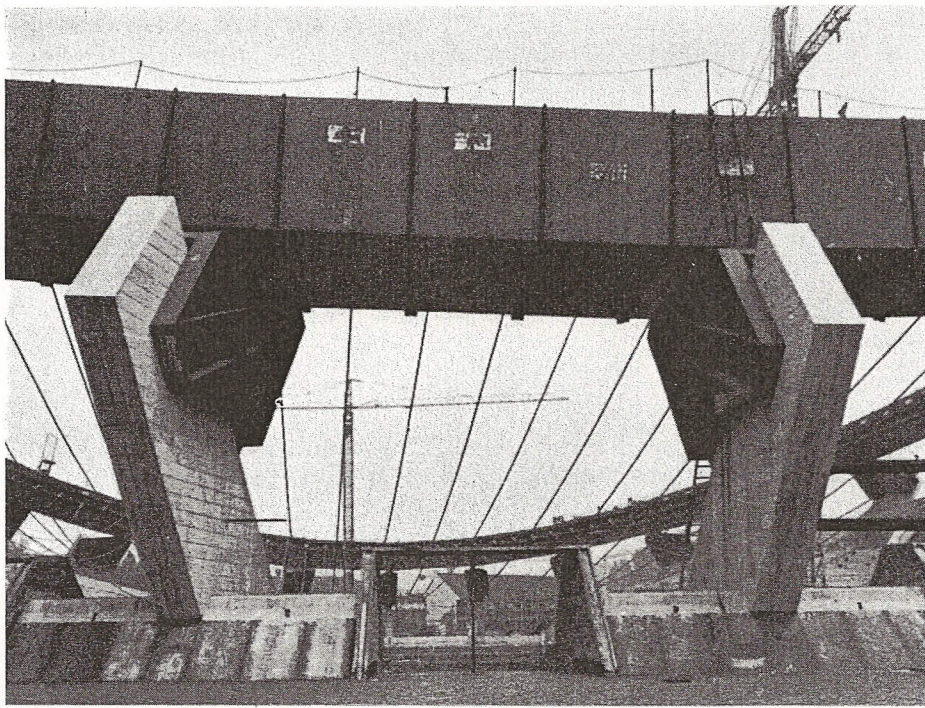


Fig. 4 - Le funi fascianti furono montate per prime e naturalmente presero freccia rovescia.

staggio degli sforzi dei due ordini di funi con martinetti tarati (cfr. fig. 6).

Anche in questo caso il calcolo risulta analogo a quelli condotti precedentemente.

2.5. - La quinta operazione di montaggio è consistita nel serraggio dei morsetti e nell'applicazione del manto di copertura.

Lo studio relativo alle considerazioni di sollecitazione, è stato condotto questa volta su di una struttura spaziale (cfr. fig. 7) comprendendo oltre alle aste di bordo i tronchi di fune compresi fra morsetto e morsetto. Per semplificare le operazioni di calcolo si sono introdotte funi equivalenti, riunenti gli effetti di 4 ÷ 6 funi. La scelta della posizione delle funi equivalenti è stata effettuata con l'accorgimento di farne incrociare il tracciato con le verticali per gli appoggi; si sono così ottenute forti semplificazioni di calcolo. I carichi sono stati ovviamente supposti concentrati ai nodi della rete equivalente. I dati di ingresso dei calcoli prevedono per le aste del bordo i parametri di resistenza ricordati al punto 2.1; per le aste di fune modulo elastico  $E = 1.500.000 \text{ kg/cm}^2$  ed area delle funi equivalenti come indicato in fig. 7.

Del complesso metodo di calcolo utilizzato in questa fase è stata già data relazione nella nota [3].

Si osserva infine che è stato necessario tener conto in particolare: delle modalità di applicazione all'anello degli sforzi di trazione delle funi che le travi, cui queste sono ap-

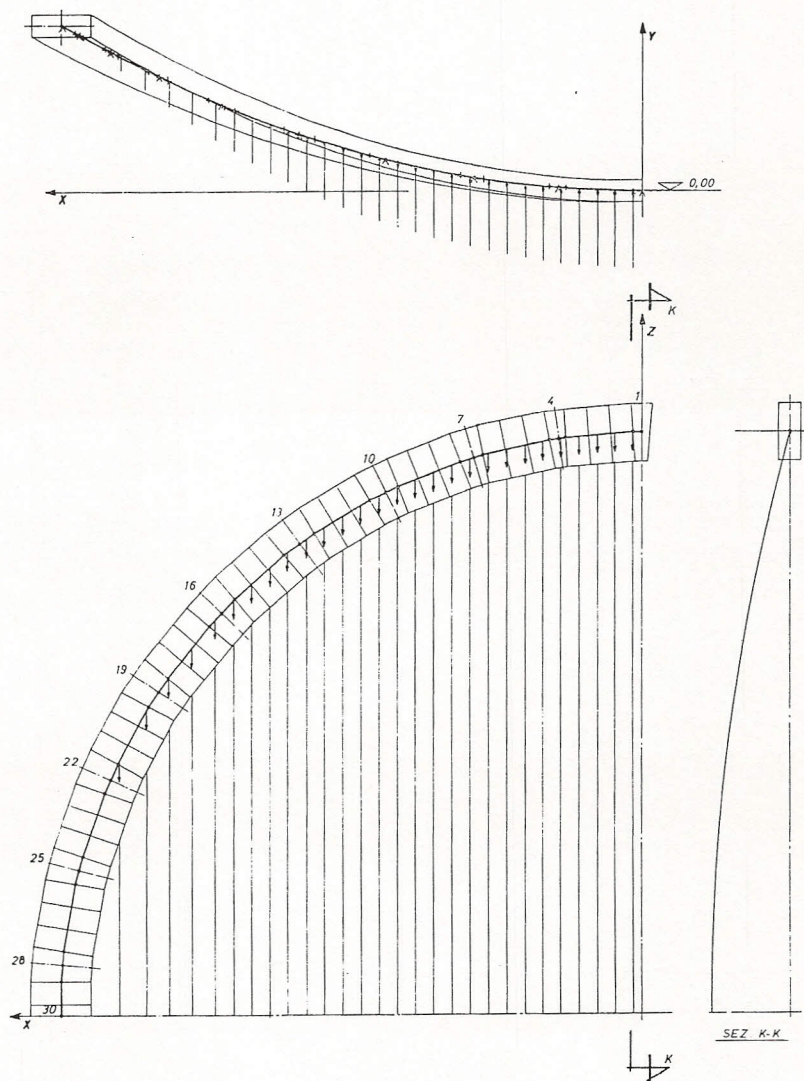


Fig. 5 - Schematizzazione della seconda fase di montaggio.

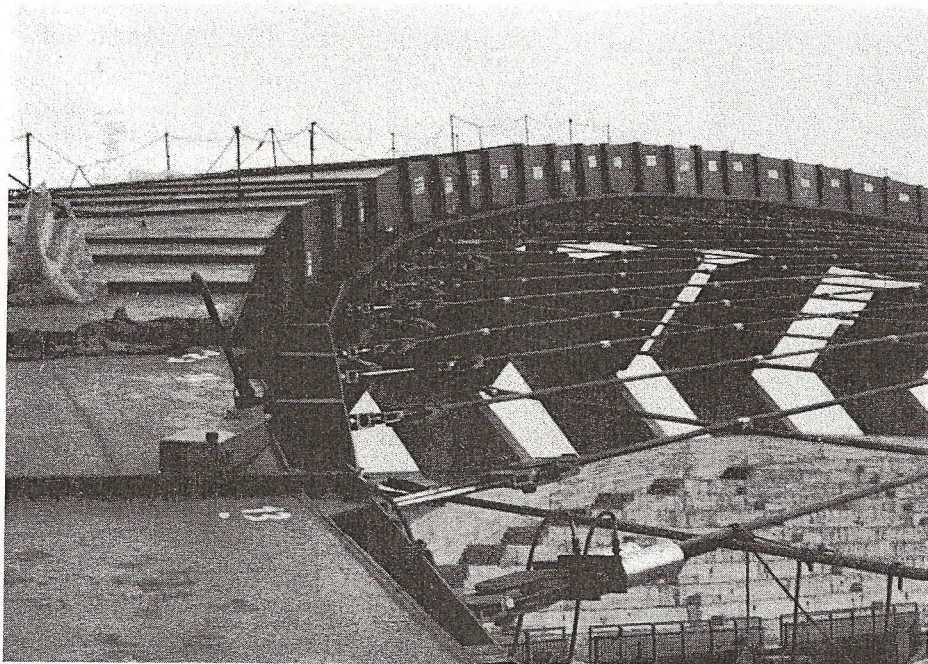


Fig. 6 - Tesatura delle funi per mezzo della coppia di martinetti in primo piano e loro fissaggio alla trave di aggancio.

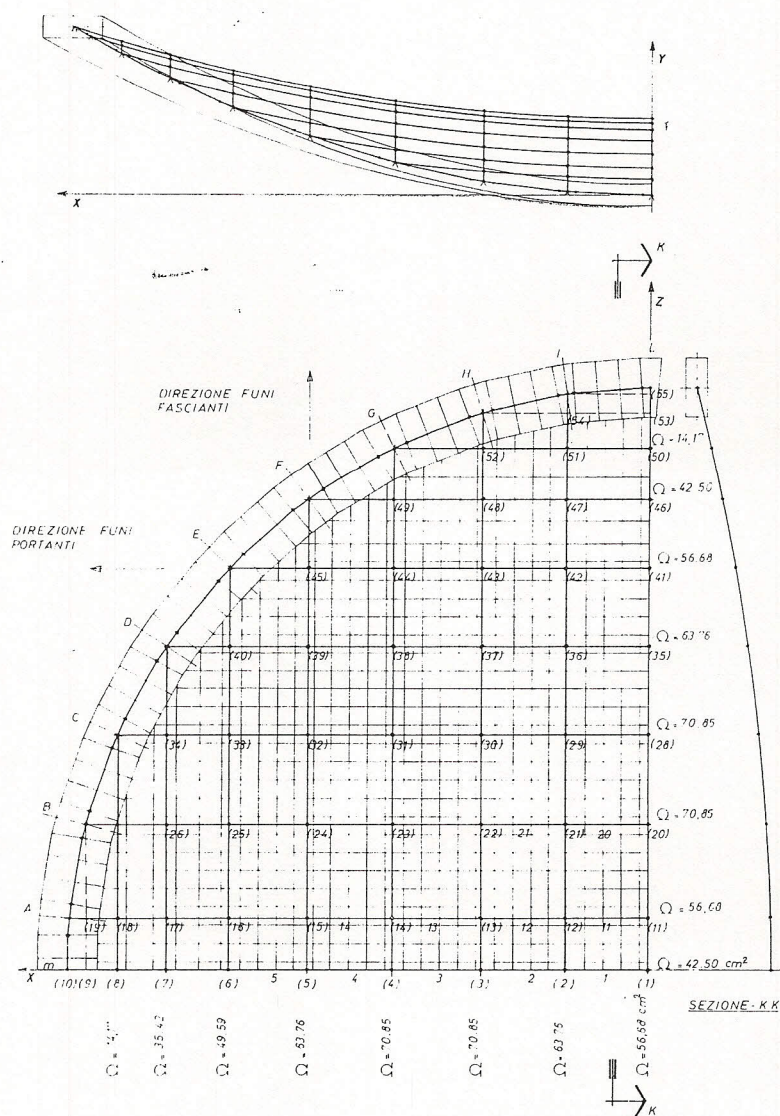


Fig. 7 - Schematizzazione della quinta fase di montaggio.

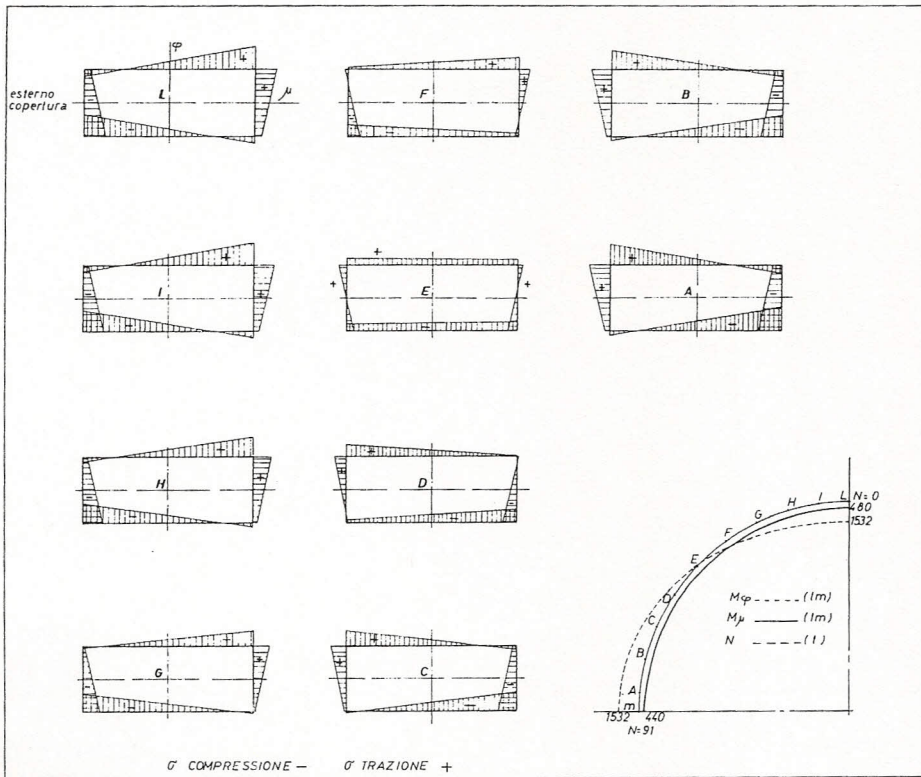


Fig. 8 - Andamento delle  $\sigma$  normali nelle varie sezioni dell'anello alla fine della fase di montaggio delle funi fascianti a freccia rovescia.

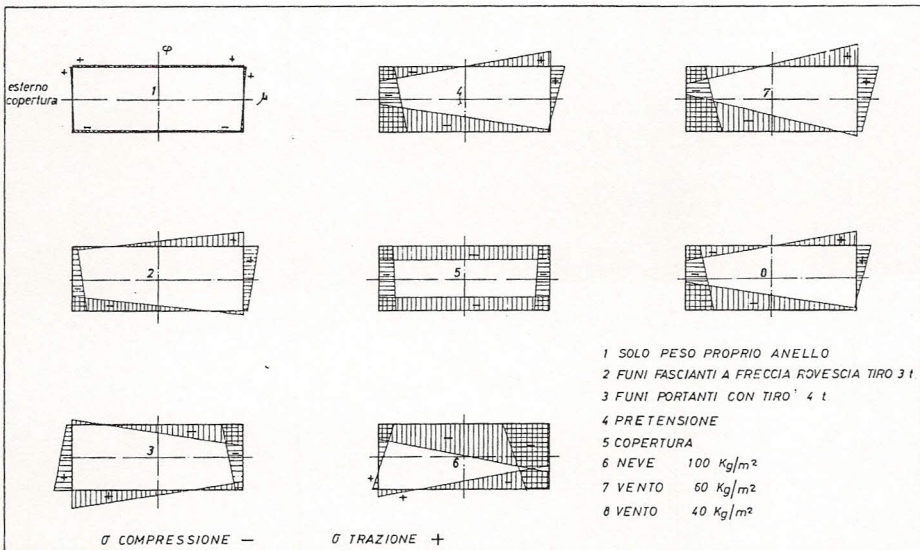


Fig. 9 - Andamento delle  $\sigma$  normali nella sezione « L » al variare delle fasi di montaggio e delle successive condizioni di carico.

plicate, riportano in corrispondenza ai diaframmi; del regime di torsione non uniforme indotto dalle brusche variazioni di direzione dell'asse dell'anello e del conseguente contrasto ingobbamento. A quest'ultimo effetto corrisponde una distribuzione di bimomenti lungo l'anello stesso, che sollecitano diaframmi e pareti del cassone. L'anello è stato quindi ve-

rificato come trave cava diaframmiata in curva ad asse poligonale.

Per quanto riguarda gli effetti dinamici collegati con il fenomeno delle raffiche di vento, si è verificato con considerazioni approssimate che la struttura in esame abbia periodi propri di oscillazione inferiori ai limiti indicati dai vari regolamenti in vigore.

### 3. - Verifiche di resistenza e di stabilità della trave di bordo

Dai valori massimi dei parametri di sollecitazione si passa alle tensioni nelle varie sezioni. Nella fig. 8 si è riportato, come esempio, l'andamento delle  $\sigma$  normali alle varie sezioni, conseguenti alle forze di montaggio, illustrate nel punto 2.2. Nella fig. 9 si è riportato l'andamento delle stesse  $\sigma$  nella sezione « L » al variare delle fasi di montaggio e delle successive condizioni di carico.

Oltre al controllo che in nessun punto della struttura le tensioni massime superino le tensioni ammissibili, si è valutato il coefficiente di sicurezza all'imbozzamento nei singoli pannelli, tenendo conto della deformabilità delle nervature longitudinali.

Le nervature trasversali, per le loro dimensioni e perchè comprese nei diaframmi reticolari della trave, possono essere considerate enormemente rigide.

Appoggiandosi alla [4] si sono quindi considerati i pannelli indicati nella fig. 10, supposti incernierati lungo i lati e sottoposti a distribuzioni uniformi di sforzi di compressione nella direzione parallela alle nervature.

Per i diaframmi reticolari si sono controllate le tensioni dovute alle sollecitazioni ricordate ai punti 2.2. e 2.5.

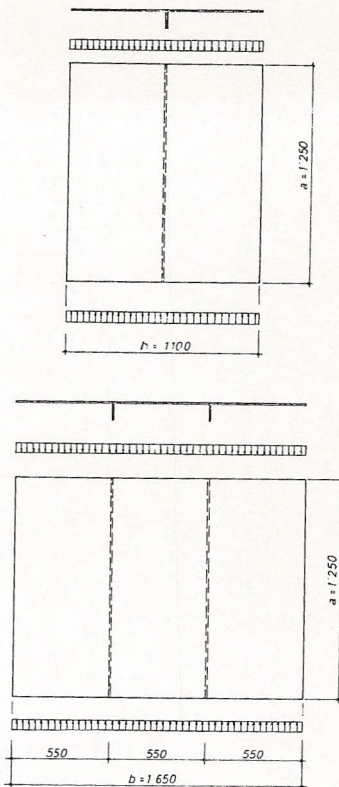


Fig. 10 - Schematizzazione pannelli compressi.

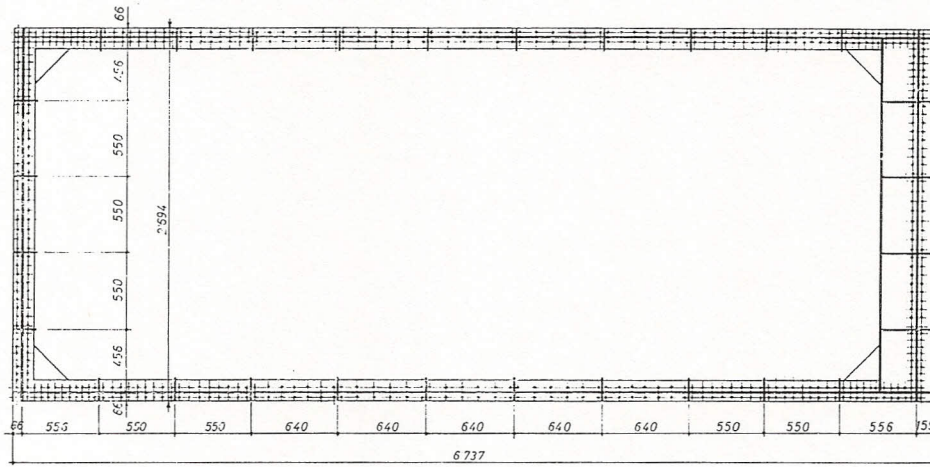


Fig. 11 - Dimensioni e foratura delle flangie di collegamento dei conci della trave di bordo.

Per la trasmissione di sforzi di trazione attraverso i giunti a flangia (cfr. fig. 11) si sono disposti bulloni in numero e sezione tali da sopportare, a rottura, sforzi non inferiori a quelli che corrisponderebbero alla condizione di plasticizzazione della parte compressa, per aumento dei carichi applicati alla tensostruttura.

#### 4. - Indicazioni intorno alla progettazione delle travi di ammassaggio delle funi e delle mensole di sostegno dell'anello

La trave di ammassaggio, delle funi che, come si è detto, riporta ai diaframmi della trave di bordo gli sforzi delle funi, è realizzata in tronchi di tre campate continue corrispondentemente ai tronchi rettilinei prefabbricati della trave di bordo [1], alternati a tronchi di una sola campata corrispondente ai pezzi speciali della trave di bordo. Alle estremità di questi tronchi sono considerate condizioni di vincoli a cerniera. Questa trave è stata realizzata con lamiera ad « $\Omega$ »

convenientemente irrigidita dai piatti di aggancio delle funi (cfr. fig. 6). Per i suoi agganci ai diaframmi della trave principale è stato scelto un tipo a flangia, con bulloni ad alta resistenza controllato mediante specifiche prove a rottura (cfr. fig. 12).

Le mensole di sostegno dell'anello sono state previste nel progetto architettonico come elementi di aggiustaggio della posizione planimetrica ed altimetrica della trave di bordo. E' risultato conveniente, almeno nella fase di realizzazione delle opere cui ci si riferisce, la loro esecuzione come strutture d'acciaio. Ciascuna di esse è stata incernierata mediante un perno del diametro di 300 mm in corrispondenza all'asse della parte terminale di uno dei montanti di cemento armato, in zone adeguatamente rinforzate. La loro conseguente possibilità di rotazione è stata bloccata da appoggi semplici contro la superficie laterale dei pilastri come è indicato in fig. 1).

Al loro dimensionamento non sono rimaste estranee considerazioni di ordine estetico.

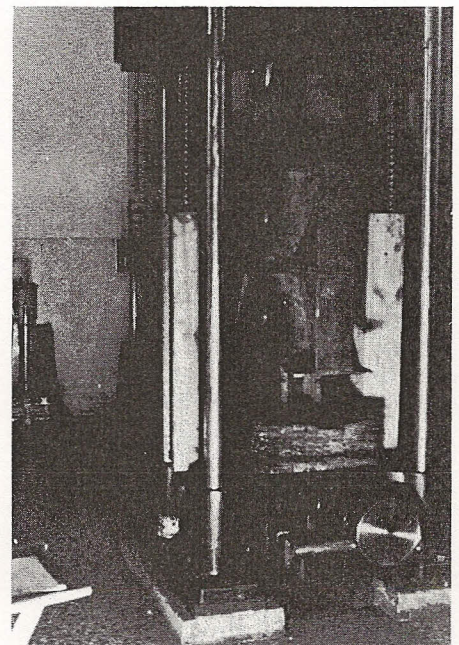


Fig. 12 - Prova a rottura attacco trave di aggancio funi alla trave principale.

#### Bibliografia

- [1] G. ROMARO: Le tecniche di costruzione e montaggio nella fase progettuale delle tensostrutture - Nota II - *Costruzioni Metalliche* n. 5/73.
- [2] A. SAMUELLI-FERRETTI - A. ZINGALI: Sull'influenza della deformabilità elastica del bordo nelle tensostrutture a doppia curvatura inversa - *Giornale dell'Ingegnere*, fasc. 9°, 10°, 11°, 12° - Anno 109°.
- [3] S. ODORIZZI - B. SCHREFLER: Contributo allo studio di reti di funi pretese entro strutture di bordo elasticamente deformabili - n. 3/74 *Costruzioni Metalliche*.
- [4] BÜRGERMEISTER - STEUP - KRETZSCHMAR: Stabilitätstheorie - Akademie Verlag, Berlin 1963.