

8.5 STADIO OLIMPICO 90: UNA COPERTURA SOSPESA

8.5.1 Criteri di progettazione

Il sistema tensostrutturale di copertura, adottato per la copertura del nuovo stadio Olimpico in Roma, è costituito essenzialmente da (fig. 8.62):

- un'orditura radiale di tensostrutture piane
- un anello interno policentrico di contrasto
- un sistema d'ancoraggio esterno anulare policentrico reticolare spaziale.

8.5.1.1 Tensostrutture piane

Le tensostrutture di tipo piano, costituite da funi portanti, funi stabilizzanti e da un sistema di collegamento di parete in fune ad andamento quasi parallelo, sono ordite in direzione radiale rispetto ai

centri C_1 e C_2 delle curve policentriche omotetiche, generatrici dello schema geometrico generale dello stadio (fig. 8.61). Dalla fig. 8.61 è possibile osservare che le tensostrutture corrispondenti agli allineamenti da 1 a 5 e simmetriche secondo x ed y sono generate con un angolo al centro costante di circa $2^\circ.3'$. Le tenso allineate con i fili 6-15 hanno

un angolo generatore relativo variabile tra $2^\circ.36'$ e $6^\circ.87'$, mentre da 15 a 20 l'angolo è costante, pari a $7^\circ.6'$ circa.

In funzione dello stato di sollecitazione e deformazione le tensostrutture piane sono state dimensionate diversamente e riunite in due gruppi.

Le caratteristiche geometriche e meccaniche principali del sistema tensostrutturale sono illustrate nel paragrafo seguente.

Tutte le funi sono di formazione spirodale chiuse e/o aperte, zincate (classe B), con resistenza elementare dei fili maggiore di 1600 N/mm^2 .

Al sistema di orditura radiale delle tensostrutture piane è associata l'orditura secondaria di supporto del manto di copertura. Le travi sono sospese al livello della fune stabilizzante, vincolate in semplice appoggio, e sono realizzate con un traliccio reticolare. Il manto di copertura appoggiato e collegato all'estradosso delle travi secondarie tubolari ad orditura parallela è costituito da una membrana in fibra di vetro spalmata con P.T.F.E. (Teflon).



Fig. 8.61 Vista aerea di una zona della copertura dello Stadio Olimpico dove si possono notare i vari elementi costitutivi del sistema costruttivo: l'anello esterno reticolare, le tensostrutture radiali, l'anello interno in funi ed i moduli di copertura in Teflon.

Fig. 8.62 Vista assometrica del modello geometrico-matematico utilizzato per l'analisi statica e dinamica del sistema strutturale di copertura.

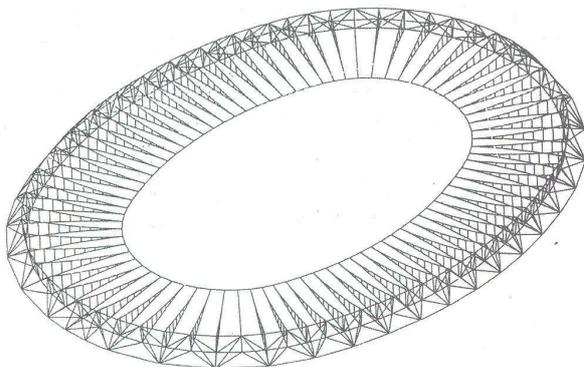


Fig. 8.64 Vista interna dello
Stadio Olimpico, Roma.



Progetto ed esecuzione

Ente Appaltante:

Comitato Olimpico Nazionale Italiano (CONI).

Progetto architettonico guida:

arch. M. Clerici, ing. M. Michetti, ing. P. Teresi, arch.
A. Vitellozzi.

Progettazione:

Sezione Architettura: arch. P. e J. Zucker E.C.S., Engineering
Consulting Services.

Sezione Strutture: ing. G. Calosi (Italprogetti s.r.l.),
prof. M. Majowiecki.

Sezioni Impianti tecnologici: Sitepe S.p.A.; Elektra S.p.A..

Direzione Lavori: ing. G. Valle.

Collaudi in corso d'opera:

Sezione Strutture: prof. L. Finzi, ing. G. Chiucini, prof. A.
Castellani.

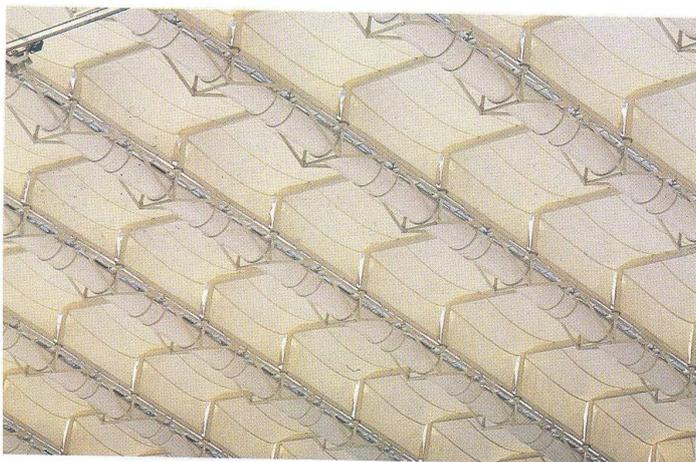
Sezione Impianti Tecnologici: prof. A. Fantini.



8.5.1.2 Anello interno circolare policentrico

L'anello interno, che ha la funzione principale di equilibrare, in un sistema locale chiuso, gli sforzi orizzontali trasmessi dalle tenso radiali, è configurato geometricamente in pianta da due archi di cerchio aventi rispettivamente 165,89 m e 52,69 m di raggio. L'anello è costituito da 12 funi Ø 87 mm a formazione spiroidale, zincate, chiuse, disposte su un piano orizzontale a quota + 29 m, distanziate tra loro in modo da disporre, in sezione, la traccia dei loro baricentri su una linea circolare di circa 1 m di diametro, allo scopo di permettere un funzionale collegamento con le tenso radiali.

Fig. 8.66 Dettaglio della copertura dall'interno



8.5.1.3 Anello esterno di ancoraggio

Le funi portanti e stabilizzanti si ancorano esternamente su un anello reticolare spaziale a configurazione circolare policentrica in pianta, di dimensioni massime esterne di 307,94 m per il diametro maggiore e 237,28 m per il diametro minore.

La sezione, triangolare, è formata da un corrente superiore in tubolare di acciaioli

Fe 510 C di 1400 mm, di diametro e spessore variabile tra 70 e 60 mm, disposto a quota + 36,49 m e da correnti inferiori a quote + 23,99 m e + 25,89 m, realizzati con tubolari di 1000 mm di diametro e di spessore variabile tra 16 e 18 mm. Le dimensioni di ingombro del triangolo, misurate agli assi, sono di 10,50 m alla base e di 12,50 m in altezza.

Spazialmente l'anello è reticolare nelle sue facce mediante aste di parete (montanti e diagonali). Diagonali e montanti sono realizzati con tubi di 609,6 - 409,8 mm di diametro e di spessore 10 e 8 mm rispettivamente.

I raggi generatori in pianta sono:

$$R_1 = 212,10 \text{ m}, R_2 = 222,60 \text{ m}, R_3 = 98,90 \text{ m}, R_4 =$$

8.5.1.4 Modello geometrico meccanico: lo Stato «0»

La modellazione geometrica è stata ottenuta, sfruttando gli assi di simmetria della struttura, per un quarto della struttura mediante il metodo classico di ricerca dello Stato «0», tipico delle tensostrutture. Le caratteristiche geometriche e meccaniche delle tensostrutture formanti un quarto d'anello sono contenute nella Tabella 1. Per le combinazioni di carico simmetriche viene considerato un modello geometrico di 1/4 di struttura (nodi e aste). Per le combinazioni non simmetriche si considera 1/2 di struttura (con simmetria secondo l'asse x e secondo l'asse y) (fig. 8.4.6).

8.5.2 Interazione strutturale - Il programma calcolo

Per quanto riguarda l'interazione elastica

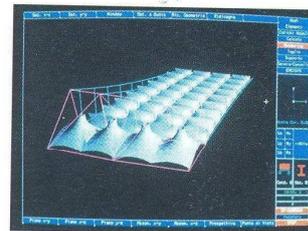


Fig. 8.67

Fig. 8.9 Elenco dimensionamento esecutivo della tensostruttura.

Pos.	Ø mm	A[cm ²]	L fune[m]	N. pezzi	p[kg/m]	P _{tot} t	Capocorda
Port./L 1÷10	64	27.50	55.20	38	23.01	48.26	F+R
Port./L 11÷20	87	52.11	55.20	40	43.50	96.05	F + R
Stab. 1÷10	47	14.77	52.80	38	12.33	24.74	F+R
Stab. 11÷20	74	37.91	52.80	40	31.77	67.10	F+R
Anello	N°12-87	625	116.50	4	522	243.21	F+F
Pendini	2 Ø 19	3.94	media 4.00	1248	4	19.97	F+F
F = Fisso/Fixed		R = Regolabile/Adjustable		P _{tot} =500 t			

ed anelastica il sistema tensostrutturale e le strutture d'ancoraggio (anello reticolare) si è adottato il metodo di risoluzione della sottostruttura.

Mediante questo metodo è possibile risolvere i due sistemi strutturali interagenti separatamente.

tiva al carico neve.

la parte fluttuante degli spostamenti mediamente probabili è data da:

$$\{G\}f_i = \pm g_{Gi} \sigma_{Gi}$$

Il valore medio dei massimi dinamici per $DT = 10$ min, sommato alla risposta statistica relativa alla pressione media, costituisce il valore di verifica per lo stato di esercizio.

Utilizzo degli spettri sperimentali

Non essendo note le espressioni analitiche degli spettri (pressioni) sperimentali di ingresso del vento, si è ritenuta lecita la seguente approssimazione: considerato il ramo discendente della curva sperimentale relativo al campo di funzionamento meccanico della struttura, si è costruita una curva approssimante detto ramo del tipo essendo x la variabile frequenza, a e b sono coefficienti numerici che definiscono, in coordinate bilogaritmiche, la retta di approssimazione. Ad esempio, considerato un angolo di ingresso del vento di 0° , lo spettro relativo al campo di frequenze 0.1-1.0 Hz viene sostituito dalla curva:

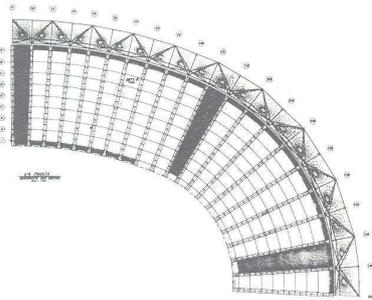
$$f_x S(n) = 330 \times 10^{-6} f^{-1.60}$$

Analoghe considerazioni valgono per la zona compresa fra 0,01 e 0,1 Hz.

Tutti gli spettri sono forniti a meno di una costante moltiplicativa che è pari a $(1/2 \rho V)^2$, che nel caso in esame vale $2,73 \times 10^3$.

Gli spettri sperimentali sono 30. Così ad esempio, considerato nuovamente il caso di ingresso del vento di 0° , si conoscono 15 spettri relativi alla parte di copertura sottostante l'asse $x-x$ ed altri 15 situati sopra detto asse, ma relativi ad un angolo di ingresso pari a

Fig. 8.68 Vista in pianta del quadrante superiore destro del sistema di copertura.



8.5.2.1 L'analisi dinamica

Ricerca delle caratteristiche dinamiche della struttura - Analisi frequenziale

Per ottenere le caratteristiche dinamiche della struttura è stata eseguita una preliminare analisi frequenziale con la tecnica SUB-SPACE ITERATION. L'equazione di frequenza senza smorzamento utilizzata è:

$$\| (K_e + K_g) - \Omega^2 M \| = 0$$

dove:

K_e = matrice di rigidità elastica

K_g = matrice di rigidità geometrica

M = matrice delle masse.

Sono stati considerati i primi 8 autovalori e modi di vibrare corrispondenti.

L'analisi frequenziale è stata eseguita per tre differenti casi corrispondenti alla presenza dello 0%, 30%, 50% della massa rela-

Fig. 8.69 Vista prospettica del sistema di copertura

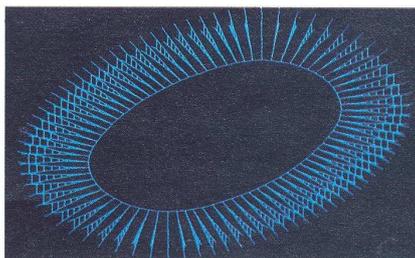
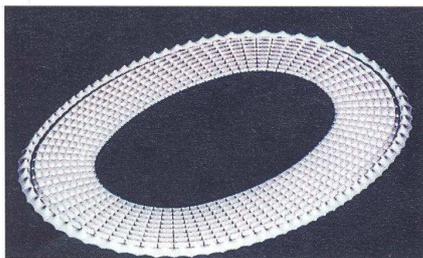
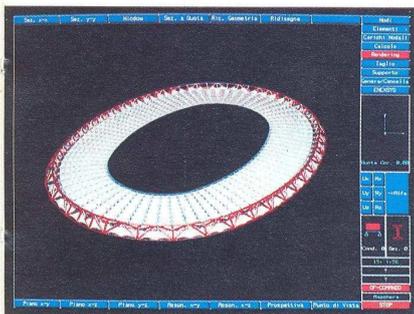


Fig. 8.70 Elementi costruttivi principali del sistema di copertura: Anello reticolare, sistema tensostrutturale, sistema di copertura in P.T.F.E. (Teflon)

180°. L'intera copertura è stata suddivisa in 78 pannelli. Per i pannelli privi di informazione è stata effettuata un'interpolazione con pannelli contigui.

Controllo sperimentale della DSP delle forze generalizzate

È noto che il modello teorico d'analisi aleatoria nel dominio della frequenza presenta diverse limitazioni riguardanti

il nostro caso è situato a 0,05 Hz; i secondi, invece, presentano un picco a 0,1 Hz.

Il grafico dello spettro di ESDU, riportato in fig. 8.71a, si presenta già moltiplicato per la funzione di correlazione $\text{coh}(P_1, P_2, f)$, che è di tipo esponenziale, essendo P_1 e P_2 nodi appartenenti ad un medesimo pannello della copertura. I coefficienti di decadimento sono stati assunti pari a

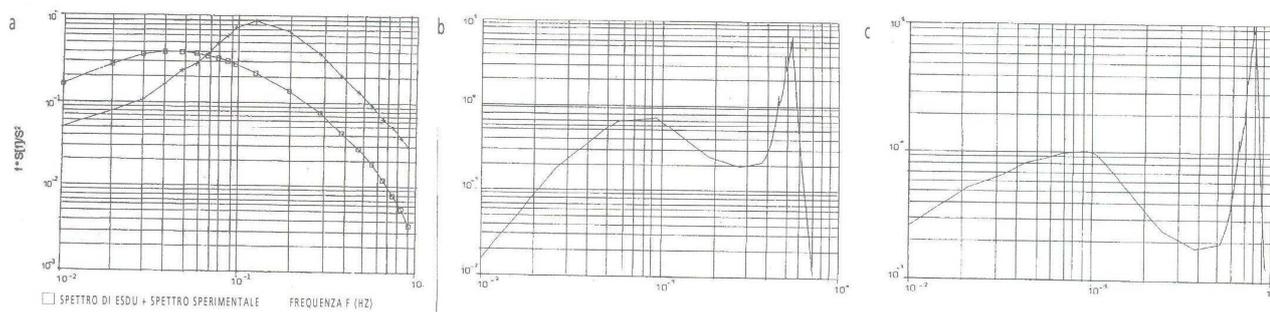


Fig. 8.71 Confronto fra spettri teorici e sperimentali del vento (a). Risposta dello spostamento verticale nel modo 1 (b). Spettro di risposta dello sforzo normale di una fune portante (c).

danti la definizione dell'azione del vento sulla struttura.

Infatti, a meno di notevoli complicazioni numeriche, è impossibile considerare l'azione $W(t)$ normale alla direzione del vento che nel caso di strutture sub-orizzontali non è trascurabile. Inoltre la funzione di coerenza ottenibile dalla letteratura tecnica appare non utilizzabile per coperture molto estese.

Per ovviare ai suddetti inconvenienti è stata richiesta un'appropriata indagine sperimentale, eseguite nella Galleria del Vento dell'Università Western Ontario.

Le funzioni sperimentali delle DSP e della coerenza sono state diagrammate per 8 settori della copertura. I dati elaborati sono stati utilizzati per l'analisi dinamica.

In fig. 8.71a è possibile comparare la DSP teorica e quella sperimentale per un pannello tipico di copertura.

Risultati dell'analisi dinamica

Dal confronto fra lo spettro di ESDU e quelli sperimentali si può dedurre che il primo ha un picco, funzione della velocità del vento, che nel

caso 2 e 16, con l'intento di indicare un maggiore smorzamento della correlazione in direzione normale alla direzione del flusso medio rispetto alla componente secondo la direzione del flusso stesso.

I risultati numerici dell'analisi dinamica e alcuni spettri ad essi relativi evidenziano che gli effetti dinamici si traducono, sulla copertura in esame, essenzialmente, in pressioni di tipo pseudostatico.

In altri termini, la quasi totalità dell'energia prodotta dal vento viene spesa lontano dalla zona di funzionamento meccanico della struttura. Ciò è confermato anche dagli spettri forniti dagli sperimentatori relativi al modello aeroelastico.

I risultati numerici forniscono per lo spostamento verticale del nodo 1

Fig. 8.10

Modo	Autovalore	Frequenza	Periodo
1	9.79224783e + 00	3.12925675e + 00	2.007884
2	1.17491108e + 01	3.42769760e + 00	1.833063
3	1.34743432e + 01	3.67074151e + 00	1.711694
4	1.41655563e + 01	3.76371575e + 00	1.669410
5	1.59285180e + 01	3.99105475e + 00	1.574317
6	1.77308570e + 01	4.21080242e + 00	1.492159
7	2.21803711e + 01	4.70960413e + 00	1.334122
8	2.41319230e + 01	4.91242537e + 00	1.279039
9	2.61072114e + 01	5.10952165e + 00	1.229701
10	2.75590618e + 01	5.24967254e + 00	1.196872

(equivalente alla locazione 5, definita dagli sperimentatori) un valore della varianza di 0,033 m che, per fattore di picco di 3,51, porta ad un valore della parte fluttuante dello spostamento pari a 0,116 m.

Gli spettri di risposta riportati, dedotti dall'analisi dinamica, si discostano da quelli sperimentali, specie nel campo 0,1-1,0 Hz. Ciò è dovuto all'aver trascurato, nella nostra indagine, l'interazione fluido-struttura e aver assunto, a favor di sicurezza, nullo lo smorzamento aerodinamico indipendentemente dalla frequenza. Di seguito sono stati diagrammati gli spettri di risposta di spostamenti e sollecitazioni in posizioni significative della struttura (figg. 8.71 b e c).

8.5.3 Le caratteristiche strutturali della copertura e la sua costruzione

Ing. Mauro Nanni (*)

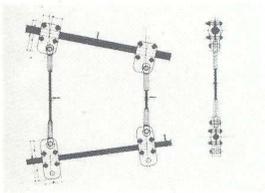


Fig. 8.72 Sistema di collegamento di parete tra funi portanti e stabilizzanti mediante pendini verticali e morsetti ad attrito. In corrispondenza della fune inferiore è predisposto il collegamento per le strutture secondarie sospese.

8.5.3.1 Caratteristiche geometriche e strutturali

- Sviluppo massimo della struttura di bordo: 870 m.
- Sezione trasversale: triangolo non regolare.
- Ingombro sezione agli assi: base 12,50 m
altezza 10,50 m.
- Dimensioni correnti tubolari: superiore \varnothing 1400 mm, spessore variabile da 60 - 70 mm
inferiore \varnothing 1000 mm, spessore variabile da 16,18 mm.
- Dimensioni aste di parete: montanti e diagonali \varnothing variabile da 409 a 609 mm
spessori variabili da 8 a 10 mm.
- Piastre di collegamento ed irrigidimento nodi: spessori variabili fino a 30 mm.
- Pilastri portanti in acciaio (n. 12): altezza 24 m
 \varnothing 2000 mm
spessore 40 mm.
- Peso totale dell'anello: circa 5 000 t. 1.3

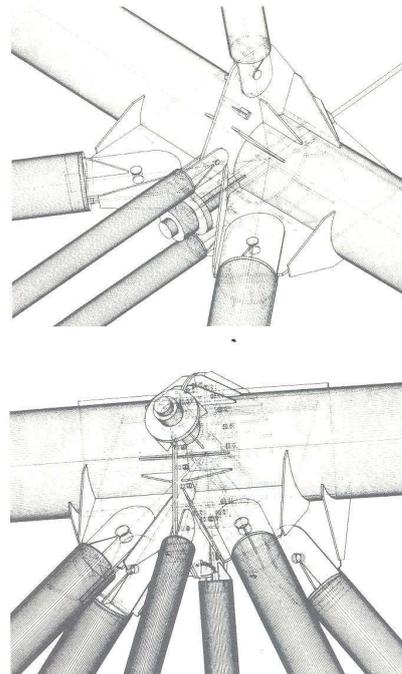
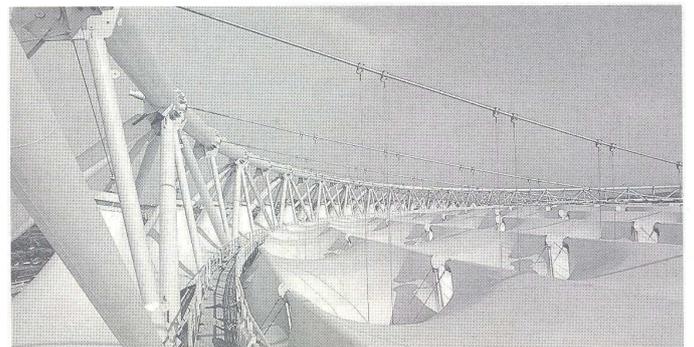


Fig. 8.73 Elaborazione grafica assistita da computer (C.A.D.) del nodo tipico in corrispondenza del corrente inferiore esterno dell'anello reticolare.

8.5.3.2 Caratteristiche dei materiali

- Acciaio FE 510 C (tubi), e FE 430 CIB
- Saldature eseguite secondo specifiche tecniche e sotto il controllo dell'Istituto Italiano della Saldatura di Genova.
- Bulloni
 - in acciaio C40 quelli speciali, per la giunzione dei correnti
 - viti UNI 5737 - 8.8
 - dadi UNI 5588 - 6.5
 - rondelle UNI 6592 - 3.6
- Trattamenti superficiali
 - Carpenteria - sabbiatura SA 2,5
 - una mano di zinco inorganico x 75 μ
 - una mano intermedia epossipoliammidica x 40 μ
 - una mano a finire poliuretanic x 50 μ
 - Bulloni - elettrozincatura.

Fig. 8.74 Vista dei moduli di copertura in P.T.F.E. in corrispondenza dell'anello reticolare.



8.5.3.3 Prove sui materiali

Tutti i materiali sono stati prodotti con riferimento alla normativa UNI, secondo procedure codificate dal Manuale di Controllo Qualità. Tutte le saldature sono state eseguite secondo specifiche tecniche che ne definiscono procedure e tolleranze, elaborate dall'Istituto Italiano della Saldatura e sottoposte a controlli radiografici e magnetoscopici direttamente dall'I.I.S. presso le officine di lavorazione, prima dei relativi assemblaggi.

8.5.4 Le tensostrutture radiali e l'anello teso interno

8.5.4.1 Generalità

La necessità di adottare un sistema strutturale di facile realizzazione, rapida costruzione e montaggio, con la maggior leggerezza formale possibile, ha portato alla realizzazione della tensostruttura di copertura dell'Olimpico. I vincoli esterni che rendono impossibile l'interazione della copertura con le strutture esistenti e quindi la necessità di realizzare un sistema strutturale «chiuso» localmente in se stesso, unito all'esigenza di una struttura con elevatissimo grado di sicurezza interno, in caso di rotture accidentali degli elementi strutturali tesi, hanno imposto l'adozione di un sistema tensostrutturale ad anello a «ruota di bicicletta» dove gli elementi tesi sono in funi d'acciaio, essenzialmente modulari, sostanzialmente sostituibili anche in esercizio, di facile controllo, regolazione e manutenzione. L'ordito è costituito da 78 tensostrutture piane, radiali, collegate ad un anello teso centrale, omotetico e con regime statico corrispondente all'anello esterno.

8.5.4.2 Caratteristiche geometriche e strutturali

- Sviluppo massimo dell'anello centrale: 530 m.
- Numero e tipo delle funi dell'anello: n. 12 Ø 87 mm.
- Tensostrutture radiali:
 - luce circa 46 m

Fig. 8.75 Lavorazione del terminale d'ancoraggio della fune

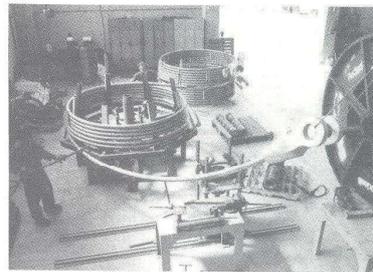
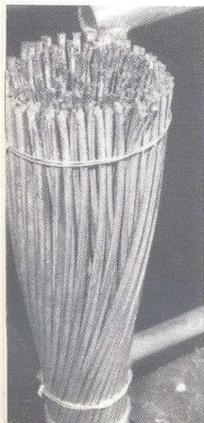


Fig. 8.76 Formazione di una fune portante con capicorda di tipo open bridge socket.

Fig. 8.77 Esecuzione di controlli sulle saldature di un nodo tipico d'ancoraggio delle funi già preassemblato.

- di tipo piano con funi portanti, stabilizzanti e pendini di parete
- dimensione funi (in relazione al diverso regime di sollecitazione tra zone a maggiore o minore curvatura):
 - portanti Ø 64 e Ø 87 mm
 - stabilizzanti Ø 47 e Ø 74 mm
 - pendini di collegamento - Ø19mm.

• Tipologia degli attacchi terminali:

- realizzati con capicorda cilindrici filettati, a testa fusa in zinco, regolabili sugli attacchi esterni, completi di dado e rondella sferica
- realizzati con capicorda tipo aperto con perno, nelle giunzioni all'anello centrale.
- Sforzo massimo sull'anello teso centrale: circa 50 000 KN .

8.5.4.3 Specifiche tecniche delle funi

Funi di tipo spiroidale zincato chiuso.

Tolleranza in peso:	± 2%
Modulo elastico dopo prestratura:	155 kN/mm ²
Tolleranza sul modulo elastico:	± 5 kN/mm ² .
Min. tensione di rottura:	dei fili a Z 1470 N/mm ² ; dei fili tondi 1570 N/mm ²
Marking:	tolleranza ± 2 mm.
Taglio funi:	tolleranza + 0.1/1000 per funi non regolabili tolleranza + 0.2/1000 per funi regolabili
Temperatura di taglio e marking:	+ 15°C
Sforzo prestratura per stabilizzazione del modulo elastico:	50% circa del carico di rottura nominale.
Cicli di prestratura:	n. 3 minimo
Norma di riferimento:	UNI 7690-77
Zincatura:	secondo ASTM 586/603 - classe A

Caratteristiche delle funi:

Diametro nominale mm	47	64	74	87
costruzione	1x129	1x199	1x241	1x283
carico rottura minimo	2125kN	3819	5242	7407
area metallica sezione	1469 mm ²	2739	3779	5172
peso	12,33 kg/m	23,01	31,77	43,50

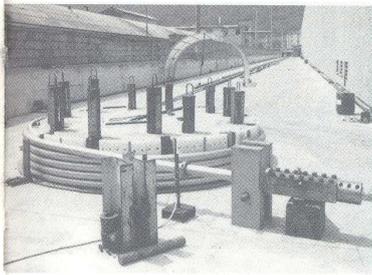


Fig. 8.78 Banco di pre-stiratura delle funi strutturali per stabilizzazione del modulo elastico.

8.5.4.3 Specifiche dei capicorda e delle teste fuse

Specifiche capicorda:

Capicorda cilindrici filettati:
 - costruiti con materiale per getti di elevata resistenza (UNI 4010 FeG70)
 - caratteristiche meccaniche non inferiori a:

- Rm = 690 N/mm²
- Rs = 440 N/mm²
- A% = 12
- KV-20°C = 27J

- zincatura elettrolitica tipo:
 F Zn 12 ||| UNI 4721-74
 con trattamento di cromatazione.

Le filettature sono state successivamente ingrassate con AGIP GRPV2- filettatura metrica eseguita mediante lavorazione meccanica: tolleranza 6 h (UNI 5341)

- trattamento termico: bonifica
 - identificazione con marchio del fabbricante

- controllo magnetoscopico sul 100% dei pezzi, rilievo caratteristiche meccaniche e KV - 20°C, esame visivo e dimensionale; esami radiografici sul 20% dei pezzi ed a campione.

8.5.4.3.1 Capicorda aperti:

- materiale come al precedente punto 1
 - caratteristiche meccaniche come al precedente punto 1
 - zincatura a caldo per immersione con peso di zinco non inferiore a 300 g/m²
 - trattamento termico: bonifica
 - identificazione: marchio del fabbricante

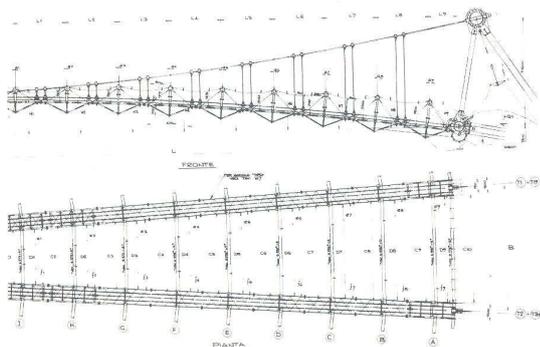
- collaudo con esame magnetoscopico prima della zincatura al 100% dei pezzi ed ultrasuoni a campione nei punti di attacco delle ali sul cono di tenuta fune.

Rilievo caratteristiche meccaniche e KV - 20°C. Esame visivo dopo zincatura e controllo dimensionale; esami radiografici a campione.



Fig. 8.80 Vista interna allo stadio

Fig. 8.79 Vista in pianta e sezione di una tensostruttura radiale tipica e del sistema ad orbita radiale e parallela delle strutture secondarie tubolari di sostegno del sistema di copertura



8.5.4.3.2 Perni per capicorda aperti:

- costruiti con laminato 39 NiCrMo3 UNI 7845 bonificato
 - caratteristiche meccaniche non inferiori a:

- Rm = 690 N/mm²
- Rs = 440 N/mm²
- A% = 14
- KV - 20°C = 27J

- zincatura come capicorda aperti
 - identificazione: marchio del fabbricante

cante
 - collaudo con esame magnetoscopico a campione prima della zincatura. Rilievo prova di trazione. Rilievo caratteristiche meccaniche e KV - 20°C. Esame visivo e controllo dimensionale.

I capicorda sono muniti di aste di regolazione che consentono la regolazione delle lunghezze, l'introduzione della presollecitazione delle strutture e l'eventuale controllo e ripresa della stessa nel tempo.

Le funi chiuse sono collegate ai capicorda mediante una fusione di zinco, eseguita in sede conica a conchiglia, previa sfiocatura, decappaggio e preparazione dell'estremità della fune, secondo quanto raccomandato dalle norme DIN 3092/79, con un riscaldamento dello zinco a 490 +/-10°C. Lo zinco per la fusione è di tipo elettrolitico, puro al 99.9%.

fissaggio, bulloni generalmente Classe 8.8 ed opportunamente dimensionati

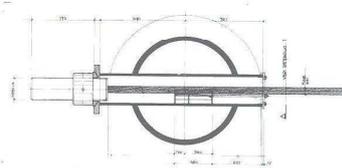


Fig. 8.82 Fig. 9. Sella di rinvio per funi.

secondo la loro destinazione.

Trattamento superficiale con zincatura a caldo secondo UNI 5744/66 (min. 300 gr/m²). Sono forniti i certificati d'origine dei materiali e le caratteristiche meccaniche ricavate da prova di trazione e resilienza su provini scelti a campione, nonché controlli sulle principali saldature con liquidi penetranti o esami magnetoscopici.

Il dato essenziale per il loro dimensionamento è la forza d'attrito che li sollecita.

Sono stati dimensionati per una solle-

Fig. 8.80 Modulo base con travi ad omega e sistemi di collegamento alla tensostruttura.

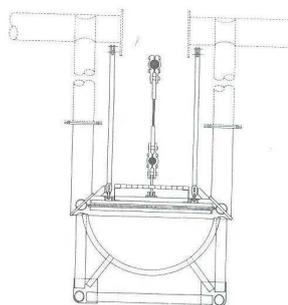
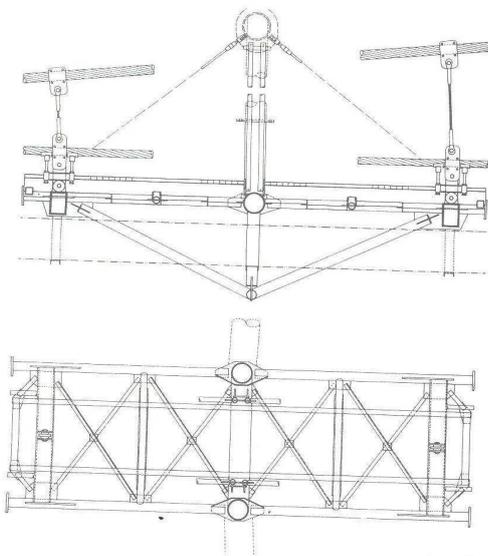


Fig. 8.81 Vista in pianta e sezione di una tensostruttura radiale tipica e del sistema ad orditura radiale e parallela delle strutture secondarie tubolari di sostegno del sistema di copertura.

8.5.5 Specifiche dei morsetti di fissaggio delle funi

Sono costruiti in acciaio tipo Fe 510 C o Fe 360 C secondo la necessità in una o più parti sagomate, tali da permettere l'alloggiamento ed il serraggio delle funi ed il collegamento delle stesse agli elementi di parete.

Sono completi di ogni accessorio di

citazione globale di 90 t/cad. Per limitare le pressioni massime che vengono esercitate sulle funi, coerentemente a quanto suggerito dalle più avanzate normative internazionali (AISI e DIN), la loro dimensione trasversale non può scendere sotto i 300 mm (per le 90 t di attrito e 360 t di sforzo max nelle funi portanti).

8.5.6 Prove di qualità e garanzia delle funi

Tutte le funi ed accessori sono stati allestiti in regime di Garanzia di Qualità e secondo uno specifico Manuale Controllo Qualità. Tutte le lavorazioni in officina sono state sottoposte a controlli da parte dell'I.I.S. di Genova, curando in particolare tutti i seguenti collaudi presso laboratori ufficiali.

Per ogni diametro di fune si è prelevato uno spezzone a caso da spezzoni o bobine da cui sono state ricavate le funi da impiegare.

Gli spezzoni sono stati predisposti con le teste identiche a quelle impiegate in opera e su di essi si è determinato:

1- Diametro della fune ad 1/10 del carico di rottura.

2- Modulo elastico apparente E della fune secondo UNI 7690/77, effettuato dopo 3 cicli di carico e scarico tra 0.1 e 0.4 del carico di rottura, con lettura nell'ultimo scarico nel tratto compreso

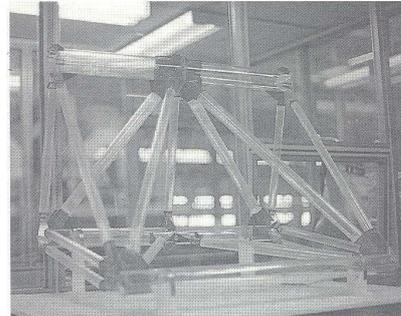


Fig. 8.84 Modello in plexiglass di controllo geometrico e della sequenza di montaggio dei componenti elementari

8.5.7 Pretensione, marcatura delle funi e loro protezione

Ogni fune è stata pretesa al fine di elevarne e stabilizzarne il modulo di elasticità apparente.

La pretensione è stata eseguita con le stesse modalità impiegate per la determinazione del modulo E sottoponendo le funi a tre cicli di carico della durata di 15 minuti ciascuno e variabili dal 10% al 50% del carico di rottura nominale minimo, ottenendo così un modulo elastico apparente

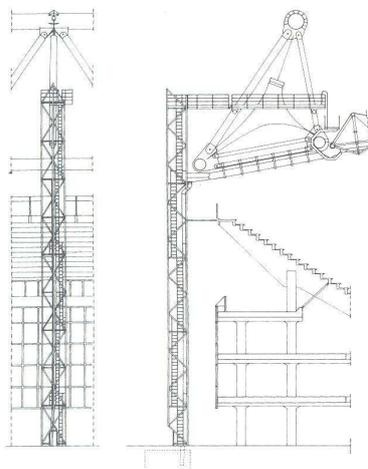
$$E = 150 \text{ kN/mm}^2 \pm 4.0/100$$

Al termine dell'ultimo ciclo del cari-

Fig. 8.85 Vista assonometrica della geometria dei moduli di membrana posizionati all'interno dell'anello esterno con illustrazione dei particolari di unione, mediante giunti in alluminio.

Fig. 8.86 Sezione trasversale dell'anello reticolare esterno e posizionamento interno relativo del modulo di copertura pseudoconico in P.T.F.E.

Fig. 8.83 Sezione in corrispondenza delle colonne tecnologiche dove è posizionato il passaggio delle linee elettriche, i tubi di evacuazione delle acque meteoriche e le passerelle d'accesso per l'ispezione e manutenzione copertura



tra lo 0.4 e lo 0.1 del carico di rottura stesso.

3 - Carico di rottura dello spezzone di fune.

4 - Collaudi sui fili delle funi.

Le norme di riferimento sono UNI 7690/77, UNI 7304/74 e conformemente a DIN 3051 Blatt 1-4/72.

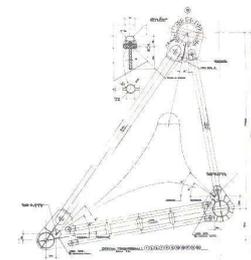
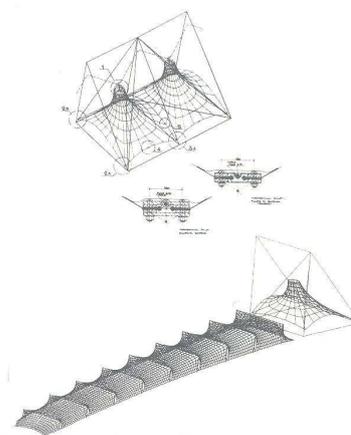


Fig. 8.87 Vista assonometrica di un modulo radiale completo e di un modulo pseudoconico.

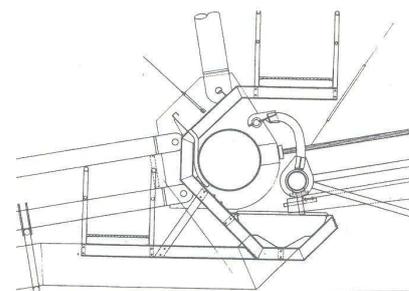


Fig. 8.88 Fig. 14. Particolare costruttivo del sistema di raccolta dell'acqua in policarbonato e passerelle di servizio ed ispezione.

co, la fune è stata sottoposta al carico di lavoro (stabilito dai calcoli), misurata e marcata sotto carico, nei punti di applicazione dei morsetti, considerando le correzioni per la temperatura e con una tolleranza sulla lunghezza dello 0.05 per mille.

Si è preceduto, infine, alla predisposizione dei terminali di ancoraggio definitivi nelle posizioni misurate.

Tutte le funi sono tamponate internamente col prodotto SACI 200A della WITCO, ed esternamente col protettivo esterno SACI 500, pigmentato con alluminio e reso più duro con l'aggiunta di resine particolari.

8.5.8 Strutture secondarie di sostegno

8.5.8.1 Generalità

In considerazione di tutti gli aspetti tecnici e pratici legati al montaggio delle strutture, nonché ad una facile manutenzione delle stesse prolungata nel tempo, si è decisa l'introduzione di una struttura secondaria in carpenteria metallica, disposta radialmente ed in posizione corrispondente alle tensostrutture piane, inferiormente alle stesse.

In tale struttura vengono così concentrate le varie funzioni tecnologiche legate alla copertura, consentendo la realizzazione di:

- Passerella pedonale di manutenzione, in griglia metallica zincata.

Passaggio delle condutture elettriche per l'impianto di illuminazione, sonoro

e TV.

- Il collegamento con la trave di fune per mezzo di un opportuno sistema di sospensione, con selle di smorzamento delle forze di sollevamento.

- Il collegamento puntuale e distribuito ed il sistema di tensionamento della membrana di copertura.

- I telai tubolari ad omega, di sostegno trasversale della membrana di copertura.

- La conversa di scarico delle acque, posta all'interno della sezione della trave secondaria e realizzata in policarbonato bianco traslucido.

8.5.8.2 Caratteristiche geometriche e strutturali

La struttura secondaria risulta costituita da 78 travi radiali suddivise in 702 moduli, in profilato tubolare e struttura reticolare, lunghi 5 m e larghi 1,50 m, collegati a spinotto alle funi stabilizzanti, in corrispondenza dei pendini di parete.

Ogni trave si compone quindi di 9 moduli base, sagomati longitudinalmente secondo il profilo geometrico della fune stabilizzante sovrastante ed incernierati con un sistema basculante alla trave di bordo.

Le travi ad omega sono anch'esse in profili tubolari metallici, di lunghezza ed altezza variabile in relazione al loro posizionamento planimetrico; sono necessarie per stabilizzare in senso trasversale le travi secondarie e fornire linee trasversali di appoggio per la membrana di copertura.

I materiali e le prove sono conformi a quanto indicato precedentemente.

8.5.9 La membrana di copertura

8.5.9.1 Generalità

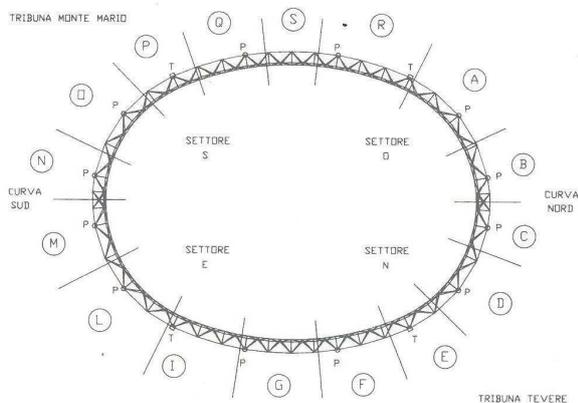
Considerando di primaria importanza l'esigenza di realizzare una struttura di copertura che minimizzi l'impatto ambientale anche dal punto di vista dello spettatore, quindi possibilmente orizzontale, ed a disposizione visiva

Fig. 8.81 Trave reticolare esterna.

Pianta schematica dei

16 concetti principali di montaggio.

T = torri in ca.



radiale, che concentri quindi l'attenzione dello spettatore stesso verso il centro del campo, è stato d'obbligo proporre una copertura in membrana sintetica, leggera, inalterabile nel tempo e con deformazioni compatibili con quelle del sistema tensostrutturale. Altrettanto importante è l'esigenza tec-

• Modulo radiale, di dimensioni medie in pianta di circa 46 x 10 m e costituito da pannelli di circa 5 x 10 m, prefabbricati e saldati in officina senza soluzione di continuità, secondo la sagoma di taglio elaborata dal calcolo, ottenendo così le tipiche superfici a curvatura gaussiana negativa delle membrane

Fig. 8.89 Particolare del morsetto ad attrito che unisce le funi portanti ed il sistema di funi radiali.

Si notano anche le unioni tra le due funi dell'anello interno e i carter di posizionamento degli estensimetri di controllo.

Fig. 8.90 Vista interna durante la fase di sollevamento del sistema tensostrutturale

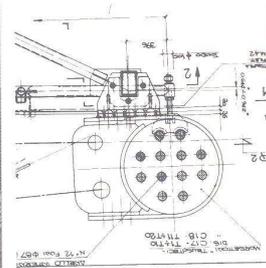
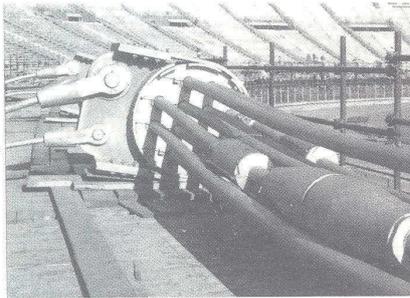


Fig. 8.92 Particolare costruttivo alla confluenza dell'anello interno formato da 12 funi \varnothing 84 mm e del sistema strutturale secondario ad orditura radiale.

nica, relativa a problemi di facilità e rapidità di montaggio e durabilità nel tempo, di non realizzare un'unica membrana di copertura, bensì suddividere la stessa in pannelli radiali funzionalmente indipendenti, che limitino eventuali rotture dovute a fenomeni localizzati all'interno del pannello stesso, permettendone facilmente la sostituzione ed evitando interazioni deformative coi pannelli adiacenti.

La scelta di una membrana di copertura in Teflon ha permesso di ottenere una copertura leggera, prefabbricata in stabilimento per singoli conci radiali, semplice da montare, traslucida e con eccezionali doti di resistenza nel tempo.

Infatti le caratteristiche intrinseche del Teflon lo rendono chimicamente inattaccabile dagli agenti atmosferici, con ridotto coefficiente d'attrito ed autopu-

lente, con durata minima valutata in 30 anni senza manutenzione.

8.5.9.2 Caratteristiche geometriche e strutturali

Il sistema di copertura è formato principalmente da due moduli.

presollecitate.

- Modulo pseudo-conico, posto all'interno dell'anello reticolare esterno, di dimensioni medie in pianta 10 x 12 m ed h 6 m, anche questi moduli sono prefabbricati in officina.

La particolare forma a camino favorisce migliori condizioni di microclima, con il miglioramento della ventilazione naturale laddove lo spettatore è più vicino alla copertura.

8.5.9.3 Specifiche tecniche del materiale

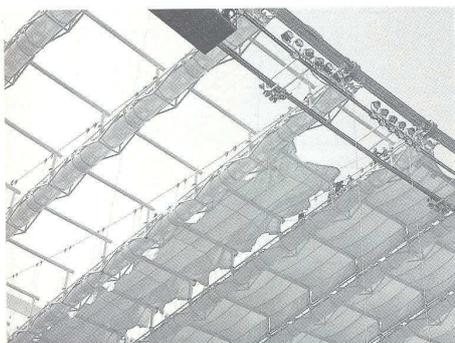
Il materiale per la membrana di copertura è costituito da una parte resistente in tessuto ad ordito ortotropo di fibra di vetro con protezione impermeabilizzante su introdosso ed estradosso di P.T.F.E. (Poli Tetra Fluoro Etilene).

Il nome commerciale del materiale è SHEERFILL IIX e le caratteristiche meccaniche dichiarate dalla ditta fornitrice, Chemical Fabrics Corporation, sono riportate nella Tabella seguente.

8.5.9.4 Prove sulla membrana

Le prove condotte presso laboratori italiani ed americani sul materiale della copertura hanno condotto a risultati compatibili e superiori a quelli richiesti dalle specifiche tecniche,

Fig. 8.91 Vista dell'interno della curva sud



confermando i risultati principali seguenti:

Tab. 8.12

	Risultati delle prove (media di 20 campioni)	Valori di specifica
Strip tensile		
Warp	7708 N/5 cm	5430 N/5 cm
Fill	7218 N/5 cm	4200 N/5 cm
Flex fold		
Warp	7393 N15 cm	4380 N/5 cm
Fill	5556 N/5 cm	3290 N/5 cm

8.5.9.5 Metodologia di costruzione e fasi operative

L'anello reticolare esterno

Tutta la struttura dell'anello esterno è stata preassemblata in officina, al fine di verificarne la rispondenza alla geometria teorica dell'insieme, alle tolleranze strutturali ed alla predisposizione del piano di trasporto e montaggio.

Tab. 8.13

SHERFILL III X			
Physical Property		Test Values	Test Method
Weight (N/m ²)		12.469 nominal	FTMS 191-5041
Thickness (mm)		762 nominal	FTMS 191-5030
Tensile Strength (N/50 mm)	Warp	7223 min. avg	FTMS 191-5102
Dry		6567 min. sgl.	
	Fill	5692 min. sgl.	
Flexfold Strength (N/50 mm)		3502 min. sgl.	
	Warp	5954 min avg.	FTMS 191-5102
		5472 min sgl.	
Trapezoidal Tear Strength (N)		4027 min. avg.	Birdair Ff-01
		3502 min. sgl.	
	Warp	333 min. avg.	FTMS 191-5136
Coating Adhesion (N/50 mm)		311 min sgl.	
	Fill	378 min avg.	
Transmission (High)		122 min avg.	Birdair Ad-01
		133 min. sgl.	
(Low)	(%)	16 ± 2	ASTM E424/P378A
Reflectance	(%)	9 ± 2	
Burnin Characteristics		69 min.	ASTM E424/P378A
ASTM E-84 Tunnel Tel			ASTM E136 - Non Combustile
Flame Spread		10 max.	
Smoke Generation		20 max	
NFPA 701 (small scall)(UL 94)			ASTM E108
Flame Out - seconds:		1 max.	Spread of Flame - Class A
After Glow - seconds:		record	Intermittent Flame - Class A
Char Length - inches:		0.25 max.	Burning Brand - Class A

A piè d'opera è stata quindi ricomposta secondo le marche di progetto, a formare conci elementari prefabbricati, di peso e dimensioni opportune. L'intera trave esterna è stata suddivisa in 16 conci principali, di dimensioni variabili in relazione al loro posizionamento planimetrico e relativa difficoltà di sollevamento.

Il concio principale, assemblato a terra attraverso rigorosi controlli dimensionali e prove non distruttive su tutte le saldature, è stato quindi sollevato con l'ausilio di due gru di eccezionale portata, la prima delle quali progettata e realizzata dalla Società Belleli, espressamente per permettere la migliore e più sicura movimentazione dei pezzi. Gli appoggi erano costituiti sia dagli appoggi definitivi (16 pilastri in acciaio e 4 in c.a.) sia da appoggi provvisori telescopici a biella. Le dimensioni dei singoli conci variavano da circa 40 m a circa 78 m di lunghezza. A sollevamento ultimato, verificando nel contempo l'aderenza

geometrica spaziale dei conci alla loro posizione teorica, nelle identiche condizioni di carico, si è quindi proceduto al controllo complessivo finale, attraverso una serie di stazioni di rilevamento, della congruenza tra i valori provenienti dal calcolo strutturale e quelli ottenuti in cantiere (spostamenti e tensioni nei principali elementi strutturali). Soltanto dopo l'esito favorevole di tale verifica, si è proceduto al collegamento mediante saldatura in opera dei singoli conci principali. Successivamente, per mezzo di martinetti idraulici posti nei sostegni provvisori telescopici, si è proceduto all'abbassamento simultaneo e controllato della struttura, fino a liberarle gli stessi sostegni e rendere la struttura autosostenuta.

mente dalle tribune, rimanendo appese alle funi portanti ormai pressoché rettilinee. Il lavoro è stato svolto da 4 squadre contemporaneamente.

FASE 5

Sollevamento tensostruttura

Il sollevamento è stato oggetto di un vero e proprio «progetto»: il comportamento dell'intera struttura (insieme anello esterno/travi di funi/anello interno) è stato schematizzato all'elaboratore allo scopo di determinare in ogni fase lo stato geometrico e tensionale, da confrontare con quello che si è poi rilevato nella realtà. Un esempio di tale studio è riportato nello schema di fig. 8.93. Erano predisposti sistemi di controllo delle deformazioni dell'anello in carpenteria, oltre a quelle della tensostruttura. Posizionamento di 8 squadre di tiro su 8 punti dell'anello in carpenteria, simmetricamente distribuiti. Organizzazione di una centrale di controllo munita di stazione radio e strumenti topografici laser posta al centro del campo. Tesatura di circa 2 m degli stralli provvisori, dagli 8 punti di cui sopra, con conseguente innalzamento dei relativi morsettoni dell'anello centrale. Spostamento delle 8 squadre sulle stazioni di tiro adiacenti, in senso orario. Tesatura di circa 2 m degli stralli provvisori, dagli 8 punti di cui sopra, con conseguente innalzamento dei relativi morsettoni dell'anello centrale (eseguita per tutti i punti di ancoraggio delle funi). Il procedimento è continuato fino al completo innalzamento dell'anello. Al termine di ogni «giro» di innalzamento completo, si è effettuata una sosta per controllare la geometria della struttura nelle varie fasi intermedie. Il lavoro è

Fig. 8.97 Montaggio simultaneo di nove moduli di struttura secondaria radiale. In corrispondenza di questa orditura sono posizionate: le canalizzazioni elettriche, la gronda, i collegamenti di parete delle tensostrutture e di fissaggio delle membrane e il grigliato per la passerella di manutenzione.

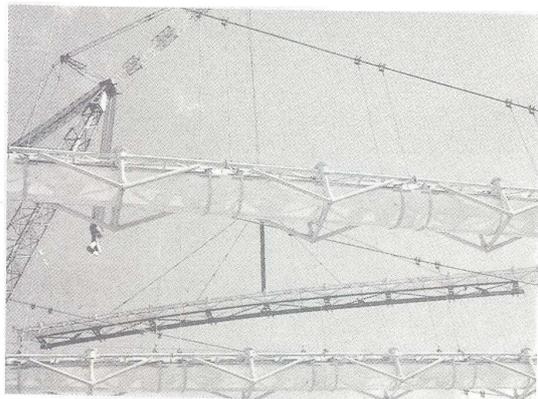


Fig. 8.98 Vista interna della copertura in corrispondenza dell'intradosso dell'anello retico/are. È possibile osservare i moduli pseudoconici interni all'anello, il sistema periferico di raccolta delle acque e la passerella di servizio interna.

stato svolto da 8 squadre contemporaneamente. Argani di sollevamento in 4°, costruiti con speciali morsetti a cuneo espressamente per tale operazione dalla Redaelli di Milano con tiro max di $40 \times 4 = 160 \text{ t max}$.

FASE 6

Ancoraggio funi all'anello in carpenteria

Il sollevamento del sistema di funi è stato effettuato mediante stralli provvisori ancorati alle funi portanti. Tale ancoraggio è stato realizzato ad una certa distanza dai capicorda, con un morsetto ad attrito, allo scopo di consentire una certa flessibilità e variazione di direzione di questi rispetto alla linea di tiro. Ciò ha consentito, quasi al termine del sollevamento, di infilare agevolmente il tubo contenente sella e capocorda negli ancoraggi in carpenteria. I capicorda delle funi stabilizzanti, realizzati di lunghezza opportuna, sono stati imboccati negli appositi ancoraggi tramite argani e funi di servizio. Il lavoro è stato svolto da 8 squadre contemporaneamente.

FASE 7

Tesatura della tensostruttura

La fase di tesatura è stata programmata e «progettata» con, la medesima metodologia impiegata per il sollevamento. Sono state cioè calcolate tutte le situazioni geometriche e tensionali intermedie dell'insieme strutturale anello in carpenteria/travi di funi/anello in funi, e quindi controllate durante i lavori. Posizionamento di 8 squadre di tiro su 8 punti dell'anello in carpenteria, simmetricamente distribuiti (funi portanti e stabilizzanti). Organizzazione di una centrale di controllo munita di stazione radio e stru-

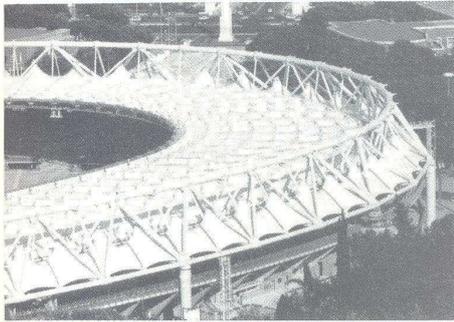


Fig. 8.99 Vista parziale della copertura

menti topografici posti al centro del campo. Messa in tensione progressiva, alternativamente agendo sulle funi portanti e sulle stabilizzanti e spostando le squadre sulle postazioni adiacenti in senso orario. Si sono

effettuati circa 3 giri completi dell'anello. I martinetti superiori erano del tipo forato da 300 t (usati singolarmente), quelli inferiori a stelo da 250 t (usati in coppia).

FASE 8

Controllo geometrico e tensionale

Il controllo è consistito nel rilievo geometrico della struttura e nella misurazione finale delle tensioni presenti agli ancoraggi delle funi, raffrontato ai valori provenienti dal calcolo strutturale.

8.5.9.6 La membrana di copertura

Si è proceduto, con l'ausilio della gru con sbraccio di 50 m e opportuno bilancino strallato, a sollevare le travi

secondarie completamente preassemblate a terra, provvedendo in alto soltanto all'aggancio dei perni di collegamento coi pendini delle funi. Successivamente, ad avvenuto montaggio di 1/8 delle strutture secondarie e relative travi ad omega, si è provveduto in contemporanea al montaggio dei singoli moduli di 46X10 m della membrana di copertura, posti «impacchettati» opportunamente in adiacenza dell'anello esterno quindi trascinati con arganelli su funi radiali, nella esatta posizione pianoaltimetrica finale. La successiva presollecitazione mediante funi e tenditori di bordo, ha conferito alla membrana la corretta forma e stabilità statica e dinamica.

8.5.9.7 Tempi di realizzazione

- Montaggio dell'anello reticolare esterno agosto-dicembre 1989
- Montaggio della tensostruttura settembre 1989-gennaio 1990
- Sollevamento e tesatura della tensostruttura 15/1/1 990-20/2/1 990
- Montaggio membrana di copertura marzo-aprile 1990

Fig. 8.100 Nodo tipico d'ancoraggio delle funi portanti in corrispondenza del corrente superiore dell'anello reticolare.

