

acciaio

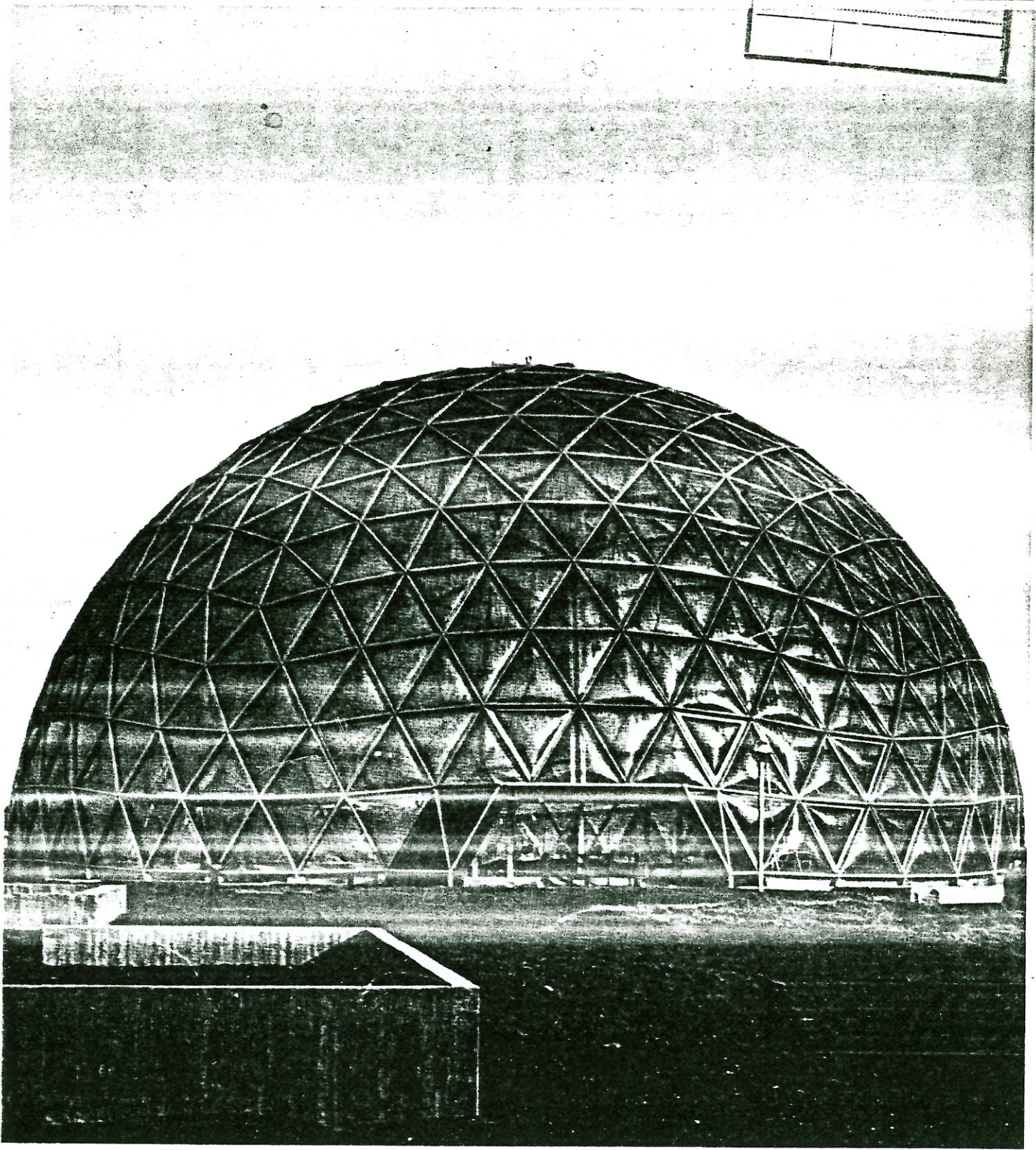
edizione italiana di

GIUSTIFICATIVO
DI PUBBLICITÀ

acier·stahl·steel

4/1976

23 GIU 1976



Chiesa di Rutigliano (Bari)

Ing. Massimo Majowiecki,
Bologna

Descrizione

Come si può notare dal progetto generale (fig. 1), già nella sua prima impostazione architettonico-strutturale la copertura viene concepita come una superficie a doppia curvatura negativa.

La superficie geometrica di base scelta per formare la copertura è quella di un paraboloide iperbolico delimitato da due piani inclinati asimmetrici rispetto all'asse di simmetria del paraboloide.

La porzione di superficie, così delimitata viene affiancata ad un'altra uguale disposta simmetricamente e distan-

ziata in sommità di 5 m. In questo modo si ottiene un volume con forma di tiara di 13,60 m di altezza e di 23,50 x 25,20 m in pianta.

Tutta la superficie di copertura si appoggia ad un calice realizzato in c.a. opportunamente sagomato e dimensionato per assorbire gli sforzi trasmessi dalle strutture di copertura.

La geometria strutturale

Per ottenere la forma architettonica desiderata, la struttura più idonea sia tecnicamente sia economicamente si è dimostrata la tensostruttura spaziale a rete di funi, la cui disposizione

di equilibrio nello spazio allo stato «0» (stato di sola pretensione) è poco dissimile da quella dell'iperboloide di base.

La prima scelta da fare è stata quella della disposizione delle funi. Nella figura 2 è possibile osservare un tentativo di definizione della rete di funi disposte secondo linee geodetiche della superficie di equilibrio (ottenuta mediante l'aiuto di plotterizzazione dei risultati di calcolo su C.D.C. 6 600).

La disposizione secondo linee geodetiche è in certi casi una soluzione molto economica giacché comporta la minima lunghezza tra gli ancoraggi della fune che risulta inoltre sollecitata da uno sforzo costante nella sua lunghezza; ne segue un dimensionamento ottimale ed in più esclude la presenza dei morsetti di serraggio nei nodi giacché tra fune e fune non vengono trasmessi sforzi tangenziali.

D'altro canto tutte queste caratteristiche sono valide solo per una situazione di carico prefissata; se questa viene a variare per l'azione di agenti esterni (vento, neve, ecc.) anche la disposizione delle geodetiche si modifica; questo fatto comporta il bloccaggio di tutti i nodi della rete.

Nel nostro caso le condizioni di carico inevitabilmente dissimetriche ci hanno sconsigliato l'adozione della disposizione secondo le geodetiche; si è ritenuto più opportuno adottare una rete con maglie a lati di egual lunghezza nello stato di riposo. In questa maniera viene facilitata l'opera in officina di marcatura delle funi.

La lunghezza delle aste tra nodo e nodo della struttura è stata fissata in 1,50 m nella condizione di assenza di ogni sforzo.

Lo stato «0»

Per la ricerca dello stato «0» in fase di sola pretensione il problema si pone in questi termini: assegnate le lunghezze delle aste interne scariche e gli sforzi degli ancoraggi delle funi (aste collegate con le strutture di bordo), determinare le coordinate dei nodi interni e gli sforzi nelle aste interne in modo da ottenere la superficie equilibrata più vicina a

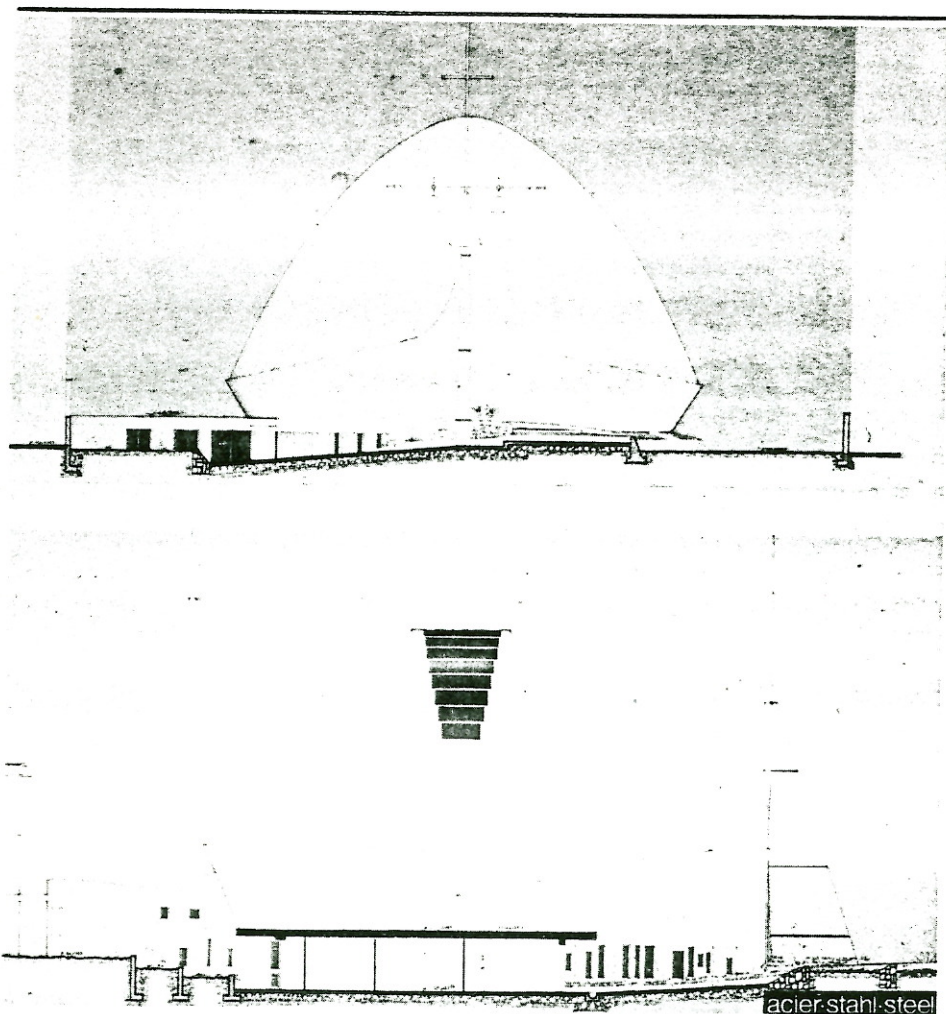


Fig. 1. Progetto architettonico della nuova chiesa. Vista frontale e laterale.

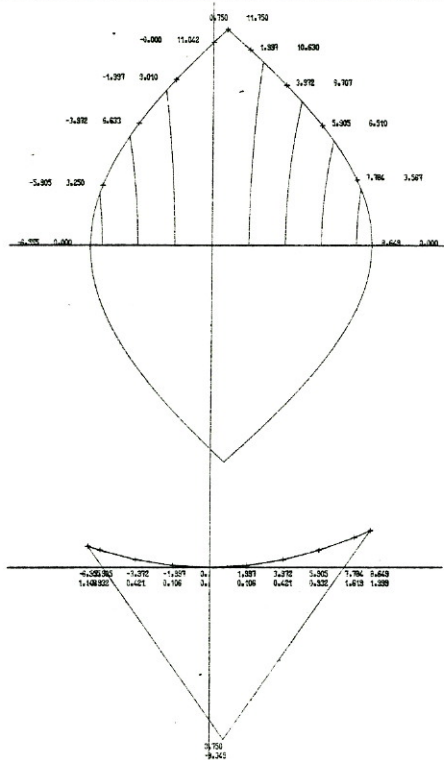


Fig. 2. Disposizione delle funi secondo le linee geodetiche della superficie di equilibrio ottenute mediante plotterizzazione dei risultati del calcolo all'elaboratore elettronico. Pianta e sezione. Questa disposizione non è stata ritenuta valida.

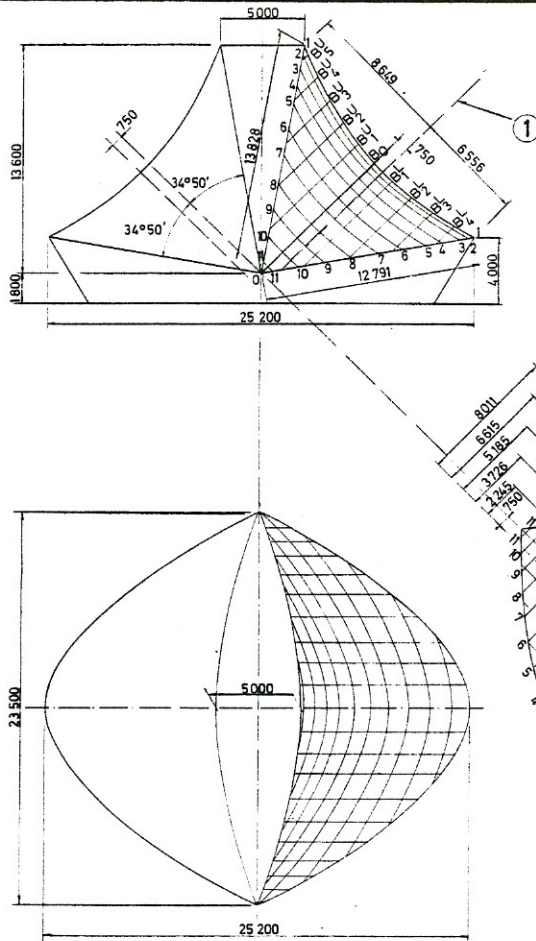


Fig. 5. Disposizione delle funi al montaggio. Prospetto laterale, vista dal disopra e vista secondo l'asse del paraboloide. (1) Questo asse è scalato di 750 mm rispetto al piano mediano dei due piani inclinati che delimitano il paraboloide (il piano dell'arco e quello della faccia superiore del basamento in c.a.).

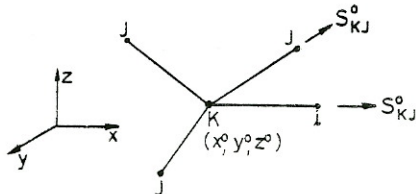


Fig. 3. Situazione di equilibrio del nodo interno « k » in fase « 0 ».

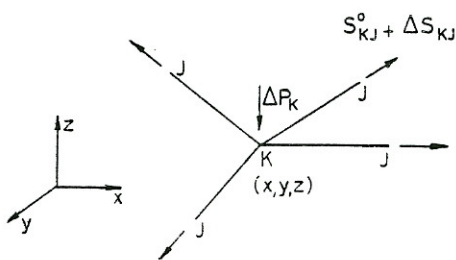


Fig. 4. Situazione di equilibrio del nodo interno « k » sotto carico.

quella scelta. Abbiamo perciò il seguente problema di ottimizzazione:

$$\left. \begin{array}{l} \text{- variabili: } [x, y, z, S]; \\ \text{- funzione obiettivo:} \\ f = \Sigma [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2] \rightarrow \min; \\ \text{- vincoli: } g(x, y, z, S) = 0; \\ S > 0. \end{array} \right\} \quad (1)$$

Le variabili in gioco sono perciò le

coordinate spaziali degli n nodi interni della rete $(x^0, y^0, z^0)_k$ e gli sforzi S^0_{kj} in fase di sola pretensione nelle m aste kj .

La funzione obiettivo esprime il concetto di ridurre al minimo le differenze geometriche tra la superficie scelta in fase di progetto architettonico (porzione di paraboloide iperbolico) e la superficie strutturale compatibile con i vincoli forniti dalle equazioni di equilibrio ($\Sigma S^0_{kj} = 0$) e dalle assegnate lunghezze delle aste ($L^0_{kj} = \text{cost.}$).

La funzione obiettivo e i vincoli non lineari ci obbligano ad innescare una sequenza di minimizzazione.

Dalla sequenza di minimizzazione si ottengono come risultati i valori delle coordinate dei nodi nello spazio. In questo caso specifico si è notato che il calcolo condotto in questa maniera comporta delle differenze trascurabili rispetto al paraboloide iperbolico di partenza.

Queste differenze sono trascurabili rispetto agli errori di marcatura e montaggio delle funi.

La disposizione finale delle funi è illustrata nella figura 5.

Azione dei carichi

Per quanto riguarda l'azione dei carichi è stato considerato:

- peso proprio, 27 kg/m²;
- vento pressione, 80 kg/m² con $c = 0,8$;
- vento estremo, 112 kg/m²;
- vento depressione, 80 kg/m² con $c = -0,5$;
- variazione termica = $\pm 10^\circ\text{C}$.

Lo stato di sollecitazione è stato trovato con il metodo dell'equilibrio risolvendo le 3 n equazioni di equilibrio in funzione dei movimenti dei nodi sotto carico. Le equazioni risolvibili il problema hanno la forma generale seguente:

$$\sum_{i=1}^m \left\{ \left(\frac{\Delta X_{kj,i}}{L_{kj}} - \frac{\Delta^0 X_{kj,i}}{L^0_{kj}} \right) S^0_{kj} + \frac{\Delta X_{kj,i}}{L_{kj}} E_{kj} \cdot A_{kj} \left[\frac{L_{kj}}{L^0_{kj}} - (1 + \alpha \Delta T_{kj}) \right] \right\} = -(P^0_{k,i} + \Delta P_{k,i}) \quad (2)$$

$i = x, y, z.$

A			B			C		
(a)	α	S	(a)	α	S	(a)	α	S
B ₅ ^U	22,35	0,362	1	69,80	6,806	1	26,19	3,778
B ₄ ^U	36,81	1,098	2	69,27	6,639	2	26,73	3,765
B ₃ ^U	44,84	1,268	3	68,27	6,347	3	27,73	3,740
B ₂ ^U	50,36	1,412	4	66,75	5,954	4	29,25	3,705
B ₁ ^U	54,18	1,548	5	64,51	5,459	5	31,49	3,659
B ₀	57,72	1,672	6	62,36	5,065	6	33,64	3,621
B ₁ ^L	54,25	1,531	7	59,97	4,696	7	36,03	3,586
B ₂ ^L	49,68	1,387	8	57,16	4,334	8	38,83	3,553
B ₃ ^L	43,17	1,226	9	54,54	4,051	9	41,46	3,531
B ₄ ^L	32,68	1,047	10	51,81	3,801	10	44,18	3,509
			11	49,22	3,598	11	46,78	3,509

Tabella 1. Angoli (α) e sforzi (S) sugli attacchi delle funi. (A) Funi stabilizzanti. (B) e (C) Funi portanti. (a) Designazione delle funi.

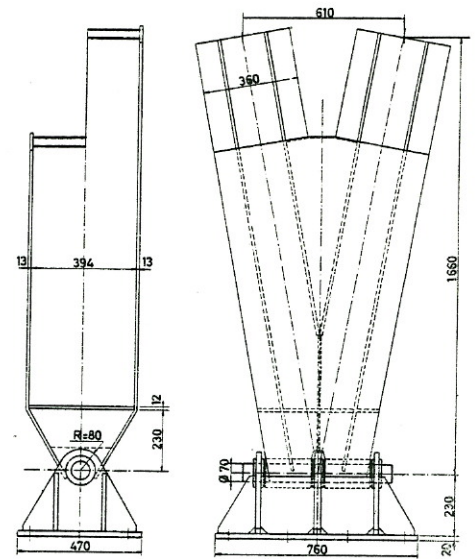


Fig. 7. Particolare A della figura 6. Basamento comune dei due archi metallici, con articolazione a cerniera. Vista frontale e laterale.

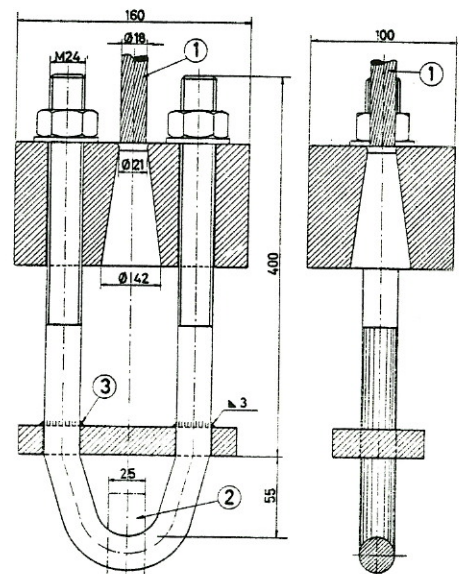


Fig. 8. Attacco di una estremità della fune sull'arco metallico o sul basamento in c.a. (1) Funi Ø 18 mm. (2) Piastra d'ancoraggio. (3) Saldatura in cantiere.

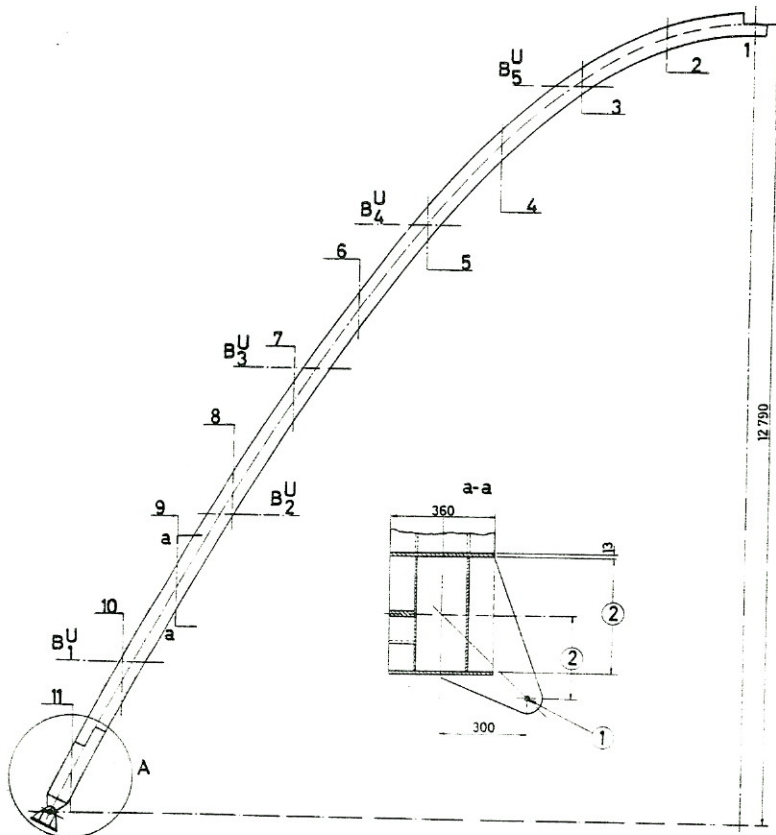


Fig. 6. Uno degli archi metallici. Vista in elevazione con indicazioni dei punti d'ancoraggio delle funi portanti e stabilizzanti. Sezione trasversale. (1) Foro per il passaggio dell'occhio di estremità della fune. (2) Dimensione variabile.

dove:

$\frac{\Delta X_{kj, i}}{L_{kj}}$ = coseni direttori dell'asta kj rispetto alla direzione i dopo l'azione dei carichi.

$\frac{\Delta^0 X_{kj, i}}{L_{kj}^0}$ = coseni direttori dell'asta kj in fase « 0 ».

S_{kj}^0 = sforzo nell'asta kj in fase « 0 ».

E_{kj} = modulo elastico dell'asta kj .

A_{kj} = area dell'asta kj .

ΔT_{kj} = differenza di temperatura sull'asta kj .

$\Delta P_{kj, i}$ = carico sul nodo k in direzione i .

L'espressione (2) ci fornisce la rela-

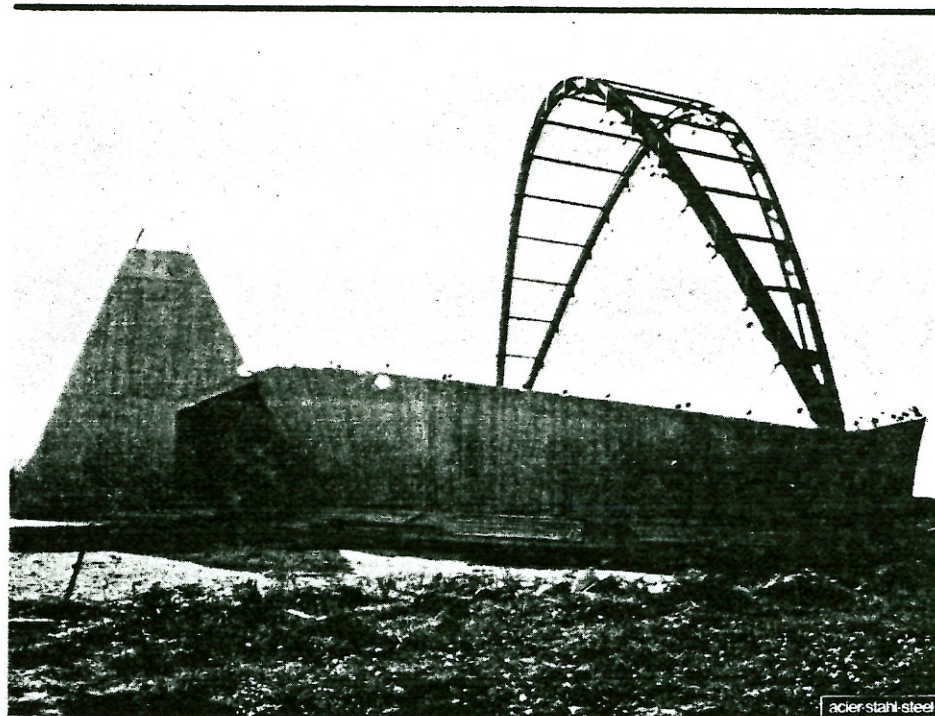


Fig. 9. Vista presa dopo il completamento del montaggio degli archi e delle funi.

Montaggio

Dopo l'approntamento di tutte le strutture in c.a. è stato iniziato il montaggio dell'arco in due pezzi saldandolo in opera nella sezione di chiave.

Le funi portanti vengono ora fissate agli ancoraggi e dopo si provvede a montare quelle stabilizzanti senza però serrare i morsetti di collegamento. A questo punto si inizia la tesatura con l'aiuto di chiavi dinamometriche (dato i modesti sforzi di pretensione) che agiscono sui terminali delle funi. Raggiunti gli sforzi voluti, si sono stretti i morsetti in corrispondenza delle marcature realizzate in officina. L'operazione di montaggio e tesatura delle funi è durata due giorni, con una squadra di quattro uomini.

Nella figura 9 si può osservare la tensostruttura dopo l'avvenuto montaggio.

zione d'equilibrio in fase di carico nel nodo generico k .

Le (2) forniscono un sistema di $3n$ equazioni non lineari nelle nuove coordinate incognite $(x, y, z)_k$ o meglio negli spostamenti u, v, w rispettivamente.

Dopo aver risolto iterativamente il sistema di $3n$ equazioni non lineari si ottengono gli spostamenti dei nodi u, v, w e da questi gli sforzi ΔS_{ki} nelle aste.

Nella tabella 1 sono riportati i risultati degli sforzi massimi agli ancoraggi delle varie funi.

Materiali. Dimensionamento e montaggio

Considerando le dimensioni modeste della costruzione è stato più economico utilizzare lo stesso tipo di funi per l'ordito portante e per l'ordito stabilizzante.

Le funi adottate, del diametro di 18 mm, a 37 fili spirodali zincate (200 g/m^2) sono state prestate in officina al carico di 70 kN in modo da stabilizzare il modulo elastico.

Il carico di rottura della fune è di 211 kN.

Il coefficiente di sicurezza statico delle funi è risultato piuttosto alto (circa

3,5); ad ogni modo si è ritenuto di non scendere sotto il $\phi 18$ per considerazioni di stabilità dinamica in modo da diminuire al massimo le vibrazioni nocive per il materiale di copertura.

L'arco metallico che sorregge la tensostruttura ha una luce di 23,5 m e altezza di 12,80 m ed è incernierato alle imposte (fig. 6).

La forma geometrica dell'arco corrisponde alla curva intersezione tra il paraboloide iperbolico e il piano di frontiera scelto in fase di progettazione architettonica.

La sezione dell'arco è a cassone ottenuto mediante saldatura di 4 piatti in acciaio tipo 1 di 13 e 8 mm di spessore. La sezione ha dimensioni costanti di $420 \times 360 \text{ mm}$. Tra le due sezioni portanti l'arco sono interposti dei collegamenti in UPN 100 che trasmettono i tiri delle funi e sorreggono il materiale traslucido di copertura.

Nei punti di ancoraggio delle funi sull'arco metallico opportuni piatti accolgono le teste di ancoraggio delle funi del tipo rappresentato nella figura 8. Lo stesso tipo di terminale è stato adottato per le funi che si ancorano sulle strutture in c.a., dove previamente sono state annegate delle opportune piastre metalliche.

Progetto ed esecuzione

Committente: Curia Arcivescovile, Bari.

Progetto: Arch. Onofrio Mangini, Bari.
Progetto tensostruttura: Ing. Massimo Majowiecki, Bologna.

Impresa costruzione metallica: Casaccio & Luppi, S. Polo di Torrile (Parma).

Funi per tensostruttura: Jawerth-Tensoteci, Sesto S. Giovanni (Milano).
Direzione lavori: Ing. Angelo Baldassarre, Bari.

Impresa lavori murari: Giovanni Campanale, Bari.