

---

## **sintesi di tesi di laurea**

---

**Università degli Studi di Firenze - Facoltà di Ingegneria**

**Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile - Orientamento Strutture**

**“PROGETTO DI COPERTURA METALLICA PER UN NUOVO PALAZZETTO DELLO SPORT  
A TERRANUOVA BRACCIOLINI (AR)**

*Autore:* Alessandro BONACCINI

*Relatori:* Prof. Paolo SPINELLI - Prof. Ing. Ostilio SPADACCINI - Prof. Ing. Maurizio ORLANDO

*Data di laurea:* 15 aprile 2009

*"La tesi dell'Ing. Bonaccini riguarda un tema vecchio e nuovo dell'Ingegneria strutturale, ovvero quello delle coperture di grande luci. Per meglio dire riguarda il quesito del miglior progetto o della migliore scelta progettuale di tali coperture. Il progetto come ottimizzazione della soluzione strutturale e ottimizzazione come la scelta della soluzione migliore, tenendo conto di tutti gli aspetti della scelta. Quindi non solo l'economia del materiale ma la resa estetica della forma e ancora altri aspetti quali la facilità di costruzione e montaggio. La tesi affronta il tema complesso in maniera precisa e completa, arrivando ai dettagli esecutivi e alle indicazioni costruttive. Quello che tutti i progettisti, per tutti i progetti, dovrebbero fare"*

**Prof. Ing. Paolo SPINELLI**

La Tesi di Laurea ha avuto come obiettivo la progettazione della struttura di copertura del nuovo Palazzetto dello Sport di Terranuova Bracciolini. Il progetto originario prevedeva l'impiego di grandi travi in legno lamellare disposte su tre appoggi a semplice orditura. Il progetto proposto nella tesi prevede invece l'uso di un materiale diverso, l'acciaio, e si basa sullo studio della soluzione statica e tecnologica più vantaggiosa, valutata secondo un'analisi costi-benefici, in rapporto al progetto architettonico originale. Il lavoro consta fondamentalmente di tre parti. Nella prima parte si confrontano, attraverso lo studio ed il dimensionamento di diverse soluzioni, i pesi strutturali complessivi. Nelle due parti successive vengono illustrati due progetti distinti, sviluppati sulla base dei confronti effettuati nella prima parte. La scelta di pervenire alla realizzazione di due diverse soluzioni, che chiameremo soluzione "A" e soluzione "B", è dovuta al presupposto di soddisfare due diverse richieste da parte della committenza.

La progettazione si basa sul metodo semiprobabilistico agli Stati Limite.

Si è fatto riferimento in particolare alle "Norme Tecniche per le Costruzioni" del 14 Gennaio 2008 ed alla relativa circolare esplicativa. La suddetta norma tuttavia, non è risultata sempre esauriente, pertanto sono state frequentemente consultate le normative europee EC3 "Progettazione delle strutture in acciaio".

## LE COPERTURE DI GRANDE LUCE

Il problema della realizzazione di strutture per la copertura degli spazi è da sempre motivo d'interesse per ingegneri e architetti, costantemente alla ricerca di nuove soluzioni. Ovviamente, la ricerca di nuove forme e sistemi costruttivi va di pari passo con la sperimentazione di più moderni e prestanti materiali.

Infatti, fino alla metà del XVIII secolo, i principali materiali da costruzione erano la pietra, il legno ed il mattone. I metalli erano ancora prodotti in modesta quantità e per impieghi in genere non edilizi, mentre il calcestruzzo, dopo l'uso abbondante ed efficace fattone dai Romani, fu quasi completamente dimenticato. I materiali lapidei sono molto resistenti a compressione ma fragili a trazione, pertanto potevano essere impiegati per realizzare strutture di copertura bidimensionali, come cupole e volte. I risultati ottenuti in tali impieghi sono stati eccezionali, sia da un punto di vista estetico che tecnologico, tuttavia, le cupole con luce maggiore che siano mai state realizzate con questa tecnica, la basilica di S. Pietro a Roma (1588-93) e quella di S. Maria del Fiore a Firenze (1420-34), non superano entrambe un diametro di base di circa 42 m. Le coperture in legno si sono basate fin dall'epoca greco-romana sulla tecnica della capriata, ma le dimensioni degli elementi lignei costituivano certamente un vincolo per la realizzazione di strutture più grandi. Con l'industrializzazione, la richiesta di strutture a grandi luci sicure e versatili aumentò notevolmente.

L'avvento dei materiali ferrosi, ferro, ghisa e acciaio, contribuì in maniera fondamentale all'evoluzione dei sistemi strutturali utilizzati per le coperture. Questi materiali di resistenza maggiore, assieme allo sviluppo di nuove tecniche di calcolo per la descrizione dei comportamenti delle strutture e alla più vasta conoscenza delle resistenze dei materiali, portarono rapidamente allo sviluppo di nuove forme strutturali volte a coprire luci sempre maggiori.

Sempre agli inizi del XX secolo venne introdotto, per la realizzazione di edifici, il calcestruzzo armato. L'ing. P.L. Nervi dette esempio di un utilizzo flessibile, originale e audace del calcestruzzo armato per risolvere il problema delle coperture di grande luce. Egli rappresenta probabilmente il maggior creatore di spazi coperti dell'età moderna, con un sapiente utilizzo di grigliati curvi in calcestruzzo armato. L'utilizzo di superfici a guscio in calcestruzzo armato caratterizza inoltre l'opera di numerosi architetti della seconda parte del XX secolo.

Ma è l'acciaio, in abbinamento a materiali leggeri e moderni quali il vetro e l'alluminio, che ha permesso, con la sua versatilità, modularità e leggerezza, di realizzare le grandi coperture più audaci e suggestive degli ultimi anni.

## SCELTE PROGETTUALI

L'acciaio rappresenta un materiale certamente adatto per la realizzazione di strutture in grado di coprire grandi luci e permette di adottare tante diverse soluzioni statiche. La copertura di un grande spazio può essere realizzata con sistemi classificabili per funzionamento statico in quattro grandi categorie:

- coperture rigide a flessione;
- coperture rigide a compressione;
- coperture strallate;
- coperture sospese.

Nel caso specifico si è svolto uno studio approfondito nel campo delle soluzioni "rigide a flessione", a loro volta catalogabili in:

- sistemi di travi a semplice orditura;
- sistemi di travi a doppia orditura;
- sistemi a piastra (piana o curva).

Gli elementi strutturali utilizzabili, nel caso dell'acciaio, sono [Fig. 1]:

- travi in parete piena;
- travi alveolari;
- travi reticolari piane;
- travi reticolari spaziali;
- strutture reticolari spaziali (SRS).

Le strutture reticolari spaziali sono sistemi composti da una serie di aste disposte secondo uno specifico reticolo mono o pluristrato e si prestano alla realizzazione di sistemi a piastra.

Al fine di pervenire ad una soluzione statica ottimale per la copertura del palazzetto, si è proceduto con l'analisi di numerose soluzioni, diverse

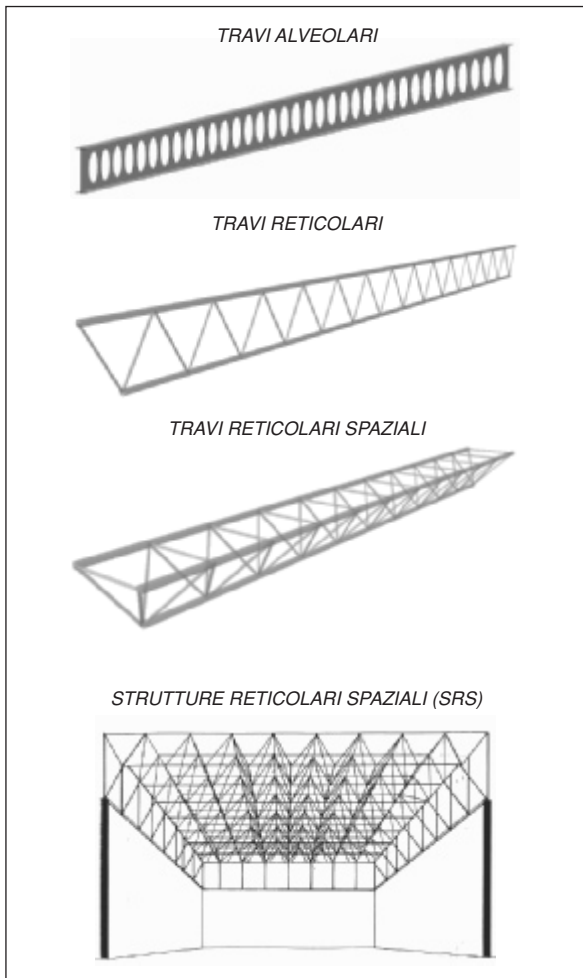


Fig. 1 - Esempi di elementi strutturali per coperture di grande luce

sia in termini di schema statico sia di tipologia di elemento costituente. La copertura è stata pensata per offrire riparo a tutti gli spazi interni previsti dal progetto architettonico, costituendo in sostanza un involucro esterno per il campo di gioco ma anche per le strutture in calcestruzzo armato che contengono gli spazi di servizio per atleti e pubblico.

Sono state fissate le dimensioni nette in pianta: 42,4 m x 39,8 m. Occorre però osservare che la dimensione minore può ulteriormente essere divisa, ad una distanza di 7,6 m dal fronte principale, da un'eventuale fila di colonne. Questa fila non pregiudicherebbe il progetto architettonico del complesso in quanto ogni colonna potrebbe essere integrata all'interno di muri divisorii o di parapetti, senza ostruire la visuale degli spettatori. Nell'altra direzione, la presenza del campo di gioco non permette l'inserimento di alcun tipo di sostegno intermedio. L'altezza libera da garantire sul campo di gioco è pari a 8 m.

Ai fini del dimensionamento si è considerata una copertura di tipo leggero, costituita da un pacchetto di chiusura comprensivo di lamiere e coibente. Il peso può variare in funzione delle luci che devono essere coperte dai singoli pannelli ma, data la loro leggerezza, può essere stimato, senza errori rilevanti in 0,15 kN/m<sup>2</sup>. Gli altri carichi considerati sono quello da neve e da vento in

conformità con le norme vigenti (Norme Tecniche del Gennaio 2008).

Date le caratteristiche geometriche dell'edificio (pianta circa quadrata) e le luci libere non grandissime (circa 40 m) gli schemi statici di base che sono stati considerati sono pertanto i seguenti [Fig. 2]:

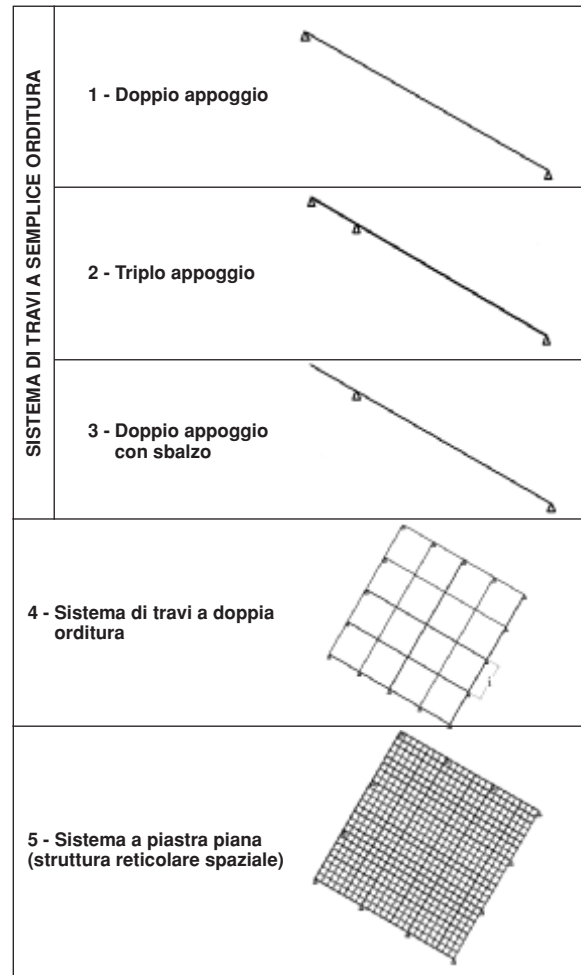


Fig. 2 - Schemi statici studiati

- semplice orditura\_doppio appoggio;
- semplice orditura\_triplo appoggio;
- semplice orditura\_2 app. + sbalzo;
- doppia orditura di travi;
- sistema a piastra piana (per SRS).

Ad ogni schema statico sono state associate diverse tipologie di elemento strutturale e diversi interassi tra le travi o tra gli appoggi (nel caso di strutture reticolari spaziali).

I risultati dell'analisi di ciascuna soluzione in termini di pesi ed altezze strutturali sono riportati nei grafici delle Fig. [3], [4].

Dal confronto delle diverse soluzioni emerge che le travi alveolari garantiscono altezze strutturali contenute ed una gradevolezza estetica legata alla loro caratteristica forma. Il loro impiego non altera l'aspetto architettonico del complesso rispetto al progetto originario ma, per garantire pesi strutturali paragonabili a quelli di altre soluzioni, è necessario utilizzare lo schema statico di travi su tre appoggi.

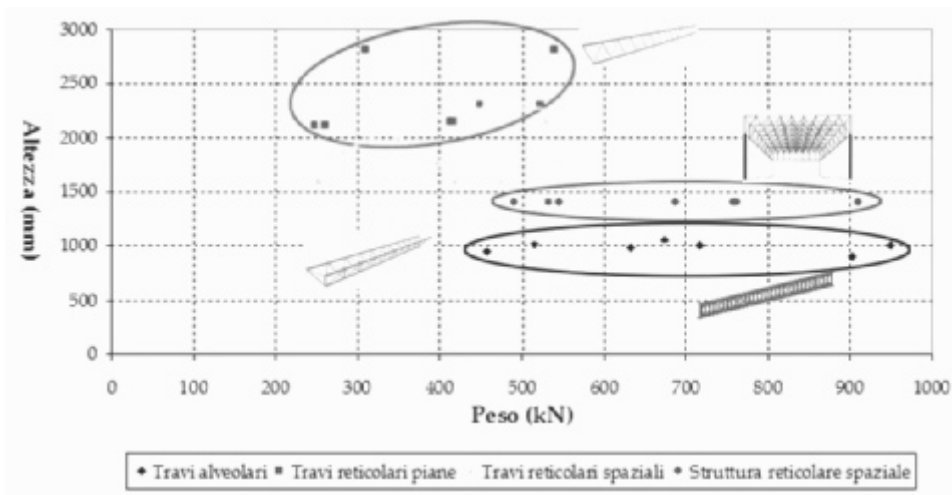


Fig. 3 - Confronto tra classi di elementi strutturali

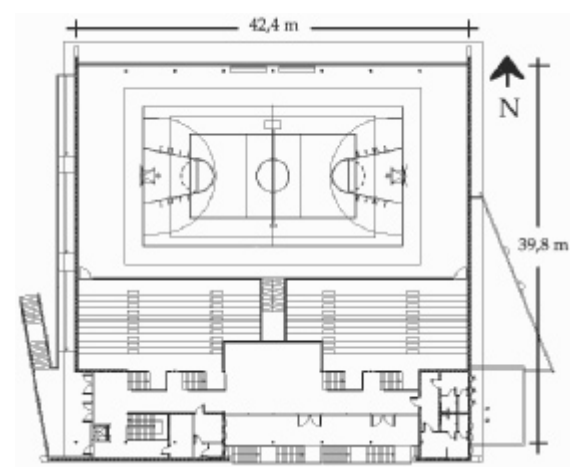


Fig. 5 - Pianta Palazzetto Soluzione "A"

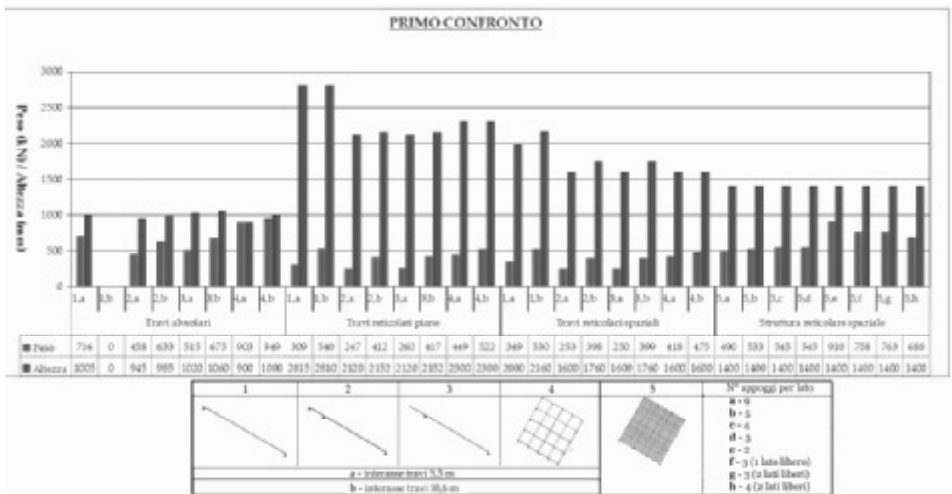


Fig. 4 - Confronto tra le diverse soluzioni dimensionate in termini di peso/altezza

L'impiego di travi reticolari spaziali permette invece di mantenere pesi competitivi anche eliminando gli appoggi intermedi; inoltre tali travi possono fortemente caratterizzare l'aspetto architettonico dell'impianto.

Fatte queste osservazioni oggettive dei dati raccolti occorre definire quali siano i precisi requisiti che condurranno alla scelta della tipologia strutturale e quindi al progetto della copertura. Si possono riassumere i requisiti nei seguenti punti:

1. minore ingombro in pianta;
2. minore peso complessivo;
3. minore altezza strutturale;
4. minore complessità realizzativa;
5. aspetto estetico.

Quindi i requisiti che devono indirizzare la scelta progettuale sono molteplici e tutti importanti. La scelta della scala d'importanza di questi diversi aspetti può indirizzare la progettazione su percorsi anche molto differenti l'uno dall'altro. Del resto la definizione di tale scala d'importanza non può che nascere dal concerto tra progettista e committente.

Nel lavoro di tesi sono state ipotizzate due diverse richieste (indicate con A e B nel seguito) da parte della committente che possono indirizzare il lavoro progettuale:

**A**

- limitazione dei costi;
- minimizzazione delle strutture all'esterno, per non violare l'architettura originaria del progetto;
- gradevolezza estetica (soprattutto interna);
- nessuna particolare richiesta sulla posizione degli elementi verticali di sostegno, se non la garanzia di visibilità per il pubblico.

**B**

- forte caratterizzazione dell'impianto anche con strutture verso l'esterno ed esaltazione dell'immagine dell'impianto sul territorio;
- nessun elemento verticale di sostegno interno all'edificio;
- gradevolezza estetica;
- contenimento dei costi.

In corrispondenza dei due insiemi di richieste sono state sviluppate due diverse soluzioni progettuali, indicate con "A" e "B".

**PROGETTO SOLUZIONE "A"**

Lo schema statico della soluzione "A" è molto semplice: si utilizzano nove travi alveolari di grande luce poste ciascuna su tre appoggi e ordinate secondo un'unica direzione. La copertura ha dimensioni pressoché simili nelle due direzioni, ma la prima luce (7,60 m) risulta molto ridotta rispetto alla seconda (32,20 m). In questo modo i due vincoli ravvicinati funzionano in maniera analoga ad un incastro e la luce libera, che complessivamente è di 39,8 m, si riduce a circa 32,2 m [Fig. 6].

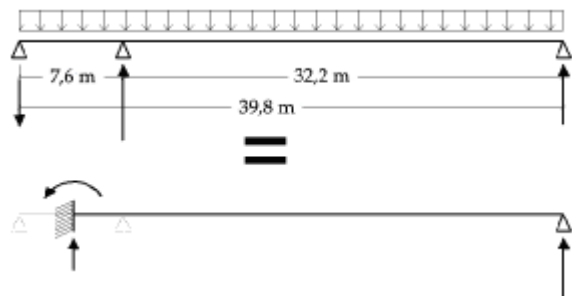


Fig. 6 - Schema trave su tre appoggi

L'utilizzo della fila intermedia di pilastri rappresenta un forte vantaggio in termini di sollecitazioni agenti sulle travi di copertura e risulta quasi indispensabile per poter fare ricorso a questo tipo di soluzione.

Le due file di colonne più esterne, costituite da tubolari in acciaio, risultano leggermente arretrate rispetto alle facciate vetrate di chiusura, mentre quella intermedia, in soluzione mista acciaio-calcestruzzo, è posta esattamente in corrispondenza della sommità della tribuna. Tutte si collegano alle travi con giunti a perno che riproducono esattamente il vincolo di cerniera assunto nello schema statico.

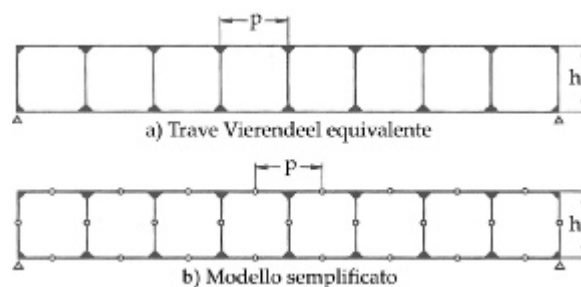


Fig. 8 - Schema per studio di travi alveolari

Per avere una migliore stima della deformazione della trave si può quindi applicare il cosiddetto *metodo dell'anima equivalente*. Tale metodo permette di utilizzare le stesse formule per le travi a parete piena, purché si definisca appunto un'anima equivalente di sezione  $A_w$ , determinata in modo che, sotto un'azione di taglio  $T$ , un pannello della trave Vierendeel di lunghezza  $a$  abbia una deformazione trasversale pari a quella di una trave a parete piena equivalente.

Le verifiche di resistenza e stabilità per questo tipo di travi si riconducono ai seguenti controlli:

1. collasso degli elementi a T superiore ed inferiore in corrispondenza di un'apertura [Fig. 9];
2. collasso di un montante d'anima;
3. collasso della trave per instabilità flessione-torsionale;
4. collasso locale dovuto a forze trasversali.

La prima di queste verifiche deve essere condotta sia in corrispondenza della mezziera delle aperture, sia sulla cosiddetta sezione trasversale critica. Tale sezione è inclinata di un angolo  $\theta$  da valutare in maniera iterativa ed è sollecitata contemporaneamente a  $T$ ,  $N$  e  $M$ .

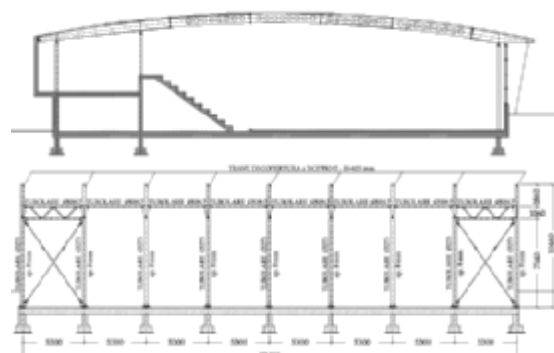


Fig. 7 - Sezione longitudinale e trasversale

Le azioni orizzontali, principalmente il vento, sono direttamente assorbite dalle colonne incastrate a terra; tuttavia per limitare le deformazioni dovute al vento in direzione trasversale sono stati inseriti due controventi di parete, nella fila centrale ed in quella più lontana. Sono stati scelti controventi concentrici a X disposti ai lati del complesso.

Le azioni sismiche sono state valutate come indicato dalla normativa ma, nel caso in esame, non risultano condizionare le scelte progettuali. Si è assunto, come spettro di progetto lo spettro elastico: in tal modo non si confida in capacità dissipative della struttura, in quanto si garantisce che essa rimanga in campo elastico anche in presenza di azioni sismiche.

Le travi alveolari si comportano in maniera del tutto simile a travi Vierendeel [Fig. 8], per cui la deformabilità a taglio assume un aspetto rilevante nella deformazione complessiva.

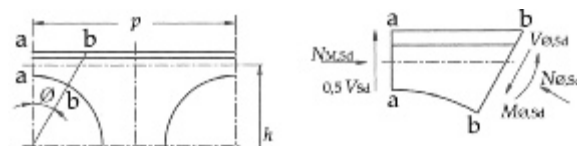


Fig. 9 - Sezioni critiche dei correnti

Come anticipato sopra, i collegamenti tra le travi di copertura e le colonne sono realizzati con cerniere a perno. Tale collegamento non può essere considerato in grado di trasferire azioni di taglio in direzione trasversale, pertanto si è deciso di adottare travi reticolari sufficientemente rigide, ottenute con tubolari saldati. I correnti delle travature reticolari sono collegati alle travi di copertura e alle colonne. L'elevata rigidità di queste travi garantisce un effettivo trasferimento delle azioni dalla copertura alla sottostruttura, senza produrre sugli elementi a perno sollecitazioni di taglio o deformazioni che ne comprometterebbero la funzionalità. Nelle file di colonne in cui sono presenti controventi di parete, i traversi reticolari risultano necessari solo in corrispondenza dei controventi stessi.



Le colonne devono essere fornite di adeguate piastre di base in acciaio per distribuire le forze di compressione su un'area di contatto sufficiente perchè la pressione di contatto non superi la resistenza di progetto  $f_j$  del giunto (malta e calcestruzzo). Inoltre, devono essere previsti tirafondi progettati per resistere alla trazione dovuta alle forze di sollevamento e/o ai momenti flettenti, oltre che al taglio.

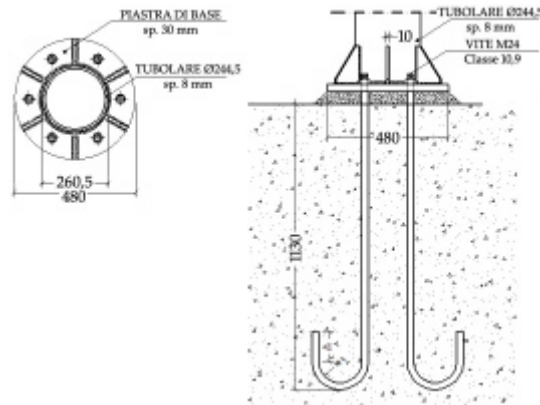


Fig. 10 - Piastra di base della colonna

## PROGETTO SOLUZIONE "B"

A differenza della soluzione "A", la soluzione "B" prevede una struttura completamente a vista verso l'esterno ed una forte caratterizzazione dell'edificio attraverso l'evidenziazione delle strutture metalliche della copertura.

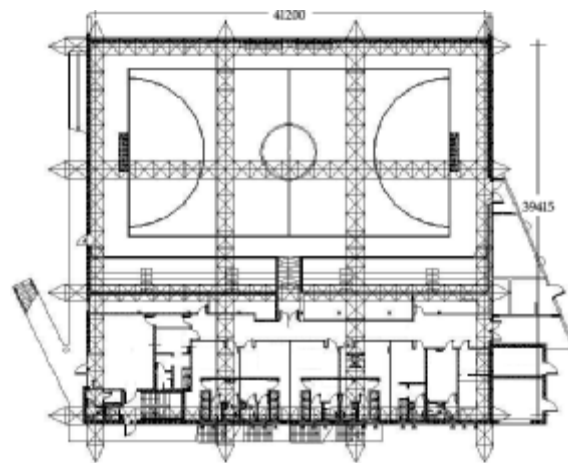


Fig. 11 - Pianta Palazzetto Soluzione "B"

Lo schema statico utilizzato in questo caso è rappresentato da quattro portali a due cerniere disposti in ciascuna delle due direzioni principali dell'edificio; i portali sono costituiti da travature reticolari spaziali, ottenute con profili tubolari saldati, e sostengono la copertura dall'esterno.

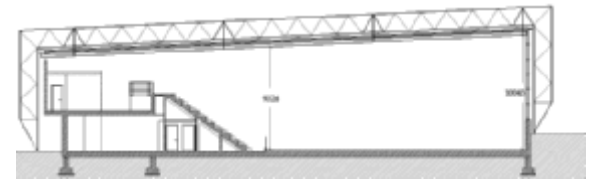


Fig. 12 - Sezione longitudinale Palazzetto

La disposizione dei portali non risulta esattamente simmetrica per motivi architettonici. La scelta di questa tipologia strutturale ha imposto alcune piccole modifiche alla disposizione originaria di alcuni locali e accessi. Con l'obiettivo di limitare al minimo tali modifiche, si è cercato di non spostare la scala e la rampa per disabili posti sul lato perimetrale Ovest, "scavalcando" con i portali questi elementi e fornendo, oltretutto, una superficie coperta anche per essi. Sul fronte principale, gli accessi sono stati accentrati per una maggiore armonia con la presenza delle strutture. D'altra parte, l'aspetto architettonico esterno risulta, con questa soluzione, completamente diverso rispetto al progetto originario.

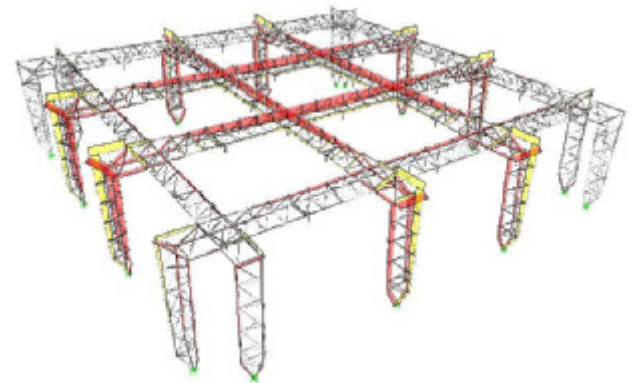


Fig. 13 - Modello realizzato con SAP2000

La copertura leggera, costituita da lamiere grecate poste su un grigliato di travi scatolari visibile dall'interno dell'impianto, risulta appesa puntualmente ai portali attraverso specifici elementi e presenta una pendenza lineare di circa il 5% verso il fronte principale. La presenza di elementi puntuali discendenti dai portali che attraversano il manto di copertura per sostenere il grigliato di travi dal basso, rappresenta una criticità per il tema dell'impermeabilizzazione. Realizzando in opera il pacchetto di copertura è possibile, attraverso la posa di guaine e scossaline metalliche, risolvere il problema dell'impermeabilizzazione; garantire un corretto ed efficace smaltimento delle acque meteoriche rappresenta un'ulteriore tutela nei confronti di questo problema. La criticità di questo collegamento è legata anche alla necessità di consentire la libera rotazione del gri-

gliato sottostante, pur garantendo il trasferimento di azioni verticali ed orizzontali ai portali [Fig.14].

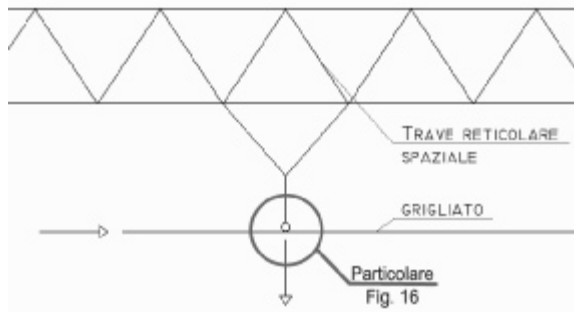


Fig. 14 - Schema di funzionamento del nodo di sospensione del grigliato di copertura

Nella Fig. 15 è rappresentato questo particolare collegamento: si è cercato di ricreare un nodo sferico affidando ad elementi privi di rigidità flessionale l'assorbimento delle azioni normali e a profili ad L le azioni di taglio.

I portali sono costituiti da travi reticolari spaziali di elementi tubolari; l'altezza dei ritti dei portali varia in funzione della quota del piano di copertura e del piano del terreno, da 9,85 a 10,35 m, mentre la distanza tra un portale e l'altro risulta pari a circa 13-14 m.

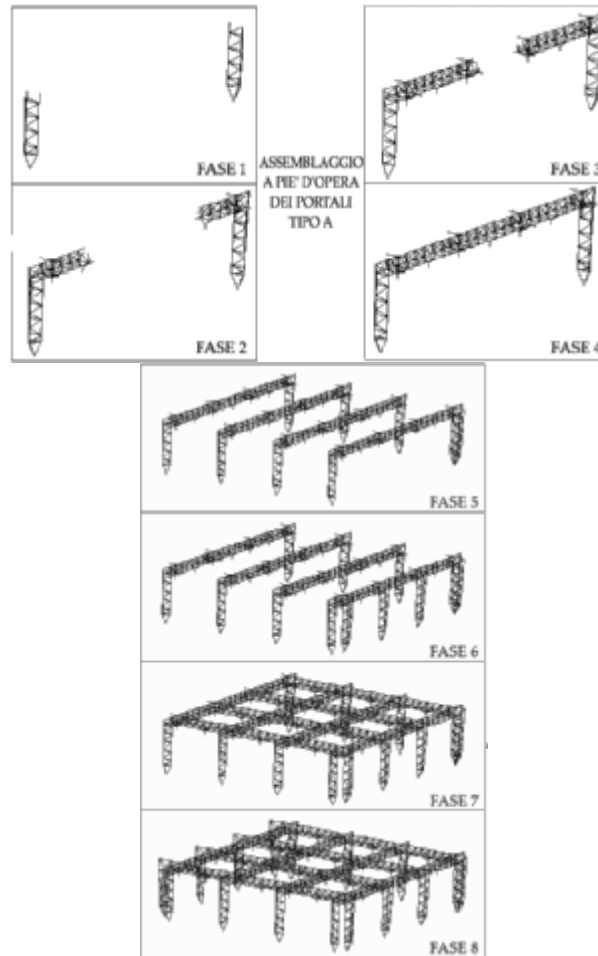


Fig. 16 - Schema di montaggio

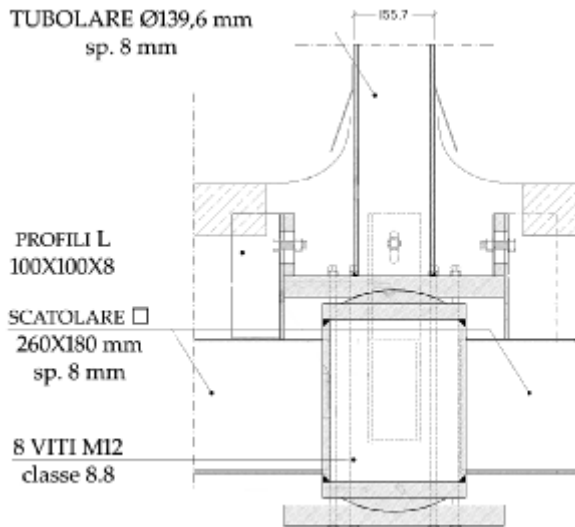


Fig. 15 - Collegamento grigliato-portali

I portali, incernierati alla base, contribuiscono ad assorbire le azioni orizzontali nelle due direzioni. Particolare attenzione è stata posta nella verifica dei collegamenti saldati tra gli elementi tubolari, nel rispetto di tutti i limiti suggeriti dall'EC3 per i rapporti tra gli spessori ed i diametri dei vari elementi.

Importante è stato infine lo studio dello schema per il trasporto ed il montaggio in cantiere di una

struttura di questa complessità. Alla saldatura a piè d'opera di quattro portali, segue il loro posizionamento nelle relative sedi d'appoggio e il completamento attraverso la bullonatura degli elementi costituenti gli altri portali ortogonali.

Infine per il collegamento dei portali alle fondazioni sono state progettate cerniere a pettine con perno, per garantire la libera rotazione direzione nel piano dei portali.

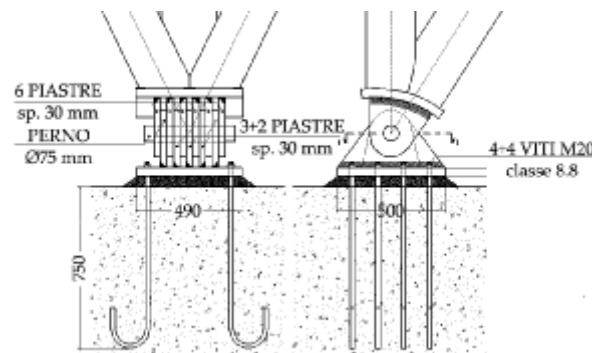


Fig. 17 - Cerniera di base dei portali