

Il presente articolo riporta esclusivamente quanto previsto dall'autore in fase di progettazione esecutiva del sistema strutturale metallico, qualsiasi modifica avvenuta successivamente non viene analizzata.

Il nuovo Centro Congressi nella zona EUR di Roma propone l'interazione tra tre principali elementi architettonici: la Nuvola, la Teca ed il corpo dell'Albergo.

La Teca contiene al suo interno una "nuvola", rivestita con membrana in fibra di vetro e silicone, che rappresenta l'elemento di fulcro architettonico del progetto. L'articolata geometria tridimensionale della "nuvola" è stata ottenuta saldando coppie di profili curvi, ottenuti con taglio al laser di lamiera metalliche. Essa è sorretta inferiormente da un graticcio di travi metalliche a geometria variabile che costituisce il cosiddetto "scafo", il cui nome deriva dal fatto che presenta una forma del tutto simile a quella dello scafo di una nave.

Vista la complessità delle forme in gioco, sono state studiate soluzioni ad hoc per permetterne la modellazione geometrica e strutturale e per garantire un adeguato isolamento sismico della struttura.

La struttura è stata sottoposta a un controllo informatico sia durante la fase di progettazione (dalla concezione strutturale all'analisi con metodi agli Elementi Finiti), sia in fase di costruzione (dal taglio dei pezzi alla produzione in officina della carpenteria metallica previste nella realizzazione dell'opera).

The present article deals only with author's solutions for executive design stage for the steel structures; any following change will not be analyzed.

The new Convention Center in Rome EUR district offers the interaction between three main architectural elements: the Cloud,

La Nuvola

Il nuovo Centro Congressi nella zona EUR di Roma

The cloud

The new Congress Centre in the EUR district of Rome

Massimo Majowiecki

the Case and the hotel building.

The "Cloud", which is contained in the Case, is covered by a glass-fiber and silicone membrane and represents the main architectural element of the entire project. The peculiar three-dimensional structure shape of the "Cloud" has been obtained by welding couples of curved profiles, got from laser-cut steel plates. This structure is supported by a frame named "hull", composed by variable steel beams. The name of this part of the structure arises from its shape that recalls a boat hull.

Due to the complex shapes, optimal solutions have been designed in order to allow and adequate seismic insulation of the structure.

The structure has been checked with IT during design (for the structural design and F.E.M. analysis) and construction phases (for the steel elements cut and their workshop production).



Fig. 1 - La Teca, al cui interno è contenuta la nuvola

1. INTRODUZIONE

La celebre proposta dell'architetto Massimiliano Fuksas per il nuovo Centro Congressi romano si colloca nell'area dell'EUR, nelle vicinanze di alcuni importanti luoghi urbani significativi, quali il Palazzo dei Congressi, la fermata della metropolitana Fermi, Piazzale Marconi ed il Lago. Il nuovo complesso, che, in sinergia con il famoso Palazzo dei Congressi, rappresenterà uno dei maggiori poli congressuali italiani, è pensato per istituire un continuo dialogo con l'importante zona cittadina. La struttura sorge infatti in uno dei fulcri urbanistici dello storico quartiere di Roma, su un'area di circa 27 mila metri quadrati tra via Cristoforo Colombo, viale Europa, viale Asia e viale Shakespeare.

In piena aderenza agli indirizzi architettonici del contemporaneo Free Form Design, il progetto si caratterizza per soluzioni innovative anche dal punto di vista logistico e nella scelta dei materiali. Il nuovo edificio propone l'interazione di tre diversi elementi architettonici: la Nuvola, la Teca ed il corpo dell'Albergo. All'interno della grande Teca, un parallelepipedo di acciaio e vetro alto 40 m e delle dimensioni in pianta di 70 x 175 m, concepita per coprire lo spazio espositivo del forum, si colloca, in posizione sospesa, quasi a galleggiare nell'aria, una nuvola rivestita con una membrana in fibra di vetro e silicene: elemento fluttuante dallo spettacolare impatto visivo (figure 1 e 2).

Il complesso ospita sino a 8000 posti, suddivisi in diverse sale congressuali di geometria e dimensioni modulabili in funzione delle esigenze, e nell'auditorium, in grado di ospitare 1800 persone, contenuto all'interno della nuvola, fluttuante tra 15 e 18 m di altezza dal suolo.

Sulla copertura della teca un sistema di pannelli fotovoltaici consentirà una doppia funzione, di schermatura rispetto alla radiazione solare incidente e di produzione naturale di energia elettrica. L'edificio è limitato poi dal corpo vetrato dell'Albergo, con circa 440 stanze ed oltre 1000 mq destinati a spazi per la ristorazione ed il *fitness*.

La struttura della grande Teca consiste in una successione di travi in acciaio del tipo Vierendeel a geometria spaziale, della luce di 60 m con un'altezza di circa 4 m, e nel "plenum" sot-

tostante: ovvero la struttura metallica che copre le grandi sale congressuali.

L'organica forma della nuvola è sorretta inferiormente per mezzo del cosiddetto "scafo": un articolato graticcio di travi metalliche a geometria variabile che si caratterizza per le imponenti proiezioni a sbalzo. Soluzioni *ad hoc* sono state concepite per governarne, dal punto di vista della modellazione geometrica e strutturale di tipo tridimensionale, le complesse forme strutturali, in particolare per la parte in elevazione della Nuvola, e per determinare un efficace isolamento sismico della struttura.

Le articolate geometrie tridimensionali sono ottenute assemblando, mediante saldatura di imbottiture metalliche di collegamento, coppie di profili curvi, ottenuti con taglio al laser di lamiere metalliche. Il processo progettuale e costruttivo è indirizzato ad un completo controllo di tipo informatico dell'oggetto strutturale, dalla concezione, all'analisi con metodi agli Elementi Finiti, al taglio dei pezzi ed alla produzione in officina, delle circa 800 tonnellate di carpenteria metallica che sono state previste per la realizzazione dell'opera.

2. DESCRIZIONE DELLE OPERE STRUTTURALI METALLICHE

2.1 L'impalcato del forum e plenum sottostante

L'impalcato del forum-plenum rappresenta uno dei principali elementi caratterizzanti questo progetto da un punto di vista strutturale (figura 4).

Si tratta di una struttura in acciaio composta da travi reticolari principali (appoggiate alle estremità su setti in c.a.) di luce di circa 66 m, disposte secondo interasse di 8,25 m. In corrispondenza dei nodi sia d'estradosso che di intradosso (disposti a passo 4,17 m circa) sono ordinate travi secondarie in anima piena:

1) Il solaio del Forum è realizzato mediante una soletta in c.a. resa collaborante con le sottostanti travi metalliche secondarie e con il corrente superiore delle travi reticolari principali mediante connettori acciaio-calcestruzzo di tipo Nelson. La soletta, realizzata con lastre prefabbricate tralicciate (tipo predalles) autoportanti in fase di getto, ha altezza compless-

siva di 25 cm; essendo il solaio Forum adibito a manifestazioni fieristiche, si è dimensionata la soletta anche per i carichi concentrati derivanti da sistemi di trasporto per allestimento;

2) Il livello del Plenum è realizzato con un sistema di travi metalliche secondarie e terziarie che sostengono il sistema di controsoffittatura con funzioni antincendio e l'impiantistica a servizio degli ambienti sottostanti.

Lo sviluppo delle caratteristiche geometriche della trave reticolare "tipo" ha fortemente risentito delle richieste architettoniche ed impiantistiche: lo spessore strutturale del pacchetto "impalcato Forum" è infatti condizionato da:

- a) La necessità di garantire agli ambienti inferiori un'altezza netta (pavimento-controsoffitto) di 9 m;
- b) l'impossibilità per ragioni di sicurezza antincendio di collocare all'interno dello spessore strutturale della reticolare gli impianti a servizio degli ambienti.

Tali richieste hanno portato, a partire dal progetto definitivo, ad una progressiva riduzione dello spessore del pacchetto strutturale con conseguente aumento dei pesi strutturali. In particolare, dovendo garantire uno spessore impianti che limiti il pacchetto strutturale a meno di 3000 mm, si rende necessaria la variazione della trave multipla reticolare in sezione a cassone composta (figura 3).

2.2 La Teca

La Teca (ovvero l'edificio che contiene la parte fuori terra del Centro Congressi) rappresenta per dimensioni e caratteristiche un'opera di grande impegno progettuale. Essa è costituita da grandi telai (macrostrutture), posti ad interassi di 33 m l'uno dall'altro, aventi una luce di campata di 66 m (come per l'impalcato Forum-Impianti) e 39 m di altezza (47 m per il telaio esterno posto sul filo B) (figure 5 e 6).

Ciascun telaio è costituito:

- da due colonne con schema spaziale di tipo Vierendeel;
- da una trave con schema spaziale reticolare (per i telai interni) o di tipo Vierendeel (per i telai esterni);

I telai sono tra loro collegati, sugli assi longitudinali esterni, da travi con lo stesso schema



Fig. 2 - Vista panoramica dell'interno della Nuvola

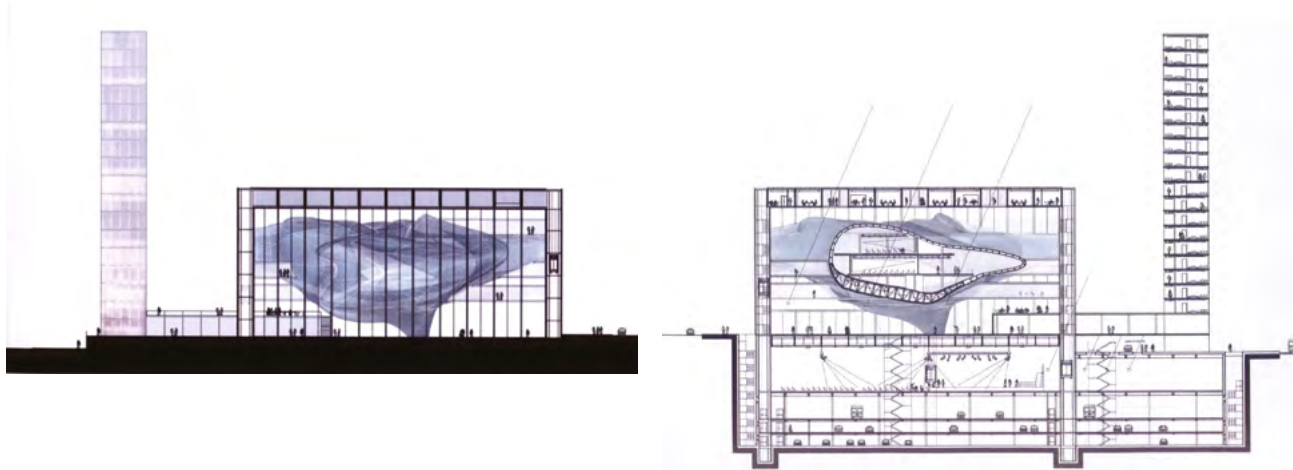
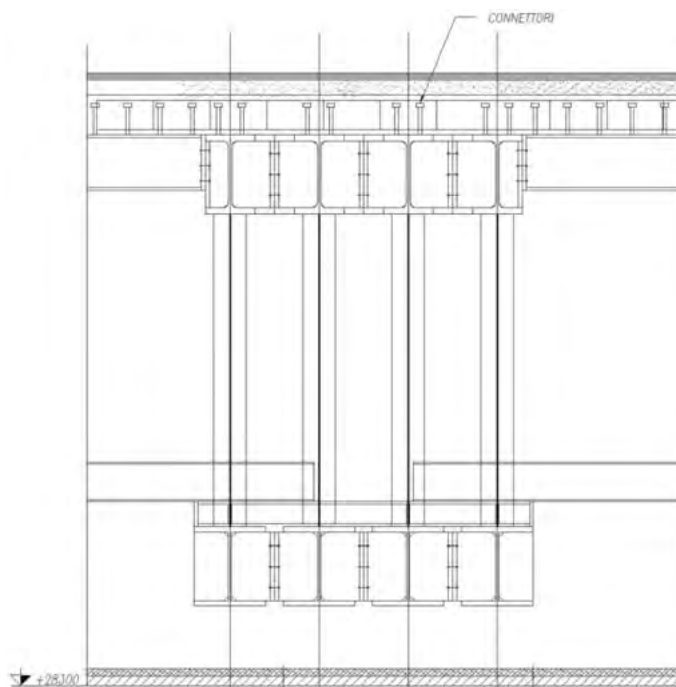


Fig. 3 - Vista e sezione dell'intero complesso



Figg. 4 - Sezione trave principale e vista struttura con travi principali e secondarie

spaziale di tipo Vierendeel.

Le travi dei telai forniscono appoggio alle travi secondarie e ai diversi ordini di arcarecci, necessari per sostenere i campi vetrati (con o senza evacuatori di fumo) della copertura e il controsoffitto vetrato di intradosso. In particolare, le travi secondarie sono disposte con interasse

12,50 m e sono organizzate in 3 campi di ampiezza 9,9 m circa.

Lungo le facciate longitudinali composte da due rivestimenti in vetro posti sulle facce esterne e sulle facce interne del corpo della teca, trovano collocazione le scale di sicurezza e gli ascensori.

Ciascun modulo di 33 m di parete longitudinale è organizzato secondo moduli di 3300 mm circa (corrispondente al modulo della trave Vierendeel di sommità). Secondo tale passo sono disposti i tiranti di appensione delle vetrate sia interna che esterna. A tali tiranti sono collegati gli arcarecci orizzontali (in tubolare rettangola-

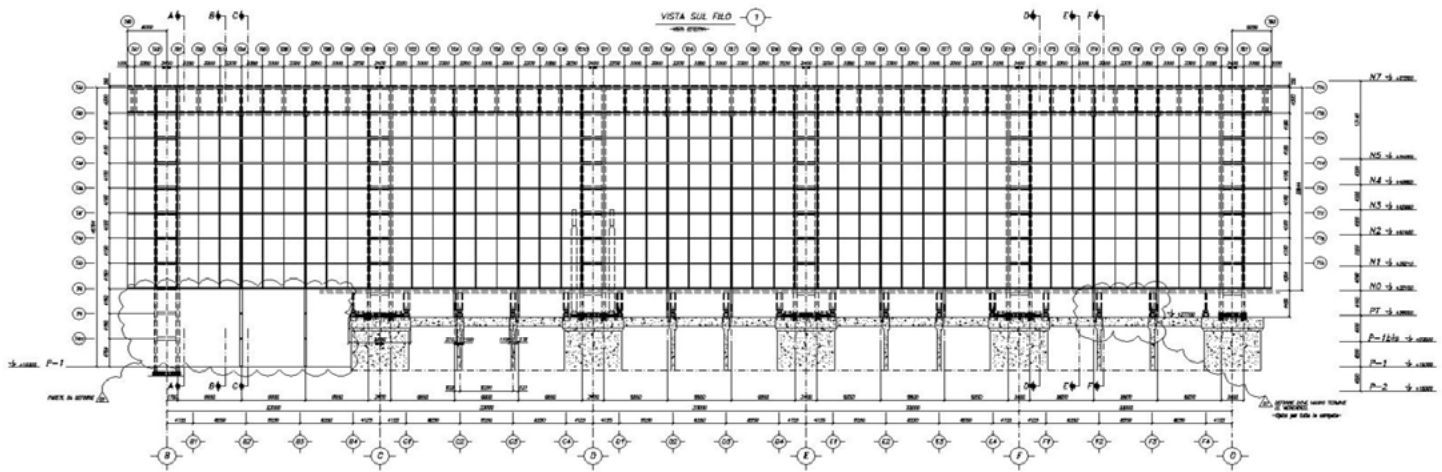


Fig. 5 - Facciata longitudinale edificio teca

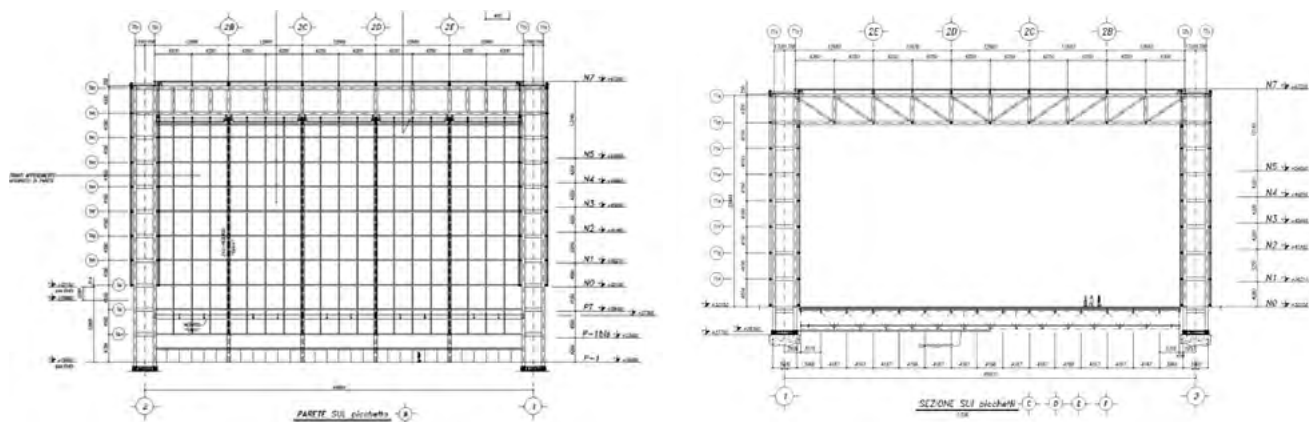


Fig. 6 - Telaio esterno sul filo B e telaio interno della teca

re) che sostengono i vetri organizzati secondo pannellature di dimensione orizzontale 1100 mm e 1650 mm rispettivamente per la vetrata interna e quella esterna e di dimensione verticale di 4200 mm circa.

L'azione di controvento in facciata è affidata, per ogni modulo di 33 m, a due travi Vierendeel piane disposte perpendicolarmente alla vetrata e disposte a passo di 9900 mm circa, che trasferiscono i carichi orizzontali in sommità ed alla base (in corrispondenza del solaio del Forum con un dettaglio che permette lo spostamento verticale) ed appendono le scale metalliche ed i pianerottoli previsti nel progetto architettonico. Lungo le facciate frontali sono previste travi Vierendeel verticali, in questo caso appoggiate al solaio inferiore, disposte con interasse di 12,5 m, di ingombro 1,5 m (distanza tra corrente esterno e corrente interno) e controventate fuori dal loro piano. Ad esse sono appesi mediante tiranti in piatti gli arcarecci di sostegno

dei pannelli vetrati.

Le colonne principali della teca sono rigidamente connesse alle strutture in c.a. poste al di sotto del Plenum, a cui è affidato il compito di trasferire le azioni orizzontali al sistema di impalcati ed alle fondazioni. Tali colonne in c.a. sono inoltre tra di loro collegate in senso lon-

gitudinale da setti e travi in c.a. che sono state utilizzate, in fase di montaggio, per lo spostamento dei grandi telai della teca dalla zona di montaggio alla loro posizione finale (figura 7).

2.3 LA NUVOLO E LE SOTTOSTRUTTURE

La Nuvola è l'elemento di fulcro architettonico



Fig. 7 - Struttura della teca durante la fase di montaggio.

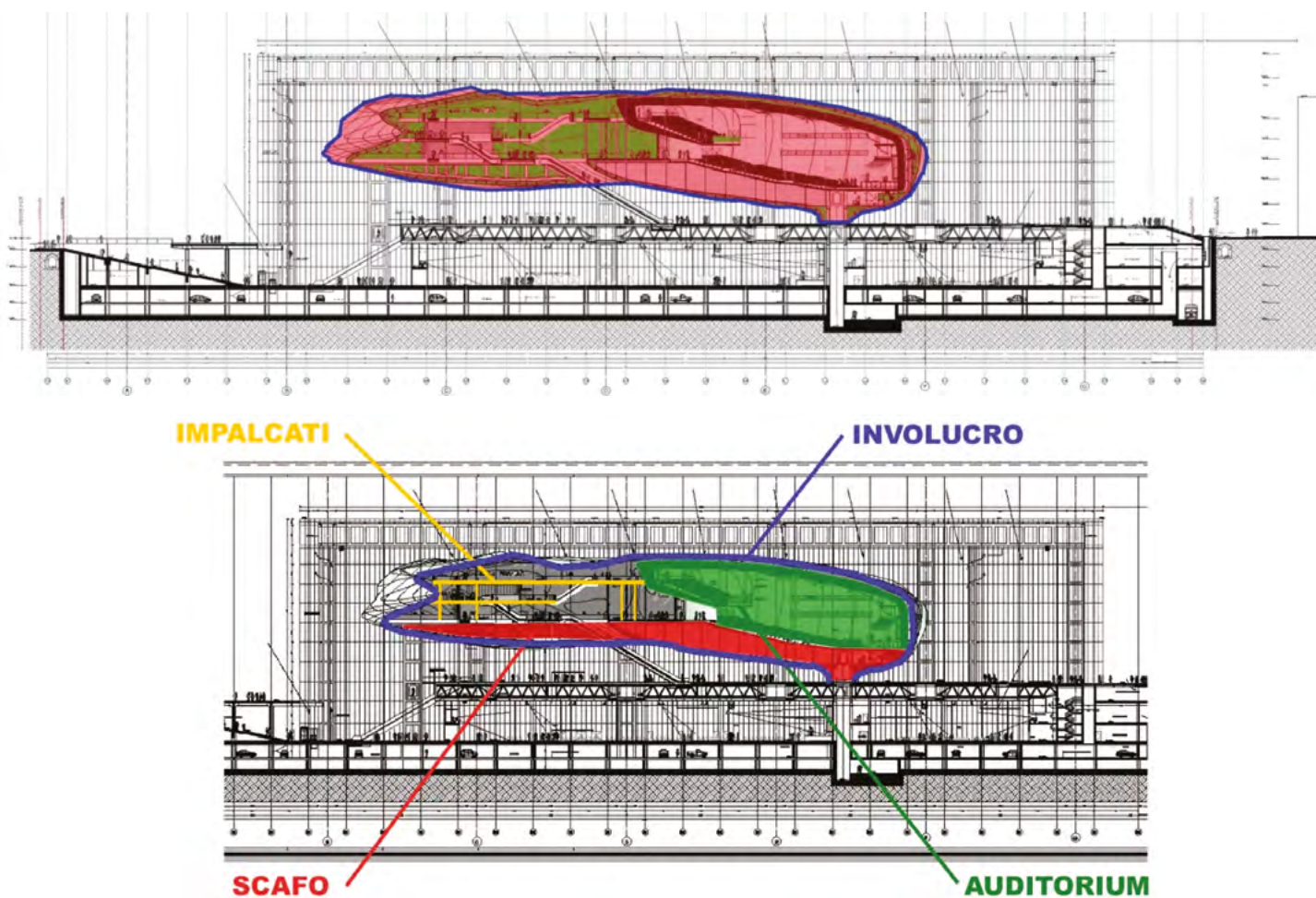
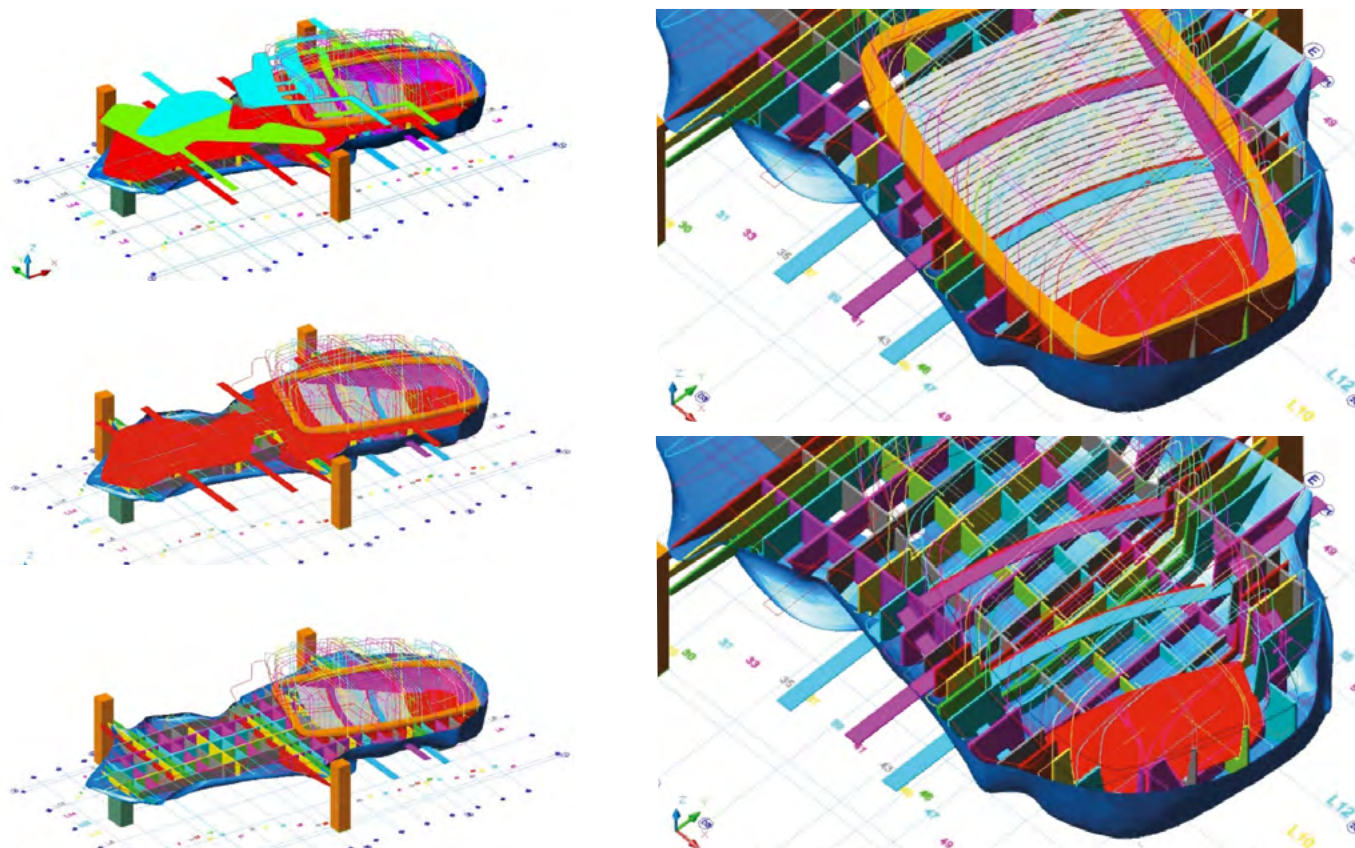


Fig. 8 - Sezione longitudinale della Nuvola



Figg. 9 - Livelli progressivi della struttura tridimensionale

del progetto ed è un'opera che non ha precedenti a livello mondiale per tipologia, sagoma e dimensioni. La forma architettonica del tutto inconsueta e fortemente irregolare, è stata affrontata e risolta dal punto di vista strutturale in maniera tale da conferire all'oggetto uno schema statico controllabile (figura 8).

Il complesso Nuvola è formato essenzialmente dalle seguenti sottostrutture:

- lo Scafo;
- le strutture di sostegno dell'Auditorium;
- gli Impalcati Intermedi;
- l'Involucro

2.3.1 LO SCAFO

Lo scafo è la struttura principale di sostegno del complesso "Nuvola".

L'ossatura portante dello scafo è costituita da un doppio ordito di travi reticolari piane ad altezza variabile. Le travi longitudinali e trasversali sono collegate fra di loro in maniera da formare un unico corpo rigido la cui forma ricorda molto quella dello scafo di una nave (figure 9 e 10). I profili utilizzati per realizzare i correnti sono dei profili a "doppio T" saldati, i montanti e i diagonali sono invece dei profili "a croce" anch'essi saldati. L'unione fra le membrature avviene tramite un tondo d'acciaio pieno (figura 11). In alcune zone i correnti superiori sono collegati alla soletta in calcestruzzo mediante pioli, sfruttando la collaborazione parziale acciaio calcestruzzo, per garantire la stabilità dei correnti stessi e migliorare lo stato deformativo e il livello di *comfort* dell'impalcato N3.

Lo scafo presenta una conformazione irregolare anche in pianta: i sostegni principali sono concentrati in tre appoggi, due castelletti metallici costituiti da profili tubolari a sezione quadrata e un nucleo in calcestruzzo armato, che portano gli scarichi fino in fondazione, trovando un vincolo orizzontale anche a livello del Forum. Altrettanti punti di appoggio laterale sono stati realizzati in corrispondenza di tre colonne della Teca, con l'importante funzione di stabilizzare lateralmente il sistema (figura 12).

In corrispondenza dei tre appoggi interni sono stati installati degli isolatori sismici, il cui inserimento consente di traslare la frequenza fondamentale del sistema isolato in un campo



Fig. 10 - Ossatura portante dello scafo in fase di montaggio

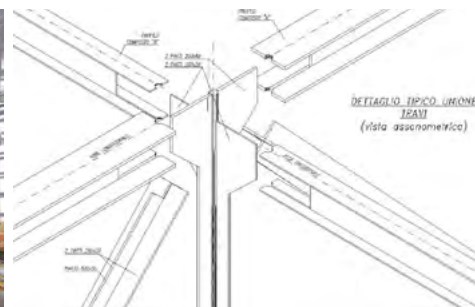


Fig. 11 - Nodo tipico di incrocio fra le reticolari dello scafo

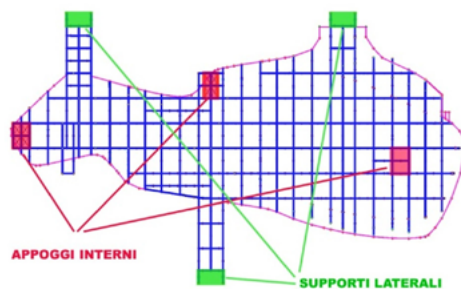


Fig. 12 - Pianta delle strutture e appoggio interno dello scafo



caratterizzato da basso contenuto energetico. In questo modo si è ridotta la vulnerabilità delle strutture garantendone l'integrità, attraverso la forte riduzione dei carichi sismici, anziché aumentarne la resistenza strutturale (figure 13 e 14).

Siccome in caso di evento sismico tutto il sistema risulta più deformabile, ovvero soggetto a spostamenti orizzontali maggiori rispetto a quello di strutture non isolate, particolare attenzione è stata posta nei confronti di quelle sottostrutture che presentano limiti di defor-

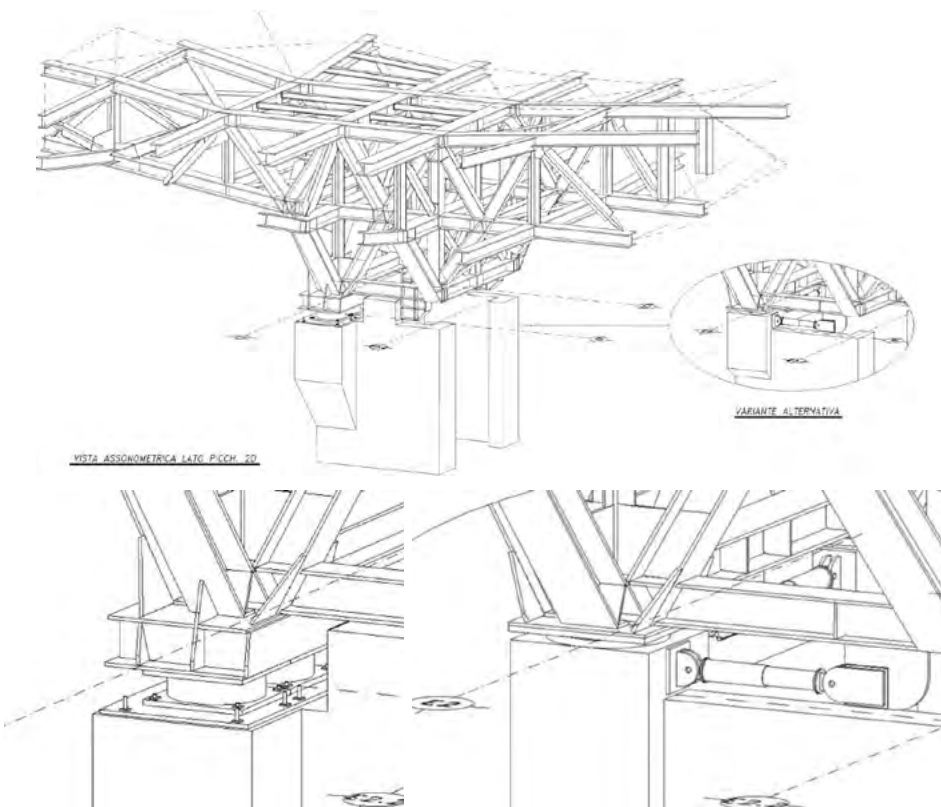
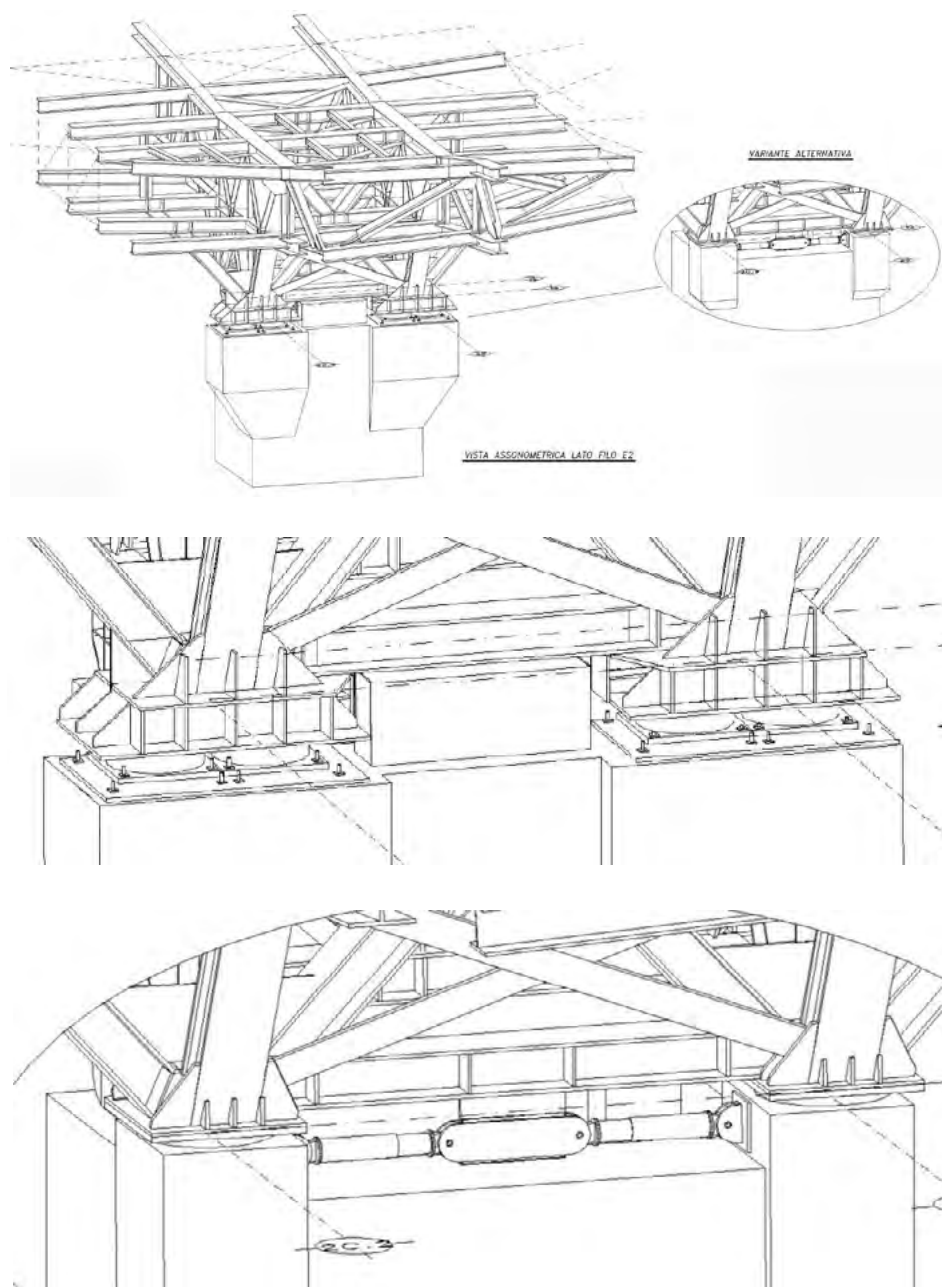


Fig. 13 - Dettagli degli isolatori in corrispondenza del picchetto 2D



Figg. 14 - Dettagli degli isolatori in corrispondenza del filo E2

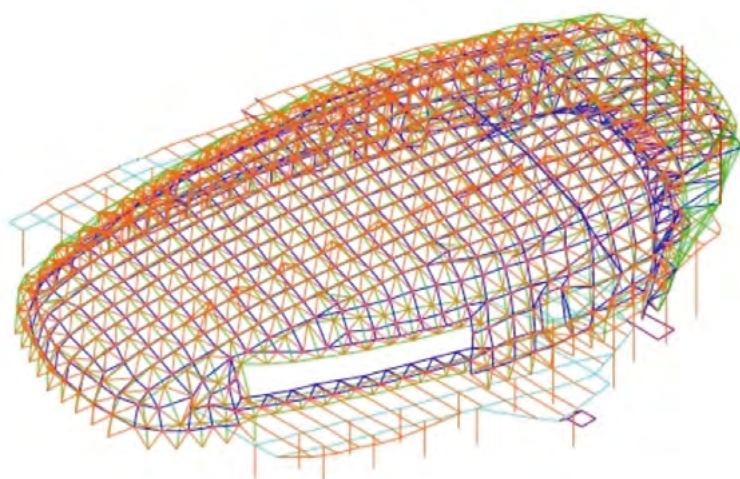


Fig. 15 - Modello di calcolo dell'Auditorium in fase di progetto

mabilità, principalmente nella progettazione di giunti strutturali, edili ed impiantistici, tra ciò che è solidale alla porzione isolata e ciò che è solidale alle strutture limitrofe non isolate.

Lo scafo sostiene direttamente:

- la reticolare piana creata nello spessore dell'Auditorium dal livello N3 in giù;
- il solaio della platea interna all'Auditorium;
- i pilastri che sostengono gli Impalcati dei livelli N4 ed N5;
- le strutture di sostegno della galleria dell'Auditorium;
- l'anello di appoggio dell'Involucro dell'Auditorium;
- le strutture secondarie che sostengono gli impalcati dei livelli N1, N2 ed N3.

Direttamente dallo scafo partono, infine, le passerelle che dall'interno della nuvola raggiungono la Teca.

2.3.2 LE STRUTTURE DI SOSTEGNO DELL'AUDITORIUM

All'interno della Nuvoletta trova spazio, tra le altre cose, un Auditorium. Esso occupa circa un terzo del volume della Nuvoletta, nella parte più ad Est. Partendo dal basso fino al livello N3, le strutture dell'Auditorium sono formate prevalentemente da una reticolare piana, che presenta in pianta una forma a "ferro di cavallo" fortemente integrata con le reticolari dello scafo.

Da N3 in su, si sviluppa l'involucro dell'Auditorium. Il sistema strutturale adottato per quest'ultimo è quello di una reticolare spaziale a doppio strato con moduli pseudo tetraedrici in acciaio. La struttura reticolare è particolarmente adatta per la forma a guscio determinata dalla configurazione architettonica desiderata, potendo ottenere ottime caratteristiche di rigidità globale con modesti spessori strutturali. I nodi di collegamento sono realizzati con procedure automatiche meccaniche a controllo numerico. Particolare attenzione è stata dedicata alla struttura della galleria la quale si appoggia a colonne intermedie e si appende alla struttura spaziale (figure 15, 16 e 17).

2.3.3 Gli impalcati intermedi

Sempre all'interno della nuvoletta, sul lato Ovest, sono stati realizzati degli impalcati di servizio ai

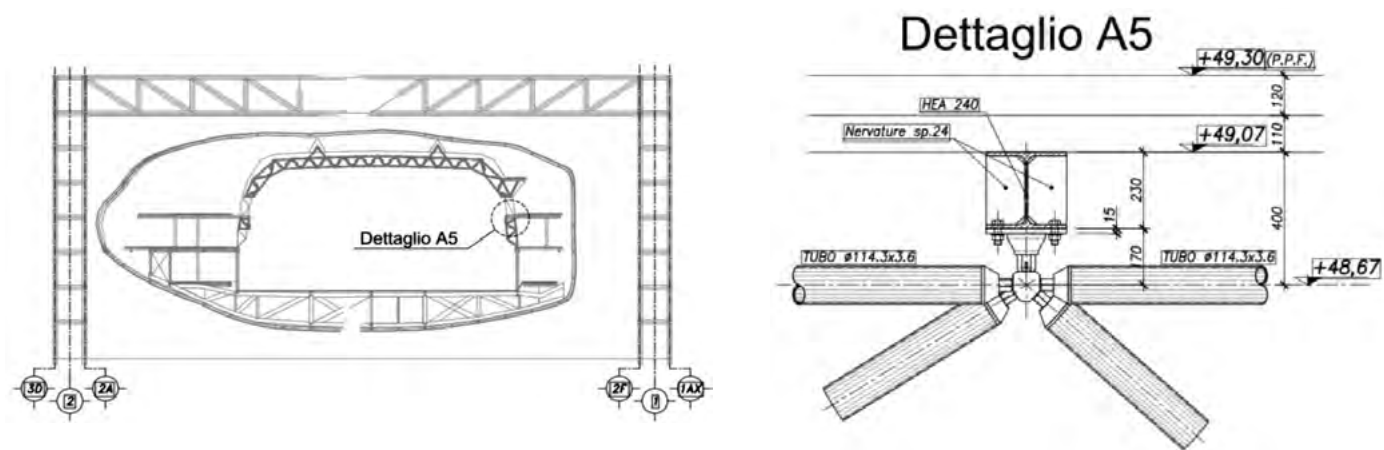


Fig. 16 - Sezione trasversale dell'auditorium e dettaglio

livelli N4 ed N5. Essi sono sostenuti da pilastri tubolari metallici che si appoggiano direttamente sullo scafo, mentre le travi portanti il solaio sono realizzate tramite profili commerciali laminati a "doppio T".

Il sistema degli impalcati si controventa in direzione Nord/Sud tramite un doppio controvento a "X" che porta le forze orizzontali direttamente sullo scafo ed in direzione Est/Ovest tramite un collegamento rigido al guscio dell'auditorium. I solai sono realizzati con lamiera grecata collaboranti con soletta in calcestruzzo e tutte le travi sono collegate al solaio tramite pilastrature minime atte a garantire una limitazione della deformabilità delle travi e un miglioramento del livello di *comfort*.

Sempre ai livelli N4 ed N5 si sviluppano altri 4 impalcati, del tutto analoghi ai precedenti per quanto concerne la tipologia strutturale. Tali impalcati si sviluppano sui due fianchi del guscio dell'Auditorium e ne occupano lo spessore in corrispondenza delle cabine di traduzione. Anche ai livelli N1 ed N2 sono stati realizzati altri impalcati di servizio con tipologia analoga alle precedenti; in questo caso le strutture di questi impalcati si intrecciano con quelle dello scafo. Da tutti gli impalcati (N1, N2, N3, N4, N5) si diramano delle passerelle che attraversano la Nuvola in direzione Nord/Sud e raggiungono le scale di emergenza contenute nello spessore della Teca (figura 18).

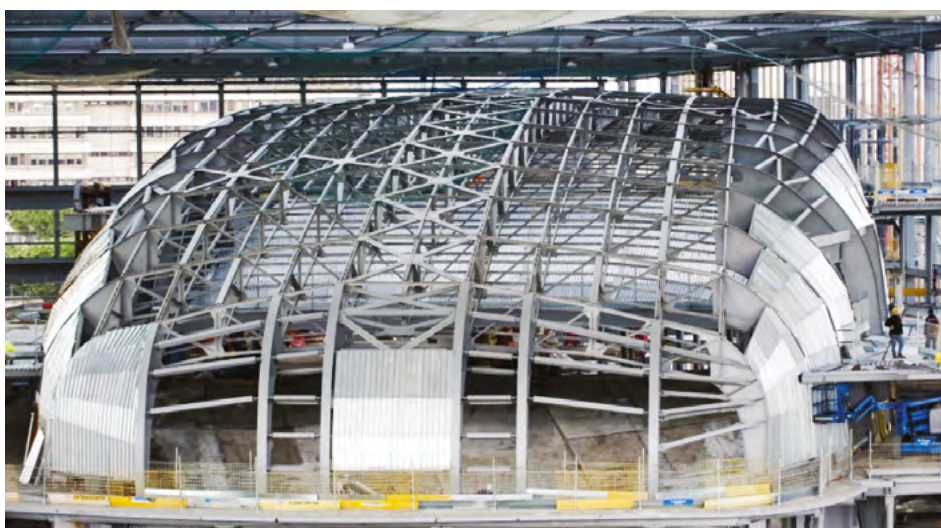


Fig. 17 - Struttura del guscio dell'Auditorium in variante costruttiva

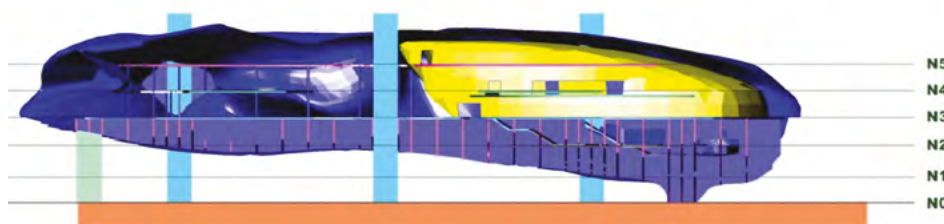


Fig. 18 - Individuazione degli impalcati all'interno della nuvola

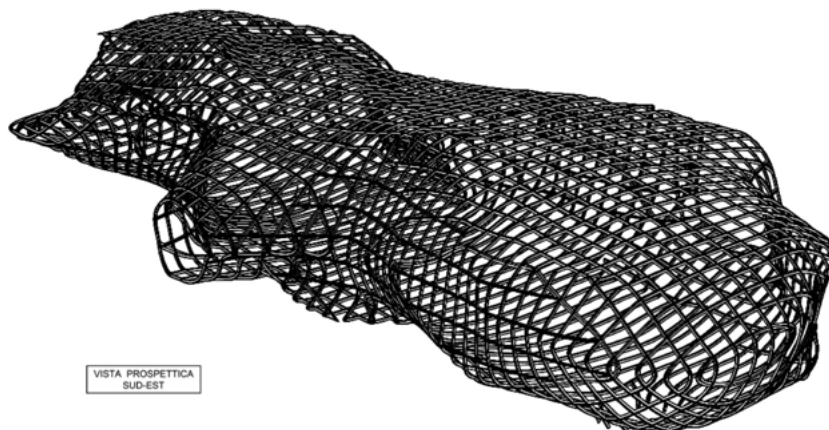


Fig. 19 - Struttura dell'involucro della Nuvola - 3D

2.3.4 L'INVOLUCRO

L'Involucro delle Nuvola è realizzato mediante una struttura a guscio monostrato in acciaio,

che in pianta presenta una maglia rettangolare (figura 19).

Questa grande “gabbia” avvolge lo Scafo, l’Auditorium e gli impalcati intermedi; nella parte inferiore si ancora alle strutture dello Scafo, nella parte superiore si appoggia al guscio dell’Auditorium e alle colonne che già sostengono l’impalcato N5. Tale ancoraggio avviene tramite apposite strutture integrate con le strutture sottostanti.

Per realizzare la forma fortemente irregolare dell’involucro della Nuvola, la struttura portante è stata realizzata con coppie di piatti pantografati, orditi in direzioni ortogonali, tali da formare una rete a maglia rettangolare (2,05 × 3,68 m circa). Questi sono stati preferiti alla soluzione in tubo scelta in fase di progettazione definitiva, in quanto, potendoli sagomare tramite taglio al pantografo, meglio si adattano alle geometrie architettoniche (figura 20).

Il nodo di incrocio è stato realizzato tramite saldature a completa penetrazione in maniera da conferire rigidità al sistema, tipica delle strutture a guscio (figura 21).

L’intero involucro della Nuvola è interamente rivestito con membrana tipo Tenara cucita, ordita in senso trasversale (figura 22).

2.4 L'albergo e ristorante

L'albergo si sviluppa per circa 60 m sopra l'attuale piano di campagna.

La struttura in elevazione è realizzata in carpenteria metallica (colonne e controventi concentrici); i solai sono realizzati in lamiera grecata e getto collaborante.

A livello P-1 (quota assoluta +19,30 m) è stato realizzato un impalcato rigido (H = 72 cm) esteso su tutta la superficie dei vani interrati, collegato ai diaframmi di contenimento su tutti

i fronti, in grado di assorbire le azioni taglianti alla base delle colonne; a questo livello è stato posto lo “zero sismico”, quindi l'altezza dell'edificio può essere considerata pari a 84,40 – 19,30 = 65,10 m.

L'edificio è suddiviso in due corpi di fabbrica principali, a destra e a sinistra del grande vano che si sviluppa a tutta altezza nel quale vengono alloggiati gli ascensori; tali corpi sono staticamente e dinamicamente separati: la vetrata frontale, la vetrata sul retro, la copertura del vano centrale sono giuntati rispetto ai due corpi principali.

Le vetrate sono state progettate in modo da trasferire ai due corpi di fabbrica principali soltanto le azioni orizzontali ortogonali al piano della facciata (principalmente l'azione del vento); le azioni orizzontali nel piano della facciata e le azioni verticali saranno assorbite dalla struttura della vetrata stessa, che nel suo piano può essere considerata come una trave Vierendeel a più ordini. Le vetrate sono collegate ai due corpi di fabbrica principali soltanto attraverso delle cerniere telescopiche che consentono le rotazioni nel piano orizzontale e gli spostamenti orizzontali nel piano della facciata.

La copertura del vano centrale è stata progettata per avere un duplice comportamento: nel caso di azioni con bassa frequenza come l'azione del vento, la copertura è resa solidale ai due corpi di fabbrica principali; nel caso di azioni ad alta frequenza (sisma) la copertura diviene galleggiante e risulta essere completamente isolata dai corpi di fabbrica. Questo duplice comportamento viene ottenuto mediante l'utilizzo di isolatori sismici.

In elevazione la struttura si sviluppa su 19 livelli, di cui tre interrati. In corrispondenza del 14° piano è prevista la realizzazione di un giardino

pensile, a doppia altezza, che si sviluppa sui 2/5 della dimensione trasversale dell'edificio.

Dal punto di vista sismico l'opera viene classificata come struttura in acciaio a telaio con controventi concentrici.

I solai sono sostenuti da travi secondarie e da travi reticolari ad altezza di interpiano, che collegano le colonne nella direzione trasversale dell'albergo. Le travi reticolari hanno sei campi, di cui cinque diagonalizzati, mentre quello in corrispondenza dei corridoi di piano si comporta come un campo Vierendeel.

Gli ultimi livelli (adibiti a suite) presentano una pianta ridotta rispetto a tutti gli altri piani e si affacciano sul giardino pensile.

La struttura della copertura è in carpenteria metallica ed è realizzata in corrispondenza della suite e della lobby ascensori, lasciando completamente libera la porzione del giardino pensile. I piani della suite saranno appoggiati sulle reticolari che avranno estradosso al piano 15° e si svilupperanno sui due interpiani sottostanti, in modo da fornire una adeguata rigidità (figure 23 e 24).

3. MODELLI MATEMATICI E ANALISI CONDOTTE

La schematizzazione strutturale è stata eseguita con modelli di differente grado di semplificazione in modo da ottenere un buon grado di affidabilità mediante un confronto critico dei risultati.

- Modello 1: unifilare a 3 g.d.l. per nodo con masse concentrate;
- Modello 2: 3D con 3 g.d.l. per nodo e 3 g.d.l. per piano e masse concentrate (condensazione di piano);
- Modello 3: generale 3D con 6 g.d.l. per nodo e masse consistenti.

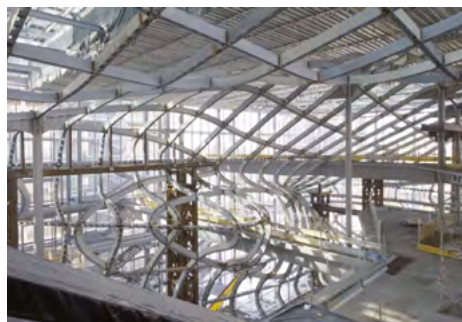


Fig. 20 - Piatti pantografati della struttura dell’involucro della Nuvola

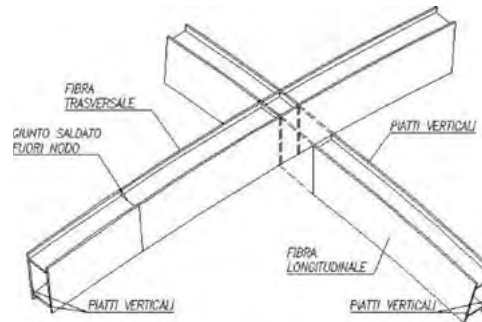


Fig. 21 - Nodo tipico dell’involucro della Nuvola

La valutazione complessiva dell'attendibilità dei risultati dell'analisi strutturale automatica è eseguita con il confronto tra modelli e l'ordine di grandezza con semplici calcoli di larga massima eseguiti con metodi tradizionali (figura 25). Questa procedura permette di minimizzare gli errori insiti nel processo di analisi di strutture complesse.

La struttura è stata modellata con il software di calcolo WinStrand eseguendo:

- Analisi Statiche: modellazione elastica lineare per geometria e materiale;
- Analisi Dinamiche: analisi dinamiche per via statica equivalente e per sovrapposizione modale con spettro di risposta in accordo con l'Eurocodice 8 e la Normativa Italiana con o senza condensazione di piano.
- Analisi di Stabilità: per l'analisi di stabilità dell'equilibrio globale e locale del sistema intelaiato si è proceduto alla determinazione dei carichi critici ultimi mediante un programma di analisi incrementale in campo di non linearità geometrica e materiale con il metodo di Chen-Lui.

3.1 Verifiche di resistenza e stabilità'

Le verifiche di resistenza e stabilità delle strutture in elevazione sono eseguite secondo:

- il metodo delle tensioni ammissibili;
- il metodo semiprobabilistico agli stati limite ultimi e di servizio (adottando per i coefficienti di sicurezza sui materiali γ_{Mi} i valori definiti nel D.M. 14/09/2005).

3.2 verifiche di deformabilità

- Spostamento laterale di piano per l'azione

del vento:

- a. lo spostamento complessivo, definito come flessione laterale sotto il vento di progetto, al piano più alto dallo spiccato di fondazione deve essere inferiore a 1/500 e 1/300 dell'altezza dell'albergo e della teca rispettivamente;
 - b. lo spostamento di interpiano, definito come lo spostamento laterale di un piano rispetto ad un altro contiguo deve essere limitato a 1/300 di ogni altezza di interpiano;
- Spostamento laterale d'interpiano per l'azione del sismica: lo spostamento interpiano dovuto all'azione sismica è determinato in base al D.M. 14/09/2005. Si fa riferimento allo spettro per SLD. Il massimo spostamento d'interpiano non deve essere superiore a $0,005 h$ ($h/200$).
 - Spostamento laterale per l'azione del sismica: la distanza tra gli edifici deve essere calcolata in base al D.M. 14/09/2005. La dimensione minima dei giunti sismici vale: $H (a \cdot g / 0,35g / 100) = H (0,19g / 0,35g / 100)$

= $H/184$. Tuttavia i giunti sismici dovranno essere dimensionati per evitare che con gli spostamenti calcolati per l'SLU (e moltiplicati per il fattore di struttura q) si verifichino fenomeni di battimento. Come previsto nell'Eurocodice 8 parte 1 (p.to 4.4.2.7(2)(b) e (c)), nel caso di due unità adiacenti indipendenti ma con le medesime proprietà, l'ampiezza di giunto dovrà essere non inferiore alla media geometrica (SRSS) degli spostamenti orizzontali massimi rilevati, con ulteriore riduzione del 70% se le elevazioni dei solai sono le medesime.



Fig. 22 - Elemento della Nuvola di cui è stato eseguito il mock-up

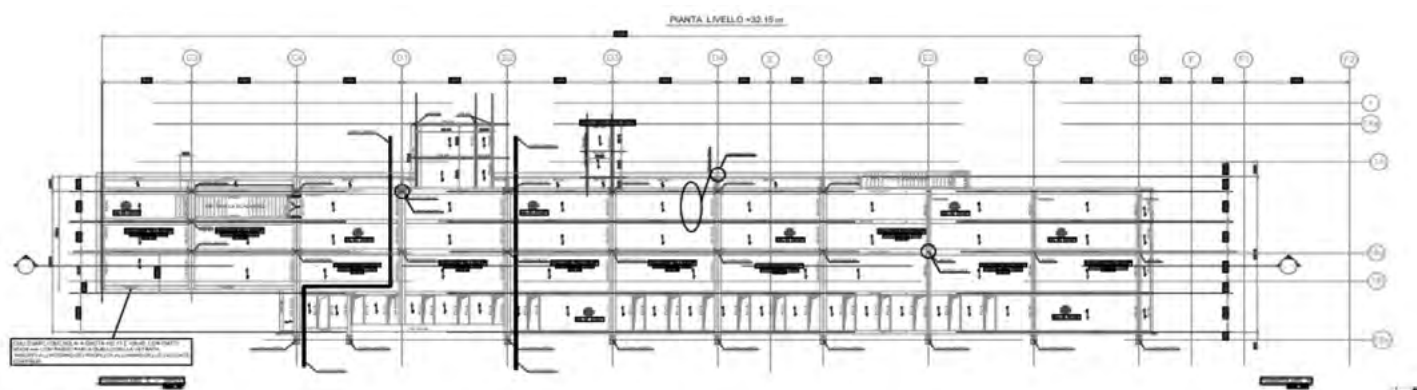
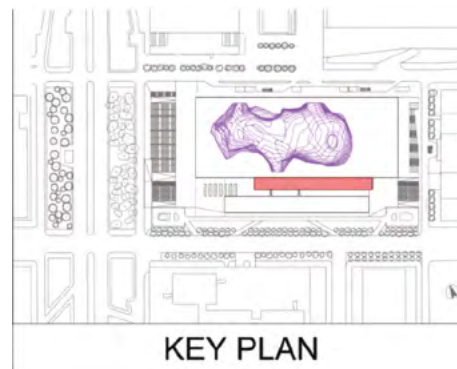


Fig. 23 - Pianta chiave e pianta tipica del ristorante

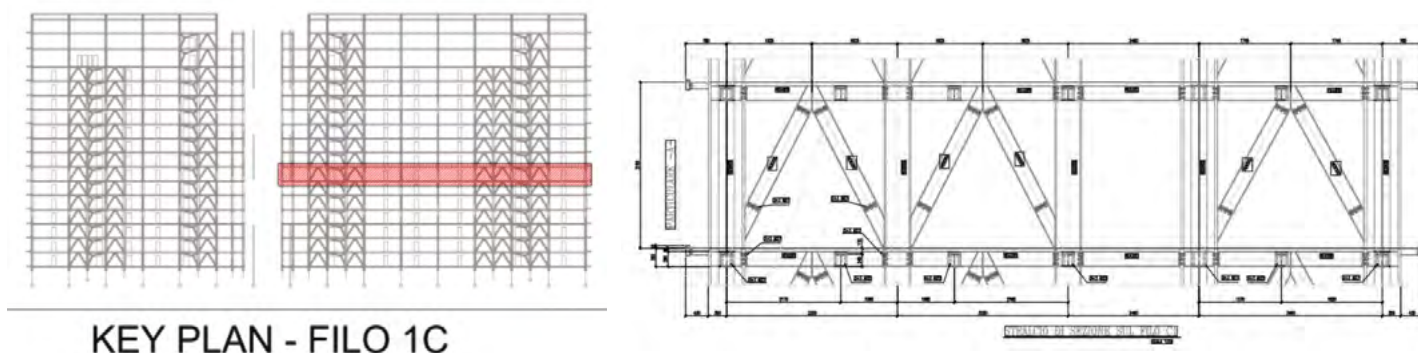


Fig. 16 - Sezione trasversale dell'auditorium e dettaglio

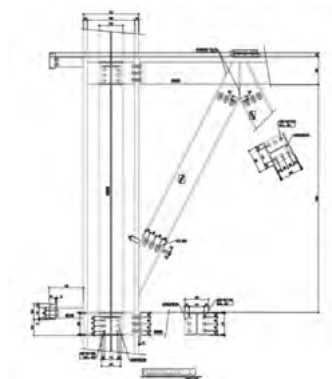


Fig. 24 - Pianta chiave, stralcio sezione tipica sul filo 1C e particolare dell'albergo

- Freccie impalcati: Per i carichi variabili e permanenti la freccia massima dei solai e degli impalcati non dovrà superare i valori limite secondo normativa per le differenti destinazioni d'uso e materiali strutturali.
- Verifica delle accelerazioni indotte dal vento per l'analisi del *comfort*: secondo le raccomandazioni ISO lo spettro di accelerazioni accettabili con un periodo di ritorno di 10 anni per un edificio è compreso tra 20 e 24 *milli-g*.

- Verifica delle risposte vibrazionali e dell'influenza sul *comfort*: le passerelle pedonali presentano un basso rapporto tra carichi permanenti e carichi accidentali e, allo stesso tempo, notevoli luci libere. In queste condizioni, i sistemi e le tipologie strutturali impiegati hanno una risposta dinamica caratterizzata da frequenze naturali di vibrazione molto vicine alle frequenze di sensibilità umana (Vibration Upgrading of Gimnasia, Sance Halls and Footbridges – Structural Engineering International 2/92; Dynamic Behaviour of Footbridges – G.P.Tilly, R. Eyre). Dalla letteratura tecnica viene consigliato di evitare i *range* di frequenze compresi tra 1,6-2,4 Hz e tra 3,5-4,5 Hz. L'aspetto prestazionale, a livello di *human comfort*, viene considerato dall'Eurocodice 3 Design of Steel Structures – Part 2: Steel Bridges, quale stato limite di servizio. Data la leggerezza della tipologia strutturale adottata ed i bassi valori di smorzamento ottenibili per le strutture metalliche, le caratteri-

stiche vibrazionali del sistema strutturale devono essere controllate in sede di collaudo.

3.3 Isolamento sismico

Tenendo presente che le masse presenti nel complesso (strutturali, dei pacchetti di finitura e dei rivestimenti e quelle associate ai carichi variabili della folla) sono rilevanti e l'impossibilità architettonica di individuare corpi controventanti laterali obbliga a concentrare l'azione nei 3 corpi d'appoggio interni, sono stati inseriti dispositivi di isolamento sismico in corrispondenza di questi ultimi.

3.3.1 Configurazioni

Sono state individuate due configurazioni:

- 1) Utilizzo di isolatori elastomerici costituiti da strati di materiale elastomerico alternati a piatti d'acciaio, aventi prevalente funzione di confinamento dell'elastomero. Essi svolgono contemporaneamente la funzione di appoggio rigido verticale e di vincolo orizzontale caratterizzato da un basso valore di rigidità

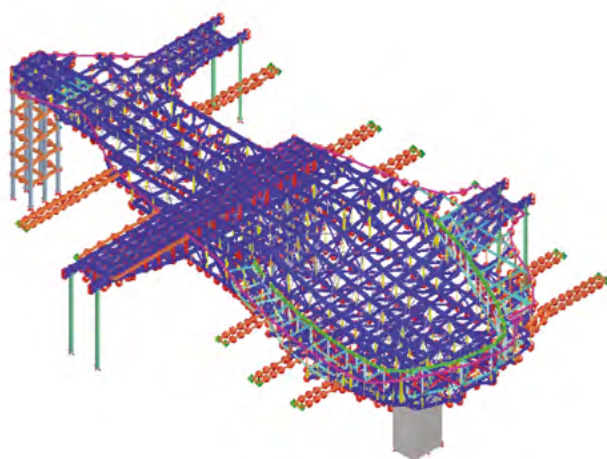


Fig. 25 - Vista assometrica del modello matematico della nuvola

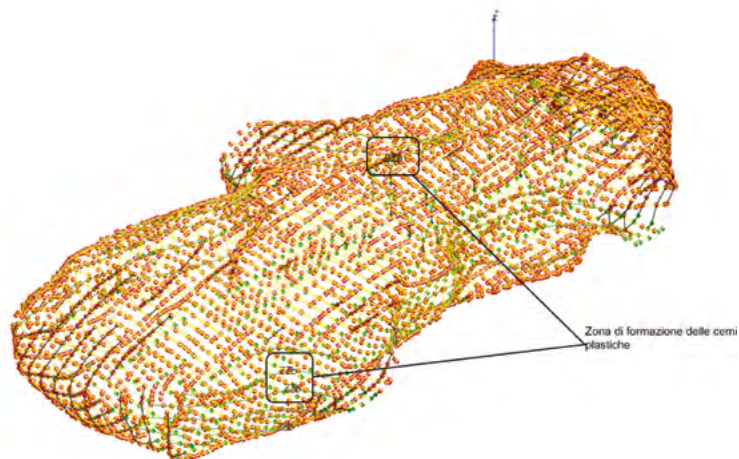


Fig. 26 - Zone di formazione delle cerniere plastiche – vista assometrica

ed un elevato valore di smorzamento. In tale configurazione le due funzioni (sostegno dei carichi verticali e vincolo alle azioni orizzontali) sono inglobate nel medesimo dispositivo;

2) Nella seconda configurazione le due funzioni vengono svolte da due dispositivi distinti: un apparecchio d'appoggio verticale ed un dispositivo a rigidità verticale nulla a cui è affidato il compito dell'abbattimento, dissipazione e resistenza alle azioni orizzontali.

3.3.2 analisi preliminare

L'analisi delle grandezze in gioco ed il dimensionamento delle grandezze che caratterizzano i dispositivi di cui sopra sono stati svolti seguendo il seguente ordine logico:

- a) Nota la posizione planimetrica dei punti di vincolo orizzontale e la posizione del baricentro delle masse di progetto si sono definite le rigidità orizzontali che occorre prevedere nei 3 punti di vincolo in modo tale che:
- 1) Il baricentro delle rigidità coincida (planimetricamente) sostanzialmente con il baricentro delle masse, affinché non si manifestino rilevanti modi di vibrare di tipo torsionale;
 - 2) Il periodo fondamentale di oscillazione T ricada nell'intervallo 2,5 - 4,0 sec a cui corrisponde il massimo abbattimento del valore dello spettro sismico e quindi dell'azione sismica indotta.
- b) Nota la massa totale di progetto e la rigidità traslante complessiva ottenuta come somma delle tre rigidità previste, si è ricavato il periodo T di vibrazione e, dallo spettro si-

Condizione	
1	Peso Proprio
2	Membrana
3	Vento Interno
4	Vento Esterno
5	Sisma 0
6	Sisma 90
7	Sisma VERT
8	Sisma 0
9	Sisma 90
10	Sisma VERT

Tabella 1 - Le condizioni di carico di base

smico elastico di progetto opportunamente riscaldato per tenere conto delle capacità intrinseche di smorzamento degli isolatori, si è determinata l'azione sismica globale associata alla massa e lo spostamento SLU previsto.

3.4 Analisi non lineare delle strutture dell'involucro

La struttura di supporto della copertura della Nuvola è stata analizzata utilizzando un codice di calcolo non-lineare che tiene conto sia della non linearità del materiale delle aste costituenti l'involucro, sia degli effetti non-lineari di tipo geometrico.

L'elemento finito utilizzato è derivato da Meek J.L. Tan H.S. "Geometric nonlinear analysis of space frames by an incremental iterative technique" in Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 47,1984 ed implementato nel codice di analisi non lineare "WinStrand Tensol". Il codice di calcolo analizza la struttura per passi incrementali di carico utilizzando l'algoritmo di "Newton-Raphson" modificato.

3.4.1 Risultati delle analisi

Le condizioni di carico di base considerate nell'analisi generale della struttura sono indicate nella tabella 1

Ai fini dell'analisi non-lineare sono state considerate le seguenti combinazioni di carico di base nella tabella 2.

Successivamente si è proceduto ad incrementare il solo set di condizioni di carico variabili (condizioni 3 e 4 dovute al vento) sino a pervenire al collasso strutturale.

La combinazione di carico che risulta più gravosa è la seconda (denominata "vento interno" nella relazione di calcolo generale) per la quale si raggiunge il collasso in seguito alla formazione di meccanismi locali dovuti a successiva formazione di cerniere plastiche alle estremità

Comb.\Cond	1	2	3	4	5	6	7
1	1,40	1,50	1,50	-1,50	0,00	0,00	0,00
2	1,40	-1,50	-1,50	1,50	0,00	0,00	0,00

Tabella 2 - Combinazioni di carico di base

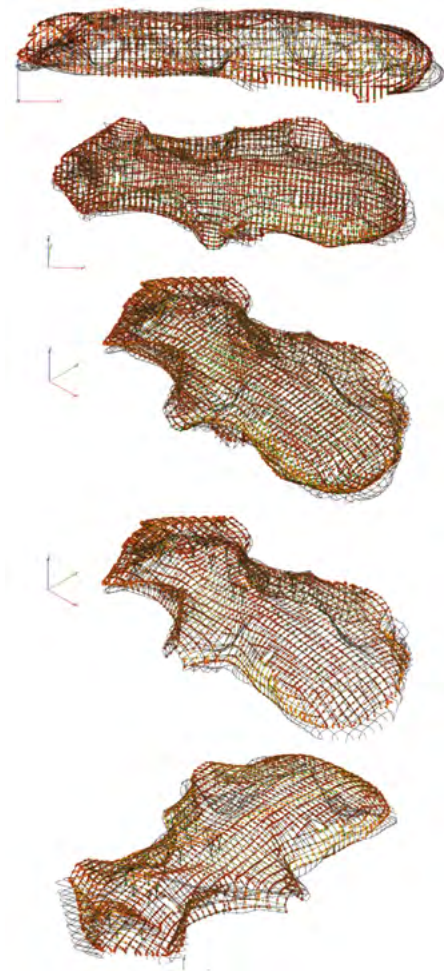


Fig. 27 - Deformate a collasso

tà delle aste senza che si noti l'innescò di un meccanismo di collasso dovuto a instabilità dell'equilibrio. Il moltiplicatore dei carichi variabili complessivo risulta essere 1,65, in buon accordo con le verifiche locali eseguite con il metodo degli SLU (figure 26, 27 e 28).

4. MATERIALI IMPIEGATI E COMPUTO

4.1 Acciaio da carpenteria

Temperatura minima di servizio: 0°

4.1.1 Profili

Tubi circolari finiti a caldo secondo EN 10210-2

Tubi circolari formati a freddo e saldati secondo EN 10219-2

Profili aperti laminati a caldo con tolleranze

secondo EN 10034

Tutte le strutture in carpenteria metallica:

S355 J0 secondo EN 10025

Piastrame, irrigidimenti, ecc.:

S355 J0 secondo EN 10025

Denti di ancoraggio longitudinale impalcato

Forum:

S450 secondo EN 10025

Barre tonde di apprensione vetrate Teca:

S460 M secondo EN 10113

4.1.2 Acciaio per profili, nodi e collegamenti della reticolare spaziale (auditorium)

Acciaio da carpenteria per profili tubolari

- Sezioni circolari

Tubi circolari finiti a caldo S 355 J2H secondo EN 10210-2

Acciaio da carpenteria S 355 J2 secondo EN 10025:

- Coni

Acciaio da carpenteria S 355 J0 secondo EN 10025.

Acciaio per sfere dei nodi della reticolare spaziale

Acciaio secondo EN 10083-1: C45E/Ck 45

Acciaio saldabile EN 10025: S 355 J0

Acciaio per collegamenti aste-nodi della reticolare spaziale

Bulloni: classe 10.9

Perni: Acciaio 102Cr6 secondo EN 10132-4

Dadi di regolazione (Spanner sleeves): Acciaio 25CrMo4 secondo EN 10083-1

4.1.3 Acciaio pioli di connessione acciaio-cl

Tipo Neloson o equivalenti

Acciaio ST37-3 K DIN 17100

valore caratteristico minimo della tensione a snervamento $f_{yk} \geq 355 \text{ N/mm}^2$

4.1.4 Acciaio per perni

Acciaio 30 CrNiMo 8 secondo EN 10083:

valore caratteristico minimo della tensione a snervamento $f_{yk} \geq 700 \text{ N/mm}^2$

valore caratteristico minimo della tensione a rottura $f_{uk} \geq 900 \text{ N/mm}^2$

4.1.5 Bulloni

Collegamenti bullonati secondo EN 14399

Viti classe 8.8 e 10.9

Dadi classe 6.S e classe 8.G

Rosette acciaio C50 EN10083

Piastrine acciaio C50 EN10083

4.1.6 Saldature e processi di saldatura

Collegamenti saldati secondo D.M. 09.01.1996, UNI 10011 e specifiche I.I.S.

a) Saldatura con elettrodi rivestiti secondo UNI 5132 - UNI 7243 corrispondenti ai tipi E44 per acciai Fe360 ed Fe430 ed E52 per acciai Fe 510, con classe di qualità 3 e 4 e rivestimento di tipo basico.

b) Saldatura a filo continuo sotto flusso (S.A.W.) o in atmosfera protettiva (M.A.G. - F.C.A.W.) con materiali di apporto (o accoppiamento filo flusso) omologati.

c) Il procedimento od i procedimenti adottati saranno omologati da un Ente Ufficiale presso lo stabilimento di costruzione per la gamma di spessori e per il tipo di giunti previsti in progetto.

d) Le saldature manuali o semiautomatiche saranno eseguite da saldatori qualificati in relazione al procedimento impiegato ed alla posizione dei giunti da eseguire in armonia alle norme UNI.

4.1.7 Lamiere grecate

Per lamiere collaboranti tipo Hi-Bond

Acciaio Fe E 280 G (UNI 5753/84) con

Carico di rottura a trazione $\geq 390 \text{ N/mm}^2$

Carico di caratteristico di snervamento $\geq 185 \text{ N/mm}^2$

4.1.8 Funi

Funi di tipo chiuse in acciaio ad alta resistenza
Composizione: 2 strati esterni di fili sagomati a Z, nucleo interno in fili rotondi, tutti zincati a caldo

Resistenza nominale a rottura = 1570 MPa min.

Proof stress $R_{p0,2} = 1180 \text{ MPa min.}$

Allungamento a rottura: 4% min. su base di 250mm

Zincatura: EN-10264-3 classe A, 300 g/m² min. sui fili sagomati

Modulo di elasticità nominale $E = 163000 \text{ MPa}$

4.1.9 Computo delle strutture metalliche di copertura

Considerando i tre principali elementi costituenti il centro congressi (Forum, Teca e Nuvola), si ha che il peso dei profili è pari a:

- Forum 3.000 t;

- Teca 8.000 t;

- Nuvola 4.500 t.

Per un totale di circa 15.500 t di fornitura.

CREDITS

Stazione appaltante: EUR S.p.A.

RUP: Ing. G. Grimaldi

Progetto Architettonico: Fuksas Associati s.r.l.

Progettazione preliminare e definitiva delle strutture:

Prof. Ing. Massimo Majowiecki, Collaboratore Ing. Stefano Pinardi.

Progettazione esecutiva delle strutture: Prof. Ing. Massimo Majowiecki, Collaboratore Ing. Stefano Pinardi.

Studio ing. Gilberto Sarti.

Validatore: Italsocotec

Consulente progettazione impianti: Al Engineering

Coordinatore della sicurezza: Studio Ing. Gilberto Sarti

Direzione dei lavori: EUR S.p.A. – Arch. Solange Signorini

Impresa Appaltatrice delle opere General Contractor:

Società Italiana per Condotte d'Acqua S.p.A.

Direttore tecnico: Ing. Giuseppe Di Giovine

Responsabile di commessa: Ing. Claudio Ceccarelli

Realizzazione della struttura metallica: Cordioli & C

Consulente per la redazione del progetto esecutivo di dettaglio della carpenteria metallica: Seteco – Ing. P. Pistoletti

Direttore tecnico di cantiere: Ing. Alessandro Muleri