

MUSEO ENZO FERRARI – MODENA

LA NUOVA GALLERIA ESPOSITIVA

1 INTRODUZIONE

L'obiettivo dell'intervento è quello di valorizzare un elemento estremamente significativo del patrimonio culturale, storico e turistico del territorio modenese, rappresentato dalla figura di Enzo Ferrari e dalla cultura dell'auto e dei motori. Di fronte alla casa in cui nacque Ferrari nel 1898 è stata realizzata una nuova galleria espositiva, l'ormai famoso "cofano" di alluminio, che avvolge la casa natale, senza sovrastarla, come una mano aperta. La galleria espositiva rappresenta il fulcro dell'intero intervento: la copertura a doppia curvatura in alluminio verniciato lucido e la facciata, anch'essa a geometria curva complessa, con brise-soleil curvi e bordo-facciata in metallo lucido, costituiscono gli elementi in grado di comunicare il concetto di "car-design" e di griglia radiatore rispettivamente. E' stato concepito come un complesso museale ad alto risparmio energetico ed elevata sostenibilità ambientale, poiché progettato su principi di bioclimatica e realizzato con materiali e soluzioni impiantistiche all'avanguardia; in particolare è stato previsto l'utilizzo di un impianto di geotermia con applicazione di sonde geotermiche di tipo verticale che alimenta i sistemi radianti di climatizzazione.



Figura 1: panoramica d'insieme del museo "Enzo Ferrari" (tratta dal sito <http://politecnica.it>)

2 DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'idea concorsuale di Future System del grande cofano, a doppia curvatura, che cinge la casa dove è nato Enzo Ferrari senza sovrastarla in altezza e si adagia in modo morbido nel terreno circostante ha portato immediatamente i progettisti di Politecnica a prendere in esame soluzioni strutturali che avessero le seguenti "parole d'ordine": ridotto spessore della struttura (per non sovrastare in altezza l'edificio storico), funzionamento membranale (naturale in relazione alla forma architettonica, consente vantaggi in termini di pesi ed ingombri spaziali), comportamento spaziale (in particolare in grado di inglobare la facciata nel sistema complessivo), eliminazione delle spinte legate all'effetto membrana tramite il basamento di fondazione.

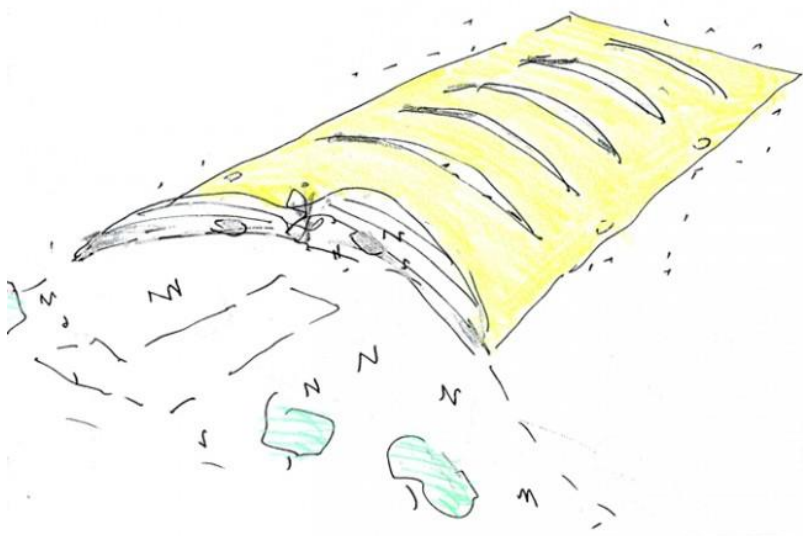


Figura 2: Bozzetto progettuale di Jan Kaplický (tratta dal sito <http://www.museocasaenzoferrari.it>)

La natura spaziale della Galleria espositiva, la sua geometria globalmente complessa ed arricchita dalla presenza di elementi, quali i lucernai "prese d'aria", a loro volta di elaborata forma sinuosa, costituiscono certamente sfide non usuali nell'ambito dell'architettura e dell'ingegneria civile; ne consegue che la soluzione strutturale è certamente complessa.

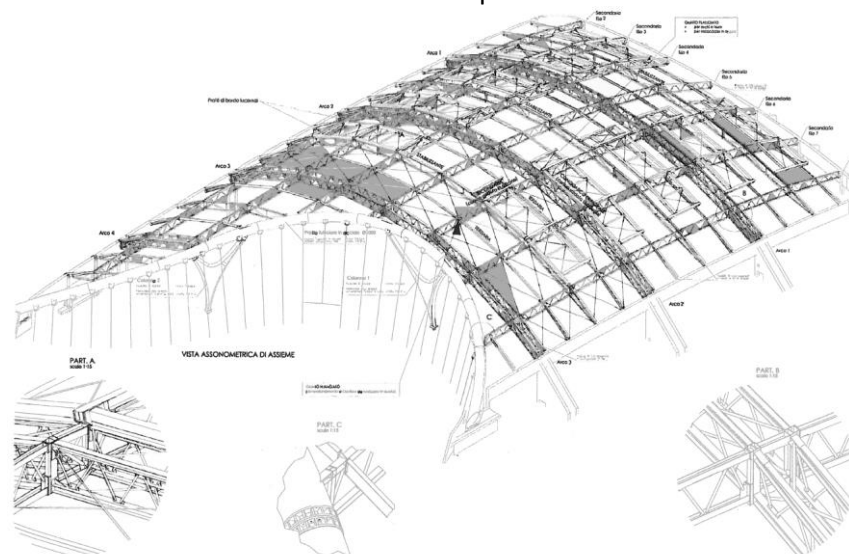


Figura 3: vista assonometrica delle strutture di copertura.

Tuttavia è possibile visualizzare in modo semplice il funzionamento strutturale ricorrendo allo schema statico di arco a spinta eliminata; nel nostro caso il sistema è in prima approssimazione riconducibile ad una sequenza di archi, sempre più ribassati procedendo dalla facciata verso il retro; la freccia degli archi varia tra $1/6$ e $1/7,5$ della luce (pari a 44,0 m circa), pertanto si passa da rapporti quasi ottimali a rapporti nei quali iniziano a divenire importanti i fenomeni di instabilità e buckling.

La soluzione ad arco (a membrana) rispetto alla soluzione a trave (a piastra) consente un omogeneo sfruttamento della sezione resistente, nonché stati tensionali e deformativi decisamente più ridotti: nel caso in esame il peso complessivo della struttura è inferiore ai 30kg/m^2 .

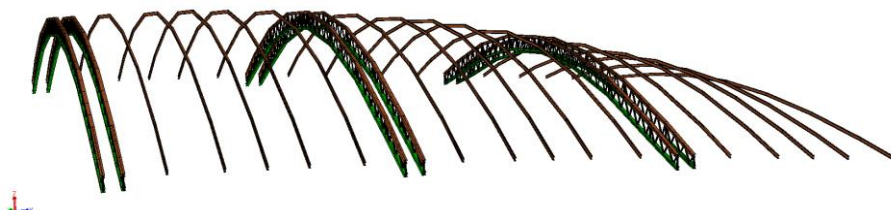


Figura 4: la sequenza degli archi.

La struttura in acciaio di tipo reticolare (con altezza di circa 1,0 m) della copertura è vincolata ad un monolitico basamento in cemento armato dotato di contrafforti costituiti da sottili pareti in c.a.; i contrafforti sono posizionati in corrispondenza degli archi principali in acciaio, il loro profilo geometrico è generato progettualmente sia dalla risultante delle forze trasmesse dalla copertura sia dall'andamento della scarpata inerbita.

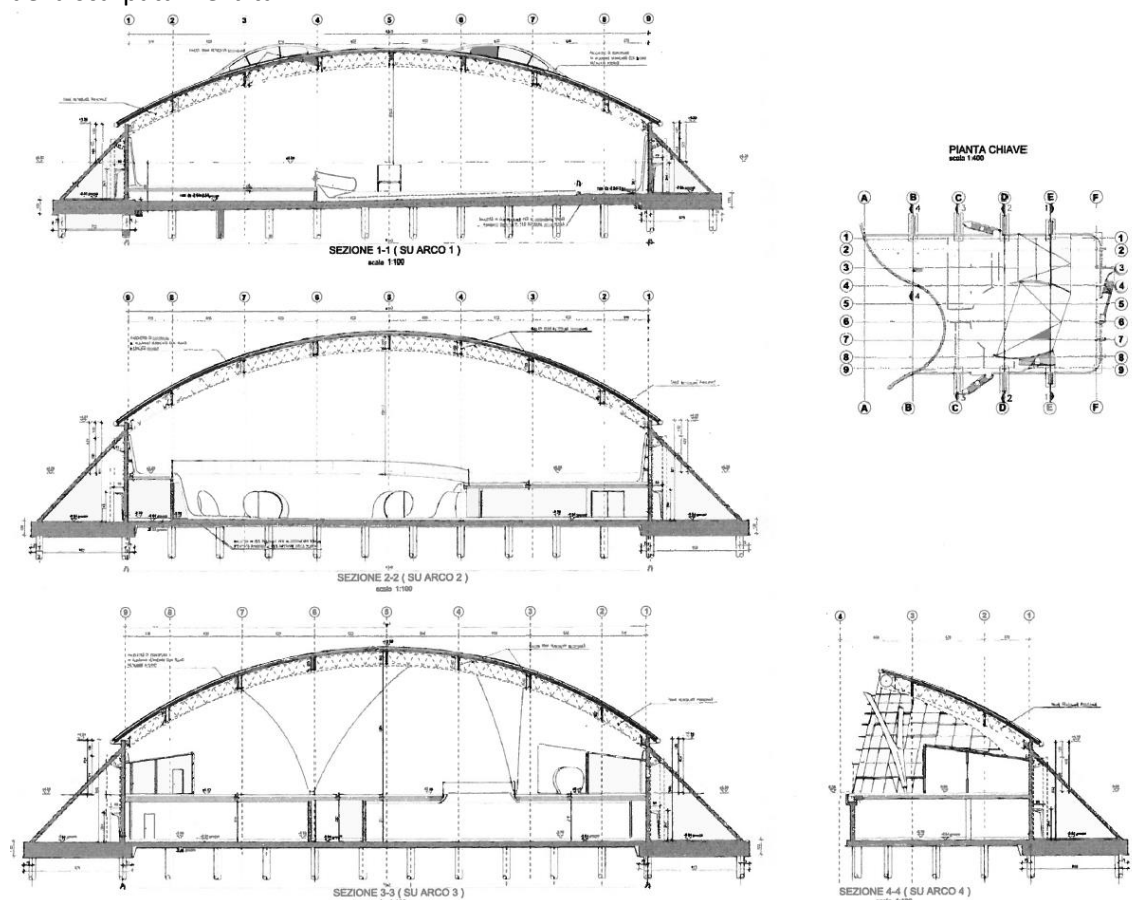


Figura 5: sezioni sugli archi principali.

Gli archi principali, con luce di 44 m circa, hanno struttura composta da due reticolari di altezza pari a 100 cm e distanti 100 cm, con modulo di 120 cm, realizzate con profili correnti HEA 160/140 e profili diagonali generalmente ϕ 42.4 sp 7.1, ϕ 54 sp 6.3; essi sono posti a passo 15.2 m, ad esclusione dell'ultimo interasse pari a 16.11 m che termina con un arco parziale appoggiato al tubo di attacco della facciata.

Le strutture secondarie sono anch'esse di tipo reticolare ma semplici, con profili correnti HEA 120/140 e profili diagonali ϕ 54 sp 6.3; esse sono poste a passo di 6 m a partire dal colmo, con campo terminale di luce pari a 3.7 m. Le reticolari secondarie hanno luce pari a 14.2 m e quindi viene inserita a metà luce una trave/arco reticolare di stabilizzazione strutturale.

Le strutture terziarie, poste ad interasse medio di 380 cm, sono costituite da profili IPE 240, mentre le terziarie di stabilizzazione sono invece reticolari piane costituite da correnti HEA 120/140 e diagonali tubolari ϕ 60 sp 6.3.

Il guscio giallo di copertura viene delimitato frontalmente dalla facciata di ingresso della galleria espositiva, vetrata, trasparente, dal profilo sinuoso, che riproduce letteralmente "l'openhands". Pertanto la forma avvolgente e la massima trasparenza sono in questo caso insopprimibili ed intrinseche esigenze del progetto.

Dal punto di vista geometrico la facciata vetrata viene generata dalla intersezione di due coni e quindi con generatrici inclinate di 12,5 gradi rispetto alla verticale che, scorrendo lungo l'impronta di base, danno vita ad un involucro che alterna convessità e concavità, chiaramente percepite sia dall'esterno che dall'interno. Dal punto di vista strutturale trattasi di facciata a cavi pseudo verticali fortemente pretensionati, il diametro dei cavi è di 3,0 cm, quindi essi sono visivamente trascurabili.

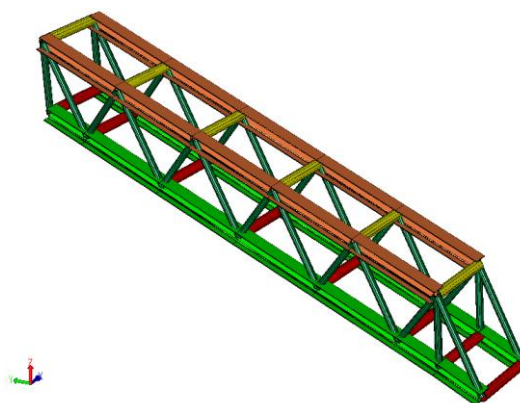


Figura 6: particolare dell'arco principale.



Figura 7: fasi di montaggio degli archi principali.

La deformazione in esercizio della facciata tensostrutturale, che consente la sua leggerezza, è stata attentamente dosata in modo da renderla compatibile con la rigidità propria delle singole lastre in vetrocamera che costituiscono la facciata (210 lastre piane di diversa dimensione, dimensione tipica 200x120 cm). Ciascuna lastra è vincolata alle funi unicamente nei 4 spigoli, tramite piastre e contropiastre in acciaio inox, realizzate con la tecnologia della microfusione e disegnate appositamente per il progetto. Ciascun cavo è vincolato superiormente ad un profilo di bordo costituito da un tubo in acciaio di diametro 100 cm e spessore variabile tra 2 e 4,0. Il tubo (a doppia curvatura, costruito tramite suddivisione in 11 conci a curvatura semplice, assemblati per saldatura in opera su telai metallici provvisori), è inoltre completamente integrato e parte fondamentale del sistema strutturale del coperto.

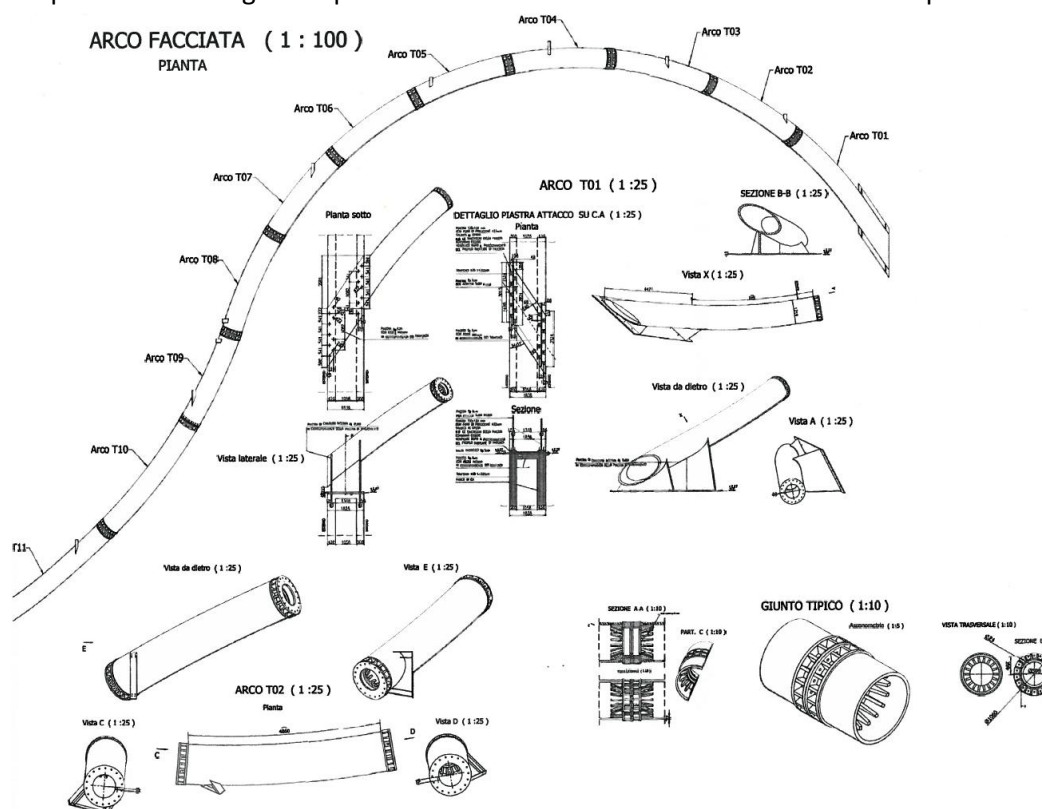


Figura 8: progetto esecutivo del tubo di facciata.

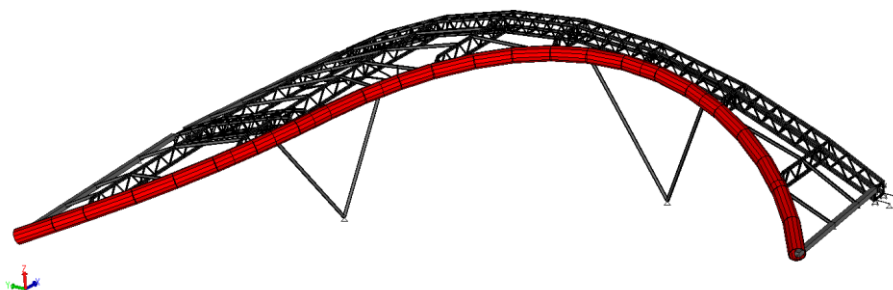


Figura 9: il tubo a doppia curvatura.

3 IL MODELLO DI CALCOLO

L'edificio è costituito da un piano fuori terra, un piano interrato e una struttura metallica che forma la copertura. La pianta ha forma quasi rettangolare con lati massimi pari a circa 78 metri e 45 metri, altezza fuori terra di circa 11.5 m. Su tre lati si sviluppa un'intercapedine di areazione, che in zone di sezione maggiore alloggia anche le scale di uscita di sicurezza dal piano interrato al piano di campagna.



Figura 10: la struttura in acciaio.

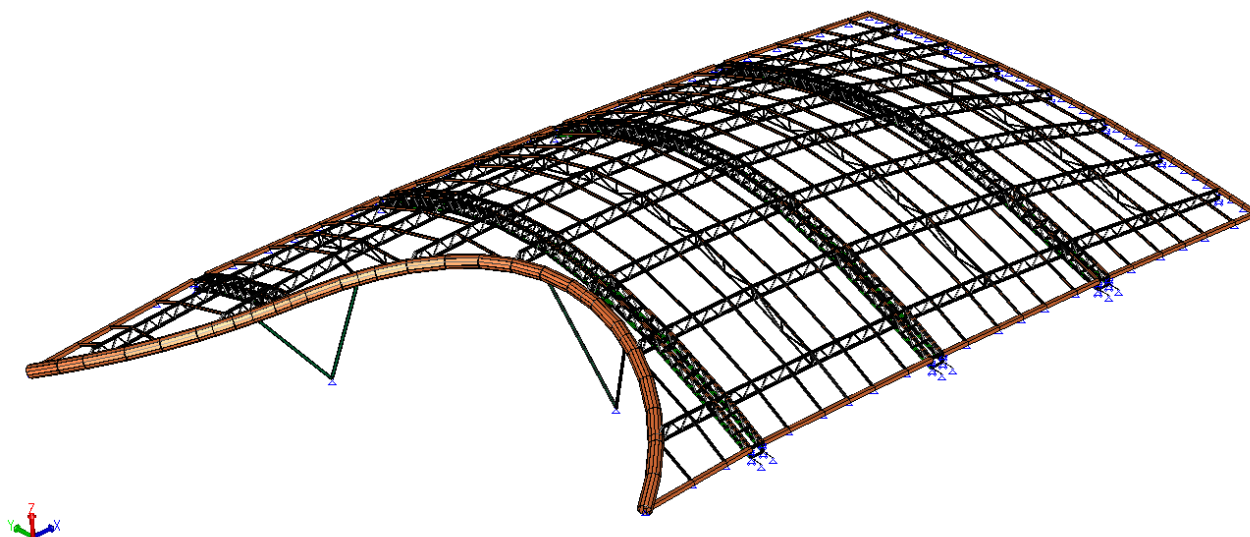


Figura 11: l'intero modello di calcolo.

In corrispondenza del prospetto ovest che si affaccia verso la casa Natale di Enzo Ferrari, la chiusura è costituita da una grande facciata realizzata con cavi pretesi, inclinata mediamente di 12.5° rispetto alla verticale. Ai sottili cavi è affidato il compito di trasferire il carico del vetro alla trave di sommità e l'azione del vento parte alla trave di sommità e parte alla fondazione. Trattasi di tensostruttura in grado di funzionare in caso di vento grazie alle consistenti deformazioni che conferiscono una forma atta a sopportare i carichi con sole azioni di trazione nei cavi.

Per sostenere le presollecitazioni è stato necessario realizzare una trave di sommità della facciata molto rigida, appoggiata ai bordi sulla fondazione e nella parte centrale su due pilastri a sezione scatolare in acciaio. Sulla trave di bordo della facciata appoggia anche una parte della copertura. Gli altri prospetti non presentano elementi di chiusura in quanto viene raccordato il muro controterra che realizza l'intercapedine di areazione e la copertura metallica; tale raccordo viene esternamente ricoperto da terreno di riporto con angolo di natural declivio.

La struttura portante di copertura è realizzata con struttura metallica composta da travi ad arco principali secondo la sezione trasversale e da secondarie reticolari. Le strutture in elevazione, sottostanti la copertura, e di fondazione sono realizzate con setti, pilastri e solette in c.a. L'impalcato di piano terra è realizzato con solai tipo predalles di vario spessore a causa della difformità delle luci di appoggio.

La verifica delle strutture metalliche della copertura è stata condotta tramite l'ausilio di un modello ad elementi finiti implementato attraverso il programma di calcolo MasterSap di AMV. Il modello è composto da circa 2750 elementi di tipo beam. La struttura portante di copertura è realizzata con struttura metallica in Fe510 composta da tre travi principali ad arco secondo la sezione trasversale e da sette secondarie reticolari. Il solaio di copertura viene realizzato con lamiera grecata tipo Montana SP153A, con schema ad appoggio continuo di luce massima pari a 3.80m: gli appoggi sono costituiti dai correnti superiori degli archi principali e delle travi stabilizzanti le secondarie e da travi di tipo semplice ordite trasversalmente e poste a luce intermedia. Il manto di copertura viene posato con una propria orditura terziaria a griglia, che poggia sulle travi secondarie.

La struttura della facciata, vista anche la geometria derivata dalla configurazione di due coni intersecanti e l'altezza variabile, è estremamente complessa. Il metodo di calcolo e verifica adottato per la struttura in elevazione è quello semiprobabilistico agli Stati Limite Ultimi e di Esercizio. L'analisi è stata condotta in campo elastico.

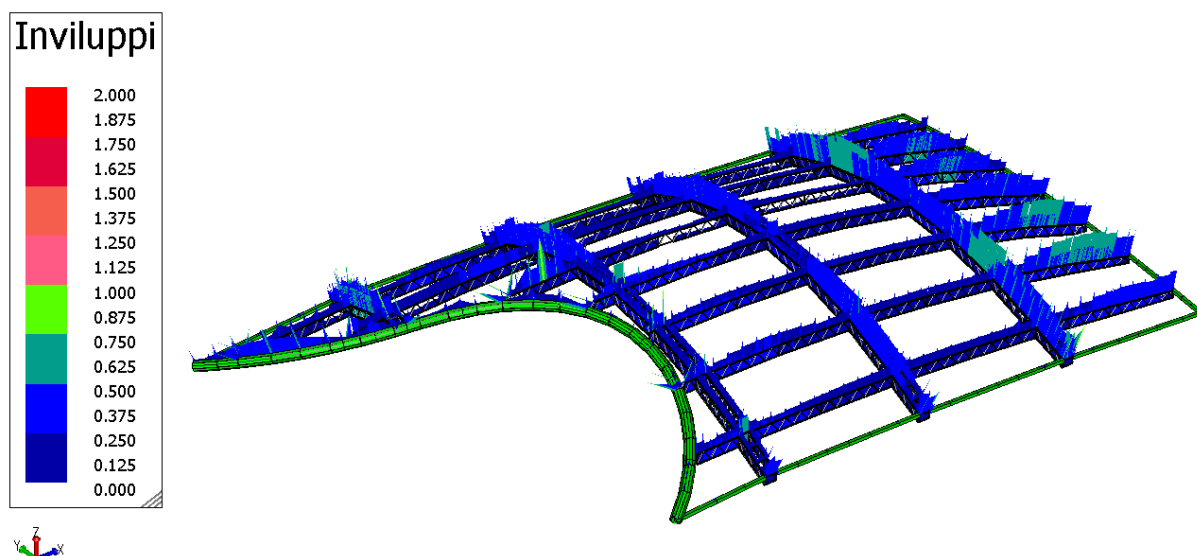


Figura 12: i risultati delle verifiche per gli archi principali e le reticolari secondarie.

Per il progetto e la verifica degli archi principali, delle reticolari secondarie, delle travi intermedie di stabilizzazione, dei pilastri, della trave di attacco della facciata si è eseguita una valutazione complessiva tramite due modelli della struttura della copertura; i modelli hanno uguale schema dimensionale e di vincolo ma semplicemente separano le condizioni di carico:

- modello 1 sisma, neve uniforme + accumulo, neve asimmetrica, vento in direzione X e variazioni termiche;
- modello 2 sisma, neve uniforme + accumulo, neve asimmetrica, vento in direzione Y.

E' stato inoltre considerato un modello 3 per l'analisi della struttura nella fase transitoria di montaggio, nella quale vengono considerati solo i carichi permanenti della copertura; inoltre le secondarie hanno schema di vincolo in semplice appoggio in corrispondenza degli archi principali e del tubo di facciata. Questa schematizzazione implica una sequenza di montaggio che prevede la solidarizzazione di tutta la struttura prima di pretendere la facciata, ma che fino a quel momento si aveva un vincolo di cerniera tra secondarie tubo principale.

I vincoli alle 3 estremità sono stati inseriti nel piano di vincolo reale della struttura, lasciando libere tutte le rotazioni, mentre risultano liberi anche gli spostamenti normali agli appoggi superiori, direzione su cui sono stati applicati i carichi. I vincoli simulano gli appoggi tipo Alga Sferon CS con portata 500 t modificati in modo da portate 60 t in orizzontale.

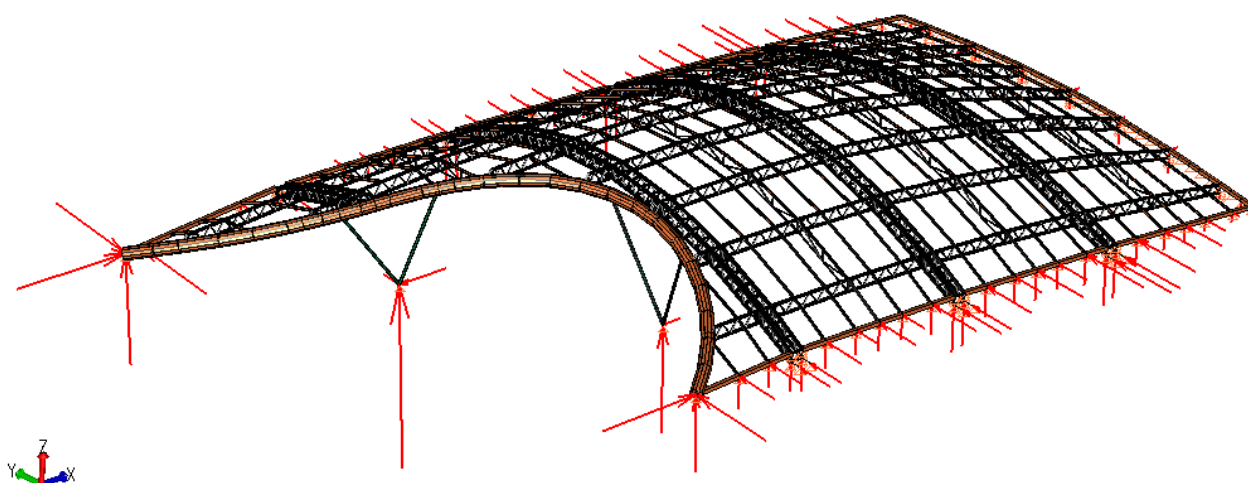


Figura 13: reazioni vincolari della struttura sotto l'azione dei carichi permanenti.

Dr. Ing. Fabio Camorani – Politecnica Ingegneria e Architettura, Modena.

Project management, ingegneria strutturale, impiantistica ed ambientale, direzione dei lavori:
Politecnica Ingegneria e Architettura – Modena

Direttore generale dei lavori e progettista delle strutture: ing. Fabio Camorani – Politecnica

Modellazione strutturale a cura degli ing. Fabrizio Baroni e Ilenia Todeschini – Bit Project, Castelfranco Emilia (MO)

Altre Fonti

Analisi & Calcolo, anno XIII, n° 50.

Costruzioni Metalliche, anno LXV, n°2