since 1990
HARPACEAS
Your digital partner

Analisi a sollevamento delle strutture metalliche di supporto della nuova cappa di aspirazioni fumi presso l'acciaieria Feralpi di Calvisano

F. Bogani[1], P. Barichello[2]*

[1,2] ***SCL Ingegneria Strutturale***

bogani.f@scl-ingegneria.it
barichello.p@scl-ingegneria.it

[*] *L'autore di riferimento per questo paper è: Paolo Barichello*

Sommario

1 Introduzione 3
2 Inquadramento normativo e coefficienti di sicurezza 3
3 Fasi del processo: studi preliminari, analisi strutturali e controlli di cantiere 5
4 Caso Studio: Sollevamento della Cappa di Aspirazione dell'Acciaieria Feralpi 9
4.1 Descrizione generale dell'opera 9
4.2 Definizione schemi di sollevamento e analisi numeriche 14
4.3 Verifiche strutturali 17
4.4 Controlli in cantiere 27
5 Osservazioni e conclusioni 33

Introduzione

Il sollevamento di strutture metalliche di grandi dimensioni costituisce una fase cruciale nell'ambito della progettazione di costruzioni industriali e civili, poiché coinvolge un insieme complesso di fenomeni strutturali, procedurali e di sicurezza. L'operazione, se non adeguatamente progettata e monitorata, può portare a deformazioni permanenti, danni strutturali o, nei casi più gravi, al collasso parziale o totale della struttura ancora prima che essa venga posta in opera, con conseguenti rischi per la vita delle persone coinvolte.
Nel presente elaborato verrà analizzata in maniera dettagliata la fase progettuale del processo, attraverso un approccio integrato che si fonda su solide basi teoriche, uno specifico inquadramento normativo e sulle fasi di modellazione e analisi numerica del problema strutturale. Il tutto verrà poi calato in un contesto progettuale concreto: le analisi a sollevamento dei moduli in carpenteria metallica costituenti la struttura di supporto della cappa di aspirazione fumi presso l'acciaieria Feralpi di Calvisano.

Inquadramento normativo e coefficienti di sicurezza

La progettazione e l'esecuzione di un sollevamento sicuro devono rispettare un quadro normativo articolato che disciplina ogni fase dell'operazione, dalla scelta dei materiali e dei componenti, all' analisi e verifica strutturale, fino all'organizzazione delle procedure e delle fasi di cantiere che regolano l'operazione.
Il contesto normativo proposto di seguito farà riferimento ad ogni fase del processo e include in aggiunta anche aspetti relativi alla progettazione strutturale nella sua accezione più generale e non specifici delle fasi transitorie di sollevamento. In particolare, esso consiste in:

- Norme tecniche sulle costruzioni: NTC-2018 - approvate con il Decreto 17 gennaio 2018 del Ministero delle Infrastrutture - "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni";
- EN 1993-1-1: Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture in acciaio - Regole generali e regole per gli edifici;
- EN 1993-1-8: Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture in acciaio - Parte 1-8: Progettazione dei collegamenti;
- EN 13155: Apparecchi di sollevamento - Attrezzature amovibili di presa del carico): riguarda i dispositivi di sollevamento come grilli, ganci, golfari, ecc.;
- UNI EN 13001-1:2015: Apparecchi di sollevamento - Criteri generali per il progetto - Parte 1: Principi e requisiti generali;
- UNI EN 13001-2:202: Sicurezza degli apparecchi di sollevamento - Criteri generali per il progetto - Parte 2: Azioni dei carichi;
- D.Lgs. 81/08 (Testo Unico Sicurezza sul Lavoro): regolamento italiano in materia di tutela della salute e sicurezza nei luoghi di lavoro, che impone l'adozione di misure preventive e protettive in ogni fase del sollevamento.

Un aspetto fondamentale regolato dalla normativa di riferimento è quello riguardante l'applicazione dei coefficienti di sicurezza, necessari per tenere in conto delle incertezze nei carichi, nei materiali e nei sistemi di presa, nonché di tutte le aleatorietà riguardanti la complessità del processo. Inoltre, risulta anche necessario definire opportuni coefficienti in grado di considerare in maniera implicita e convenzionale altre peculiarità delle operazioni di sollevamento, come l'insorgenza di possibili effetti dinamici e di squilibri tipici dei sistemi di funi. Più nel dettaglio, si considera quanto segue:

- Carichi permanenti: coefficiente di sicurezza $\gamma_p = 1.34$ da applicare ai pesi propri strutturali e degli accessori/elementi portati secondo EN 13001-2;
- Carichi variabili: non previsti durante il sollevamento;

- Amplificazione dinamica delle azioni: da letteratura il coefficiente di amplificazione dei carichi ξ_D è compreso tra 1,1 (sollevamento statico) e 1,3 (movimenti rapidi o bruschi). Esso tiene in conto in maniera convenzionale degli effetti dinamici impulsivi che possono insorgere durante le fasi di sollevamento e di rotazione in aria del modulo;
- Effetti di squilibrio: nei sistemi multifune non carrucolati, è inoltre opportuno considerare un fattore di squilibrio ξ_S tra 1,1 e 1,2 per tenere conto di una distribuzione non uniforme del carico tra le funi;
- Materiali impiegati: coefficienti di sicurezza pari a $\gamma_{M0} = 1.05, \gamma_{M1} = 1.05, \gamma_{M2} = 1.25$, da applicare ai materiali nelle verifiche di resistenza e stabilità di profilati e connessioni, secondo NTC-2018;
- Funi e catene di sollevamento: coefficienti di sicurezza rispettivamente uguali a 4 e 3, in funzione del tipo di accessorio e delle condizioni operative, secondo EN 13155. Tali coefficienti non sono da includere nelle analisi strutturali analisi, ma sono intrinsechi nella definizione della portata del componente in esame;
- Grilli e ganci di sollevamento: coefficienti di sicurezza generalmente pari a 4. Anche in questo caso essi sono intrinsechi nella definizione della portata del componente in esame.

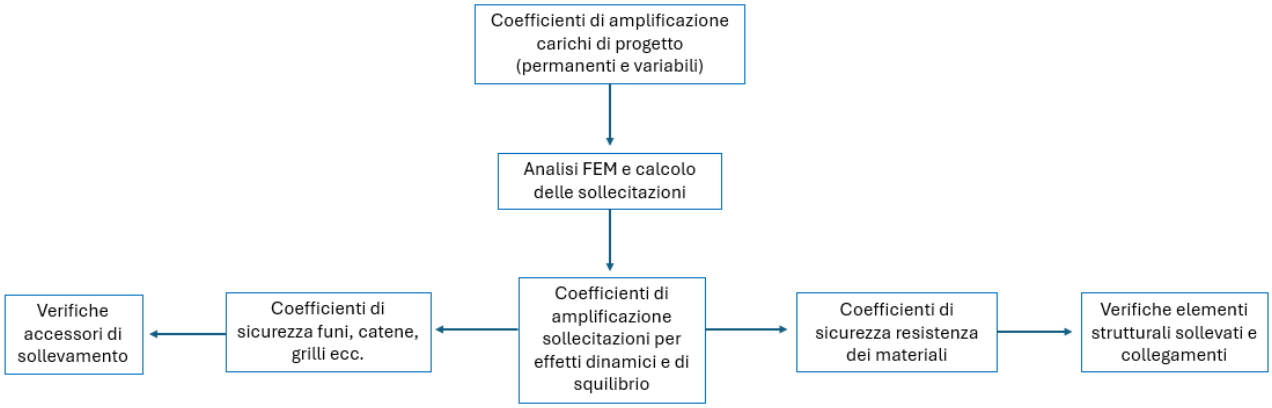


Figura 0-1: Coefficienti di sicurezza nelle analisi a sollevamento

Fasi del processo: studi preliminari, analisi strutturali e controlli di cantiere

La progettazione e la verifica strutturale in fase di sollevamento richiede un approccio metodico e interdisciplinare, articolato in diverse fasi.

1. **Studio del layout strutturale:** è essenziale conoscere nel dettaglio la geometria del modulo, i materiali utilizzati, la tipologia di connessioni impiegate, la massa complessiva e la posizione del baricentro.
2. **Studio delle attrezzature di sollevamento:** la scelta delle attrezzature disponibili (gru, funi/catene, ganci, grilli, traverse ecc.) tipicamente non è in carico al progettista strutturale che si occupa dell'analisi a sollevamento. Tuttavia, è di fondamentale importanza che esso analizzi e verifichi in maniera meticolosa che esse siano dotate di una portata adeguata in relazione al peso complessivo del modulo e che siano marcate e certificate in accordo alla normativa vigente. Si sottolinea altresì che la scelta del numero e della disposizione delle funi piuttosto che la necessità di impiegare traverse (bilancini) sia invece spesso in capo al progettista. A tal proposito, esso dovrà garantire che l'inclinazione delle funi sia ≥60° al fine di per minimizzare le componenti orizzontali della spinta, le quali inducono coazioni indesiderate nei componenti del modulo. L'impiego di traverse (bilancini) può essere d'aiuto proprio in questo senso, dal momento che consente di richiudere le spinte laterali indotte da configurazioni di funi non verticali, così da annullare gli effetti di spinta sul sistema strutturale sollevato (Figura 0-1). Infine, qualora possibile, l'impiego di un sistema di carrucole costituisce un grande vantaggio in quanto, consentendo lo scorrimento e l'auto-regolazione della lunghezza dei vari tratti di fune, permette di mantenere durante il processo un buon grado di allineamento tra il vertice del sistema di sollevamento e il centro di massa del modulo, così da evitare eccessivi squilibri, oscillazioni e rotazioni in aria del modulo, fenomeni che possono condurre in maniera disastrosa alla perdita di equilibrio e al collasso dell'assieme.

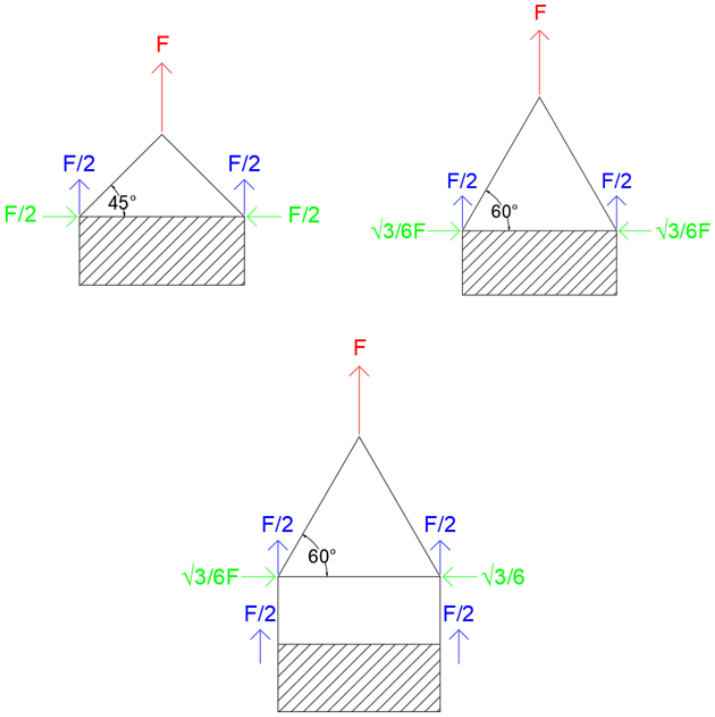


Figura 0-1: Effetto inclinazione funi e presenza traverse su spinte nel modulo

3. **Individuazione dei punti di sollevamento:** i punti di attacco devono essere scelti con attenzione per ridurre le frecce globali e le deformazioni locali, prevenire collassi per instabilità o resistenza dei componenti e per evitare l'insorgenza di stati deformativi permanenti, i quali potrebbero compromettere le successive operazioni di assemblaggio dei moduli. Inoltre, i punti di presa devono

essere tali da consentire un corretto allineamento tra il centro di massa e il vertice sommitale del sistema di sollevamento.

4. **Definizione dei carichi "generalizzati":** l'analisi dei carichi è uno step propedeutico all'analisi strutturale del modulo da sollevare. Come accennato, essi possono includere i carichi permanenti strutturali e portati, eventuali carichi variabili (azione del vento), nonché effetti di disallineamento tra centro di massa e il vertice delle funi e gli effetti dinamici impulsivi. Mediante opportuni accorgimenti e prescrizioni del progettista, alcuni di essi, in grado potenzialmente di introdurre effetti sfavorevoli, possono essere eliminati a priori. Esempi pratici sono la prescrizione di effettuare il sollevamento solo in presenza di vento trascurabile, definendo un valore soglia della velocità del vento, l'adozione di un sistema di funi carrucolate, in modo da eliminare le eccentricità di sollevamento, e l'effettuazione di un sollevamento quasi-statico, così da rendere trascurabili gli effetti dinamici o quantomeno ridurne l'entità.

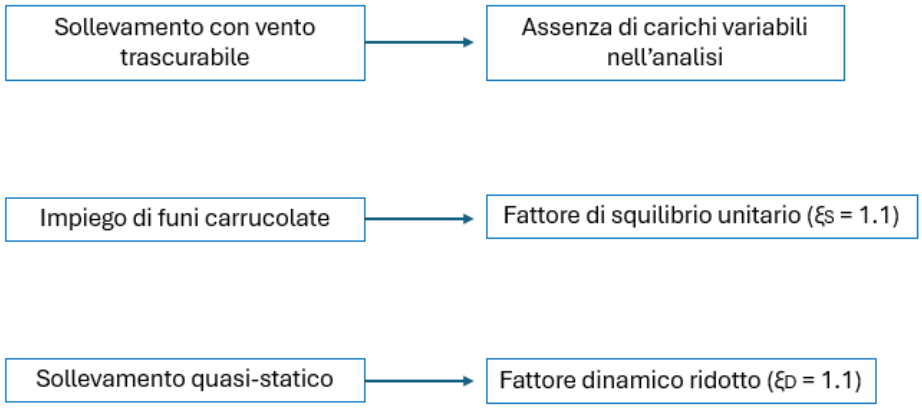


Figura 0-2: Modifica coefficienti di sicurezza con vincoli progettuali

5. **Analisi numerica:** si effettua la modellazione numerica del modulo da sollevare impiegando un opportuno software FEM. A tal proposito, è doveroso ricordare che tale modello differisce da quello usato per studiare il comportamento strutturale in esercizio, in quanto in fase di sollevamento il problema strutturale risulta caratterizzato da condizioni al contorno di natura differente. In linea generale, la struttura da sollevare viene modellata mediante l'impiego di elementi BEAM e TRUSS, le funi sono schematizzate da elementi tipo TRUSS solo tesi, mentre le eventuali traverse (bilancini) da elementi TRUSS in grado di lavorare tesi-compressi. Il vertice del sistema di funi (punto di attacco alla gru) costituisce un vincolo a terra in grado di impedirne ogni tipo di spostamento. In aggiunta, al fine di prevenire l'insorgenza di labilità del sistema strutturale, può essere necessaria l'aggiunta di ulteriori vincoli laterali fittizi in corrispondenza del sistema di funi: non essendo questi ultimi vincoli fisici, bisognerà garantire che le rispettive reazioni vincolari risultino nulle o trascurabili, condizione ottenuta tipicamente allineando sulla verticale il centro di massa del modulo con il vertice delle funi. Si sottolinea che, nei casi in cui il processo di sollevamento sia anticipato da una fase di rotazione a terra del modulo, risulta necessario effettuare una doppia modellazione: la prima che riproduce lo stato inziale del modulo posto orizzontalmente ad incipiente rotazione, mentre la seconda si identifica con il sollevamento propriamente detto, con il modulo sospeso in posizione finale (verticale) e sorretto unicamente dal sistema di funi.

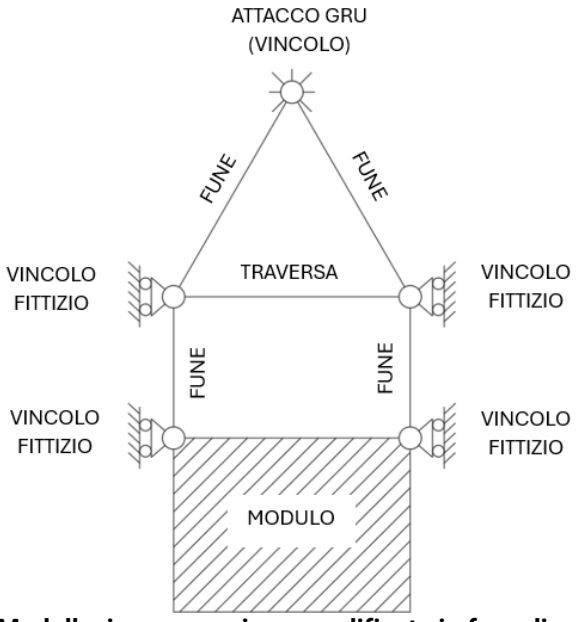


Figura 0-3: Modellazione numerica semplificata in fase di sollevamento

6. **Verifiche strutturali:** le verifiche strutturali vengono effettuate sulla base dello stato tenso-deformativo del sistema ottenuto dal modello di calcolo, opportunamente amplificato mediante l'introduzione dei coefficienti di sicurezza descritti in precedenza. Esse riguardo in generale:
   - Verifica di resistenza a trazione delle funi;
   - Verifiche di resistenza e stabilità delle traverse compresse;
   - Verifica di resistenza dei grilli/ganci tra le funi e tra le funi e il modulo sulla base delle tabelle di portata fornite dal produttore e conformi al quadro normativa;
   - Verifica degli ancoraggi sulla struttura ("orecchie" di sollevamento): verifica a flessione e rifollamento delle piastre, verifica delle saldature, verifica a taglio-trazione dei bulloni, verifiche locali dei profili metallici in corrispondenza dell'interfaccia con il sistema di ancoraggio;
   - Verifiche degli elementi strutturali e dei relativi collegamenti in termini di resistenza, stabilità, deformabilità, insorgenza di stati di plasticizzazione e di deformazione localizzati.

7. **Procedure di sicurezza e controlli di cantiere:** a valle del processo di progettazione e verifica del transitorio di sollevamento, risulta necessario mettere in pratica una serie di procedure e controlli di cantiere preliminari al sollevamento, durante il sollevamento e a processo completato. Sebbene questa fase sia di pertinenza della direzione lavori, dell'impresa e del coordinatore della sicurezza, è buona pratica che anche il progettista strutturale assista o resti al corrente di tali controlli. Più nel dettaglio, essi identificano con:
   - Ispezioni visive sulla struttura e sugli accessori di sollevamento prima del sollevamento;
   - Verifica documentale delle certificazioni per la gru, ganci, funi, catene ecc.;
   - Controllo che il sistema e le procedure di sollevamento siano conformi alle indicazioni del progettista;
   - Prova di sollevamento a carico ridotto per validare il sistema;
   - Monitoraggio visivo, e se possibile, strumentale del modulo durante la procedura;
   - Ispezioni visive sulla struttura e sugli accessori di sollevamento a valle del sollevamento;
   - In presenza di strutture costituite dall'assemblaggio di più moduli, controllo che lo stato del modulo posto in opera sia tale da garantire l'assemblaggio con i moduli adiacenti.

Infine, si sottolinea come le verifiche indicate nei primi tre punti siano a carico del Fornitore che fornisce le relative tabelle di portata e la garanzia del rispetto della “qualità della filiera”, mentre il progettista strutturale si occupa delle analisi a sollevamento e delle rimanenti verifiche e di redigere per ogni sottostruttura da sollevare, mediante un disegno dedicato nel quale indica la posizione del baricentro, i tiri nelle funi. Sarebbe opportuno inoltre fornire un range di tolleranza per i valori di tiro nelle funi, soprattutto nel caso in cui il progettista non assista personalmente alle procedure di cantiere.

Caso Studio: Sollevamento della Cappa di Aspirazione dell'Acciaieria Feralpi

Descrizione generale dell'opera

Oggetto del presente capitolo è l'analisi a sollevamento dei moduli costituenti le strutture metalliche di supporto della nuova cappa di aspirazione fumi dell'acciaieria Feralpi a Calvisano (BS). Le piante e le viste sono riportate rispettivamente in Figura 0-1, Figura 0-2 e Figura 0-3.

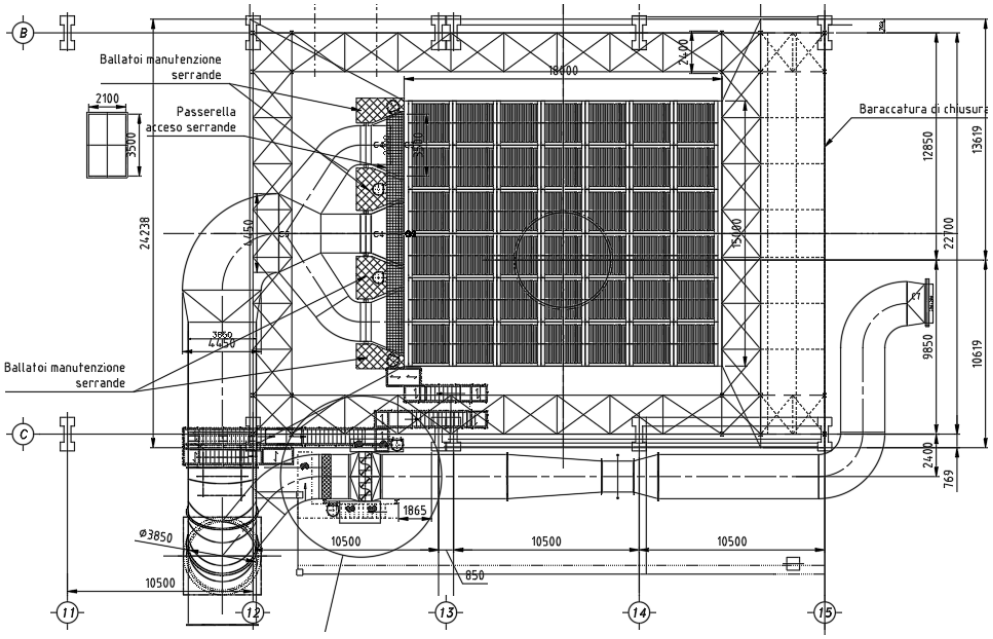


Figura 0-1: Nuova cappa di aspirazione – pianta

La progettazione strutturale relativa alla sia fase di esercizio e che al transitorio di sollevamento è stata effettuata da **SCL Ingegneria Strutturale**.

SCL Ingegneria Strutturale è una società di ingegneria con sede a Milano che opera dal 1992 nel campo dell'ingegneria strutturale in Italia e in ambito internazionale fornendo servizi di progettazione e consulenza. La società è composta da uno Studio Associato e da una Società di Servizi.

Il team di collaboratori, principalmente costituito da ingegneri strutturisti, è cresciuto progressivamente nel corso degli anni e si avvale sia di 21 professionisti che operano full time all'interno di SCL, sia di una rete di collaboratori esterni le cui competenze, in ambito interdisciplinare, consentono di offrire progettazioni complete "chiavi in mano" in contesti complessi e diversificati.

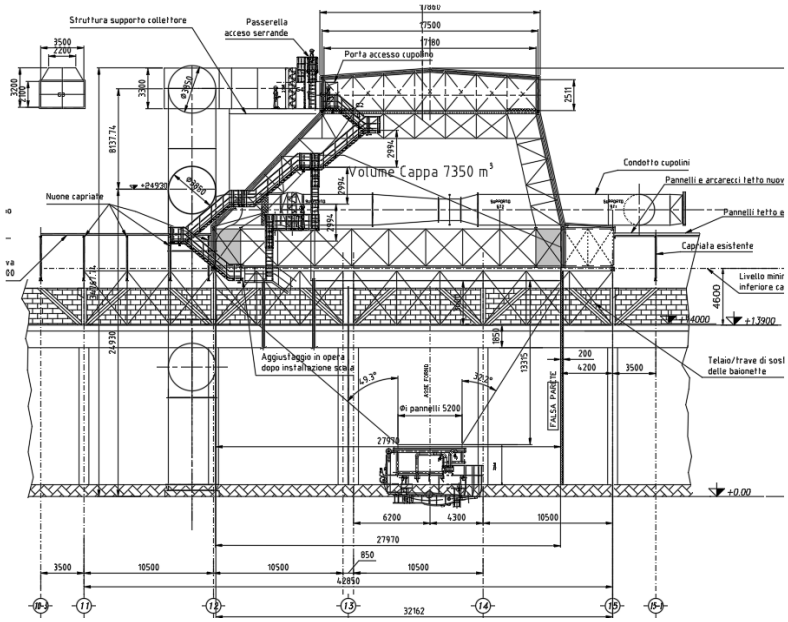


Figura 0-2: Nuova cappa di aspirazione – vista longitudinale

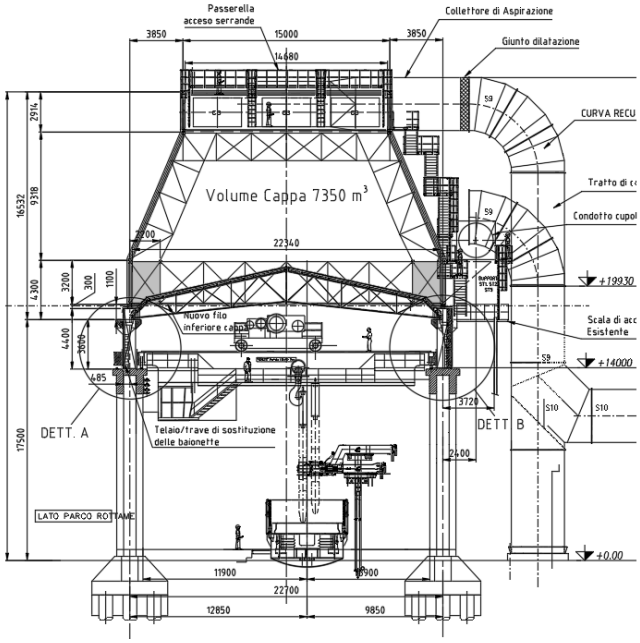


Figura 0-3: Nuova cappa di aspirazione – vista trasversale

Per maggiore chiarezza, nel seguito si farà riferimento specifico a 3 diverse porzioni della cappa, tutte realizzate in acciaio S355JR, indicate rispettivamente con i nomi di cupolino, obelisco e telaio di base (Figura 0-4).

Tali porzioni risultano a loro volta suddivise in diversi moduli che verranno sollevati mediante una gru e posti al di sopra di apposite travature reticolari posizionate sul capannone sottostante, per poi essere assemblati in modo da andare a comporre la configurazione definitiva.

In particolare, le strutture del cupolino costituiscono un unico modulo, l'obelisco risulta suddiviso in 3 diversi moduli, mentre il telaio di base è formato da 2 moduli distinti. Le travature reticolari poste al di sotto sono costituite da 4 moduli, 2 per ciascun lato della cappa.

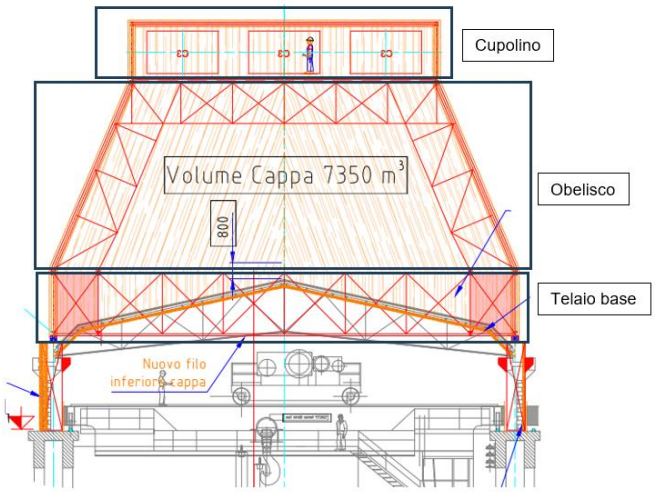


Figura 0-4: Componenti cappa – cupolino, obelisco e telaio di base

Il telaio di base (Figura 0-5) ha una lunghezza complessiva in direzione longitudinale di 32.55 m e uno sviluppo in direzione trasversale di 22.9 m. Ciascun lato del telaio di base è costituito da due travi reticolari tra loro parallele, collegate sopra e sotto da opportune controventature orizzontali ed internamente da controventi a croce, atti a presiedere l'insorgenza di possibili deformazioni torsionali dei lati del telaio. I lati del telaio sono poi connessi tra loro mediante dei puntoni tubolari al fine di evitare possibili distorsioni della struttura. Il telaio ha la funzione di trasferire tutti i carichi agenti sulle strutture di supporto della cappa alle travature reticolari sottostanti in corrispondenza di 6 distinti punti di appoggio.

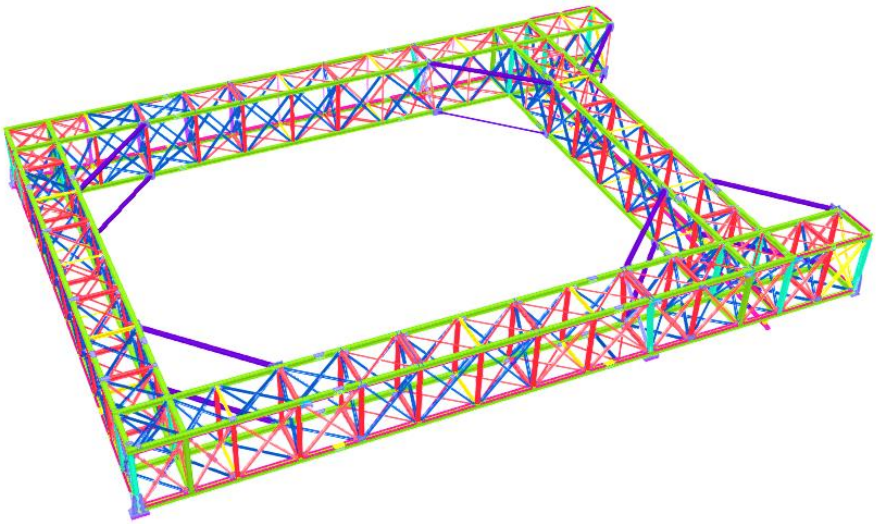


Figura 0-5: Dettaglio del telaio di base

Al fine di garantire un trasferimento ottimale delle azioni dal telaio di base alle travature sottostanti, in corrispondenza dei punti di appoggio della cappa sono presenti delle baionette irrigidite. Oltre che in prossimità degli appoggi della cappa, le baionette sono introdotte anche all'inizio e alla fine di ogni travatura.

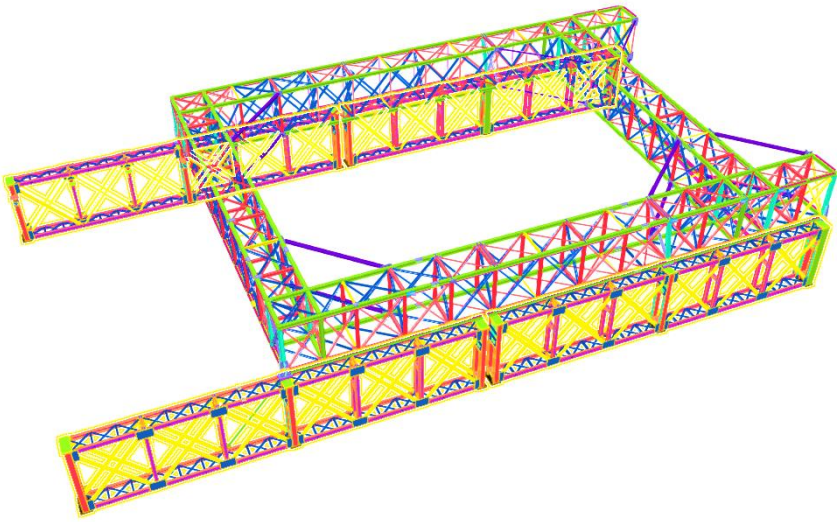


Figura 0-6: Dettaglio delle travature reticolari e delle baionette

Al di sopra del telaio di base, vengono installati gli altri moduli della cappa che vanno a costituire l'obelisco e il cupolino soprastante, il quale possiede dimensioni in pianta di 17.66 m (longitudinale) per 15.16 m (trasversale). In definitiva, l'altezza complessiva della cappa risulta pari a circa 15.5 m.
Lo schema portante principale della cappa consiste in 5 capriate reticolari che si sviluppano trasversalmente e da 4 capriate secondarie che giacciono nel piano longitudinale (Figura 0-7). Tali capriate lavorano sostanzialmente come archi compressi in grado di trasferire le sollecitazioni agenti sull'obelisco e quelle provenienti dal cupolino soprastante al telaio di base, il quale a sua volta le trasferisce alle travature reticolari, per poi essere scaricate sulle strutture del capannone.

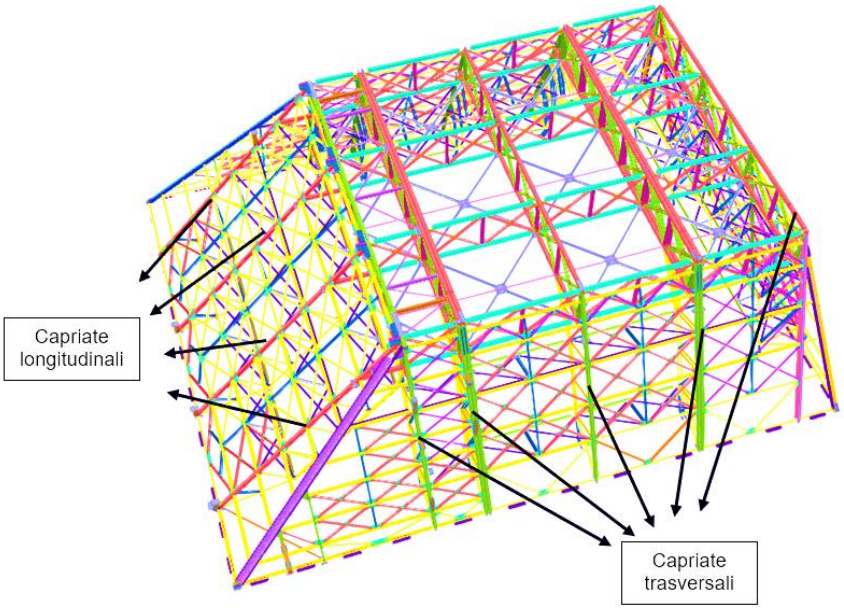


Figura 0-7: Dettaglio dell'obelisco

Infine, per quanto concerne le strutture del cupolino mostrate in Figura 0-8, anche in questo caso si prevedono degli schemi reticolari sia in direzione longitudinale che trasversale, oltre che un sistema di controventi di falda sulla copertura.

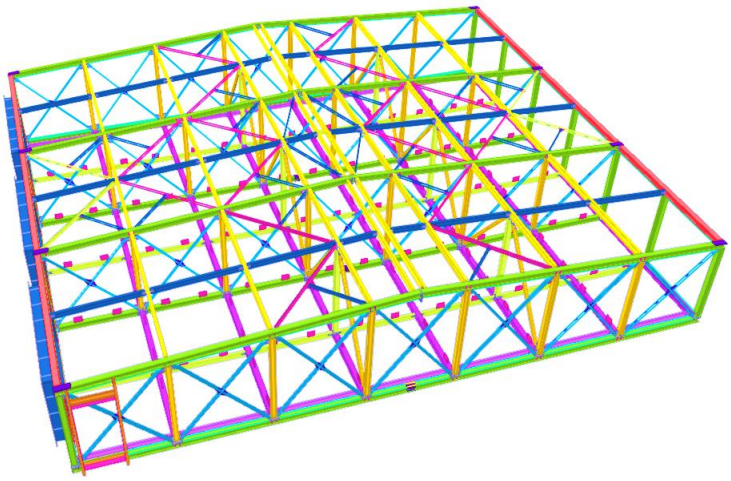


Figura 0-8: Dettaglio del cupolino

Tutte le superfici laterali dell'obelisco, del cupolino e del telaio di base vengono poi interamente pannellate dall'esterno.

Definizione schemi di sollevamento e analisi numeriche

Per la modellazione numerica FEM è stato impiegato il software di calcolo strutturale **Midas GEN**. A titolo esemplificativo, in Figura 0-9 è riportato il modello di calcolo globale impiegato per le analisi e le verifiche in esercizio.
In generale, le strutture portanti della cappa (esclusi i controventi) e le briglie delle travature reticolari sono modellati con elementi finiti tipo BEAM in corrispondenza dei loro assi baricentrici, mentre tutti i controventi presenti sono modellati mediante elementi tipo TRUSS.

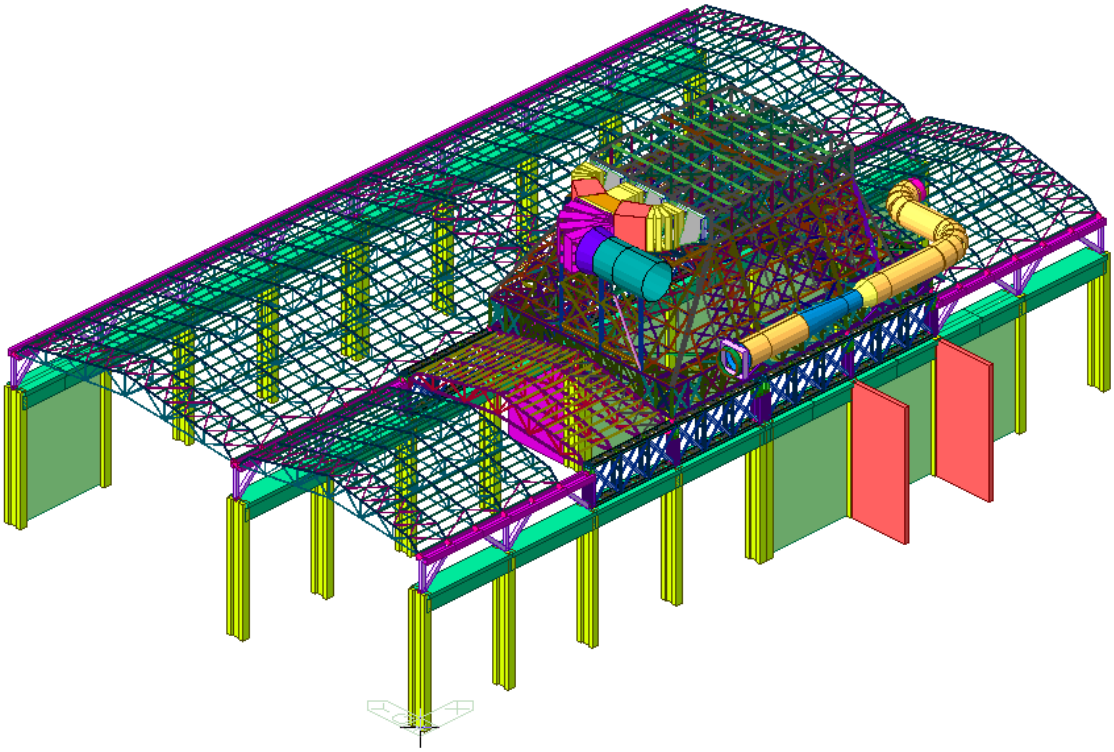


Figura 0-9: Modello numerico globale in Midas GEN – comportamento in esercizio

I moduli pre-assemblati a terra e poi sollevati e i relativi pesi complessivi risultano essere i seguenti:

- Telaio di base: Modulo 1 (sinistro) - P = 48 ton
- Telaio di base: Modulo 2 (destro) - P = 53 ton
- Obelisco: Modulo 1 (sinistro) - P = 70 ton
- Obelisco: Modulo 2 (centrale) - P = 43 ton
- Obelisco: Modulo 3 (destro) - P = 45 ton
- Cupolino: Modulo 1 (unico) - P = 74 ton
- Travatura reticolare: Moduli 1-2-3-4 (circa identici) - P = 38 ton

Per il sollevamento si dispone di un sistema di funi diversamente organizzate a seconda del modulo da sollevare, il cui vertice deve però risultare allineato di volta in volta con il centro di massa del modulo e la cui inclinazione consentita rispetto all'orizzontale risulta uguale o maggiore di 60°; tale condizione viene posta al fine di evitare l'insorgenza di spinte orizzontali eccessive ed indesiderate.
Inoltre, all'occorrenza, può essere impiegato anche un bilancino (traversa) orizzontale di portata a compressione pari a 140 ton ad estensione regolabile fino ad un massimo assunto pari a 14 m in sede di calcolo. La presenza del bilancino consente di evitare di disporre un sistema di funi che risulti inclinato in

entrambi i piani verticali, sempre con l'obiettivo di minimizzare il regime di spinte orizzontali a cui risulta soggetto ciascun modulo.
Durante il processo di sollevamento, i carichi agenti sui moduli sono rappresentati dal peso proprio degli elementi strutturali (+25% per stimare contributo piastre ed elementi di collegamento) e dal peso delle pannellature presenti. Il peso totale dei pannelli di tamponamento risulta pari a 0.674 kN/m^2. Essi risultano installati su tutta la superficie laterale della cappa.
Non si considera invece la presenza di alcun carico variabile, come quello dovuto all'azione del vento sul modulo, dal momento che sussiste la prescrizione progettuale di effettuare il sollevamento esclusivamente in assenza di vento ed altri fenomeni atmosferici.
A valle dello studio dello schema di sollevamento relativo a ciascun modulo, sono stati definiti vari modelli di calcolo parziali, i quali includono le strutture del modulo da sollevare, il sistema di funi impiegato per il sollevamento e, ove presente, il bilancino (da Figura 0-10 a Figura 0-16).
Per quanto concerne la modellazione numerica degli elementi strutturali, vale quanto descritto in precedenza, mentre le funi e il bilancino (traversa) sono modellati mediante elementi finiti tipo TRUSS rigidi e privi di peso con una sezione circolare standard, al solo scopo di garantire un corretto trasferimento delle azioni per la valutazione dello stato di sollecitazione presente negli elementi costituenti il modulo. Le funi poste al di sopra del bilancino non sono invece incluse nel modello di calcolo.
Lo schema di vincoli presenti differisce da quello impiegato nel modello globale per le analisi in esercizio, in quanto dovrà riprodurre fedelmente lo schema statico a cui è soggetto il modulo durante il sollevamento. In particolare, per i moduli non provvisti del bilancino, viene introdotto un vincolo di incastro nel punto di sommitale di intersezione delle funi, mentre, ove presente il bilancino, vengono introdotti 2 vincoli di incastro in corrispondenza delle estremità di quest'ultimo.
Infine, al solo scopo di eliminare ogni fonte di labilità nel modello di calcolo, vengono introdotti dei vincoli fittizi alla traslazione orizzontale. Risulterà chiaramente necessario assicurarsi che la reazione vincolare esercitata da tali vincoli sulla struttura risulti nulla o trascurabile, situazione perseguibile allineando il vertice del sistema di sollevamento al centro di massa del modulo da sollevare (condizione che effettivamente verrà attuata nella realtà grazie alla presenza delle carrucole).

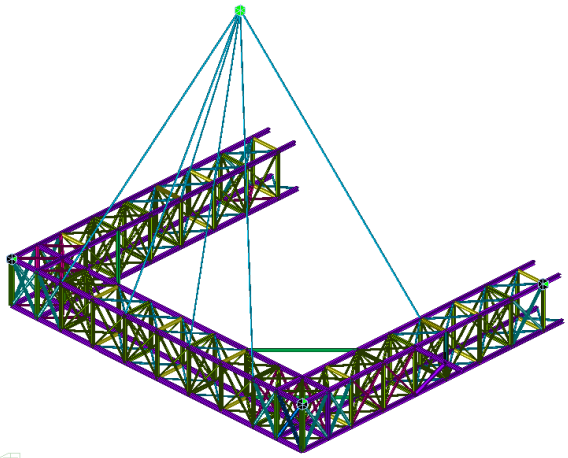


Figura 0-10: Telaio di base – Modulo 1

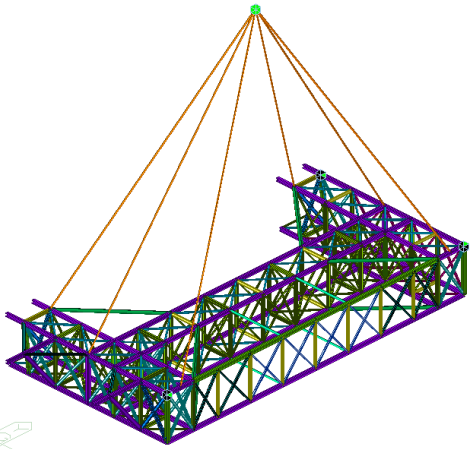


Figura 0-11: telaio di base – Modulo 2

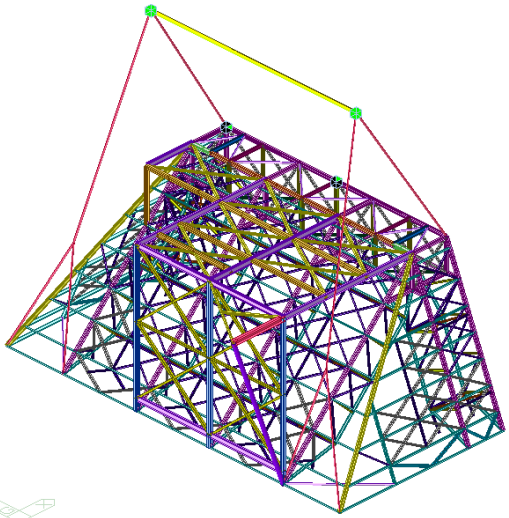


Figura 0-12: Obelisco – Modulo 1

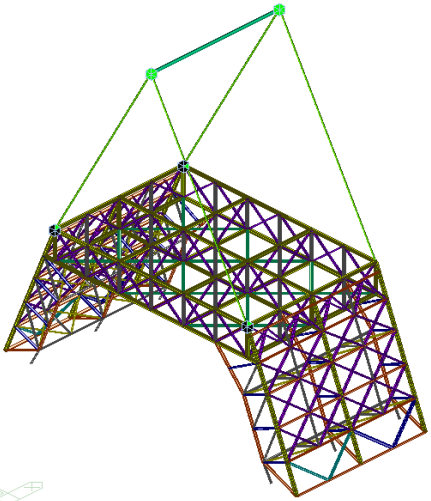


Figura 0-13: Obelisco – Modulo 2

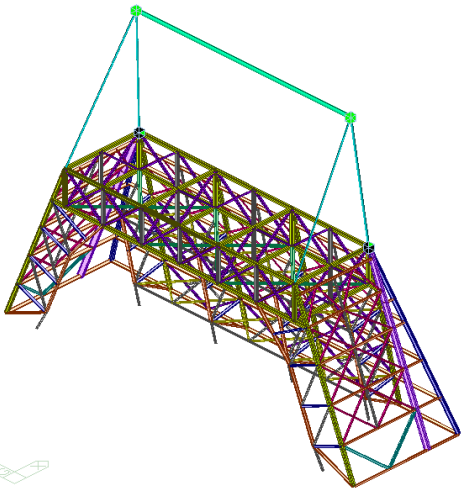


Figura 0-14: Obelisco – Modulo 3

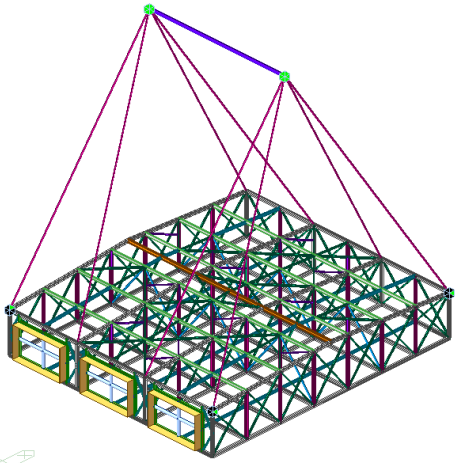


Figura 0-15: Cupolino – Modulo 1

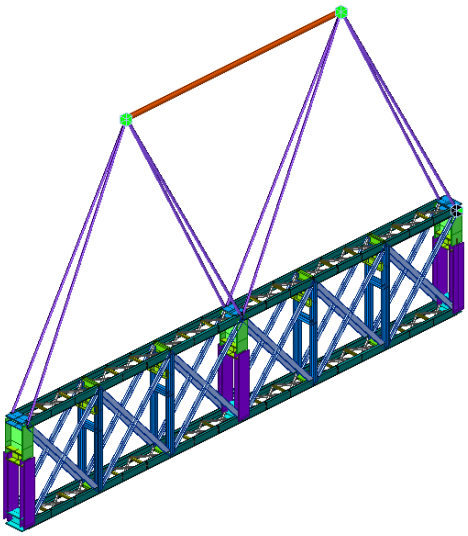


Figura 0-16: Travatura reticolare – Moduli 1 a 4

Verifiche strutturali

Da Figura 0-17 a Figura 0-23 si riportano le mappe di sfruttamento per gli elementi costituenti ciascun modulo della cappa durante le fasi di sollevamento, ottenute in accordo alla normativa di riferimento secondo le procedure discusse in precedenza. L'amplificazione complessiva considerata per le azioni è pari a quella da prevedere in fase di sollevamento in assenza di carico da vento, per un sistema carrucolato (no squilibri) e per un processo lento (quasi-statico). Si ha in definitiva:

$$\gamma = \gamma_p \, \xi_D \xi_S = 1.34 \; x \; 1.1 \; x \; 1 = 1.474 \; \cong 1.5$$

Da Figura 0-24 a Figura 0-30 sono invece mostrato i massimi tiri nelle funi che, a valle dell'applicazione dei medesimi coefficienti di amplificazione dei carichi, verranno impiegati per la verifica delle zone di ancoraggio ("orecchie" di sollevamento), di cui si riporta un esempio di "stress analysis" in Figura 0-31.

Esulano invece dall'incarico di **SCL Ingegneria Strutturale** (progettista strutturale), e quindi dai contenuti del presente elaborato, le verifiche di tutti i componenti atti a realizzare il sistema di sollevamento, ossia: funi, traversa (bilancino), grilli e la gru.

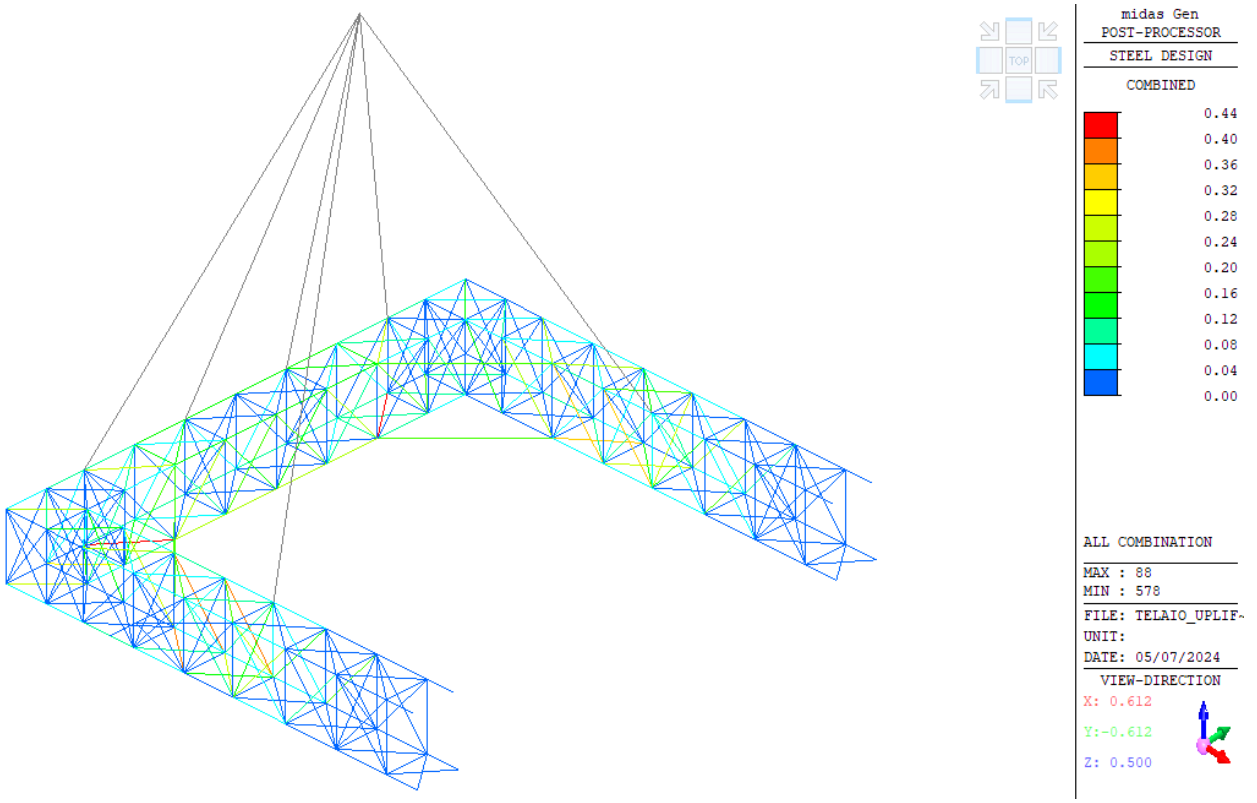


Figura 0-17: Telaio di base – Modulo 1

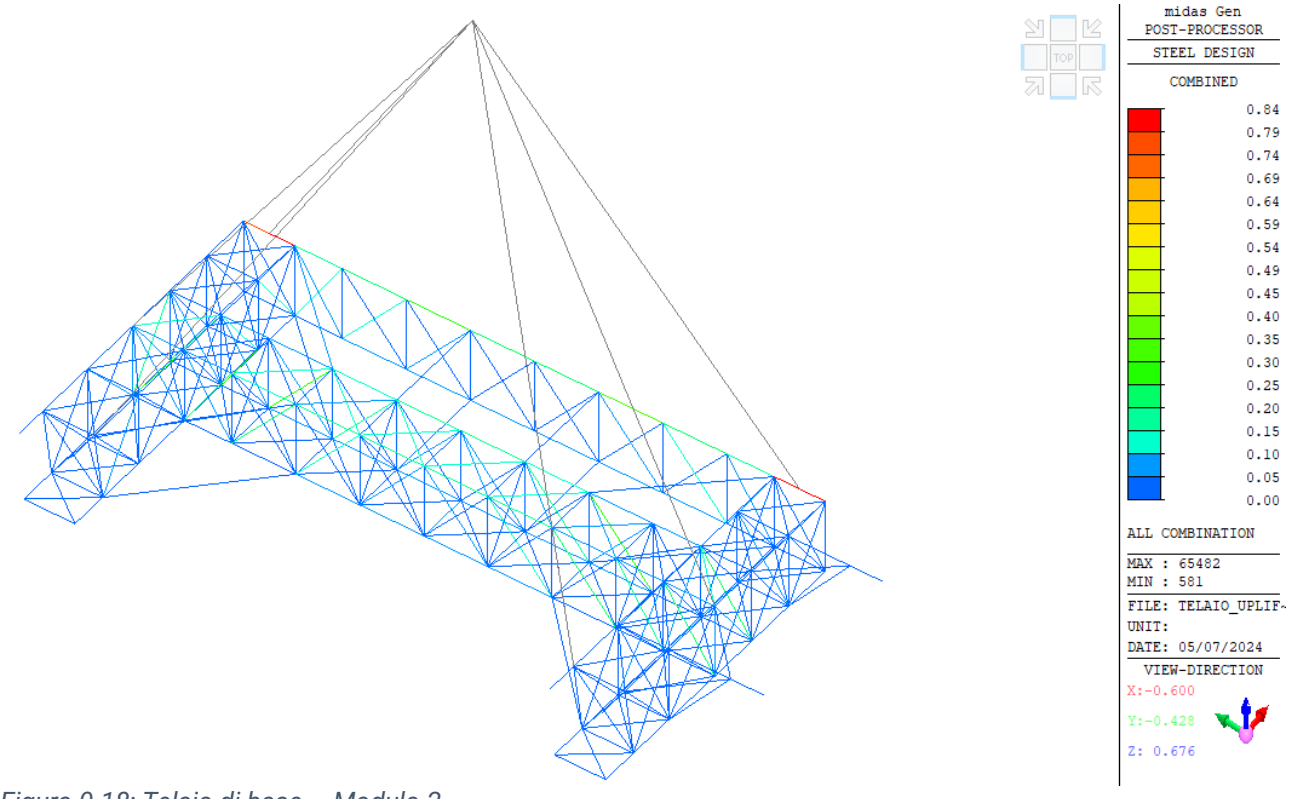


Figura 0-18: Telaio di base – Modulo 2

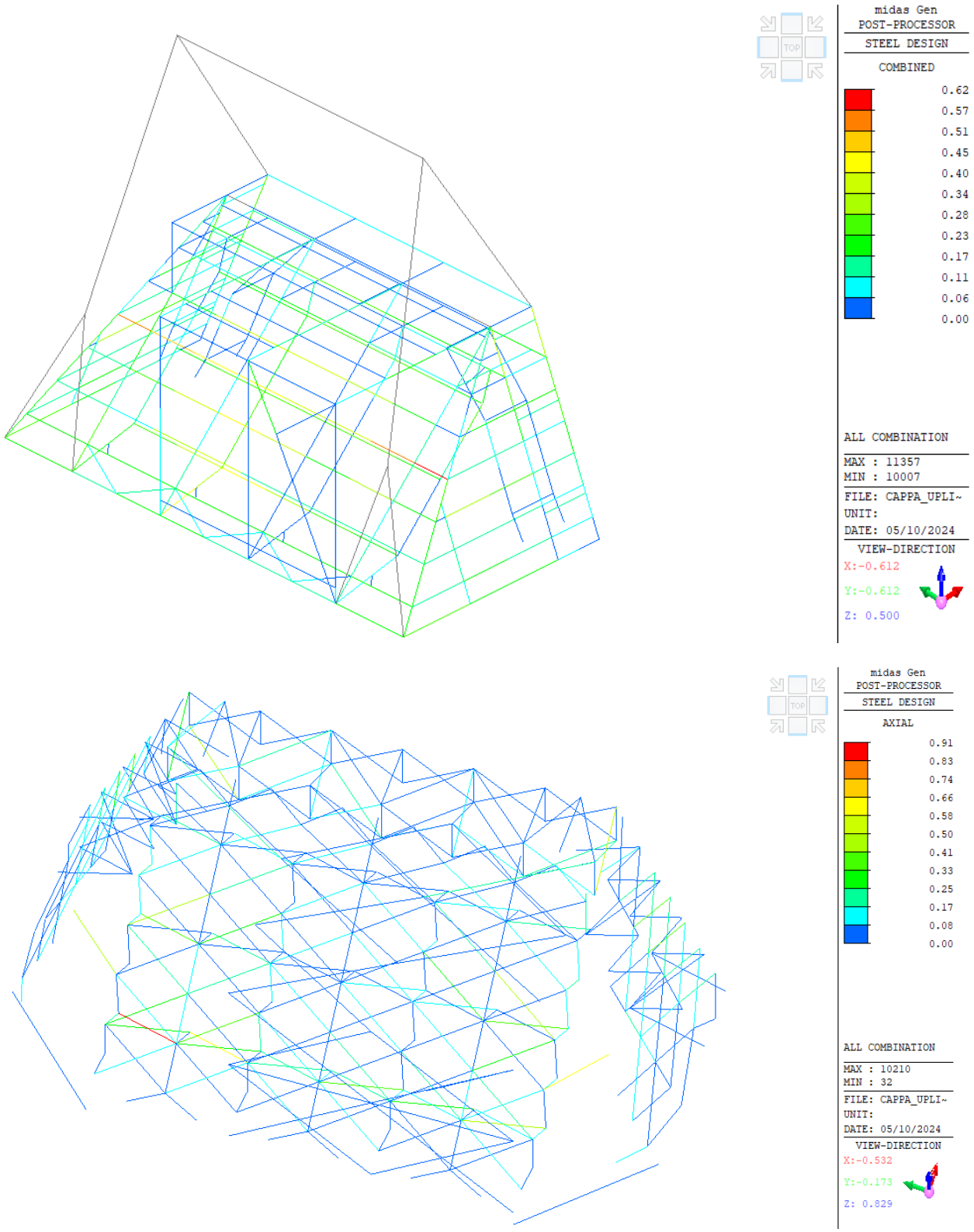


Figura 0-19: Obelisco – Modulo 1

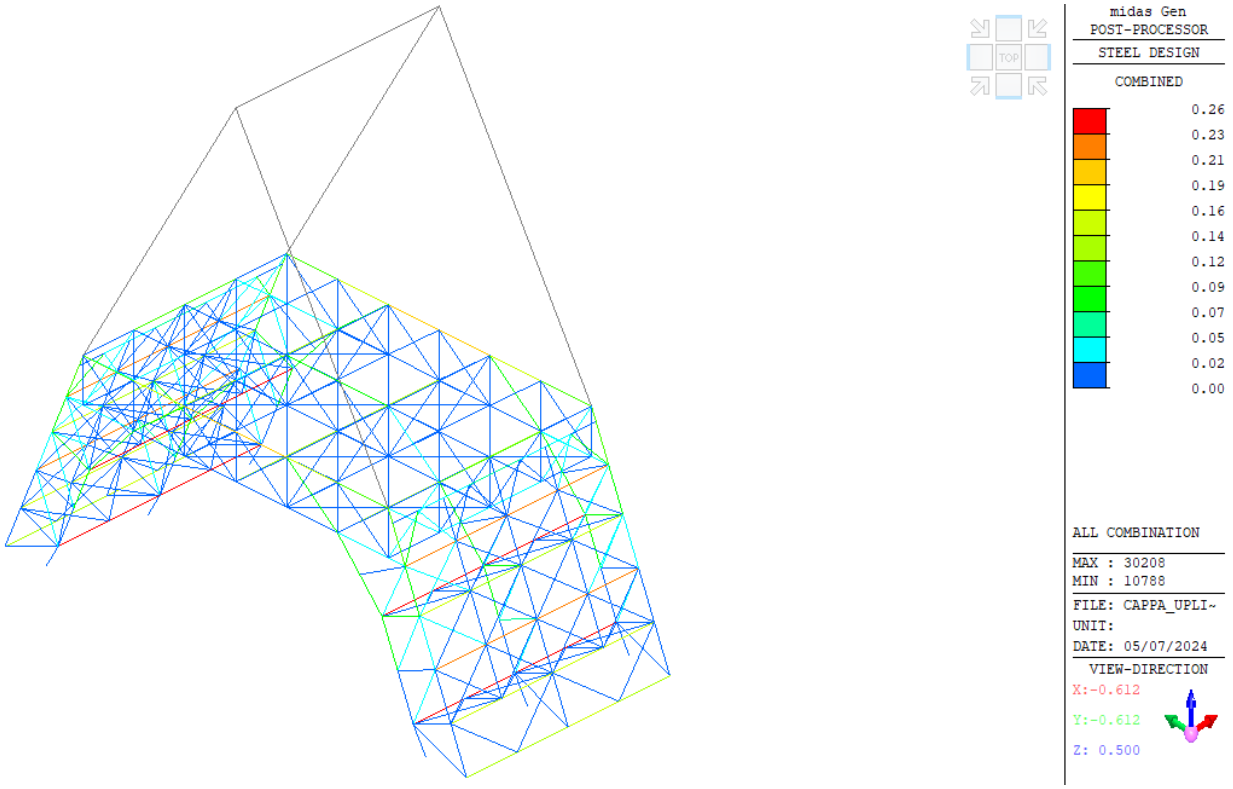


Figura 0-20: Obelisco – Modulo 2

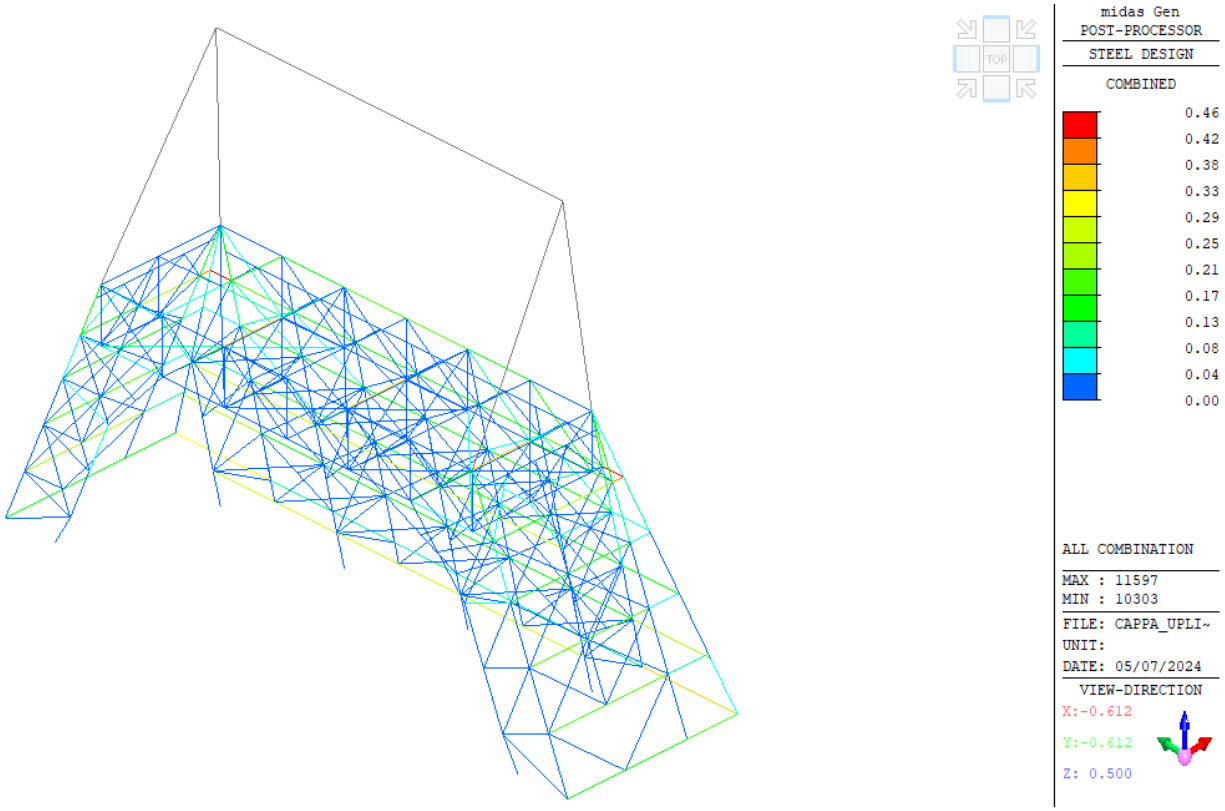


Figura 0-21: Obelisco – Modulo 3

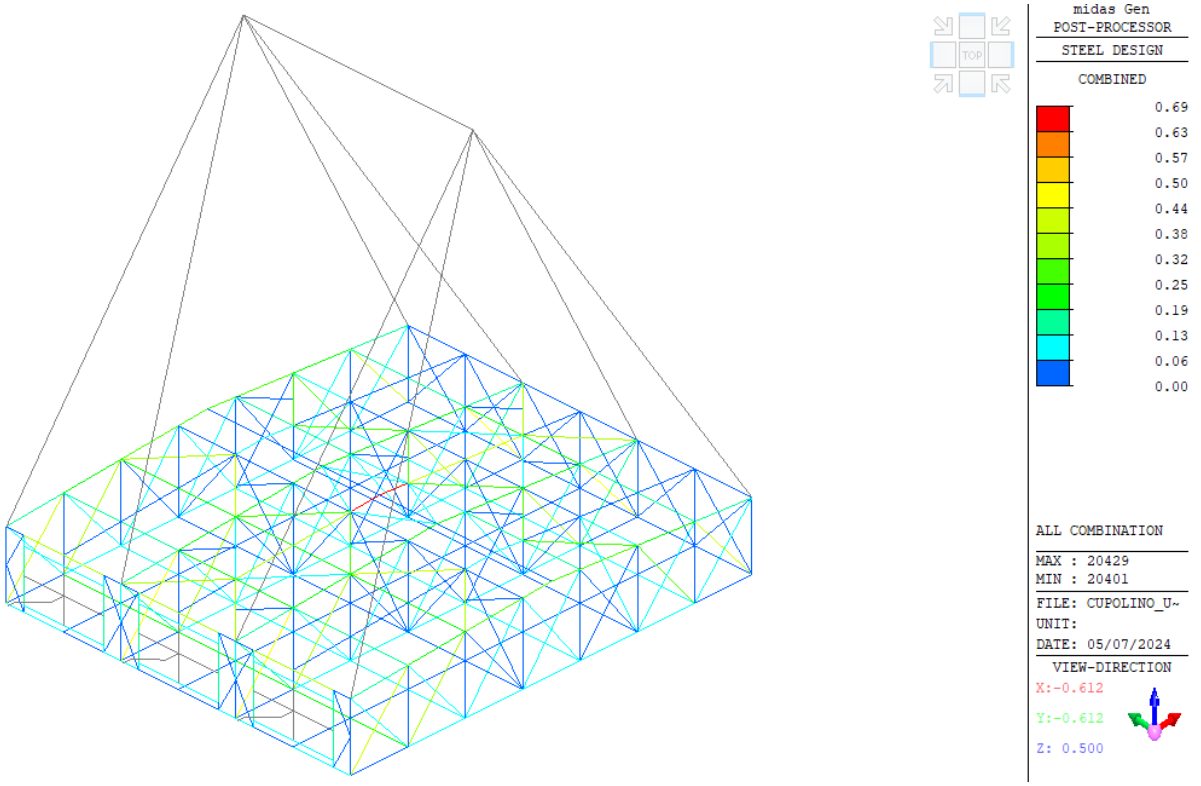


Figura 0-22: Cupolino – Modulo 1

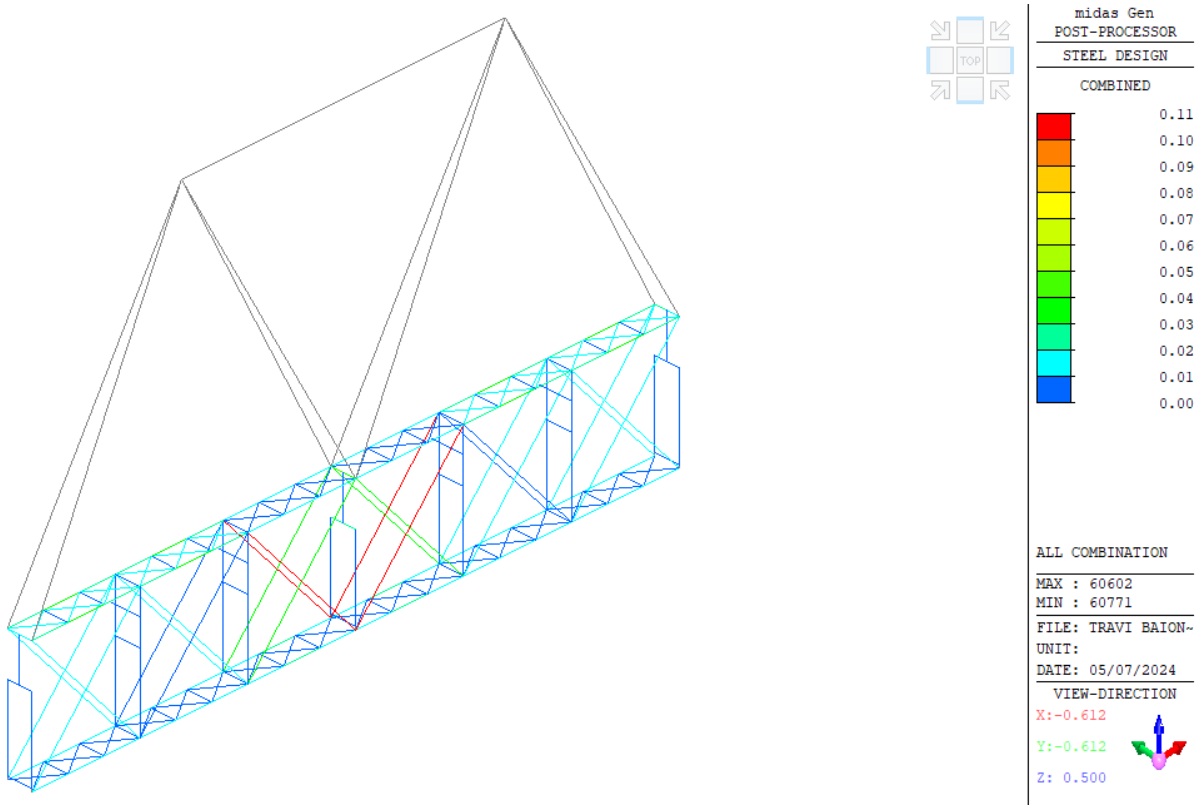


Figura 0-23: Travatura reticolare – Moduli 1 a 4

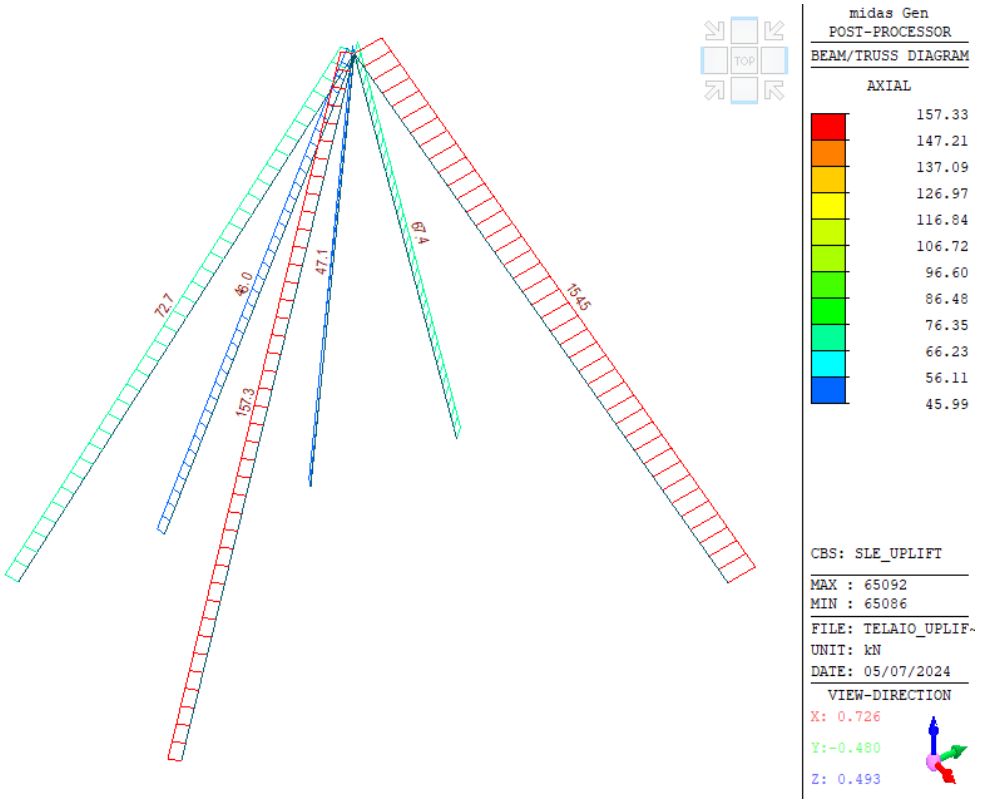


Figura 0-24: Tiro max. funi: Telaio di base – Modulo 1

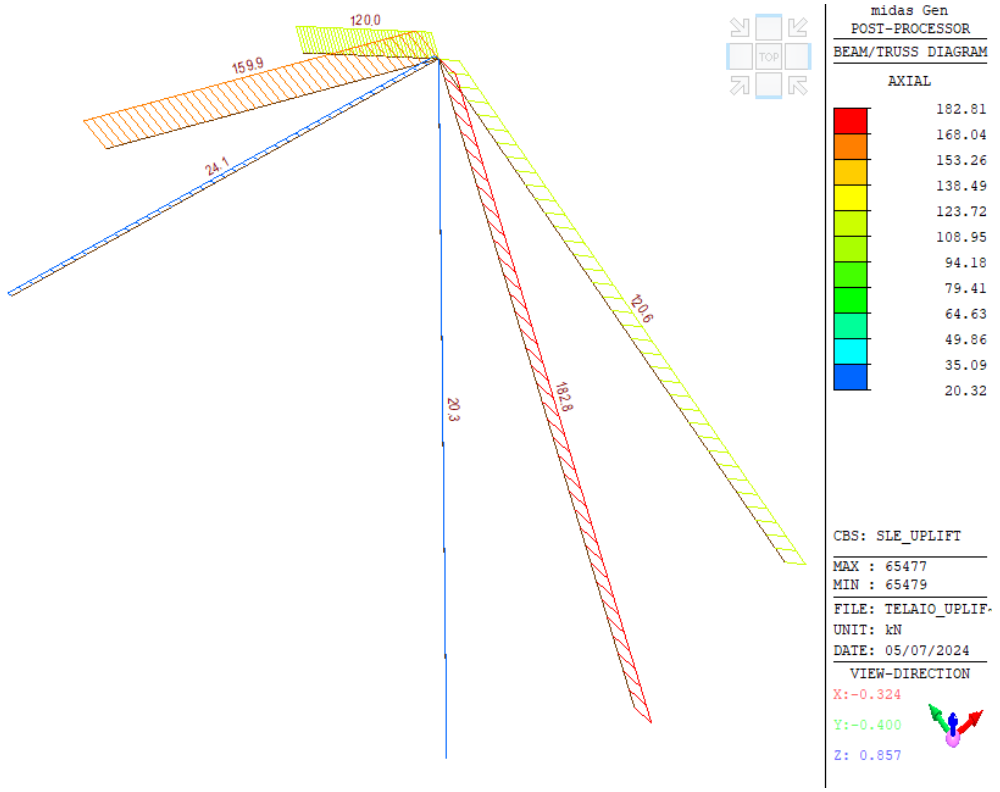


Figura 0-25: Tiro max. funi: Telaio di base – Modulo 2

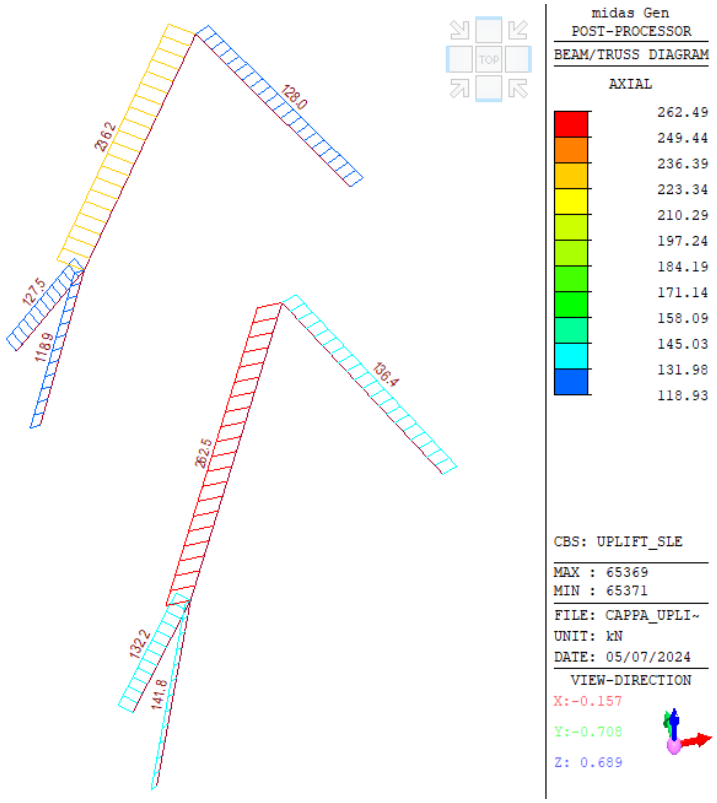


Figura 0-26: Tiro max. funi: Obelisco – Modulo 1

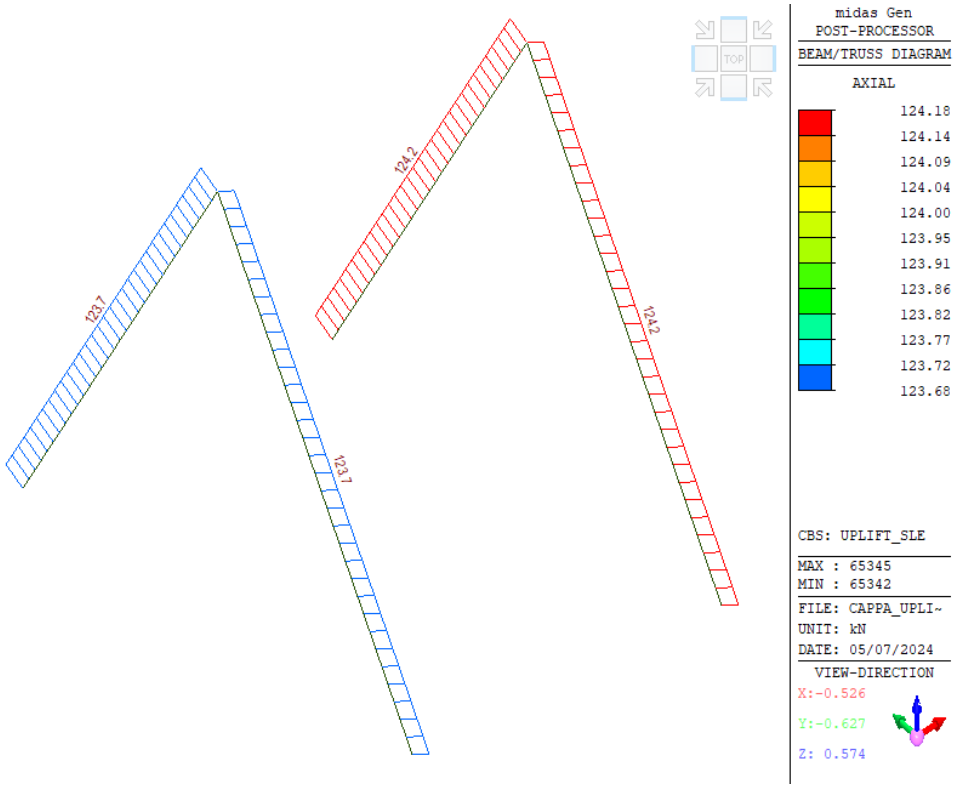


Figura 0-27: Tiro max. funi: Obelisco – Modulo 2

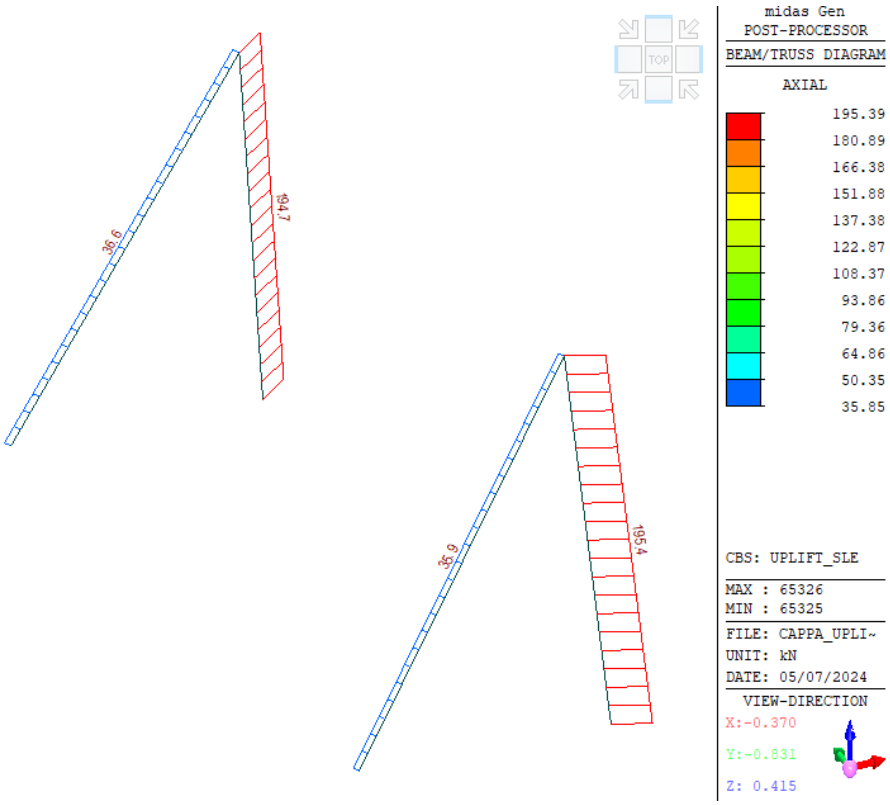


Figura 0-28: Tiro max. funi: Obelisco – Modulo 3

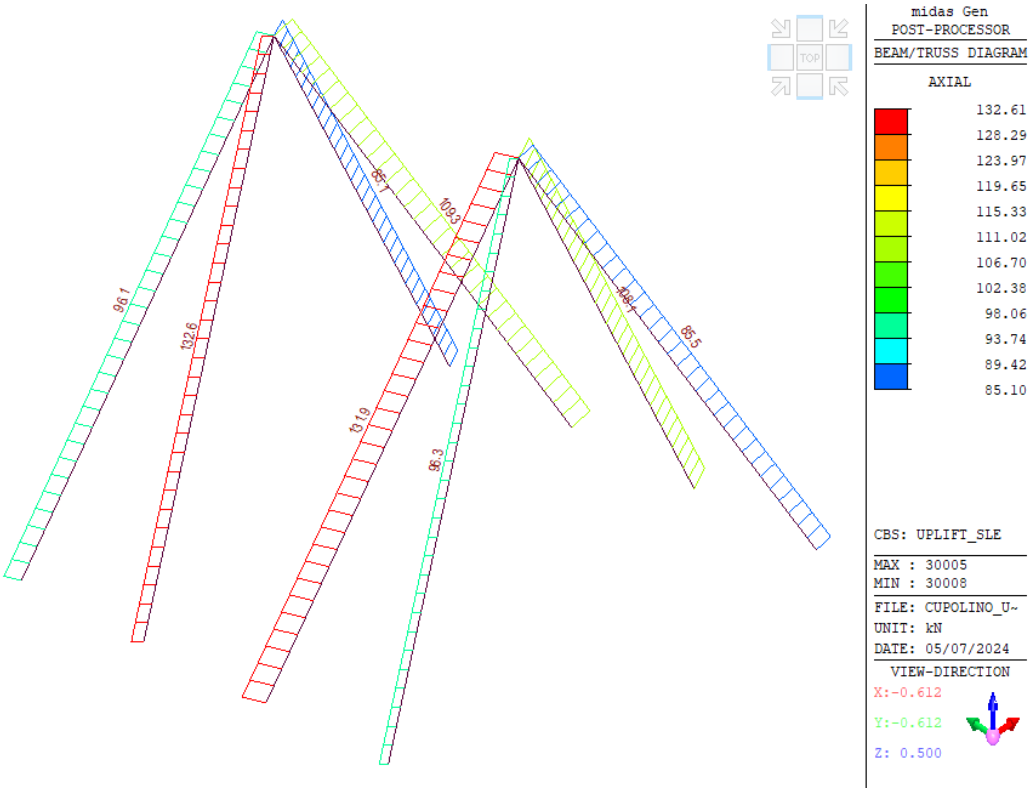


Figura 0-29: Tiro max. funi: Cupolino – Modulo 1

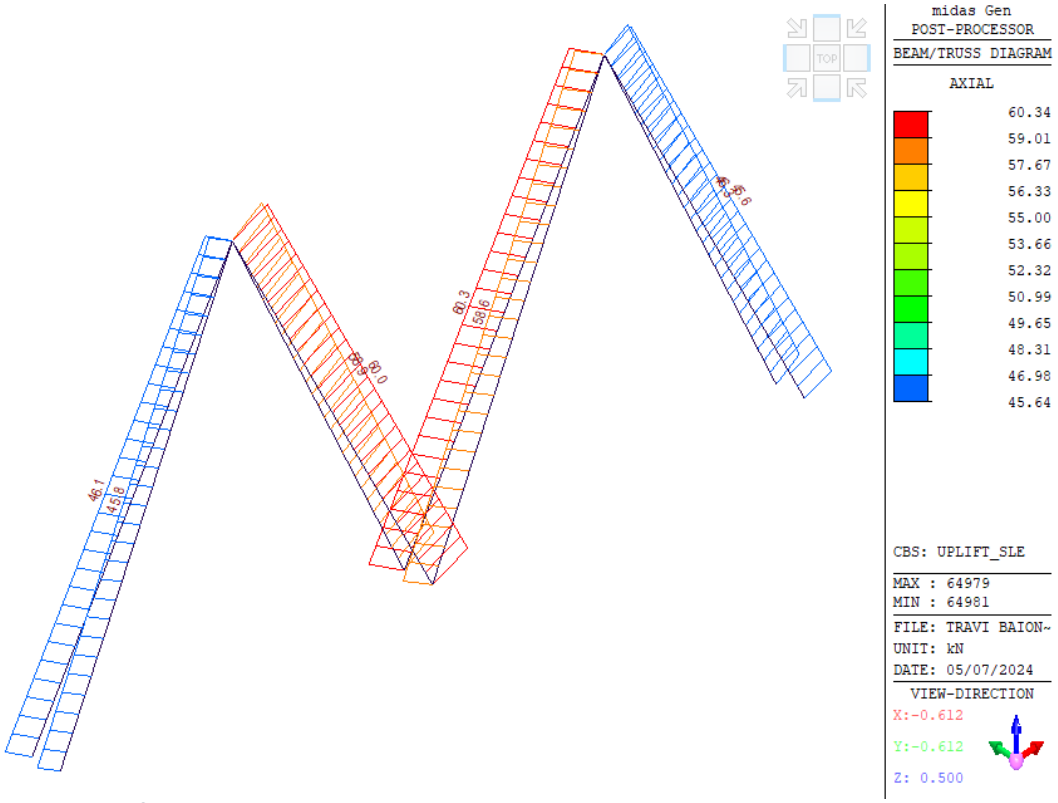


Figura 0-30: Tiro max. funi: Travatura reticolare – Moduli 1 a 4

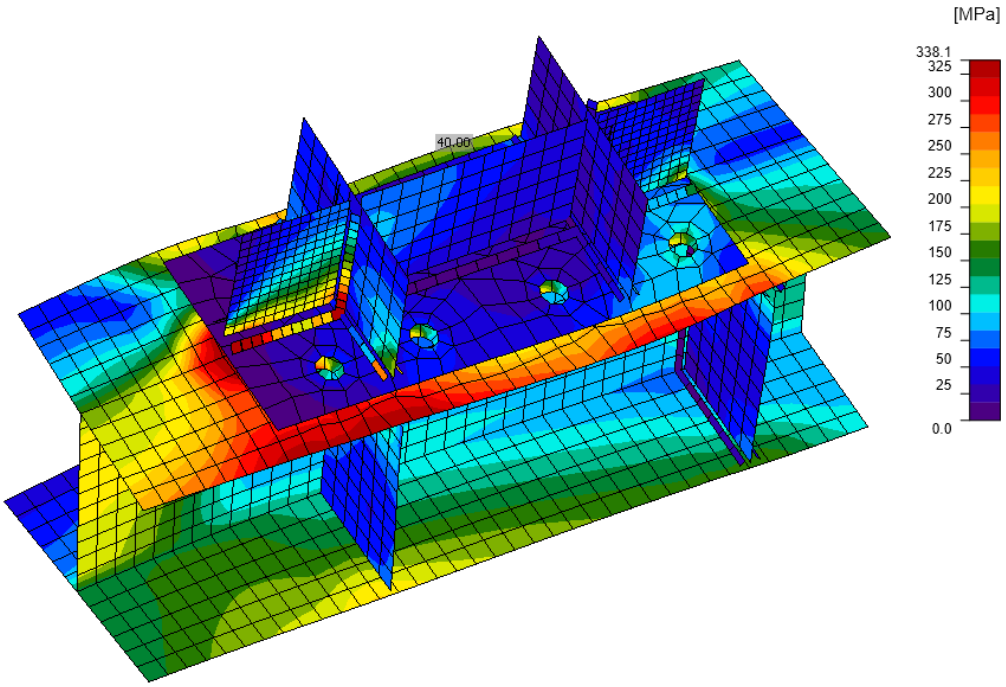
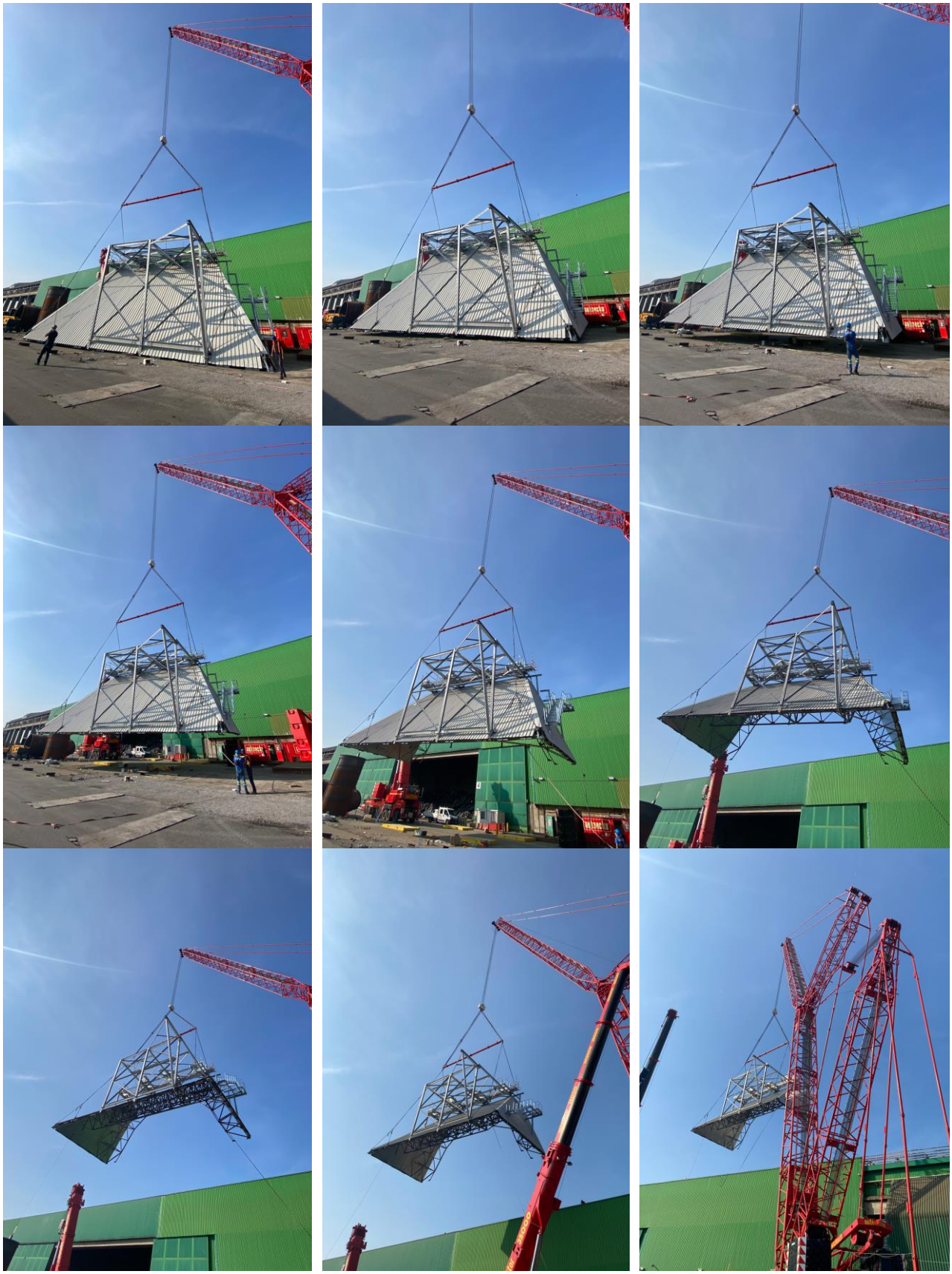


Figura 0-31: Distribuzione tensioni di von Mises in un punto di ancoraggio

Controlli in cantiere

A valle della progettazione strutturale relativa al transitorio di sollevamento, sono stati effettuati da parte di **SCL Ingegneria Strutturale** diversi sopralluoghi presso il cantiere dell'acciaieria Feralpi a Calvisano, al fine di assistere al sollevamento dei vari moduli. Come già accennato, l'intero processo è stato effettuato dall'impresa incaricata sotto il controllo e la supervisione del direttore lavori e del coordinatore della sicurezza. In ogni caso, la presenza in cantiere del progettista strutturale ha rivestito un'importanza fondamentale nel flusso di coordinazione con le altre figure professionali coinvolte.
Più nel dettaglio, a valle del controllo a carico del direttore lavori, il progettista strutturale si è premurato ad esempio di controllare che le geometrie dei sistemi di sollevamento relativi a ciascun modulo fossero conformi a quanto previsto in sede di analisi e indicato nei disegni, che il sollevamento venisse eseguito in conformità alle ipotesi di calcolo (i.e. assenza di carico da vento, condizioni quasi-statiche ecc.) e che l'assemblaggio dei moduli posti in opera non manifestasse problematiche sostanziali. In particolare, quest'ultimo aspetto si è rilevato molto delicato, dal momento che le tolleranze per il posizionamento e la connessione dei moduli adiacenti erano molto ridotte e spesso si riconducevano unicamente ai giochi foro-bullone.
Tutte le prescrizioni indicate nel progetto del sollevamento sono state seguite in cantiere in maniera meticolosa. Si riporta di seguito un estratto della estesa documentazione fotografica realizzata nelle varie fasi.

since 1990
HARPACEAS
Your digital partner



since 1990

HARPACEAS

Your digital partner

UNI EN ISO 9001
ICMQ
Certificazione sistema qualità

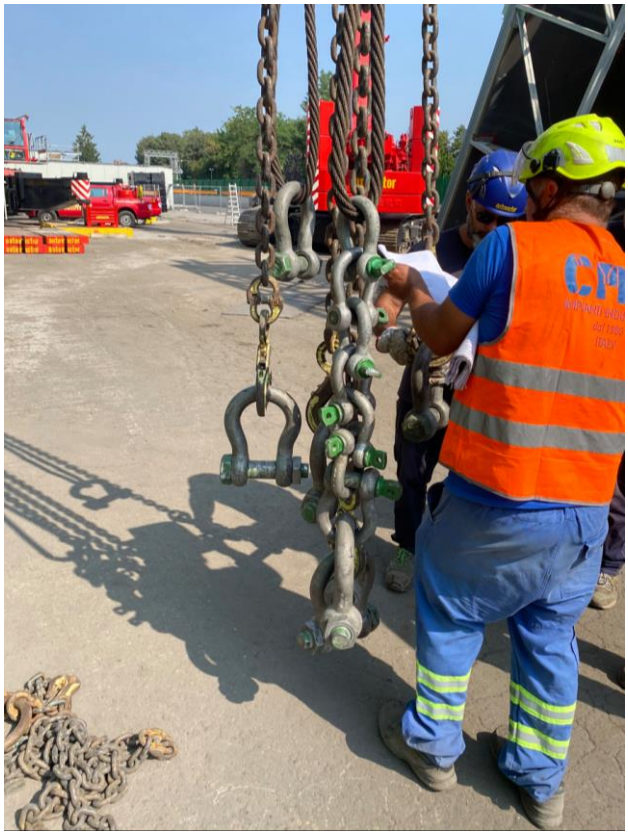
since 1990
HARPACEAS
Your digital partner

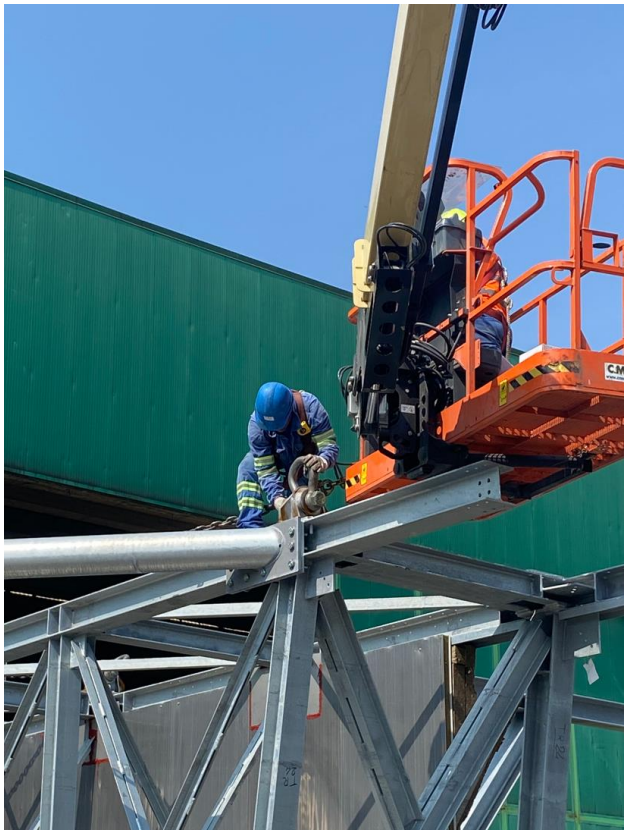
UNI EN ISO 9001
ICMQ
Certificazione sistema qualità

since 1990

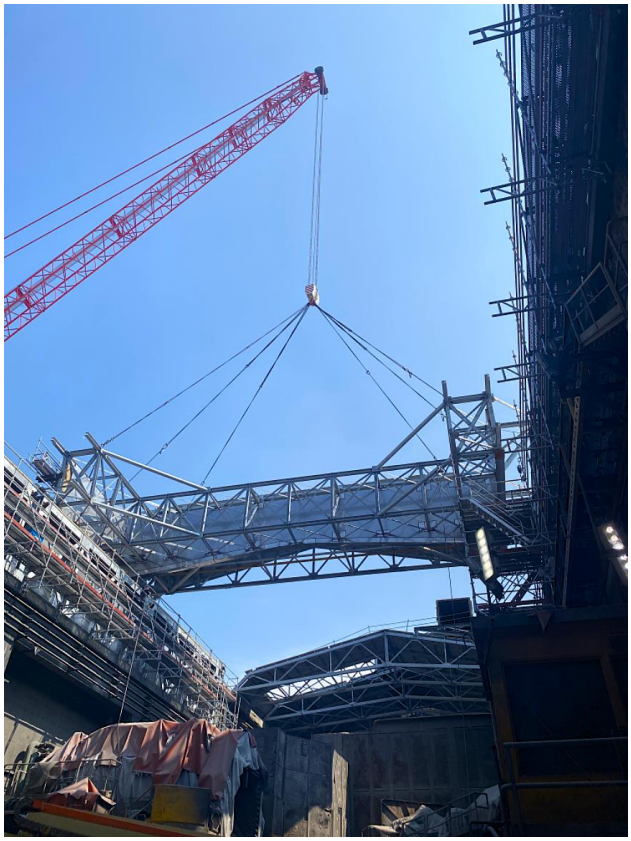
HARPACEAS

Your digital partner





UNI EN ISO 9001
ICMQ
Certificazione sistema qualità



Osservazioni e conclusioni

L'analisi e la progettazione delle fasi di sollevamento di strutture metalliche di grandi dimensioni rappresenta un aspetto cruciale nella realizzazione di opere strutturali complesse in carpenteria metallica. Il caso studio relativo alla nuova cappa di aspirazione fumi presso l'acciaieria Feralpi di Calvisano ha evidenziato come un approccio metodico, basato su una rigorosa analisi numerica e sull'adozione di adeguate procedure di controllo, sia essenziale per garantire la sicurezza e la corretta esecuzione delle operazioni di sollevamento.
L'inquadramento normativo ha costituito il fondamento dell'intero processo progettuale, così come l'adozione di coefficienti di sicurezza appropriati ha permesso di tenere in considerazione le incertezze legate ai carichi, ai materiali e agli effetti dinamici, fornendo un margine di sicurezza adeguato a fronte delle complessità del processo.
La modellazione numerica eseguita mediante il software **Midas GEN** ha consentito di valutare con precisione lo stato tenso-deformativo dei moduli in fase di sollevamento, considerando le specifiche condizioni di vincolo e i diversi schemi di funi e traverse (bilancini). L'accurata definizione dei punti di sollevamento e l'impiego di sistemi carrucolati hanno minimizzato gli effetti di squilibrio e le sollecitazioni orizzontali indesiderate, garantendo la stabilità del sistema durante tutte le fasi operative. Altri vantaggi sono stati inoltre rappresentati dalla scelta di un sollevamento quasi-statico, dall'adozione di bilancini e dal controllo delle inclinazioni delle funi al fine di ridurre le componenti orizzontali di spinta sul modulo.
Le verifiche strutturali in carico a **SCL Ingegneria Strutturale** hanno riguardato i componenti principali della struttura (profili metallici e relativi collegamenti) e i suoi punti di ancoraggio al sistema di sollevamento previsto.
Un aspetto cruciale emerso riguarda l'importanza del monitoraggio continuo in cantiere. La presenza del progettista strutturale durante le fasi di sollevamento ha permesso di verificare la coerenza tra le condizioni operative reali e le ipotesi di calcolo, intervenendo tempestivamente in caso di eventuali discrepanze coordinandosi con la direzione lavori. Inoltre, il controllo post-sollevamento ha garantito che le deformazioni residue rimanessero nei limiti di progetto, consentendo il corretto assemblaggio dei moduli.