

## La progettazione dello Stadio “Benito Stirpe”

Ing. Stefania Vellucci – Collaboratore Softing - [www.softing.it](http://www.softing.it)

Lo Stadio “Benito Stirpe” è stato inaugurato il 29 settembre 2017 alla presenza delle massime autorità politiche e sportive italiane di fronte a circa 16.500 spettatori, pari all’intera capienza dello Stadio.

L’impianto calcistico è stato realizzato nel Comune di Frosinone in località Casaleno, laddove era già esistente dai primi anni settanta una struttura dedicata al calcio che venne poi edificata nella parte riguardante la Tribuna Centrale negli anni ottanta. Rimasta un’opera incompiuta per decenni.



Figura 1 tribuna principale edificata inizi anni '80



Figura 2 tribuna principale edificata inizi anni '80

I lavori di adeguamento e completamento sono iniziati dal settembre 2016 ad opera della Together S.r.l. (proprietaria al 100% del Frosinone Calcio) facente parte di un raggruppamento temporaneo d’impresa (RTI) aggiudicatario del bando di gara “Concessione di Lavori Pubblici – Progettazione e Gestione”. Nel mese di settembre 2017 i lavori sono stati conclusi e collaudati.

Il “Benito Stirpe” è diventato il terzo impianto moderno gestito direttamente da una Società di calcio in Italia, dopo l’Allianz Stadium di Torino e lo Stadio Friuli di Udine ed è stato inoltre incluso tra i candidati al premio Stadium of the Year 2017.



*Figura 3 Vista dell'impianto durante le fasi di collaudo illuminazione*



*Figura 4 vista renderizzata del progetto esecutivo*

Il progetto è stato redatto da Ing. Alessandro Salvago De Gennaro, con la collaborazione di: Arch. Franco Capece, Arch. Andrea Patrizi, Arch. Debora Patrizi, Arch. Enrico Renzi, Arch. Benedetta Stirpe, Arch. Jaime Manca di Villahermosa. Consulenti per gli impianti: Ing. Vincenzo Fratarcangeli, Perito Ind. Mario Bracaglia. Consulenti per le strutture: Ing. Stefano Vellucci, Ing. Cristiano Cecotti. L'attività progettuale di maggiore impegno, con riferimento alle strutture, è sicuramente costituita dalla copertura della tribuna principale ( Main Stand).



*Figura 5 Strutture Tribuna principale-Main Stand*

La nuova copertura della Main Stand si estende per una superficie di 41,5 m x 80 m ed è costituita da fondazioni in c.a. realizzate mediante plinti su pali, i pali di fondazione hanno un diametro pari a 600 mm e una lunghezza di 15 m.

La struttura in elevazione è composta da due telai reticolari a sostegno dell'orditura di copertura. Il singolo telaio è composto da due pilastri reticolari, realizzati con profili metallici tubolari, collegati da una trave reticolare avente sezione trasversale di altezza variabile con altezza massima di circa 8 metri, larghezza con interasse di 3,0 m ed una lunghezza di circa 100 metri, con briglie superiori ed inferiori in profili HEB 300 e HEA 240 accoppiati e tubolari diagonali  $\phi 273 \times 6,3$  e  $\phi 355,6 \times 10$ .

I pilastri reticolari sono costituiti da pilastri tubolari  $\phi 355,6 \times 20$  (verticali), disposti ai vertici di un quadrato di dimensioni 3x3 m, tubolari  $\phi 244,5 \times 5$  (orizzontali) e  $\phi 244,5 \times 10$  (diagonali). L'orditura di copertura è composta da travi IPE240 e IPE200 disposte ad interasse pari a 4,00 m e arcarecci realizzati con profilati IPE100 disposti ad interasse di circa 1,0 m.

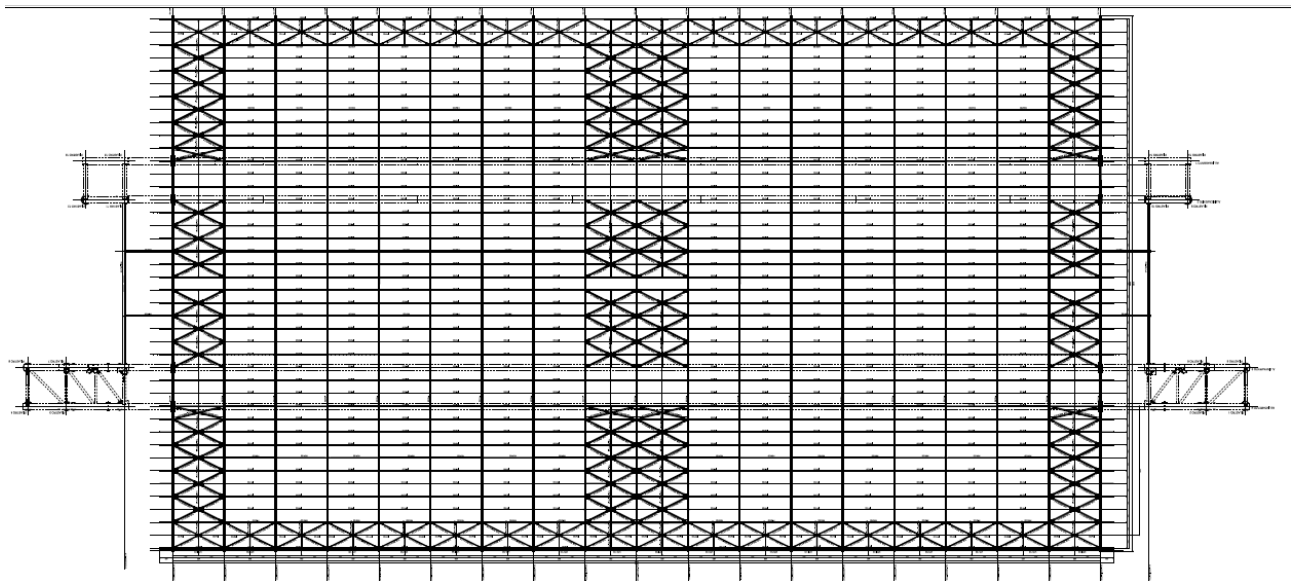
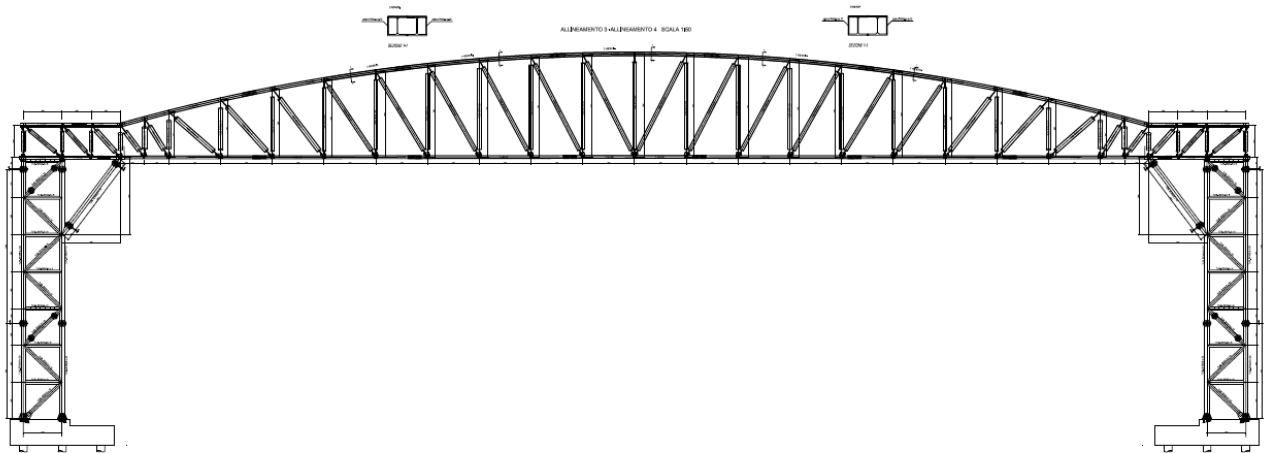


Figura 6 pianta della copertura

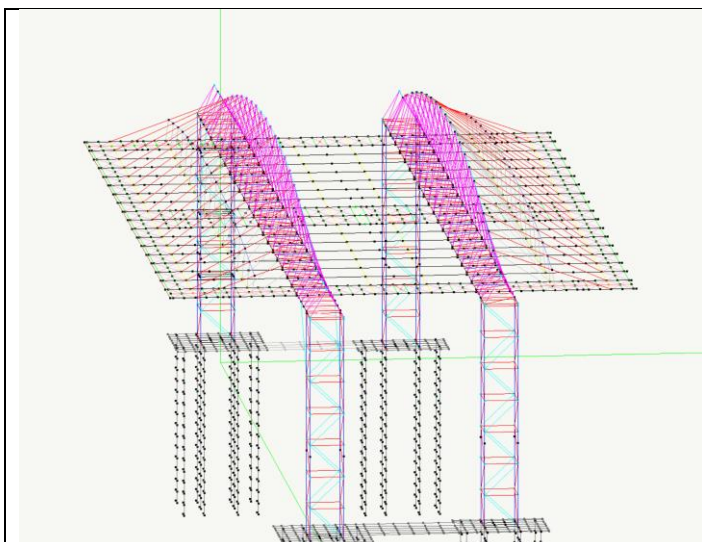


*Figura 7 Struttura reticolare principale della copertura*

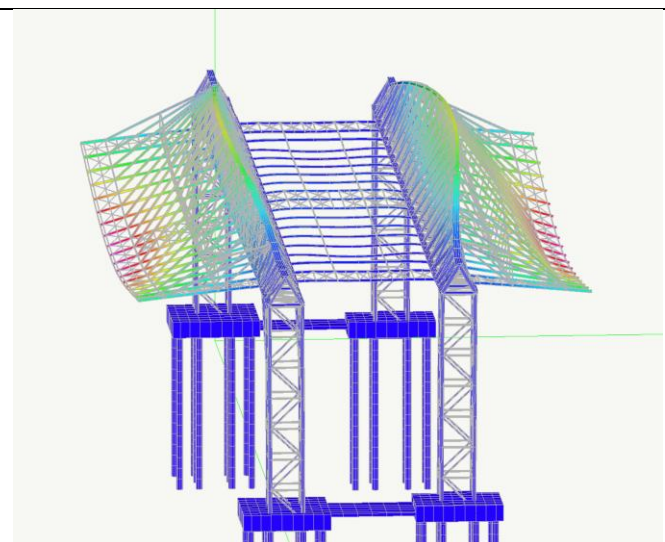
L'attività progettuale e di verifica delle strutture della copertura della Main Stand è stata elaborata con l'ausilio di modelli dapprima semplificati, sino a modelli tridimensionali che hanno permesso di affinare le scelte progettuali.

Il software utilizzato per le analisi e verifiche è stato Nòlian - All In One, prodotto dalla Softing di Roma. I progettisti hanno potuto apprezzare la grande flessibilità del software nella ricerca delle soluzioni idonee, sia alle esigenze peculiari dell'opera che nel soddisfacimento delle richieste della committenza. Infatti la committenza ha imposto requisiti di sicurezza superiori rispetto le prescrizioni delle NTC 2008.

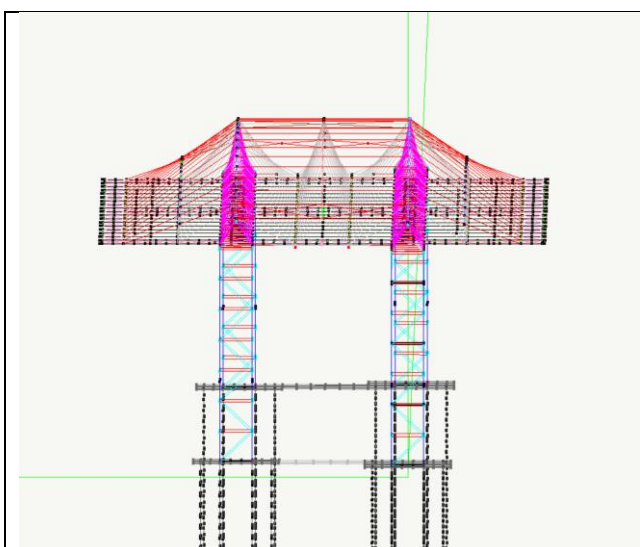
L'iter progettuale è iniziato con lo studio delle singole travi principali, ipotizzando azioni del vento quasi statiche. Nella fase di studio preliminare l'ambiente Nòlian Earthquake Engineering ha permesso di studiare l'instabilità delle travi principali, consigliando un collegamento tra le stesse, soprattutto in funzione della distribuzione delle pressioni del vento.



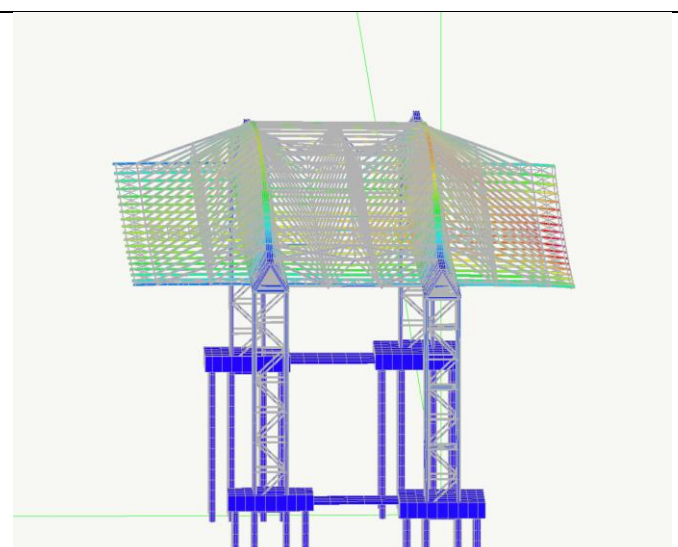
*Figura 8 Modello senza elementi di collegamento tra le travi principali*



*Figura 9 Svergolamento travi principali*



*Figura 10 Modello con elementi di collegamento*



*Figura 11 configurazione deformata con travi di collegamento, per carichi gravitazionali*

Lo studio del modello globale ha permesso di guidare le prove di approfondimento sulla distribuzione dell'azione del vento. Con l'analisi dinamica si sono esclusi fenomeni aeroelastici, esaminando con cura le frequenze proprie della struttura.

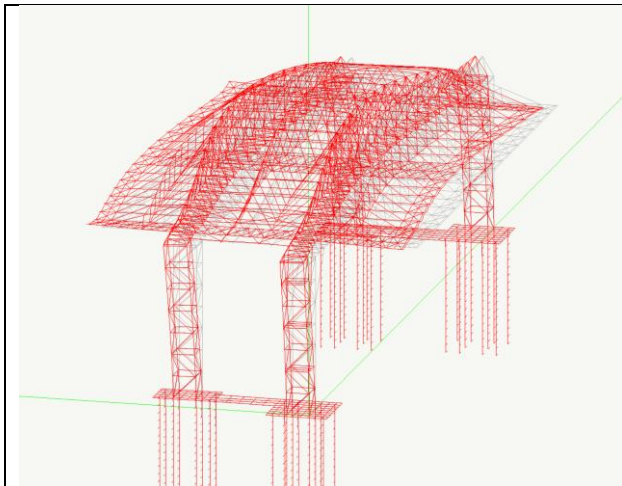


Figura 12 Principale forma modale orizzontale

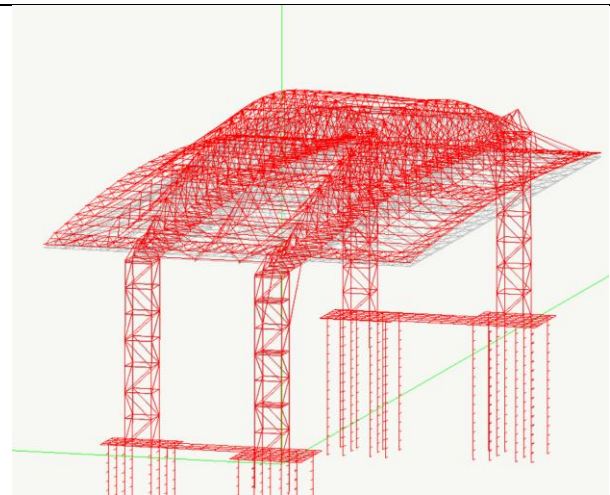


Figura 13 Principale forma modale verticale

In tal modo le prove in galleria del vento, eseguite presso il politecnico di Milano con il coordinamento del Prof. Belloli, sono state indirizzate essenzialmente nel verificare la correttezza delle distribuzioni delle pressioni sulla superficie della copertura.

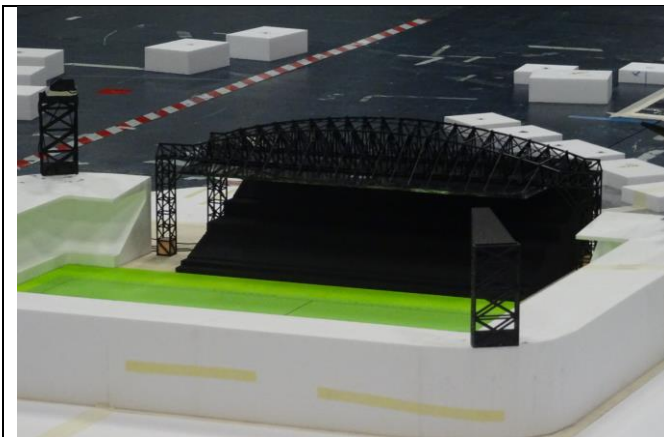


Figura 14 Modello in galleria del vento

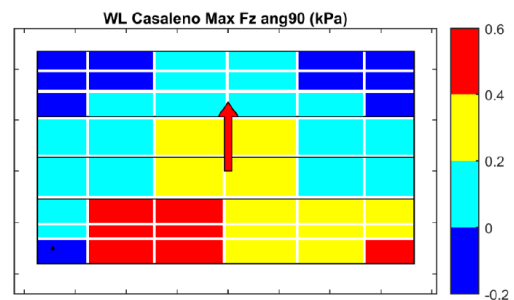


Figura 8-9: Downlift 90°.

Figura 15 Esempio di distribuzione delle pressioni per carichi eolici

Per le verifiche sono stati realizzati differenti modelli globali, facilmente confrontabili con la gestione delle Fasi, presente in Nòlian-All in One. La gestione delle Fasi consente la definizione di stadi successivi che fotografano diversi stati della geometria, della topologia o dei dati assegnati. I risultati delle varie analisi sono resi disponibili contemporaneamente permettendo confronti e involuppi. La suddivisione in ambienti permette l'utilizzo del software in base all'evoluzione delle esigenze progettuali e di verifica. L'ambiente Nòlian è stato utilizzato per i predimensionamenti per le analisi globali e per lo studio di modelli parziali e locali.

L'ambiente Earthquake Engineering è stato particolarmente apprezzato per la possibilità di analisi Non Lineari sia su modelli globali (analisi di instabilità Euleriana), che su modelli locali con materiali elasto-plastici.

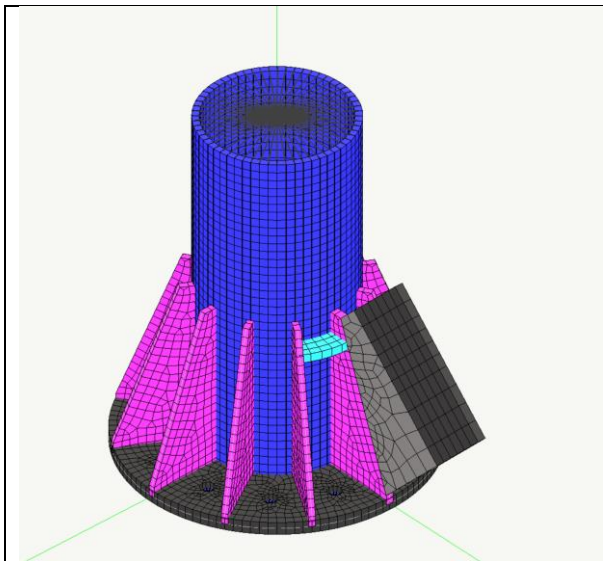


Figura 16 Modello del nodo di base dei pilastri

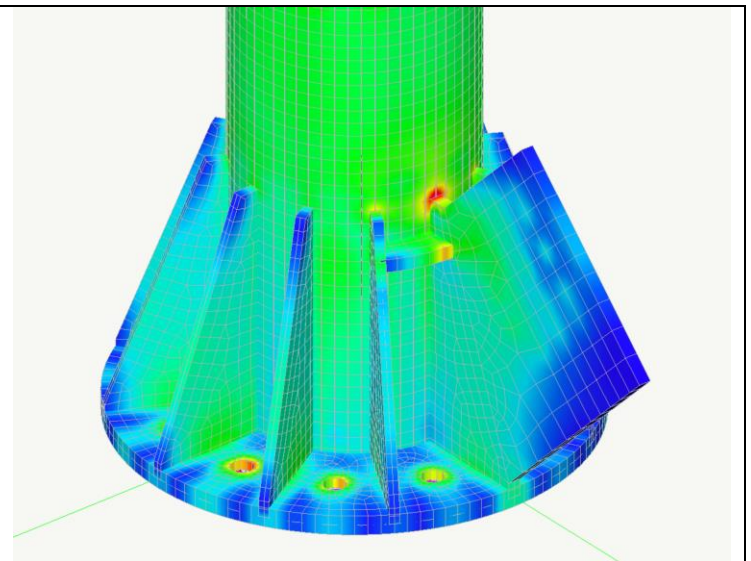


Figura 17 mappatura a colori dello stato tensionale

Le verifiche delle membrature in acciaio (aste e travi) sono state eseguite nell'ambiente EasySteel

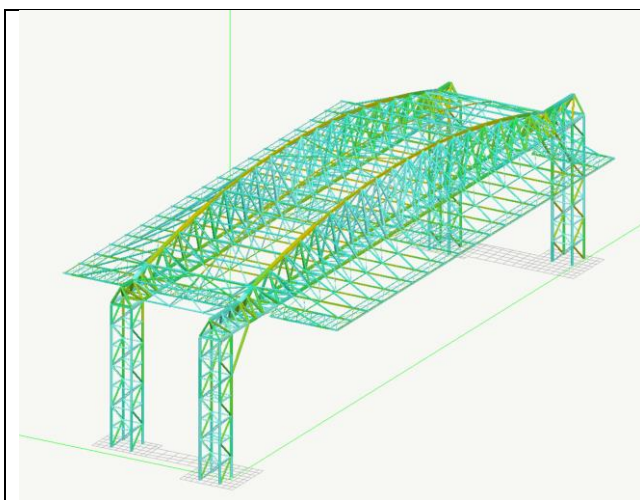


Figura 18 mappatura a colori del fattore di sfruttamento degli elementi



Figura 19 mappatura a colori del fattore di sfruttamento degli elementi

Nell'ambiente Nuans sono state eseguite le verifiche geotecniche e sono state individuati parametri per la definizione delle prove di collaudo sui pali di fondazione. Gli ambienti EasyBeam ed EasyWall hanno permesso la progettazione e verifica degli elementi in cemento armato.

L'utilizzo del software non si è limitato alle attività di progettazione ma è stato uno strumento essenziale anche durante la realizzazione dell'opera ad esempio guidando le scelte di disposizione e

dimensionamento dei golfari necessari per il varo delle travi principali e definendo le attività di collaudo.

Particolarmente impegnative sono state le attività di collaudo della struttura.

Al termine dell'assemblaggio a terra delle travi principali è stato eseguito un collaudo prima del varo. Il collaudatore Ing. Giovanni Vano coadiuvato dall'Ing. Sergio Del Gaudio, ha definito i carichi di collaudo in funzione delle effettive sollecitazioni di esercizio e delle condizioni di vincolo delle travi prima del varo.

L'analisi d'instabilità condotta in questa fase ha consigliato di definire opportuni accorgimenti per le attività di collaudo.

Per la validazione delle analisi d'instabilità eseguite in Nòlian-Earthquake Engineering, i collaudatori hanno imposto alcuni casi prova di controllo tra i risultati in letteratura e quelli forniti con il software. Dapprima sono stati eseguite analisi di instabilità elastica euleriana su semplici aste compresse con differenti vincoli esterni.

Schema dei vincoli		Deformata critica	Carico critico
		$v(z) = v_0 \sin \frac{\pi z}{l}$	$N_c = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$
		$v(z) = \frac{v_0}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi z}{l} \right)$	$N_c = \frac{\pi^2 EI}{(0,5 l)^2}$
		$v(z) = A [(\sin k z - k z) - k l (\cos k z - 1)]$ $k l = 4,493$	$N_c = \pi^2 \frac{EI}{(0,699 l)^2}$
		$v(z) = v_0 \left( 1 - \cos \frac{\pi z}{2 l} \right)$	$N_c = \frac{\pi^2 EI}{(2 l)^2}$
		$v(z) = \frac{v_0}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi z}{l} \right)$	$N_c = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$

Figura 20 Casi di studio



Per i confronti è stata utilizzata una trave 30x50 di lunghezza pari a 6 metri, con  $E=2100000 \text{ kg/cm}^2$

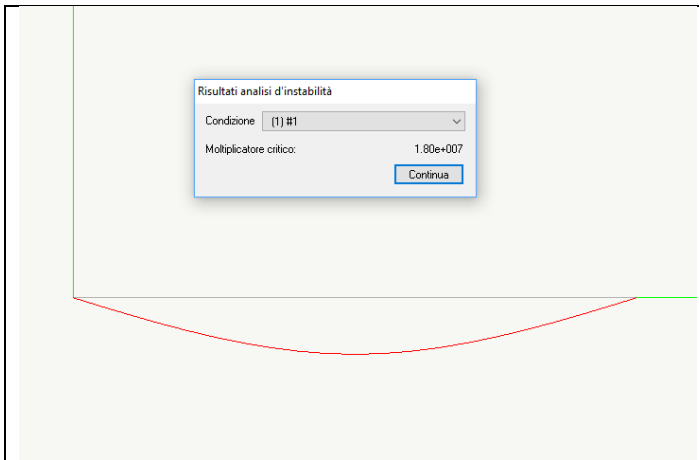


Figura 21 Caso 1,  $N_c$  teorico  $1,799 \cdot 10^7 \text{ kg}$

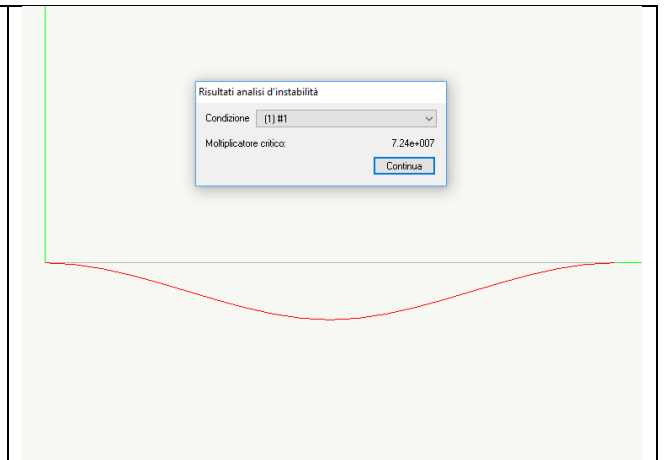


Figura 22 Caso 2,  $N_c$  teorico  $7,197 \cdot 10^7 \text{ kg}$

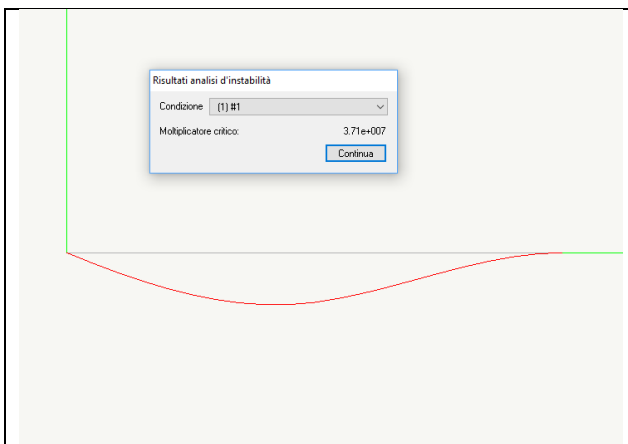


Figura 23 Caso 3,  $N_c$  teorico  $3,68 \cdot 10^7 \text{ kg}$

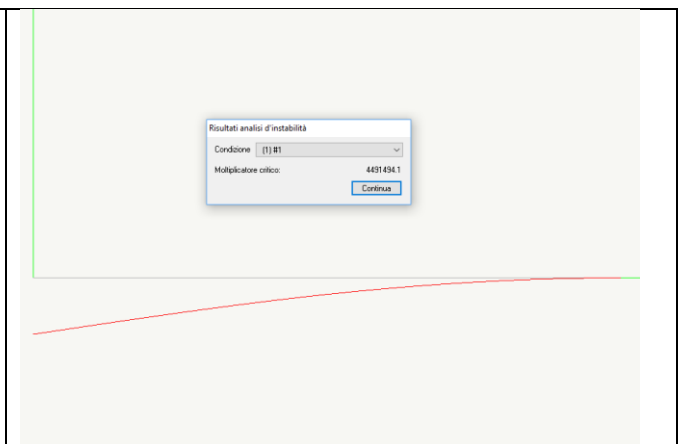


Figura 24 Caso 4,  $N_c$  teorico  $4,498 \cdot 10^6 \text{ kg}$

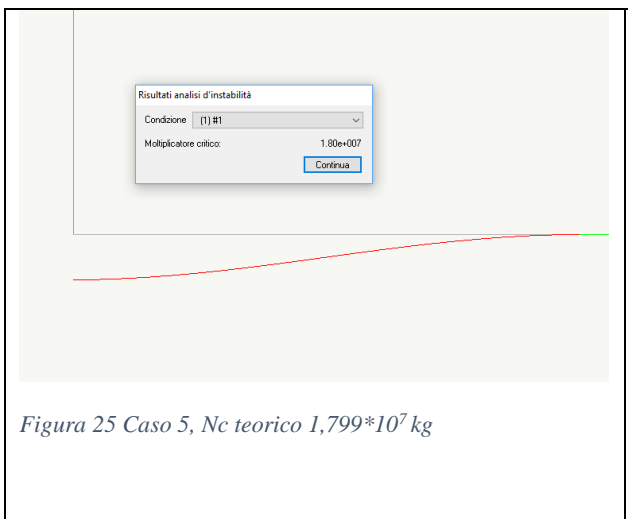


Figura 25 Caso 5,  $N_c$  teorico  $1,799 \cdot 10^7 \text{ kg}$

Nella tabella seguente sono riportati i confronti tra soluzione teorica e soluzione in ambiente Nòlian Earthquake Engineering.

Schema di vincolo		Carico critico teorico kg	Carico critico Nòlian kg	Differenza %
Caso 1		$1,80 \cdot 10^7$	$1,80 \cdot 10^7$	0,00
Caso 2		$7,20 \cdot 10^7$	$7,24 \cdot 10^7$	0,01
Caso 3		$3,68 \cdot 10^7$	$3,71 \cdot 10^7$	0,01
Caso 4		$4,50 \cdot 10^6$	$4,49 \cdot 10^6$	0,00
Caso 5		$1,80 \cdot 10^7$	$1,80 \cdot 10^7$	0,00

I confronti mostrano la rispondenza quasi totale tra i valori teorici e quelli individuati con il software agli elementi finiti Nòlian-All in One.

Uno step successivo è stato richiesto per valutare i risultati F.E.M. per analisi in grandi spostamenti, per il comportamento post critico di aste compresse.

Anche in queste analisi si è potuto apprezzare la validità delle soluzioni ottenute con Nòlian.

I risultati dei Benchmark hanno mostrato una rispondenza quasi totale tra i valori ottenuti dalla risoluzione analitica delle equazioni che descrivono il problema, e quelli ottenuti tramite la modellazione agli elementi finiti in Nòlian EE.

Si è proceduto alla valutazione del carico critico Euleriano della trave principale per scongiurare fenomeni d'instabilità durante le fasi di collaudo precedenti il varo.

Il carico totale previsto in questa fase di collaudo è stato di 150 tonnellate complessive ed i risultati hanno determinato un moltiplicatore dei carichi circa pari a 3.

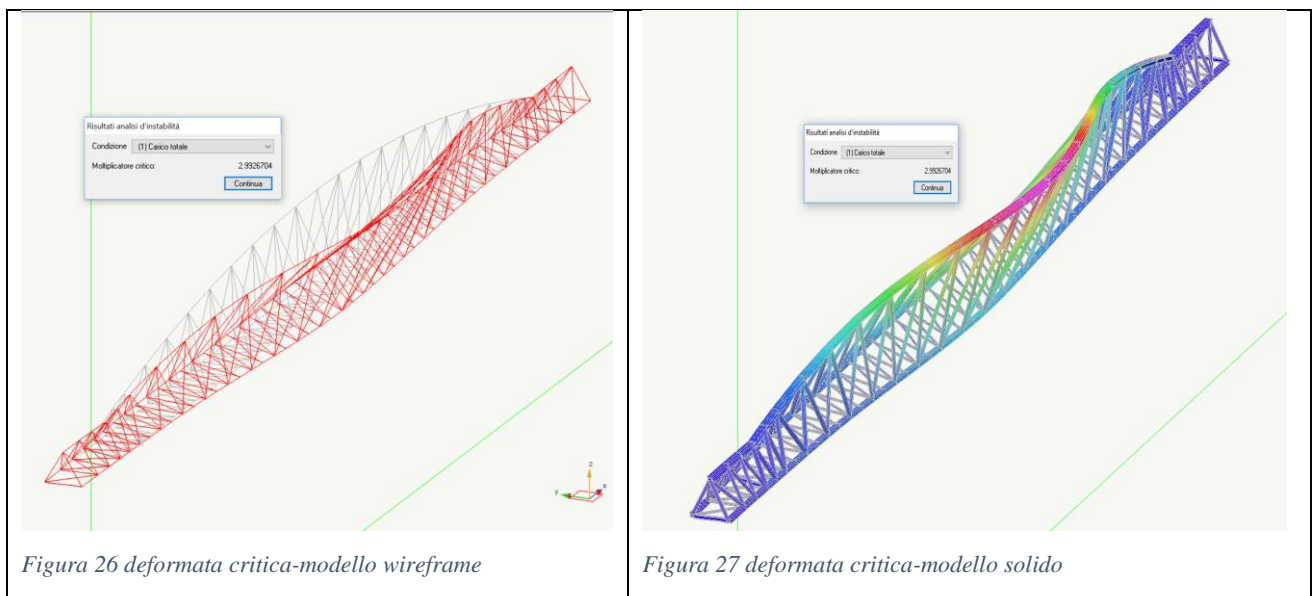


Figura 26 deformata critica-modello wireframe

Figura 27 deformata critica-modello solido

Per garantire un collaudo in assoluta sicurezza si è provveduto a migliorare la risposta della struttura ancorando, con aste in acciaio, la trave reticolare alla tribuna in cemento armato adiacente.

La configurazione deformata ha guidato l'inserimento degli elementi compatibili con le strutture in cemento armato della tribuna.

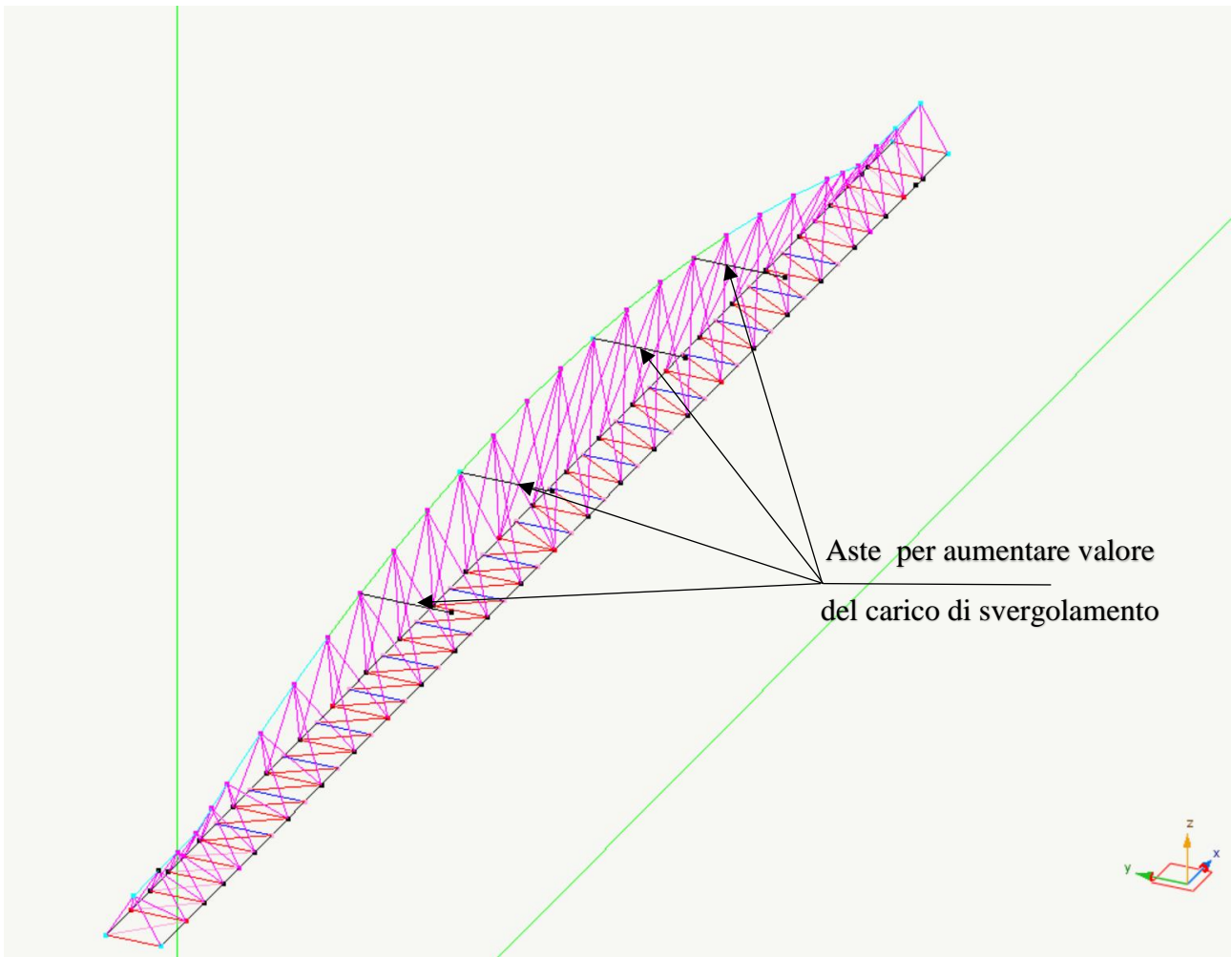


Figura 28 Nuovo modello per analisi instabilità

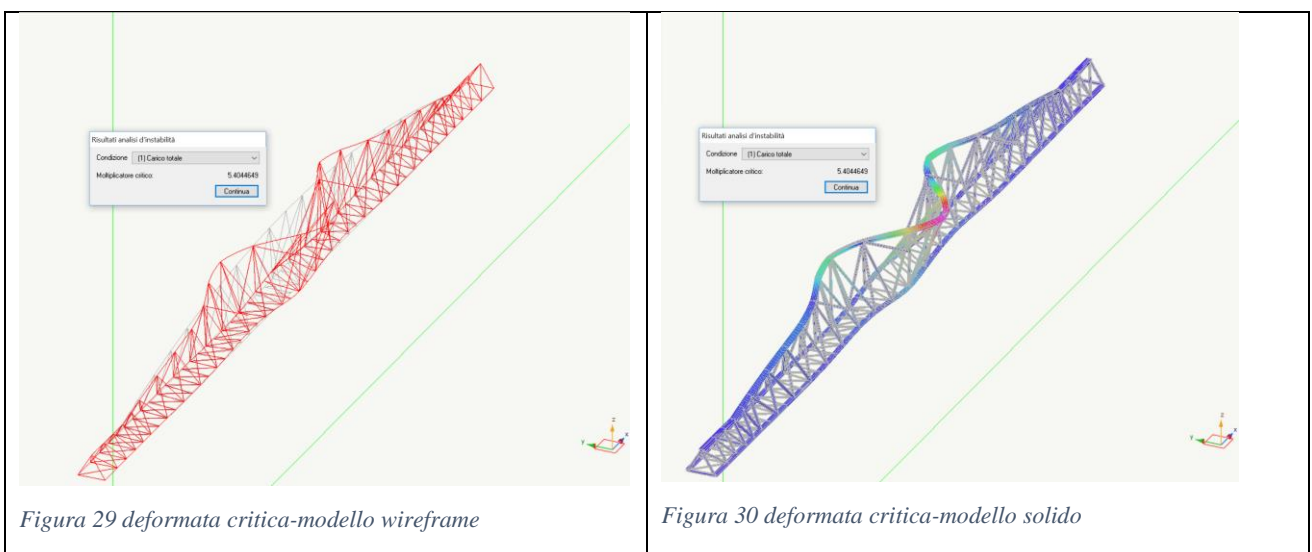


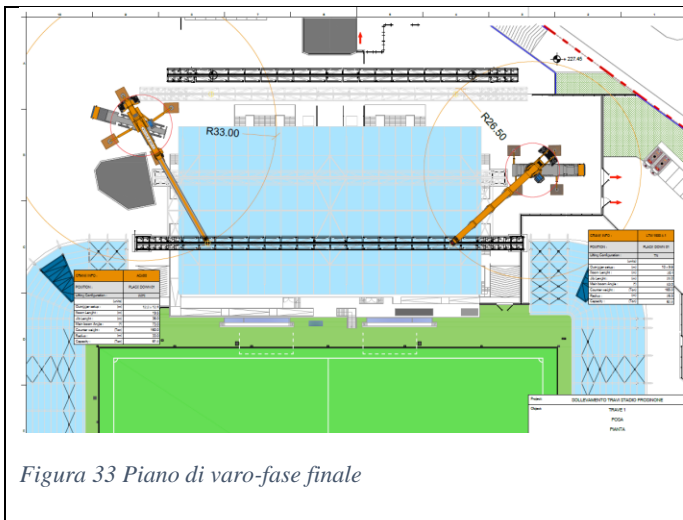
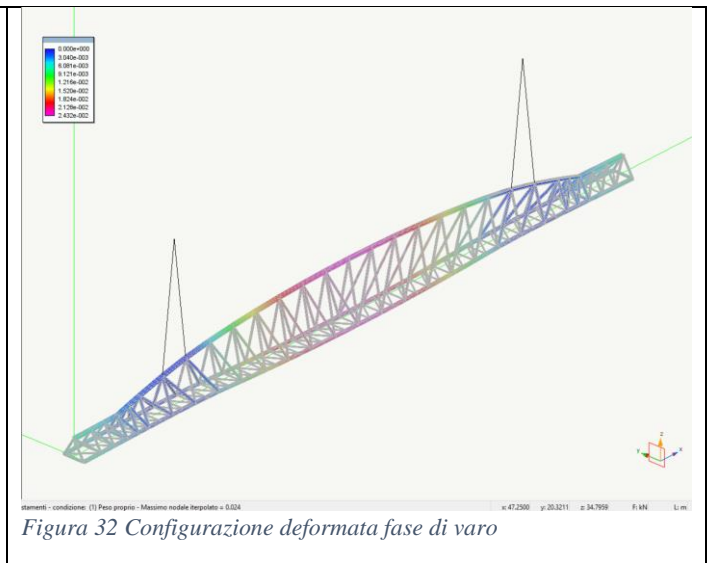
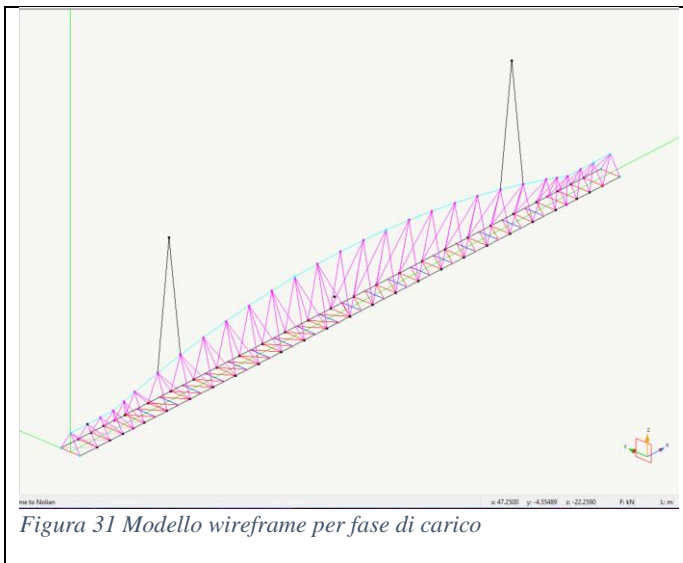
Figura 29 deformata critica-modello wireframe

Figura 30 deformata critica-modello solido

Il miglioramento della risposta all'analisi d'instabilità ha permesso di procedere con le attività di collaudo "a terra" che sono state eseguite il giorno 12 Luglio 2017 e sono proseguite tutta la notte, con risultati perfettamente rispondenti alle prescrizioni di collaudo.

Il varo della prima trave è avvenuto il giorno 20 luglio 2017.

Anche il varo è stato assistito da un modello di analisi per ottimizzare la posizione dei golfari in funzione delle gru di sollevamento.



Le attività di collaudo finali delle strutture si sono svolte tra il 6 ed il 9 settembre 2019.

I risultati dei modelli numerici individuati in Nòlian, sono stati in congruenti con quelli scaturiti dalle prove di carico, con un comportamento aderente alle previsioni progettuali.

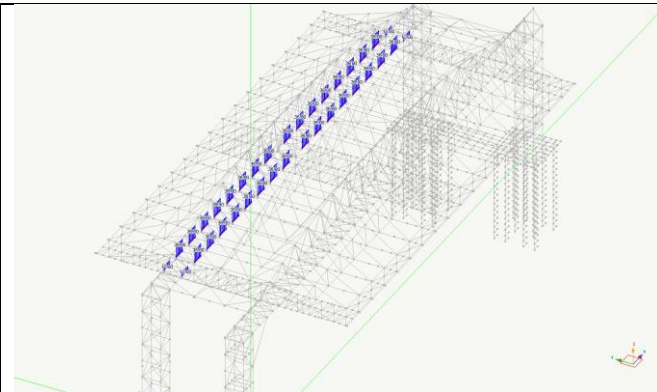


Figura 35 Modello di calcolo prima fase collaudo

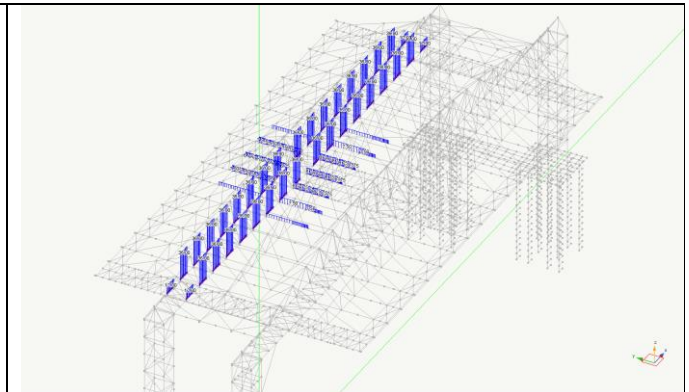


Figura 36 Modello di calcolo fase finale collaudo

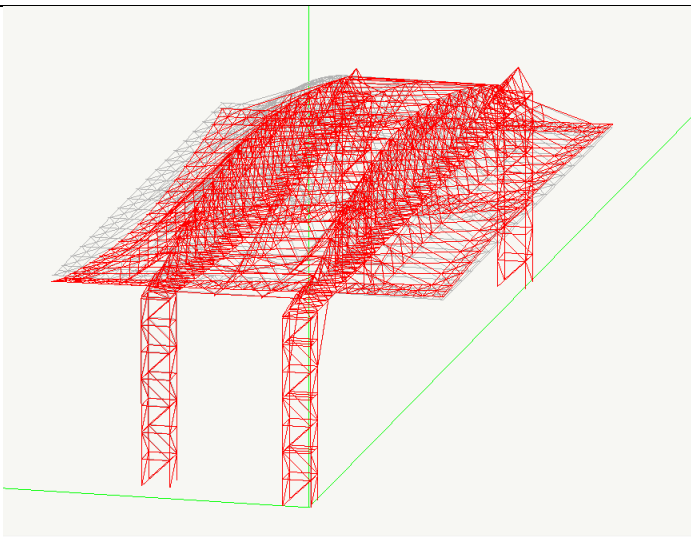


Figura 37 Configurazione deformata-fase finale di collaudo

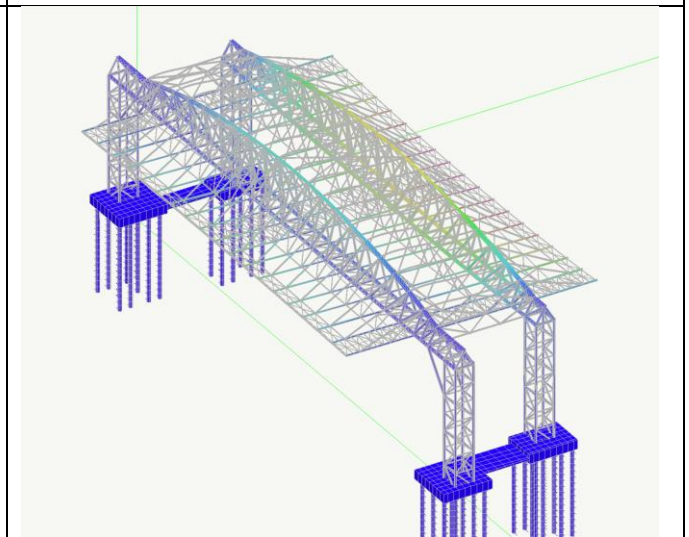


Figura 38 mappatura a colori degli isospostamenti-fase finale



Figura 39 attività di collaudo finale



Figura 40 Attività di collaudo finale

La versatilità del software Nòlian-All In One ha permesso un utilizzo non come semplice software di verifica, ma soprattutto come strumento che ha accompagnato tutte le fasi di progettazione sino alle attività di varo e collaudo. La facilità di elaborazione di modelli differenti, facilmente confrontabili con gli strumenti messi a disposizione dai vari ambienti Nòlian-All In One, ha garantito una ottimizzazione delle scelte progettuali e guidato verso approfondimenti nello studio delle strutture.