



Modellazione di un impalcato da ponte sghembo in Midas Civil



Enrico Compagnone¹



Salvatore Gazzo²



Gabriele Miceli³



Loredana Contrafatto⁴



Software utilizzato

¹ Ingegnere Senior Giniu Ingegneria e Architettura s.r.l.

² Co-fondatore e CEO Spin-off "Giniu Ingegneria e Architettura" dell'Università degli studi di Catania

³ Fondatore & CEO "ETS s.r.l."

⁴ Docente di Scienza delle Costruzioni presso Università degli studi di Catania e Co-fondatore Spin-off "Giniu Ingegneria e Architettura"

Introduzione

La progettazione e verifica di nuove strutture richiede l'utilizzo di strumenti di calcolo automatico e l'introduzione di modelli numerici che rappresentino la struttura ed il suo comportamento in maniera accurata. I software basati sul Metodo degli Elementi Finiti sono certamente i più diffusi ed impiegati nell'ambito professionale.

In taluni casi, l'opera oggetto di calcolo e verifica presenta caratteristiche geometriche che richiedono particolare cura nella scelta della modellazione.

Questo aspetto viene esemplificato con riferimento alla modellazione di un ponte di nuova costruzione in struttura mista acciaio-calcestruzzo. L'aspetto

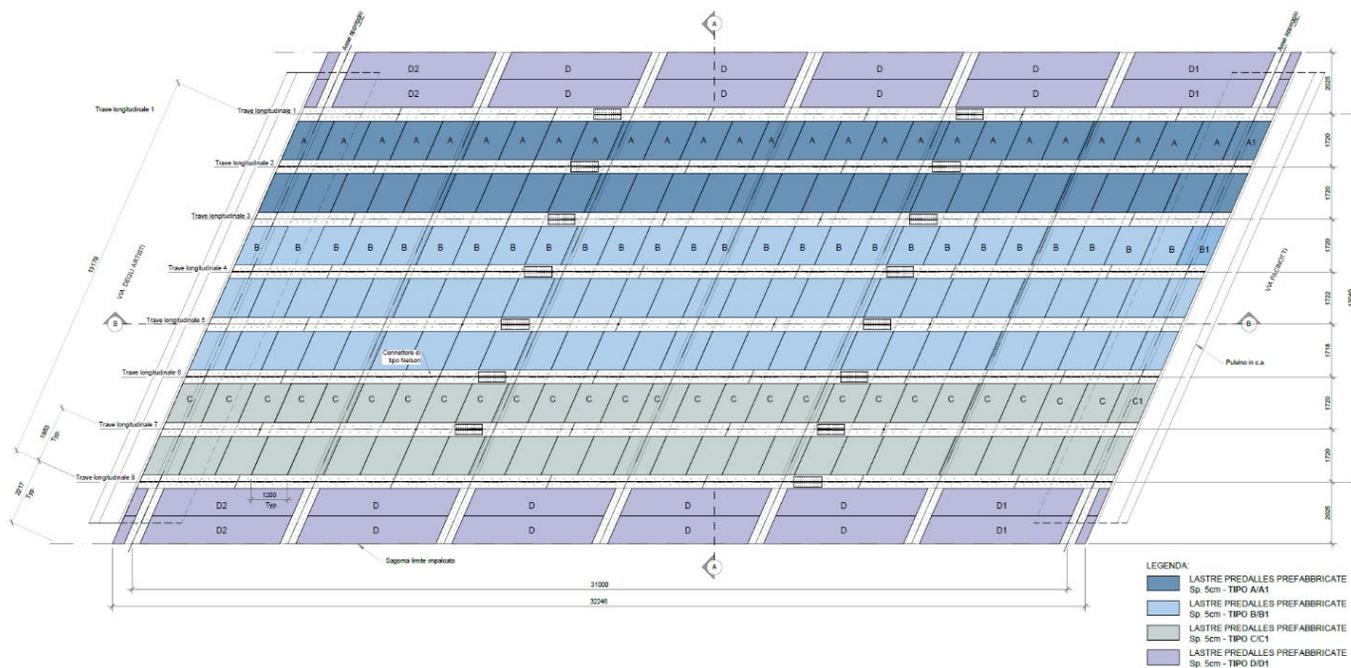
rilevante di tale struttura riguarda la geometria dell'impalcato, il quale presenta una particolare forma in pianta caratterizzata da due lati obliqui. Tale condizione rende complessa sia la fase di modellazione geometrica della struttura, sia la definizione dei vincoli da assegnare al contorno. È stata proposta una modellazione innovativa della soletta del ponte, implementata con il codice di calcolo "Midas Civil", tramite l'utilizzo di elementi plate. Il modello ha permesso di definire dettagliatamente le condizioni della struttura nelle diverse fasi di progettazione e di carico, e di valutare, infine, la validità della progettazione proposta.

1. Descrizione dell'opera

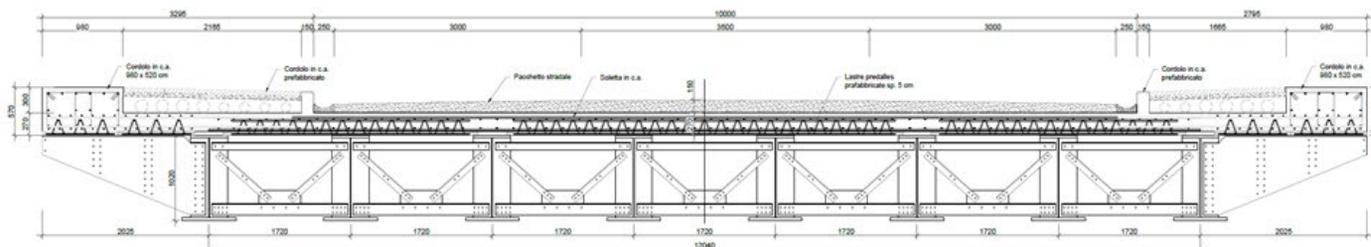
Il progetto della struttura prevede una struttura portante costituita da 8 travi in acciaio, calandrate in officina con controtreccia pari a 35 cm (Figure 1.1, 1.2). Le travi sono realizzate saldando a completa penetrazione lamiere in modo da ottenere una sezione a doppio T con altezza complessiva pari a 1020 mm. Le travi sono tra loro collegate da diaframmi reticolari, che differiscono tra le sezioni trasversali di testa e le sezioni interne, e poggiano sulle spalle tramite apparecchi di appoggio a disco elastomerico confinato, i quali realizzano il vincolo a cerniera (tipo

fisso) o carrello unidirezionale o bidirezionale. Sette profili metallici a sezione variabile collegati lungo lo sviluppo di ciascuna delle due travi di riva sostengono due sbalzi della larghezza di 2.025 m. L'impalcato è costituito da una soletta semi-prefabbricata formata da elementi del tipo "predalles", dello spessore di 5 cm, su cui viene eseguito un getto di completamento dello spessore di 22 cm. Ogni lastra predalles ha lunghezza variabile, è profonda 1.20 m e appoggia su 3 travi centrali e sulla trave di riva. La collaborazione delle travi con la soletta in calcestruzzo

è assicurata da tre file di pioli tipo Nelson del diametro di 22 mm saldati sull'estradosso della piattabanda superiore. Le lastre sono utilizzate come casseforme per la parte interna e per gli sbalzi dell'impalcato. L'intradosso della soletta poggia sulle ali delle travi, provviste di connettori a spinotto, con la mediazione di uno strato di malta antiritiro e bande elastiche che assicurano la continuità dell'appoggio ed evitano il percolamento del getto di calcestruzzo. L'impalcato ha larghezza di 16 m e luce di 32.25 m.



■ Figura 1.1. Pianta carpenteria impalcato



■ Figura 1.2. Sezione tipo impalcato

Il ponte sovrappassa una linea ferroviaria ed è classificato come strada urbana di quartiere (tipo E). È previsto un cordolo ai margini dell'impalcato con un'altezza di 20 cm rispetto al manto stradale e della larghezza complessiva di 98.5 cm, nonché il dispositivo di ritenuta e la barriera. Sono previsti

due marciapiedi ai margini della piattaforma stradale di larghezza lorda pari a 1.665 m su un lato 2.165 m sull'altro. La finitura è costituita da uno strato uniforme di binder dello spessore di 9 cm ed uno strato di usura dello spessore di 5 cm. Sono infine presenti le opere

per lo smaltimento delle acque meteoriche.

Il processo costruttivo prevede la realizzazione dell'impalcato, completo di opere accessorie, su un'area contigua alla sede e il successivo varo nella sua posizione finale.

2. Materiali costruttivi

La scelta della tipologia di calcestruzzo da utilizzare è stata effettuata in accordo alle disposizioni di normativa [1] in riferimento alle condizioni ambientali di sito e all'esposizione ambientale (le condizioni chimiche e fisiche alle quali la struttura è esposta nell'ambiente in cui è immersa, in aggiunta alle azioni meccaniche) [2]. Per le varie parti del ponte sono state individuate differenti classi di esposizione, ad ognuna delle quali corrisponde una classe di calcestruzzo minima raccomandata.

ACCIAIO DA CEMENTO ARMATO B450C		
Tensione caratteristica a rottura (f_{sk})	540	N/mm ²
Tensione caratteristica a snervamento (f_{syk})	450	N/mm ²
Tensione di snervamento di calcolo (f_{syd})	$f_{yk}/1.15=391.3$	N/mm ²
Modulo di elasticità normale (E_s)	210000	N/mm ²

■ Tabella 2 1. Parametri acciaio armature

Al termine del processo di individuazione delle classi richieste, si è scelto di utilizzare per tutti gli elementi in calcestruzzo armato una classe di calcestruzzo C 35/45, classe di consistenza S4 e copriferro 45 mm.

L'acciaio per le barre di armatura scelto per l'opera è il B450C, le cui caratteristiche meccaniche sono riportate nella **Tabella 2.1**.

Per l'acciaio strutturale, invece, si è scelta la lega "S355J0W", facente parte di leghe di acciaio per impieghi

Norme e qualità degli acciai		Spessore nominale "t" dell'elemento in mm			
		f_{yk} [N/mm ²]		f_{tk} [N/mm ²]	
		$t \leq 16$	$16 < t \leq 40$	$t < 3$	$3 < t \leq 100$
UNI EN 10025-2	S355J0W	355	345	510-680	470-630

■ Tabella 2.2. Parametri acciaio strutturale

strutturali laminati a caldo; le caratteristiche meccaniche sono elencate in **Tabella 2-2**.

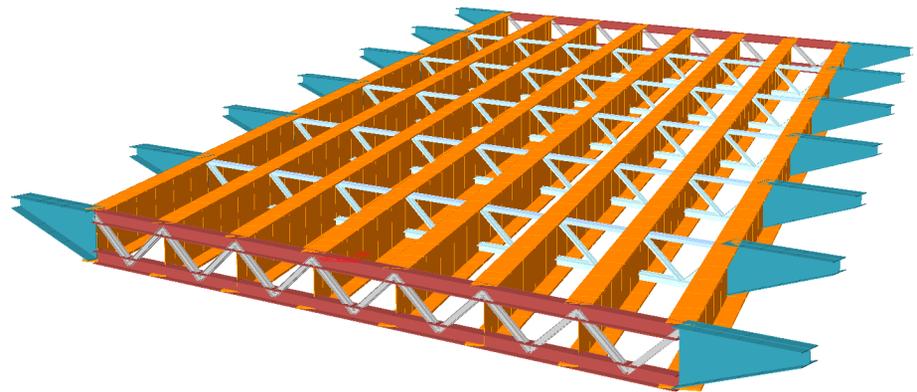
3. Modellazione FEM

3.1. Costruzione geometrica

La modellazione agli elementi finiti di seguito descritta è stata sviluppata all'interno del software "Midas Civil". In particolare, l'impalcato è stato descritto attraverso un modello tridimensionale in cui le travi principali, le mensole degli sbalzi, i correnti superiori e inferiori dei traversi, sono modellati come elementi beam, mentre le diagonali dei traversi come elementi truss (**Figura 3.1**).

Dunque, in testa alle travi principali è stata modellata la soletta tramite elementi piastra che conferiscono rigidità trasversale e trasferiscono i carichi permanenti, portanti e da traffico al reticolo sottostante (**Figura 3.2**).

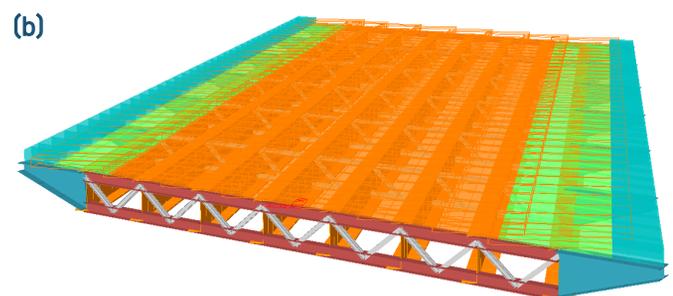
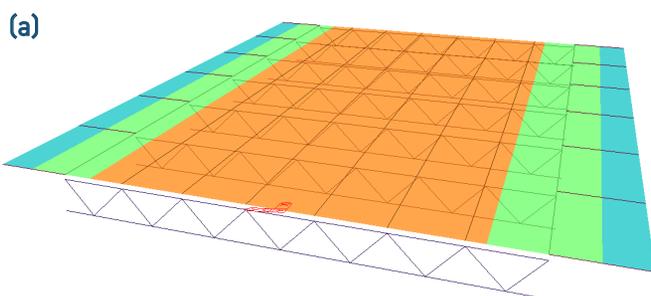
Le travi principali longitudinali sono state modellate con elementi di tipo beam a sezione composta



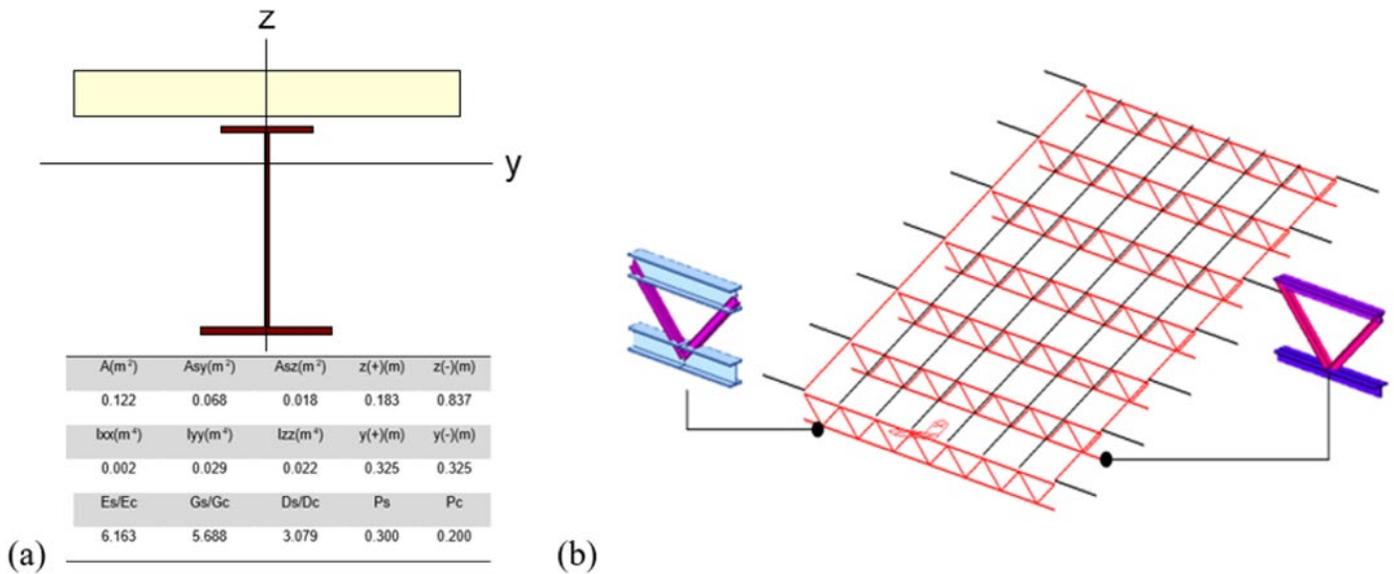
■ Figura 3.1. Vista solida elementi beam e truss

(**Figura 3-3 (a)**), in cui le proprietà di acciaio e calcestruzzo entrano nel processo di costruzione in fasi differenti. I traversi sono stati modellati con elementi beam,

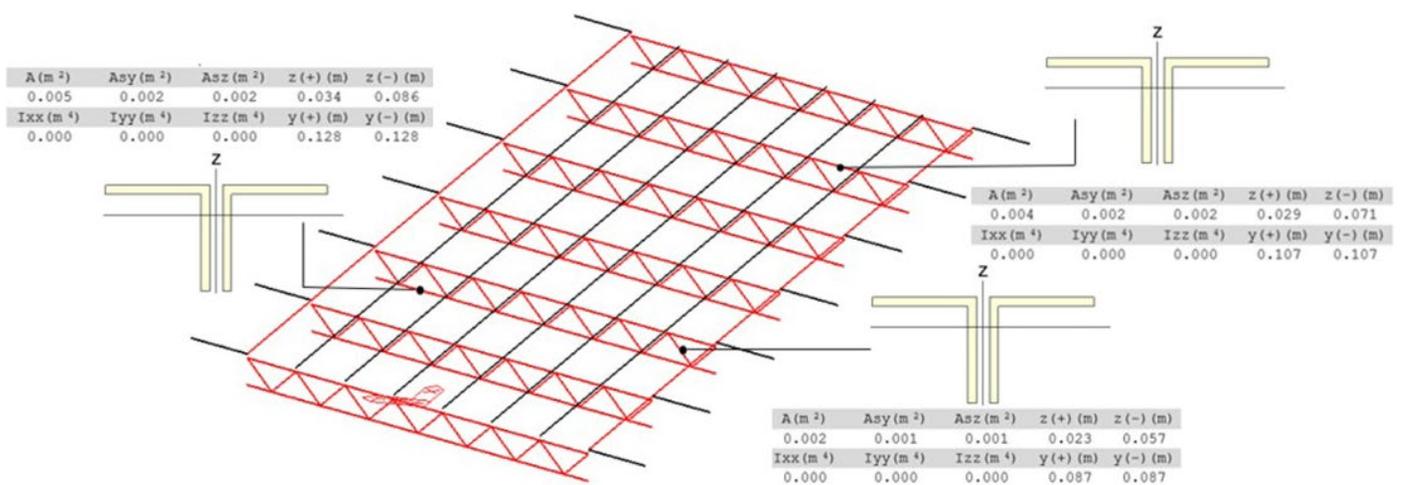
svincolati a momento negli estremi (**Figura 3-2 (b)**). Le sezioni utilizzate per i traversi di testata e interni differiscono tra loro, così come le sezioni dei diagonali (**Figura 3-4, 3-5**).



■ Figura 3.2. (a) Vista wireframe elementi plate (b). Vista solida elementi plate

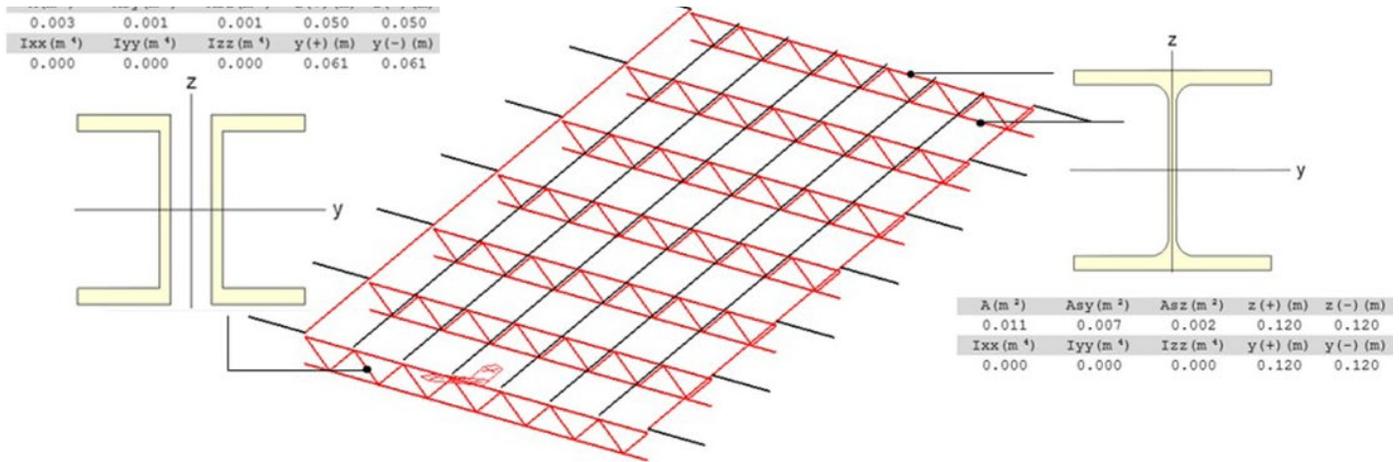


■ Figura 3.3. (a) Sezione trave principale (b) Dettaglio trasverso di testata e interno

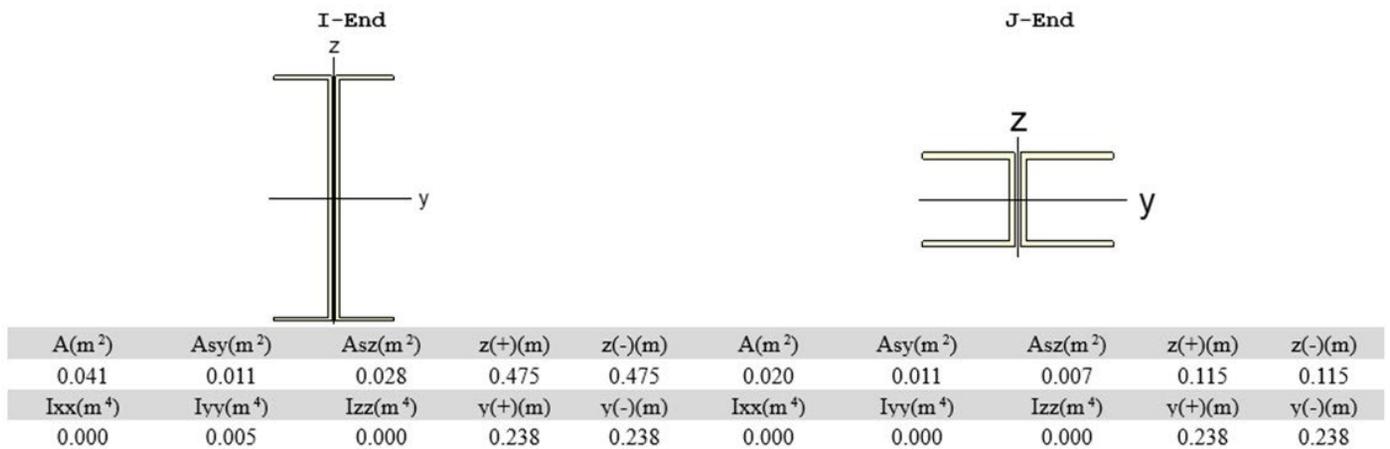


■ Figura 3.4. Sezioni trasversi interni

Per i profilati a sezione variabile utilizzati per il supporto degli sbalzi sono state definite le sezioni di inizio e fine elemento, mostrate in [Figura 3-6](#).



■ Figura 3.5. Sezioni trasversali di testata



■ Figura 3.6. Sezioni elementi a sbalzo

3.2. Definizione dei carichi

Il calcolo dei carichi sollecitanti la struttura è stato effettuato valutando in primo luogo le azioni permanenti date dai pesi propri degli elementi strutturali e non strutturali in calcestruzzo e in acciaio. In seguito, sono state calcolate le deformazioni dovute agli effetti di ritiro

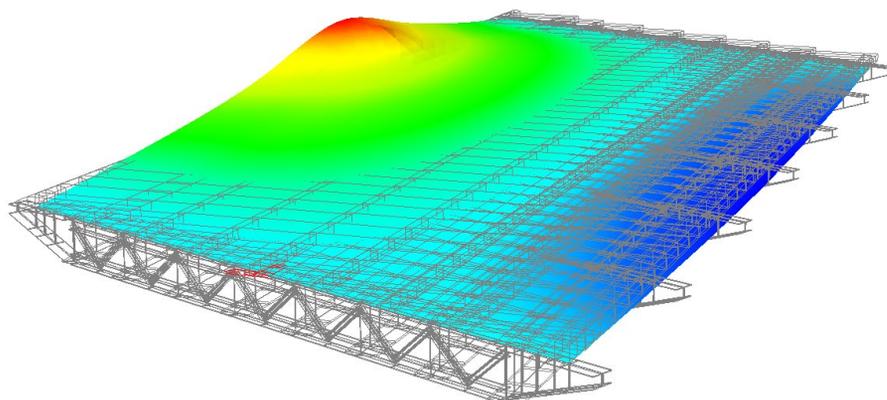
e i coefficienti di omogenizzazione per effetto della viscosità; ciò è stato effettuato applicando le formulazioni definite all'interno della normativa italiana, §11.2.10.6. In particolare, il software MIDAS CIVIL permette di definire funzioni dipendenti dal tempo e applicarle al materiale strutturale;

viene specificato il giorno di inizio di tali effetti, collocato nella corretta fase della "construction stage", che si manifesteranno fino al termine dell'ultima fase. Inoltre, attraverso la definizione dei coefficienti di omogenizzazione, il software tiene conto della variazione di rigidezza

per carichi di breve, lunga durata e viscosità.

Sono state, poi, valutate le azioni in fase di costruzione: per la determinazione delle azioni da vento e dell'azione variabile da neve si è fatto riferimento alle NTC-2018 e, ove utile, alla Circolare esplicativa 7 del 21-01-2019; per la determinazione delle azioni da costruzione si è utilizzato l'Eurocodice1 [parte 1-6].

Infine, sono state calcolate le azioni in fase di esercizio (configurazione finale in cui lo schema di carico è quello di trave poggiate-poggiate): azioni variabili da vento e da neve (NTC-2018); azione della temperatura (DM 17.01.2018); azione variabile da traffico (Indicazioni per schemi di carico riportate nelle NTC-2018 e nell'Eurocodice1); azione sismica (si ricava lo spettro di

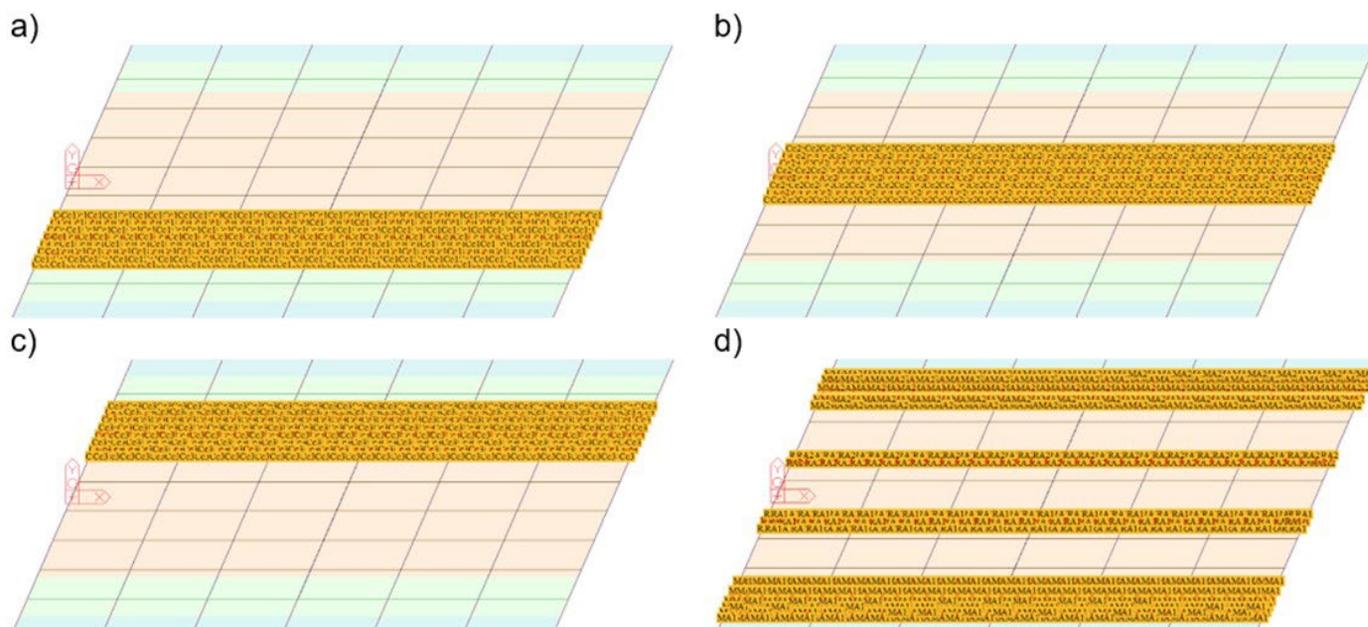


■ **Figura 3.7. Superficie di influenza che massimizza il momento in campata nella trave esterna**

risposta elastico riferito al sito di pertinenza tramite le NTC-2018]; azioni eccezionali sui parapetti e urto dei veicoli in svio (§5.1.3.10 delle NTC-18).

A titolo d'esempio si riporta in **Figura 3-7** la rappresentazione del carico da traffico. In Midas Civil è possibile definire le corsie convenzionali per

carico da traffico in funzione delle superfici di influenza. Si utilizza la funzione "traffic lanes" (**Figura 3-8**) per la definizione delle corsie di traffico convenzionali e la funzione "Moving load Vehicles" per la definizione dei casi di carico in funzione della normativa utilizzata.



■ **Figura 3.8. Corsie convenzionali (a) Corsia N°1 (b) Corsia N°2 (c) Corsia N°3 (d) Aree rimanenti e marciapiedi**

Le verifiche strutturali sono state condotte per le combinazioni di carico riportate in **Tabella 3-1**.

Inviluppi combinazioni	
170-EU-ST	Inviluppo SLU delle combinazioni di carico statiche
171-EU-ST+G1	Inviluppo SLU delle combinazioni di carico statiche + carichi mobili Gruppo 1
172-EU-ST+G2	Inviluppo SLU delle combinazioni di carico statiche + carichi mobili Gruppo 2
173-EU-ST+RS	Inviluppo SLU delle combinazioni di carico statiche + spettri di risposta SLV e SLD
174-EU-ST+RS+ML	Inviluppo di tutte le combinazioni SLU
175-ES-R-ST	Inviluppo SLE RARE delle combinazioni di carico statiche
176-ES-R-ST+ML	Inviluppo SLE RARE delle combinazioni di carico statiche + carichi mobili + spettri di risposta SLO
177-ES-F-ST+ML	Inviluppo SLE FREQUENTI delle combinazioni di carico statiche + carichi mobili + spettri di risposta SLO
178-ES-ST+RS	Inviluppo SLE delle combinazioni di carico statiche + spettri di risposta SLO
179-ES-ST+RS+ML	Inviluppo di tutte le combinazioni SLE

■ **Tabella 3.1. Inviluppi delle combinazioni**

3.3. Calcolo per fasi di costruzione

Il calcolo è svolto per fasi costruttive. Trattandosi di un sistema misto acciaio-clc, il calcolo delle azioni agenti, l'analisi e le verifiche sono eseguite sulla base di una suddivisione in tre fasi del comportamento dell'impalcato ed una fase finale in esercizio, su due diversi schemi statici (**Figure 3.9, 3.10**).

FASE 1: Considera il peso proprio della struttura metallica, delle lastre predalles e del getto della soletta che, in questa fase, è ancora inerte. La sezione resistente corrisponde alla sola parte metallica. La struttura dell'impalcato in questa fase poggia su vincoli fissi con schema Appoggio-Carrello, posti alle estremità. In questa fase pertanto vengono applicati: Peso del getto della soletta e Azioni da costruzione.

FASE 2: Ai successivi carichi permanenti applicati alla struttura (pavimentazione, barriere, ecc.)

corrisponde invece una sezione resistente mista acciaio-calcestruzzo. Si tiene conto degli effetti del ritiro e viscosi. Coefficiente di omogeneizzazione $n=18$. La struttura dell'impalcato in questa fase poggia su vincoli fissi con schema Appoggio-Carrello, posti alle estremità. In questa fase pertanto vengono applicati: Azioni di ritiro e viscosità; Peso della soletta; Pesì dovuti ai carichi permanenti non strutturali; Azioni da costruzione.

La costruzione è simulata attivando tutti gli elementi e caricando l'impalcato con i pesi propri e i pesi portati. La durata della fase è di 123 giorni, durante i quali si sviluppa completamente la resistenza del calcestruzzo, mentre le travi principali esplicano gli effetti reologici relativi al periodo di tempo considerato.

FASE 3: Corrisponde alla condizione di varo dell'impalcato. Tra le posizioni che esso può assumere, è stata valutata in termini di po-

sizione dei supporti la situazione in cui si trova a sbalzo sulla sede ferroviaria, per una lunghezza pari a 10 m, in attesa di essere portato in posizione finale. Coefficiente di omogeneizzazione $n=6$. La struttura dell'impalcato in questa fase poggia su vincoli fissi con schema Appoggio-Carrello con sbalzo.

FASE 4 (Post Construction stage): Corrisponde al transito dei carichi accidentali. In tale fase si tiene conto degli effetti dovuti alla variazione termica differenziale. In questa fase pertanto vengono applicati: Variazione termica differenziale tra soletta e struttura in acciaio; Carico accidentale da traffico. La struttura dell'impalcato in questa fase si trova nella sua configurazione finale. Lo schema statico è uguale a quello della fase 2. Coefficiente di omogeneizzazione $n=6$. In questa fase vengono infine valutati gli effetti delle sollecitazioni indotte dall'azione sismica calcolata con l'ausilio di

spettri di risposta in accelerazione sia orizzontale che verticale negli stati limite: SLO, SLD, SLV.

Le fasi di costruzione del ponte sono state simulate nei modelli MIDAS Civil attivando o rimuovendo

vincoli e carichi in funzione delle stesse.



■ Figura 3.9. Schema statico fase 1 e 2



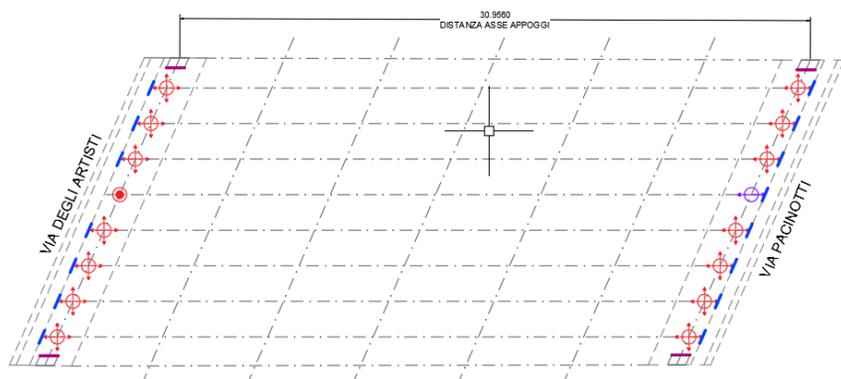
■ Figura 3.10. Schema statico fase 3

3.4. Disposizione dei vincoli

Dati gli schemi strutturali a campata unica appoggiata o appoggiata con sbalzo, il modello di calcolo, limitato al solo impalcato, prevede l'applicazione di vincoli cerniera e appoggio. Le reazioni risultanti nelle diverse combinazioni di carico di tali vincoli sono utilizzate nelle verifiche strutturali di spalle e pulvini e

nelle verifiche di resistenza degli apparecchi di vincolo. La scelta della tipologia dei vincoli è dettata dalla inconsueta forma in pianta dell'impalcato, il quale presenta due lati obliqui, inclinati di circa 24° rispetto all'asse trasversale del ponte; ciò comporta che la rigidità trasversale della struttura attiri più carichi sui supporti più vicini al

centro geometrico dell'impalcato rispetto a quelli più lontani (Figura 3.11). Con riferimento alla figura 3.11, al fine di minimizzare le azioni orizzontali sugli appoggi si è scelto di utilizzare, in corrispondenza dell'asse longitudinale, un solo vincolo fisso sulla spalla sinistra, e un appoggio che inibisce gli spostamenti in direzione verticale



LEGENDA	
	APPOGGIO MULTIDIREZIONALE
	APPOGGIO FISSO
	APPOGGIO UNIDIREZIONALE
	RITEGNO LONGITUDINALE
	RITEGNO TRASVERSALE

■ Figura 3.11. Disposizione degli appoggi

e ortogonalmente all'asse sulla spalla opposta. I rimanenti vincoli impediscono esclusivamente la traslazione in direzione verticale. Le rotazioni al contorno sono tutte consentite.

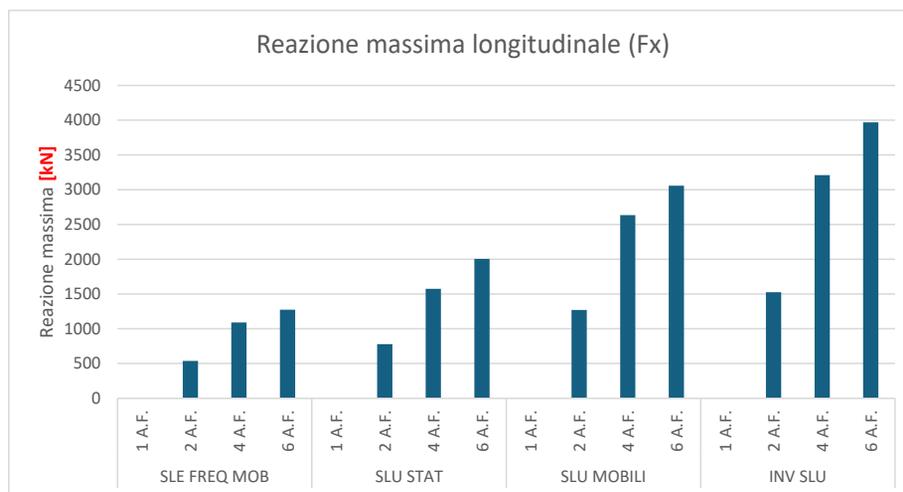
Al fine di valutare l'effetto del numero e tipo di vincoli imposti e il numero corretto di appoggi fissi da adottare, sono state eseguite quattro analisi agli elementi finiti, in cui a parità di carichi applicati alla struttura dell'impalcato è stato fatto variare il numero di appoggi fissi (a sinistra in **figura 3.11**) e unidirezionali (a destra in **figura 3.11**) come di seguito:

1. Analisi: 1 Appoggio fisso + 1 appoggio unidirezionale
2. Analisi: 2 Appoggi fissi + 2 appoggi unidirezionali
3. Analisi: 4 Appoggi fissi + 4 appoggi unidirezionali
4. Analisi: 6 Appoggi fissi + 5 appoggi unidirezionali

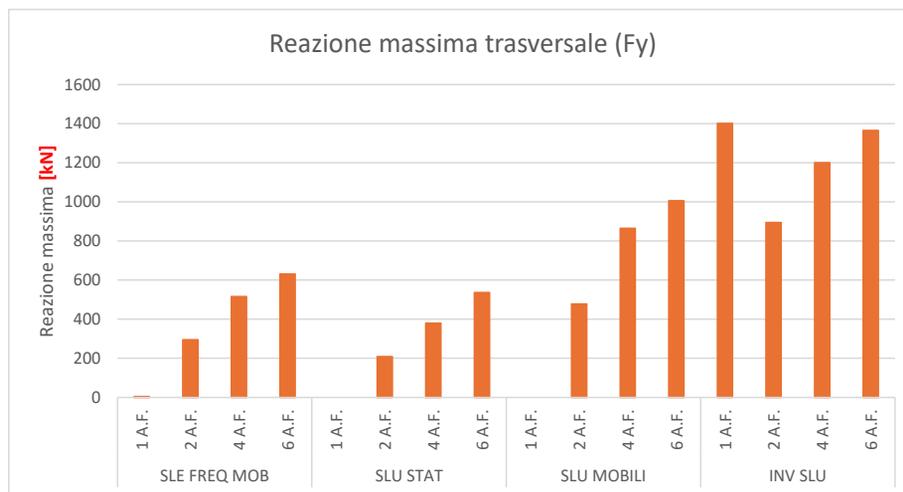
Di volta in volta sono state valutate le entità delle reazioni vincolari rispetto alle seguenti combinazioni di carico:

1. SLU – Statico (Azioni statiche al netto dei carichi mobili)
2. SLU – Mobili (Stato limite ultimo con carichi mobili del gruppo1)
3. SLE – Frequente (Azione di tutti i carichi in combinazione frequente, mobili compresi)
4. INVILUPPO SLU (Involuppo delle combinazioni allo stato limite ultimo)

Si osserva la nascita di coppie di intensità crescente nel piano dell'impalcato al crescere del numero di vincoli fissi all'appoggio. I grafici nelle **figure 3.12, 3.13, 3.14** illustrano, per diverse condizioni di carico, l'andamento della reazione massima nelle tre direzioni X-Y-Z



■ **Figura 3.12. Reazione massima nel piano in direzione longitudinale per le 4 configurazioni di vincolo**

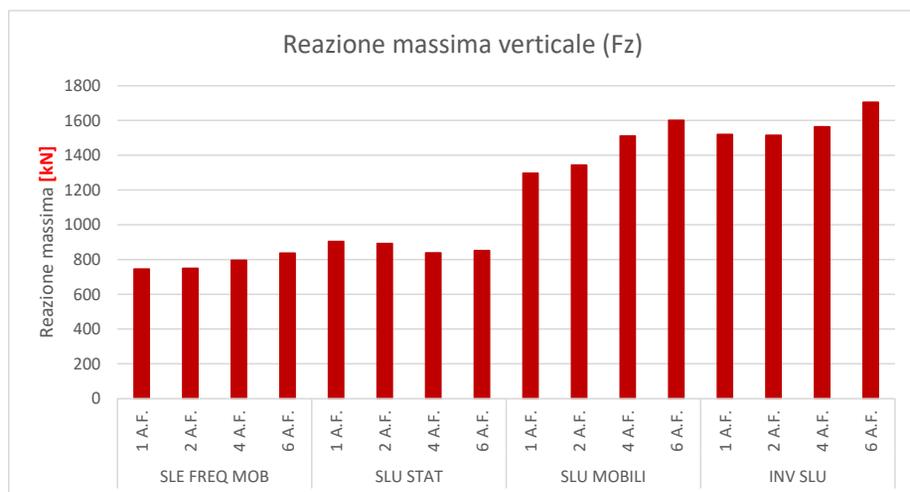


■ **Figura 3.13. Reazione massima nel piano in direzione trasversale per le 4 configurazioni di vincolo**

per ognuno dei quattro schemi di vincolo analizzati, che risulta crescente all'aumentare del numero di vincoli fissi.

I grafici mostrano che il passare da uno schema con un solo appoggio fisso ad uno con più appoggi porta ad un notevole aumento dell'entità delle reazioni massime orizzontali (Fx), le quali tendono a crescere

proporzionalmente al numero di appoggi. Si osserva inoltre che per un numero di appoggi fissi/unidirezionali superiori a 1 si innescano reazioni orizzontali sui dispositivi di appoggio e quindi in cascata sui boggini e sul pulvino, nelle combinazioni di carico statiche SLU e SLE frequente, quindi durante le fasi di normale utilizzo del ponte.



■ **Figura 3.14. Reazione massima verticale per le 4 configurazioni di vincolo**

3.5. Analisi e verifiche

Sono state svolte le analisi delle sollecitazioni riferite ai diversi casi di carico e, dunque, agli involucri di carico allo SLE; è stata effettuata l'analisi modale per identificare i modi di vibrazione, i corrispondenti valori di massa partecipante e le frequenze proprie dell'opera. La **figura 3.15** mostra il primo modo significativo per ognuna delle quattro condizioni di vincolo, la massa partecipante e il periodo di vibrazione.

Dalla **Figura 3.15** si evince che all'aumentare del numero di dispositivi di vincolo fisso, il primo modo di vibrare della struttura passa da rotazionale (1 appoggio fisso) a traslazionale (4 appoggi fissi). In **Tabella 3.2** sono confrontate le masse eccitate al primo modo di vibrare traslazionale Z e torsionale X, per i

N. APPOGGI	TRAN-Z-SUM(%)	ROTN-X-SUM(%)
1	0.71	79.67
2	2.19	78.13
4	43.72	35.42
6	74.49	3.85

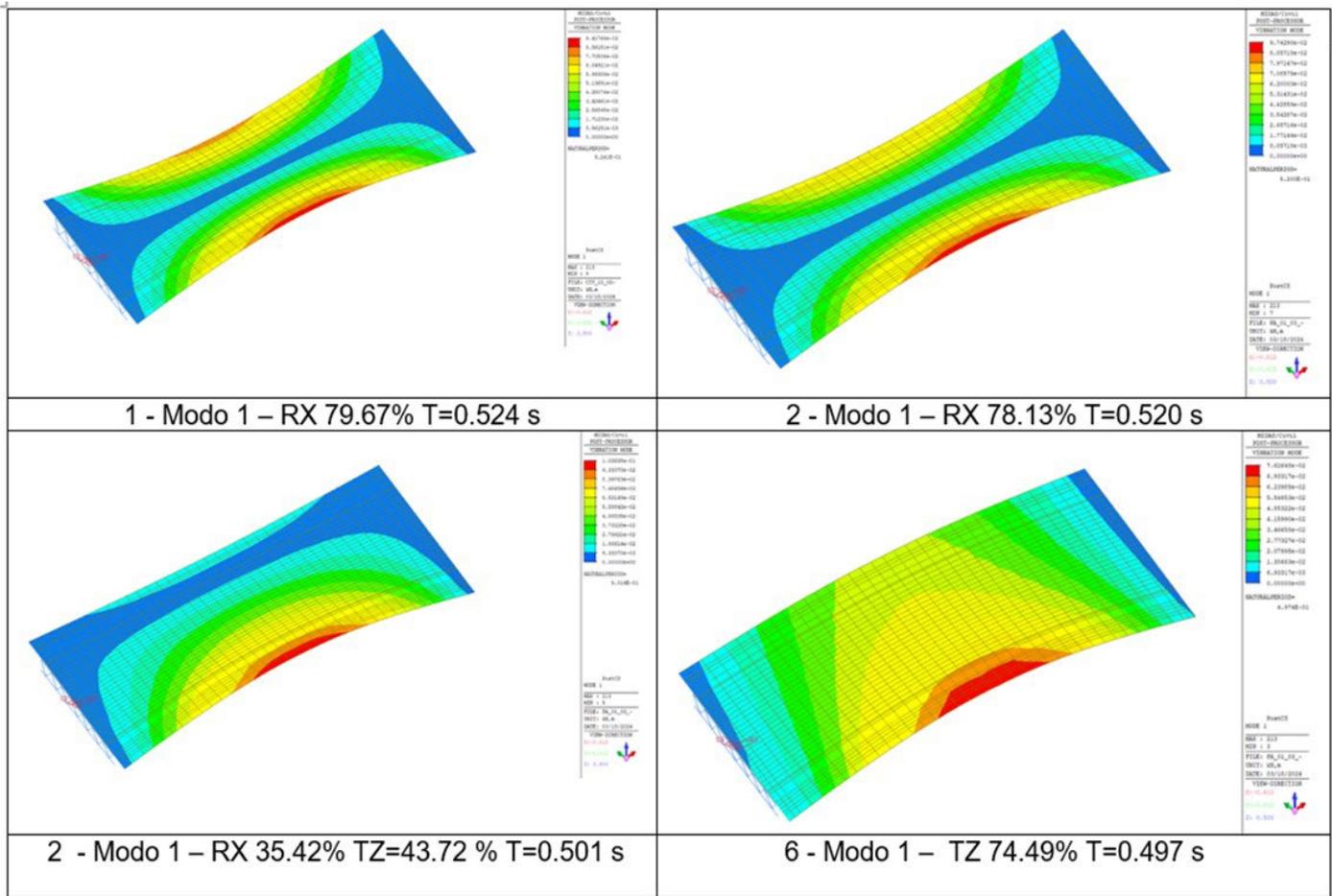
■ **Tabella 3.2. Massa modale partecipante nel primo modo nei vari schemi di vincolo**

quattro schemi statici, espresse in percentuale della massa totale.

Ne consegue che per minimizzare le sollecitazioni sui dispositivi di appoggio nelle condizioni di carico statiche è necessario rinunciare alla ridondanza di vincoli fissi nel piano dell'impalcato.

A completamento della progettazione sono state effettuate le ve-

rifiche strutturali necessarie alla validazione delle scelte adottate. Dunque, si è proceduto con la verifica dei dispositivi di appoggio, la classificazione delle sezioni, la verifica allo SLE e SLU delle travi principali e dei traversi, la verifica della soletta in calcestruzzo armato e dei collegamenti.



■ Figura 3.15. Prima forma modale per gli schemi con 1-2-4-6 vincoli fissi

Bibliografia

- [1] Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)-2018
- [2] UNI EN 206:2016