

PONTE AD ARCO RIBASSATO SOLUZIONE VINCENTE PER I SOVRAPPASSI CICLOPEDONALI

Vista del ponte sul Curone

IMPIEGO DI SOLUZIONI AD ARCO RIBASSATO A VIA INFERIORE PER LO SCAVALCO DEL TORRENTE CURONE E DEL CANALE GRAVELLONE LUNGO LA CICLOVIA VENTO CHE UNIRÀ TORINO CON VENEZIA

Nell'ambito della progettazione esecutiva della Ciclovia VENTO, percorso ciclabile turistico di circa 700 km, che collegherà, una volta realizzata, Torino con Venezia, si è inserita la progettazione di due opere a scavalco rispettivamente del torrente Curone, nel comune di Cornale e Bastida (PV), e del canale Gravello, nel comune di Travacò Siccomario (PV).

Le opere si inseriscono nel Lotto 1 della Ciclovia VENTO, lotto funzionale piemontese. Il tracciato, che si snoda sulla sponda sinistra del fiume Po, attraversa le province di Torino (comuni di Chivasso, Verolengo e Verrua Savoia) e Vercelli (comuni di Crescentino, Fontanetto Po, Palazzolo Vercellese e Trino Vercellese). La pista in oggetto si sviluppa in sinistra idraulica del fiume Po, costeggiandolo per lunghi tratti.

Il percorso segue in prevalenza tratti stradali esistenti; nell'attraversamento degli abitati si tratta in genere di strade asfaltate (quindi utilizzate anche dalla viabilità ordinaria) e di lunghi tratti sterrati o in terra battuta, che attraversano le campagne e sono utilizzati da mezzi agricoli. Non mancano, comunque, tratti di nuova realizzazione.

La scelta progettuale per l'inserimento dei nuovi ponti ha optato per una soluzione in carpenteria metallica, con uno schema statico di ponte ad arco a via inferiore.

La soluzione adottata permette oltre che il normale funzionamento ciclopedonale, il passaggio di mezzi di emergenza per ri-

dure i tempi di primo soccorso nelle aree rurali interessate.

La struttura a campata unica, senza pile o strutture nell'alveo inciso dei fiumi, ha permesso di risolvere senza interferenze le problematiche di interfaccia con il flusso idraulico del corso d'acqua.

La struttura ad arco ribassato a via inferiore ha permesso il contenimento dello spessore dell'impalcato garantendo il franco idraulico estremamente ridotto imposto dal committente.

DESCRIZIONE DELL'OPERA

Le due opere sono caratterizzate, dal punto di vista geometrico, da un impalcato con una lunghezza complessiva rispettivamente di 30,12 m e di 35,12 m per una larghezza di 4 m. Il sistema è costituito da uno schema statico di ponte ad arco a via inferiore. I due archi, tracciati su piani inclinati, sono realizzati mediante profili tubolari e si avvicinano in prossimità della mezzeria. Gli archi vengono connessi nella parte sommitale tramite profili tubolari. L'impalcato metallico, sospeso mediante una copertina di pendini reticolari ad una coppia di archi, non risulta strutturalmente connesso all'estremità degli archi, i quali quindi scaricano le spinte direttamente alle fondazioni.

Gli archi sono realizzati mediante profili tubolari $\phi 508$ mm e sono incastrati alla base su blocchi di ancoraggio in calcestruzzo

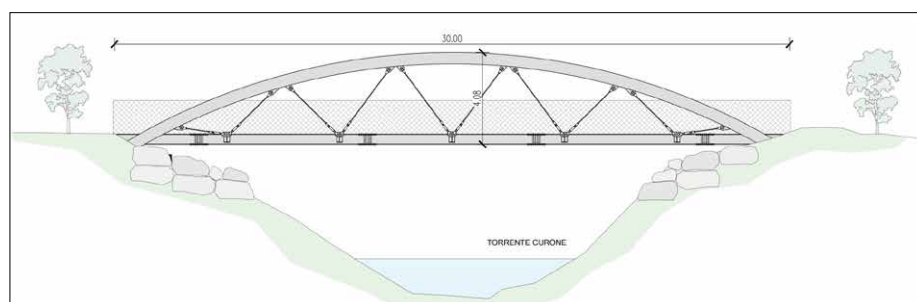


armato. L'ancoraggio dell'arco ai blocchi di fondazione è realizzato mediante una piastra di base con fori maggiorati e rondelle saldate in opera dopo la posa, in modo da garantire sufficienti tolleranze per la posa garantendo maggiore semplicità costruttiva. I tirafondi di collegamento ai blocchi di ancoraggio sono stati ammorzati nel getto di calcestruzzo con una dima di posizionamento.

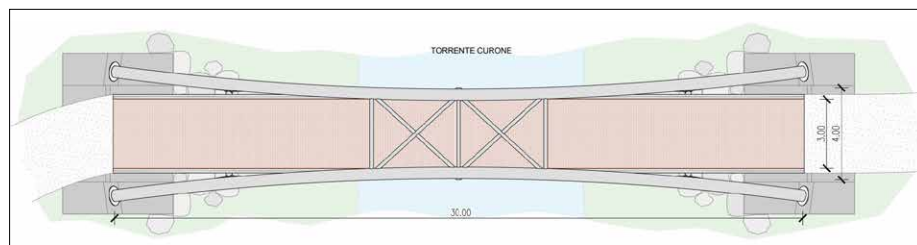
I pendini sono realizzati con funi locked coil. Il terminale di attacco all'arco del pendino è fisso, mentre quello dell'impalcato è regolabile in modo da consentire le operazioni di tesatura in fase di montaggio ed eventuali future regolazioni in fasi di manutenzione.



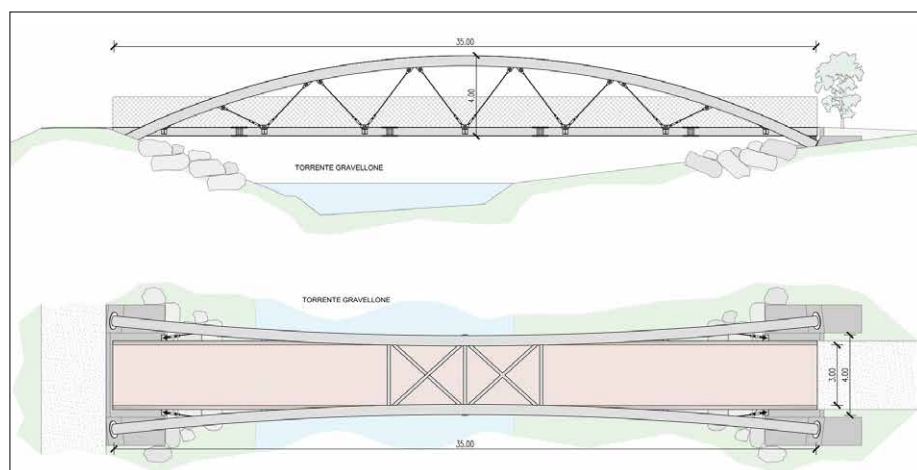
2. Vista del ponte sul Gravellone



3. Prospetto longitudinale del ponte sul Curone



4. Vista aerea del ponte sul Curone



5A e 5B. Prospetto longitudinale e vista aerea del ponte sul Gravellone

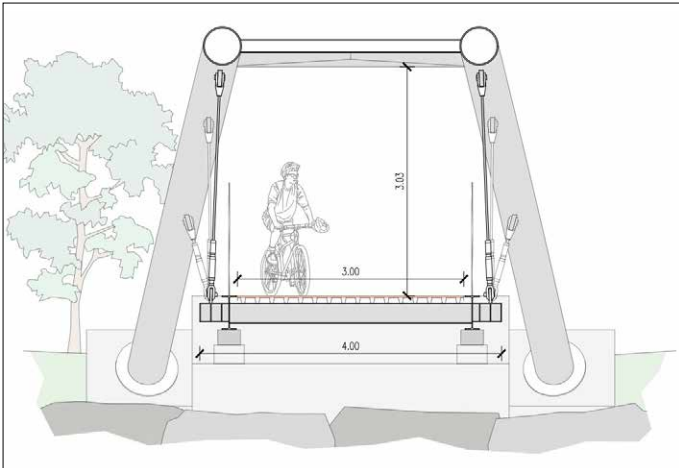
La geometria dell'impalcato, con una leggera contromonta di 10 cm, ha come obiettivo lo smaltimento delle acque meteoriche di piattaforma. Al fine di garantire il raggiungimento di questo obiettivo i pendini sono stati sottoposti ad un pretiro tale da garantire l'assorbimento della deformata indotta dai carichi permanenti (strutturali e portati) e da un'aliquota dei carichi accidentali. L'impalcato presenta una larghezza complessiva di 4 m e una larghezza calpestabile di 3 m. L'impalcato è costituito da due travi longitudinali realizzate con profili IPE450 poste ad un interasse di 3,22 m. Le travi sono realizzate mediante conci rettilinei che approssimano la livelletta dell'impalcato. Tali conci sono uniti tra loro mediante giunto flangiato con coprigiunto. Le travi poggiano su 4 appoggi (2 in corrispondenza di ciascuna spalla).

Le travi vengono collegate da traversi posti ad un interasse di 2,5 m e realizzati con profili di tipo IPE270 e IPE240, uniti mediante giunti saldati a completa penetrazione.

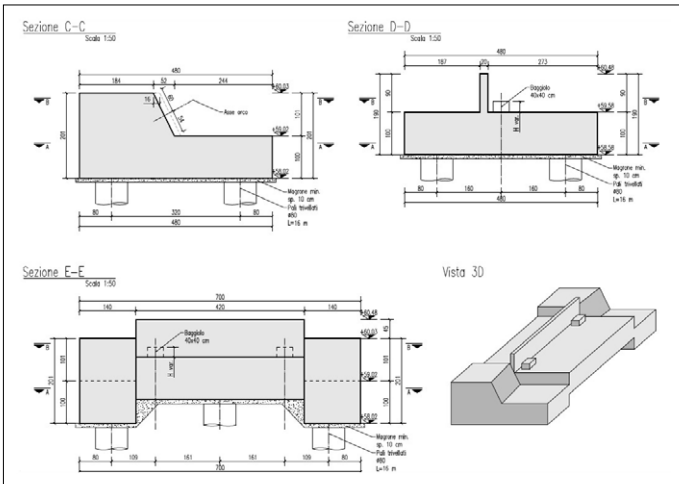
La soletta è realizzata tramite una pavimentazione in legno composito per esterni WPC poggiata su una lamiera metallica ordita longitudinalmente fra i traversi di impalcato.

Lo schema degli appoggi previsto per l'impalcato prevede complessivamente 4 dispositivi di vincolo di varia natura, sintetizzati nello schema di figura 7.

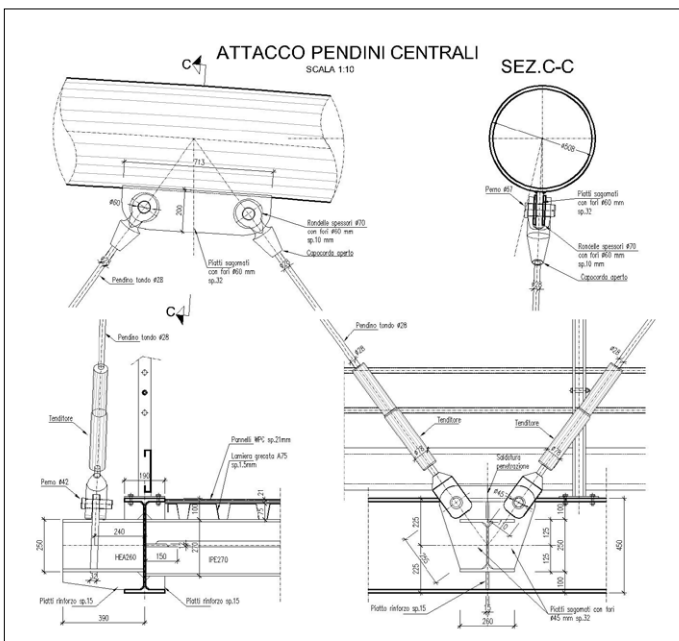
La sovrastruttura poggia su spalle realizzate con suola di fondazione di spessore 1 m, larghezza 4,8 m e larghezza trasversale rispetto all'asse longitudinale del



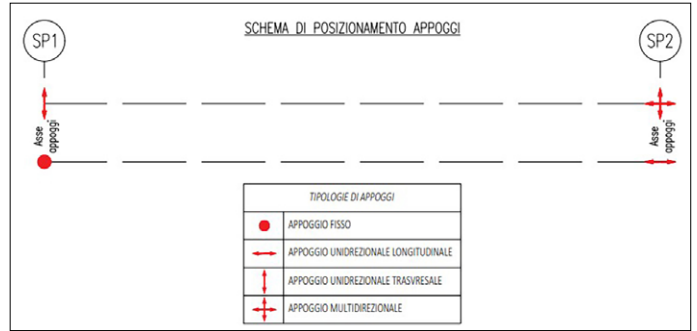
6. Sezione trasversale dell'impalcato della passerella



8. Carpenteria delle spalle



9. Dettaglio fissaggio pendini



7. Schema di vincolo delle travate del ponte

ponete pari a 7 m. In prossimità dell'arco vi è un aumento dello spessore della fondazione a 2 m con idonea rastremazione atta ad accogliere l'innesto del tubolare e relativi fissaggi. Il para-ghiaia è di spessore 0,2 cm e altezza 0,9 cm. Per ogni spalla sono disposti 6 pali trivellati diametro 0,8 m e lunghezza 16 m, disposti su 2 file.

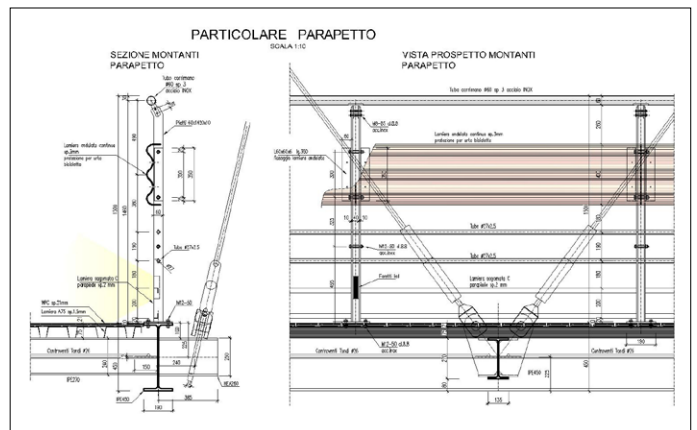
LA MODELLAZIONE E L'ANALISI NON LINEARE E LE CONDIZIONI DI ESERCIZIO

Lo studio della struttura è stato effettuato mediante il metodo basato sugli elementi finiti con l'ausilio del programma CSi Bridge di Computers and Structures, inc. (CSI).

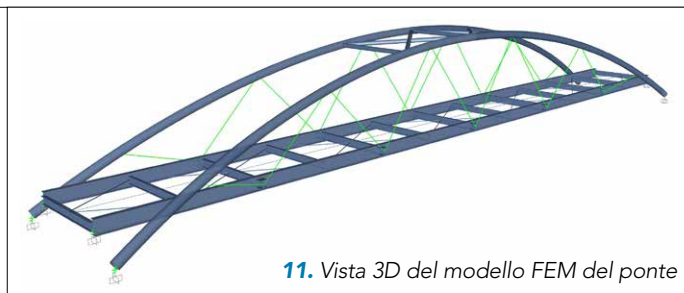
Le analisi svolte, secondo la dizione della nuova generazione degli Eurocodici (Bandini, L. 2024), sono di tipo GNIA - Geometrically Nonlinear Analysis with imperfection, in altre parole analisi non lineari per effetti geometrici, c.d. analisi P-Delta. A tali analisi sono state affiancate anche analisi lineari tradizionali (LA) ed analisi alla biforcazione di equilibrio (LBA, c.d. analisi di Buckling).

Le analisi sono state fatte implementando un modello matematico globale della struttura, di tipo tridimensionale, comprendente tutti gli elementi strutturali -archi, catene, pendini, travi, traversi, controventi ed appoggi-, al fine di riprodurre le condizioni geometriche e meccaniche della struttura stessa.

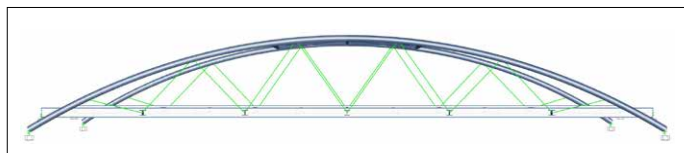
Le membrature metalliche sono state modellate con elementi frame (elementi tipo trave), assegnando ad ogni elemento la relativa sezione trasversale e suddividendolo con opportuna mesh. I pendini sono stati modellati con elementi cable a cui è stata assegnata la corretta sezione resistente ed il pre-tiro richiesto.



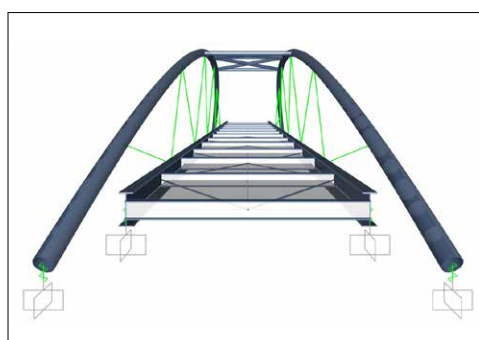
10. Dettaglio fissaggio parapetti



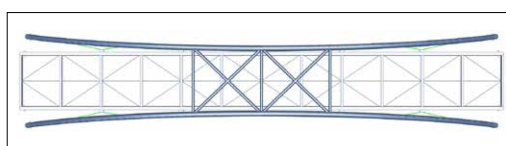
11. Vista 3D del modello FEM del ponte



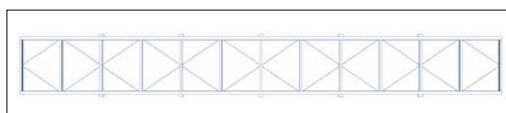
12. Prospetto del modello FEM del ponte



13. Vista frontale del modello FEM del ponte



14. Vista in pianta del modello FEM del ponte



15. Pianta impalcato del modello FEM del ponte

I controventi di piano dell'impalcato sono stati modellati mediante l'impiego di elementi frame, la cui sezione trasversale riproduce fedelmente geometria e posizione dei tiranti utilizzati. Nelle figure dall'11 alla 15 si riportano alcune immagini del modello di calcolo.

DETTAGLIO DELLE ANALISI SVOLTE E DEL PROCESSO SEGUITO

La parte analitica è stata condotta mediante modellazione FEM. Successivamente alla fase di creazione del modello e l'inserimento dei carichi, si è proceduto da prima ad un'esecuzione di analisi lineari (LA) volte alla determinazione dello stato tensionale dei singoli componenti strutturali, in modo da poter controllare, mediante analisi ragionata dei risultati, i risultati macroscopici attesi: freccia teorica attesa, stato di sollecitazione dell'arco e dei pendini. Successivamente a questa prima fase di calibratura, si è proceduti ad analisi lineare di biforcazione dell'equilibrio (LBA). Queste analisi, condotte per le diverse condizioni di carico hanno evidenziato una dipendenza dagli effetti del second'ordine ($\alpha_{cr} < 10$), rendendo necessario l'esecuzione di analisi ad hoc. Si è così proceduto con il metodo GNIA, analisi geometricamente non lineari con l'introduzione delle imperfezioni geometriche. A tale scopo sono state introdotte le imperfezioni geometriche,

per le quali si è proceduto con due strade parallele. La prima strada è stata quella di produrre una distorsione del modello utilizzando la prima forma di Buckling e scalando in modo da avere un'imperfezione massima pari ad 1/500 della corda d'arco. La seconda analisi, condotta in un modello separato è stata quella di introdurre un sistema di carichi nozionali equivalenti all'imperfezione. Ogni nodo del modello FEM è stato così caricato nella direzione trasversale in modo da ottenere effetti equivalenti all'imperfezione descritta. Contestualmente, considerando il fatto che le analisi al second'ordine sono corrette solo tenendo in conto della perdita di rigidità per effetti inelastici indotte dal fatto che le verifiche di resistenza vengono condotte mediante il metodo semi-probabilistico degli Stati Limite Ultimi, si è applicato un fattore riduttivo della rigidità assiali (EA) e quelle

flessionali (EJ) assunto pari a 0,8 (Bandini, L. 2022).

Le analisi scelte sono quindi analisi P-Delta in controllo di forza. Questa procedura ha consentito di applicare il metodo di verifica noto nella nuova generazione dell'Eurocodice, come metodo M3: metodo indiretto che utilizza le sollecitazioni dell'analisi che includono gli effetti di instabilità globale contestualmente alla lunghezza libera di ogni elemento pari

alla lunghezza dell'elemento finito (Kfactor unitari).

LO STUDIO DEL LIVELLO DI COMFORT NEI CONFRONTI DELLE VIBRAZIONI

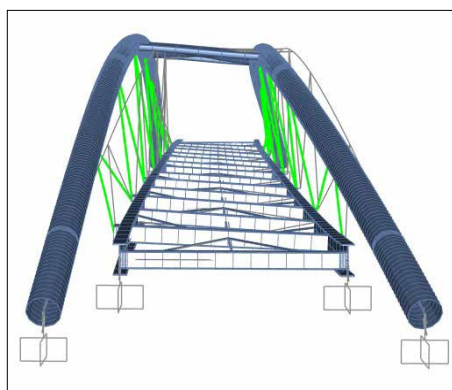
Lo studio delle passerelle ha avuto come filo conduttore l'esigenza di realizzare una struttura improntata all'estetica ed alla snellezza: questo aspetto, combinato con la limitata entità dei carichi permanenti ed accidentali applicati, ha indotto la necessità della valutazione del "comfort"

del pedone, al fine di evitare eccitazioni dinamiche eccessive che potrebbero indurre situazioni di disagio per il pedone. È stata pertanto eseguita una valutazione del rischio di risonanza dell'impalcato nei confronti di forzanti esterne date dalla percorrenza di pedoni facendo riferimento al documento tecnico SÉTRA, 2006, tipicamente assunto come documento di riferimento per analisi di questo tipo.

In entrambe le direzioni verticale e orizzontale, si evidenziano convenzionalmente quattro gamme di frequenza, corrispondenti ad un rischio di risonanza

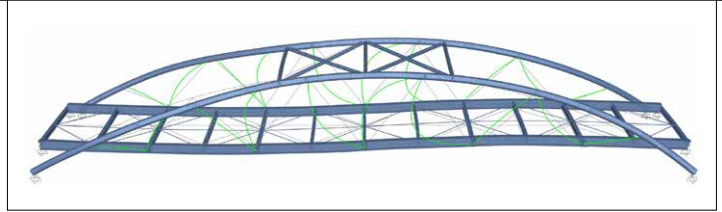
progressivamente decrescente:

- Intervallo 1: rischio massimo della risonanza.
- Intervallo 2: rischio medio di risonanza.
- Intervallo 3: basso rischio di risonanza per le situazioni di carico standard.

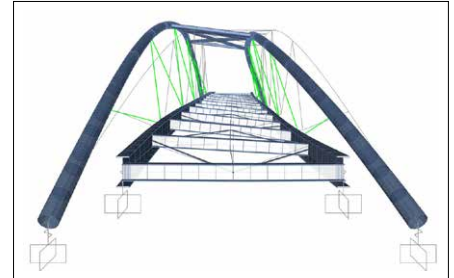


16. Deformed Shape (Buckling) – Mode 1; Factor 8.42

- Intervallo 4: rischio trascurabile di risonanza. L'analisi delle frequenze proprie della struttura ha fornito i risultati riportati in tabella 1 e nelle figure 17, 18 e 19. A valle delle analisi è stata controllata la collocazione della soglia di rischio, assicurandosi che la condizione di comfort fosse soddisfacente. ■



17. Modo 9 - Primo modo longitudinale



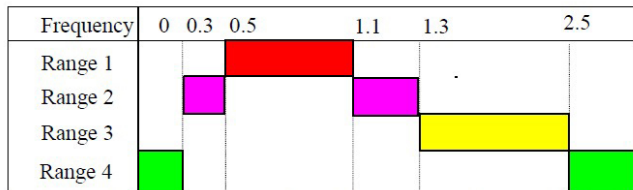
18. Modo 1 - Primo modo trasversale

TABLE: Modal Participating Mass Ratios					
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	
RITZ_PDELTA	Mode	9	0.053	9.59	- 1° modo longitudinale
RITZ_PDELTA	Mode	1	0.696	1.438	- 1° modo trasversale
RITZ_PDELTA	Mode	4	0.175	5.73	- 1° modo verticale

Tabella 1. Analisi delle frequenze proprie. Le foto 17, 18 e 19 sono illustrative di questa tabella

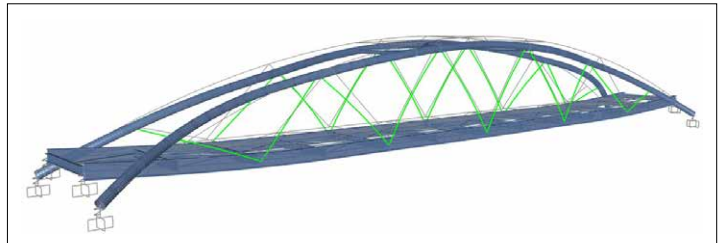


Frequency ranges (Hz) of the vertical and longitudinal vibration



Frequency ranges (Hz) of the transverse horizontal vibrations

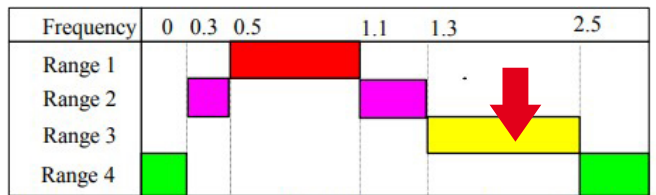
Tabella 2A e 2B. Intervalli di frequenza a vibrazione verticale, orizzontale longitudinale e orizzontale trasversale



19. Modo 4 - Primo modo verticale



Frequency ranges (Hz) of the vertical and longitudinal vibrations



Frequency ranges (Hz) of the transverse horizontal vibrations

Tabella 3A e 3B. Intervalli di frequenza a vibrazione verticale e longitudinale (3A) e trasversale (3B)

- (1) Ingegnere, Direttore Tecnico di Coopprogetti Soc. Coop.
 (2) Ingegnere, Specialista strutture e Socio Coopprogetti Soc. Coop.
 (3) Architetto, Specialista architettura e Socio Coopprogetti Soc. Coop.
 (4) Ingegnere Direttore Tecnico di IPM Engineering
 (5) Ingegnere, Specialista di ponti di IPM Engineering
 (6) Ingegnere, CSi Italia Srl

DATI TECNICI

Stazione appaltante: Agenzia Interregionale per il fiume Po
Contraente generale: Agenzia Interregionale per il fiume Po
Coordinatore del progetto: Arch. Enrico Costa (Coopprogetti in RTP)
Progettisti strutturali: Ing. Lorena Ragnacci e Ing. Danilo Pelle (Coopprogetti in RTP)
Consulenza specialistica: Ing. Leonardo Cappi e Ing. Marco Pizzini (IPM Engineering)

Bibliografia

- Bandini, L. (2022, 5 e 6). GMNIA - Analisi non lineare geometrica e per materiale con imperfezioni per strutture in acciaio. Costruzioni Metalliche.
- Bandini, L. (2024, 2). L'approccio FEM per la verifica di membrature in acciaio: prEN1993-1-14, un documento dedicato negli eurocodici di nuova generazione. Costruzioni Metalliche.
- SÉTRA. (2006, October). Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading.