The Filomena Delli Castelli Bridge over the Saline River (PE)

Il Ponte Filomena Delli Castelli sul Fiume Saline (PE)

Luigino Dezi¹, Gabriele Dezi¹, Raoul Davide Innocenzi², Mario Traversini³

¹ DSD Dezi Steel Design srl, Ancona, Italy

² Department of Construction, Civil Engineering and Architecture, Università Politecnica delle Marche, Italy

³ Cooprogetti Soc. Coop., Gubbio, Italy

ABSTRACT: The paper describes the cable-stayed bridge over the Saline River linking Montesilvano and Città Sant'Angelo towns, in the Pescara province, having main span of 103.4 m and total length of 188.6 m. The bridge has a steel-concrete composite deck, supported by 40 stays anchored to pylons made with concrete filled steel tubes. Two double T steel beams at a distance of 14.1 m and cross beams of variable depth and length, both connected to a 25 cm thick concrete slab, constitute the deck structure. Each pylon has two inclined steel tubes, concrete filled in the lower part (16 m), connected by a box cross beam under the deck level. All the stays are anchored to the top of the deck steel beams, except the four external ones, which are fixed to the concrete abutments. The seismic protection of bridge is improved by lead rubber isolators fixed at the center of the pylons cross beams. The support devices of the main beams are multidirectional negative-load bearings. / La memoria illustra il ponte strallato sul Fiume Saline tra i comuni di Montesilvano e Città Sant'Angelo, in provincia di Pescara, avente la campata principale di 103.4 m di luce e una lunghezza totale di 188.6 m. Il ponte presenta un impalcato a sezione composta acciaio-calcestruzzo sostenuto da 40 stralli ancorati ad antenne cilindriche aventi anch'esse sezione composta acciaio-calcestruzzo. L'impalcato è costituito da due travi metalliche a doppio T poste ad interasse di 14.1 m collegate da traversi portanti ad altezza variabile, entrambi collaboranti con una soletta di 25 cm di spessore. I piloni sono formati da due antenne metalliche inclinate a sezione circolare, rese collaboranti ad un getto di calcestruzzo nella parte inferiore (16 m) e collegate da un traverso metallico a sezione scatolare, su cui è appoggiato l'impalcato. Tutti gli stralli sono ancorati alle due travi dell'impalcato, eccetto i quattro terminali che sono fissati alle spalle. La protezione sismica del ponte è assicurata da isolatori elastomerici con nucleo in piombo posti al centro dei traversi di collegamento delle antenne. Gli appoggi delle travi principali sono invece del tipo multidirezionale a carico negativo.

KEYWORDS: Cable-stayed bridges, steel-concrete composite deck, concrete filled steel tubes, shear connectors, fractioned slab casting, shrinkage, creep. / Ponte strallato, impalcato composto acciaio-calcestruzzo, pilone composto acciaio-calcestruzzo, connettori, getto frazionato soletta, ritiro, viscosità.

1 INQUADRAMENTO DELL'OPERA

Il Ponte Filomena Delli Castelli è l'opera d'arte più importante realizzata nell'ambito dei lavori sulla viabilità dei Comuni di Montesilvano e Città Sant'Angelo, in provincia di Pescara (PE). L'opera nasce per consentire l'attraversamento stradale e ciclo-pedonale del Fiume Saline in corrispondenza della sua foce e completare così la variante alla S.S. 16 Adriatica, al fine di migliorare il collegamento tra i due comuni riducendo il traffico sull'arteria principale.

Il ponte è stato inaugurato il 20/12/2019 ed è stato intitolato a Filomena Delli Castelli, illustre politico italiano e madre costituente, scelta come simbolo dei comuni collegati essendo nata a Città Sant'Angelo ed essendo stata sindaco di Montesilvano dal 1951 al 1955. Il ponte, di tipo strallato, è composto da 3 campate con luci di 42.6, 103.4 e 42.6 m per una lunghezza complessiva di 188.6 m e presenta sia l'impalcato che le antenne a sezione composta acciaiocalcestruzzo, facendone una struttura mista di particolare rilevanza.



Figure 1. Overview of the bridge / Foto aerea del ponte.

2 DESCRIZIONE DELL'OPERA

2.1 Impalcato

L'impalcato ha una larghezza complessiva variabile da 19.20 m a 22.70 m a contenimento della carreggiata di 11.30 m, due cordoli di 0.75 m per l'alloggiamento delle barriere, due percorsi di servizio in corrispondenza degli attacchi degli stralli e di un percorso ciclo-pedonale con larghezza minima di 2.50 m.



Figure 2. Longitudinal view and general plan of the bridge / Prospetto longitudinale e planimetria generale del ponte.



Figure 3. Cross section of the deck / Sezione trasversale dell'impalcato.



Figure 4. Photos of the bridge from above and below / Foto dall'alto e dal basso del ponte.

La struttura dell'impalcato è costituita da due travi metalliche longitudinali a doppio T alte 1.20 m collegate da traversi a doppio T ad altezza variabile da 0.80 a 1.20 m, entrambe collaboranti con una soletta di 25 cm di spessore. Le travi principali sono poste ad interasse di 14.10 m, mentre i traversi, che si estendono in aggetto oltre le travi per una lunghezza variabile tra 4.00 m e 7.50 m lato valle e per 1.10 m lato monte, sono posti ad interasse longitudinale di 4.26 m nelle campate laterali e 4.70 m nella campata centrale.

La soletta in calcestruzzo armato è gettata in opera con l'impiego di predalles in c.a. ed è connessa alle travi metalliche tramite pioli tipo Nelson. Le predalles hanno uno spessore di 7 cm e sono ordite in direzione longitudinale con appoggi sui traversi; sullo sbalzo lato valle in corrispondenza della pista ciclo-pedonale sono alleggerite con blocchi di polistirene espanso.

2.2 Piloni

I piloni sono formati da due antenne metalliche a sezione circolare di diametro pari a 1.90 m e di altezza pari a 33.45 m lato monte e 36.40 m lato valle, riempite di calcestruzzo per i primi 16 m di altezza, reso collaborante tramite 20 pioli tipo Nelson ϕ 19/25 cm, e collegate trasversalmente da un traverso metallico a sezione scatolare largo 1 m e alto 2 m, posto immediatamente al di sotto dell'impalcato.

Ogni antenna è inclinata verso l'esterno trasversalmente di 10° per le due lato monte e 8° per le due lato valle e longitudinalmente di 2°.



Figure 5. Pylon geometry and cross sections / Geometria e sezioni dei piloni.



Figure 6. Photo of a pylon / Foto dell'antenna di un pilone.

Alla base le antenne sono ancorate tramite 20 barre in acciaio ϕ 40 mm tipo Dywidag lunghe 5.50 m e 4 chiavi di taglio a un fusto in calcestruzzo di forma tronco conica e alla sottostante zattera di fondazione.



Figure 7. Detail of pylon base connection / Particolare del collegamento di base delle antenne.

Quest'ultima ha spessore di 2 m e pianta quadrata di 9.2 m di lato, è collegata trasversalmente all'altra zattera dello stesso pilone con un cordolo largo 3 m e alto 2 m ed è fondata su 9 pali trivellati di 1.20 m di diametro lunghi 35 m.

Le zattere sono approfondite a quota -3.00 m rispetto al fondo dell'alveo in modo da lasciare esposta alla corrente la sola sezione dei fusti in calcestruzzo, mentre i traversi di collegamento delle antenne sono posti ad una quota tale da risultare parzialmente interessati dalla corrente fluviale solo in condizioni eccezionali, ovvero per una piena con tempo di ritorno pari a 200 anni.

2.3 Stralli

Ogni strallo è composto da un fascio di 19, 25, 30 o 37 trefoli paralleli cerati e viplati a 7 fili zincati in acciaio armonico a basso rilassamento ed è protetto da una guaina esterna in polietilene ad alta densità.



Figure 8. Strands of a stay before installation / Trefoli di uno strallo prima del montaggio.

Gli stralli, disposti a semi-ventaglio, sono ancorati ai piloni tramite forche fisse imperniate su orecchie saldate alle antenne disposte su 5 livelli distanziati l'uno dall'altro di circa 2.50 m e all'impalcato tramite piastre nervate, direttamente saldate alle travi principali ad interasse di 8.52 m nelle campate laterali e 9.40 m nella campata centrale, conformate in modo da consentirne la tesatura.

Le due coppie di stralli esterni si aprono fino ad ancorarsi ai muri andatori delle spalle tramite 8 barre in acciaio \$40 mm tipo Dywidag lunghe 7.00 m. La distanza trasversale dei punti di ancoraggio passa da 14.10 a 26.10 m, garantendo così una riduzione della flessione trasversale.



Figure 9. Detail of anchorages to the pylons and the deck of a minimum inclination stay / Particolare dell'ancoraggio sulle antenne e sull'impalcato di uno strallo con minima inclinazione.



Figure 10. Photos of anchorage to the abutment of external stays / Foto dell'ancoraggio sulle spalle degli stralli esterni.

2.4 Spalle

Le spalle hanno una altezza complessiva, data dalla somma delle pareti frontali e dei muri paraghiaia, di circa 5 m al di sopra della zattera di fondazione. Le pareti frontali hanno spessore di 1.90 m, mentre i muri paraghiaia, arretrati di 2.25 m rispetto alle prime, hanno spessore di 0.50 m. Le pareti laterali, che si raccordano alle pareti frontali con un tratto inclinato di 34.2°, sono costituite da muri lunghi 5.85 m di spessore pari a 3.00 m, sui quali si agganciano attraverso una sporgenza inclinata gli stralli più esterni di ritenuta delle antenne.



Figure 11. Concrete abutment geometry / Geometria delle spalle.

Le zattere di fondazione sono inscritte in un rettangolo 10.3x16.3 m, hanno uno spessore di 1.4 m e sono fondate su 16 pali trivellati di 1.2 m di diametro disposti su 3 file trasversali: quella più vicina all'impalcato è costituita da 4 pali lunghi 35 m, quella centrale da 6 pali lunghi 30 m e quella più lontana da 6 pali lunghi 28.7 m intestati su un dente di 1.3 m di altezza posto all'intradosso della zattera.

2.5 Appoggi e isolatori

Gli appoggi delle travi principali sui traversi di collegamento delle antenne e sulle spalle sono del tipo multidirezionale in PTFE a carico negativo.

Sui due traversi di collegamento delle antenne ed al di sotto dei traversi di collegamento delle travi principali dell'impalcato sono posizionati degli isolatori elastomerici con nucleo in piombo (LBR, Lead Rubber Bearings), che controllano gli spostamenti dell'impalcato nel piano orizzontale e assicurano la protezione sismica del ponte sommando i benefici legati all'allungamento del periodo proprio a quelli derivanti dalla dissipazione di energia.



Gli isolatori per ragioni costruttive sono suddivisi in 4 elementi, ciascuno dotato di un nucleo in piombo e di una rigidezza orizzontale equivalente di 4.25 kN/mm, garantendo così una rigidezza orizzontale equivalente di 17 kN/mm, uno smorzamento viscoso equivalente maggiore del 25% e uno spostamento orizzontale massimo di ±200 mm.



Figure 13. Rubber isolator geometry / Geometria degli isolatori elastomerici.

3 MODELLAZIONE E ANALISI

3.1 Analisi non lineari per fasi costruttive

Le analisi sono state svolte ricorrendo ad un modello di calcolo globale agli elementi finiti comprendente anche i pali di fondazione.

Per la modellazione dell'impalcato, delle antenne, degli stralli e dei pali di fondazione si sono utilizzati elementi *frame*, mentre per le sole zattere di fondazione delle antenne e per le spalle si sono utilizzati elementi *shell*.



Figure 14 Extruded view of bridge FEM model / Vista estrusa del modello FEM del ponte.

Le sollecitazioni per le condizioni di carico statiche sono state determinate mediante analisi di tipo non lineare per step, che includono anche gli effetti del secondo ordine.

In questo modo è stato possibile valutare correttamente la trazione negli stralli e distinguere nelle travi principali le sollecitazioni che interessano la sezione metallica (peso proprio e della soletta) e la sezione composta (carichi permanenti e azioni variabili).

In particolare, a valle dell'ultimo step di costruzione del ponte sono stati applicati i carichi variabili, considerando le caratteristiche inerziali di travi e antenne composte a breve termine, con un coefficiente di omogeneizzazione pari a $n_0 = 6.12$ derivante dal modulo elastico E_{cm} del calcestruzzo a 28 giorni.

Per valutare le sollecitazioni a lungo termine dei carichi permanenti (G2) e del ritiro (cs) è stato introdotto uno step di modifica delle caratteristiche inerziali con coefficienti di omogeneizzazione pari a n_{G2} = 17.79 e n_{cs} = 16.98 derivanti da un modulo elastico E_c^* del calcestruzzo corretto secondo la formula:

$$E_c^* = \frac{E_{cm}}{1 + \psi_L \varphi(t, t_0)} \tag{1}$$

in cui:

- ψ_L è il moltiplicatore della deformazione viscosa, pari a 1.10 per i carichi permanenti e 0.55 per il ritiro,
- φ(t,t₀) è il coefficiente di viscosità, calcolato con t₀ pari a 28 giorni per i carichi permanenti e 1 giorno per il ritiro.

Per ottenere i massimi e minimi momenti flettenti e tagli sulle travi principali dovuti ai carichi mobili sono state studiate due differenti disposizioni trasversali delle corsie di carico massimizzando gli effetti prima sulla trave sinistra poi su quella destra.



Figure 15 Transverse position of moving loads / Disposizione trasversale dei carichi mobili.



Figure 16 Bending moment M and shear V envelope diagrams on main girders due to moving loads / Diagrammi d'inviluppo dei momenti flettenti M e tagli V sulle travi principali dovuti ai carichi mobili.

3.2 Effetto Shear-lag

Un problema rilevante affrontato nella modellazione dell'opera è rappresentato dall'effetto shear-lag in soletta, caratterizzata da una larghezza significativa e da forze assiali concentrate trasmesse dagli stralli.

La tipologia strutturale strallata, infatti, comporta la presenza nell'impalcato di sollecitazioni di compressione in aggiunta a quelle flessionali, secondo lo schema di trave continua su appoggi cedevoli costituiti dagli stralli stessi.

Per il calcolo della larghezza efficace della soletta, da utilizzare sia nell'analisi globale che nelle verifiche sezionali dell'impalcato, è stato elaborato un modello globale che considera la soletta mediante elementi *shell*.

Sotto l'effetto di un carico uniformemente distribuito in direzione longitudinale, nella sezione trasversale della soletta è stato valutato l'andamento delle tensioni, deducendone la larghezza che può essere considerata effettivamente partecipante.



Figure 17 Slab effective width from FEM model / Larghezza efficace della soletta da modello FEM.

4 FASI COSTRUTTIVE

Le principali fasi di montaggio seguite per la realizzazione del ponte sono:

- Varo delle 4 antenne assemblate in officina, successivo montaggio dei traversi di collegamento e getto di parziale riempimento delle antenne;
- Varo su pile provvisorie di 4 conci delle travi principali su 6 totali e successivo montaggio dei traversi;
- Varo dei restanti 2 conci nella zona d'alveo previo montaggio e prima tesatura di 8 stralli;
- Posa in opera delle predalles;
- Montaggio e prima tesatura in 8 fasi dei restanti 32 stralli;
- Tesatura degli stralli per ottenere la controfreccia necessaria a compensare gli abbassamenti prodotti dal peso della soletta e dagli altri carichi permanenti;
- Getto della soletta in 3 fasi;
- Posa in opera della pavimentazione stradale e realizzazione delle opere accessorie;
- Regolazione finale degli stralli.

In particolare, per ottimizzare le sollecitazioni sulla struttura e controllare la fessurazione della soletta, è stato frazionato il getto in 3 fasi: getto delle campate laterali (fase 1), poi della campata centrale (fase 2) e da ultimo dei tratti in prossimità delle antenne (fase 3).



Figure 18 Slab casting sequences / Fasi di getto della soletta.



Figure 19 Photo of slab casting / Foto del getto della soletta.

5 CONCLUSIONI

The Filomena Delli Castelli Bridge, despite having a moderate span in the field of cable-stayed bridges, represents instead a remarkable application for steel-concrete composite structures. Actually, in front of a central span of 103.4 m and a maximum width of 22.7 m, the deck consists of two steel beams only 1.2 m high connected to a 25 cm thick r.c. slab.

In addition, the bridge is characterized by deep geometric complexity, given by variable width of the deck and both longitudinal and transversal inclination of the antennas, for which composite section was used for the lower part without stay anchorages, subject to the greatest stresses.

Il Ponte Filomena Delli Castelli, pur avendo una luce modesta nel campo dei ponti strallati, rappresenta invece una notevole applicazione per le strutture composte acciaio-calcestruzzo. Infatti, a fronte di una campata centrale di 103.4 m di luce e una larghezza massima di 22.7 m, l'impalcato è costituito da due travi metalliche di soli 1.2 m di altezza solidali ad una soletta in c.a. di 25 cm di spessore.

Inoltre, il ponte è caratterizzato da profonda complessità geometrica, data dalla larghezza variabile dell'impalcato e dall'inclinazione delle antenne sia in direzione longitudinale che trasversale, per le quali si è ricorso all'uso della sezione composta per il tratto inferiore privo di ancoraggi degli stralli, soggetto alle maggiori sollecitazioni.