



# La Fenice di Comacchio



**L'IMPORTANTE VIA D'ACQUA DELLA PIANURA FERRARESE È DA TEMPO OGGETTO DI LAVORI DI AMMODERNAMENTO TRA CUI ANCHE LA SOSTITUZIONE DI TUTTI I PONTI ESISTENTI**

*Un render del nuovo ponte a Finale con intervento d'artista*

Marco Petrangeli\* Gaetano Usai\*\* Paolo Tortolini\*\*\*

L'idrovia Ferrarese, che connette l'omonima città con il porto di Comacchio sull'Adriatico, in questi anni è oggetto di lavori di ammodernamento consistenti nell'allargamento della sezione e nella rettifica di alcune curve più strette in modo da permettere il transito di natanti di dimensioni maggiori. Questi lavori stanno richiedendo la sostituzione di tutti i ponti esistenti che non possiedono né la luce né il franco necessario. Arrivando a Finale di Rero (FE), una curva di raggio ridotto che non poteva essere allargata ha richiesto lo scavo di un nuovo canale navigabile, lasciando l'attuale a disposizione per l'or-

meggio. Tra le due vie d'acqua nascerà un'isola artificiale (Figura 1) destinata a ospitare un'area ricreazionale che andrà ad arricchire il già articolato ed affascinante sistema di ciclabili, il quale permette oggi una fruizione eco-turistica di questa attraente parte del delta del Po.

Il ponte esistente, così come il nuovo, sorge sulla punta di monte di quest'isola.

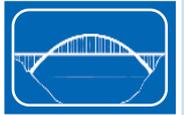
Il nuovo attraversamento avrà bisogno di due campate di 40 e 80 m circa per superare il vecchio e il nuovo canale rispettivamente. La configurazione è chiaramente adatta a un dop-

pio arco a spinta eliminata, sia perché sostituisce l'arco in calcestruzzo armato esistente sia perché è necessario adottare una via inferiore per assicurare il franco senza alzare troppo la livelletta stradale, dato che in sponda sinistra dell'attraversamento si è già in pieno Paese.

Il ponte progettato dagli Scriventi, in fase di costruzione da parte di Coop Costruzioni, è stato concepito per richiamare l'Airone Cinerino, grande e pregiato esemplare della ricca fauna aviaria di questa parte del delta. Il richiamo è reso possibile dall'inclinazione dei pendini che trasforma la funicolare dei due archi in un profilo del tutto simile a quello di due ali di un airone in fase di decollo (Figure 2A e 2B).



1. Il ponte esistente andrà demolito e sostituito con la nuova opera



### Disegno ed efficienza strutturale

Nella continua ricerca di visibilità e citazioni, la progettazione di ponti sta seguendo le contorsioni di certa architettura moderna. Sfortunatamente, i ponti non sempre possono ignorare le leggi di gravità come gli edifici perché camion e treni sono notevolmente pesanti ed i momenti flettenti che insorgono per luci appena superiori a poche decine di metri sono infinitamente superiori a quelli che nascono dalle contorsioni di un edificio che vuole ergersi ad icona post-urbana.

Detto questo, non è che la perfetta verticalità e simmetria sia necessariamente vantaggiosa in tutte le situazioni, anche perché sono le stesse azioni esterne, a meno della gravità, che possono presentare variabilità e asimmetrie. Così come in natura la resilienza degli organismi non sembra aver bisogno di linee rette, anche in architettura la tenacità non necessariamente si ottiene con superfici piane ed angoli retti.

I ponti ad arco sono particolarmente adatti ad essere manipolati dalla moda architettonica del “famolo strano” a tutti i costi. Gli archi sono, infatti, molto iperstatici e per luci fino a 150 m circa le sollecitazioni relativamente contenute possono essere ripartite in modo da conferirgli qualunque forma, a patto di realizzarli in acciaio. Ecco quindi che vengono realizzati archi di tutti i tipi: posti in piani inclinati, ruotati, con geometrie fuori funicolare fin ad arrivare alla totale perdita di funzione portante, lasciati lì solo con funzione estetica, simbolo perituro di un'epoca di sprechi ormai purtroppo o per fortuna terminata.

Per luci fino a 150 m gli archi a spinta eliminata, così come gli strallati, difficilmente possono essere più economici di una trave continua. Se però queste strutture sono progettate con alcuni accorgimenti di efficienza strutturale e facilità costruttiva, il loro costo può essere ragionevolmente prossimo a quello di una trave di luce equivalente.

Tra questi accorgimenti è ovviamente necessario che l'arco abbia una geometria in funicolare e che, dove possibile, si utilizzino profili aperti da saldare in automatico. Anche la disposi-



3. Un render del nuovo ponte a Finale di Rero

zione dei pendini può fare una certa differenza: i network arches [1] risultano molto efficienti e su luci medio grandi possono effettivamente condurre ad un risparmio di materia mediante la riduzione dei momenti flettenti su archi ed impalcato. Per luci medio-piccole, al contrario, non sembra che la complicazione ed i maggiori oneri di una configurazione a “rete” possa bilanciare il risparmio di materiale, soprattutto per l'impalcato che viene ad essere dimensionato dagli effetti locali.

In occasione della gara per il ponte di Finale, gli Autori hanno ritenuto fosse giunta l'occasione di proporre una soluzione ad arco con pendini inclinati.

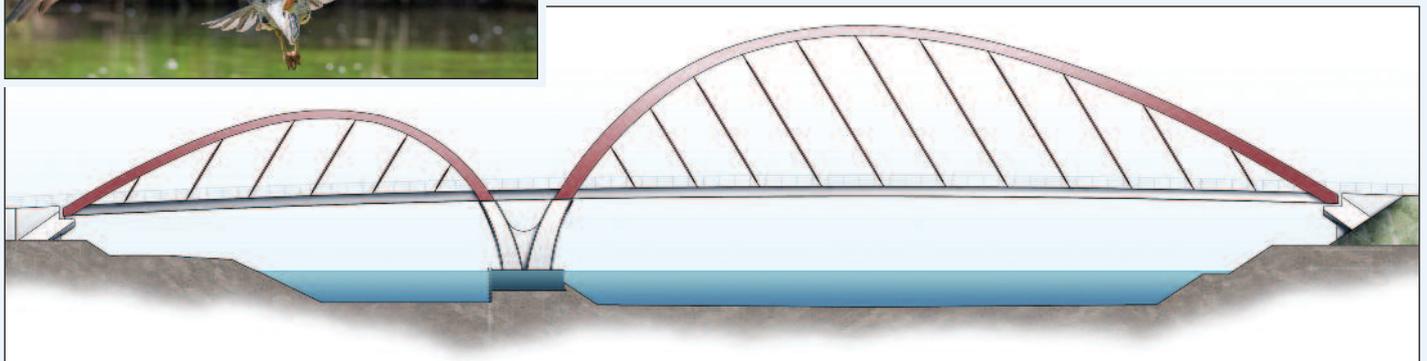
Perdendo la verticalità dei pendini la funicolare dell'arco si trasforma infatti in un profilo asimmetrico che ricorda quello di un'ala parzialmente spiegata, con perdite di efficienza strutturale assolutamente trascurabili. La funicolare dell'arco così ottenuta è apparsa immediatamente calzante per il ponte a doppio arco di Finale di Rero (Figura 3), richiamando in maniera impressionante la sagoma dell'animale simbolo delle valli di Comacchio ovvero appunto l'Airone Cinerino.

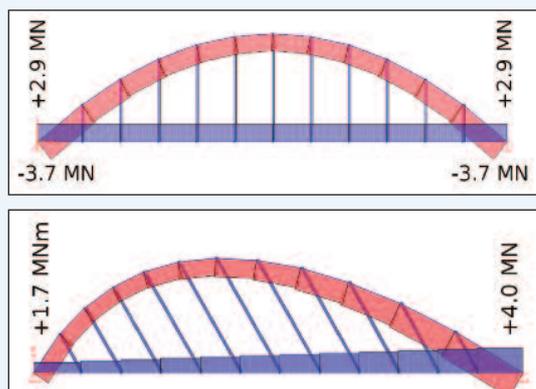
### Il comportamento strutturale

Per investigare l'effetto dell'inclinazione dei pendini sul comportamento strutturale dell'arco, abbiamo analizzato la luce più grande di Finale nelle due configurazioni a pendini verticali (arco simmetrico) e in quella di progetto a pendini inclinati. Sono stati realizzati due modelli piani agli elementi finiti delle due strutture aventi identica luce (74 m) e le medesime caratteristiche inerziali associate agli archi e all'impalcato, che sono state prese direttamente dal ponte di Finale schiacciando i due archi e le due travi d'impalcato su un unico piano.

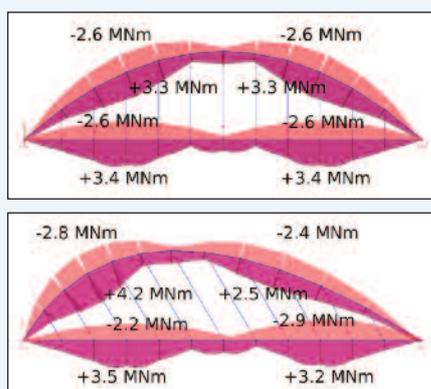


2A e 2B. L'Airone Cinerino, ispirazione del nuovo attraversamento a Finale





4A e 4B. La distribuzione di sforzo assiale dovuta ai carichi permanenti

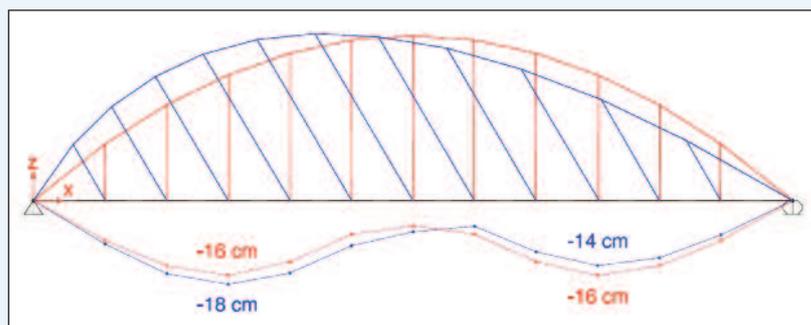


5A e 5B. L'involuppo dei momenti flettenti dovuti al carico accidentale

Considerato che i due archi sono in funicolare, i momenti flettenti dovuti a pesi propri e portati sono in entrambi i casi trascurabili. Lo sforzo assiale cambia invece tra le due configurazioni come riportato in Figure 4A e 4B. I pendini sono più caricati in quanto a parità di componente verticale (carico) il loro sforzo aumenta di un fattore di  $1/\cos\alpha$ , con  $\alpha$  l'angolo di inclinazione dei pendini rispetto alla verticale ( $30^\circ$  per il progetto presentato). Anche la compressione negli archi e la trazione nell'impalcato è differente, in quanto nella configurazione a pendini inclinati lo sforzo assiale varia linearmente a causa della componente orizzontale del tiro sui pendini. Nel complesso, però, aumenti e riduzioni portano allo stesso valore medio delle sollecitazioni assiali e quindi alla stessa richiesta di area strutturale.

Passiamo quindi ad analizzare il comportamento delle due strutture per carichi accidentali. Sui due modelli delle sollecitazioni è stato fatto transitare il carico standard dell'Eurocodice, corrispondente a una piattaforma stradale da 9,5 m.

Gli involuppi dei momenti flettenti delle due strutture sono riportati nelle Figure 5A e 5B. Il raffronto delle Figure 5A e 5B mostra quanto l'andamento sia molto simile; ancora una volta il ponte con pendini inclinati non sembra perdere particolarmente efficienza; infatti i suoi momenti hanno valor medio uguale a quelli della struttura con pendini verticali. Si nota invece che l'arco con i pendini inclinati è meno efficiente là dove questi incidono perpendicolarmente all'arco stesso nella zona delle "reni o fianchi" (mentre la situazione si ribalta dal lato opposto). Il comportamento strutturale sotto carichi accidentali è confermato anche dal confronto degli spostamenti ovvero dall'invi-



6. L'involuppo degli abbassamenti dell'impalcato dovuti a carichi accidentali

luppo degli abbassamenti dell'impalcato rappresentato in Figura 6. Anche per queste grandezze, il valor medio della soluzione con pendini inclinati è molto prossima a quanto si ottiene con la configurazione simmetrica.

In definitiva, inclinare i pendini non sembra porti ad un'apprezzabile riduzione di efficienza strutturale. Le stesse conclusioni potrebbero ovviamente non valere nel caso di una maggiore inclinazione dei pendini o per ponti nel quale il rapporto di rigidità tra archi ed impalcato sia completamente diffe-

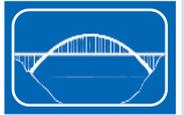
rente. Le analisi condotte, infatti, non pretendono di essere esaustive di tutte le possibili configurazioni che si possono avere negli archi a spinta eliminata, ma certamente si può affermare che la configurazione geometrica adottata non determina un detrimento al comportamento strutturale dell'opera, come invece si è assistito in una serie di opere recenti nelle quali si inclinano gli archi in maniera arbitraria, peggiorando sensibilmente il comportamento laterale degli stessi, sia in termini di resistenza alle forze orizzontali che a fenomeni di instabilità. Queste opere spesso perdono di snellezza ed eleganza con membrature molto più massicce di quanto sarebbe richiesto dal comportamento stabile in funicolare degli archi stessi.

## Fondazioni e condizioni vincolari

Il ponte di Finale si trova a circa 30 km dalla foce del Po di Volano e i terreni di fondazione sono composti da depositi alluvionali che si protraggono per una profondità considerevole di alcune centinaia di metri. I livelli superficiali direttamente interessati dalle fondazioni dell'opera sono principalmente costituiti da argille a caratterizzazione ove sabbiosa ove limosa, in cui si rinvenivano inserti di torba e strati di sabbia anche di 5-6 m di spessore. Le indagini in sito si sono spinte fino a profondità di 50 m (prove STP, penetrometriche statiche e dinamiche, sondaggi a carotaggio continuo) e sono state completate da test di laboratorio su campioni prelevati (prove a taglio diretto, prove edometriche, prove triassiale drenata e non drenata). In aggiunta, nelle diverse campagne di indagini, sono state eseguite prove con coni di penetrazione per la misura della pressione interstiziale. Sulla base delle informazioni ottenute è stato redatto il modello geotecnico di dettaglio del sito.

Tale modello ha messo in luce l'impossibilità di individuare un substrato rigido d'imposta a profondità ragionevoli. Pertanto, nel progettare le fondazioni dell'opera, si è fatto ricorso alla portanza laterale di pali di grande diametro (D1.500) di lunghezze variabili tra 29 e 32 m. Tale profondità è risultata necessaria per superare gli strati più soffici e raggiungere formazioni più resistenti.

La geometria delle fondazioni ha dovuto anche tenere conto delle condizioni dettate dalla presenza



del ponte preesistente, che verrà demolito prima della costruzione della nuova opera, dalla posizione del nuovo canale e di quello esistente che dovrà essere mantenuto in funzione durante tutti i lavori.

Infine, la progettazione delle opere ha tenuto in debita considerazione, attraverso analisi di rischio e specifici modelli di calcolo, dei pericolosi fenomeni di liquefazione del terreno conseguenti ad eventi tellurici, anche sulla scorta di quanto accaduto nell'esperienza del non lontano, temporalmente e geograficamente parlando, terremoto emiliano del Maggio 2014.

## La carpenteria metallica

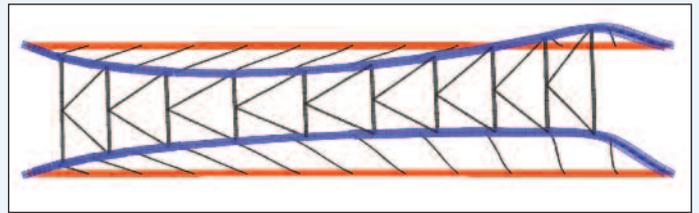
Gli archi e l'impalcato sono realizzati con 500 t di acciaio tipo SJ355. Il montaggio di questa carpenteria può essere eseguito mediante gru di portata medio piccola, in quanto l'arco grande verrà realizzato in terraferma prima di scavare il nuovo canale e l'arco piccolo è comunque un'opera di dimensioni modeste, molto leggera e relativamente facile da movimentare. Allo stato attuale, il colore definitivo della carpenteria metallica non è stato ancora deciso. Gli Autori ritengono che il bianco che è andato tanto di moda negli ultimi anni non sia necessariamente la scelta migliore. Gli Autori e la Committenza stanno convergendo verso un colore cenere, quello appunto dell'Airole Cinerino, che oltre all'originalità avrebbe anche il vantaggio di assicurare una maggiore resistenza allo sporco riducendo la necessità di manutenzione.

## Gli archi

Gli archi sono contenuti in piani convergenti inclinati di  $14^\circ$  rispetto alla verticale per entrambe le luci. L'inclinazione degli archi non complica significativamente la costruzione e tuttavia ha il vantaggio di ridurre i controventi e conferire alla struttura un aspetto più slanciato.

La sezione degli archi è di tipo aperto a doppio T saldato di altezza variabile tra 700 a 1.200 mm con flange di larghezza compresa tra 700 e 900 mm. L'anima ha spessore corrente variabile tra 20 e 25 mm, le flange hanno spessori fino a 50 mm.

Anche se le sezioni scatolari hanno una migliore resistenza e stabilità in compressione, il loro uso in ponti di modesta grandezza presenta la controindicazione di non permettere l'accesso e l'ispezione interna a causa dell'impraticabilità per le ridotte dimensioni. Per lo stesso motivo non è possibile posizionare gli ancoraggi dei pendini dentro tali sezioni. Se poi si tiene conto del costo aggiuntivo richiesto dalla realizzazione di una sezione scatolare rispetto ad una aperta si comprende che è molto più conveniente aggiungere del materiale su di una sezione a T per ottenere la stessa capacità portante piuttosto che ricorrere ad una sezione scatolare di piccole dimensioni. Per contrastare la debolezza delle sezioni aperte rispetto a quelle scatolari nei confronti della resistenza presso-torsionale è sufficiente prevedere un sistema di controventatura



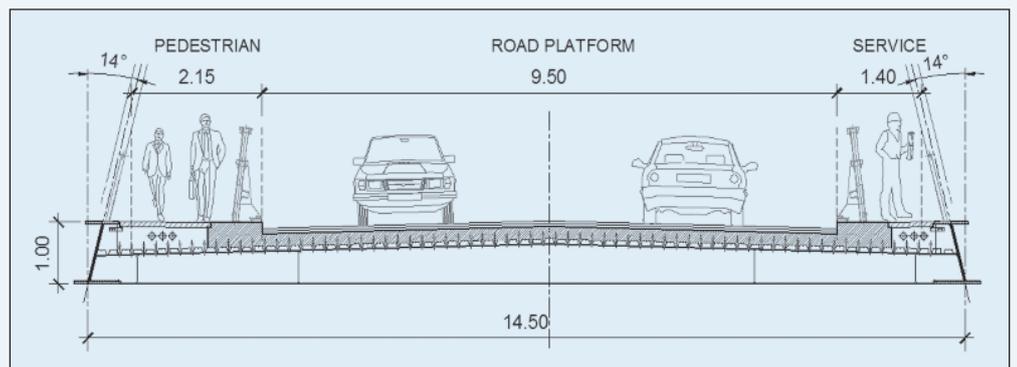
7. Il primo modo di instabilità degli archi

mento efficace che migliori decisamente anche la risposta alle forze orizzontali, quali vento e sisma. Sebbene la controventatura degli archi sembra essere passata di moda, il ponte di Finale è stato dotato di tale essenziale elemento strutturale che gli permette di ottenere un coefficiente di sicurezza allo sbandamento degli archi superiore a 7 con il primo modo, raffigurato in Figura 7, che coinvolge ovviamente la parte bassa dell'arco, lì dove termina la controventatura per lasciare un franco di circa 6,5 m sul piano stradale.

## L'impalcato

Il ponte ha una larghezza di 14 m circa sui quali ospita una piattaforma tipo C2 da 9,5 m, un corridoio ciclopeditonale da 2 m da un lato ed un marciapiede di servizio dall'altro. L'impalcato è portato dalle due travi longitudinali di bordo (catene) e da trasversi posti ad interesse di 3 m come raffigurato in Figura 8. Le travi longitudinali sono inclinate come gli archi, ma le flange sono orizzontali in modo da facilitare l'attacco con i trasversi e i marciapiedi.

La soletta in calcestruzzo fibrorinforzato sarà gettata su lamiera grecata galvanizzata. Onde ridurre la quota parte di spinta assorbita dalla soletta, questa è connessa rigidamente solo nel settore centrale del ponte alle travi longitudinali ed alla pila fissa sottostante. Nella parte restante del ponte la soletta non arriva fino alle travi longitudinali ma si ferma prima in modo da lasciare dei cavedii attrezzati sotto i due marciapiedi. Così facendo, il tiro delle catene migra solo in parte sulla soletta in quanto i trasversi non hanno grande rigidità nel piano orizzontale e non sono in grado di trasferire quote significative di sforzo tra le travi laterali che chiudono la spinta dell'arco e la soletta. La massa sismica di quest'ultima e le eventuali forze di frenature si scaricano invece sulla pila centrale grazie all'allargamento della soletta nel tratto centrale del ponte che la collega rigidamente a quest'ultima.



8. La sezione dell'impalcato



## I pendini

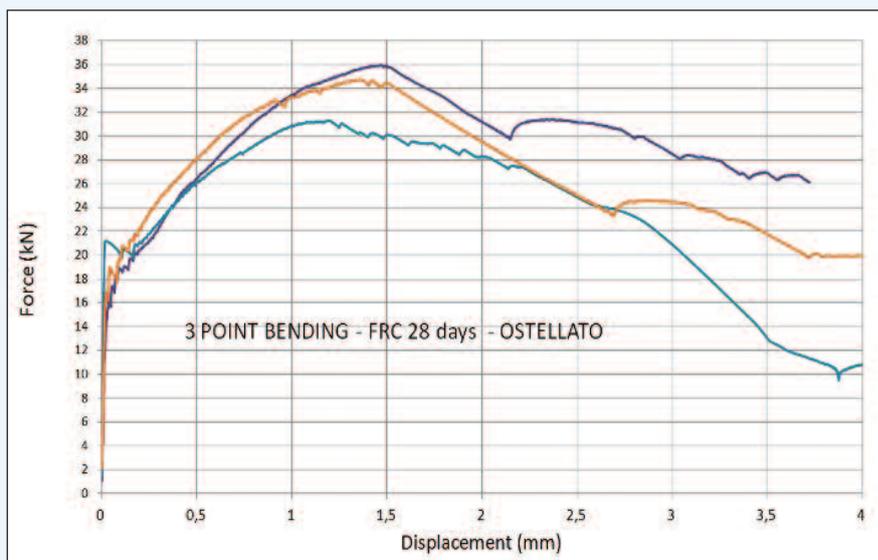
Una voce di spesa che può avere una notevole incidenza negli archi a via inferiore è quella delle funi/barre usate per realizzare i pendini. L'utilizzo di barre o funi è dettato dalla necessità di avere un elemento di facile installazione e di lunghezza regolabile. Questi elementi hanno però un costo molto elevato che non è necessariamente giustificato nell'ambito di opere di dimensioni medio-piccole quale quella in esame: ecco, quindi, che sono sempre più numerosi i ponti ad arco che sostituiscono le funi con profili metallici. Nel caso del ponte di Finale, l'utilizzo di profili saldati a T con sezione variabile non solo permette di contenere i costi, ma conferisce al ponte anche un ulteriore elemento di similitudine con l'airone, in quanto nei pendini inclinati realizzati in profilo metallico è possibile intravedere le penne remiganti dell'ala dell'uccello. Per facilitare l'installazione di questi elementi è prevista una giunzione bullonata direttamente all'anima degli archi e una saldatura su dei fazzoletti connessi all'anima delle travi dopo averli portati a lunghezza mediante tesatura con barre provvisorie.

## La soletta in FRC

Sebbene sia oltre 20 anni che il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) è disponibile sul mercato ed il suo impiego sia ormai codificato in varie Normative internazionali, il suo utilizzo strutturale, e nei ponti in particolare, è ancora molto ridotto. Come ha detto un rinomato Docente italiano della materia parafrasando il titolo di un celebre dramma di Pirandello [2], il FRC è ancora in "cerca di autore".

Gli Scrittori ritengono che vi siano, effettivamente, diverse situazioni nelle quali l'impiego di FRC sia particolarmente indicato e in cui probabilmente è destinato a sostituire il calcestruzzo tradizionale. Una di queste applicazioni è certamente da individuare negli ancoraggi di cavi e stralli, dove i gradienti delle tensioni molto elevati rendono poco efficace l'armatura lenta [3] che non dispone di sufficiente lunghezza di ancoraggio e trasferimento. Un esempio di applicazione di FRC agli ancoraggi degli stralli è il ponte di Ostellato sulla stessa Idrovia Ferrarese, presentato su questa rivista lo scorso anno [4].

Un'altra interessante applicazione del FRC di cui si prevede un forte sviluppo nei prossimi anni è quello delle solette da ponte [5]. Le solette da ponte in calcestruzzo rappresentano, infatti, una quota ragguardevole del peso complessivo di queste strutture, specialmente nel caso di travi a struttura mista. Le lastre ortotrope in acciaio utilizzate per luci medio-grandi, là dove si vuole contenere il peso dell'impalcato, hanno per contro un costo elevato e presentano diversi problemi sia costruttivi che manutentivi. La possibilità pertanto di ottimizzare la soletta in calcestruzzo mediante l'utilizzo di calcestruzzo fibrorinforzato sembrerebbe una soluzione molto promettente.



9. Il test a flessione su provino di FRC intagliato

Negli archi a spinta eliminata il vantaggio di utilizzare il FRC è ancora più evidente se si considera che l'impalcato funge da catena e quindi la soletta tende ad essere tesa con conseguente insorgere di fenomeni fessurativi piuttosto marcati. L'uso di FRC a basso contenuto di fibre metalliche (tra 30 e 50 kg/m<sup>3</sup>) fornisce una soluzione semplice ed economica a questo problema, considerato che questo materiale è già ampiamente utilizzato nella realizzazione di pavimentazioni industriali che soffrono di fessurazione per ritiro impedito.

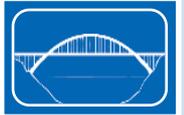
Nel caso di ponti, si è visto che si può arrivare facilmente a 50 kg/m<sup>3</sup> mantenendo le stesse procedure consolidate per il confezionamento e la posa in opera di un conglomerato tradizionale. I risultati ottenuti con un calcestruzzo classe 40 addizionato con 50 kg/m<sup>3</sup> di fibre nel vicino ponte di Ostellato sono particolarmente incoraggianti.

Le prove di flessione su provini intagliati di 150 mm [6] sono riportati in Figura 9, da cui è immediato prendere cognizione degli effetti sorprendenti delle fibre in termini di duttilità post-picco a trazione, che risulta essere circa un ordine di grandezza superiore a quella di un calcestruzzo convenzionale.

Questo fortissimo aumento di duttilità, con conseguente forte miglioramento dell'aderenza con le barre di armatura lenta, influirà beneficamente sul contenimento dei fenomeni fessurativi della soletta, permettendo una contestuale riduzione dell'incidenza di armatura tradizionale, innescando una sorta di processo virtuoso nei confronti della fessurazione che molto spesso è alimentata proprio dalla eccessiva congestione di armatura lenta.

## Conclusioni

I ponti a spinta eliminata, anche per luci medio piccole, rappresentano una soluzione ragionevolmente economica ed esteticamente molto attraente, purché la loro ottimizzazione strutturale porti ad un dimensionamento contenuto delle membrature che conferisca slancio e leggerezza.



10. L'ortofoto dell'intervento

Contrariamente a molte delle soluzioni viste negli ultimi anni, in cui i piani degli archi venivano ruotati arbitrariamente nello spazio, in questo caso gli Autori si sono limitati ad inclinare i pendini rendendo la funicolare dell'arco asimmetrica. L'inclinazione dei pendini permette di studiare tutta una serie di geometrie che, mantenendo intatta l'efficienza statica dello schema ad arco, apre però possibilità formali e figurative molto interessanti che potranno essere approfondite e sfruttate da Architetti e Designer negli anni a venire. Il doppio arco di Finale, oltre a questo aspetto strutturale, presenta tutta una serie di altri accorgimenti che ne favoriscono efficienza, snellezza e economicità.

**DATI TECNICI**

**Stazione Appaltante:** Provincia di Ferrara  
**Contraente Generale:** Coop Costruzioni  
**Progetto esecutivo:** Integra Srl  
**Importo dei lavori:** 8.500.000,00 Euro

Tra questi si ricordano:

- ◆ l'utilizzo di profili aperti in composizione saldata;
- ◆ l'impiego di FRC per la soletta per ridurre pesi e fessurazioni;
- ◆ l'adozione di pendini in carpenteria metallica, per il contenimento dei costi.

I lavori sul lotto di Finale sono recentemente iniziati: attualmente si sta lavorando sul ponte provvisorio che è necessario realizzare per demolire l'esistente e costruire il nuovo.

Le sottostrutture del ponte provvisorio saranno quindi utilizzate dal nuovo ponteciclopedonale di accesso all'isola artificiale.

\* *Professore di Tecnica delle Costruzioni dell'Università G. D'Annunzio di Pescara*

\*\* *Socio e Direttore Tecnico di Integra Srl*

\*\*\* *Ingegnere Strutturista di Integra Srl*

**BIBLIOGRAFIA**

- [1]. P. Tveit - "Optimal design of network arches", IABSE Symposium, Melbourne, 2002, ISBN 3-85748-107-2.
- [2]. L. Pirandello - "Sei personaggi in cerca d'autore", 1921.
- [3]. M. Petrangeli, C. Andreocci, F. Magnorfi, M. Orlandini, G. Geremia - "Large Concrete Precast Box Girders along the New Italian High Speed Railway", 7th Int. Conf. on Short & Medium Span Bridges, IABSE, Montréal, Aug. 23-25, 2006, ISBN: 1-894662-09-1.
- [4]. M. Petrangeli, G. Usai, M. Pietrantonio - "Lo strallato di Ostellato", "Strade & Autostrade", n° 106 Luglio/Agosto 2014, pp. 56-59.
- [5]. P.R. Marcantonio, M. Petrangeli - "Use of FRC for Bridge Deck Slabs", Concrete Engineering for excellence and efficiency Fib Symposium, Prague 2011, 8-10 June 2011, pp. 1117-1120.
- [6]. UNI EN 14651:2005 - "Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)".



11. Un render della nuova opera