

L'ADEGUAMENTO STRUTTURALE E FUNZIONALE DEL PONTE SAN MICHELE TRA PADERNO E CALUSCO D'ADDA

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ADJUSTMENT OF THE SAN MICHELE BRIDGE BETWEEN PADERNO AND CALUSCO

Pierangelo Pistoletti,
Marcello Vaccarezza, Luca Crespo
Seteco Ingegneria S.r.l. – C.so Aurelio Saffi 1C
Genova
ufficiotecnico@setecoge.it

Pier Giorgio Malerba
Paolo Galli, Alessandro Albertin
Studio Malerba – V.le Abruzzi 17
Milano
mail@studiomalerba.net

ABSTRACT

The San Michele Bridge is a trussed arch structure, built entirely in “weld iron” between 1887 and 1889. The deck is a double way, in the upper part intended for road traffic, below for railway traffic. A masterpiece of Italian industrial archeology, it is a unique structure of its kind as it is currently the only bridge of this type and era to be fully operational.

In September 2018, the bridge was closed following the results of the latest structural check and the inspections carried out by R.F.I. technicians. The structure was therefore the subject of an important investigation, modelling, design, and adaptation activity to restore the necessary safety levels for reopening to road traffic firstly and, two years after its closure, to railway traffic.

The architectural value of the bridge, the presence of an original non-weldable material and the typical design requirements for railway bridges represented a challenge for the design and construction of the reinforcements, as well as for the optimization of the connection details between the new elements and those of the original structure.

SOMMARIO

Il Ponte San Michele è una struttura ad arco reticolare a via superiore, costruito integralmente in ferro-agglomerato e realizzato tra il 1887 ed il 1889. L'impalcato è a doppia via, superiormente stradale ed inferiormente ferroviaria. Capolavoro dell'archeologia industriale italiana, è una struttura unica nel suo genere in quanto è attualmente l'unico ponte di questa tipologia ed epoca ad essere in esercizio. Nel settembre 2018 il Ponte è stato chiuso a seguito delle risultanze dell'ultima verifica strutturale e del sopralluogo sull'opera svolti dai tecnici di R.F.I. La struttura è quindi stata oggetto di un'importante attività di indagine, modellazione, progettazione e ade-

guamento al fine di ripristinarne i necessari livelli di sicurezza per la riapertura al traffico, dapprima stradale e, due anni dopo la sua chiusura, alla circolazione ferroviaria. Il pregio architettonico dell'opera, la presenza di un materiale base originale non saldabile e le prescrizioni progettuali tipiche dei ponti ferroviari hanno quindi rappresentato una sfida per la concezione e la realizzazione dei rinforzi, nonché per l'ottimizzazione dei dettagli di collegamento tra gli elementi di nuova progettazione e quelli della struttura storica originale.

1 IL PONTE SAN MICHELE SULL'ADDA

Una delle più notevoli conquiste tecnologiche, formali ed estetiche dell'architettura di ogni tempo è rappresentata dall'avvento delle costruzioni in acciaio, in particolare con struttura reticolare, della cui tipologia i grandi viadotti ad arco costituiscono senza dubbio l'apice.

Il Ponte di San Michele sull'Adda è un capolavoro dell'archeologia industriale italiana (Fig. 1). Fu progettato dall'ing. Jules Röhrlisberger per la Società Nazionale Officine di Savigliano nell'anno 1886 e costruito tra gli anni 1887-1889 [1], [2], [3].

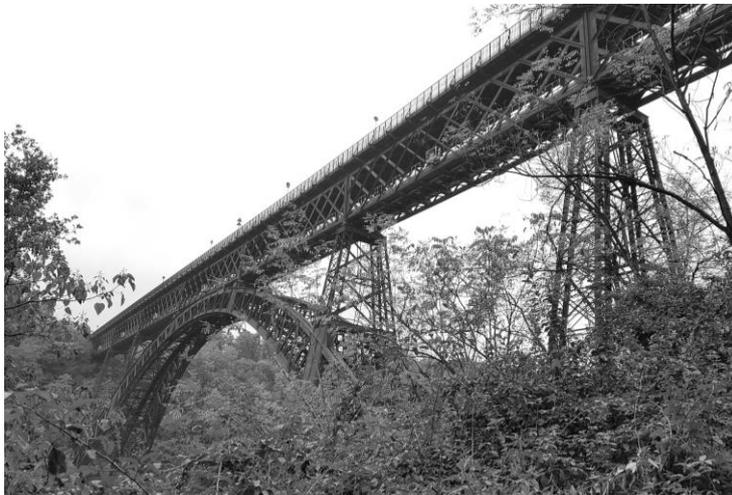


Fig. 1. Il Ponte San Michele sull'Adda

La campata principale è di 150 m, la freccia in chiave è di 37.5 m, l'impalcato è continuo su otto campate di 33.25 m, con due gallerie lunghe 19 m ai due accessi da Paderno e da Calusco, per una lunghezza totale di 304 m. La sezione è quella di un ponte a due vie: l'impalcato inferiore serve la linea ferroviaria tra Bergamo e Milano, quello superiore serve la Strada Provinciale n°54, importante nel collegamento tra le province di Bergamo e Lecco (Fig.2). La travata reticolare a traliccio quadruplo, presenta montanti alti 6.25 m che sono connessi con le briglie in sezione a T semplice. I traversi dell'impalcato ferroviario sono posti ad interasse 3.325 m e forniscono appoggio alle travi di binario longitudinali. La travata presenta due sistemi di controventi orizzontali, entrambi composti mediante diagonali costituiti da profili angolari, collocati sia al di sotto dei traversi dell'impalcato ferroviario, sia di quello stradale. La grande arcata metallica, che caratterizza strutturalmente l'opera, si compone di una coppia di archi, ciascuno dei quali ha per asse una parabola giacente su un piano inclinato rispetto alla verticale. Tale inclinazione realizza il progressivo allargamento della struttura verso la base, per motivi di stabilità, così che l'arcata stessa presenta una larghezza crescente da 5.0 m in chiave a 16.346 m all'imposta. Ogni arco è costituito da una struttura reticolare a traliccio con diagonali e montanti di sezione variabile. Le briglie di cia-

scun arco sono a sezione composta, realizzata da una coppia di profili a T. Le pareti reticolari sono infine collegate da traversi e da due sistemi continui di controvento, all'intradosso e all'estradosso dell'arcata. Le pile sono composte, ognuna, da montanti inclinati a cassone reticolare, collegati tra loro da un sistema rigido di montanti orizzontali e da croci di S. Andrea. Durante i suoi 130 anni il ponte ha sorretto diverse tipologie di traffico (dai treni a vapore a quelli elettrificati), due guerre, lavori di ispezione e manutenzione e alcuni periodi di chiusura e riapertura. Negli anni ha servito l'intensa mobilità di una delle principali zone attive del Nord Italia. Nel 2017-2018 RFI, Ente Gestore dell'opera, ha promosso un'ampia campagna di rilievi e ispezioni, che ha messo in luce le principali carenze della struttura e che fu alla base delle successive decisioni sul futuro del ponte. In particolare, le verifiche strutturali presentate mostrarono che i coefficienti di sicurezza relativi al quadro deformativo ed allo stato di sollecitazione di numerosi elementi risultavano oltre i parametri ritenuti accettabili. Si decise pertanto di procedere alla chiusura immediata del Ponte.

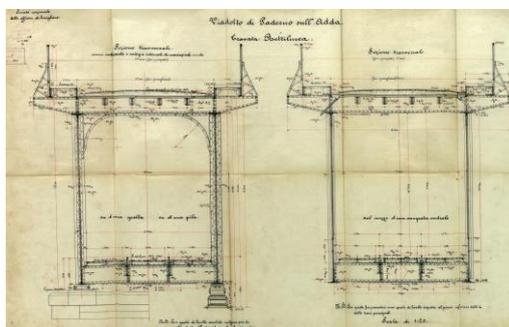


Fig. 2. Sezioni del progetto originale (anno 1887)

2 GLI STUDI SULLA STRUTTURA ESISTENTE

I materiali, i carichi di traffico e i criteri di progettazione impiegati più di un secolo fa erano profondamente diversi da quelli utilizzati oggi. Pertanto, la valutazione della sicurezza del Ponte San Michele e delle possibilità di prolungarne la vita di servizio è stata preceduta da accurati rilievi e ispezioni, prove sui materiali e dallo studio approfondito dei documenti di progettazione originali.

2.1 Le prove sui materiali condotte dall'Istituto Italiano della Saldatura

Le incertezze principali riguardavano le caratteristiche del materiale "ferro-agglomerato".

Nell'ambito del Progetto Esecutivo è stata eseguita una prima serie di prelievi sul materiale del quale era possibile disporre in fase iniziale e proveniente da parti secondarie dell'impalcato stradale superiore. Quando è stato disponibile un numero sufficiente di barre danneggiate rimosse dalla struttura principale dell'arco, si è condotta una più ampia serie di prove di laboratorio.

Prelievi e analisi sono stati eseguiti dall'Istituto Italiano della Saldatura (I.I.S.) di Genova.

I risultati delle prove hanno mostrato una presenza significativa di inclusioni e impurità del materiale, aspetto che ha favorito l'insorgere e la propagazione di difetti superficiali e interni. Comparando i dati di queste analisi con quelli di campagne di indagini condotte in anni precedenti, è emerso un deterioramento delle capacità meccaniche nel tempo, particolarmente rilevante nelle prove a rottura e di resilienza. Estremamente importante, considerato lo stato di degrado della struttura e le difettosità interne del materiale, è stata la prova di propagazione del danno per effetto dei carichi ciclici, utile per poter valutare le risorse residue dell'opera.

Da un'attenta valutazione dei risultati delle prove, è stato possibile sia caratterizzare il materiale per condurre le verifiche strutturali, sia stimare in circa dieci anni la vita utile residua del Ponte.

2.2 Campagna di sopralluoghi e mappatura del degrado

Per caratterizzare lo stato di fatto del Ponte San Michele, oltre alle informazioni fornite dal progetto originale e agli studi condotti sulla struttura in epoche più o meno recenti, è stata condotta un'estesa campagna di sopralluoghi al fine di valutare lo stato di degrado e le difettosità tipiche dell'opera. Le difettosità tipiche riscontrate sono state le festonature dei profili composti tra chiodo e chiodo, riscontrate in maniera diffusa su tutta la struttura, cricche, rotture di aste o giunzioni e problemi di regimentazione idraulica (Fig. 3).

Puntualmente, si sono riscontrate aste che denotavano fenomeni di instabilità e perdita delle capacità deformative degli apparecchi di appoggio, che risultavano bloccati. In fase di progetto tutti gli elementi costituenti la struttura metallica sono quindi stati suddivisi in sei livelli di degrado/danno, con criticità progressive a partire da elementi integri fino ad elementi rotti o con fenomeni di instabilità globale. In funzione di questi livelli, a ciascuna asta è stata quindi associata una differente riduzione percentuale delle proprie caratteristiche resistenziali, variabile da 0 al 100%.

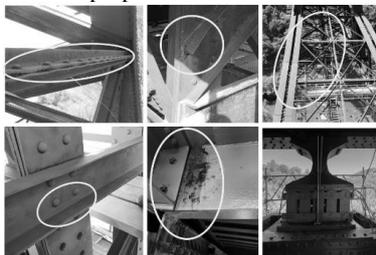


Fig. 3: Difettosità tipiche rilevate sul Ponte

3 LA SCELTA DELLA STRATEGIA DI ADEGUAMENTO STRUTTURALE

La scelta della tipologia di interventi di rinforzo della struttura ha mirato a rispettare ed a regolare gli schemi statici, contenendo le luci libere di inflessione degli elementi compressi, cercando di ridurre il più possibile l'aggiunta di ulteriori elementi e quindi l'incremento del peso della struttura. Ogni aggiunta di acciaio di rinforzo avrebbe comportato un incremento dei pesi propri riducendo, di conseguenza, le risorse resistenti della struttura disponibili per i carichi da traffico.

È stata inoltre posta particolare attenzione, per tutte le strutture metalliche, nel mantenimento di una simmetria degli interventi sia tra il lato monte ed il lato valle, sia tra i lati Paderno e Calusco, al fine di garantire una distribuzione il più possibile omogenea delle caratteristiche di sollecitazione e non creare zone che presentassero maggiori rigidità e con esse concentrazioni di tensione. Dovendo intervenire su una struttura costituita con materiale non saldabile, è stato necessario porre attenzione sia nel collegamento tra i profili esistenti e quelli di nuova progettazione, sia per semplificare i dettagli costruttivi previsti, sia per ottimizzare le lavorazioni di cantiere.

Gli interventi previsti sul Ponte San Michele sono stati suddivisi in due macro-raggruppamenti. Il primo comprendeva tutte le aste che avrebbero necessitato di un intervento di rinforzo o di sostituzione prima della riapertura al traffico stradale, da effettuarsi con la massima rapidità. Il secondo gruppo conteneva invece quelle aste da attenzionare per sostenere il passaggio dei convogli ferroviari, da realizzarsi a valle della riapertura stradale.

4 LA MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA

Per l'analisi del Ponte San Michele è stato realizzato un modello tridimensionale agli elementi finiti della struttura attraverso il software di calcolo Sap2000 (Fig. 4). Il modello è stato in grado di tenere in conto sia dell'effettivo grado di danneggiamento di ogni singola asta, secondo quanto

rilevato sulla struttura ante-operam, sia della contemporanea presenza di differenti materiali quali l'acciaio di carpenteria di fine XIX secolo per taluni elementi e dell'attuale acciaio S355 per i rinforzi. La modellazione ha permesso di cogliere il comportamento non-lineare della struttura, sia per la presenza di elementi "tension-only", previsti per quelle aste di parete particolarmente snelle e pertanto ipotizzate reagenti solo a trazione, imponendo dei limiti alle forze di compressione cui può essere soggetta l'asta.

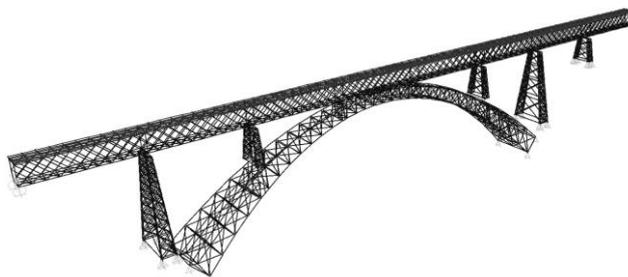


Fig. 4. Modello completo del Ponte in Sap2000

Anche le tipologie di analisi condotte sono state non lineari: oltre a tenere in conto degli effetti P-Delta, questo modello è stato in grado di considerare sia le condizioni iniziali della struttura (geometrie, danneggiamenti e materiali), sia dei successivi interventi di rinforzo con la loro effettiva sequenza di posa in opera sulla struttura, mediante l'utilizzo delle funzioni "staged construction". Il modello ha tenuto in conto anche delle fasi di lavorazione del cantiere e delle schermature dell'opera durante le operazioni di sabbiatura/verniciatura, al fine di stimarne il maggior effetto dell'azione del vento su superfici cieche durante questi transitori.

5 LA CANTIERIZZAZIONE E L'ESECUZIONE DEI LAVORI

L'esecuzione dei lavori è stata difficile e complessa. Una prima sfida è stata presentata dall'impalcatura: a causa dell'azione del vento, un ponteggio completo su tutta la campata del ponte o sull'arco avrebbero comportato carichi orizzontali eccessivi, soprattutto per le pile. Sono state quindi studiate configurazioni di ponteggi modulari, evitando di sovraccaricare il ponte a cui i ponteggi sono appesi. La profonda gola attraversata dall'arco ha rappresentato una seconda sfida: operai specializzati controllavano una complessa serie di attrezzature di sollevamento e movimentazione delle aste e, per le operazioni più rischiose, venivano impiegati operai rocciatori appositamente addestrati. Rimuovere vecchie vernici e ruggine è stato un lavoro che ha richiesto pazienza, sistematicità e ripetuti controlli. Particolare attenzione è stata posta alla pulizia dei rigonfiamenti di ossido tra gli elementi chiodati delle aste composte. Al fine di proteggere l'ecosistema della valle in cui si trova il ponte, sono state osservate severe norme antinquinamento durante tutte le fasi di costruzione: queste includevano un'attenta gestione dei rifiuti e l'uso di schermi per controllare l'emissione di polvere, ruggine e polveri sottili.

6 GLI INTERVENTI STRUTTURALI SUL PONTE

Ogni tipologia di macrostruttura, quali impalcato, pile, arco, ha reso necessario lo studio di differenti approcci di intervento, nel rispetto delle strategie di intervento precedentemente descritte. Non è risultato necessario effettuare alcuna attività di rinforzo delle strutture principali del Ponte, evitando in questo modo lavorazioni invasive, costose e di più complessa esecuzione.

L'intera struttura, ultimata l'installazione dei nuovi elementi in carpenteria metallica previsti a progetto, è stata sottoposta a cicli di sabbiatura e verniciatura secondo le prescrizioni di capitolato RFI, per garantirne adeguata protezione nel tempo e ripristinarne l'aspetto estetico originale.

6.1 L'impalcato

L'intervento ha previsto l'irrigidimento delle aste della parete reticolare verticale che risultano in compressione: principalmente queste aste, di sezione a T composta, si trovano sul lato esterno dell'impalcato. Il rinforzo è stato condotto con l'obiettivo di incrementare sia l'area sia la stabilità dell'asta mediante l'aggiunta di angolari, profili UPN e piatte (Fig. 5).

6.2 Gli appoggi

Nel corso delle indagini è risultato che gli apparecchi di appoggio in corrispondenza delle spalle e in testa alle pile erano bloccati o avevano escursioni limitate, tali da non consentire le corrette dilatazioni termiche dell'impalcato. Dopo aver studiato gli effetti statici del sollevamento di un singolo appoggio ed appurato che questa operazione potesse essere svolta in sicurezza, in corrispondenza di ogni dispositivo si è sollevato l'impalcato con l'ausilio di martinetti (Fig. 6).

Questo ha consentito di scaricare gli appoggi e poter procedere alla pulizia delle superfici di contatto con getti d'acqua ad alta pressione e successiva lubrificazione. Queste attività, svolte su tutti gli appoggi, hanno consentito un parziale recupero del loro funzionamento.

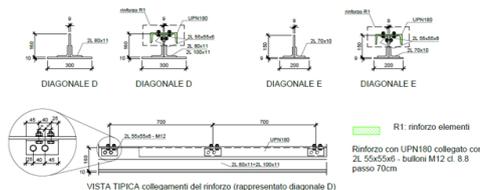


Fig. 5. Rinforzo tipico delle aste dell'impalcato

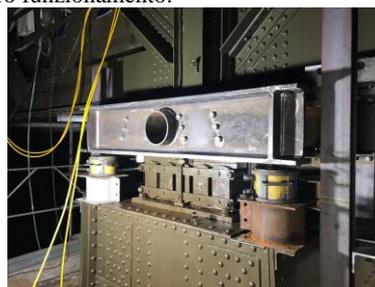


Fig. 6. Struttura per sollevamento appoggi

6.3 Le pile metalliche

Per tutte le pile, la scelta della tipologia di interventi di rinforzo è stata condotta al fine di ottimizzarne gli schemi statici. Sono stati inoltre introdotti tutti quegli elementi necessari l'ispezione e la manutenzione, quali scale e pianerottoli. Questi nuovi elementi hanno migliorato la risposta statica delle pareti reticolari frontali, irrigidendone i montanti orizzontali ad intervalli regolari.

Il rinforzo delle pile ha reso necessario un'estesa campagna di ispezioni al fine di valutare tutte quelle aste che a causa di ammaloramenti necessitassero di interventi specificamente studiati per il loro ripristino o sostituzione.

6.4 L'arco

Gli interventi sono stati condotti al fine di ottimizzarne gli schemi statici, cercando di ridurre il più possibile l'aggravio al peso della struttura. I principali interventi si sono focalizzati sulle controventature orizzontali superiori ed inferiori, e sulle diagonali e le briglie inferiori dei diaframmi, dove sono stati inseriti elementi rompi-tratta. Tutti gli elementi di nuova progettazione sono stati eseguiti con profili leggeri, di facile movimentazione, che riprendessero geometrie ed ingombri dei profili originali e con collegamenti di semplice realizzazione in opera.

Nella prima fase di intervento, riapertura al traffico stradale, si è minimizzato il numero di aste su cui intervenire. Per analoghe motivazioni sono stati mantenuti parte dei rinforzi previsti per la riapertura al traffico pedonale del ponte e sono state trascurate eventuali lievi “asimmetrie” negli interventi sull’arco. Nella seconda fase di intervento, per la riapertura ferroviaria, le aste sono state rinforzate in maniera tale da garantire, o ripristinare, la simmetria dei rinforzi precedentemente citata. In ultimo, sono stati introdotti tutti gli elementi necessari per l’ispezione e manutenzione (Fig. 7).

6.5 Il sistema di monitoraggio

Sono stati installati sensori per monitorare la risposta globale in tempo reale della struttura. Un sistema di barriere laser permette di identificare gli intervalli di passaggio dei treni e di correlare l’azione dei carichi in transito agli effetti misurati dai vari strumenti.

7 I COLLAUDI E LE RIAPERTURE AL TRAFFICO

Il collaudo per la riapertura al traffico stradale è stato effettuato il 4 novembre 2019. Quello per la riapertura ferroviaria si è tenuto nella notte tra il 10 e l’11 settembre 2020, utilizzando un treno di collaudo in differenti condizioni di carico significative per valutare la risposta della struttura (Fig. 8). In tutte le fasi di carico previste sull’impalcato, sia stradale sia ferroviario, la struttura ha risposto linearmente alle sollecitazioni agenti, presentando un ritorno elastico allo scarico. Inoltre, l’andamento delle deformate della struttura è apparso regolare ed in accordo alle previsioni, con valori di spostamento inferiori a quelli teorici attesi.



Fig. 7. L’arco in fase di ispezione

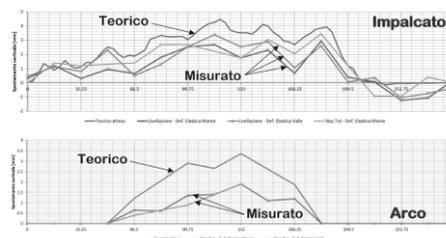


Fig. 8. Risultati del collaudo ferroviario

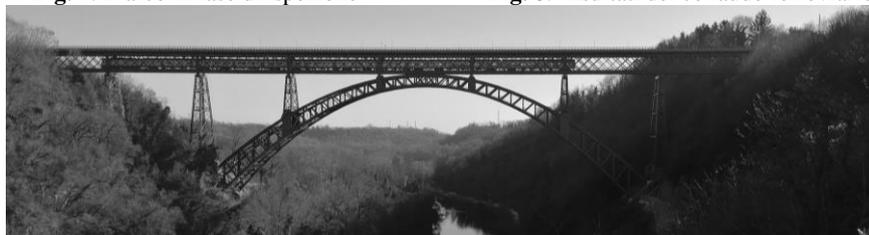


Fig. 9. Un treno in transito sul Ponte San Michele dopo il termine dei lavori

8 CONCLUSIONI

Il progetto ed il cantiere del Ponte San Michele sono stati una sfida per l'importanza dell'opera, per le problematiche intrinseche nel dover intervenire su una struttura realizzata 130 anni fa e per le tempistiche imposte per la sua riapertura. Tutti questi obiettivi sono stati positivamente raggiunti nell'arco di soli due anni dalla chiusura, riaprendo il Ponte San Michele al traffico a settembre 2020, tre mesi in anticipo rispetto al programma lavori. Le verifiche strutturali hanno tenuto conto dello stato di ammaloramento del Ponte, degli elementi rinforzati e delle caratteristiche del materiale originale. Il livello di sfruttamento delle sezioni è stato limitato per tenere in conto di tutti i fenomeni descritti che, inevitabilmente, caratterizzano una struttura con una storia di servizio di questo tipo. In esercizio, il comportamento strutturale del Ponte sarà seguito da un impianto di monitoraggio continuo, come accade per tutte le opere di importanza singolare.

Va ricordato che vi sono fenomeni ammaloranti irreversibili con i quali, grazie ai lavori svolti e ai controlli attuali e futuri, si potrà convivere in sicurezza per un periodo di circa dieci anni.

Trascorso questo lasso di tempo, sarà necessario un cambio di destinazione d'uso del Ponte, prevedendo nel mentre strutture di nuova realizzazione per il traffico stradale e ferroviario.

RINGRAZIAMENTI

I progettisti, Seteco Ingegneria di Genova e Studio Malerba di Milano, desiderano ringraziare R.F.I., Ente Gestore dell'opera, ed in particolare la sua Direzione Operativa Infrastrutture Territoriale di Milano. Si ringraziano l'Impresa Luigi Notari per l'esecuzione dei lavori ed i tecnici dell'Istituto Italiano della Saldatura. Si ringraziano, infine, tutte le Società che, con il loro contributo, hanno reso possibile l'adeguamento strutturale e funzionale del Ponte San Michele.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rothlisberger, J. (1886). Del ponte ad arco sull'Adda vicino a Trezzo e di un metodo analitico per calcolare la resistenza di un arco metallico con due cerniere. *L'ingegneria civile e le arti industriali*, Anno XII, (Agosto - Dicembre), Pagine 177 – 182.
- [2] Sacheri, G. (1889). Il viadotto di Paderno sull'Adda. *L'ingegneria civile e le arti industriali*, Anno XV (giugno).
- [3] Società Nazionale delle Officine di Savigliano (1889). Il viadotto di Paderno sull'Adda. *Tip. e lit. Camilla e Bertolero*.
- [4] Nascé, V., Zorgno, A. M., Bertolini, C., Carbone, V. I., Pistone, G., and Roccati, R. (1989). Il ponte di Paderno: storia e struttura. *Electa Editore*.

KEYWORDS

Ponte San Michele, carpenteria metallica, acciaio, arco, reticolare, adeguamento strutturale