

“STRATEGIE PER LA GESTIONE DEI PONTI STORICI ITALIANI - Prima parte”

Petrangeli M., Mecozzi A. (2016)

“Questo articolo è stato pubblicato per la prima volta sulla rivista *Strade & Autostrade*, casa editrice EDI-CEM, <http://www.stradeeautostrade.it/>”

“This article was first published in *Strade & Autostrade*, publisher: EDI-CEM, <http://www.stradeeautostrade.it/>”

“Cet article a été publié pour la première fois sur *Strade & Autostrade*, éditions : EDI-CEM, <http://www.stradeeautostrade.it/>”

“Este artículo se publicó por primera vez en la revista *Strade & Autostrade*, casa editorial : EDI-CEM, <http://www.stradeeautostrade.it/>”

STRATEGIE PER LA GESTIONE DEI PONTI STORICI ITALIANI

- PRIMA PARTE -

**RISORSE SCARSE E PRECIPITAZIONI ABBONDANTI:
IL CASO DELLA PROVINCIA DI MACERATA**

In questa prima parte si discute del fenomeno dello scalzamento delle fondazioni anche con riferimento al ponte sul Chienti a Montecosaro, nella seconda parte del lavoro si ripercorre la storia dell'attraversamento del Fiastra, dal collasso del ponte esistente, passando per i guadi provvisori fino alla realizzazione della nuova opera. Le conclusioni contengono infine alcune ipotesi di approfondimento e delle proposte progettuali per il rafforzamento dei ponti storici.

La rete infrastrutturale Italiana, realizzata in gran parte il secolo scorso, presenta una elevata incidenza di opere d'arte, molte delle quali necessarie ad attraversare i numerosi corsi d'acqua, spesso a carattere torrentizio, che solcano le nostre valli prealpine e subappenniniche. Tutte queste opere, archi in muratura ma anche opere pionieristiche in calcestruzzo armato, hanno fondazioni superficiali o comunque approfondite di pochi metri sotto il piano campagna e pertanto sono particolarmente sensibili ad azioni di scalzamento. Per queste opere e per la rete stradale di cui fanno parte si pone oggi un problema di sicurezza idraulica accentuata da fenomeni

evolutivi degli alvei, dalla crescente vetustà delle opere stesse e forse anche da alcuni fenomeni riconducibili ai cambiamenti climatici che sembrerebbero aver accentuato i fenomeni pluviometrici intensi. L'articolo, partendo dalle analisi di vulnerabilità idraulica illustra i principali scenari di intervento, da quello del rafforzamento preventivo delle fondazioni a quello della sostituzione integrale dell'opera passando per la realizzazione dei guadi necessari alla gestione dell'emergenza con riferimento a due attraversamenti del bacino del Chienti nella provincia di Macerata.

IL RAFFORZAMENTO DELLE FONDAZIONI

Quando le analisi di vulnerabilità idraulica indicano che un'opera ha una sicurezza insufficiente ma è opportuno preservare la stessa in quanto possiede un valore storico-architettonico o comunque è in buono stato di conservazione con una piattaforma adeguata alla traffico che vi transita, è sempre possibile rafforzare le fondazioni. Il rafforzamento delle fondazioni dei ponti esistenti si può ottenere con diversi tipi di interventi. Sostanzialmente si tratta di approfondire le fondazioni originali dei ponti con pali e/o micropali ovvero con diaframmi. La fattibilità tecnica di questi interventi non è in discussione, meno scontato è invece il responso dell'analisi costi-benefici ovvero la vantaggiosità di queste soluzioni rispetto alla demolizione/ricostruzione dell'opera stessa.

Nell'analisi costi-benefici è poi spesso necessario tener conto di altre voci di spesa in aggiunta a quelle per il rafforzamento delle fondazioni. Le più comuni sono quelle associate al ripristino di ammaloramenti, soprattutto per le opere in calcestruzzo armato, e l'allargamento delle piattaforme stradali di larghezza inadeguata, operazione che può a sua volta richiedere il rafforzamento delle strutture portanti.

Questi interventi sulle sovrastrutture possono avere un costo tutto sommato contenuto ovvero economicamente competitivo rispetto a quello della demolizione e ricostruzione, anche tenendo conto degli oneri indiretti dovuti all'interruzione del servizio.



1. Il ponte del Fiastra danneggiato a seguito dell'evento alluvionale del 2011

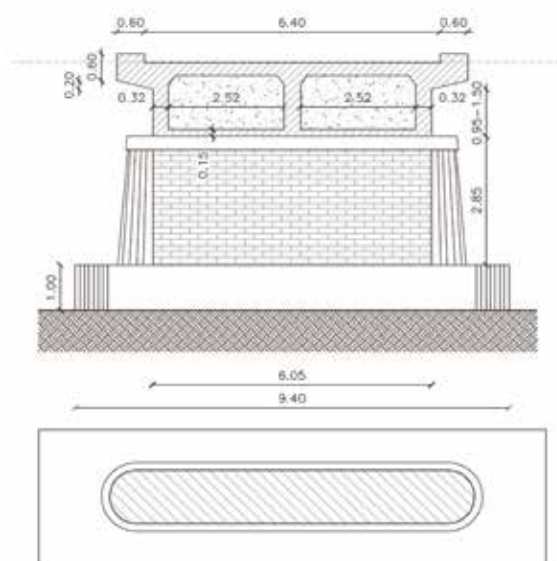


3A e 3B. La realizzazione delle fondazioni del ponte sul torrente Fiastra nel 1955

Sono invece i costi degli interventi in fondazione che spesso costituiscono l'elemento discriminante ai fini della valutazione della fattibilità dell'intervento di rafforzamento e quindi della salvaguardia dell'opera. Tali costi potrebbero in molti casi essere drasticamente ridotti se si adottassero soluzioni meno conservative di quelle che, in mancanza di una esperienza consolidata, vengono oggi utilizzate. Queste prevedono il più delle volte di trasferire tutto il peso dell'opera alle nuove fondazioni con costi elevati anche perché non è sempre possibile intervenire in asse alle pile dall'alto, ma è spesso necessario lavorare in adiacenza alle stesse sotto l'impalcato con lavorazioni laboriose e con ingombri vincolati.

Le fondazioni esistenti

Le fondazioni dei ponti esistenti realizzati all'inizio del secolo scorso e fino a tutto il secondo dopoguerra hanno per lo più forma rettangolare allungata in quanto ricalcano la forma delle pile che è tipicamente a setto, tanto per gli archi, dove questa è una scelta obbligata, quanto per i primi impalcati in calcestruzzo armato, dove l'utilizzo di tre o più travi e l'altezza generalmente contenuta delle pile consigliava l'adozione di un unico fusto piuttosto che di fusti singoli. Dato che i ponti avevano larghezza variabile dai 6 ai 10 m circa, le fondazioni avevano larghezze analoghe, ma spessori più ridotti in quanto sufficienti ai carichi che provenivano dall'impalcato con luci che tipicamente variavano tra i 10 e i 20 m, anche se vi sono esempi di ponti con luci fino a 30 m [1]. La realizzazione delle fondazioni di questi ponti era condizionata dalla capacità di mantenere all'asciutto lo scavo del plinto, fosse esso in muratura o in conglomerato cementizio. Anche durante la stagione secca, ricorrendo a tutti gli artifici possibili e ovviamente alle pompe già diffuse nel primo dopoguerra, si riusciva a scendere fino ad un massimo di 3-4 m circa dalla quota usuale dell'alveo. Da questa quota, per le opere di maggior importanza e per i fiumi più grandi si poteva quindi mettere in atto un consolidamento mediante pali battuti in legno ovvero in calcestruzzo. Queste sottofondazioni non fornivano però un adeguato incastro al plinto di fondazione e quindi non erano in grado di fornire sufficiente resistenza nel caso di scalzamenti eccezionali. Considerato però



2. Lo schema della pila e della fondazione tipica dei viadotti storici in muratura e/o calcestruzzo armato

che le fondazioni venivano protette con soglie o rivestimenti in materiale lapideo di varia fattura, si riusciva in definitiva a dotare questi ponti di adeguata resistenza rispetto alle piene stagionali.

I principali interventi di rafforzamento

Con la riduzione del trasporto solido, in parte anche provocato dalla realizzazione di invasi artificiali a monte, e l'avvio (o aggravamento) di fenomeni erosivi, già dagli ultimi decenni del secolo scorso si sono resi necessari interventi di rafforzamento delle fondazioni.

Essendo state affinate nel frattempo le tecniche di perforazione e scavo sotto falda, là dove si è reso necessario rafforzare questi ponti,

si sono realizzate delle paratie attorno alle fondazioni esistenti con diaframmi ovvero con pali accostati. Queste cuffie venivano approfondite quanto necessario a sopportare gli scalzamenti massimi previsti tenendo conto che la loro elevata estensione perimetrale era generalmente più che soddisfacente a garantire una adeguata resistenza alle azioni verticali e orizzontali.



4. Un esempio di fortissima erosione fluviale del Vomano all'altezza di Castelnuovo (TE): le fondazioni originali realizzate con il palo-pila centrale furono consolidate con corona di medio-pali, oggi anch'essi completamente scoperti

Si rendeva poi necessario collegare queste cuffie perimetrali alla pila e alle fondazioni esistenti. Volendo affidare tutto il carico a questo collegamento, cioè volendo trasmettere l'intero carico del ponte dalle pile esistenti a queste cuffie perimetrali, era necessario prevedere un gran numero di inghisaggi. Tali inghisaggi si potevano per altro realizzare con relativa facilità in quanto le fondazioni esistenti erano in muratura o in conglomerato di qualità modesta.

Certo la loro realizzazione richiedeva un impiego di manodopera non indifferente, ma a quel tempo i costi non erano così proibitivi come ai giorni d'oggi. Questi interventi, che sono stati in molti casi risolutivi, mostrano però degli evidenti limiti di efficacia tecnico-economica. Il costo è chiaramente il primo fattore: la realizzazione di una struttura perimetrale profonda attorno alle fondazioni esistenti è ovviamente onerosa in quanto tali fondazioni hanno una estensione notevole proprio per il fatto di essere di tipo diretto.

Un costo indiretto dell'intervento è anche dovuto alla laboriosità delle lavorazioni necessarie alla sua implementazione, dovendosi realizzare delle ture all'asciutto dove portare i macchinari per lo scavo e dovendo quindi lavorare in buona parte sotto l'impalcato con altezze molto modeste che allungano i tempi di perforazione e successiva posa delle armature.

Questi interventi sono però scarsamente ottimizzati anche dal punto di vista del comportamento statico e idraulico. La forma allungata delle fondazioni fa sì che queste cuffie non esplicino una buona azione cerchiante, per cui per il collegamento alla vecchia fondazione è necessario ricorrere agli inghisaggi. Da un punto di vista idraulico inoltre, queste cuffie creano un ulteriore restringimento della sezione idraulica, restringimento che percentualmente può essere significativo in quanto le luci di queste opere sono generalmente modeste. A fronte di questo restringimento si ha pertanto un aumento dello scalzamento locale e una riduzione della sezione complessiva di deflusso con tutte le controindicazioni del caso.

Lo scalzamento: forma e ampiezza

I fenomeni di scalzamento sulle fondazioni dei ponti sono la conseguenza dell'azione erosiva della corrente, che scava e trasporta a valle il materiale che costituisce il fondo dell'alveo. Le dimensioni del fenomeno dipendono dalla capacità erosiva della corrente, dalla resistenza all'erosione del materiale d'alveo e dal bilancio del trasporto solido entrante e uscente nella sezione del ponte [2, 3, 4 e 5].

La stima della profondità massima potenzialmente raggiungibile dallo scavo è resa complessa dalla natura ciclica del fenomeno; gli scavi massimi si verificano infatti durante gli eventi alluvionali e in particolare al passaggio del picco di portata e tendono ad essere riempiti, parzialmente o totalmente, nella fase di esaurimento dell'idrogramma di piena.

Il fenomeno dell'erosione alla base delle pile dei ponti è in genere il risultato della sovrapposizione di tre diversi processi:

1. abbassamento (innalzamento) dell'alveo in prossimità del ponte, per variazioni globali della morfologia di fondo indipendenti dal ponte stesso (general scour);
2. erosione generalizzata provocata dal restringimento della sezione idraulica per la presenza della struttura del ponte

a cui è associato l'incremento della velocità della corrente (contraction scour);

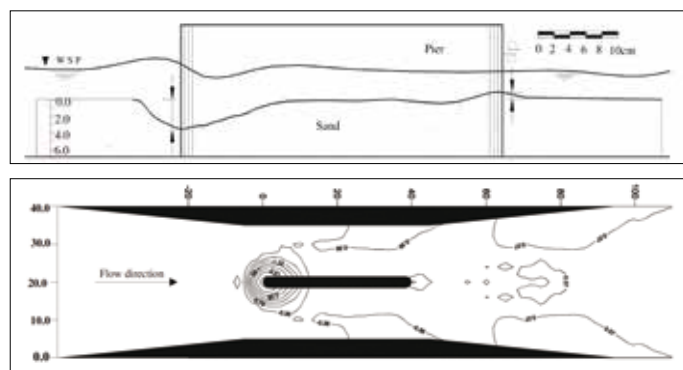
3. erosione localizzata alla base delle pile e delle spalle dei ponti dovuta alla deviazione e concentrazione delle linee di flusso della corrente che causa aumenti locali della velocità (local scour).

La profondità totale di scavo, data dalla somma dei tre effetti stimati indipendentemente, è variabile nel tempo e nello spazio, ma la pratica professionale tende a stimare, in prima approssimazione, i livelli di scavo massimi dovuti ai tre effetti, come se fossero stazionari. Questo porta in genere a sovrastimare tale profondità in quanto i tre meccanismi non sono sincroni e quindi i massimi non sono direttamente sommabili.

L'erosione localizzata, soprattutto quando associata ad un generale abbassamento del fondo alveo è una delle cause più frequenti di crolli e danneggiamenti dei ponti. Essa è dovuta alla formazione di vortici alla base delle pile. All'aumentare della profondità di scavo l'energia dei vortici tende a diminuire e l'escavazione tende a raggiungere una profondità di equilibrio. Anche a valle della pila si formano dei vortici ma la loro intensità, per fondazioni con pianta allungata è generalmente minore e diminuisce rapidamente all'aumentare della distanza dalla pila per cui, in genere, a valle del ponte si ha la deposizione del materiale asportato.

I principali fattori che influenzano questa forma di erosione sono la velocità, la profondità della corrente, la larghezza e la forma della pila, l'angolo d'attacco della corrente, la natura del materiale d'alveo e la presenza di detriti trasportati. Un fattore determinante da considerare per il valore dello scalzamento locale è la quota di trasporto solido proveniente da monte: nel caso di assenza di trasporto (clear water scour), o con trasporto solo in sospensione inferiore alla capacità di trasporto della corrente, si ha uno scalzamento che cresce progressivamente fino al massimo potenziale; nel caso di presenza di trasporto solido da monte (live-bed scour), si ha un fenomeno ciclico che produce il massimo scavo in fase crescente della piena e riempie parzialmente la buca di scavo nella fase discendente.

La zona di maggior scavo è di solito collocata sulla faccia di monte della pila. La maggior capacità di deposito misurabile a valle della pila definisce una zona separata da quella di monte con scavi assoluti inferiori. La forma tipica dello scalzamento locale per una fondazione rettangolare allungata è quella rappresentata nelle Figure 5A e 5B.



5A e 5B. L'erosione localizzata: gli effetti sul fondo alveo



6. Il vecchio ponte a Montecosaro e il nuovo in costruzione

IL PONTE SUL CHIENTI A MONTECOSARO

Il ponte sul Chienti a Montecosaro, costruito nel 1960, ha subito un primo danneggiamento dovuto a scalzamento nel 1980. In quella occasione la pila 3 lato Macerata sprofondò di circa 50 cm. Essendo l'impalcato realizzato con una schema tipo Gerber, esso riuscì ad assorbire questo cedimento e pertanto fu possibile la sua riabilitazione mediante sollevamento e sopraelevazione della pila che aveva ceduto.

Contestualmente si decise di rafforzare tutte le fondazioni del ponte. Per quest'ultimo intervento fu bandito un appalto concorso che fu aggiudicato ad un'impresa che propose di rafforzare le fondazioni mediante diaframmi perimetrali da realizzare intorno alle fondazioni esistenti (Figura 7). Tali diaframmi avevano spessore di 0,5 e profondità di circa 8 m.

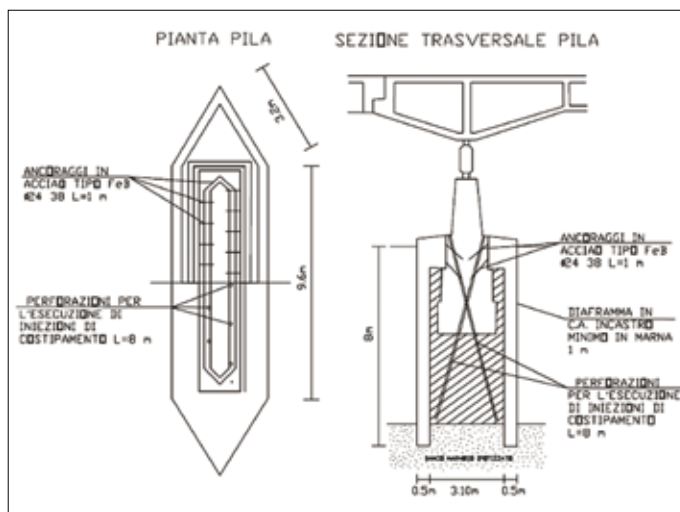
In occasione dei lavori, l'alveo di magra del fiume fu deviato in destra idrografica e tale deviazione sembra essersi consolidata negli anni in quanto il fiume è rimasto in tale posizione.

Nel 2006 la Provincia di Macerata ha stanziato dei fondi per potenziare questo attraversamento. L'opera esistente è infatti soggetta ad un traffico molto intenso dato che collega aree manifatturiere e commerciali importanti e in costante espansione. Considerato che la piattaforma dell'opera esistente ha una larghezza di soli 7 m e tutti i giunti sulle seggiole Gerber dovevano essere sostituiti per usura si poneva il problema di come affrontare i lavori di riabilitazione del ponte senza interrompere il traffico con gravissime ripercussioni per tutta l'economia del distretto.

Si è quindi dapprima valutata la possibilità di allargamento dell'opera esistente e quindi deciso di realizzarne una nuova in affiancamento. Il percorso decisionale ha dovuto evidentemente tenere conto delle condizioni di sicurezza idraulica dell'opera esistente e degli effetti causati dalla nuova costruzione che doveva necessariamente essere realizzata immediatamente a monte, in affiancamento, per usufruire dell'unico corridoio stradale possibile.

La valutazione della sicurezza idraulica ponte esistente

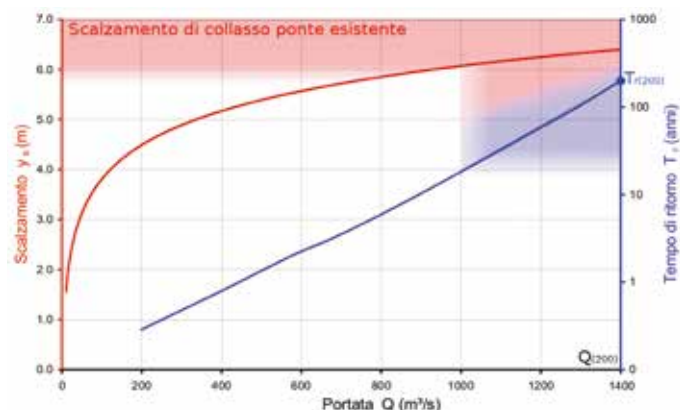
Per valutare la sicurezza idraulica del ponte esistente si sono dovute innanzitutto ricavare le curve di scalzamento in funzione della portata. Impiegando le principali formule di letteratura per le fondazioni del ponte esistente (Figura 7) si vede abbastanza chiaramente che, anche con portate relativamente modeste, si ottengono scalzamenti variabili tra i 3 e i 4 m. Lo scalzamento di alcuni metri nel caso di piene stagionali forti è stato in effetti verificato dagli scriventi durante la fase di studio e successiva realizzazione dell'opera. La causa di questi scalzamenti frequenti dovuti alle piene stagionali è la pendenza dell'asta fluviale abbastanza accentuata che comporta velocità di deflusso elevate, come tipico per la fascia sub-appenninica, e la presenza di ghiaie e sabbie di pezzatura relativamente piccola che possono essere trasportati con relativa facilità dalla corrente.



7. Il rafforzamento della fondazioni del viadotto sul Chienti a Montecosaro realizzato nel 1980

Questi scalzamenti sono stati sufficienti a far sprofondare la pila 3 nel 1980 quando il ponte aveva ancora le fondazioni originali. Oggi, con i diaframmi che hanno approfondito le fondazioni fino ad 8 m intestandosi dentro il substrato di argille grigio-azzurre plio-pleistoceniche, l'opera è da considerare stabile fintanto che non si superino i 6-7 m circa di scalzamento. Come già accaduto per altre opere del medio versante adriatico fondate su terreni con caratteristiche stratigrafiche simili, il substrato in argille grigio-azzurre fornisce un buon sottofondo dove intestare le fondazioni profonde, un sottofondo che non è inciso dagli eventi di piena ma che invece viene facilmente dilavato nel lungo periodo se scoperto come nel caso del Vomano.

Può essere quindi interessante correlare le portate del Chienti nella sezione di attraversamento del ponte con i tempi di ritorno e quindi in definitiva ottenere lo scalzamento in funzione del tempo di ritorno, ovvero una misura abbastanza diretta della sicurezza idraulica dell'opera. Per il ponte di Montecosaro esistente con le fondazioni rinforzate con diaframmi le curve che si ottengono sono riportate in Figura 8: in rosso, la curva Portata-Scalzamento e in blu la Portata-Tempo di Ritorno, dove per il Tempo di Ritorno è stata adottata una scala logaritmica in modo da facilitare la lettura per gli eventi più frequenti.



8. Le curve Portata-Scalzamento, Portata-Tempo di Ritorno per il ponte sul Chienti a Montecosaro



9. Le fondazioni del nuovo ponte in adiacenza all'esistente

Come si vede dalla Figura 8, lo scalzamento cresce rapidamente al crescere delle portate. Anche la curva Portata-Tempo di Ritorno ha un andamento simile sebbene mascherata dalla scala logaritmica. Le portate crescono subito rapidamente per cui già per un tempo di ritorno T_r di soli due anni si ottengono portate di circa $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Se questo andamento fosse vero, il ponte esistente sarebbe già dovuto crollare più volte prima del 1980. Questa sovrastima delle portate per i tempi di ritorno più brevi, quelli per cui si ha per altro facile memoria storica, è dovuto ai modelli utilizzati che spesso non tengono conto della presenza degli invasi artificiali all'interno del bacino che riducono il deflusso invasando una quota significativa delle portate. La presenza di tali invasi viene ignorata in favore di sicurezza quando si calcolano le portate duecentennali di progetto ma dovrebbero invece essere considerati per una stima corretta della sicurezza idraulica nel breve periodo. Se da una parte infatti i tempi di corrivazione sono diminuiti per l'antropizzazione del territorio dall'altra sono aumentati gli invasi artificiali. Questo porta in definitiva ad un aumento delle piene locali per fenomeni intensi dei piccoli corsi d'acqua e una riduzione delle portate per i corsi d'acqua maggiori dove vi è la presenza di invasi artificiali.

Tenendo conto delle riserve di cui sopra si vede in definitiva che il ponte esistente ha discrete probabilità di sopravvivenza (scalzamenti inferiori ai 6-7 m circa) per almeno una ventina di anni ovvero il tempo di ritorno per scalzamenti maggiori di 6-7 m sono superiori ai venti anni circa. Questo risultato ha sconsigliato l'allargamento della piattaforma esistente senza onerosi interventi di riabilitazione e rafforzamento delle fondazioni in quanto l'opera con le fondazioni rinforzate nel 1980 non dispone di una sicurezza idraulica paragonabile a quella richiesta per le nuove costruzioni. Gli stessi risultati suggeriscono però di mantenere l'opera in esercizio potendo contare su di un nuovo attraversamento immediatamente a monte in quanto la stessa ha comunque una aspettativa di vita non trascurabile.

Si ritiene infatti che con la realizzazione delle fondazioni del nuovo ponte si sia migliorata la sicurezza idraulica dell'esistente in quanto, come già illustrato precedentemente, lo scalzamento localizzato tende a concentrarsi in entrata e quindi nel caso in esame sulla punta a monte dei plinti del nuovo ponte (Figura 9), a distanza di 10 m circa dalle fondazioni del ponte vecchio.

Si è quindi realizzato un nuovo attraversamento con una trave continua a struttura mista di luci generose (pari a tre campate del ponte esistente quindi 60 m circa) fondata su pali trivellati di grande diametro. Dovendo stare in adiacenza alle fondazioni esistenti, si sono studiati dei plinti asimmetrici che realizzano un unico solido idrodinamico con quelli del vecchio ponte proprio per evitare di creare turbolenze localizzate con conseguente rischio di scalzamento. L'opera ha una piattaforma stradale di larghezza pari a 9,2 m più una camminamento ciclopedonale di 1,3 m e una lunghezza complessiva di 215 m per una superficie complessiva di 2.250 m^2 . L'impalcato è un bi-trave classico in acciaio autopatinante, le travi hanno altezza variabile per richiamare il prospetto del ponte esistente ovvero l'intradosso dei due impalcati segue lo stesso andamento.

La costruzione del nuovo ponte è stata ritardata dal fallimento dell'impresa aggiudicataria. I lavori sono stati interrotti per più di un anno e quindi ripresi riappaltando le lavorazioni mancanti e portati a termine senza ulteriori ritardi. L'opera e tutta la viabilità di collegamento è costata molto poco, circa 2,5 milioni di Euro compresa la viabilità e le opere accessorie. ■

⁽¹⁾ *Ingegnere Dirigente Viabilità e Patrimonio, Provincia di Macerata*

⁽²⁾ *Professore Presidente di Integra SpA*

Bibliografia

- [1]. M. Petrangeli, C. Andreocci, M. Sciarra - "Sulla S.S. 16 Adriatica, la ricostruzione del Ponte sul Sangro", "Strade & Autostrade", n° 65 Settembre-Ottobre 2007, pp. 76-82.
- [2]. Florida Department of Transportation - "Bridge Scour Manual", 2010.
- [3]. Federal Highway Administration - "Bridge Scour And Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection, and Design Guidance", Second Ed., FHWA NHI 01-003, March, 2001
- [4]. A.K. Agrawal, M.A. Khan, Z. Yi - "Handbook of Scour Countermeasures Designs", City College of the City University of New York, 2005.
- [5]. R.W.P. May, J.C. Ackers, A.M. Kirby - "Manual on scour at bridges and other hydraulic structures", CIRIA, London, 2002.

10. Il nuovo ponte sul Chienti a Montecosaro

