

Manutenzioni Straordinarie

Come consolidare un ponte sul Po

È ENTRATA NELLA FASE DEL MONITORAGGIO - AFFIDATO A UN SISTEMA BREVETTATO DAL POLITECNICO DI MILANO - L'ATTIVITÀ DI MESSA IN SICUREZZA DEL PONTE SUL PO A BORGOFORTE (MANTOVA), CHE È CONSISTITA IN LAVORI DI RINFORZO STRUTTURALE E PROTEZIONE DEL FONDO ALVEO. DI SEGUITO TUTTI I DETTAGLI DELL'INTERVENTO DAL PROGETTO ALLE PROVE.

La messa in sicurezza di ponti fluviali risulta una tematica di stretta attualità soprattutto in territori come quelli della Provincia di Mantova, caratterizzati da una fitta rete idraulica composta da fiumi naturali e canali artificiali i cui numerosi manufatti di attraversamento si trovano sottoposti all'azione aggressiva degli eventi atmosferici, nonché a problematiche causate dalle evoluzioni altimetriche dell'al-

veo e dall'erosione localizzata delle pile. Tra gli interventi di manutenzione straordinaria avviati dalla Provincia a partire dal 2000 si presentano particolarmente interessanti quelli che hanno riguardato il Ponte di Borgoforte sul Po lungo la ex SS 62 (fig. 1). Si è trattato di lavori di rinforzo strutturale, di protezione del fondo alveo dall'erosione localizzata generata della corrente idrica, nonché di un innovativo siste-

Silvio Franzetti
Professore ordinario
Ingegneria idraulica
Politecnico di Milano

Giuliano Rossi
Ingegnere
Settore tecnico e unico
progettazioni e manutenzioni
Provincia di Mantova

con

Giulio Broli
Architetto
Settore tecnico e unico
progettazioni e manutenzioni
Provincia di Mantova

1

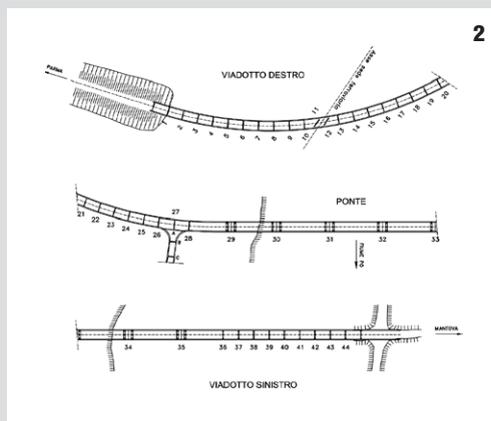


L'identikit del manufatto

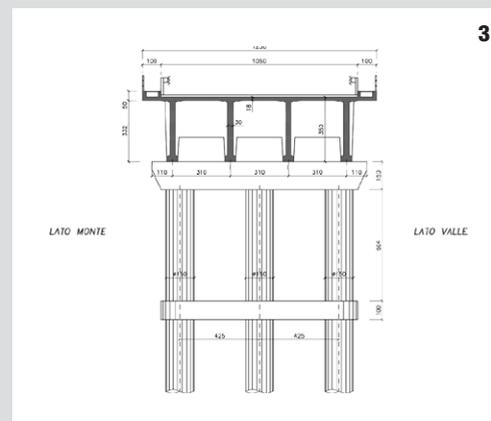
Il ponte di Borgoforte, realizzato nel 1961 in sostituzione del preesistente ponte di barche, attraversa il Po sulla ex SS 62 "della Cisa" al km 168+700, in prossimità di Borgoforte. Il ponte si trova in un tratto del Po privo di immissioni importanti ed è pressoché parallelo all'attraversamento ferroviario della linea Verona-Modena situato circa 150 m a monte di quello stradale. L'attraversamento tra i due argini, la cui lunghezza è di circa 630 m, è costituito da tre parti principali (fig. 2):

1. Viadotto di accesso in sinistra idraulica (lato Lombardia): si sviluppa completamente in golena ed è costituito da 9 campate in semplice appoggio con luce di 18,35 m.

2. Ponte sul fiume Po: si sviluppa parte in golena e parte in alveo ed è costituito da 7 pile, su due file di palificate accoppiate, che reggono travi "cantilever" con doppio sbalzo da 8,925 m e lunghezza totale di 27,35 m. I tratti cantilever sono tra loro collegati da travi tampone di 36 m di luce, per una luce complessiva tra le pile di 63,50 m. I cantilever hanno altezza variabile da 3,50 m nella sezione alla radice della



pila, a 2,50 m in corrispondenza delle selle Gerber e poggiano, tramite pulvini-traversone di collegamento, su due terne di pali-pila Ø 1500 mm (fig. 3). Un secondo traversone è posto sopra la quota del livello di magra. L'impalcato tampone ha una larghezza di 12,50 m ed è costituito da 4 travi a "T", collegate da traversi. La soletta è in c.a. ordinario, con spessore di 18 cm. Le pile sono composte da due file di tre colon-



ne a sezione circolare con diametro di 1,5 m collegate in sommità da pulvini. Le fondazioni di tipo indiretto sono costituite da palificate di 3+3 pali Ø 1500 mm, con profondità variabile da -21.30 a -42.90 m slm. **3. Viadotto di accesso in destra idraulica (lato Emilia):** si sviluppa completamente oltre l'argine per un numero complessivo di 28 campate in semplice appoggio con luce di 18,40 m.

1. Il ponte sul Po di Borgoforte (Mantova) a intervento di consolidamento concluso

2. Pianta schematica del ponte

3. Sezione trasversale prima dell'intervento

4. Localizzazione del sistema di monitoraggio

ma sperimentale di monitoraggio di una pila (fig. 4) per la valutazione del rischio in occasione di eventi idrometeorologici significativi. Il collaudo del ponte riqualificato è avvenuto all'inizio del 2011. Il monitoraggio è in corso e, dopo un periodo di sperimentazione, si tradurrà in un'attività permanente dell'ente gestore funzionale al miglioramento della sicurezza del manufatto. La struttura del ponte è composta da impalcato arcuato a trave "Gerber" sostenuti da pile costituite da telai a pali di grande diametro. La gestione del manufatto è stata in carico all'Anas fino al 2001, quindi è stata trasferita alla Regione Lombardia e, infine, alla Provincia di Mantova in virtù del D.Lgs 112/98. Prima del "passaggio", a seguito degli eventi alluvionali dell'ottobre 2000, il Compartimento per la Viabilità della Lombardia dell'Anas aveva già promosso una campagna di indagini finalizzate a definire le condizioni statiche delle pile e delle fondazioni dei principa-



li ponti in carico al Compartimento e, tra questi, di quello sul Po a Borgoforte. Le indagini furono le seguenti:

- **indagini sulla struttura e sul fondo alveo:** consistenti in ispezioni visive volte a individuare stati di degrado localizzati, quadri fessurativi, tracce di percolazioni; rilievo batimetrico dell'alveo, per cogliere eventuali segnali di scalzamento in prossimità delle pile; indagini ecometriche su 29 pali (11 in alveo e 18 in golena) al fine di stimarne la lunghezza;
- **indagini geognostiche con prove in situ e di laboratorio,** consistenti in sondaggi in prossimità delle pile 17, 30, 33, 40, 7 a varie profondità; prelievo di 58 campioni rimaneggiati; prelievo di 6 campioni indisturbati.

Le indagini evidenziarono una situazione di criticità di alcune pile in alveo a causa di una profonda buca che si era creata in centro alveo. Un altro aspetto critico fu la situazione di degrado delle pile del viadotto di accesso lato Emilia, che presentavano e ampi distacchi del copriferro e barre d'armatura scoperte e corrose. Sulla base di queste evidenze, il professor Pier Giorgio Malerba del Politecnico di Milano, su incarico dell'Anas, nel 2001 predispose un progetto definitivo volto al recupero del necessario grado di sicurezza di pile e fondazioni. Nel frattempo, in ottemperanza a quanto stabilito dal D.Lgs 112/98, in data 26/9/2001 la Provincia di Mantova prese in carico il tratto di SS 62 a cui appartiene il ponte di e optò per una revisione del progetto anche in base ai finanziamenti disponibili, peraltro insufficienti per portare a compimento tutte le opere previste nel progetto Anas. Con questo obiettivo e con un'attenzione particolare alle problematiche idrauliche, nel 2003 la Provincia incaricò il professor Silvio Franzetti del Politecnico di Milano di ridefinire i contenuti del progetto.

Situazione prima dell'intervento

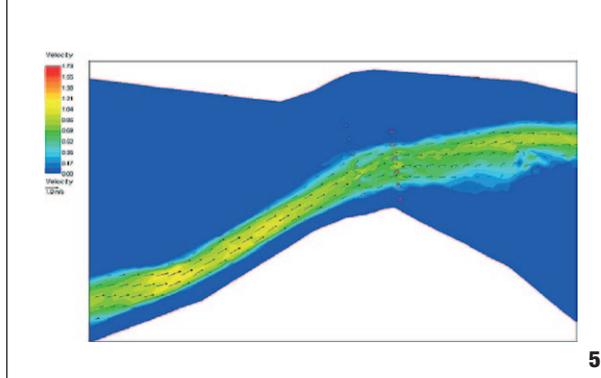
Sulla base di quanto emerso da sopralluoghi e indagini Anas possiamo sintetizzare la situazione sullo stato di conservazione e manutenzione del ponte focalizzando l'attenzione sui seguenti aspetti.

Aspetti idraulici

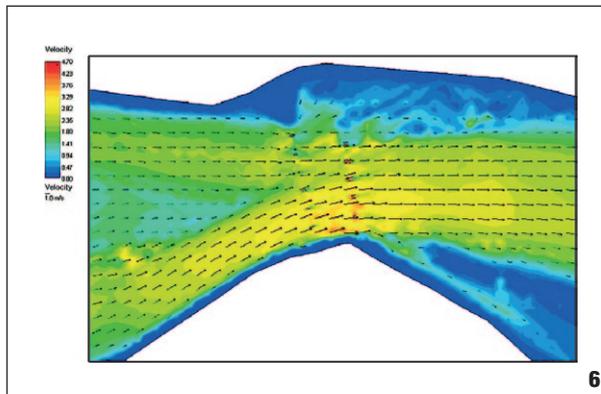
Lo studio idraulico del ponte è stato effettuato, già in sede di progetto Anas, in base alle prescrizioni della normativa vigente e tenendo conto delle disposizioni di cui alla normativa PAI - Norme di attuazione (deliberazione del CI dell'Autorità di bacino del fiume Po, n. 18 del 26/4/2001); PS45 (deliberazione del CI dell'Autorità di bacino del fiume Po, n. 9 del 10/5/1995); Direttiva "Criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B" (allegato alla deliberazione del CI dell'Autorità di bacino del fiume Po, n. 2/99 del 11/5/1999). In particolare è stato evidenziato che:

- il franco minimo registrato durante la piena storica del 2000 è superiore a quello prescritto dalla direttiva n. 2/99 dell'Autorità di Bacino del Fiume Po;
- la forma delle pile è tale da favorire l'accumulo di materiale di trasporto solido (tronchi, ramaglie, ecc.) nell'intorno delle pile stesse;
- rilievi batimetrici eseguiti nel 2001 avevano evidenziato una profonda buca di erosione in corrispondenza delle pile centrali del ponte, in particolare della pila 32, dove il fondo è generalmente a quota +9 m slm (era invece a quota di -7,14 m slm). La buca si estendeva, nella direzione del flusso, verso monte per circa 70 m e verso valle per circa 90 m.

Uno studio sulla compatibilità idraulica e sulla vulnerabilità idraulica svolto dal prof. Franzetti nel 2008 ha appurato che il franco di sicurezza del ponte è adeguato anche per piene con tempi di ritorno di 200 anni; inoltre le pile costituiscono un ostacolo al deflusso del materiale flottante trasportato dalla corrente e l'accumulo, a monte e tra i pali, di detto materiale può portare a significativi incrementi della dimensione dell'ostacolo trasversale al flusso e quindi a un notevole aumento della erosione localizzata. La modellazione 2D, inoltre, ha consentito di chiarire il comportamento della corrente e definirne, in funzione della portata, la distribuzione delle velocità. In condizioni di magra il massimo valore della velocità, e di conseguenza il massimo sforzo, è localizzato tra le pile 32 e 31 (fig. 5); in condizioni di piena il massimo si sposta verso la pila 30 (fig. 6) perché l'incidenza della corrente tende a diventare, all'aumentare della portata, sempre più perpendicolare all'asse del ponte stradale, come confermato da uno studio del 2007 del Politecnico sull'attiguo ponte fer-



5



6

5, 6. Dettaglio della direzione della corrente in prossimità dei ponti ferroviario e stradale con $Q=510 \text{ m}^3/\text{s}$ e con $Q=10'000 \text{ m}^3/\text{s}$

7. Progetto Anas: localizzazione dei sondaggi e prove geotecniche eseguite

roviario. Ne deriva che quest'ultima pila è la più sollecitata in piena e lo sforzo a cui è sottoposta, anche in caso di piena trentennale e senza intasamento delle pile, può portare al raggiungimento di valori critici delle tensioni dell'acciaio di armatura delle strutture. Per questo la Provincia ha deciso di installare un opportuno sistema di monitoraggio alla pila 30.

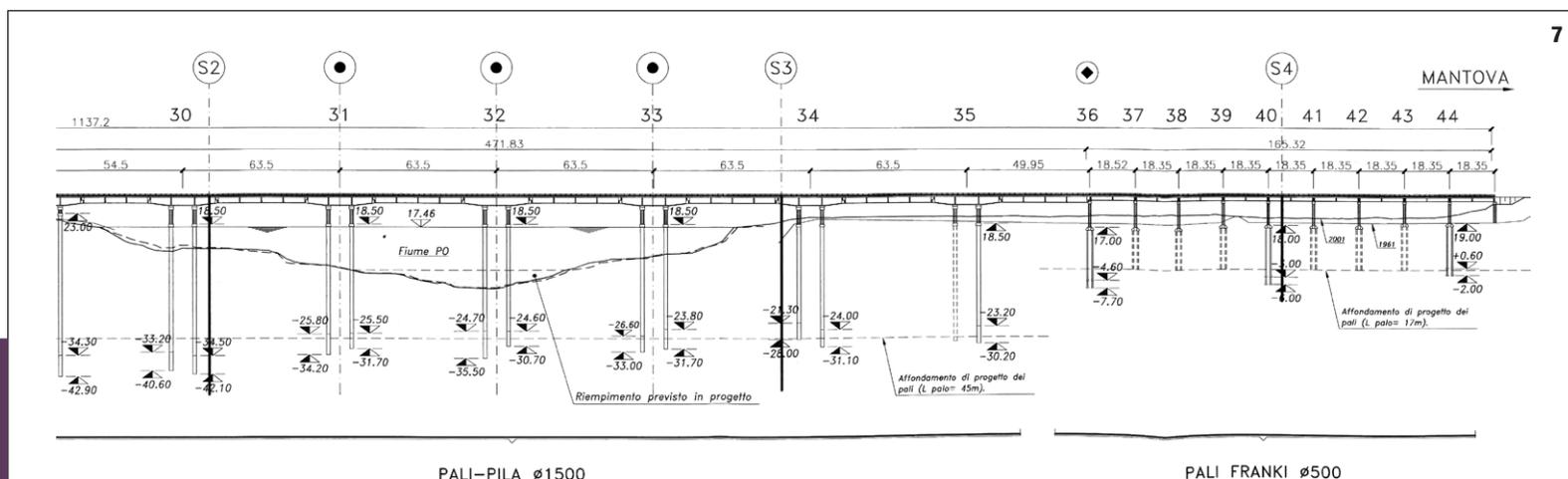
Aspetti geotecnici

Le fondazioni del ponte sono su pali di tipo trivellato di grande diametro $\Phi = 1500 \text{ mm}$ per la parte centrale in alveo e $\Phi = 1000 \text{ mm}$ per le rampe golenali. Le indagini geotecniche eseguite da Anas (fig. 7) consistono in quattro sondaggi a carotaggio continuo per la caratterizzazione litostratigrafica mentre per la caratterizzazione geomeccanica sono state eseguite delle prove SPT in foro e le prove di laboratorio indicate in tab. 1. I terreni di fondazione sono costituiti prevalentemente da materiali sabbiosi mediamente addensati alternati da livelli di argilla-limosa. La stratigrafia si può così schematizzare:

- **Strato 1:** alternanza fitta di livelli limosi argillosi con presenza di sabbia fino ad una quota variabile da 11 a 21 m dal livello fondo alveo.
- **Strato 2:** materiale prevalentemente sabbioso fino alla profondità di m $65 \div 68$ dalla quota del piano viabile (PV).
- **Strato 3:** al di sotto della formazione 2 vi è la presenza di strati di argille e limi argillosi mediamente compatti, con tracce di ghiaia.

LEGENDA:

- ③ Sondaggio geotecnico n°1 del 2001
- ◆ Prova CPT (eseguita nel 2001)
- Sondaggi geotecnici integrativi (L= 60 m), da effettuare prima dei lavori con:
 - esecuzione di prove SPT ogni 1.50 m
 - prelievo di 5 campioni indisturbati nello strato di limo sotto la quota -64m \pm -69m dal piano viabile ed esecuzione di prove di taglio drenate e non drenate.
- Sondaggi L=40m con l'esecuzione di prove SPT ogni 1.5m con prelievo di campioni rappresentativi e di misurazioni con scissometro e pocket penetrometer sulle carote estratte.



7

PALI-PILA $\Phi 1500$ PALI FRANKI $\Phi 500$

TAB. 1 PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO

Sondaggio	Prof. da P.V. (m)	Prof. da alveo	Prossimità pila	Prove di laboratorio					
				Granulometria	Limiti	Edometria	Tx-CU	ELL	TD
S1	47	35,00	18	11	3	1	1	1	
S2	80,10	56,30	30	16	3	1		2	
S3	78,30	70,30	34	24	5		1	1	1
S4	42,60	35,00	40	11	2				

P.V. = piano variabile; Tx-CU = prova triassiale consolidata non drenata; ELL = prova a compressione a espansione laterale libera; TD = prova di taglio diretta

TAB. 2 MODELLO GEOTECNICO TERRENO DI FONDAZIONE PILE 30 E 34

Strato	Prof. da P.V. (m)	N SPT corr. medio	calc.	Cu kPa	
Formazione 1	Da -25,60 a -30,10	7	29,2		
	Da -30,10 a -37,60	22	33		
	Da -37,60 a -43,60	18	32,5		
Formazione 2	Da -43,60 a -66,10	21,33	33,50		
Formazione 3	Da -66,10 a -79,90	2,6		60	0,6

TAB. 3 FATTORI DI SICUREZZA PILE IN ALVEO PRIMA DEL CONSOLIDAMENTO

Pile	30	31	32	33	34
O_{lim}	14.387	11.047	7.000÷5.657	11.980	20.000
O_{adm}	5.755	4.419	2.800÷2.263	4.792	8.000
Carico di progetto	5.000	5.000	5.197	5.000	5.000
Fattore di sicurezza	2,87	2,21	1,34÷1,09	2,38	4,42

8. Sezione trasversale di progetto della pila con opere di consolidamento

9. Progetto Provincia di Mantova: protezione e riempimento buca di erosione con massi (sezione trasversale al fiume)

In corrispondenza delle pile 30 e 34 in alveo, quelle maggiormente sollecitate, il modello geotecnico del terreno di fondazione, risultante dalla elaborazione dei valori strumentali ricavati dalla prove in sito e di laboratorio dei sondaggi S2 e S3, è indicato in tab. 2. Con i parametri sopra specificati, nel progetto Anas è stata eseguita una valutazione della portanza dei pali delle pile 31, 32 e 33. Le verifiche hanno evidenziato una situazione carente per dette pile e in particolare la portanza limite stimata per i pali della pila 32 è risultata di circa 7.000÷5.657 kN (a seconda del sondaggio a cui si fa riferimento), quindi con fattore di sicurezza pari a 1,09÷1,34 (tab. 3), decisamente insufficiente.

Stato di conservazione delle strutture

Le strutture verticali in calcestruzzo ordinario sono, in genere, in cattivo stato di conservazione. In particolare nel progetto Anas sono state segnalate le seguenti criticità:

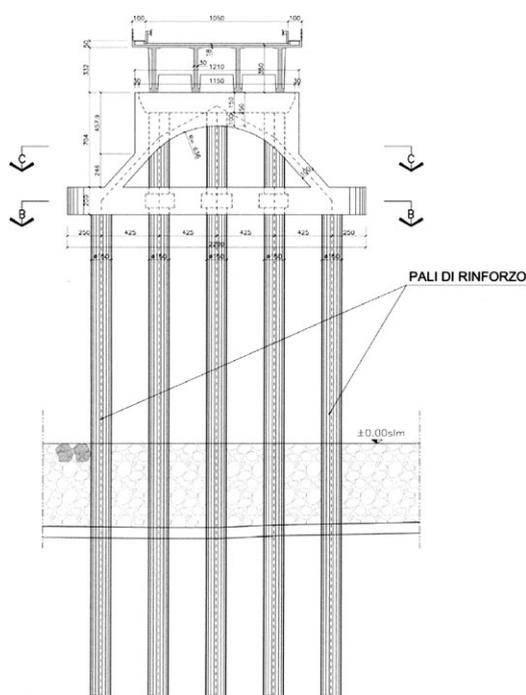
- le pile del viadotto di accesso lato Emilia presentano, all'altezza del traverso intermedio di collegamento, segni evidenti di carbonatazione, ampi distacchi del copriferro e barre d'armatura scoperte e corrose. Notevolmente degradate sono in particolare le zone di testa pila, sulle quali sono posizionati gli appoggi;
- le selle Gerber del ponte principale, in particolare quelle delle pile cantilever 29 e 35, presentano affioramenti accentuati dei ferri di armatura;
- i giunti necessitano di manutenzione.

Interventi in progetto

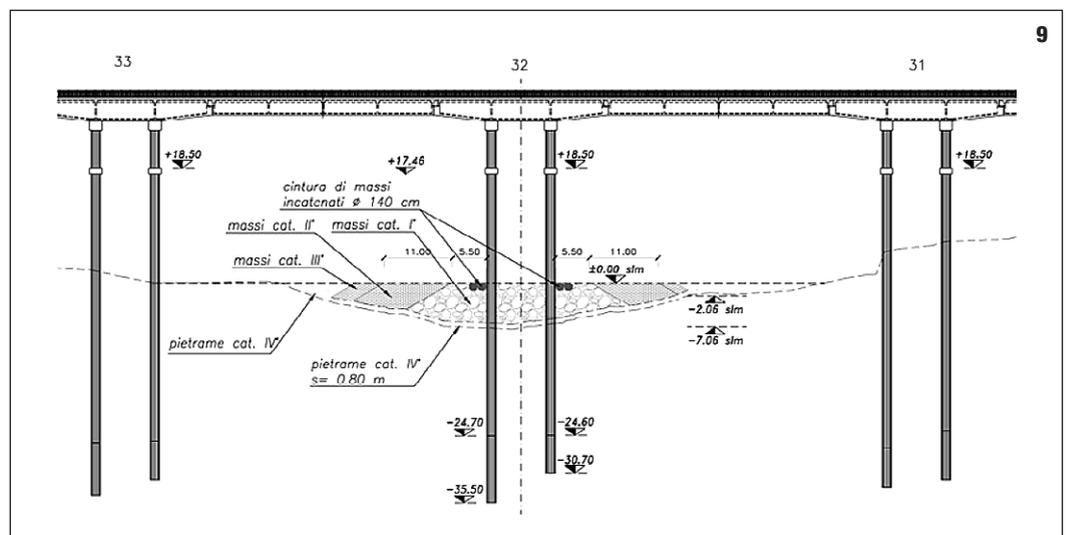
Il progetto Anas (2001) prevedeva un intervento di manutenzione straordinaria che comprendeva:

- il potenziamento delle fondazioni delle pile in alveo 31, 32, 33 - previa esecuzione di indagini geognostiche nell'intorno della pila 33 per la verifica puntuale delle caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione indagati nel 2001 -, mediante la realizzazione, per ogni pila, di 4 pali aggiuntivi (2 a monte e 2 a valle) collegati a nuovi traversi e a strutture ad arco in calcestruzzo;
- il riempimento, con sacconi, massi e rip-rap, della buca;
- l'esecuzione di interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria sul viadotto di accesso lato Emilia mediante asportazioni di parti di calcestruzzo ammalorate, ripristino e posa

8



9



delle armature integrative delle strutture trasversali e dei traversi;

- la sostituzione di giunti dell'impalcato di tutto il viadotto con giunti in gomma armata;

- un eventuale sistema di monitoraggio fisso costituito da ecoscandagli per il controllo delle quote di fondo alveo.

Il progetto della Provincia di Mantova (2004) ha recepito in toto quello Anas per i soli lavori di cui al primo punto. Viceversa è stato modificato l'intervento idraulico, consistente nel parziale riempimento (fino a quota +0 m slm) della buca in alveo - così come rilevata nel 2001 - in corrispondenza della pila 32 con massi e pietrame, a granulometria graduata e variabile in funzione degli sforzi previsti (fig. 8, 9). L'estensione massima longitudinale e trasversale al fiume prevista è di 240 e 90 m. Il volume complessivo dei massi di riempimento è di circa 40.000 m³, ripartita in classi di pezzatura diversa. Attorno alla metà anteriore della pila, dove gli sforzi possono essere elevati, è prevista una doppia corona di massi da 1,4 m³ collegati fra loro con catene d'acciaio zincate con diametro del tondo Ø 15 mm, di lunghezza fra due massi = 2 m, collegate con golfare e grilli d'acciaio inox ai massi tramite tiranti in barre dywidag Ø 26,5 mm. La protezione a monte della pila non è estesa a tutta la buca, ottenendo così un risparmio tale da contenere la spesa entro il limite del finanziamento. Ciò è tecnicamente ragionevole in quanto a monte della zona protetta gli sforzi sono minori e ci si attende che il trasporto di fondo, ostacolato dal riempimento, riempi rapidamente la buca.

Esecuzione, controlli e varianti in corso d'opera

I lavori, iniziati nel 2005, hanno avuto uno sviluppo discontinuo sia a causa della variabilità del regime idraulico del fiume sia per l'evoluzione dell'alveo che al momento dell'esecuzione mostrò quote di fondo diverse da quelle di progetto. Il collaudo del manufatto rinnovato risale al 2011.

Lavori strutturali

Per quanto riguarda i lavori strutturali, sono stati eseguiti attenti controlli sui materiali, sugli elementi strutturali e sulla parte di manufatto interessata dall'intervento. Nello specifico: controllo di continuità e integrità strutturale dei pali di rinforzo mediante prove non distruttive di tipo *crosshole*; verifica di resistenza dei calcestruzzi e dei ferri di armatura; rilievi geometrici generali e di dettaglio. Una volta realizzati pali (fig. 10) e traversi, poiché portanza e cedimenti sono elementi essenziali per l'efficacia dell'intervento, i pali di rinforzo sono stati controllati accuratamente. Di seguito si descrive la prova di carico sui pali della pila 33 eseguita ai fini del collaudo dei pali stessi. Per ogni palo di monte e valle si è utilizzato un martinetto oleodinamico (fig. 11) della potenza massima di 600 ton in grado di ottenere il carico prescritto applicato a contrasto con la nuova struttura in c.a. (traverso). I due martinetti sono stati collegati a una unica centralina oleodinamica in modo da essere caricati contemporaneamente. Per mezzo di 3 comparatori centesimali disposti a circa 120° sono state eseguite le letture di abbassamento dei pali; mediante letture ottiche è stata controllata la deformazione della struttura di contrasto. La prova è stata eseguita secondo i seguenti cicli di carico.



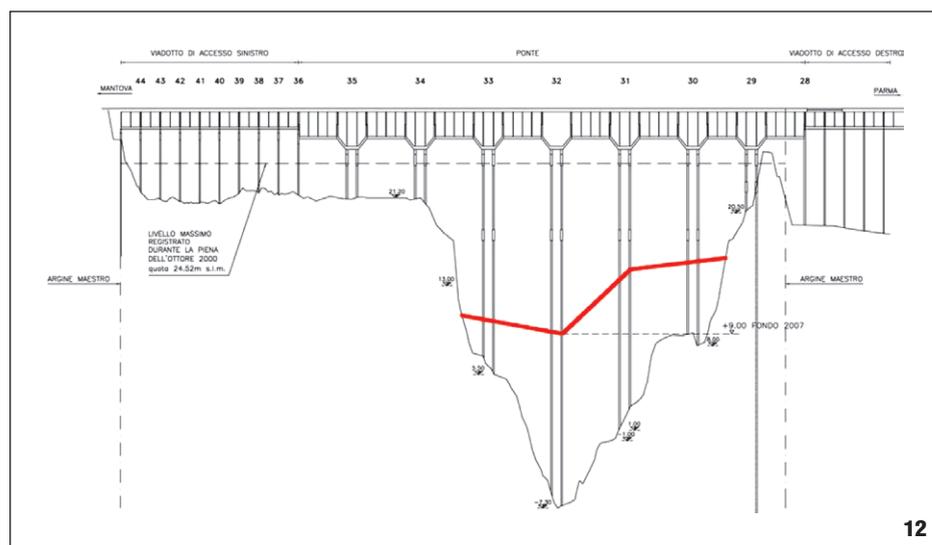
10. Pali di rinforzo

11. Martinetto oleodinamico di carico

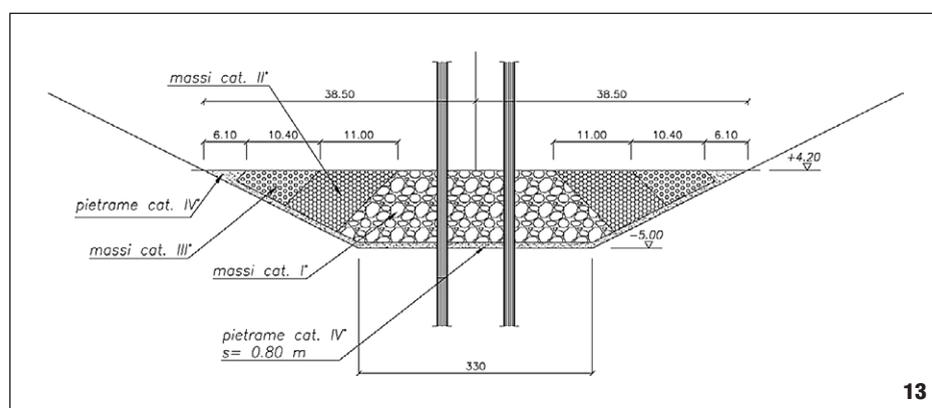
- *Primo ciclo (carico di esercizio)*: si è raggiunto il carico di 351,4 t > 350,6 ton di esercizio, con 3 incrementi di 102,84 ton e 1 incremento di 42,85 ton; per ogni incremento sono stati misurati i cedimenti stabilizzati di entrambi i pali aggiun-

TAB. 4 RISULTATI PROVE SUI PALI (SEQUENZA DI CARICO PROGETTO 2001)

Palo di monte					
Primo ciclo carico	Cedimenti in mm	Cedimento residuo mm	Carico P in t	Rapporto cedimenti	Rapporto carico
1 [^]	1,28		102,84		
2 [^]	2,53		205,68	1,98	2
3 [^]	3,97		308,52	1,57	1,5
4 [^]	4,61		351,40	1,16	1,14
Scarico		0,69			
Secondo ciclo di carico	7,9		531,40		
Scarico		1,96			
Palo di valle					
Primo ciclo carico	Cedimenti in mm	Cedimento residuo mm	Carico P in t	Rapporto cedimenti	Rapporto carico
1 [^]	0,63		102,84		
2 [^]	1,74		205,68	2,70	2
3 [^]	3,09		308,52	1,77	1,5
4 [^]	3,60		351,40	1,16	1,14
Scarico		0,26			
Secondo ciclo carico	6,24		531,40		
Scarico		0,92			



12



13

12. Confronto tra profili del fondo alveo nel 2001 (dopo la piena del 2000) e nel 2007

13. Sezione trasversale al fiume: scavo e riempimento alla pila 22

tivi. La fase di scarico è avvenuta con 4 decrementi (uguali agli incrementi utilizzati in fase di carico) e sono stati misurati i cedimenti di ritorno per entrambi i pali.

• *Secondo ciclo (carico di collaudo = 1,5 volte il carico di esercizio)*: Si è raggiunto il carico di prova per entrambi i pali pari a 531,4 ton > 1,5 volte il carico di esercizio = 525,9 ton, con 4 incrementi pari a 102,84 ton e 2 incrementi di 42,85 ton e 1 incremento di 34,28 ton; per ogni incremento sono stati misurati i cedimenti stabilizzati di entrambi i pali aggiuntivi. La fase di scarico è avvenuta con 6 decrementi (uguali agli incrementi utilizzati in fase di carico) e sono stati misurati i cedimenti di ritorno per entrambi i pali, come riportato in dettaglio in tab. 4.

Per quanto riguarda il primo ciclo, gli abbassamenti massimi sono stati contenuti: 4,61 mm per il palo di monte e 3,60 mm per il palo di valle. Il cedimento residuo è stato pari a 0,69 mm per il palo di monte e 0,26 mm per il palo di valle, molto modesti e parzialmente compresi nella tolleranza strutturale. Gli abbassamenti massimi del secondo ciclo di carico sono stati: 7,9 mm per il palo di monte e 6,24 mm per il palo di valle. Il cedimento residuo totale è risultato pari a 1,96 mm per il palo di monte e 0,92 mm per il palo di valle. I gradienti di deformazione sono risultati con discreta approssimazione proporzionali ai gradienti di carico. Visti i modesti cedimenti residui e il comportamento quasi elastico del sistema palo-terreno, si è ritenuta la prova di carico piena-

mente soddisfacente. Per far sì che i pali integrativi di tutte le pile rinforzate risultassero collaboranti con quelli esistenti, ciascun palo integrativo è stato precaricato mediante martinetto con un ciclo di carico-scarico a 4500 kN/palo e successivo ricarico a 2300 kN/palo; infine, bloccata la situazione di ricarico sostituendo ogni martinetto con 3 vitoni (da 1000 kN ciascuno), i pali sono stati solidarizzati ai traversi mediante getti di malte ad alta resistenza.

Lavori idraulici

Il progetto originario della Provincia di Mantova (2004), come del resto il precedente progetto Anas, partiva dalla constatazione dell'esistenza in alveo di un'ampia buca di erosione localizzata alla pila 32 a seguito degli eventi alluvionali del 2000. Le buche di erosione possono riempirsi o durante la fase calante dell'onda che le ha generate o durante successive minori "morbide" o anche durante il regime normale di portata. Questa sequenza si è verificata, come constatato tramite appositi rilievi batimetrici che hanno evidenziato come nel 2007 il fondo alveo si fosse portato alla quota di circa +9 m s.l.m., cioè praticamente alla quota precedente la piena del 2000. In fig. 12 è rappresentato il confronto tra la forma dell'alveo indicata nella relazione idraulica del progetto Anas con scavo di erosione alla profondità di -7,30 m e la forma dell'alveo nel 2007: pertanto la protezione con massi della pila 32 non poteva più essere realizzata nella maniera prevista dal progetto 2004. È stata quindi predisposta una perizia di variante che prevedeva lo scavo attorno alla pila di una buca appropriata con fondo a quota -5 m s.l.m., da riempire con pietrame e massi fino a quota +4,20 m s.l.m. (fig. 13), per un'estensione di 100 m in senso longitudinale e 90 m in senso trasversale (volume totale di circa 40.000 m³). Durante i lavori, le osservazioni dirette e i frequenti rilievi batimetrici, hanno confermato quanto previsto dalla modellazione numerica e concettuale: si è dovuto procedere rapidamente al riempimento in massi prima che il non trascurabile trasporto solido di fondo del fiume in morbida riempisse la buca scavata; il filone principale della corrente, che in magra è diretto verso la pila 32, all'aumentare della portata coinvolge le altre pile, spostando il massimo di velocità verso la pila 30, pur conservando elevati valori cinetici anche alla pila 32.

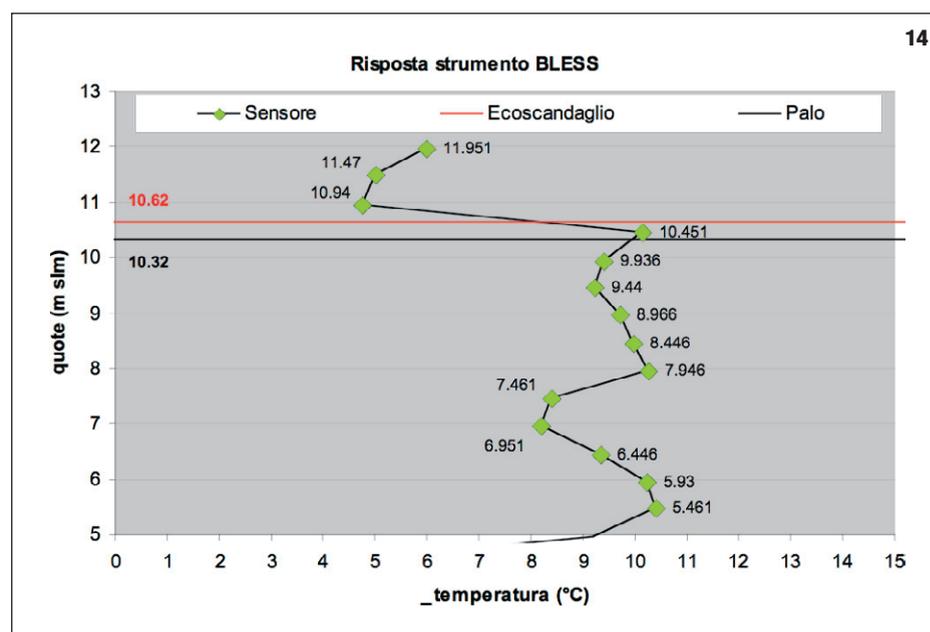
Il monitoraggio

Come detto, sono state rinforzate le pile 31, 32, 33, ma la modellazione numerica e le evidenze sperimentali hanno mostrato che in piena la pila 30 potrebbe essere la più vulnerabile. Si è quindi deciso di realizzare alla pila 30 un sistema di monitoraggio fisso atto a valutare in tempo reale le condizioni di sicurezza del ponte. Gli sforzi nella struttura dipendono, oltre che dai carichi mobili, anche dal livello del fondo alveo, dalla temperatura e dalla velocità dell'aria e dell'acqua. Data la mancanza di *standard* consolidati per il monitoraggio della quota di fondo alveo attorno a una pila, è stato deciso di utilizzare, oltre a sistemi già in uso altrove, anche sistemi innovativi alternativi ai sensori acustici (ecoscandagli). Il sistema consiste in sedimenti ottici connessi a un profondo palo d'acciaio appositamente installato. L'erosione localizzata a una pila dipende dalla cinematica della corrente e dalla dimen-

sione dell'ostacolo che può incrementare considerevolmente per effetto dell'accumulo di corpi galleggianti attorno alla pila; pertanto si è previsto il controllo visivo della pila con telecamere. Oltre alle suddette grandezze, l'impianto acquisisce altre misure significative, relative a temperatura, velocità dell'aria, livello idrico del fiume. Nel dettaglio, le opere di monitoraggio (fig. 4) consistono in: un sistema di controllo dello scavo di erosione mediante ecoscandaglio; un sistema di controllo dello scavo di erosione mediante sedimetri ottici ancorati a un tubo in acciaio zincato Φ 200 mm inserito in un perforo fino a -17 m slm; un sistema di controllo visivo del materiale solido galleggiante che si accumula contro la pila consistente in 2 telecamere a infrarossi più 2 illuminatori a infrarossi; un sistema di controllo e registrazione dei livelli idrometrici e anemometrici; un sistema di *box* nei quali sono alloggiati le componenti elettriche; un sistema di trasmissione dati a una centrale di controllo locale; una centrale di controllo posizionata nei pressi della pila 34 con funzione di registrazione locale, elaborazione e trasmissione dati a stazione remota; un sistema di trasmissione dati remota; un sistema remoto di raccolta ed elaborazione dati trasmessi; collegamenti elettrici, quadri e opere civili e meccaniche. Entrando ulteriormente nel dettaglio delle principali strumentazioni, possiamo aggiungere che l'anemometro consente di determinare velocità e direzione del vento: le medie, come il valore di folata (massimo), sono registrate ogni 10 minuti. L'idrometro a ultrasuono rileva quindi la distanza tra lo strumento e il pelo libero della corrente; nota la quota di riferimento, si ricava l'altezza dell'acqua. La misura della quota del fondo del fiume è invece la variabile più problematica da monitorare. A Borgoforte sono stati posizionati due strumenti tra loro indipendenti: un ecoscandaglio (PSA-916 Teledyne Benthos) e un innovativo sedimetro ottico (BLESS), entrambi collocati a valle della pila 30. Il sedimetro BLESS (Bed Level Seeking System), brevettato dal Politecnico di Milano, utilizza una serie di reticoli di Bragg (FBG) all'interno della stessa fibra per misurare un profilo verticale di temperatura. L'innovazione è data dall'utilizzo di una fonte di calore che scalda i reticoli per effetto Joule. La temperatura misurata dai sensori in acqua corrente è minore rispetto a quella rilevata dai sensori interrati, per diversa dissipazione del calore: la posizione del fondo del fiume è così identificata dal conseguente salto termico tra due sensori consecutivi (fig. 14).

Conclusioni

Gli sforzi nella struttura, e quindi il coefficiente di rischio del ponte, dipende dalle forze derivanti da vento, acqua e veicoli transitanti. Da *test* effettuati, è già possibile affermare che in condizioni ordinarie, con ponte aperto al traffico, la risultante dei momenti agenti diventa critica se il vento è forte, anche senza scavo; in condizioni di ponte chiuso al traffico, il valore del coefficiente di rischio è prossimo all'unità solo per eventi eccezionali, sia di piena sia di scavo intorno alla pila, quando quest'ultima è intasata da detriti. Queste considerazioni consentono di affermare che la valutazione del rischio della struttura in tempo reale non solo consente il transito del ponte in sicurezza, ma anche di prevenire un ipotetico crollo della struttura. Il monitoraggio in tempo reale delle varia-



bili da cui dipendono i valori delle forzanti - con conseguente procedura di acquisizione, trasmissione, analisi e valutazione dei dati messa a punto dal Politecnico di Milano, titolare di apposito contratto di ricarica sottoscritto dalla Provincia di Mantova - è quindi elemento importante in quanto permette di prendere appropriate misure di prevenzione, quale l'eventuale chiusura del ponte. Al termine della sperimentazione, si prevede di mettere a punto un applicativo interfacciato al *software* di acquisizione che consenta di interpolare i valori misurati all'interno di una griglia multidimensionale di scenari prefissati, funzionale alla valutazione del grado di vulnerabilità del ponte. I valori saranno quelli derivanti dallo studio metodologico contenuto nello "Studio della vulnerabilità idraulica" del 2008, messo a disposizione dalla Provincia, con eventuali puntualizzazioni sulla spinta idrodinamica alla luce di recenti studi. I livelli di preallarme, di allarme e le conseguenti azioni di protezione civile saranno quindi definiti sulla base di opportune valutazioni di stabilità della struttura nelle diverse condizioni di carico. ■■

14. Output dello strumento BLESS

La squadra dietro l'opera

Committente progettazione definitiva: Anas SpA
Progettazione definitiva: prof. Giorgio Malerba (Politecnico Milano)
Stazione appaltante: Provincia di Mantova, Settore Unico Progettazioni e Manutenzioni
Progettazione esecutiva e Direzione Lavori: prof. Silvio Franzetti (Politecnico di Milano)
Responsabile del procedimento: ing. Marcello Rabitti (Provincia di Mantova)
Collaudo tecnico amministrativo in corso d'opera: ing. Giuliano Rossi (Provincia di Mantova)
Collaudo statico: ing. Martino De Togni
Coordinatore sicurezza: ing. Luciano Corradini (Studio Polaris)
Impresa esecutrice: ATI Sarti Ing. Giuseppe & C SpA-Lavori speciali Srl
Opere specialistiche impianti elettrici ed elettromeccanici: TI Control Srl
Prove sui materiali: Laboratorio Tecnologico Mantovano Srl