

MODELLAZIONE FISICA A FONDO MOBILE DEL TRATTO DI FIUME PO TRA IL CANALE DI ISOLA SERAFINI ED IL PONTE DI CREMONA

Autori: Prof. Ing. Alessandro Paoletti, Ing.ri Omar William Cella (ETATEC S.r.l. Milano), Roberto Salvadori, Andrea Ostan (Autostrade Centro Padane S.p.a.)

Premessa a cura di: Ing.ri Ivano Galvani e Federica Pellegrini – (AIPo)

PREMESSA

Il polo scientifico e tecnologico AIPo di Boretto (RE) ha ospitato, tra marzo 2011 e luglio 2012, i tecnici della Società CentroPadane Spa di Cremona e della Società di Ingegneria Etatec srl di Milano che hanno curato la realizzazione del modello fisico a fondo mobile del tratto del fiume Po compreso tra il canale di restituzione della centrale di Isola Serafini e il ponte ferroviario nei pressi della città di Cremona. Tale zona è interessata dalla realizzazione del nuovo viadotto autostradale, facente parte del "Raccordo autostradale tra A21 con S.S. 10 - Padana Inferiore - e il nuovo casello di Castelvetro Piacentino - Completamento bretella autostradale tra S.S. 10 e S.S. 234", posto tra l'Isola del Deserto, a valle, ed il pennello esistente, a monte.

La Società CentroPadane ha curato la progettazione del nuovo attraversamento stradale e ha commissionato alla società Etatec l'esecuzione delle sperimentazioni su modello fisico necessarie per: la verifica delle interazioni tra l'alveo e le pile del nuovo ponte, la progettazione ed esecuzione delle opere di cantierizzazione, di difesa spondale e di fondazione, nonché per la verifica dell'ottimale abbassamento del pennello di navigazione in località Maginot.

Le verifiche sono state ritenute necessarie in sede di istruttoria tecnica del progetto condotta in modo congiunto con i competenti Uffici di AIPo, di Autorità di Bacino del Fiume Po (AdbPo) e con i tecnici della Società Autostrade CentroPadane.

La collaborazione tra l'Agenzia e la Società CentroPadane, regolamentata da apposito disciplinare oneroso per l'uso del laboratorio di modellistica idraulica, ha rappresentato il primo esempio, per l'Agenzia, di "conto terzi" ovvero di utilizzo delle proprie strutture e del proprio personale per attività di supporto esterno.

Il polo, infatti, ha fino ad oggi ospitato i modelli fisici di manufatti idraulici (casce di laminazione sui fiumi Parma (PR), Panaro (MO), Rio Torto e Chisola (TO) e opere di difesa del fiume Tanaro ad Alessandria) che interessano l'ambito di operatività dell'Agenzia.

La collaborazione tra AIPo, AdbPo e Società CentroPadane è tuttora in essere, in virtù della sottoscrizione di un protocollo d'intesa in data 22.05.13 finalizzato alla progettazione e realizzazione delle opere per il recupero morfologico degli ambiti fluviali retrostanti i quattro pennelli nel tratto del fiume Po compreso tra le progressive chilometriche 371 (nuovo ponte in progetto) e 377 (ponte A21 esistente), nonché per le attività di monitoraggio ambientale e morfologico.

1. INTRODUZIONE

Nel Laboratorio di Idraulica n. 2 del polo scientifico dell'Agenzia Interregionale per il fiume Po (AIPo) di Boretto (RE) tra marzo 2011 e luglio 2012 è stata effettuata, per conto della società Autostrade Centropadane S.p.a, una vasta indagine su modello fisico a fondo mobile del tratto di fiume Po interessato dalla realizzazione del nuovo viadotto facente parte del "Raccordo autostradale tra A21 con S.S. 10 - Padana Inferiore - e il nuovo casello di Castelvetro Piacentino - Completamento bretella autostradale tra S.S. 10 e S.S. 234".



Fig. 1 - Tracciato del nuovo viadotto in progetto a Castelvetro Piacentino

Il tratto del fiume Po interessato è compreso tra il canale di restituzione della centrale di Isola Serafini e il ponte ferroviario nei pressi della città di Cremona. Il nuovo viadotto attraversa tutto l'alveo del Po per una lunghezza complessiva tra i due argini maestri di circa 2.000 m, in posizione intermedia tra il pennello esistente in destra idraulica in località Maginot, a monte, e l'Isola del Deserto, a valle; è previsto con una campata principale, in corrispondenza dell'alveo inciso, a doppio arco sospeso di luce netta 200 m poggiante su due pile di grandi dimensioni, una delle quali interferente direttamente con l'alveo inciso e l'altra sul suo margine di sponda sinistra, e campate secondarie con luci variabili tra 50 m e 75 m poggianti su quartetti di pali-pile direttamente affondati sul fondo alveo (Fig. 2). Le dimensioni in pianta delle due pile principali, studiate con le due differenti soluzioni più oltre discusse, sono inscritte in un rettangolo di circa 80 m x 45 m (Fig. 3).

I principali obiettivi delle attività di modellazione hanno riguardato sia i fenomeni erosivi localizzati indotti dalle opere in alveo del nuovo viadotto, sia aspetti morfologici estesi e in particolare:

- l'analisi delle interazioni tra corrente di piena ed opere poste in alveo, in relazione ai fenomeni erosivi alla base delle stesse e ottimizzazione delle caratteristiche delle opere in alveo e delle opere di protezione;
- la caratterizzazione, lungo tutto il tratto d'alveo modellato, dei fenomeni evolutivi che si generano durante eventi formativi;
- l'analisi degli effetti morfologici conseguenti all'interazione

tra le pile del ponte in progetto e l'intervento di abbassamento del pennello in destra idraulica situato subito a monte del viadotto, previsto nel Programma di Gestione dei Sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po (di seguito PGS-Po). A supporto della modellazione fisica sono stati utilizzati i risultati dei precedenti studi idraulici realizzati nella fase di progettazione definitiva dell'opera, nell'ambito dei quali il tratto di fiume in questione è stato oggetto di modellazione bidimensionale a fondo fisso e mobile tramite il codice di calcolo SMS di ems-i. Partendo dai risultati di tali studi è stato possibile definire per vari regimi idrici le caratteristiche idrauliche del modello fisico (condizioni al contorno, campo di moto) tramite le quali sono state condotte sia la taratura che le prove sperimentali.

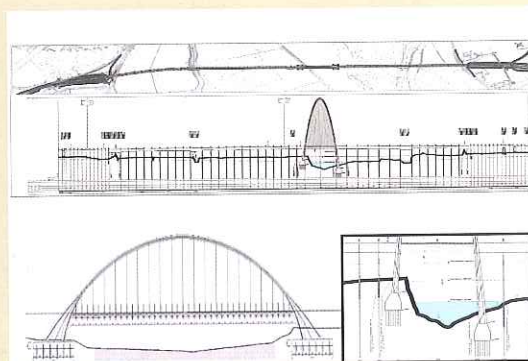
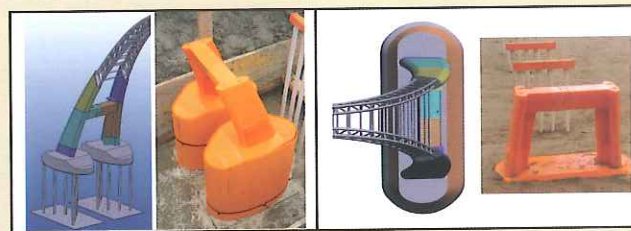


Fig. 2 - Particolari del nuovo viadotto sul fiume Po a Castelvetro Piacentino



Soluzione 1 di progetto

Soluzione 2 in variante

Fig. 3 - Le due soluzioni delle pile principali in alveo provate sul modello

2. MODELLO FISICO

2.1 Scala ed estensione

Con l'obiettivo di analizzare non solo gli effetti erosivi localizzati, ma anche più in generale la morfodinamica sedimentologica di un tratto significativo del Po, è risultato necessario l'impiego di un modello a fondo mobile in scala distorta nelle altezze. Dati i vincoli imposti dallo spazio disponibile nel Laboratorio AIPo e dalla massima portata dell'impianto idraulico di circolazione, il modello è stato realizzato in scala planimetrica 1:85 e altimetrica 1:50, tenendo conto anche della granulometria del

1 - Il rapporto completo dello studio su modello è riportato in Paoletti e Cella (2012).



sedimento prescelto. Il modello ha una larghezza massima di circa 19 m, corrispondente a circa 1.615 m in prototipo, e una lunghezza massima di circa 43 m, corrispondente a circa 3.655 m in prototipo. In Figura 4 è mostrato l'ingombro del modello insieme all'impronta delle strutture civili del Laboratorio AIPO.



Fig. 4 - Ingombro del modello (in blu) insieme all'impronta delle strutture fisiche del laboratorio AIPO (in rosso)

Tale scelta dei rapporti geometrici è derivata da un compromesso tra una scala adatta a contenere nel Laboratorio l'intero tubo di flusso della piena di riferimento Q200 PAI, pari nel tratto di interesse a $14.300 \text{ m}^3/\text{s}$, ed una scala idonea a rappresentare sia fenomeni localizzati in corrispondenza delle pile in alveo sia le forme di fondo lungo l'intero tratto da modellare, senza introdurre fattori di scala significativi e difficilmente gestibili nei riguardi dei sedimenti. Ne è conseguita la scelta dei rapporti prima citati che hanno comportato la limitazione dell'estensione del modello ad un tubo di flusso centrale di piena corrispondente a una corrente idrica di portata pari a $11.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Il tubo di flusso parziale, ma centrale e dominante, è stato ottenuto dai risultati del campo di moto calcolato con il modello 2D implementato nelle precedenti fasi della progettazione.

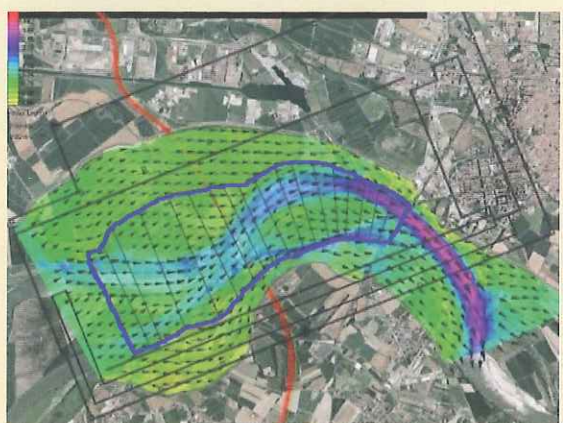


Fig. 5 - Tubo di flusso (11.000 mc/s) alla scala del modello fisico realizzato (in blu)

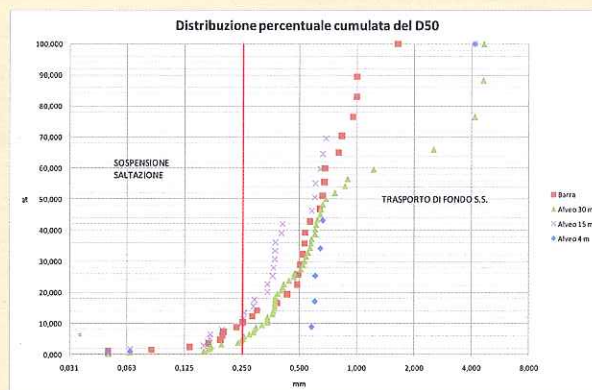


Fig. 6 - Sondaggi integrativi eseguiti in profondità (rosso) e superficialmente (blu)

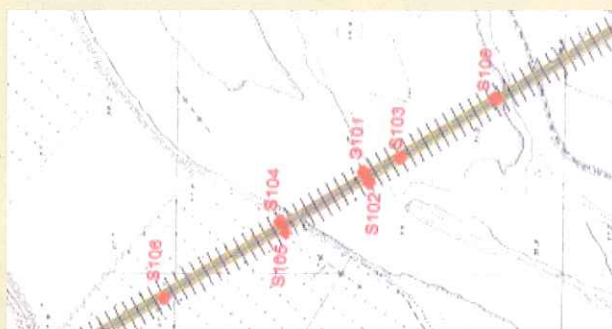


Fig. 7 - Distribuzione percentuale cumulata del D50

2.2 Granulometria dei sedimenti del Po e del modello

Lo studio è stato impostato a partire dall'analisi dei dati granulometrici già disponibili dal PGS-Po, successivamente integrati con nuove analisi granulometriche (8 sondaggi tra -15 m e -30 m e 3 prelievi superficiali per un totale di 90 campioni) appositamente eseguite per studiare il trend granulometrico delle barre e dell'alveo fino a profondità congrue alle problematiche sedimentologiche di esercizio delle nuove pile (Fig. 5) ed ottenere la relativa distribuzione percentuale cumulata del D50.

In sintesi l'alveo presenta una stratigrafia bi-granulare che, in scala reale, ha le seguenti caratteristiche: D50 pari a 0,6-0,7 mm dal fondo alveo fino alla profondità di -22 metri; D50 pari a 3-4 mm da -22 m a -30 m. Considerando che le escavazioni previste difficilmente possono superare i -22 m del primo strato e le difficoltà di una modellazione bi-granulare con materiale naturale, la modellazione dell'alveo è stata eseguita sulla base di un unico fuso granulometrico del prototipo (mm): $D_{100} = 1,8$; $D_{90} = 1,0$; $D_{75} = 0,8$; $D_{50} = 0,7$; $D_{25} = 0,5$; $D_{10} = 0,25$.

2.3 Progettazione e realizzazione

La geometria del modello è stata definita estrapolando n. 21 sezioni ad interasse di 2 m (170 m in prototipo) dal DTM utilizzato per l'implementazione del modello 2D di riferimento. Utilizzando tali sezioni il dominio è stato suddiviso nelle parti fluviali mobili in cui ospitare il sedimento, realizzate sagomando il fondo del laboratorio con solette in cls di differente spessore, e parti fluviali fisse, rappresentanti le golene e l'Isola del Deserto, interessate solo da eventi di piena importanti e ormai consolidate dalla vegetazione. Queste parti fisse sono state realizzate in cemento riproducendo la reale morfologia del prototipo.

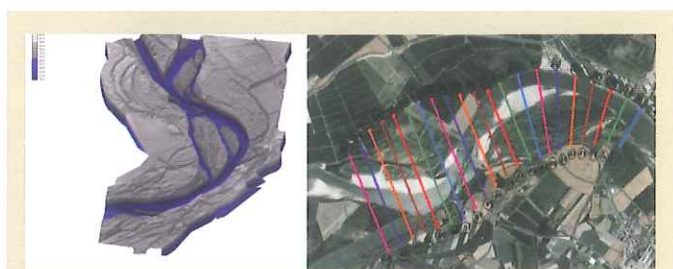


Fig. 8 - DTM dell'area interessata dalla modellazione fisica

2.4 Criteri di similitudine ed effetti scala

I risultati delle prove sono stati tradotti in prototipo seguendo il criterio di similitudine di Froude. Tale criterio è stato utilizzato per mantenere inalterato il campo di moto del prototipo e rappresentare correttamente la corrente idraulica in prossimità del ponte in progetto. Con i rapporti di scala $\lambda_o = 1:85$ scala geometrica planimetrica, $\lambda_v = 1:50$ scala geometrica verticale, le altre scale principali sono: scala delle velocità $\lambda_{vel} = 1:7,1$, scala delle portate $\lambda_Q = 1:30.052$, scala della scabrezza $\lambda_k = 1:0,52$, scala dei sedimenti $\lambda_d = 1: 29,41$. Peraltro, avendo come prima esposto il materiale d'alveo del fiume Po un D50 di 0,7 mm, con la suddetta scala di Froude dei sedimenti il D50 del modello sarebbe pari a 0,023 mm (argilla/limo) con conseguente introduzione nel modello di effetti coesivi non presenti nella realtà. Per ovviare a tutto ciò si è scelto di allontanarsi, sia pure in misura limitata, dalla scala di Froude scegliendo un materiale più grossolano con limite inferiore D10 pari a 0,06 mm, diametro mediano pari a 0,14 mm e distribuzione granulometrica proporzionale alla distribuzione di riferimento. Con tale maggiore granulometria si genera l'insorgere nel modello di alcuni effetti di scala che si riflettono soprattutto sulle condizioni di inizio del movimento e di risospensione, sulle forme di fondo generate, sulla concentrazione del materiale trasportato e, quindi, sulla scala sedimentologica. In questi casi, nella pratica modellistica fluviale si sceglie spesso di compensare tali effetti distorsivi con un aumento delle velocità nel modello rispetto a quelle scalate secondo Froude. Allo scopo di ben calibrare tali scelte, sono state eseguite alcune prove preliminari sul materiale prescelto per individuare l'entità dell'effetto di scala introdotto nel modello.



Fig. 9 - Modello con fondo mobile realizzato

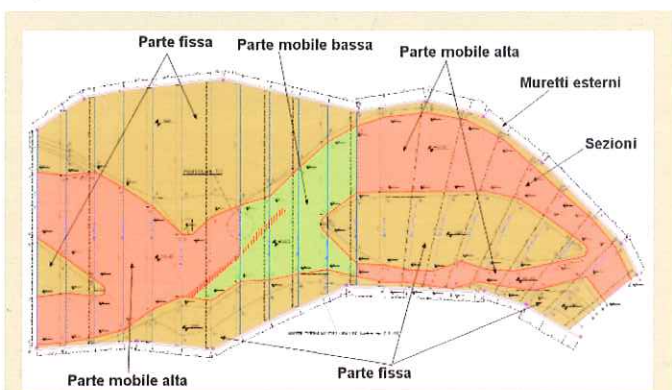


Fig. 10 - Planimetria delle parti fisse e mobili del modello fisico e sezioni di progetto

In particolare, in una serie di prove preliminari in canalina sono state caratterizzate le condizioni di inizio del movimento sul modello, in confronto con quelle del sedimento reale del Po.



Fig. 11 - Prove in canalina della sabbia prescelta

Successivamente, sul modello finito, ulteriori analisi sedimentologiche delle forme di fondo generate nei diversi regimi di portata hanno consentito di verificare compiutamente l'effetto di scala.

Le analisi svolte, riportate su grafici specifici come quelli delle Figure 12 e 13, hanno evidenziato che senza modificare la velocità secondo Froude, il materiale prescelto per il modello sviluppa un comportamento simile a quello del prototipo, mantenendosi nello stesso campo delle forme di fondo, pur introducendo un modesto effetto di scala, soprattutto nei riguardi delle valutazioni dell'incipiente movimento o della forma e dinamica di formazione degli scavi localizzati, ottenuti in gran parte durante i regimi medio bassi in cui l'effetto di scala è più sensibile.



Le forme di fondo che si generano nel modello sono di tipo ripples o dune, tipiche di questa tipologia di corso d'acqua, con lunghezza d'onda e altezza compatibili con il comportamento reale espresso dal prototipo.

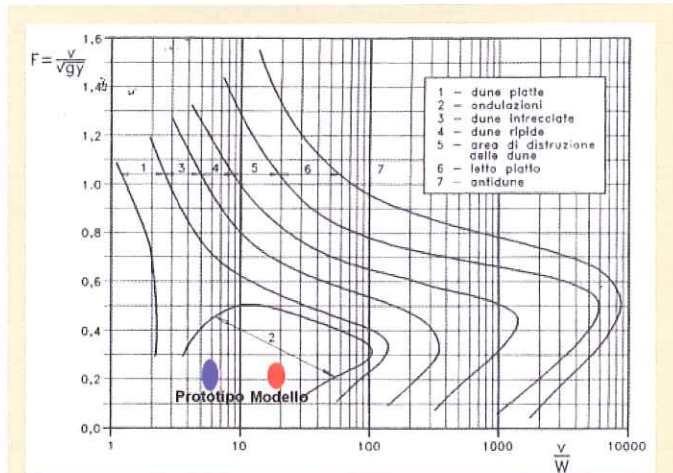


Fig. 12 - Campi di esistenza delle forme di fondo, in funzione del numero di Froude (Fr) e del rapporto tra battente idrico (y) e granulometria del materiale di fondo (d_{50}).

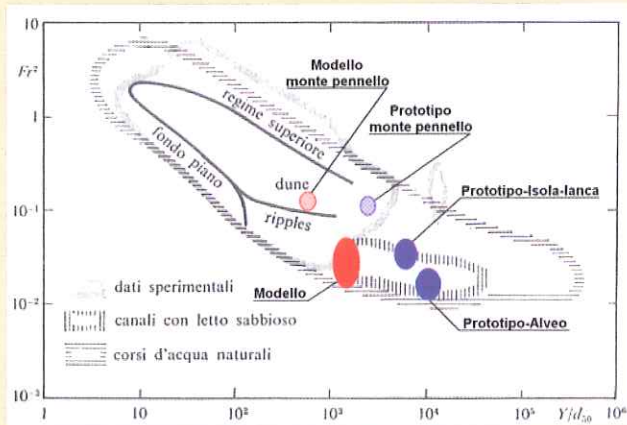


Fig. 13 - Diagramma di Znamenskaya per l'individuazione delle forme di fondo di un corso d'acqua (w = velocità di sedimentazione delle particelle; F = Froude; v = velocità idrica)

2.5 Trasporto solido

Il modello è stato anche equipaggiato con una spagliatrice-tramoggia di alimentazione della sabbia ubicata all'estremità di monte in corrispondenza dell'alveo principale del Po. Il sistema è stato tarato (velocità di rotazione, apertura tramoggia) per poter immettere nel modello la giusta portata di materiale necessario per riprodurre il trasporto solido del prototipo durante gli eventi di piena.

Come più oltre esposto, le prove sperimentali sono state condotte sia tenendo spenta la suddetta spagliatrice e quindi senza

alimentazione artificiale del sedimento (modalità di acque chiare), sia con la spagliatrice funzionante e quindi con alimentazione solida (modalità di torbida).

In realtà si è rilevato che, anche nel corso delle prove con spagliatrice spenta, il trasporto solido si attivava normalmente raggiungendo condizioni di regime se la portata di prova fosse tale da determinare azioni di trascinarsi maggiori di quella critica per l'inizio del movimento. In pratica, già per portate maggiori di circa $2.500 \text{ m}^3/\text{s}$, si generava il regime di corrente torbida con trasporto di fondo e formazione delle forme di fondo. In tali casi, essendo spenta la spagliatrice, l'alimentazione del trasporto solido avviene attraverso la progressiva erosione del tratto di monte di avviamento del modello che quindi funge da sorgente del trasporto solido, senza peraltro influenzare i fenomeni di trasporto solido nel successivo tratto fluviale di interesse (quello corrispondente al pennello e al ponte in progetto).

A riprova di ciò, in molti casi le prove condotte senza alimentazione solida sono state ripetute anche con l'alimentazione solida, allo scopo di verificare gli effetti dell'alimentazione stessa, che in effetti si è accertato avere un'influenza molto ridotta nel tratto di interesse sperimentale.

2.6 La riproduzione della scabrezza

Una volta regolate le condizioni di moto tali da rispettare, per ogni portata di prova, sia la condizione al contorno nota di valle rappresentata dalla scala di portata della sezione del Po a Cremona, sia la pendenza media del pelo libero, la taratura del modello è stata incentrata sulla progressiva variazione della scabrezza delle parti fisse del modello al fine di ottenere un campo di moto (velocità e livelli) corrispondente al campo di moto del prototipo e riprodotto nella fase di modellazione bidimensionale allegata al progetto definitivo dell'opera. In particolare, si è considerando che il modello comprende zone del Po, quali le aree golenali e l'isola, che oggi vengono interessate dalla corrente solo per portate maggiori di $8.000 \text{ m}^3/\text{s}$ e che, anche in dipendenza di ciò, sono caratterizzate da vegetazione stabile che certamente induce una scabrezza idraulica ben maggiore di quella relativa all'alveo inciso. Il modello è stato quindi caratterizzato da scabrezze differenziate in modo da riprodurre la diversa scabrezza delle diverse parti dell'alveo di piena, in particolare dell'alveo inciso mobile, e delle golene e dell'isola, nelle quali la scabrezza è stata ottenuta con l'incollaggio di tronchetti di legno a diversa concentrazione e alcuni strati di ghiaia grossolana ove necessario. Per la taratura si è fatto quindi riferimento alla piena Q_{200} e alla riproduzione del campo di moto delle velocità derivante dalla simulazione modellistica 2D allegata al progetto definitivo dell'opera. Quest'ultima era stata ottenuta con coefficienti di scabrezza di Strickler pari a $37 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, per l'alveo inciso, e $17 \div 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, per le golene e l'isola.

3. PROVE E RISULTATI

La sperimentazione ha riguardato diverse configurazioni, dallo stato attuale in assenza dell'opera in progetto sino alla realizzazione completa di tutte le opere in alveo, pile principali e quartetti pila, di sostegno del viadotto. Le prove hanno anche analizzato l'influenza dell'abbassamento del pennello a monte dell'Isola del Deserto, previsto nel PGS-Po, nonché l'impatto idraulico e morfologico delle opere provvisorie di cantiere.

In particolare sono state indagate le seguenti configurazioni:

- Stato attuale senza le opere in progetto;
- Cantiere n.1 pennello allo stato attuale, pista di cantiere e pozzo per la costruzione della pila principale in alveo;
- Cantiere n.2 pennello abbassato, pista di cantiere e pozzo per la costruzione della pila principale in alveo;
- Stato finale ad opera ultimata con pennello allo stato attuale;
- Stato finale ad opera ultimata con pennello abbassato;
- Stato finale ad opere ultimate con opere di protezione in alveo (rip-rap) delle strutture di sostegno.
- Stato finale ad opera ultimata con pennello abbassato e luce principale aumentata a 250 m.

Le prove, condotte in condizioni di alimentazione a regime permanente con acqua chiara ed in alcuni casi in condizioni di torbida, hanno riprodotto per step crescenti di portata (3.000 m³/s, 5.000 m³/s, 8.000 m³/s, Q200) la fase ascendente della piena di riferimento. Ogni step è stato mantenuto per una durata di 1 ora ad eccezione del colmo di piena che è stato mantenuto per 2 ore. Per approfondire aspetti specifici della modellazione (incipiente movimento, dinamiche di erosione), sono state eseguite anche prove con portate di 900 m³/s, 1.000 m³/s, 2.000 m³/s e 6.000 m³/s e prove a portata costante (1.000 m³/s; 5.000 m³/s) di lunga durata per 8 ore. Per ogni configurazione, al termine di ogni step di portata, sono state eseguite le operazioni di rilievo del fondo, confrontate poi con il medesimo fondo alveo di riferimento, riprodotto all'inizio di ogni prova in funzione delle caratteristiche attuali del prototipo. Durante le prove sono state effettuate osservazioni dirette della corrente e misure di velocità con misuratore elettromagnetico e di livello con sonde ad ultrasuoni, mentre al termine di ogni step di portata sono state effettuate misure della morfologia del fondo alveo con sonde laser installate sul sistema di posizionamento a controllo numerico.

3.1 Risultati ottenuti

Le indagini svolte hanno permesso di valutare gli effetti idraulici e morfologici indotti dalle opere in alveo del nuovo ponte e dall'intervento di abbassamento del pennello, posto a monte dell'isola del Deserto, previsto nel PGS-Po.

Erosione e sedimentazione nell'intorno delle pile del nuovo ponte

Le prove, effettuate in assenza di protezioni, hanno evidenziato erosioni alla base delle pile che, per alcune configurazioni, hanno raggiunto valori prossimi ai 15 m. Inoltre, le sperimenta-

zioni hanno evidenziato il differente comportamento delle due tipologie di fondazione sperimentate (doppio plinto trasversale; unico plinto longitudinale), permettendo di valutare i rispettivi effetti erosivi. Il confronto delle erosioni ha evidenziato i benefici indotti dalla fondazione con unico plinto: si ottengono, infatti, riduzioni dello scavo del 15% in lunghezza e del 50% in larghezza e riduzioni dell'angolo di inclinazioni delle erosioni, contribuendo a limitare le azioni erosive indotte lungo la sponda sinistra del Po.



Fig. 14 – Erosione localizzata soluzione con due plinti trasversali e unico plinto longitudinale



Fig. 15 - Confronto planimetrico buche di erosione per gli scenari sperimentati

Le protezioni in alveo (rip-rap) realizzate per il plinto principale e per il quartetto pila n.5 si sono rivelate efficaci nei confronti dei fenomeni erosivi. Infatti, le protezioni prescelte di diametro 0,80 m in prototipo (0,03 m in modello), estese attorno alle pile in funzione dell'ampiezza dei fenomeni erosivi riscontrati in assenza del rip-rap, sono rimaste sempre stabili in tutte le condizioni di prova.



Fig. 16 – Effetto del rip-rap per Q200 sulla fondazione principale e sul quartetto pila n.5



Effetti morfologici

Le sperimentazioni dello stato attuale confermano le principali indicazioni emerse nel PGS-Po, evidenziando fenomeni di deposito in alveo, localizzati soprattutto in prossimità dell'Isola del Deserto, la tendenza all'erosione lungo il tratto a valle dell'isola e lungo la sponda sinistra in froldo in prossimità di Cremona.

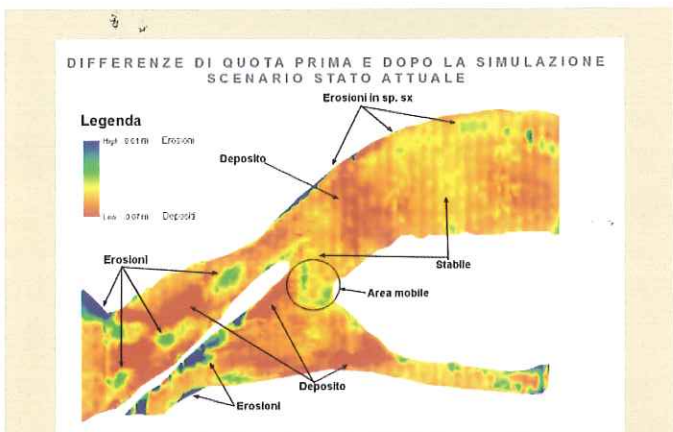


Fig. 17 - Differenze tra le quote di fondo misurate prima e dopo la prova riferita allo Stato Attuale

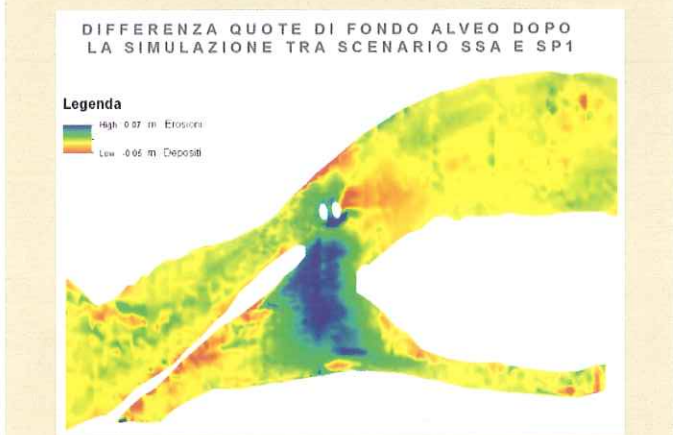


Fig. 18 - Differenza quote di fondo tra Stato Attuale (SSA) e scenario progetto 1 (SP1)

Le analisi hanno evidenziato che in generale, al di là dell'effetto localizzato prodotto dalle opere in alveo, il nuovo viadotto non induce significative variazioni nella dinamica evolutiva fluviale.



Fig. 19 - Forme di fondo generate al termine della prova riferita allo Stato Attuale

Effetti dovuti all'abbassamento del pennello a monte di Cremona

L'abbassamento del pennello posto a monte dell'opera è stato definito in modo conforme alle indicazioni del PGS-Po e alle indicazioni di AIPO. In particolare, ricordando che l'attuale pennello ha quota di sommità di circa 33 - 34 m s.m. ed inizia a sfiorare per portate di 3.000 m³/s in gaveta e 5.000 m³/s sulle ali laterali, la nuova quota di sfioro è stata fissata a 29,70 m s.m. per consentire lo sfioro di portate di circa 1.000 m³/s, in conformità alle risultanze del PGS-Po e alle esigenze di navigazione fissate da AIPO. L'abbassamento del pennello apporta i seguenti decisivi benefici: 1) migliore distribuzione delle portate in alveo e riattivazione della lanca già per portate di 1.000 m³/s (3.000 m³/s attuali); 2) minori azioni al fondo lungo l'alveo navigabile; 3) diminuzione delle erosioni localizzate; 4) regolarizzazione della corrente nell'intorno della struttura principale; 5) riduzione degli effetti morfologici indotti dal restringimento prodotto dalle opere provvisorie di cantiere. È emerso quindi come tale abbassamento sia di importanza basilare e prioritaria per tutto il tratto di Po indagato.

Opere di cantiere provvisorie

La fase di cantiere rappresenta una situazione critica per il deflusso delle portate, in quanto sono presenti le strutture della pista carrabile di cantiere che attraversa tutto l'alveo e dell'isola palancolata di realizzazione della fondazione della pila principale. La pista, realizzata in materiale sciolto, è prevista in rilevato con un'altezza variabile tra 1 m e 2,5 m dal fondo e sarà tracimabile per portate superiori a 2.000 m³/s. Il deflusso della corrente è facilitato dalla realizzazione di fornic lungo tutto lo sviluppo della pista. L'isola provvisoria di fondazione della pila principale avrà dimensioni di circa 115 m x 70 m e sarà in materiale sciolto di altezza tra 10 - 15 m, tracimabile per portate di 2 anni di tempo di ritorno. Le sperimentazioni sono state svolte con step successivi di portata crescente (900 m³/s, 2.000 m³/s, 3.000 m³/s, 6.000 m³/s, Q200) considerando il pennello sia allo stato attuale sia abbassato.



Fig. 20 - Opere provvisorie di cantiere

Le opere di cantiere non influiscono sensibilmente sul regime idrico del fiume, soprattutto per la portata Q200. L'isola di cantiere è risultata compatibile con la portata di progetto della stessa (T = 2 anni = 2.000 m³/s) così come la pista di cantiere. L'abbassamento del pennello riduce l'impatto della corrente sull'isola, sul tratto di raccordo tura-isola e la velocità idrica nell'alveo navigabile, lungo il restringimento causato dalla presenza dell'iso-

la provvisoria. I risultati ottenuti indicano che, sotto l'aspetto prettamente idraulico, l'assetto di cantiere proposto è compatibile in tutte le sue parti e che il suo impatto sulla morfodinamica dell'alveo nella durata del cantiere è più attenuato se si realizza prioritariamente l'abbassamento del pennello.



Fig. 21 – Fondo alveo al termine della sperimentazione delle opere di cantiere

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

Adami A. (1994) – I modelli fisici nell'idraulica, CLEUP Editore.

Autorità di Bacino del fiume Po, (2001) – "Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico del bacino del fiume Po".

Autorità di Bacino del Po, (2008) – Programma di Gestione dei Sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po.

Brath, A., Lamberti, A. e A. Montanari (1999) – Lo studio dei fenomeni fluviali mediante modelli fisici, in Maione, U. e A. Brath (eds.) "L'ingegneria naturalistica nella sistemazione dei corsi d'acqua", Atti del Corso di aggiornamento, Milano, 5-9 ottobre 1998, pp. 167-210, Editoriale Bios.

Brath A., Montanari A. (2000) – Vulnerabilità idraulica dei ponti, L'Acqua, Volume 3.

Breusers H.N.C., Raudkivi A.J. (1991) – Scouring, IAHR Hydraulic Structures Design Manual, A.A. Balkema ed. Amsterdam.

Dargahi Bijan, (1982) – "Local Scour At Bridge Piers", Royal Institute of Technology Stockholm Sweden, Stockholm.

FHWA (1995) – Evaluating Scour at Bridge. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA : Hydraulic Engineering, Circular No. 18, Publication No. FHWA-IP-90-017, November.

Fiorotto, V., e R. Cividin (1996) – Sulle caratteristiche del flusso in corrispondenza di un pennello. L'acqua, vol. 3, pp. 7-19.

Franzetti S., Malavasi S., Piccinin C. (1994) – Sull'erosione alla base delle pile di ponte in acque chiare, Atti del XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Volume II, Napoli, pp. 13-24.

Florida Department Of Transportation – Bridge Scour Manual, 2005.

Guerrero M., Lamberti A. (2004) – Modelli a fondo mobile nella progettazione di grandi opera fluviali, Rivista L'ACQUA n.3/2004.

Lamberti, A., (2001) – "Studio dell'abbassamento dell'alveo del fiume Po: previsioni trentennali dell'abbassamento a Cremona" Aggiornamento 1993-2000. Regione Lombardia – Azienda Regionale per i porti di Cremona e Mantova. Bologna, Ottobre 2001.

May, Ackers, Kirby (2002) – Manual on scour at bridges and other hydraulic structures, CIRIA, London.

Melville B.W. (1997) – Pier and abutment scour: integrated approach, J. of Hydraulic Engineering, Volume 123, n° 2.

Novak P., Cabelka J. (1981) – Models in Hydraulic Engineering. Physical Principles and Design Application, Pitman Publishing Program.

Paoletti A., Cella O., (2012) – Relazione Tecnica della "Modellazione fisica del tratto di fiume Po compreso tra il canale di Isola Serafini ed il Ponte stradale di Cremona" – ETATEC S.r.l. – Milano, Marzo 2011 – Luglio 2012.

Richardson E.V., Davis S.R. (1995) – Evaluating scour at bridges, 3rd edition, Hydraulic Engineering Circular HEC 18, Federal Highway Administration, Washington, USA.

SAFE Infrastrutture (2007) – "Il Po dall'emergenza alla pianificazione", Atti della II giornata di lavoro, notiziario dell'Autorità di Bacino del fiume Po – Serie speciale Allegato 1 al n.8.