

LA SICUREZZA IDRAULICA DEGLI ATTRAVERSAMENTI FLUVIALI

Prof. Ing. Armando Brath

Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Bologna

Membro del Comitato Tecnico dell'Autorità di Bacino del Fiume Po

1. Introduzione

I manufatti di attraversamento fluviale sono oggi oggetto di particolare attenzione da parte delle istituzioni preposte al governo idraulico del territorio, a seguito del verificarsi nel recente passato di svariati eventi alluvionali sia in Italia che all'estero, in occasione dei quali essi hanno evidenziato un livello di vulnerabilità spesso preoccupante, testimoniato dagli innumerevoli danneggiamenti e crolli.

Anche prescindendo dai problemi di collasso o danneggiamento del ponte per effetti erosivi di varia natura, l'analisi di diversi eventi alluvionali più o meno recenti ha evidenziato come la presenza di un attraversamento sottodimensionato possa indurre conseguenze rilevanti sulla morfologia dell'alveo fluviale, sulle caratteristiche idrauliche della corrente e persino sullo stesso regime delle portate di piena nel corso dell'evento. Non sono infrequenti, infatti, i casi di migrazioni laterali d'alveo indotti dalle infrastrutture del ponte, in particolare dei rilevati di accesso, di riduzione della capacità di deflusso e conseguente rialzo dei livelli del pelo libero di monte, e di formazione di invasi temporanei a monte del manufatto di attraversamento favoriti dalla parziale ostruzione delle luci del ponte ad opera di detriti lapidei e vegetali trasportati dalla corrente. La formazione di tali invasi temporanei può avere conseguenze particolarmente rilevanti, poiché da un lato può provocare un sensibile rialzamento dei livelli a monte e conseguente sormonto dell'impalcato, dall'altro l'insorgenza di sollecitazioni anomale sia sulle pile dei ponti che soprattutto sull'impalcato, usualmente non previste negli schemi di calcolo statico degli stessi. Ciò può portare al collasso del ponte, fenomeno che si sviluppa usualmente in tempi piuttosto brevi; si verifica così lo svasso rapido del volume idrico accumulato a monte, che si traduce in un incremento anche notevole delle portate di piena a valle rispetto alla situazione di alveo indisturbato.

Le conseguenze, potenzialmente calamitose, dell'insufficienza idraulica dei ponti pongono la valutazione della loro vulnerabilità fra le esigenze primarie degli Enti preposti alla pianificazione ed alla tutela della sicurezza idraulica del territorio. Detta necessità è oggi sempre più pressante, poiché molti attraversamenti fluviali esistenti, a servizio anche di arterie di comunicazione di grande importanza, sono stati progettati in tempi nei quali la comprensione dei processi idraulici coinvolti era più frammentaria rispetto all'attuale; detti attraversamenti risultano di conseguenza dimensionati con margini di sicurezza che, alla luce delle conoscenze odierne, appaiono estremamente ridotti.

La Federal Highway Administration, ad esempio, analizzando una serie di ponti fluviali realizzati prima del 1985 negli Stati Uniti, ha riconosciuto che l'effetto degli scavi ad opera della corrente sulle fondazioni dei manufatti non è stato adeguatamente considerato nella progettazione in gran parte dei casi. Dei circa 580.000 ponti censiti, 18.000 (pari al 3%) si trovavano in condizioni di acclarata criticità, mentre per circa 100.000 di essi (pari al 17% circa) non risultava possibile rinvenire informazioni sul tipo di fondazioni utilizzato in alveo (FHWA, 1988; Parola et al., 1997).

Un'indagine dello stesso tipo, in riferimento alla realtà italiana, è stata recentemente condotta da Ballio et al. (1998), prendendo in considerazione un campione di circa 400 ponti investiti da 8 distinti eventi alluvionali dell'ultimo decennio. Nel campione esaminato, il rapporto tra il numero dei ponti crollati (o gravemente danneggiati) ed il numero totale dei ponti esistenti sui tratti fluviali in cui si sono verificati danni ai ponti è risultato pari a circa il 30%; ovviamente tale numero, che appare molto elevato, risente del criterio di scelta degli eventi alluvionali, che ha portato ad selezionare quelli più intensi verificatisi. Le tipologie di danno primario ai ponti riscontrate in detta indagine sono riassunte nel grafico riportato nella Figura 1 (a sx), che riporta anche l'indicazione della relativa frequenza di accadimento; esse possono essere divise nelle seguenti classi principali: (a) cedimento delle pile o delle spalle del ponte a causa di erosione alla base delle relative fondazioni; (b) lesione o distruzione dell'impalcato; (c) crollo totale o parziale del rilevato di accesso. Le cause di danneggiamento primario sono invece mostrate nel grafico riportato in Figura 1 (a dx); è interessante notare che, al contrario di quanto osservato negli Stati Uniti, l'erosione, pur rimanendo una delle maggiori cause di vulnerabilità degli attraversamenti considerati, in quanto responsabile del 26% dei danneggiamenti compresi nel campione a disposizione, non risulta la causa principale, essendo invece leggermente predominanti i casi di lesioni provocate dalla spinta idrodinamica della corrente. E' anche interessante osservare che la parte del manufatto più spesso danneggiata è il rilevato di accesso, che è soggetto a danneggiamento con maggior frequenza (41% dei casi) rispetto a pile e spalle dei ponti (26% dei casi), mentre è rilevante anche il numero dei casi che riguardano l'impalcato (19%). Tale peculiare comportamento potrebbe, almeno in prima istanza, essere spiegabile da un lato in base ad una maggiore frequenza nel nostro Paese di rilevati di accesso ai ponti ubicati nelle zone golenali dell'alveo, che potrebbe giustificare la maggiore frequenza dei danni ai rilevati stessi, dall'altro agli effetti della vegetazione fluitata dalla corrente in precedenza ricordati che potrebbero giustificare la frequenza piuttosto elevata di danni agli impalcati delle strutture di attraversamento.



Figura 1 – Elementi strutturali dei manufatti di attraversamento danneggiati a seguito di eventi alluvionali (a sx) e cause di danno primario subito dai ponti (a dx). Dati desunti da Ballio et al. (1998).

In ogni caso i risultati delle predette indagini, al pari di quelli ottenuti in altri paesi, invitano a porre la giusta enfasi sul problema dell'analisi della sicurezza idraulica degli attraversamenti fluviali, confermando un livello di vulnerabilità dei manufatti esistenti sul territorio molto elevato ed invero piuttosto preoccupante.

La presente nota intende fornire un contributo in tal senso, fornendo un inquadramento di alcuni dei principali aspetti della vulnerabilità idraulica degli attraversamenti fluviali. A tale scopo vengono innanzitutto affrontati i temi della dinamica dei fenomeni erosivi alla base delle strutture in alveo dei ponti, evidenziando i metodi di previsione disponibili per la valutazione quantitativa delle profondità di scavo. Viene poi evidenziato il ruolo della modellistica fisica, che costituisce un supporto di grande utilità per la previsione degli effetti erosivi soprattutto in situazioni caratterizzate da geometria complessa. Successivamente si pone l'attenzione sui principali riferimenti normativi esistenti nel nostro Paese per la progettazione e la verifica della sicurezza degli attraversamenti fluviali, con particolare riguardo alle norme recentemente emanate dall'Autorità di Bacino del Fiume Po. Infine, si fornisce documentazione sulle procedure di valutazione speditiva della vulnerabilità degli attraversamenti fluviali esistenti, con una discussione sulle loro potenzialità di utilizzo e sulla possibilità di applicarle alla realtà nazionale. Visto il numero molto elevato dei ponti esistenti potenzialmente soggetti a rischio, che rende di fatto impossibile la realizzazione di una diagnosi approfondita delle condizioni di vulnerabilità di ciascuno di essi, tali procedure speditive si configurano come uno strumento di indagine preliminare che consente di operare su vasta scala spaziale, identificando gli attraversamenti a maggior rischio apparente, su cui concentrare successivamente i monitoraggi e le analisi di dettaglio.

2. La previsione dell'erosione alla base delle pile e delle spalle dei ponti

2.1. Concetti di base

L'erosione è il risultato dell'azione della corrente fluviale, che mobilita e trasporta i sedimenti d'alveo. I materiali sciolti sono più facilmente erodibili in tempi brevi di quelli coesivi, sebbene le profondità di scavo raggiunte all'equilibrio siano scarsamente dipendenti dalla coesione medesima. L'entità dell'erosione, inoltre, dipende strettamente dal trasporto solido del corso d'acqua. La stima della profondità massima potenzialmente raggiungibile dallo scavo è resa complessa dalla natura ciclica del fenomeno. Le escavazioni, infatti, generalmente raggiungono le profondità maggiori durante gli eventi alluvionali, in particolare al momento del transito del picco di portata, per poi essere parzialmente o totalmente riempite nella fase di esaurimento dell'idrogramma di piena. Ciò fa sì che una corretta valutazione dell'entità massima dello scavo possa difficilmente essere ottenuta con osservazioni compiute al termine dell'evento, che portano per i motivi anzidetti a sottostimare l'entità del fenomeno.

Il fenomeno dell'erosione alla base delle pile dei ponti è generalmente costituito dalla sovrapposizione di tre processi, che vengono solitamente stimati indipendentemente per poi sommarne gli effetti. Detti processi sono (a) l'abbassamento dell'alveo in prossimità del ponte, per variazioni globali del profilo del corso d'acqua indipendenti dalla presenza del ponte medesimo (general scour o erosione generalizzata); (b) l'erosione (localizzata) in corrispondenza della sezione ristretta del ponte, causata dall'aumento locale della velocità della corrente indotto dal restringimento dovuto alla presenza dell'attraversamento (contraction scour); (c) l'erosione localizzata alla base delle pile e delle spalle del ponte, causata dalle deviazioni del flusso idrico indotte dalla presenza delle strutture in alveo, che causano aumenti locali della velocità della corrente (local scour). La Figura 2 mostra esempi emblematici di cedimento di una pila di ponte in alveo dovuta ad un fenomeno di erosione localizzata al piede della stessa.

La profondità totale di scavo è variabile nel tempo, sia a breve che a lungo termine. Una descrizione accurata del fenomeno non potrebbe quindi prescindere dalla definizione dell'evoluzione temporale dei diversi processi di erosione. Tuttavia, le conoscenze di letteratura al riguardo di fenomeni erosivi conseguenti a portate liquide e solide non stazionarie sono estremamente frammentarie. Spesso, quindi, ci si limita a descrivere, in prima approssimazione, i livelli di erosione corrispondenti agli stati finali di equilibrio. Tale procedura può però indurre significative sovrastime dell'effettiva entità dei fenomeni erosivi, qualora i tempi caratteristici di sviluppo di questi ultimi siano sensibilmente maggiori di quelli tipici degli eventi di piena più ricorrenti.



Figura 2 – Esempi di crolli di attraversamenti dovuti fenomeni di erosione localizzata alla base di una pila.

Nel seguito vengono brevemente descritti i fenomeni (a), (b) e (c) precedentemente richiamati, con l'obiettivo di porre in luce le principali variabili dalle quali essi dipendono. Tali variabili e la natura di detta dipendenza verranno brevemente sintetizzati nel paragrafo 2.5.

2.2. Fenomeni di erosione generalizzata

Il fenomeno di erosione generalizzata (general scour), ove presente, è un fenomeno di abbassamento del fondo alveo che si manifesta indipendentemente dalla presenza del manufatto di attraversamento. Esso è documentato a titolo di esempio nella Figura 3.



Figura 3 – Esempio di abbassamento d'alveo per erosione generalizzata. Ponte sul Fiume Po a Boretto.

Il calcolo dell'eventuale abbassamento d'alveo è indispensabile al fine di definire la quota che il fondo alveo assumerebbe in assenza del manufatto, che viene assunta quale quota di riferimento per calcolare l'entità dei fenomeni di erosione localizzata e per scavo di contrazione, questi ultimi, riconducibili alla presenza in alveo del manufatto. Detta quota può variare nel tempo sia per evoluzioni temporali di periodo medio-lungo sia per evoluzioni di periodo più breve, spesso limitato alla durata di un unico evento di piena. L'evoluzione temporale del fenomeno deve in ogni caso essere determinata sulla base di accurate valutazioni idrologiche e idrauliche, queste ultime riferite ad un tratto d'alveo adeguatamente esteso a monte e a valle dell'opera considerata.

La tendenza del fondo alveo ad essere soggetto ad abbassamenti globali può essere desunta da osservazioni dirette, compiute in condizioni di magra. In particolare, è significativa la posizione altimetrica del fondo alveo nei confronti di opere non interferenti con l'attraversamento fluviale e poste a sufficiente distanza da quest'ultimo; ad esempio, la presenza di fondazioni scoperte di opere radenti di difesa spondale è sintomatica di una significativa tendenza all'abbassamento del tronco d'alveo esaminato.

La valutazione in prossimità dell'attraversamento della quota del fondo alveo non è semplice, poiché quest'ultima è influenzata dai fenomeni erosivi locali che verranno descritti nei paragrafi successivi. Il livello del pelo libero della corrente in condizioni di magra, qualora il tirante sia trascurabile, può essere un efficace indicatore per risalire alla posizione della quota del fondo a monte e a valle dell'opera, poiché tende a livellare gli effetti dell'erosione locale in corrispondenza dell'attraversamento.

2.3. Fenomeni di erosione localizzata per riduzione di sezione

L'erosione per riduzione di sezione (o scavo di contrazione), come già ricordato in precedenza, è una particolare forma di erosione localizzata (in quanto limitata ad un breve tratto d'alveo immediatamente adiacente al ponte) dovuta al restringimento, operato dall'attraversamento, della sezione trasversale indisturbata caratteristica dell'alveo; esso

ingenera un'accelerazione locale della corrente che può dar luogo a fenomeni di scavo del letto dell'alveo, le cui scale temporali caratteristiche sono in genere quelle degli eventi alluvionali. Per la valutazione di tale erosione sono stati effettuati studi di entrambe le situazioni corrispondenti ad assenza e a presenza di trasporto solido da parte della corrente. In letteratura sono reperibili numerose formulazioni basate sia su esperienze di laboratorio che sull'interpretazione empirica delle osservazioni di campo disponibili (Laursen, 1960 e 1963; Breusers e Raudkivi, 1991).

Le formulazioni proposte, tuttavia, sono in gran parte simili alla relazione introdotta da Straub (1934), probabilmente la prima formula comparsa in letteratura per la valutazione del fenomeno. Per tale motivo, i seguenti cenni illustrativi si limiteranno ad illustrare solo detta equazione, ottenibile combinando l'equazione di Manning, che permette di calcolare la resistenza al moto negli alvei fluviali, con la relazione di Du Boys per il calcolo del trasporto solido di fondo. L'equazione di Straub (1934) fa riferimento a condizioni di equilibrio e si scrive come

$$\frac{h_r}{h_m} = \left(\frac{B}{b}\right)^{6/7} \left[\frac{\tau_c}{2\tau_m} + \sqrt{\left(\frac{\tau_c}{2\tau_m}\right)^2 + \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_m}\right)\frac{B}{b}} \right]^{-3/7} \quad (1)$$

dove h_m e h_r sono le altezze d'acqua, rispettivamente, nella sezione indisturbata ed in quella ristretta, τ_c è l'azione tangenziale media esercitata dalla corrente sull'alveo in condizioni di moto incipiente del materiale di fondo alveo, τ_m è la medesima azione tangenziale in corrispondenza della sezione indisturbata mentre B e b sono le larghezze del pelo libero nelle sezioni d'alveo, rispettivamente, indisturbata e ristretta. In condizioni di moto incipiente e quindi di assenza di trasporto solido, identificate dall'eguaglianza $\tau_m = \tau_c$, la (1) diviene

$$\frac{h_r}{h_m} = \left(\frac{B}{b}\right)^{6/7} \quad (2)$$

Una volta stimato h_r , la profondità dello scavo di contrazione e_c può essere ricavata mediante la relazione

$$e_c = h_r - h_0 \quad (3)$$

dove h_0 è il tirante idrico in corrispondenza del restringimento prima dell'inizio del processo di erosione.

2.4. Fenomeni di erosione localizzata in corrispondenza di pile e spalle del ponte

L'erosione localizzata alla base delle pile o delle spalle è, come visto, una delle cause più frequenti di crollo o danneggiamento dei manufatti di attraversamento fluviale. La causa principale dell'erosione localizzata in corrispondenza delle pile è la formazione di vortici alla loro base, che sono comunemente detti "vortici a ferro di cavallo". Come evidenziato nella Figura 4, essi sono causati dall'arresto della corrente idrica sulla superficie di monte della pila, che, a causa del gradiente delle pressioni di ristagno che si instaura lungo la verticale, provoca un flusso in direzione della base della pila stessa, dove si sviluppano vortici tali da provocare la rimozione del materiale d'alveo (cfr. Breusers e Raudkivi, 1991). Al crescere della profondità dello scavo, l'energia del vortice tende a diminuire, sicché l'escavazione tende a raggiungere una profondità di equilibrio. Oltre al vortice a ferro di cavallo, a valle della pila si formano vortici ad asse verticale (rappresentati anch'essi nella Figura 4 a destra o schematicamente in pianta nella Figura 6), che pure contribuiscono alla rimozione dei sedimenti d'alveo; tuttavia, l'intensità di questi ultimi vortici diminuisce rapidamente al crescere della distanza dalla pila, sicché spesso, immediatamente a valle del ponte, si ha la deposizione del materiale asportato.

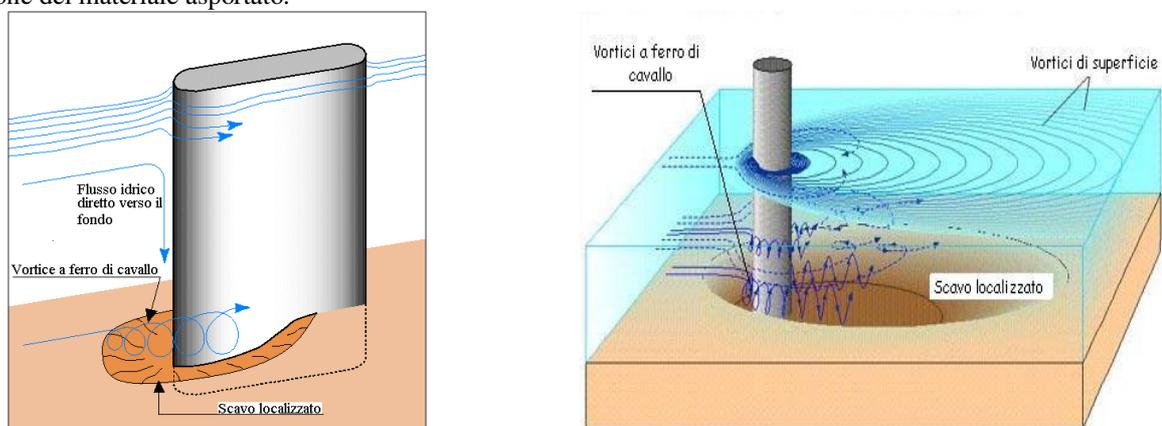


Figura 4 – Rappresentazione schematica del campo di moto e del processo di escavazione localizzata in corrispondenza di una pila di ponte.

L'altezza di scavo raggiungibile in condizioni di assenza di trasporto solido (clear-water scour) è superiore alla corrispondente in presenza di trasporto (live bed scour, cfr. Figura 5). E' interessante notare che, qualora si sia in presenza di trasporto solido, l'altezza di scavo attorno alla base della pila, dopo una fase iniziale di crescita, oscilla attorno alla configurazione di equilibrio per effetto del continuo succedersi di fasi di parziale riempimento e successivo approfondimento dello scavo (vedi Figura 5). Indicativamente, si può ritenere che la massima altezza di scavo sia superiore in percentuale pari a circa il 10% rispetto all'altezza raggiunta all'equilibrio (Richardson e Davis, 1995).

I principali fattori che influenzano il processo di erosione alla base delle pile sono la velocità e la profondità della corrente, la larghezza della pila e la sua forma, la lunghezza della pila e l'angolo d'attacco della corrente, la natura del materiale d'alveo e l'eventuale presenza di detriti trasportati dalla corrente. Questi ultimi possono in particolare creare effetti indesiderati, ampliando la zona di influenza dei vortici precedentemente descritti, contribuendo così ad amplificare lo scavo ed aumentare la superficie dell'alveo esposta allo scavo stesso (si veda, a tale proposito, la Figura 6). Vanno inoltre considerati con attenzione i fenomeni di evoluzione morfologica del letto del fiume; ad esempio le migrazioni laterale di un alveo meandriforme possono indurre variazioni dell'angolo d'attacco della corrente nei confronti dei manufatti in alveo, con conseguente cambiamento dell'entità dei fenomeni di escavazione.

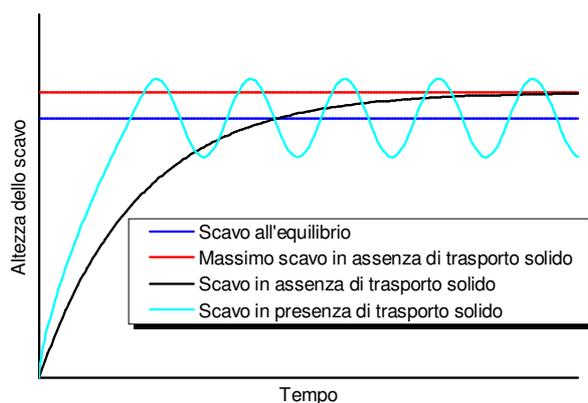


Figura 5 – Evoluzione temporale dell'escavazione alla base delle pile dei ponti, in condizioni di presenza e assenza di trasporto solido.

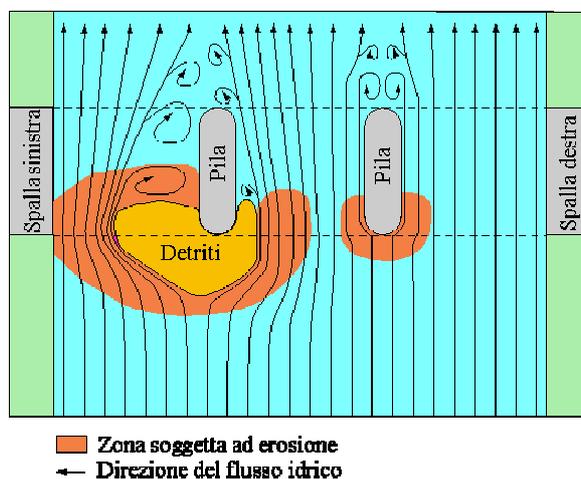


Figura 6 – Effetto della presenza di detriti sull'erosione localizzata alla base delle pile dei ponti.

Sono molto numerose le formule per il calcolo della profondità dello scavo localizzato proposte, alcune anche recentemente, nella letteratura scientifica internazionale, a seguito di diverse sperimentazioni effettuate in laboratorio in riferimento sia alla condizione di equilibrio sia all'evoluzione nel tempo del fenomeno (si veda, ad esempio, Franzetti et al., 1994; Melville, 1997). Esse sono generalmente riferite a situazioni corrispondenti a materiale d'alveo privo di coesione. Nel seguito verranno riassunte alcune di queste formulazioni, limitandosi per brevità a quelle che forniscono la profondità di scavo all'equilibrio.

Negli Stati Uniti l'erosione alla base di pile di ponte è comunemente calcolata utilizzando un'equazione proposta dalla Colorado State University (Richardson e Davis, 1995), denominata formula CSU, espressa dalla relazione:

$$e_l = 2k_p k_\theta k_f k_c \left(\frac{a}{h_m} \right)^{0.65} h_m F_m^{0.43} \quad (4)$$

nella quale a è la larghezza della pila, h_m e F_m sono rispettivamente il tirante idrico e il numero di Froude della corrente immediatamente a monte della pila stessa e k_p , k_f , k_θ e k_c sono fattori correttivi che tengono conto, rispettivamente, della geometria delle pile, della forma del fondo alveo, dell'angolo di incidenza della corrente e dell'effetto dell'eventuale corazzamento.

Un'equazione molto usata per il calcolo dell'erosione alla base di pile è quella di Melville e Sutherland (1988):

$$e_l = k_p k_\theta k_v k_d k_h a \quad (5)$$

dove k_v , k_d , e k_h sono fattori correttivi valutabili in funzione, rispettivamente, del rapporto fra la velocità media della corrente e quella che produce le condizioni di equilibrio limite del materiale d'alveo, delle caratteristiche della curva granulometrica del materiale d'alveo e dell'altezza d'acqua della corrente a monte dell'attraversamento.

Le formule proposte in letteratura per il calcolo dell'erosione in corrispondenza delle basi delle spalle del ponte risultano meno numerose di quelle elaborate in riferimento alle pile. Un breve riassunto delle formule più utilizzate è riportato in Fiorentino et al. (1999).

Merita di essere menzionato che le formulazioni disponibili in letteratura forniscono risultati spesso sensibilmente discordanti fra loro, sicché una valutazione cautelativa deve necessariamente essere basata sull'applicazione congiunta di diverse metodologie e sul successivo confronto critico dei risultati ottenuti. La notevole variabilità delle altezze di scavo fornite da alcune fra le formule proposte dalla letteratura, comprese quelle in precedenza descritte, è evidenziata nella Figura 7, la quale, per un assegnato valore del numero di Froude, visualizza i valori, forniti da diverse formule, della profondità di scavo in funzione dell'altezza idrica, entrambe adimensionalizzate rispetto alla larghezza della pila.

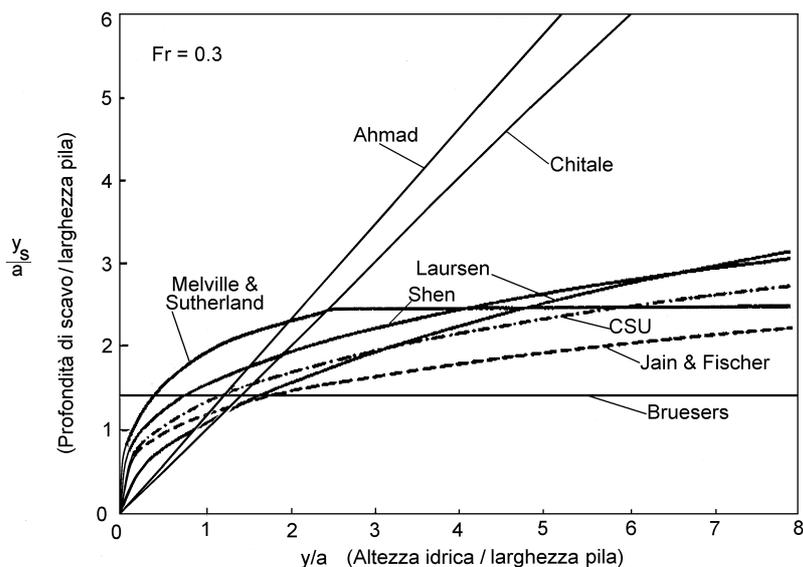


Figura 7 – Confronto tra i valori della profondità di scavo di equilibrio alla base di una pila di geometria assegnata ricavati dall'applicazione di alcune delle formule di letteratura, per numero di Froude $Fr=0.3$.

Va poi rilevato che permangono non poche incertezze sulla capacità di dette relazioni, dedotte essenzialmente in base a dati di laboratorio su modelli in scala ridotta, di interpretare adeguatamente dati di campagna (v. ad es. Landers et al., 1994; Johnson, 1995). Vanno infine ricordate le incertezze che scaturiscono dalla caratterizzazione della granulometria dei sedimenti d'alveo, operazione che si complica per gli effetti conseguenti al corazzamento. Tale fenomeno è, come noto, dovuto alla differente mobilità dei sedimenti di diverso diametro; al prolungarsi nel tempo dell'azione erosiva esercitata dalla corrente, si verifica un progressivo impoverimento del contenuto di materiale fine nello strato più superficiale dell'alveo, che dopo un certo tempo viene così ad essere costituito dal solo materiale più grosso, in grado di fronteggiare l'azione di trascinarsi esercitata dalla corrente. Lo strato superficiale viene così a costituire una sorta di corazza protettiva per gli strati di sedimenti sottostanti. Ne discende che, nella scelta di indicatori della granulometria dei sedimenti d'alveo, il riferirsi allo strato superficiale potrebbe portare a sottostimare il livello di vulnerabilità all'escavazione della struttura. Infatti, l'asportazione dello strato superficiale corazzato, a seguito del verificarsi di portate liquide che determinino il superamento della soglia di mobilità del materiale che lo costituisce, determina la messa a nudo di uno strato sottostante maggiormente dilavabile. Di conseguenza, in una tale eventualità, sono da attendersi effetti erosivi anche molto pronunciati.

3. Il ruolo della modellistica fisica

Le formule empiriche in precedenza menzionate sono state generalmente ricavate sviluppando esperienze di laboratorio riferite a configurazioni idrauliche e geometriche semplificate, anche per esigenze di generalità di rappresentazione. I risultati della loro applicazione possono di conseguenza risultare anche largamente approssimati quando nella realtà siano presenti condizioni sensibilmente diverse da quelle per cui sono state dedotte, ad esempio nel caso di geometrie complesse o di più manufatti in successione interferenti con la corrente. Recenti esperienze hanno evidenziato ad esempio come, nel caso di due pile poste in rapida successione, il fenomeno di escavazione si evolva con modalità profondamente diverse rispetto al caso di un'unica pila isolata, in dipendenza dalla posizione reciproca delle pile e dall'angolo di attacco della corrente. Tali differenze giocano un ruolo rilevante anche per le ricadute progettuali, come mostrato dal fatto che lo scavo che si manifesta immediatamente a monte della prima pila può, per talune configurazioni geometriche, risultare sensibilmente maggiore rispetto al caso di pila isolata.

Per configurazioni particolari, quali quelle che si verificano appunto nel caso di più manufatti in alveo posti in rapida successione, una valutazione più realistica dei fenomeni di scavo ad opera della corrente può richiedere la realizzazione di un modello fisico in scala ridotta, in grado di riprodurre in laboratorio le singolarità presenti nel campo di moto, come peraltro suggerito dalle "Istruzioni relative alla normativa tecnica dei ponti stradali" emanate dal Ministero dei Lavori Pubblici. La trattazione dei problemi connessi alla modellistica fisica esula dalle finalità della presente breve nota; si rimanda il lettore interessato a Brath et al. (1999).

In proposito, a titolo esemplificativo, possono citarsi le esperienze su modello a fondo mobile recentemente condotte presso il Laboratorio di Ingegneria Idraulica (già Laboratorio di Costruzioni Idrauliche) della Facoltà di Ingegneria Università di Bologna, al fine di valutare la vulnerabilità idraulica dell'attraversamento in progetto del Fiume Reno in prossimità di Sasso Marconi, a servizio della Variante di Valico dell'autostrada A1 Milano-Napoli, per conto della Spea Ingegneria Europea SpA.

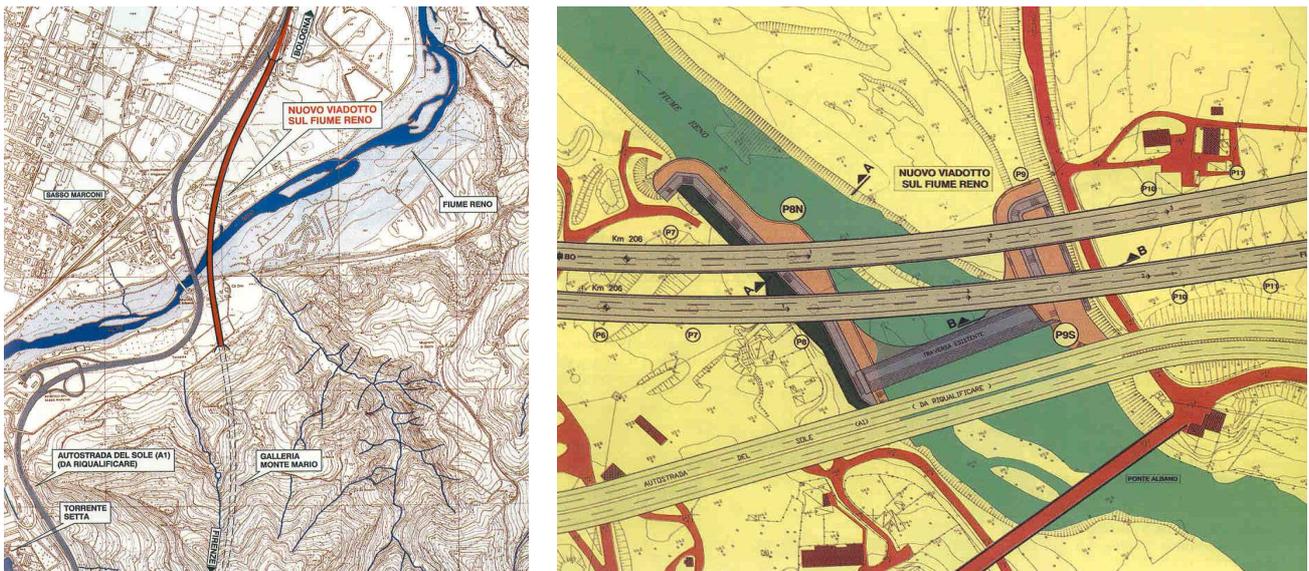


Figura 8 – Variante autostradale di valico Bologna-Firenze. Fiume Reno, località Sasso Marconi (BO). Corografia generale degli attraversamenti stradali già esistenti e del nuovo attraversamento della variante autostradale di valico (sx). Planimetria generale degli attraversamenti e delle sistemazioni d'alveo di progetto (dx). Fonte: Spea Ingegneria Europea

In aggiunta all'esistente viadotto sull'alveo del Reno insiste, in un ristretto intorno dell'intervento, un'ulteriore attraversamento a monte costituito dal cosiddetto Ponte Albano sulla viabilità provinciale ed è anche presente una traversa di controllo dell'erosione (Figura 8). A seguito della realizzazione del nuovo attraversamento, il tronco fluviale viene ad essere interessato dalla presenza di tre attraversamenti d'alveo posti in rapida successione, in grado di dare luogo a significative perturbazioni della corrente fluviale. Il particolare contesto lascia presumere, sotto il profilo dell'interferenza alveo/strutture, l'esistenza di processi idraulici di difficile riproduzione mediante l'impiego di metodologie numeriche. E' apparsa di conseguenza consigliabile la realizzazione di un modello fisico a fondo mobile del tratto d'alveo interessato, riprodotto in scala geometrica 1:100. Il fine principale della realizzazione del modello è stato l'individuazione e la quantificazione di eventuali fenomeni di escavazione, anche localizzati, in corrispondenza delle opere in alveo e delle sistemazioni in progetto. La realizzazione del modello ha permesso, valutando diverse ipotesi alternative di intervento, di ottimizzare il progetto delle sistemazioni idrauliche connesse al viadotto.

La Figura 9 documenta alcune fasi di una delle prove eseguite con riferimento ad una portata nel prototipo pari a 3000 mc/s, cui è attribuito un tempo di ritorno di circa 1000 anni. Il particolare della pila sud posto nella figura a destra

evidenzia la complessità del campo di moto che si genera per la presenza immediatamente a monte della pila stessa della traversa di protezione delle fondazioni del vecchio manufatto di attraversamento dell'autostrada.



Figura 9 - Modello fisico a fondo mobile del ponte sul Fiume Reno della Variate di valico dell'autostrada A1 Bologna- Firenze. Laboratorio di Ingegneria Idraulica dell'Università di Bologna. Prove relative alla portata millenaria. Vista laterale di insieme (a sx) e particolare di una pila (a dx).

La Figura 10 documenta la situazione al termine di una delle prove relative al transito della portata 1000-enaria. E' evidente la profonda modificazione dell'alveo che però non determina situazioni di preoccupazione per la struttura. Il particolare nella figura a destra evidenzia come alcuni dei massi posti a protezione delle fondazioni della pila siano stati asportati dalla corrente. Tale circostanza ha suggerito di investigare nella progettazione soluzioni diverse da quella rappresentata in figura, per garantire una migliore stabilità delle protezioni antoerosive.



Figura 10 - Modello fisico a fondo mobile del ponte sul Fiume Reno della Variate di valico dell'autostrada A1 Bologna-Firenze. Laboratorio di Ingegneria Idraulica dell'Università di Bologna. Situazione al termine di una prova relativa alla portata millenaria. Vista di insieme da valle (sx) e particolare di una pila (dx, notare l'asportazione di alcuni massi di protezione).

Nel complesso, l'esempio riprodotto evidenzia come la modellazione fisica fornisca la possibilità di studiare efficacemente situazioni caratterizzate da geometria anche molto complessa, rendendo possibile riconoscere l'esistenza e valutare la consistenza di fenomeni localizzati altrimenti ben difficilmente quantificabili e spesso nemmeno identificabili.

4. Riferimenti normativi

In Italia, fino a pochi anni or sono, gli unici riferimenti normativi ai quali ci si doveva attenere nella progettazione o nella verifica degli attraversamenti fluviali erano quelli contenuti nel Decreto Ministeriale del 2 agosto 1980 e in quello del 4 maggio 1990, ai quali ha fatto seguito la Circolare n. 34233 emanata in data 25 febbraio 1991 dal Ministero dei Lavori Pubblici, recante "Istruzioni relative alla normativa tecnica dei ponti stradali". Nel complesso, le norme emanate dal Ministero dei Lavori Pubblici fissano il quadro di riferimento per lo sviluppo della relazione sugli aspetti idrologici,

idrografici ed idraulici prescritta a corredo della progettazione dell'attraversamento fluviale, delineando anche i criteri generali che devono guidare l'articolazione di tale relazione. Non vengono fornite invece specifiche indicazioni circa le procedure di calcolo che devono essere utilizzate per redigere la relazione idraulica né prescrizioni vincolanti sulle caratteristiche costruttive del manufatto di attraversamento in relazione alle sue interferenze con l'alveo fluviale in cui viene a collocarsi ed in particolare sui limiti ammissibili per il franco idraulico, lasciando in tal modo ampi margini all'estensore della relazione medesima.

Un sensibile avanzamento nel quadro normativo si è avuto ad opera dell'Autorità di Bacino del Fiume Po che ha deliberato in data 11 maggio 1999 l'emanazione di "Criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B" dei corsi d'acqua di propria competenza (Autorità di Bacino del Fiume Po, 1999), di seguito indicata come Direttiva sui ponti. Successivamente analoghe iniziative sono state assunte sul territorio nazionale da altre Autorità di Bacino. Le fasce suddette sono state individuate dal Piano stralcio delle fasce fluviali approvato con D.P.C.M. 24 luglio 1998, che ha provveduto a circoscrivere le porzioni di territorio funzionali alla delimitazione dell'alveo di piena ordinaria (fascia A), all'espandersi della piena per i tempi di ritorno assunti a riferimento (fascia B) e le aree che potrebbero risultare coinvolte per piene con tempi di ritorno maggiori di 200 anni (fascia C).

Le prescrizioni in questione riguardano sia gli attraversamenti in progetto che quelli esistenti. Nel caso di attraversamenti in progetto, esse sono rivolte a garantire che l'inserimento della struttura sia coerente con l'assetto idraulico del corso d'acqua e non comporti significative alterazioni delle condizioni di rischio idraulico, nonché ad assicurare che siano valutate in modo adeguato le sollecitazioni di natura idraulica cui è sottoposta l'opera, in rapporto alla sua sicurezza. Nel caso dei ponti esistenti, invece, oltre ai punti precedenti la Direttiva sui ponti indica anche gli adempimenti imposti per le opere che risultino vulnerabili dal punto di vista idraulico, cioè le eventuali condizioni di esercizio transitorio della struttura, sino alla realizzazione di interventi di adeguamento, di cui sono indicati i criteri guida.

L'illustrazione delle norme in questione esula necessariamente, per i limiti di spazio disponibili, dalle finalità della presente nota. Si può comunque affermare che la Direttiva sui ponti ha consentito un notevole progresso nel campo normativo, anche se alcuni aspetti di un certo interesse (ad esempio la valutazione dei fenomeni di erosione generalizzata d'alveo e quella delle escavazioni che intervengono nel caso di interferenza tra le pile in alveo di più ponti fra loro vicini) meriterebbero una trattazione più specifica. Essa fornisce un quadro articolato di riferimento su cui impostare le analisi di compatibilità degli attraversamenti, entrando dettagliatamente nel merito dei metodi di verifica e fornendo precise istruzioni per le calcolazioni.

La Direttiva sui ponti emanata dall'Autorità di Bacino del Fiume Po prescrive, come detto, che lo studio di compatibilità debba essere esteso a tutti i ponti in progetto ed a quelli esistenti che interferiscono con gli alvei all'interno delle fasce fluviali di categoria A e B. Essa rappresenta quindi un primo esempio di riconoscimento, nella realtà italiana, della necessità di una verifica estensiva delle condizioni degli attraversamenti fluviali esistenti. Nonostante la Direttiva non individui una procedura univoca di approccio al problema, le indicazioni in essa contenute possono costituire una prima importante traccia per uniformare e sistematizzare la verifica della vulnerabilità idraulica degli attraversamenti esistenti.

5. La valutazione speditiva della vulnerabilità idraulica dei ponti

Mentre le attuali conoscenze circa i fenomeni di scavo ad opera della corrente permettono di meglio dimensionare, rispetto al passato, le fondazioni degli attraversamenti di nuova costruzione, la valutazione della vulnerabilità all'erosione delle opere esistenti è un problema tutt'altro che agevole. Spesso dette opere hanno un'età ragguardevole; di conseguenza non sempre è possibile reperirne i progetti originali, sicché in molti casi non si ha conoscenza delle caratteristiche della parte sommersa del ponte e, a maggior ragione, delle fondazioni. Inoltre, la verifica delle condizioni delle strutture sommerse è spesso difficile, sicché eventuali evidenze di pericolo, manifestate ad esempio da scavi localizzati attorno alle pile, non sono facilmente identificabili.

Il numero elevato dei ponti potenzialmente soggetti a rischio, presenti in molti dei paesi più industrializzati, rende però improponibile la realizzazione in tempi brevi di una diagnosi approfondita delle condizioni di vulnerabilità di ognuno di essi. Detta circostanza ha suggerito l'elaborazione di procedure di valutazione strutturate in due fasi (Brath e Montanari, 2000 e 2000a). La prima fase è indirizzata all'individuazione speditiva e di massima degli attraversamenti soggetti a maggiore criticità, in modo da stabilire innanzitutto le priorità di intervento; per essere realizzata in tempi brevi, tale valutazione deve necessariamente essere effettuata in funzione di indicatori di vulnerabilità facilmente quantificabili, con procedure speditive di valutazione della vulnerabilità basate su semplici ispezioni o studi di massima che non richiedono l'effettuazione di accurati rilievi di campo. La seconda fase, invece, è dedicata allo studio di dettaglio della vulnerabilità degli attraversamenti a rischio precedentemente individuati come potenzialmente vulnerabili, attraverso indagini approfondite che possono prevedere anche l'impiego di sofisticati monitoraggi.

Procedure di valutazione così impostate sono state recentemente proposte negli Stati Uniti e nel Regno Unito e le loro prime applicazioni hanno subito messo in evidenza la delicatezza della prima fase, che appare affetta da rilevanti margini di soggettività, essendo prevalentemente fondata su schematizzazioni concettuali molto astratte dei fenomeni coinvolti e sull'interpretazione empirica dell'informazione storica disponibile, concernente attraversamenti danneggiati

in passato. Rimandando a Brath e Montanari (2000 e 2000a), per una descrizione più esaustiva si fornisce nel seguito una breve illustrazione di tre procedure di particolare importanza.

Una prima procedura di valutazione speditiva della vulnerabilità è quella messa a punto dalla Hydraulic Research Ltd (HR, 1989; Meadowcroft e Whitbread, 1993) su commissione del British Railway Board, che ha avviato una procedura di revisione delle condizioni dei ponti ferroviari di propria competenza. In base alle risultanze delle procedure di valutazione speditiva, le ferrovie inglesi hanno approntato sistemi di monitoraggio degli scavi alla base delle pile degli attraversamenti ferroviari risultati a rischio, basati sull'impiego di ecoscandagli. La funzionalità di questa procedura, in riferimento alla realtà italiana, è stata analizzata dalle Ferrovie dello Stato S.p.A. in riferimento ad un campione di 26 ponti ferroviari distribuiti su tutto il territorio nazionale (De Falco et al., 1997). I risultati hanno suscitato talune perplessità, soprattutto in merito alla definizione dei limiti dell'indicatore che discrimina fra le diverse classi di vulnerabilità. Detti limiti sono infatti apparsi non adeguatamente motivati, per cui l'estensione del loro uso al territorio italiano potrebbe fornire indicazioni non attendibili.

Un'altra procedura speditiva è quella originariamente sviluppata dallo United States Geological Survey (USGS) Tennessee District (Simon et al., 1989) e successivamente ripresa dall'USGS Maryland-Delaware-DC District. E' correntemente nota negli Stati Uniti come Maryland-Index ed è stata successivamente modificata da Doheny (1996), al fine di includere un maggior numero di indicatori di vulnerabilità. Essa si basa sull'impiego di una serie di indicatori che possono essere valutati analizzando lo stato dei luoghi; i punteggi assegnati ad ogni indicatore sono sommati per ottenere una valutazione globale che consente di classificare gli attraversamenti in funzione della loro vulnerabilità. In pratica, la valutazione della vulnerabilità delle opere esaminate viene ottenuta confrontando il loro punteggio con quelli caratteristici di attraversamenti che hanno palesato in passato, o che palesano nel presente, problemi conclamati dovuti ad erosione.

Una terza procedura è quella della Federal Highway Administration (FHWA, 1988); questa non propone in realtà una vera e propria procedura di valutazione speditiva della vulnerabilità all'erosione degli attraversamenti fluviali, ma si limita a suggerire linee guida, lasciando ai singoli stati dell'Unione il compito di scendere nel dettaglio e di elaborare metodi di valutazione idonei alle loro singole realtà. Viene così ad essere riconosciuto il carattere necessariamente locale di ogni procedura di classificazione della vulnerabilità dei ponti, rinunciando all'intento di proporre un metodo di validità generale esteso all'intero territorio degli Stati Uniti. Fra le procedure di valutazione speditiva elaborate dai singoli stati merita di essere ricordata quella sviluppata dall'USGS dell'Indiana, che assegna agli attraversamenti un punteggio per quantificarne la vulnerabilità, in funzione della tipologia del materiale d'alveo, dell'angolo di incidenza della corrente rispetto alle pile, del grado di ostruzione delle luci del ponte ad opera di detriti e del rapporto di restringimento della larghezza dell'alveo fluviale causato dalla presenza del ponte.

Nel complesso, i metodi di valutazione speditiva fino ad oggi proposti basano solo in parte le procedure di stima della vulnerabilità di un determinato attraversamento sul patrimonio di conoscenze disponibili sui processi di erosione fluviale. Essi sono stati infatti elaborati soprattutto cercando di interpretare le evidenze delle esperienze di campo maturate dagli Enti che li hanno sviluppati, verificando la loro capacità di individuare le priorità emergenti dalle banche dati disponibili. L'applicazione di dette procedure in contesti diversi da quelli rispetto ai quali sono state elaborate e verificate appare quindi meritevole di approfondite verifiche preliminari, poiché condizioni idrologiche, geomorfologiche e climatiche diverse potrebbero dare luogo a risultati inattendibili.

6. Considerazioni conclusive

La presente nota ha inteso trattare alcuni aspetti di particolare interesse relativi alla valutazione della vulnerabilità idraulica degli attraversamenti fluviali. Si tratta di un problema di grande attualità, in quanto diversi eventi alluvionali verificatisi nel recente passato in varie zone del Paese hanno messo in evidenza l'inadeguatezza dal punto di vista idraulico di molte delle opere di attraversamento fluviale esistenti sul territorio, palesandone un livello di vulnerabilità spesso preoccupante, chiaramente testimoniato dai numerosi danneggiamenti e crolli. Molti attraversamenti, infatti, sono stati progettati in tempi nei quali la comprensione dei processi idraulici coinvolti era assai più frammentaria rispetto all'attuale e nel contempo non erano disponibili soluzioni tecnologiche, oggi comuni, che consentono di ridurre notevolmente sia la vulnerabilità strutturale dell'attraversamento che le sue interferenze con il deflusso delle acque.

Nel presente paragrafo, riprendendo quanto discusso nell'intervento effettuato a conclusione della prima giornata di lavoro del Progetto Safe (Brath, 2006), si ritiene opportuno sviluppare alcune considerazioni, evidenziando una serie di temi su cui si ritiene utile che la ricerca concentri la sua attenzione nel futuro e sui quali appare necessario avviare una stretta interlocuzione tra il mondo accademico e le istituzioni preposte al governo idraulico del territorio.

In primo luogo, è importante avviare uno sforzo comune per migliorare ed aggiornare il quadro normativo esistente. L'Autorità di Bacino del Fiume Po, che ha fornito un notevole impulso nel recente passato al miglioramento del quadro normativo pregresso mediante l'emanazione della Direttiva sui ponti, può sicuramente giocare un ruolo di grande rilievo al riguardo. Vi sono infatti temi su cui la ricerca scientifica recente ha compiuto importanti passi avanti, che portano a consigliare un aggiornamento delle metodologie di calcolo raccomandate, come pure altri dove appare urgente avviare uno sforzo di ricerca applicata con il supporto degli Enti territoriali, per migliorare il quadro delle conoscenze disponibili. Solo per citarne alcuni, i metodi per la valutazione dei fenomeni di erosione generalizzata, in

molti casi responsabili dei dissesti dei ponti più di quanto lo siano i fenomeni di erosione localizzata cui si rivolge invece nella quasi totalità dei casi l'attenzione delle metodologie di verifica, l'analisi dello scavo in presenza di terreni coesivi, la valutazione della profondità di escavazione in presenza di trasporto solido, condizione generalmente trascurata dagli approcci empirici che si riferiscono alle cosiddette condizioni di acque chiare. Infine, un aspetto che pare particolarmente importante, forse più importante degli altri, è quello della definizione delle portate di riferimento cui commisurare il calcolo delle profondità di escavazione, in presenza di un fenomeno di piena che è tipicamente non stazionario. Per far comprendere l'importanza del problema, si può fare osservare che, se si effettuassero le verifiche delle profondità massima di escavazione localizzata o generalizzata con riferimento alla portata al colmo diciamo 100-ennale, ben pochi degli attraversamenti esistenti, caratterizzati da fondazioni superficiali, risulterebbero in grado di resistere alla sollecitazione idraulica. Questo stride con l'evidenza sperimentale di moltissimi ponti che hanno fronteggiato con successo eventi di piena anche di elevato tempo di ritorno. La ragione di tale incongruenza è legata al fatto che le formule empiriche comunemente impiegate, di cui è fornita una disamina nella presente nota, restituiscono lo scavo di lungo periodo, relativo a condizioni di moto permanente, mentre, durante i fenomeni di piena, le portate massime si verificano per intervalli di tempo comunque limitati. Occorre quindi avviare una riflessione per trovare indicatori di portata più realistici rispetto alle portate massime al colmo di assegnato tempo di ritorno, che, soprattutto per piccoli bacini, non appaiono rappresentative del fenomeno ed appropriate allo scopo.

In secondo luogo, occorrerebbe procedere in tempi brevi e certi alla verifica della vulnerabilità idraulica di tutti gli attraversamenti fluviali presenti sul territorio. Tale esigenza è ormai largamente condivisa in molti paesi avanzati. In tale direzione, per quanto riguarda il nostro Paese, si muove la menzionata Direttiva sui Ponti recentemente emanata dall'Autorità di Bacino del Fiume Po, quando impone di sottoporre ad una verifica idraulica di dettaglio tutti gli attraversamenti esistenti che ricadono all'interno delle fasce fluviali. Come ampiamente discusso nel Paragrafo 5, il numero estremamente elevato di ponti potenzialmente soggetti a rischio idraulico rende però improponibile la realizzazione, in tempi ragionevolmente brevi quali sarebbero auspicabili vista la gravità del problema e con costi socialmente accettabili, di una diagnosi approfondita per ognuno di essi. A ciò si aggiunga che, per molti dei manufatti esistenti, non sono note con la necessaria precisione le caratteristiche geometriche delle fondazioni e quelle del materiale d'alveo, per cui l'applicazione delle usuali tecniche analitiche richiederebbe l'esecuzione di rilievi di campo, geognostici e topografici, alquanto onerosi.

In ragione di tali difficoltà, sembra opportuno suggerire, in linea con l'esperienza sviluppata soprattutto nel Regno Unito e negli Stati Uniti ed illustrata nella presente nota, l'implementazione di procedure speditive per l'individuazione degli attraversamenti soggetti a maggiore criticità, basate sull'impiego di indicatori di vulnerabilità di semplice valutazione. Tali procedure vanno intese come propedeutiche e non sostitutive degli studi idraulici di dettaglio. Esse dovrebbero essere indirizzate a stabilire su vasta scala spaziale le priorità di intervento, consentendo di individuare, almeno in prima istanza, gli attraversamenti maggiormente vulnerabili, sui quali andrebbero concentrati i successivi monitoraggi e studi idraulici di dettaglio, necessari alla programmazione degli interventi di messa in sicurezza.

L'individuazione degli attraversamenti esistenti che versano in condizioni di maggiore criticità sulla base di un'apposita scala di vulnerabilità idraulica gioca un ruolo molto importante da un lato ai fini di protezione civile, permettendo di ottimizzare l'articolazione sul territorio degli interventi di monitoraggio delle loro condizioni di sicurezza idraulica sia prima che durante il verificarsi degli eventi alluvionali; dall'altro ai fini di una corretta programmazione degli interventi di messa in sicurezza delle opere esistenti, in considerazione anche della relativa facilità con la quale, talvolta, le contromisure necessarie a limitare i danni derivanti dall'erosione fluviale possono essere predisposte senza ricorrere necessariamente a modifiche di rilievo nella struttura dell'attraversamento.

L'esperienza maturata al riguardo evidenzia la necessità di utilizzare procedure fortemente strutturate, codificate in modo da limitare l'arbitrarietà conseguente al giudizio soggettivo del tecnico che esegue le analisi preliminari sui singoli manufatti. La definizione degli indicatori di vulnerabilità si presenta comunque come una operazione non banale; l'eventuale adattamento di procedure esistenti, sviluppate per altri contesti geografici, deve necessariamente essere preceduto da un'operazione di taratura basata su un'analisi estensiva delle loro prestazioni con riferimento al contesto di interesse, anche al fine di provvedere agli opportuni adattamenti.

La raccolta di un'ampia documentazione di casi storici di attraversamenti interessati da eventi alluvionali costituisce quindi il presupposto indispensabile per lo sviluppo di attendibili procedure di valutazione speditiva della vulnerabilità idraulica dei ponti. Ciò suggerisce l'opportunità di prevedere per il futuro studi sistematici su casi di attraversamenti investiti da eventi alluvionali, con esaustiva archiviazione della documentazione disponibile, al fine di costituire banche dati che consentano di ottenere una casistica sufficientemente rappresentativa per il territorio esaminato.

7. Riferimenti bibliografici

- Autorità di Bacino del Fiume Po (1999) – Criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno della fasce A e B, Deliberazione n.2/99.
- Ballio F., Bianchi A., Franzetti S., De Falco, F., Mancini, M. (1998) – Vulnerabilità idraulica di ponti fluviali, Atti del XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Volume III, Catania, pp. 69-79.
- Brandimarte L., Brath A., Montanari A. (2003) – Modelli interpretativi dei fenomeni di erosione d'alveo in corrispondenza di attraversamenti fluviali, in Maione, U., A. Brath e P. Mignosa (eds.) "La progettazione di opere idrauliche in zona montana", Atti del Corso di aggiornamento, Milano, 7-11 ottobre 2002, pp. 25-50, Editoriale Bios.

- 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, pp. 45-60.
- Brath A., Montanari A. (2000a) – Valutazione della vulnerabilità idraulica degli attraversamenti fluviali, in Maione U., Brath A. e Mignosa P. (eds.), “Sistemazione dei corsi d’acqua”, Atti del Corso di Aggiornamento, Politecnico di Milano, 4-8 ottobre 1999, BIOS Editrice, pp. 367-412.
- Brath A. (2006) – Valutazione della vulnerabilità idraulica dei ponti nella pianificazione di bacino. Alcune riflessioni, Atti della prima giornata di lavoro del Progetto Safe Infrastrutture, Parma, 7 giugno 2006, Il Po, Notiziario dell’Autorità di Bacino del Fiume Po, Serie speciale, All. 1 al n.7, pp.58-59.
- Breusers, H.N.C., Raudkivi, A.J. (1991) – Scouring, 152 pp., Balkema, Rotterdam.
- De Falco F., Mancini M., Gentile M. (1997) – Valutazione di vulnerabilità da erosione fluviale e sistemi di monitoraggio. L’esperienza delle Ferrovie dello Stato S.p.A., Corso "Fenomeni idraulici in prossimità dei ponti", Centro Internazionale per le Scienze Meccaniche, Udine, 28-30 maggio 1997.
- Doheny E.J. (1996) – A modified index for assessment of potential scour at bridges over waterways, United States Geological Survey Open-File Report n° 96-554, Reston, USA.
- Federal Highway Administration (FHWA) (1988) – Revisions to the National bridge inspection standards (NBIS), Technical Advisory T 5140.21, Federal Highway Administration, McLean, USA.
- Fiorentino M., Oliveto G., Raimondo M.A. (1999) – Analisi semplificata della vulnerabilità idraulica degli attraversamenti fluviali, 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. 333-362, Editoriale BIOS.
- 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.
- Hydraulic Research Ltd (HR) (1989) – Hydraulic aspects of bridges: assessment of the risk of scour, Civil Engineering Department, Handbook n° 47, Hydraulic Research Ltd, Wallingford, UK.
- Johnson P.A. (1995) Comparison of pier-scour equations using field data, J. of Hydraulic Engineering, Volume 121, N° 8.
- Landers M.N., Sterling Jones J., Trent R. E. (1994) – Brief summary of national bridge scour data base, Hydraulic Engineering '94, Proc. of the ASCE Conference, Buffalo August, 1-5, 1994, vol.2, pp. 41-45.
- Laursen E.M. (1960) – Scour at bridge crossings, J. of the Hydraulic Division, ASCE, Volume 86, N° HY 2.
- Laursen E.M. (1963) – An analysis of relief bridge scour, J. of the Hydraulic Division, ASCE, Volume 89, N° HY 3.
- Meadowcroft I.C., Whitbread J.E. (1993) – Assessment and monitoring of bridges for scour, Hydraulic Research Ltd Wallingford Publication n° 77, pp. 18-21.
- Melville B.W. (1997) – Pier and abutment scour: integrated approach, J. of Hydraulic Engineering, Volume 123, N° 2.
- Melville B.W., Sutherland A.J. (1988) – Design method for local scour at bridge piers, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Volume 114, N° 10.
- Parola A.C., Hagerty D.G., Mueller D.S., Melville B.W., Parker G., Usher J.S. (1997) – The need of research on scour at bridge crossings, Proceedings of the 27th IAHR Congress, San Francisco, Theme A, pp. 124-129.
- Richardson E.V., Davis S.R. (1995) – Evaluating scour at bridges, 3rd edition, Hydraulic Engineering Circular HEC 18, Federal Highway Administration, Washington, USA.
- Simon A., Outlaw G.S., Thomas R. (1989) – Evaluation, modeling and mapping of potential bridge-scour, in West Tennessee National Bridge Scour Symposium, 17-19 ottobre, Federal Highway Administration, McLean, USA.
- Straub L.G. (1934) – Effect of channel contraction works upon regime of movable bed streams, Trans. Am. Geophysical Union.