

VULNERABILITA' IDRAULICA DEI PONTI

Summary

The paper is aimed at inspecting some aspects about the vulnerability of river bridges during flood events. To this end, a brief description of the most important hydraulic processes involved is firstly provided, with the aim to highlight the nature of the main factors which more frequently make bridges vulnerable to floods. The knowledge of these factors allows to better estimate the hydraulic risk to which the existing bridges might be subjected.

Moreover, the paper describes the results of applied researches performed in Italy and abroad, in order to evaluate extensively the vulnerability of the existing bridges with respect to floods in a certain geographical region. This allows to identify the bridges which are in the most critical conditions, and thus to establish a concerted plan of civil protection actions and structural and non-structural measures aimed at reducing the existing hydraulic risk. To this end, a very important role is played by the preliminary evaluation procedures aimed at a first assessment of the bridge vulnerability. The paper is aimed at discussing the potential applicability and the main limitations of some well-known procedures of this type, which were developed abroad, in view of their possible application in Italy.

Sommario

La nota si propone di inquadrare alcuni aspetti salienti dei problemi della vulnerabilità idraulica degli attraversamenti fluviali. A tal fine viene fornita una breve descrizione dei fenomeni idraulici di interesse, finalizzata a mettere in rilievo le principali cause di vulnerabilità dei ponti e la relativa frequenza dei danni ad esse imputabili ed a definire indicatori sintetici che consentano di caratterizzare il livello di rischio idraulico cui sono soggetti i manufatti esistenti.

Vengono poi documentate alcune iniziative intraprese, sia a livello nazionale che internazionale, per far fronte all'esigenza di valutare estensivamente la vulnerabilità degli attraversamenti esistenti in un determinato contesto geografico. Tale esigenza è al giorno d'oggi molto sentita al fine di individuare le priorità di intervento, identificando gli attraversamenti che versano in condizioni di maggiore criticità. Ciò al fine di ottimizzare sia la pianificazione delle azioni di protezione civile sia la programmazione degli interventi strutturali e non strutturali di riduzione del rischio idraulico. A tale scopo, ben si prestano le cosiddette procedure speditive di valutazione della vulnerabilità idraulica. Nella nota si propone di discutere le potenzialità di utilizzo e le principali limitazioni di alcune fra le più accreditate procedure di questo tipo messe a punto in ambito internazionale, anche in vista di un loro possibile adattamento alla realtà nazionale.

1. INTRODUZIONE

L'analisi delle interazioni che si verificano fra la corrente idrica, l'alveo del corso d'acqua in cui questa defluisce e le strutture in alveo degli attraversamenti fluviali è stata oggetto negli ultimi anni di una rinnovata attenzione da parte dei ricercatori, a seguito di alcuni eventi alluvionali verificatisi nel recente passato sia Italia che all'estero. E' stato infatti riconosciuto come, in occasione di tali eventi, le

* Prof. Ing. Armando Brath; Dott. Ing. Alberto Montanari, DISTART - Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna.

strutture di attraversamento abbiano evidenziato un livello di vulnerabilità spesso preoccupante, testimoniato dal verificarsi di numerosi danneggiamenti e crolli (*Figura 1*).

L'analisi del quadro dei danni originati da tali eventi alluvionali ha anche confermato come, in molti casi, la presenza di un attraversamento, quand'anche si prescindano dai problemi derivanti da un suo eventuale collasso o danneggiamento, possa indurre conseguenze rilevanti sulla morfologia dell'alveo fluviale, sulle caratteristiche idrauliche della corrente e sullo stesso regime delle portate di piena. Ad esempio, si possono verificare migrazioni laterali d'alveo indotte dalla presenza in alveo delle infrastrutture del ponte, in particolare dei rilevati di accesso, riduzione della capacità di deflusso e conseguente rialzo dei livelli del pelo libero di monte, e formazione di invasi a monte del manufatto di attraversamento che possono essere amplificati 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 comunemente adottati. 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. Eventi di quest'ultimo tipo si sono verificati con una certa frequenza in occasione dei fenomeni alluvionali che hanno colpito il Piemonte meridionale ed in particolare il bacino del Tanaro nel novembre 1994 e l'alta Versilia nel giugno del 1996. La *Figura 2*, che si riferisce all'alluvione del novembre 1994 del fiume Belbo in località a S. Stefano Belbo, documenta un caso emblematico di ostruzione delle luci di un ponte ad opera della vegetazione trasportata dalla corrente fluviale.

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 (Stati Uniti), ad esempio, ha recentemente riconosciuto che l'effetto degli scavi ad opera della corrente sulle fondazioni dei ponti non è stato adeguatamente considerato nella progettazione di molti attraversamenti realizzati prima del 1985. Inoltre, molte delle strutture esistenti hanno ormai un'età prossima o superiore alla vita media generalmente attesa in fase di progetto per le costruzioni civili, sicché la valutazione della loro funzionalità appare una necessità imprescindibile. La consapevolezza di tale esigenza ha spinto molti paesi avanzati a intraprendere progetti di ricerca e campagne di indagini di campo finalizzate all'identificazione delle cause principali di vulnerabilità dei ponti e all'individuazione delle situazioni a maggior rischio.

Negli Stati Uniti, ad esempio, sempre la Federal Highway Administration ha promosso un inventario dei ponti esistenti sulle strade pubbliche, che ha messo in evidenza le condizioni di criticità di circa 18.000 di essi, mentre di circa 100.000 non è stato possibile rinvenire informazioni sul tipo di fondazioni utilizzato in alveo. Da tale ispezione nazionale è emerso che la causa principale di collasso degli attraversamenti fluviali negli Stati Uniti è l'erosione fluviale che si verifica durante gli eventi di piena (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. Le tipologie di danno primario ai ponti riscontrate in detta indagine sono riassunte nel grafico riportato nella *Figura 3*, 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 4*; 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, essendo responsabile del 26% dei danneggiamenti compresi nel campione a disposizione, non risulta la causa principale di danneggiamento, 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 differente 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.

In ogni caso i risultati delle predette indagini, analoghi a quelli ottenuti in altri paesi europei, hanno permesso di porre la giusta enfasi sul problema dell'analisi della sicurezza idraulica degli attraversamenti fluviali, confermando l'esistenza un livello di vulnerabilità dei manufatti di attraversamento esistenti sul territorio molto elevato ed invero piuttosto preoccupante. Volendo fare specifico riferimento alla situazione del nostro Paese, si possono menzionare in proposito i dati riportati dal citato lavoro di *Ballio et al.* (1998) che hanno valutato, nel campione esaminato, in circa il 30% 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.

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. Come già accennato in precedenza, spesso dette opere hanno un'età ragguardevole e 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.

La consapevolezza dell'attualità di tale problema ha spinto diversi Enti a sviluppare apposite procedure per la valutazione su larga scala spaziale della vulnerabilità idraulica degli attraversamenti fluviali esistenti, rivedendo e perfezionando in molti casi i riferimenti normativi vigenti.

A tale riguardo, con riferimento al nostro Paese possono essere citate le iniziative intraprese dall'*Autorità di bacino del Fiume Po* (1999), che, oltre ad emanare un complesso di norme che integrano quanto disposto dalle vigenti istruzioni ministeriali sulla normativa tecnica sui ponti stradali per la progettazione dei nuovi manufatti, ha disposto una serie di verifiche da eseguire sugli attraversamenti esistenti che interferiscono con le fasce di pertinenza fluviale dei corsi d'acqua del bacino del Po. Tale iniziativa si colloca in sintonia con altre recentemente attivate in ambito internazionale da diversi Enti, che hanno provveduto a emanare prescrizioni normative al fine di sottoporre a verifica idraulica gli attraversamenti fluviali esistenti (ad es. *FHWA*, 1988).

Il numero elevato dei ponti potenzialmente soggetti a rischio, in molti dei paesi più industrializzati, rende però impossibile 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 principali.

La prima fase è indirizzata all'individuazione speditiva e qualitativa 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 individuabili, con 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, attraverso indagini approfondite che possono prevedere anche l'impiego di sofisticati monitoraggi.

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 condizioni di sicurezza idraulica degli attraversamenti esistenti sia prima che durante il verificarsi degli eventi alluvionali, dall'altro ai fini della programmazione degli interventi di messa in sicurezza atti a limitare sensibilmente il rischio al quale molte opere esistenti sono sottoposte, 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 a modifiche di rilievo nella struttura dell'attraversamento.

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 infatti prevalentemente fondata su schematizzazioni concettuali dei fenomeni coinvolti e sull'interpretazione empirica dell'informazione storica disponibile, al riguardo di attraversamenti danneggiati in passato. Le procedure di valutazione speditiva sino ad oggi proposte forniscono infatti risultati non sempre concordi fra loro, in conseguenza delle diversità delle singole realtà locali che portano ad attribuire la vulnerabilità degli attraversamenti a cause differenti.

La presente memoria si propone di contribuire a mettere in luce quali possono essere le evidenze macroscopiche principali della vulnerabilità all'erosione degli attraversamenti fluviali, che possono essere considerate e adeguatamente pesate per effettuare la valutazione speditiva in precedenza descritta. Tale scopo è perseguito effettuando una disamina comparativa di alcune procedure di valutazione speditiva recentemente proposte negli Stati Uniti e nel Regno Unito, al fine di individuare i fattori che colà sono stati ritenuti maggiormente influenti sulla vulnerabilità degli attraversamenti, in riferimento quindi a realtà climatiche, idrologiche e geomorfologiche diverse da quella italiana. Il confronto critico di metodologie diverse può consentire di riunire e comparare le conoscenze e le esperienze maturate in diverse realtà, ponendo così le premesse per l'elaborazione di una procedura validità per il territorio nazionale.

La prossima sezione della nota è dedicata alla descrizione della dinamica dei fenomeni erosivi alla base delle strutture in alveo dei ponti; sono brevemente riassunte alcune formule per la valutazione quantitativa delle profondità di scavo, al fine di contribuire a porre in evidenza i fenomeni e i parametri idraulici che debbono essere adeguatamente considerati per valutare la vulnerabilità degli attraversamenti. Il terzo paragrafo è invece dedicato alla descrizione dei 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. La quarta parte della nota riporta una sintetica descrizione delle principali procedure di valutazione speditiva recentemente messe a punto in ambito internazionale, per l'analisi della vulnerabilità idraulica degli attraversamenti fluviali esistenti, con una discussione sulle loro potenzialità di utilizzo e sulla possibilità di applicarle alla realtà nazionale.

2. EROSIONE ALLA BASE DELLE PILE E DELLE SPALLE DEI PONTI

2.1. Concetti di base e definizioni

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 (o innalzamento) dell'alveo in prossimità del ponte, per variazioni globali del profilo del corso d'acqua indipendenti dalla presenza del ponte medesimo (*general scour*); (b) l'erosione generalizzata in corrispondenza dell'eventuale 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 5 mostra un esempio emblematico 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.

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. Abbassamento d'alveo

Il calcolo dell'abbassamento (o innalzamento) 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 generalizzata riconducibili, questi ultimi, 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 valutazioni idrologiche e idrauliche estese all'intero bacino contribuyente, che prevedono anche il rilievo del profilo longitudinale dell'alveo per un tratto adeguatamente esteso a monte e a valle dell'opera considerata.

La tendenza dell'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 (si veda, ad esempio, la *Figura 6*).

2.3. Erosione generalizzata

L'erosione generalizzata in prossimità del ponte, come già ricordato in precedenza, è dovuta alla riduzione, ad opera dell'attraversamento, della sezione trasversale indisturbata caratteristica dell'alveo; detta riduzione ingenera un'accelerazione locale della corrente che può dar luogo a fenomeni di erosione, le cui scale temporali caratteristiche sono in genere quelle degli eventi alluvionali. Per la valutazione dell'erosione generalizzata, 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 per la valutazione della profondità dell'erosione generalizzata, basate sia su esperienze di laboratorio che sull'interpretazione empirica delle osservazioni di campo disponibili (*Laurson*, 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 e B e b sono le larghezze del pelo libero nelle sezioni d'alveo, rispettivamente, indisturbata e ristretta. In condizioni di assenza di trasporto solido e moto incipiente, 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. Erosione localizzata in corrispondenza delle pile e delle 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 *Figura 7* documenta il caso del ponte sul fiume Secchia in località Gatta (Emilia-Romagna) danneggiato dall'alluvione del settembre 1972.

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 8*, 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 schematicamente in pianta nella *Figura 9*), che pure contribuiscono alla rimozione di materiale 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.

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 9*). Vanno inoltre considerati con attenzione i fenomeni di evoluzione morfologica del letto del fiume; a titolo esemplificativo la *Figura 10* documenta gli effetti di una possibile migrazione laterale di un alveo meandriforme che può indurre variazioni dell'angolo d'attacco della corrente nei confronti dei manufatti in alveo, con conseguente cambiamento, anche notevole, dell'entità dei fenomeni di escavazione.

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 11*). 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 11*). 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).

Numerose formulazioni per il calcolo della profondità dello scavo localizzato sono state proposte 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 presenza di trasporto solido (*live bed*) e 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'ulteriore equazione al fine del calcolo dell'erosione alla base delle pile è quella elaborata da *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 medesimo 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 e inoltre, anche in tal caso, risulta carente lo studio dell'evoluzione nel tempo della profondità di scavo. Un breve riassunto delle formule più utilizzate è riportato in *Fiorentino et al.* (1999).

L'applicazione delle formule precedentemente descritte, richiedendo la conoscenza di taluni parametri idraulici non immediatamente desumibili con semplici ispezioni di campo, non è generalmente contemplata dalle procedure di valutazione speditiva descritte nel seguito, che prendono invece in considerazione indicatori di vulnerabilità di più semplice stima.

Merita poi 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 12*, 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.

Inoltre, 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).

Infine, è opportuno ricordare che le formule anzidette 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 e di seguito richiamate.

In proposito, a titolo puramente esemplificativo, possono citarsi le esperienze recentemente condotte presso il Laboratorio di Ingegneria Idraulica dell'Università degli Studi 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 Bologna-Firenze. Il modello, realizzato anche in ottemperanza ad una prescrizione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, si è reso necessario in considerazione della presenza in alveo di tre attraversamenti posti in rapida successione e di una soglia, che determinano la formazione di singolarità idrauliche nel deflusso della

corrente e la presenza di fenomeni di scavo localizzati difficilmente prevedibili in assenza del modello stesso. Dette esperienze sono state realizzate a seguito di Convenzione fra il Dipartimento DISTART dell'Università medesima e Spea Ingegneria Europea S.p.A., su incarico della Società Autostrade S.p.A. titolare dell'intervento. La *Figura 13* mostra una veduta generale del modello durante l'esecuzione di una prova intesa a verificare l'evoluzione della morfologia dell'alveo al transito della portata di piena pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo, corrispondente ad un tempo di ritorno più che millenario, mentre un particolare del campo di moto in corrispondenza di una delle pile del ponte in progetto ubicate in sponda destra è riportato nella *Figura 14*.

2.5. Riassunto dei principali parametri idraulici che condizionano i processi di erosione

La descrizione dei processi erosivi contenuta nei paragrafi precedenti ha messo in luce i parametri idraulici maggiormente influenti sui fenomeni di escavazione e gli indicatori che possono essere utilizzati per stabilire il livello di vulnerabilità di un attraversamento. Nel seguito, si fornisce un breve riassunto di quanto precedentemente esposto, al fine di avere un quadro più chiaro degli indicatori di rischio che meglio si prestano allo scopo e nel contempo risultano facilmente stimabili con ispezioni di campo speditive.

Per quanto riguarda l'abbassamento d'alveo generalizzato, un primo indicatore di rischio di facile valutazione può essere la presenza di fondazioni scoperte di opere in alveo, sia di tipo radenti che di tipo trasversale. Utili indicazioni sull'eventuale presenza di fenomeni di abbassamento generalizzato possono essere desunti anche rilievi storici del profilo d'alveo, così come rilievi fotografici eseguiti nel passato.

Un possibile indicatore per individuare situazioni di vulnerabilità nei riguardi del fenomeno di erosione generalizzata è costituito invece dal rapporto di contrazione della larghezza dell'alveo imposto dall'attraversamento; ponti la cui presenza determina elevati restringimenti d'alveo devono quindi destare più forti sospetti per la loro vulnerabilità.

L'erosione localizzata alla base delle pile dipende, invece, da un numero più elevato di fattori, e di conseguenza risulta maggiore anche il numero degli indicatori di rischio che possono essere presi in considerazione per analizzare la vulnerabilità degli attraversamenti nei riguardi di tale fenomeno. Fra di essi si distinguono innanzitutto la profondità e la velocità della corrente; correnti più profonde e veloci hanno infatti un maggiore potenziale erosivo. Inoltre rivestono particolare importanza la larghezza delle pile, la loro geometria e le caratteristiche del materiale d'alveo, in particolare la granulometria nel caso di sedimenti non coesivi.

A tale riguardo, merita di essere ricordato come in sede di caratterizzazione della granulometria dei sedimenti d'alveo occorra considerare attentamente 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 trascinamento 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.

Infine, anche la forma del fondo alveo deve essere adeguatamente valutata, osservando se la geometria della sezione può indurre concentrazioni del flusso idrico in corrispondenza delle pile e valutando pure l'angolo di incidenza della corrente con le pile medesime.

3. RIFERIMENTI NORMATIVI

3.1. *Prescrizioni normative del Ministero dei Lavori Pubblici*

In Italia i riferimenti normativi ai quali si deve attenere il progettista degli attraversamenti fluviali sono 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". Tali normative impongono innanzitutto che, quando il ponte interessi un corso d'acqua naturale e artificiale, il progetto debba essere corredato da una specifica relazione riguardante i problemi idrologici, idrografici ed idraulici relativi alle scelte progettuali, alla costruzione ed all'esercizio del ponte. L'ampiezza e l'approfondimento di detta relazione sarà commisurato all'importanza del problema ed al grado di elaborazione del progetto. Nello studio sono da approfondire particolarmente i seguenti aspetti: ricerca e raccolta presso gli uffici ed enti competenti delle notizie e dei rilievi esistenti; giustificazione delle soluzioni proposte per l'ubicazione del ponte, le sue dimensioni e le sue strutture in pianta, in elevazione e di fondazione; studio idrologico degli eventi di massima piena; definizione della scala delle portate nella sezione interessata, per le condizioni attuali e per quelle conseguenti alla costruzione del manufatto, anche per le diverse fasi costruttive previste.

Le norme prescrivono inoltre di assumere normalmente quale portata di progetto quella corrispondente a tempo di ritorno centennale per la quale i calcoli idraulici dovranno verificare la sussistenza di un franco minimo tra il livello di massima piena e l'impalcato del ponte. Viene poi suggerito di stimare la frequenza probabile dell'evento di piena che dà luogo all'annullamento del franco ed in ogni caso si stabilisce che, per i corsi d'acqua arginati, la quota di sottotrave del ponte deve essere non inferiore a quella della sommità arginale.

Nello studio idraulico dell'opera, devono inoltre essere oggetto d'indagine i seguenti problemi: classificazione del corso d'acqua ai fini dell'esercizio della navigazione interna; valutazione dello scavo localizzato con riferimento alle forme ed alle dimensioni delle pile, delle spalle, delle fondazioni nonché dei rilevati; valutazione degli effetti dovuti all'eventuale presenza di correnti veloci; esame delle conseguenze della presenza di eventuali corpi natanti, flottanti e trasportati dalle acque, ove ricorra detta possibilità, nonché delle conseguenze di eventuali ostruzioni delle luci, specie se queste possono creare invasi anche temporanei a monte, sia in fase costruttiva, sia durante l'esercizio delle opere. In situazioni particolarmente complesse si suggerisce di sviluppare le indagini anche con l'ausilio di modelli fisici in scala ridotta.

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 eseguite 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.

Utili riferimenti in tal senso possono essere desunti dalle indicazioni date dal Magistrato per il Po per i ponti sul Fiume Po, che di seguito si riassumono in breve sintesi: (a) la luce netta fra le pile deve risultare non inferiore a 60 m; (b) il franco minimo per la portata di massima piena deve risultare non inferiore a 2 m se il tratto non è navigabile e 5 m se navigabile, valori che devono essere assicurati per 2/3 della luce fra le pile, e comunque per un tratto non inferiore a 40 m qualora l'intradosso del ponte non sia rettilineo; (c) l'argine deve essere innalzato e ringrossato in corrispondenza dell'attraversamento e la scarpata lato fiume deve essere rivestita in pietrame al di sotto della quota di massima piena; (d) le pile in alveo devono essere poste a distanza non minore di 25 m dal bordo lato fiume della sommità arginale mentre la spalla lato campagna deve distare non meno di 35 m dallo stesso punto.

3.2. Prescrizioni normative dell'Autorità di Bacino del Fiume Po

L'Autorità di Bacino del Fiume Po 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). Tali fasce 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 avere zone di coinvolgimento per piene con tempi di ritorno maggiori di 200 anni (fascia C). Il Piano stabilisce che all'interno delle fasce A e B è consentita la realizzazione di nuove opere pubbliche di competenza degli organi statali, regionali o degli altri enti territoriali e quelle di interesse pubblico a condizione che non modifichino i fenomeni idraulici naturali che possono avere luogo nelle fasce, costituendo significativo ostacolo al deflusso e non limitino in modo significativo la capacità di invaso. I progetti devono essere corredati da uno studio che documenti l'assenza dei suddetti fenomeni. Gli interventi e gli studi sono sottoposti all'Autorità Idraulica competente, ai fini dell'espressione di parere di compatibilità rispetto al Piano di bacino o ai suoi stralci. Gli interventi a maggiore criticità per ciò che riguarda l'impatto sull'assetto della rete idrografica sono sottoposti a specifico parere da parte dell'Autorità di Bacino, mentre i rimanenti devono essere sottoposti a verifica idraulica nel rispetto dei criteri per la valutazione di compatibilità emanati dall'Autorità stessa.

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 a garantire 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 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. Le norme predette verranno riassunte nel seguito, con particolare riferimento ai criteri per la verifica della compatibilità idraulica dei ponti esistenti, peraltro molto simili a quelle relativi ai ponti di nuova costruzione.

Le norme impongono innanzitutto di assumere quale portata di piena di progetto quella utilizzata per la delimitazione della fascia B e, nel caso di corsi d'acqua non interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali, una portata di tempo di ritorno non inferiore a 100 anni. Qualora si tratti di corsi d'acqua di piccole dimensioni o di infrastrutture di importanza molto modesta, possono essere assunti tempi di ritorno inferiori; in tali situazioni è comunque d'obbligo verificare che la presenza di tali opere non comporti un aggravio delle condizioni di rischio idraulico sul territorio circostante al passaggio della portata di piena duecentennale.

Il franco minimo fra la quota idrometrica relativa alla piena di progetto e la quota di intradosso del ponte non deve essere inferiore a 0.5 volte l'altezza cinetica della corrente e comunque non inferiore ad 1 m. Il valore del franco deve essere assicurato per 2/3 della luce quando l'intradosso non sia rettilineo e comunque per almeno 40 m, nel caso di luci superiori a tale valore. Il franco minimo fra la quota idrometrica relativa alla piena di progetto e la quota della sommità del rilevato di accesso al ponte deve anch'esso essere non inferiore a 0.5 volte l'altezza cinetica della corrente e comunque non inferiore ad 1 m. Limitatamente ai ponti in progetto, è prescritto che la quota di intradosso del ponte sia superiore a quella della sommità arginale ed è raccomandato di verificare che, qualora si tema il transito di alberi di alto fusto trasportati dalla corrente, sussista un adeguato dislivello tra la quota del fondo alveo e quella di intradosso dell'impalcato al fine di scongiurare il verificarsi di ostruzioni delle luci del ponte.

Il ponte deve essere inoltre adeguatamente posizionato rispetto all'alveo. Deve essere verificato l'orientamento delle pile e delle spalle e le relative interazioni con la corrente fluviale. Per i corsi d'acqua in progetto vengono dettate specifiche norme per la posizione delle pile e delle spalle dei ponti in relazione alla posizione degli argini e dell'alveo inciso.

Gli elementi strutturali del ponte e i relativi rilevati di accesso non devono comportare effetti negativi sul deflusso di piena; in particolare, il profilo di rigurgito eventualmente indotto dall'insieme delle opere di attraversamento deve essere compatibile con l'assetto delle opere di difesa presente e non deve comportare un aumento delle condizioni di rischio idraulico per il territorio circostante. Va inoltre verificato l'effetto della presenza di eventuali corpi flottanti trasportati dalla piena, ovvero di deposito anomalo del materiale ad opera del trasporto solido, soprattutto nel caso possano verificarsi a monte invasi temporanei di volume significativo.

Il manufatto di attraversamento e le opere connesse devono inoltre essere sottoposti a verifica della stabilità strutturale nei confronti di fenomeni di escavazione localizzata in corrispondenza delle fondazioni di pile e spalle del ponte e dei rilevati di accesso, urti ed abrasioni provocati dalla corrente sulle pile in alveo, spinta idrodinamica della corrente sulla struttura, ove opportuno anche con riferimento ad un scenario di tracimazione del ponte provocata dall'ostruzione delle luci.

Tutti i calcoli di natura idraulica debbono essere condotti riferendosi a schemi di moto permanente o moto vario. L'utilizzo dello schema di moto uniforme non è consentito.

Per la verifica idraulica viene fornito un compendio dei metodi di calcolo per il calcolo del rigurgito prodotto dalle pile dei ponti e dell'escavazione temibile. L'illustrazione fa riferimento ai metodi di calcolo più comuni, peraltro ampiamente trattati in letteratura; non sono adeguatamente trattati però alcuni aspetti che pure presentano un certo interesse, quali 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.

Nei casi in cui la verifica di compatibilità idraulica dei manufatti esistenti, i cui lineamenti essenziali sono stati appena descritti, non risulti soddisfatta, le Amministrazioni competenti al rilascio del parere idraulico di compatibilità (nulla-osta idraulico) sono tenute a definire, sulla base degli elementi derivanti dallo studio idraulico, le condizioni di esercizio transitorio dell'opera, valide fino alla realizzazione degli interventi di adeguamento.

Tali condizioni devono contenere:

- la definizione dei limiti di completa funzionalità idraulica dell'opera, rappresentati dal tempo di ritorno della portata di piena che soddisfa i limiti predetti sul franco idraulico;
- la programmazione degli interventi periodici di manutenzione dell'opera, e dell'alveo in corrispondenza del ponte, necessari per assicurare la massima capacità di deflusso, comprensivi dell'indicazione dei soggetti responsabili;
- la definizione di specifiche operazioni da compiere nell'ambito dello svolgimento delle funzioni periodiche di vigilanza e ispezione sullo stato di conservazione dell'opera, come definite dalla Circolare n. 34233 del Ministero dei Lavori Pubblici in precedenza citata;
- la definizione degli scenari di piena probabili per le portate superiori a quelle per cui l'opera è compatibile, con particolare riferimento alle piene con tempo di ritorno pari a 200 e 500 anni, con evidenziazione dei centri abitati e delle infrastrutture circostanti coinvolte;
- la definizione dei tempi medi di preannuncio della piena e dei tempi medi di crescita dell'onda di piena;
- l'installazione, in una sezione adeguata in prossimità del ponte, di un idrometro con l'evidenziazione del livello di guardia e di quello di superamento delle condizioni di sicurezza, per il quale deve essere sospesa l'agibilità del ponte;
- il soggetto responsabile della sorveglianza per la segnalazione degli stati idrometrici di guardia e di superamento delle condizioni di sicurezza;
- la necessità eventuale di aggiornamenti periodici circa le condizioni di funzionalità idraulica dell'opera.

Le condizioni di esercizio provvisorio così definite costituiscono parte integrante del parere di compatibilità idraulica del ponte esistente, rilasciato dalle Amministrazioni competenti.

La direttiva emanata dall'Autorità di Bacino del Fiume Po prescrive 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 verificare accuratamente le condizioni degli attraversamenti fluviali esistenti. Nonostante la normativa non individui una procedura univoca di approccio al problema, le direttive generali in essa contenute possono costituire una prima importante traccia per uniformare e sistematizzare la verifica della vulnerabilità idraulica degli attraversamenti esistenti.

4. VALUTAZIONE SPEDITIVA DELLA VULNERABILITA' IDRAULICA DEI PONTI

Le procedure di valutazione speditiva descritte nel seguito, come già accennato in precedenza, non hanno come scopo quello di pervenire a una stima quantitativa della vulnerabilità idraulica degli attraversamenti medesimi nei riguardi dei fenomeni di erosione, per la quale sarebbero necessari studi e monitoraggi di campo approfonditi che richiedono adeguati tempi di elaborazione; esse sono invece finalizzate alla rapida individuazione degli attraversamenti soggetti a maggiore rischio e delle loro principali cause di vulnerabilità, in maniera da individuare una scala di priorità degli interventi necessari al fine di porre in sicurezza gli attraversamenti fluviali esistenti all'interno di una certa regione geografica.

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.

L'analisi delle procedure di valutazione speditiva di vulnerabilità all'erosione degli attraversamenti fluviali di seguito brevemente descritte ha lo scopo di presentare una disamina delle principali procedure di tale natura messe a punto a livello internazionale, mettendo in evidenza i più significativi indicatori individuati nei rispettivi contesti, senza alcuna pretesa di voler individuare quale metodo fra quelli esistenti sia maggiormente suscettibile di essere utilizzato sul territorio nazionale. Tali indicatori sono riassunti nelle Tabelle 1, 2 e 3, in riferimento a ciascuna delle tre procedure di seguito descritte. E' immediato notare come in molti casi dette Tabelle suggeriscano di adeguatamente valutare alcuni dei fattori predisponenti all'erosione già menzionati nel paragrafo 2.5. Esse propongono anche l'analisi di altri fattori di tipo non parametrico che, per loro natura, non possono essere inclusi in formule per il calcolo dell'erosione, ma possono comunque fornire utili indicazioni per la valutazione speditiva del rischio.

4.1. La procedura della Hydraulic Research Ltd

Il metodo è stato messo 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.

Il grado di vulnerabilità all'erosione delle fondazioni in alveo del ponte è stimato attraverso la stima di un indicatore complessivo di vulnerabilità RN , espresso come

$$RN = PPE + TR - FQ \quad , \quad (6)$$

dove *PPE*, *TR* e *FQ* sono 3 fattori indipendenti che identificano, rispettivamente, la predisposizione potenziale all'erosione dell'alveo, le condizioni generali di stabilità del corso d'acqua e degli argini ed infine la vulnerabilità delle fondazioni delle strutture in alveo del ponte.

Per valutare l'indicatore di erosione potenziale *PPE* si procede dapprima a stimare le profondità di erosione generalizzata *DG* e localizzata *DL*, attraverso opportune relazioni empiriche che esprimono queste ultime in funzione dei fattori indicati in Tabella 1; la somma di *DG* e *DL* viene adimensionalizzata dividendola per la larghezza della pila *e*, a seconda dei valori assunti da tale quantità adimensionalizzata, viene assegnato un punteggio da 1 a 7 a *PPE*. Il valore di *PPE* così ottenuto viene corretto secondo criteri codificati nel caso in cui siano presenti protezioni della pile quali soglie o difese in massi.

Gli indicatori *TR* e *FQ* sono stimati mediante relazioni analitiche, che consentono di esprimerli in funzione di alcuni parametri, indicati in Tabella 1, fra i quali compaiono alcuni parametri idraulici della corrente, le caratteristiche del materiale d'alveo e degli argini ed inoltre la tipologia del ponte e delle relative fondazioni.

In base al valore assunto dall'indicatore *RN* si distinguono 3 classi di vulnerabilità dell'opera. Se *RN* risulta compreso fra 7 e 3 l'opera è altamente vulnerabile ed è pertanto consigliabile uno studio idraulico dettagliato. Valori di *RN* compresi fra 3 e -3 identificano strutture soggette a media vulnerabilità, le cui condizioni di stabilità idraulica devono essere regolarmente controllate. Infine, valori di *RN* compresi fra -3 e -7 identificano opere scarsamente vulnerabili, per le quali si raccomandano comunque saltuarie ispezioni.

La funzionalità di questa procedura, in riferimento alla realtà italiana, è stata recentemente 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 di *RN* che discriminano 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.

4.2. La procedura dello United States Geological Survey

La procedura di seguito descritta è stata 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 recentemente modificata da *Doheny* (1996), al fine di includere un maggior numero di indicatori di vulnerabilità. Tale forma modificata è quella brevemente riassunta nel seguito.

La procedura individua preliminarmente gli indicatori predetti, che sono riportati nella Tabella 2. Ad ognuno di essi è assegnato un punteggio variabile, a seconda delle alternative previste indicate anch'esse in Tabella 2; punteggi più alti corrispondono ad una minore vulnerabilità all'erosione. I punteggi relativi ad ogni indicatore sono sommati per ottenere una valutazione globale che consente di classificare gli attraversamenti in funzione della loro vulnerabilità.

Rispetto alla procedura della Hydraulic Research Ltd, il metodo USGS prende in considerazione un numero maggiore di indicatori, consentendo di conseguenza una valutazione più circostanziata. A fronte del maggior dettaglio apparente della stima, il metodo USGS presenta però l'inconveniente di consentire solamente una classificazione relativa fra opere diverse, non individuando classi di valori del punteggio totale che consentano di inquadrare gli attraversamenti in classi di vulnerabilità. In pratica, la valutazione della vulnerabilità deve essere ottenuta confrontando il punteggio, relativo alle opere considerate, con quelli caratteristici di attraversamenti che hanno palesato in passato, o che palesano nel presente, problemi conclamati dovuti ad erosione.

Tale procedura risulta quindi più laboriosa in quanto la sua utilizzazione deve essere preceduta da un'applicazione su vasta scala nella regione di interesse, che consenta di costituire una casistica sufficientemente rappresentativa dei valori del punteggio complessivo riscontrati in attraversamenti vulnerati in passato a seguito di erosione, in modo da definire con sufficiente attendibilità i valori critici del punteggio stesso da utilizzare per la valutazione della vulnerabilità degli attraversamenti esistenti. Peraltro, tale limitazione può tradursi in un reale vantaggio in quanto l'operazione di definizione dei valori critici può rendere la procedura meno arbitraria e maggiormente rappresentativa della realtà caratteristica dei diversi contesti geografici.

4.3. La procedura della Federal Highway Administration

La Federal Highway Administration (FHWA) non propone 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 estesa all'intero territorio degli Stati Uniti. In questo senso, quanto descritto in questo paragrafo, che riporta essenzialmente indicazioni di carattere generale, si differenzia dal contenuto dei paragrafi precedenti, che trattano invece veri e propri metodi di valutazione della vulnerabilità. Tuttavia, le linee guida della FHWA risultano interessanti, proprio perché il loro carattere generale le rende potenzialmente meglio adattabili a diversi contesti locali.

Dette linee guida non si limitano ad identificare i principali indicatori di vulnerabilità degli attraversamenti all'erosione, ma identificano un piano complessivo di azioni che prevede la valutazione della vulnerabilità all'erosione di tutti gli attraversamenti fluviali esistenti, al fine di individuare le priorità emergenti di intervento, i tipi di indagini di campo necessarie e le contromisure preliminari e definitive necessarie. Tale piano è suddiviso in 5 fasi e verrà nel seguito brevemente descritto nella sua completezza.

Nella prima fase i ponti sono divisi in 5 categorie, corrispondenti rispettivamente ad attraversamenti (1) a basso rischio, (2) debolmente o (3) fortemente suscettibili di scavi localizzati ad opera della corrente, (4) con ignota tipologia di fondazioni e (5) soggetti a fenomeni di marea. Sono da ritenersi suscettibili di scavi localizzati i ponti che: (a) mostrano evidenze di erosione localizzata alla base delle pile oppure hanno mostrato di essere soggetti a fenomeni di scavo durante gli eventi di piena osservati nel passato; (b) sono posti su letti fluviali erodibili e sia contemporaneamente verificata una o più delle seguenti condizioni: le fondazioni non sono profonde; l'impalcato è realizzato con schemi isostatici anziché iperstatici; le luci sono sottodimensionate in rapporto al potenziale trasporto di detriti e materiale flottante ad opera della corrente; (c) sono posti su corsi d'acqua caratterizzati da elevata capacità di trasporto della corrente, che può essere palesata ad esempio da evidenti fenomeni di erosione o deposito generalizzati lungo il corso dell'alveo, migrazioni d'alveo significative nel recente passato, forti pendenze e velocità della corrente, massiccio prelievo o discarica di inerti nelle vicinanze del ponte e memoria storica di eventi di piena caratterizzati da forte trasporto solido nel passato; (d) sono localizzati su tronchi fluviali nei quali possono verificarsi anomale condizioni di deflusso della corrente, ad esempio nelle vicinanze di importanti confluenze o in corrispondenza di marcate curvature dell'alveo. La FHWA non fornisce criteri oggettivi per la discriminazione fra le classi 2 e 3 (debolmente e fortemente suscettibili di scavo) precedentemente menzionate. La distinzione è quindi soggettiva, una volta valutati i principali fattori di rischio indicati.

Nella seconda fase si prendono in considerazione gli attraversamenti compresi nelle classi 2, 3 e 4 in precedenza descritte e si stabilisce una prima priorità di intervento in base alla vulnerabilità presunta dell'attraversamento, ai rischi potenziali derivanti da un'eventuale collasso del ponte e alla importanza della relativa arteria di comunicazione. In questa fase si compie dunque la valutazione speditiva della vulnerabilità.

Nella terza fase, in base alle priorità stabilite nella fase precedente, è necessario stimare lo scavo potenziale alla base delle strutture in alveo del ponte, utilizzando formule empiriche analoghe a quelle già richiamate in precedenza nella presente nota. La valutazione deve essere condotta in riferimento agli eventi corrispondente a tempi di ritorno pari a 100 e 500 anni. In mancanza di un'attendibile valutazione dell'evento cinquecentenario, si raccomanda di assumere a base dei calcoli di verifica una portata di piena pari a 1.7 volte la portata centenaria. Il massimo scavo potenziale risultante è quindi confrontato con la profondità delle fondazioni, quando questo dato sia disponibile. Ciò permette di classificare il ponte in classi assegnate di rischio. Gli attraversamenti con ignota tipologia di fondazione vengono classificati a parte; nel caso soffrano di erosioni localizzate, da accertare anche con rilievi subacquei, detti ponti devono essere sottoposti ad indagini di campo finalizzate alla definizione del tipo di fondazione presente.

La quarta fase è dedicata alla definizione delle contromisure necessarie alla messa in sicurezza dell'attraversamento. Queste possono includere la posa di protezioni in massi sciolti, la predisposizione di un opportuno sistema di monitoraggio degli scavi, la realizzazione di campagne di ispezione delle fondazioni oppure la messa in atto di un piano di provvedimenti non strutturali che possono ad esempio prevedere il blocco del traffico durante gli eventi di piena.

Nella quinta fase, esaurita l'analisi dei ponti ritenuti a rischio, la FHWA raccomanda di eseguire una valutazione della criticità nei confronti dell'erosione anche per i ponti rimanenti, compresi quelli ritenuti a bassa vulnerabilità.

Come accennato in precedenza, la FHWA non specifica nel dettaglio le procedure da seguire nella fase 2, che necessita di una valutazione preliminare della vulnerabilità all'erosione presunta dell'attraversamento. La FHWA invita semplicemente i singoli stati a sviluppare una propria metodologia che tenga conto delle prerogative specifiche delle singole realtà locali. A titolo di orientamento, viene però suggerito un elenco di quelli che possono essere ritenuti i principali indicatori, desumibili dall'osservazione del sito, utili ad evidenziare situazioni di vulnerabilità dell'attraversamento all'erosione (cfr. Tabella 3).

Gli indicatori di vulnerabilità della FHWA contengono alcuni interessanti elementi di differenziazione rispetto a quelli presi in considerazione dai due metodi precedentemente descritti. Interessante è il riferimento alla presenza di condizioni al contorno di monte o di valle (confluenze o dighe) che possono indurre condizioni di deflusso singolari in prossimità del ponte. La FHWA considera inoltre la possibilità che si verifichi deflusso idrico in pressione nelle luci del ponte, valutando quindi la superficie dell'impalcato potenzialmente esposta alla corrente e la natura dei collegamenti fra l'impalcato e le strutture in alveo dell'attraversamento. E' anche presente un riferimento allo schema statico dell'impalcato, che assegna maggiore vulnerabilità all'erosione agli attraversamenti realizzati con schemi isostatici.

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.

5. CONCLUSIONI

Diversi eventi alluvionali verificatisi nel recente passato 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 dal verificarsi di 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.

L'analisi dell'evoluzione dei predetti eventi ha ormai evidenziato in maniera inequivoca come l'insufficienza idraulica degli attraversamenti esistenti debba in molti casi destare preoccupazione, oltre che per l'ovvio aspetto della sicurezza strutturale dell'opera e dei danni indiretti derivanti dalla sua mancata funzionalità, anche per il possibile aggravamento del livello di rischio idraulico dei territori circostanti. 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.

Di conseguenza, l'esigenza di verificare in maniera estensiva la vulnerabilità idraulica degli attraversamenti fluviali esistenti sul territorio è ormai largamente condivisa in molti paesi avanzati. In tale direzione, per quanto riguarda il nostro Paese, si muove la menzionata direttiva recentemente emanata dall'Autorità di Bacino del Fiume Po, che impone di sottoporre ad una verifica idraulica di dettaglio tutti gli attraversamenti esistenti che ricadono all'interno delle fasce fluviali.

Il numero estremamente elevato di ponti potenzialmente soggetti a rischio idraulico rende però improponibile la realizzazione in tempi ragionevolmente brevi di una verifica approfondita per ognuno di essi. In ragione di tale difficoltà, in alcuni paesi sono state messe a punto procedure speditive per l'individuazione degli attraversamenti soggetti a maggiore criticità, basate sull'impiego di indicatori di vulnerabilità di semplice valutazione. Tali procedure non vanno intese come sostitutive degli studi idraulici di dettaglio, ma servono soltanto a stabilire su vasta scala spaziale le priorità di intervento, consentendo di individuare, almeno in prima istanza, gli attraversamenti maggiormente vulnerabili sui quali andranno concentrati i successivi monitoraggi, studi idraulici di dettaglio e interventi di messa in sicurezza.

La nota ha lo scopo di documentare il lettore sulle principali iniziative intraprese a livello internazionale per far fronte all'esigenza di valutare su larga scala spaziale la vulnerabilità degli attraversamenti fluviali esistenti. L'analisi effettuata ha consentito di evidenziare gli indicatori parametrici e non parametrici utilizzati in tre procedure di analisi speditiva della vulnerabilità dei ponti, di discutere le potenzialità di utilizzo e le principali limitazioni delle suddette procedure, anche in vista di un loro possibile adattamento finalizzato a renderle maggiormente fruibili nel contesto nazionale.

La discussione ha evidenziato la necessità di utilizzare procedure fortemente strutturate, codificate in modo da limitare l'arbitrarietà conseguente al giudizio soggettivo del tecnico che esegue le analisi sui singoli manufatti. L'esame effettuato ha anche evidenziato l'opportunità di utilizzare un elevato numero di indicatori, in modo da prendere in considerazione il maggior numero di evidenze di vulnerabilità riscontrabili nella molteplicità delle possibili situazioni. Per contro, ciò pone il problema di pesare adeguatamente l'informazione che scaturisce dai singoli indicatori, in modo da ottenere un indice di valutazione complessiva delle condizioni di sicurezza dell'opera.

Quest'ultima operazione, sia in considerazione del numero che della diversa natura degli indicatori, si presenta piuttosto complessa, talché lo sviluppo di una procedura di valutazione speditiva non può che scaturire da una serie di verifiche delle stime ottenute per attraversamenti che hanno palesato in passato, o che palesano nel presente, problemi conclamati di vulnerabilità. Ne consegue che l'adattamento di una procedura esistente, sviluppata per altri contesti geografici, deve necessariamente essere preceduto da un'operazione di taratura basata su un'estensiva analisi delle sue prestazioni con riferimento al contesto di interesse, anche al fine di provvedere agli opportuni adattamenti.

In definitiva, la raccolta di un'ampia documentazione di casi storici di attraversamenti interessati da eventi alluvionali costituisce il presupposto indispensabile per lo sviluppo di attendibili procedure di valutazione speditiva della vulnerabilità idraulica dei ponti fluviali. Ciò suggerisce l'opportunità di

prevedere per il futuro lo sviluppo di 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.

Si ringrazia il Dott. Domenico Tropeano, Direttore dell'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica nel bacino padano di Torino, per il materiale documentale cortesemente messo a disposizione.

6. BIBLIOGRAFIA

- 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.
- Breusers, H.N.C., Raudkivi, A.J. (1991) – *Scouring*, 152 pp., Balkema, Rotterdam.
- De Falco F., Mancini M., Gentile M. – 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 *L'ingegneria naturalistica nella sistemazione dei corsi d'acqua*, a cura di U. Maione e A. Brath, Atti del corso di aggiornamento, 5-9 ottobre 1998, pp. 333-362, Editoriale BIOS, Cosenza.
- 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*.

DIDASCALIE DELLE FIGURE

Figura 1 – Alluvione sul Fiume Mississippi (1993).

Figura 2 – Ostruzione delle luci di un ponte operata dal materiale vegetale flottante trasportato dalla corrente (Fiume Belbo a S. Stefano Belbo, Piemonte alluvione del novembre 1994).

Figura 3 – Elementi strutturali dei manufatti di attraversamento danneggiati a seguito di eventi alluvionali (dati desunti da Ballio et al., 1998).

Figura 4 – Cause di danno primario subito dai ponti (dati desunti da *Ballio et al.*, 1998).

Figura 5 – Esempio di crollo parziale di un manufatto di attraversamento dovuto ad un fenomeno di erosione localizzata alla base di una pila.

Figura 6 – Erosione localizzata alla base delle pile dei ponti ed effetto di livellamento ad opera del pelo libero della corrente.

Figura 7 - Cedimento di una pila del ponte sul Fiume Secchia in località Gatta (Emilia-Romagna) dovuta ad erosione localizzata (piena settembre 1992).

Figura 8 – Rappresentazione schematica del campo di moto e del processo di escavazione localizzata in corrispondenza di una pila di ponte.

Figura 9 – Effetto della presenza di detriti sull'erosione localizzata alla base delle pile dei ponti.

Figura 10 – Effetto della migrazione dell'alveo sull'erosione alla base delle fondazioni del ponte.

Figura 11 – Evoluzione temporale dell'escavazione alla base delle pile dei ponti, in condizioni di presenza e assenza di trasporto solido.

Figura 12 – 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 $Fr=0.3$.

Figura 13 – Vista laterale dell'alveo del modello in scala ridotta del nuovo attraversamento del Fiume Reno nella variante di valico dell'autostrada A1 in località Sasso Marconi, durante una prova con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo (Laboratorio di Ingegneria Idraulica dell'Università degli Studi di Bologna, 1999).

Figura 14 – Vista di una delle pile del nuovo attraversamento del Fiume Reno nella variante di valico dell'autostrada A1, durante una prova con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo (Laboratorio di Ingegneria Idraulica dell'Università degli Studi di Bologna, 1999).

**Tabella 1 – Indicatori di vulnerabilità idraulica degli attraversamenti fluviali
(Procedura Hydraulic Research Ltd)**

Erosione generalizzata dell'alveo (<i>DG</i>)	Altezza idrica della corrente
	Restringimento dell'alveo di magra ad opera del ponte
	Restringimento dell'alveo di piena ad opera del ponte
	Curvatura del fiume
	Posizione delle spalle o delle pile in alveo nei riguardi di eventuali curve dell'alveo
	Granulometria del materiale d'alveo
Erosione localizzata dell'alveo (<i>DL</i>)	Larghezza della pila
	Altezza idrica della corrente
	Angolo di incidenza della corrente rispetto alla pila
	Forma del rostro della pila
Vulnerabilità delle fondazioni (<i>FQ</i>)	Granulometria del materiale d'alveo
	Profondità delle fondazioni
Caratteristiche generali dell'alveo (<i>TR</i>)	Capacità portante del terreno di fondazione
	Stabilità generale del corso d'acqua
	Stabilità degli argini
	Pendenza media dell'alveo di monte

**Tabella 2 – Indicatori di vulnerabilità idraulica degli attraversamenti fluviali
(Procedura United States Geological Survey)**

Indicatore	Alternative previste (in ordine crescente di vulnerabilità)
Materiale d'alveo	7 alternative: calcestruzzo; roccia; massi e ciottoli; ciottoli e ghiaia; ghiaia; sabbia; alluvionale ignoto; limo e argilla.
Riduzione della larghezza d'alveo al ponte	5 alternative con percentuali crescenti da 0% a 100%.
Maturità dell'alveo	6 livelli alternativi
Protezioni d'alveo	4 alternative a seconda che l'alveo sia interamente o parzialmente protetto oppure non protetto.
Numero di pile in alveo	3 alternative fra 0 e maggiore di 2
Numero di pile in alveo inclinate rispetto alla direzione della corrente	3 alternative fra 0 e maggiore di 2
Angolo di incidenza massimo della corrente rispetto alle pile	6 alternative con angoli crescenti fra 0° e maggiore di 60°
Collocazione di ciascuna spalla	3 alternative: esterne all'alveo di piena, esterne all'alveo di magra, interferenti col deflusso di magra
Angolo di incidenza della corrente rispetto alle spalle	6 alternative con angoli crescenti fra 0° e maggiore di 60°
Tipo di materiale di ciascuna sponda	Come materiale d'alveo
Erosioni di sponda	4 alternative da assenza di erosione; a presenza di erosioni molto marcate.
Percentuale di copertura vegetale arborea su ciascuna sponda	5 alternative con percentuali decrescenti da 100% a 0%
Angolo di incidenza della corrente rispetto alle sponde	6 alternative con angoli crescenti fra 0° e maggiore di 60°
Percentuale di area delle luci del ponte ostruita da detriti solidi	5 alternative con percentuali crescenti da 0% a 90%
Distanza di eventuale curve dell'alveo a monte del ponte	4 alternative da distanze maggiori di 30 m fino a 0 m.
Presenza di erosioni marcate in corrispondenza delle pile	2 alternative: presenti; non presenti.

**Tabella 3 – Indicatori di vulnerabilità idraulica degli attraversamenti fluviali
(Procedura Federal Highway Administration)**

Tronco fluviale di monte	
Argini	Presenza di smottamenti, lesioni arginali, lesioni alle protezioni arginali.
Alveo principale	Presenza di barre pronunciate, depositi di detriti, isole; canale principale non allineato con l'asse dell'alveo; erosione o deposito generalizzati, migrazioni d'alveo; cambi repentini della geometria dell'alveo.
Golene	Evidenze di deflusso frequente nelle golene, di livello del pelo libero superiori alle quote stradali, restringimento delle golene.
Detriti	Presenza di significative quantità di detriti potenzialmente movimentabili nell'alveo a monte del ponte.
Altre caratteristiche	Presenza di confluenze significative a monte del ponte, dighe, o altre condizioni che potrebbero creare condizioni di deflusso particolari in prossimità dell'attraversamento.
Ponte	
Strutture in alveo	Evidenze di erosione localizzata attorno alle pile o alle spalle. Erosioni al piede del rilevato di approccio al ponte, piano di posa delle fondazioni o pali di fondazione messi in luce dall'erosione. Presenza significativa di detriti attorno alle pile. Danni alle protezioni del ponte.
Impalcato	Evidenze di deflusso in pressione nelle luci del ponte. Collegamenti fra l'impalcato e le strutture in alveo. Estensione della superficie dell'impalcato potenzialmente esposta al deflusso. Presenza di detriti nell'impalcato. Impalcato realizzato con schemi isostatici.
Protezioni d'alveo	Evidenze di inefficienza di eventuali protezioni in massi sciolti. Condizioni delle eventuali protezioni arginali. Danneggiamento di eventuali protezioni delle pile e altri manufatti atti a mitigare l'impatto fra la corrente e le pile.
Luci del ponte	Ampiezza ridotta delle luci in rapporto alla portata di piena. Evidenza di fenomeni di scavo generalizzato. Presenza di barre o depositi di detriti nell'alveo fra le luci.
Tronco fluviale di valle	
Argini	Come tronco fluviale di monte
Alveo principale	Come tronco fluviale di monte
Golene	Evidenze di deflusso parzializzato nelle golene dovuti al restringimento operato dal ponte. Evidenze di difficoltà nel deflusso dovute a vegetazione o detriti. Evidenze di fenomeni di turbolenza.
Altre caratteristiche	Presenza a valle di dighe, confluenze significative.



Figura 1 – Alluvione sul Fiume Mississippi (1993)



Figura 2- Ostruzione delle luci di un ponte operata dal materiale vegetale flottante trasportato dalla corrente (Fiume Belbo a S. Stefano Belbo, Piemonte alluvione del novembre 1994)

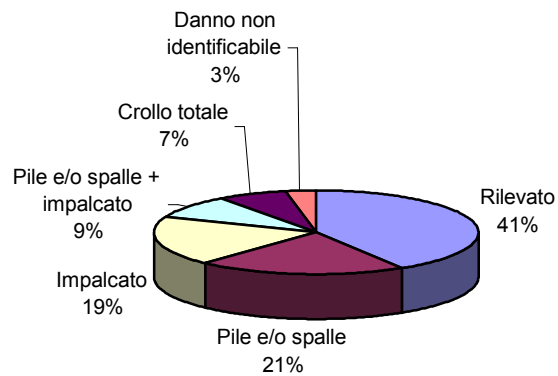


Figura 3 – Elementi strutturali dei manufatti di attraversamento danneggiati a seguito di eventi alluvionali (dati desunti da *Ballio et al.*, 1998)

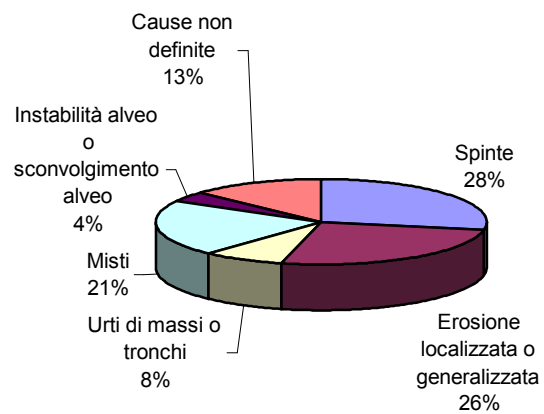


Figura 4 – Cause di danno primario subito dai ponti (dati desunti da *Ballio et al.*, 1998)



Figura 5 – Esempio di crollo parziale di un manufatto di attraversamento dovuto ad un fenomeno di erosione localizzata alla base di una pila

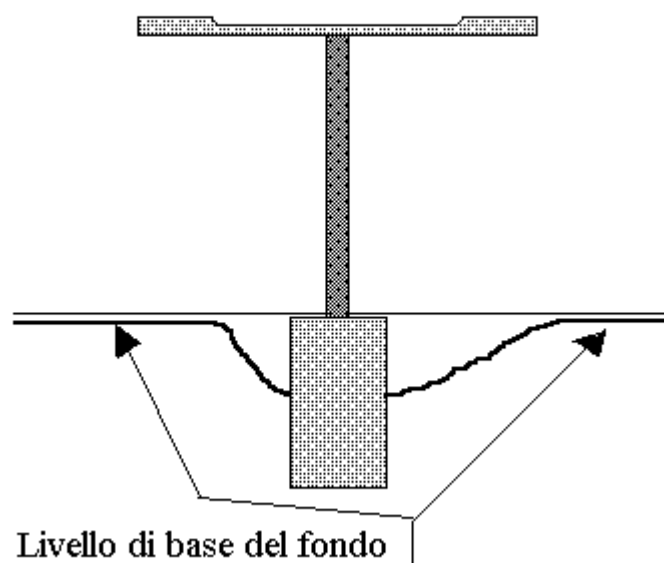


Figura 6 – Erosione localizzata alla base delle pile dei ponti ed effetto di livellamento ad opera del pelo libero della corrente



Figura 7 - Cedimento di una pila del ponte sul Fiume Secchia in località Gatta (Emilia-Romagna) dovuta ad erosione localizzata (piena settembre 1992)

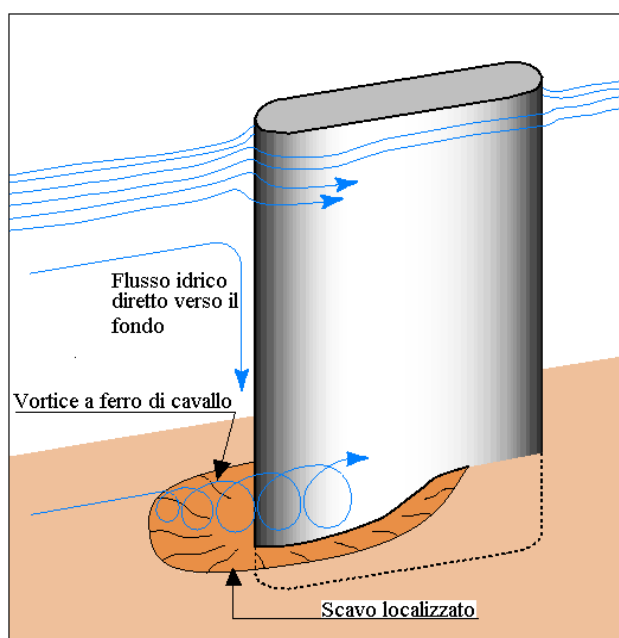


Figura 8 – Rappresentazione schematica del campo di moto e del processo di escavazione localizzata in corrispondenza di una pila di ponte

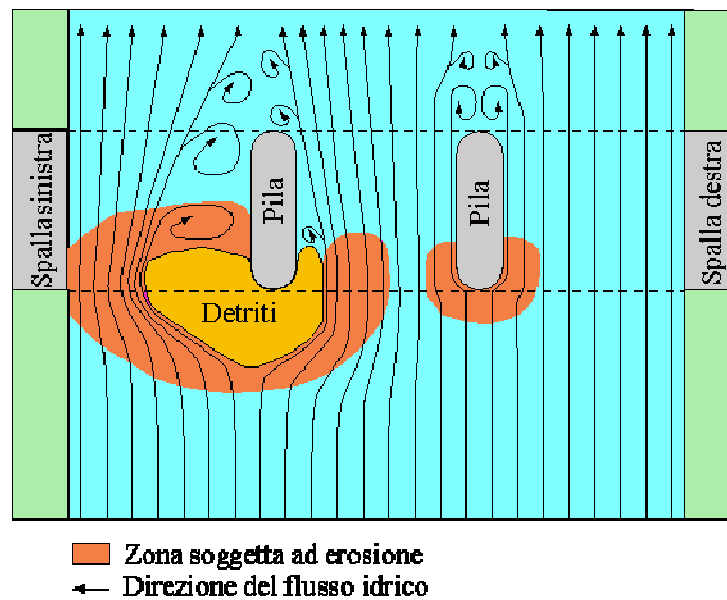


Figura 9 – Effetto della presenza di detriti sull'erosione localizzata alla base delle pile dei ponti

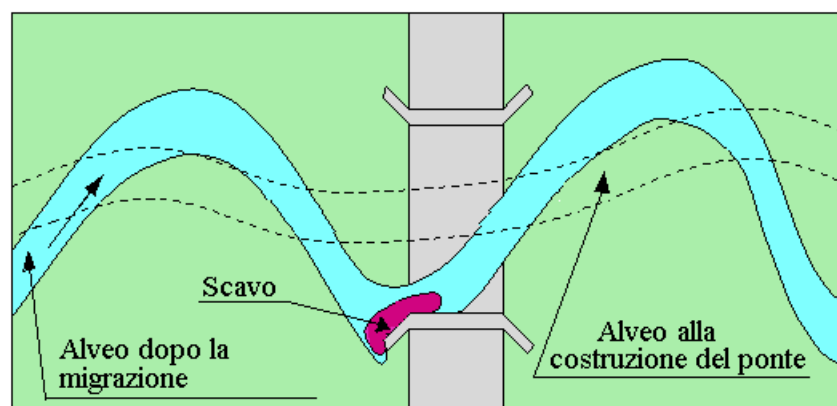


Figura 10 – Effetto della migrazione dell'alveo sull'erosione alla base delle fondazioni del ponte

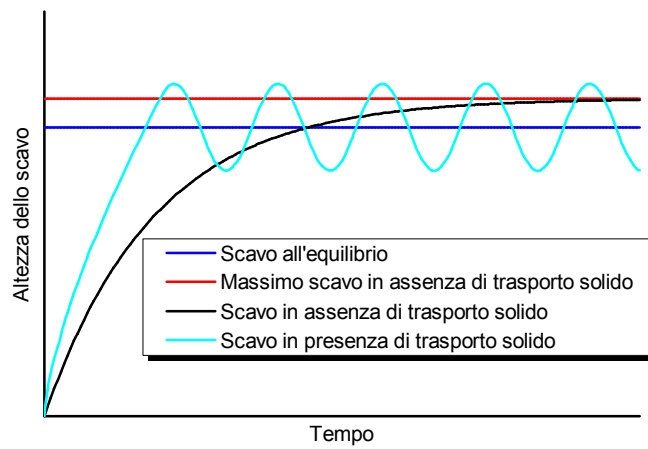


Figura 11 – Evoluzione temporale dell’escavazione alla base delle pile dei ponti, in condizioni di presenza e assenza di trasporto solido

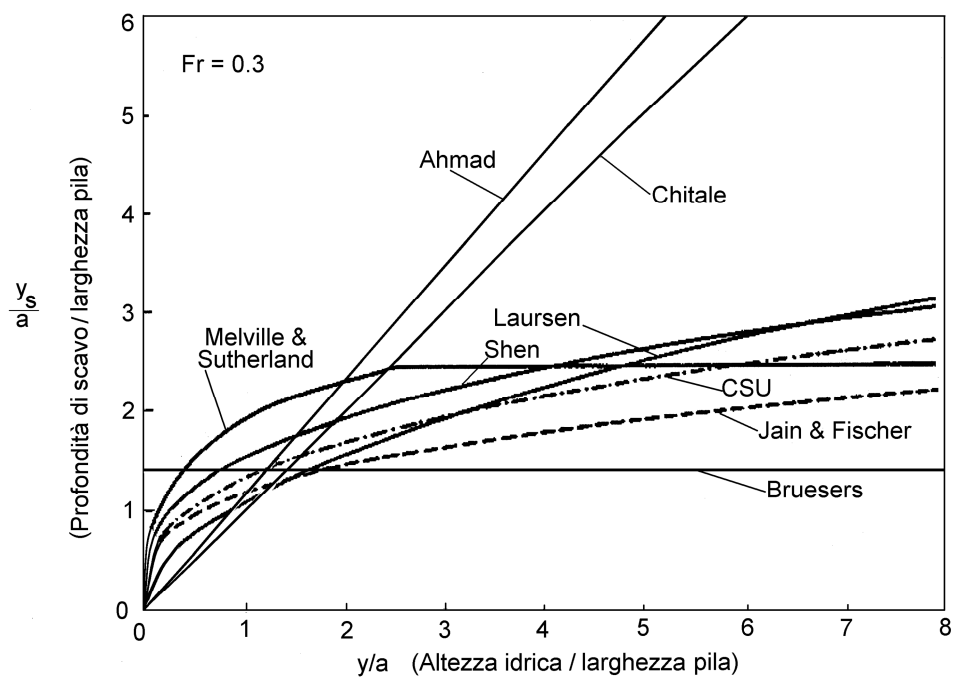


Figura 12 – Valori della profondità di scavo di equilibrio alla base di una pila di geometria assegnata ricavati dall’applicazione di alcune delle formule di letteratura per numero di Froude $Fr=0.3$.



Figura 13 – Vista laterale dell'alveo del modello in scala ridotta del nuovo attraversamento del Fiume Reno nella variante di valico dell'autostrada A1 in località Sasso Marconi, durante una prova con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo (Laboratorio di Ingegneria Idraulica dell'Università degli Studi di Bologna, 1999).



Figura 14 – Vista di una delle pile del nuovo attraversamento del Fiume Reno nella variante di valico dell'autostrada A1, durante una prova con portata pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ nel prototipo (Laboratorio di Ingegneria Idraulica dell'Università degli Studi di Bologna, 1999).

