

Studio sperimentale delle forme delle pile dei ponti

E. BUFFONI - N. CONTI

La progettazione e la manutenzione di un ponte è fortemente condizionata dalla presenza in alveo delle pile dell'attraversamento stesso. Nel corso d'acqua compreso tra la zona a monte e a valle del ponte insorge così la comparsa di una sezione contratta in cui si realizza un notevole incremento di velocità della corrente liquida che determina l'erosione sia del fondo sia delle pareti dell'alveo.

Il fenomeno di rigurgito e di conseguenza quello di scalzamento risulta, poi particolarmente accentuato dall'eventuale presenza dei materiali trasportati dalle piene che si depositano a monte della pila elevando il livello di rischio.

Uno degli obiettivi del presente studio sarà proprio quello di evidenziare che tra le problematiche che occorre analizzare nella progettazione di un ponte, particolare importanza assumono gli effetti che generalmente si possono determinare a seguito dell'inserimento negli alvei delle pile, come lo scalzamento delle fondazioni il quale risulta principalmente dovuto ad un caratteristico fenomeno idraulico localizzato del rigurgito.

Queste tematiche si esporranno in relazione alla forma della pila in modo così da poter fare delle considerazioni e sottolineare la forte differenza tra il profilo tipo Joukowski e Fuhrmann Simmetrico rispetto alla pila cilindrica, rettangolare e rettangolare con rostri triangolari di 60°.

Parole chiave: Ponti, pile dei ponti, erosione del fondo.

1. PREMESSA

L'influenza di una pila di un ponte sulla corrente fluviale è particolarmente vincolante sia per la progettazione che per la manutenzione di un attraversamento. Il *rigurgito* provocato dalla presenza delle pile di un ponte va attentamente valutato al fine di garantire un opportuno margine di sicurezza per le zone limitrofe alla struttura. Così pure l'*erosione* localizzata che si verifica alla base delle opere di fondazione in alveo necessita adeguato controllo: gli effetti erosivi si producono a causa dell'aumento della velocità della corrente e dei conseguenti fenomeni di turbolenza che si instaurano in corrispondenza della sezione del ponte [10]. L'asportazione di materiale dalla base delle pile e delle spalle può creare problemi di stabilità alla struttura, conducendo allo scalzamento della fondazione.

Questi argomenti sono di particolare interesse per Convegni di Idraulica e Costruzioni Idrauliche e di centri di studio specifici come il CIRF (Centro Italiano per la riqualificazione fluviale); numerosi sono poi i casi di studio e sperimentazione provenienti dalle varie Università italiane e non solo. Sempre maggiori sono i Convegni mondiali, dove gli studi fatti sui casi nazionali vengono presentati ai colleghi stranieri, come nel caso del VI Simpósio Italo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

L'importanza del tema trattato si traduce anche nella realizzazione di apparecchiature tecniche, premiate da associazioni ambientaliste, che permettono di monitorare in tempo reale l'erosione localizzata alla base delle pile dei ponti.

Da un lato la continua ricerca di nuovi materiali e tipologie costruttive ha permesso di coprire luci sempre maggiori e realizzare attraversamenti sempre più maestosi, ma dall'altro il limitato studio degli effetti idraulici prodotti dalle pile e dalle spalle dei ponti nei corsi d'acqua ha reso visibile le due conseguenze maggiori già menzionate: il

fenomeno di rigurgito per il restringimento di sezione e l'erosione in corrispondenza delle pile e delle spalle in alveo.

I danni sui ponti sono uno dei dissesti più frequenti nel corso delle piene. Le tipologie ricorrenti sono il cedimento delle pile o delle spalle, la distruzione dei rilevati di accesso e la lesione dell'impalcato. Le più importanti sollecitazioni idrodinamiche sono rappresentate dallo scalzamento delle fondazioni delle pile o delle spalle, la trascinazione e/o erosione dei rilevati di accesso e sollecitazioni della struttura per cause diverse (insufficienza delle luci, ostruzione a causa del materiale trasportato) [2]; [5].

Pertanto uno studio minuzioso sull'effetto prodotto da una pila in alveo dovrà analizzare i seguenti aspetti fondamentali.

1. la scia vorticoso prodotta a valle della pila, che si traduce nella valutazione del Coefficiente di Resistenza Sperimentale;
2. il vortice "a ferro di cavallo", situato a monte della pila;
3. l'erosione attorno alla pila, provocata principalmente dai vortici sopra menzionati.
4. eliminare il "vortice a ferro di cavallo" tramite una forma opportuna.

L'inserimento delle pile nel corso d'acqua provoca, infatti, una contrazione della sezione liquida producendo dei vortici, nonché una modifica del pelo libero [7]; [8].

Di rilevante interesse è lo studio dell'erosione del fondo per la stabilità dell'intera opera; infatti, l'asportazione progressiva della terra dal sito, con l'andare del tempo, potrebbe causare il cedimento delle pile con conseguente collasso delle campate che su di esse poggiano. Si pensò quindi di ridurre il fenomeno di scalzamento dotando le pile di particolari elementi aventi forma arrotondata denominati *rostri*, i quali avrebbero dovuto limitare la discontinuità nella corrente e l'insorgere di vortici e di scie che sono la causa del rigurgito e dunque delle ero-

sioni. Nel tempo gli ingegneri si resero conto che il vantaggio ottenuto non era quello atteso: la forma della pila non era ancora "perfetta".

Con il presente lavoro si metterà in evidenza che quando la direzione della corrente del corso d'acqua è ben definita ed invariabile risulta conveniente adottare pile con profili *alari*, in particolare quelli ricavati da Joukowski. Questi profili godono di proprietà idrodinamiche molto importanti: essi presentano una resistenza minima alla corrente, limitando al massimo la formazione di vortici e di scie [3].

In letteratura, però, viene approfondito il comportamento di una pila con profilo Joukowski per quanto riguarda gli effetti sulla scia vorticoso provocata a valle dalla pila stessa (e quindi il Coefficiente di Resistenza Sperimentale), mentre ben poco viene detto a riguardo dell'erosione al piede. Da qui la necessità di realizzare un valido modello a fondo mobile che, a parità di condizioni idrauliche, permetta un confronto tra pile di forme diverse: cilindrica, rettangolare, rettangolare con rostri triangolari di 60° e profilo di Joukowski. Dall'osservazione dello scalzamento al piede, il comportamento migliore non è attribuibile alla pila tipo Joukowski bensì a quella coi rostri, la quale, di contro, ha una notevole influenza sulla corrente. Si intuisce quindi la necessità di un compromesso e perciò l'introduzione di una nuova "struttura": pila con profilo di Fuhrmann Simmetrico.

Obiettivo principale del presente lavoro è pertanto uno studio sperimentale delle forme delle pile dei ponti.

2. DESCRIZIONE DELLA SPERIMENTAZIONE.

L'attività di sperimentazione è stata svolta nei mesi che vanno da maggio ad ottobre dell'anno 2007, presso il Dipartimento di Idraulica, della facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Pisa.

Il modello idraulico è stato realizzato secondo la similitudine di Froude, con elevato numero di Reynolds; nel caso in esame è stata scelta una scala geometrica indicativa di 1:100.

Il modello che è stato utilizzato per le varie esperienze è costituito da una canaletta lunga nel totale 9,10 m, di larghezza ed altezza interna di 0,50 m e di pendenza nulla. La struttura è in metallo con pareti in vetro. La parte iniziale della canaletta (di lunghezza 2,10 m) termina con quattro griglie a nido d'ape che garantiscono una diffusione uniforme del liquido in ingresso. La canaletta viene alimentata da una vasca di testata, dove vi è immessa una condotta munita di saracinesca di regolazione manovrabile manualmente. La condotta di alimentazione proviene da un serbatoio posto sulla torre piezometrica, dotato di uno sfioratore di grandi dimensioni in grado di mantenere così il carico costante per tutta la durata delle esperienze. Nella sezione terminale della canaletta vi è una paratoia piana, anch'essa manovrabile a mano, che permette di regolare il livello liquido all'interno della struttura. La vasca di raccolta, situata alla fine del modello, serve per convogliare le acque, tramite un sistema di canalette, nella vasca di aspirazione delle pompe.

La misura della velocità dell'acqua è stata ese-

guita per mezzo dell'apparecchiatura Laser Doppler Anemometry.

Il Laboratorio del Dipartimento di Idraulica della Facoltà di Ingegneria di Pisa possiede un velocimetro con laser He-Ne (Elio e Neon), che emette una lunghezza d'onda di 0,6328 micron.

Il LDA fornisce un valore di velocità puntuale ogni 10 secondi come media dei valori di un intervallo di tempo precedentemente da noi fissato. Questo strumento risulta inoltre totalmente non invasivo perché, attraverso le pareti trasparenti, nella corrente arrivano soltanto i due raggi laser.

I modelli di pile che sono stati realizzati ed utilizzati per il presente studio sono cinque: pila cilindrica, rettangolare, rettangolare con rostri triangolari inclinati di 60°, pila con profilo di Joukowski e con profilo di Fuhrmann Simmetrico.

Il modello di pila cilindrica è stato realizzato in PVC nero. Il diametro è di 2 cm che in scala geometrica corrisponde ad una pila-prototipo di 2 m. Il modello di pila rettangolare è stato realizzato in marmo bianco comune di Carrara. Le dimensioni in pianta sono di 2 cm di larghezza e 14 cm di lunghezza. La pila con rostri è stata realizzata di metallo; la larghezza in pianta è chiaramente uguale a quella della pila rettangolare ed al diametro di quella cilindrica. La distanza tra le punte dei rostri è ancora di 14 cm mentre i rostri sono triangoli equilateri, quindi con angoli interni di 60°. La pila con profilo di Joukowski è di legno, con una larghezza massima di 2 cm ed una lunghezza di 14 cm. La pila con profilo di Fuhrmann Simmetrico è di metallo, come la piastra di base, con una larghezza massima di 2,2 cm ed una lunghezza di 15 cm.

3. VALUTAZIONE DEL COEFFICIENTE DI RESISTENZA SPERIMENTALE IN RELAZIONE ALLA FORMA DELLA PILA

L'influenza di una pila in alveo è direttamente correlabile al vortice di scia provocato. Questo argomento, apparentemente complesso, può essere semplicemente connesso ad un parametro adimensionale chiamato *Coefficiente di Resistenza Sperimentale*.

Una pila in alveo è interessata da una forza (D) che gli viene trasmessa dal fluido in movimento. La correlazione tra il Coefficiente di Resistenza Sperimentale (C_D) e la forza D è espressa dalla seguente [7]:

$$D = C_D \cdot d \cdot b \cdot y \cdot \frac{U^2}{2 \cdot g} \quad (1)$$

dalla quale si ricava il C_D .

Nell'espressione (1) si distinguono:

- D: la forza che il fluido trasmette alla pila;
- C_D : il Coefficiente di Resistenza Sperimentale;
- d: la larghezza trasversale della pila;
- b: la lunghezza del corpo nella direzione dell'asse z;
- y: il peso specifico dell'acqua (1000 kg/mc);
- U: la velocità di moto uniforme che si registra a monte e
- g: l'accelerazione di gravità (9,81 m/s²).

La forza totale su di un corpo posizionato in un flusso di un fluido in movimento può essere calcolata essenzialmente con due metodi diversi: il primo prevede l'applicazione del teorema della quantità di moto, mentre il secondo passa attraverso la realizzazione dei profili di velocità a monte e a valle della pila. Nel presente studio è stato applicato il secondo metodo che consiste nel determinare il *total o profile drag*, cioè la forza totale su di un corpo investito dalla corrente, a partire dalla distribuzione di velocità in scia. » stato quindi applicato il cosiddetto Pitot Traverse Method [4].

La formula che viene utilizzata per la determinazione della forza è valida solo per opportune ampie distanze dal corpo. In accordo con questo la forza D (Drag) sulla pila si ottiene dalla seguente espressione:

$$D = b \cdot \rho \cdot \int_{y=-\infty}^{+\infty} u(U_{\infty} - u) dy \quad (2)$$

dove:

b denota la lunghezza del corpo nella direzione dell'asse z ;

U_{∞} : la velocità di moto uniforme che si registra a monte;

$u(y)$ si riferisce alla distribuzione di velocità di scia, cioè a valle e

ρ : la densità dell'acqua.

L'integrale deve essere sviluppato ad una distanza dal corpo tale per cui la pressione statica nella sezione di misura risulti uguale a quella della corrente indisturbata. Nel momento in cui tale limite non venga rispettato, non è più possibile applicare la formula sopra scritta e si presenta la necessità di modificarla. Il termine di correzione è tanto più apprezzabile quanto più vicini ci troviamo al "punto di chiusura" del profilo della pila e quindi risulta molto importante avere una sua espressione molto precisa. Tali termini di correzione furono individuati per primi da A. Betz [3] e poi da B. M. Jones [4].

Chiaramente le condizioni di rilievo della forza D cambiano in funzione delle condizioni di velocità e viscosità del fluido, perciò ad ogni valore di D , e quindi del coefficiente C_D , è stato affiancato il corrispondente valore del numero di Reynolds, calcolato secondo la seguente:

$$Re = \frac{U \cdot d}{\nu} \quad (3)$$

dove:

U : la velocità di moto uniforme a monte del corpo

d : la dimensione trasversale del corpo (diametro del cilindro, larghezza del rettangolo e del profilo di Joukowski) e

ν : la viscosità cinematica.

Presso il Dipartimento di Idraulica della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, sono stati fatti i rilievi di velocità mediante apparecchiatura Laser Doppler Anemometry della corrente liquida a monte e a valle di una pila posizionata all'interno di una canaletta del Laboratorio. Scopo dell'operazione è stato quello di tracciare il profilo di

velocità a monte e a valle della pila generica. Quindi sono stati misurati i valori di velocità in diversi punti in senso trasversale alla corrente per poi interpolarli ed ottenere così il profilo di velocità. Il rilievo è stato fatto a 3 cm a monte ed a valle dell'estremità della generica pila.

Come abbiamo già detto, il LDA è uno strumento che fornisce un valore di velocità puntuale ogni 10 secondi come media dei valori di un intervallo di tempo precedentemente da noi fissato (60 secondi). Pertanto la velocità che assoceremo a ciascun punto corrisponde alla media dei dieci valori rilevati per quel punto. La distanza trasversale di rilievo tra un punto ed un altro dipende dal tipo di pila: 0,5-1 cm per pila cilindrica, rettangolare e con rostri, 0,25 cm per quella con profilo di Joukowski e Fuhrmann Simmetrico: la scelta è stata fatta per percepire la variazione di velocità in maniera più precisa ed accurata, sapendo che per le ultime due pile sarebbe stata limitata ad un tratto ristretto.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dalla campagna di sperimentazione effettuata, trascurando di riportare i dati raccolti e le rappresentazioni grafiche dei profili di velocità a monte e a valle della generica pila:

Tabella I: risultati sperimentali

| PILA | Esperienza | U_m monte [m/s] | T [°C] | D [N] | C_D | Re |
|---------------|------------|-------------------|--------|----------|--------|------|
| CILINDRICA | 1 | 0,2021 | 18,65 | 4,3484 | 1,044 | 3883 |
| | 2 | 0,2104 | 18,60 | 4,7132 | 1,044 | 4038 |
| RETTANGO-LARE | 1 | 0,2143 | 19,05 | 9,3858 | 2,004 | 4158 |
| | 2 | 0,2244 | 20 | 10,26093 | 1,997 | 4457 |
| CON ROSTRI | 1 | 0,1960 | 18,95 | 7,77778 | 1,984 | 3795 |
| JOUKOWSKI | 1 | 0,1810 | 19,05 | 0,05927 | 0,0177 | 3513 |
| FUHRMANN | 1 | 0,0682 | 21,7 | 0,02547 | 0,0537 | 1441 |

Quindi ad un minor valore del coefficiente C_D corrisponde una minore resistenza alla corrente, dovuta alla limitata formazione di vortici e scie di valle. Nei solidi penetranti la corrente viene quindi accompagnata con gradualità verso la coda in modo da non avere distacchi di vortici, responsabili della depressione che si forma a valle. La pila con profilo di Joukowski presenta la minima resistenza alla corrente, migliore anche di quella con profilo di Fuhrmann. Come previsto il peggiore impatto sulla corrente è quello provocato da pile dai profili tozzi, come quella cilindrica ma ancor più da quelle rettangolari con o senza rostri.

4. CONSIDERAZIONI SUL "VORTICE A FERRO DI CAVALLO"

Il sistema di vortici che si innesca in corrispondenza di una pila di un ponte e, più in generale, di un ostacolo posto in un alveo fluviale, è alquanto complesso e difficile da simulare con modelli matematici o da rilevare con apparecchiature come per esempio il LDA. In particolare, il campo di moto diventa sempre più complesso al progredire dell'evoluzione della fossa d'erosione.

Durante varie esperienze di laboratorio sono stati fatti diversi tentativi per rilevare in termini di velocità il vortice a ferro di cavallo in condizioni di fondo fisso tramite il Laser Doppler Anemometry. Il tentativo è apparso subito estremamente complesso a causa delle ridotte dimensioni del vortice stesso sul fondo rigido: nel caso della pila cilindrica è stata stimata una dimensione verticale del vortice di circa 2-3 mm. In queste condizioni il fascio laser veniva in parte riflesso dalla piastra metallica di base della pila rendendo impossibile la ricerca del segnale da parte dello strumento.

Per comprendere la natura e allo stesso tempo la pericolosità del vortice a ferro di cavallo è stato necessario porci in condizioni di fondo mobile introducendo così la dinamica erosiva. Pertanto è stato osservato che ai piedi delle varie pile di forme diverse, durante il transitorio che stabilisce una portata Q costante nel tempo, si verificano una serie di piccoli scavi attorno alle pile del ponte, dovuti alla formazione del vortice a ferro di cavallo. Durante il processo di erosione attiva la velocità del vortice è tale da rendere la capacità erosiva molto superiore rispetto a quella di deposito all'interno dello scavo che via via si approfondisce. Dunque in questa fase il vortice si esalta e si amplifica fino a raggiungere le condizioni di massime dimensioni; l'aumento del vortice è accompagnato dall'aumento dello scavo attorno alla pila che, una volta raggiunto il massimo, produce una riduzione della velocità del vortice e conseguentemente una diminuzione della sua capacità erosiva. Unitamente all'approfondimento dello scavo alla base della pila, il volume di sedimenti che risulta necessario rimuovere per un approfondimento ulteriore dello scavo è sempre maggiore. Per questo motivo il tasso di erosione, misurato dalla rapidità dell'approfondimento dello scavo, decresce rapidamente.

Tramite la fluorescina sono state effettuate delle visualizzazioni di tale vortice su fondo fisso ottenendo risultati in linea con altri. Secondo alcuni autori (ad esempio Muzzammil et al., 1992, [20]) l'ampiezza del vortice a ferro di cavallo su fondo rigido per alti valori del numero di Reynolds è pari a: dove d è la dimensione trasversale della pila.

Il vortice a ferro di cavallo è un argomento particolarmente importante, oggetto di molti studi al fine di una previsione della profondità di scavo al piede della pila. I modelli elaborati dai diversi autori nei loro studi sono generalmente basati su assunzioni che riguardano alcune delle caratteristiche del vortice stesso durante il processo di scavo e quindi non sono pienamente avvalorati da valide prove sperimentali. Molte volte lo studio sugli aspetti fisici e dinamici del vortice a ferro di cavallo è stato condotto a buon fine per bassi valori del numero di Reynolds ed in particolare nella regione dello strato limite laminare su fondo piano. Le caratteristiche principali del vortice non sono quindi state studiate affondo proprio a causa della sua complessa natura [21]; [22].

La fondazione di una pila di un ponte in un letto di un fiume è spesso molto costosa così che viene presa in considerazione una profondità tale da provvedere alla minima lunghezza di ancoraggio per la sicurezza della fondazione. Da qui la necessità di considerare accorgimenti per ridurre la

profondità di scavo, che permettano quindi di ricorrere a fondazioni meno profonde e poi di ridurre i costi delle pile-fondazioni. Le previsioni della massima profondità di scavo possibile ed il progetto di un appropriato sistema di protezione dallo scavo stesso per le pile di un ponte sono due importanti aspetti dell'ingegneria dei ponti riguardante sicurezza ed aspetti economici. L'azione del vortice a ferro di cavallo stimola la dislocazione dei sedimenti lontano dalle pile e le sue caratteristiche fattezze sarebbero importanti parametri per il progetto di protezioni e per le stime delle profondità di scavo.

Inoltre la dimensione media del vortice D_v è 0,2D e la dimensione orizzontale del vortice, x_0 , è stata trovata da Muzzammil approssimativamente uguale a $x_0=0,4D$. La protezione per lo scavo è necessaria come minimo nella zona attiva del vortice a ferro di cavallo e quindi avrà un diametro di circa $(2x_0+D)=1,8D$. Si potrebbe quindi ipotizzare che con una piastra a collare attorno alla pila di dimensioni $2D$ posizionato a $0,1D$ al di sotto del livello del letto si avrebbe la massima efficacia.

Quindi nel momento in cui lo scavo si sviluppa, il vortice a ferro di cavallo vi affonda completamente e la sua dimensione media cresce linearmente con la profondità dello scavo. La variazione della velocità del vortice e della sua forza con lo sviluppo dello scavo mostra un incremento evolutivo nella parte iniziale mentre indica un decremento nella parte finale dello stato dello scavo. L'espressione della massima profondità di scavo in condizioni di equilibrio consegue dalla variazione di velocità del vortice nel buco dello scavo. In conclusione l'entità dello scavo dipende dalla geometria della pila, dalle caratteristiche dei sedimenti e da parametri del flusso.

5. VALUTAZIONE DELL'EROSIONE ATTORNO ALLA PILA IN FUNZIONE DELLA SUA FORMA

L'erosione operata dalla corrente in corrispondenza delle pile e delle spalle dei ponti rappresenta una delle maggiori cause di cedimenti e danneggiamenti delle strutture poste in alveo [1]. I ponti maggiormente a rischio di erosione sono quelli di più antica costruzione, con pile di dimensioni notevoli e luci molto ridotte, che producono forti gradi di contrazione della corrente e conseguentemente possono esporre le fondamenta a rischi di erosione a causa dell'aumento di velocità e della formazione di vortici. Inoltre le tecniche di fondazione utilizzate prima degli anni '60 si basarono prima su scavi di tipo manuale e poi su perforazioni di tipo pneumatico, inadatte a fornire sufficienti garanzie contro i rischi di scalzamento. Il miglioramento della qualità dei materiali impiegati nel campo delle costruzioni ha permesso di ridurre notevolmente il grado di contrazione della corrente e di costruire fondazioni adeguate [23].

Lo studio dei fenomeni erosivi in un tratto di un corso d'acqua interessato dalla presenza di un ponte è un problema complesso che richiede la considerazione di numerose variabili proprie del tratto considerato, quali:

- curva granulometrica caratteristica del terreno

- geometria della sezione ristretta
- caratteristiche idrauliche della corrente in corrispondenza della portata di progetto
- pendenza media dell'alveo
- caratteristiche dell'ostruzione

Lo studio dell'erosione localizzata attorno alle opere di sostegno di un ponte implica l'individuazione di una relazione funzionale tra le variabili significative appena elencate e la misura dello scavo prodotto dalla corrente attorno alle opere di sostegno.

La presenza di un ostacolo provoca una distorsione locale della corrente con un conseguente aumento della capacità di trasporto solido, e quindi con lo sviluppo di una fossa di erosione. Man mano che tale scavo si sviluppa, il processo erosivo rallenta fino ad una condizione di equilibrio. Il campo di moto è caratterizzato da un elevato livello di turbolenza e da forte tridimensionalità [12].

La tipologia e la conformazione dello scavo che si produce al piede di un ostacolo in alveo dipende essenzialmente dalle sue caratteristiche geometriche (dimensione, forma, etc.) e dalla sua collocazione rispetto alla corrente. Nel caso delle pile, collocate in una posizione centrale rispetto alla corrente lo scavo avrà la forma di un cono rovesciato, a volte con una pianta diversa dalla circolare a seconda, principalmente, dell'angolo di attacco della corrente. Lo scavo ha generalmente pendenze delle superfici laterali circa pari all'angolo di riposo del materiale di cui è costituito il letto. La zona di maggior scavo è di solito collocata sulla faccia a monte della pila. La maggior capacità di deposito misurabile a valle della pila definisce una zona separata da quella di monte con scavi assoluti inferiori.

Nonostante il notevole sforzo di ricerca, la previsione quantitativa dei processi erosivi localizzati risulta ancora affetta da significative incertezze, infatti, a causa del numero elevato dei parametri di controllo per il sistema in esame, si possono riscontrare differenze anche notevoli fra modelli predittivi e risultati sperimentali, così come tra modelli previsionali di differenti autori. La descritta difficoltà di sintesi quantitativa nasce anche dalla mancanza di un adeguato inquadramento fenomenologico: i modelli concettuali proposti in letteratura sono, in generale, fondati su eccessive semplificazioni sia per la descrizione del complesso campo di moto, che per il modello di interazione liquido-solido. Nella letteratura sono stati proposti anche diversi tentativi di modellazione numerica, in cui il campo di moto turbolento ottenuto mediante integrazione delle equazioni del moto viene accoppiato ad un modello di trasporto che tenga conto dell'evoluzione morfologica del fondo (Carravetta et al., 2000; Olsen and Kjellesvig, 1998; Jia, 2001). I risultati ottenuti, seppur promettenti, evidenziano la notevole complessità del problema.

Da qui la necessità di una trattazione sperimentale di laboratorio. Pertanto nel presente paragrafo si riporteranno i risultati ottenuti da prove a fondo mobile in cui sono state posizionati contemporaneamente tutti i modelli di pile in modo così da poter effettuare un confronto fra i diversi scavi nelle medesime condizioni di corrente. Il

raffronto avverrà per mezzo di fotografie ed elaborazioni grafiche.

Per il modello a fondo mobile è stata utilizzata sabbia fine di Torre del Lago di cui ne è stata definita la granulometria mediante la curva granulometrica, che è stata elaborata il giorno 14 giugno 2007 per setacciatura. I setacci utilizzati appartengono alla serie UNI ed hanno le seguenti dimensioni di luce netta: 0,84 ñ 0,42 ñ 0,25 ñ 0,149 ñ 0,088 ñ 0,053. Per una maggiore sicurezza sulla bontà del lavoro eseguito, la curva granulometrica è stata determinata tre volte con un campione di 500 g di sabbia, con i seguenti risultati del trattenuto (g):

Tabella II: Granulometria

| SETACCIO UNI | CURVA 1 | CURVA 2 | CURVA 3 |
|--------------|---------|---------|---------|
| 0,84 | 0 | 0 | 0 |
| 0,42 | 148 | 148 | 118 |
| 0,25 | 219 | 224 | 254 |
| 0,149 | 91 | 96 | 92 |
| 0,088 | 33 | 24 | 28 |
| 0,053 | 7 | 6 | 6 |
| rimanente | 2 | 2 | 2 |

Nella curva granulometrica sopra riportata è stato messo in evidenza il diametro mediano che risulta essere 0,32 mm, che in scala geometrica corrisponde a sedimenti nel prototipo di 32 mm.

Prima di iniziare la prova, è stato accertato, per mezzo del grafico di Shields, che con le condizioni di flusso previste vi fosse movimento dei sedimenti di fondo [24].

Per ciascuna delle tre prove eseguite, sono state fatte fotografie per ognuna delle pile considerate nel modello e per una migliore comprensione sono stati eseguiti i rilievi degli scavi attorno alle pile ed elaborazioni grafiche che, tramite interpolazione dei punti rilevati, ne riportano le curve di livello.

La prima prova con il modello a fondo mobile è stata fatta il giorno 21 giugno 2007. Il primo tratto della canaletta è stato munito di uno spessore in lamiera di 7 cm, cioè della stessa altezza dello strato di sabbia costituente il modello, in modo così da non avere discontinuità in corrispondenza dell'inizio. La prova ha avuto una durata di 3 minuti, con un livello liquido di 119 mm ed una velocità di 17,25 cm/s; la temperatura dell'acqua era 21,8°C.



Fig. 1 - Il modello a fondo mobile visto da monte

La seconda prova con il modello a fondo mobile è stata fatta il giorno 25 giugno 2007. In questo caso le pile confrontate sono state cinque, avendo inserito nel modello la pila con profilo di Fuhrmann Simmetrico, decisione presa dopo aver interpretato i risultati della prima prova. La durata è stata di 6 minuti e 37 secondi, con un livello liquido di 72 mm ed una velocità di 4,01 cm/s; la temperatura dell'acqua era 20,5°C.

La terza prova con il modello a fondo mobile, di geometria analoga alla precedente, è stata fatta il giorno 27 giugno 2007. La prova ha avuto una durata di 1 minuto e 47 secondi, con un livello liquido di 83 mm ed una velocità di 4 cm/s; la temperatura dell'acqua era 21,5°C.

Come abbiamo visto nel paragrafo precedente, il vortice a ferro di cavallo che si forma al piede della pila risulta ben visibile quando l'esperienza viene eseguita su fondo mobile. In questo caso, infatti, è stato possibile osservare il vortice all'interno del buco dello scavo senza bisogno di tracciante od altra particolare tecnica di visualizzazione.

Pertanto è stato accertato che nel caso di pile arrotondate, come per quella cilindrica e profilo tipo Joukowski, si formano i classici e piccoli vortici a ferro di cavallo: uno principale ed uno secondario. Nel caso invece di pila rettangolare, si innescano due vortici controrotanti sugli spigoli che causano l'inizio del notevole scavo al piede della pila.

Notiamo che la pila rettangolare con rostri, con lo spigolo vivo a monte, ostacola lo sviluppo del vortice a ferro di cavallo e questo lo dimostra anche il limitato scavo che si è registrato a fine prova.

La pila con profilo di Joukowski presenta un'erosione a monte simile a quella cilindrica sempre per la presenza del vortice a ferro di cavallo.

Diversa la situazione a valle dove il migliore comportamento è tenuto dalla pila Joukowski. Quella cilindrica registra la peggiore situazione a valle, mentre quella rettangolare e con rostri vedono la massima erosione in punti laterali.

Osservando quindi l'erosione ai piedi delle varie pile e l'evoluzione del vortice a ferro di cavallo abbiamo compreso che la pila che avrebbe avuto il miglior comportamento ai fini dello scavo doveva avere una forma che stringesse insieme la capacità di ostacolare la formazione del vortice a monte, come quella con rostri, ed accompagnasse la corrente a valle come quella di Joukowski. Una pila del genere risulterebbe quindi un compromesso tra il minimo scavo e la minima influenza sulla corrente: la pila con profilo di Fuhrmann Simmetrico risponde giustappunto a questi requisiti.

Per questa ragione la seconda e la terza prova su fondo mobile sono state eseguite nelle stesse condizioni della prima fatta eccezione l'inserimento nel mezzo del modello della pila con profilo di Fuhrmann Simmetrico.

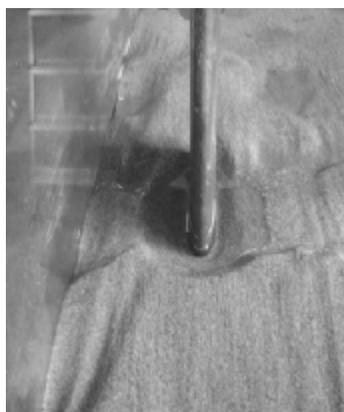


Fig. 2 - Scavo al piede della pila con profilo Joukowski (prima prova): vista da monte.

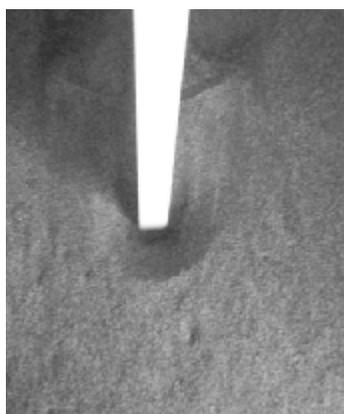
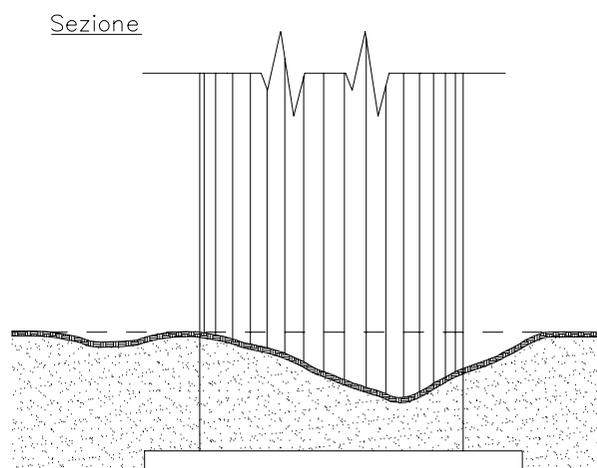
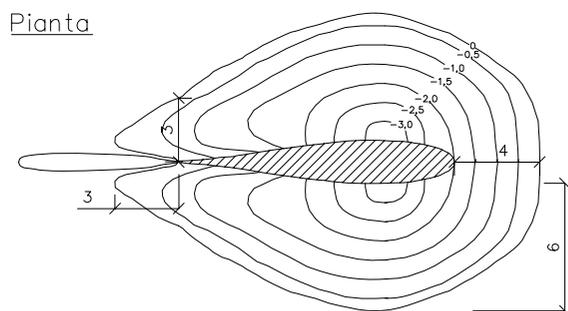


Fig. 3 - Scavo al piede della pila con profilo rettangolare (prima prova): vista da monte.

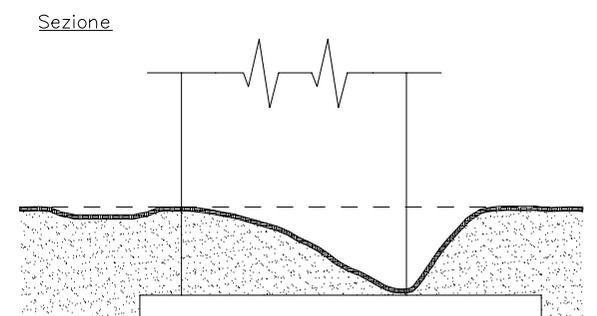
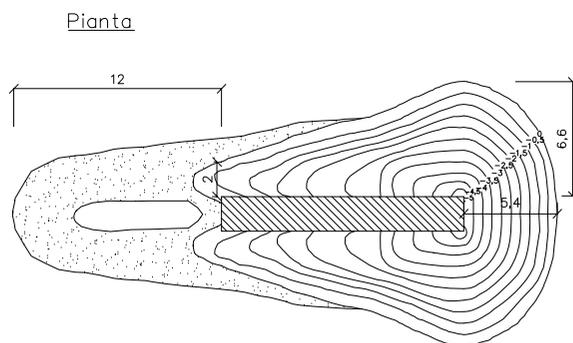




Fig. 4 - Scavo al piede della pila rettangolare con rostri triangolari (prima prova): vista laterale.

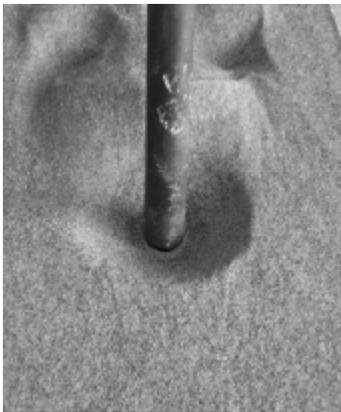
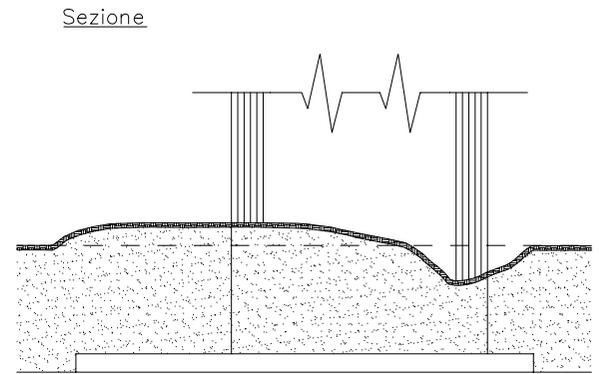
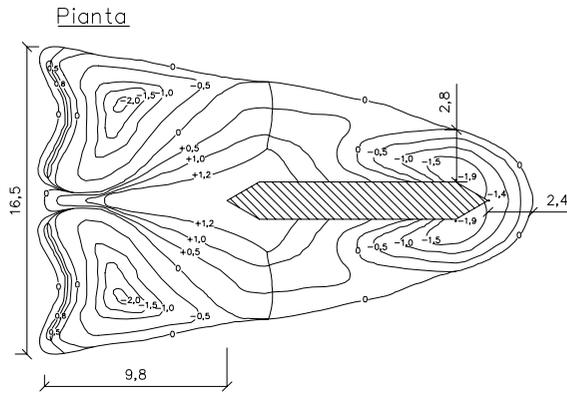


Fig. 5 - Scavo al piede della pila cilindrica (prima prova): vista da monte.

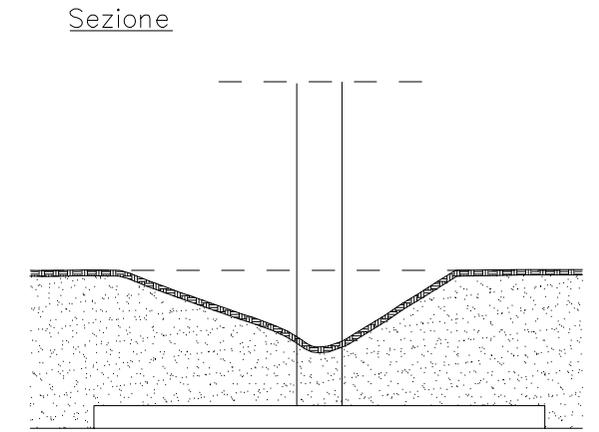
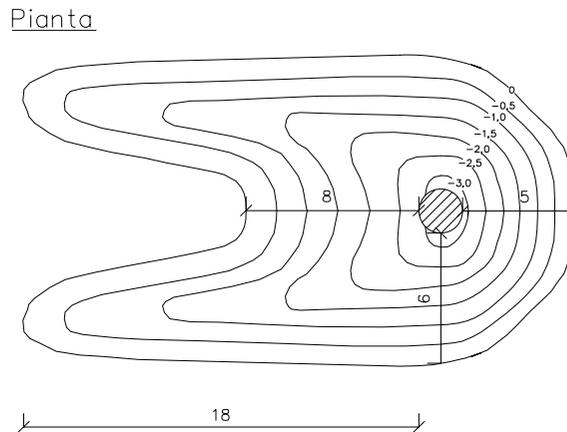
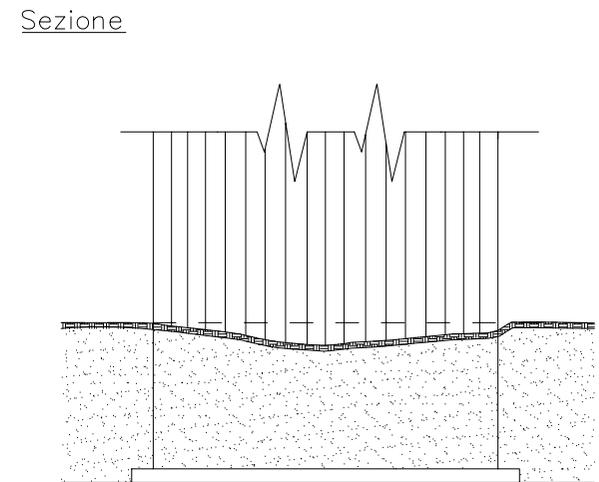
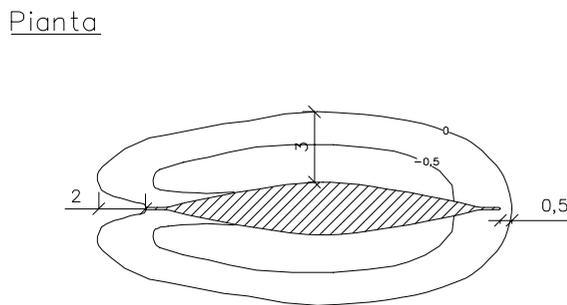


Fig. 6 - Scavo al piede della pila con profilo di Fuhrmann (terza prova): vista laterale. Con la presente foto si riesce ad apprezzare il limitato scavo a monte al piede della pila.



Considerazioni tra l'erosione al fondo e le onde di superficie provocate dalle pile.

Dall'analisi delle prove a fondo mobile e dall'osservazione delle onde in superficie provocate dalle varie pile di forme diverse, abbiamo percepito una correlazione intuitiva tra le onde superficiali e l'erosione al piede della pila: anche se il collegamento non è rigoroso, sembrerebbe esserci una certa parvenza tra quello che si osserva in superficie e quello che succede sul fondo mobile.

Nel caso di pile cilindriche, le onde di superficie hanno messo in evidenza una forte turbolenza laterale e a valle ed il rigurgito provocato dalla pila stessa.

Un simile comportamento si è intuito anche per la pila di Joukowski: il tratto a monte è molto simile tra le due pile e si nota che il massimo abbassamento di livello risulta essere ovviamente in corrispondenza del punto più largo della pila. La corrispondenza con le prove a fondo mobile è pertanto molto evidente: osservando infatti le fo-

tografie riportate nei paragrafi precedenti, la massima erosione coincide con il punto di livello liquido più basso e l'affinità del comportamento superficiale tra le due pile si riscontra anche per quanto riguarda l'erosione di fondo.

Discorso analogo per la pila rettangolare e quella con i rostri: dal confronto si intuisce un netto migliore comportamento della pila con i rostri triangolari cosa che viene confermata dalle prove a fondo mobile. Si comprende inoltre che la massima erosione ce la dovremo aspettare lateralmente, poco più a valle dello spigolo di monte.

Sicuramente migliore il comportamento della pila di Fuhrmann Simmetrica: in questo caso le onde di superficie si sono presentate più limitate sia a monte che a valle, così come l'erosione al piede della pila abbiamo visto essere trascurabile. Abbiamo quindi una forma "filante" come affermano gli ingegneri navali. Nel proseguire questo tipo di ricerche si dovrà quindi far riferimento a forme tipo *ship* che sembrano presentare una influenza trascurabile sul fondo.

6. CONCLUSIONI

L'impatto idraulico di una pila di un ponte su di un corso d'acqua è da sempre stato oggetto di studi, prove ed esperimenti da parte di ingegneri in ogni periodo storico.

I romani furono i primi veri "ricercatori" sulla forma ideale da dare alla pila di un ponte per limitarne l'influenza sul corso d'acqua. Le prime avevano una sagoma analoga a quella di un aratro: si credeva, infatti, che per limitare le resistenze bisognasse sagomare la prua indifferentemente dalla forma a valle, quando invece avremmo ottenuto maggiori risultati elaborando anche la parte posteriore. In seguito a forti erosioni al piede e quindi di crolli dei ponti, il passo successivo fu quello di "accompagnare" la corrente anche a valle mediante rostri triangolari o a volte circolari. L'evoluzione della forma delle pile dei ponti si può ritenere già conclusa nel periodo romano in quanto non ci saranno ulteriori mutamenti nel corso della storia: la pila con rostri sarà quella più utilizzata nel Medioevo ed ancora oggi risulta la più elaborata fra quelle realizzate.

Nei secoli abbiamo avuto una forte evoluzione della tecnica di costruzione di un ponte, affiancata sempre da un'importante sviluppo dei materiali: dal legno, alla muratura, dal calcestruzzo al cemento armato e a quello precompresso, fino all'acciaio.

Tale miglioramento ha interessato quasi esclusivamente la sovrastruttura dei ponti, tant'è che ancora oggi vengono realizzate pile in alveo rettangolari, come in molti ponti medioevali. A volte i viadotti autostradali poggiano su pile cilindriche, le quali hanno un comportamento meno "invasivo" rispetto alle pile rettangolari (anche se raccordate alle estremità) per quanto riguarda il deflusso del corso d'acqua, ma siamo ancora ben lontani dal comportamento che avrebbe una pila con profilo di Joukowski o quella di Fuhrmann Simmetrica.

Il problema dell'erosione al piede viene oggi superato grazie alle nuove tecnologie moderne ed avanzate, per cui si ricoprono luci anche di centi-

naia di metri senza bisogno di alcuna pila in alveo. Inoltre nuovi macchinari permettono di realizzare pali di fondazione al di sotto dei piedritti fino a diverse decine di metri di profondità così da scaricare i carichi della sovrastruttura ai terreni maggiormente resistenti e capacitivi. Pertanto le problematiche connesse con le pile in alveo, quali il rigurgito e l'erosione al piede, passano inevitabilmente in secondo piano, in quanto diminuendo il numero di "ostacoli" nel corso d'acqua si riduce anche il restringimento della sezione e quindi l'effetto del rigurgito ed inoltre con pali di fondazione molto profondi sono concessi erosioni del fondo senza alcune conseguenze per la stabilità dell'attraversamento.

Una pila con profilo di Joukowski presenta una resistenza minima alla corrente, limitando al massimo la formazione di vortici e di scie a valle. In questo caso il C_D è pari a 0,01-0,03. Nel caso invece di pila con profilo di Fuhrmann Simmetrico si ha $C_D=0,05$; per la pila rettangolare e rettangolare con rostri triangolari di 60° è $C_D=2$; mentre nel caso di pila cilindrica il Coefficiente di Resistenza Sperimentale è pari all'unità. Quindi realizzare pile con profili di Joukowski o Fuhrmann vuol dire avere una resistenza idraulica molto piccola e quindi avere un rigurgito molto limitato. Nel caso di ponti costruiti su di una curva del fiume, l'effetto favorevole è ancora più marcato: progettando una pila rettangolare ma anche cilindrica, si provocherebbe un vistoso distacco dei vortici con conseguenti forti escavazioni a valle. Una corretta progettazione dovrebbe adottare invece i profili alari, tipo Joukowski, che consentirebbero di accompagnare la corrente senza evidenti separazioni e quindi con un'influenza minima sull'alveo fluviale.

Il vortice di scia (*wake vortex*) è quindi il principale responsabile dell'erosione a valle della pila, mentre il vortice a ferro di cavallo (*horseshoe vortex*) è la causa maggiore dello scavo al piede a monte della pila stessa. Lo studio su letto rigido rivela che la dimensione media del vortice a ferro di cavallo principale è all'incirca il 20% della dimensione del diametro della pila (D), mentre la velocità tangenziale del vortice è circa il 50% della velocità media del flusso per .

Nel momento in cui il buco di scavo si sviluppa, il vortice a ferro di cavallo vi affonda completamente e la sua dimensione media cresce linearmente con la profondità dello scavo. La variazione della velocità del vortice e della sua forza con lo sviluppo dello scavo mostra un incremento evolutivo nella parte iniziale mentre indica un decremento nella parte finale dello stato dello scavo. L'espressione della massima profondità di scavo in condizioni di equilibrio consegue dalla variazione di velocità del vortice nel buco dello scavo. Comunque il coefficiente dell'equazione dipende dalla geometria della pila, dalle caratteristiche dei sedimenti e da parametri del flusso.

La necessità di un confronto sull'erosione al piede della pila in relazione alla sua forma nelle medesime condizioni idrauliche ha portato quindi alla realizzazione di modelli a fondo mobile in cui sono stati posizionati contemporaneamente tutti i modelli di pile.

Nel caso di pile arrotondate, come per quella cilindrica e profilo tipo Joukowski, si formano i classici e piccoli vortici a ferro di cavallo: uno principale ed uno secondario. Nel caso invece di pila rettangolare, s'innescano due vortici controrotanti sugli spigoli che causano l'inizio del notevole scavo al piede della pila. La pila rettangolare con rostri, data la sua conformazione a monte, ostacola lo sviluppo del vortice a ferro di cavallo e questo lo dimostra anche il limitato scavo che si registra a fine prova.

La pila con profilo di Joukowski presenta un'erosione a monte molto simile a quella cilindrica a causa proprio di quanto scritto sopra sul vortice a ferro di cavallo. Diversa la situazione a valle dove il migliore comportamento è tenuto dalla pila Joukowski. Quella cilindrica registra la peggiore situazione a valle, mentre quella rettangolare e con rostri vedono la massima erosione in punti laterali.

Osservando quindi l'erosione ai piedi delle varie pile e l'evoluzione del vortice a ferro di cavallo si intuisce che la pila col miglior comportamento ai fini dello scavo deve avere una forma che stringa insieme la capacità di ostacolare la formazione del vortice a monte, come quella con rostri, ed accompagni la corrente a valle come quella di Joukowski. Una pila del genere risulta quindi un compromesso tra il minimo scavo e la minima influenza sulla corrente: la pila con profilo di Fuhrmann Simmetrico risponde giustappunto a questi requisiti. Ulteriori prove a fondo mobile hanno dimostrato quanto appena sostenuto.

Dall'analisi delle prove a fondo mobile e dall'osservazione della turbolenza in superficie provocata dalle varie pile di forme diverse, si comprende una correlazione intuitiva tra le onde superficiali e l'erosione al piede della pila: anche se il collegamento non è rigoroso, sembrerebbe esserci una certa parvenza tra quello che si osserva in superficie e quello che succede sul fondo mobile. Infatti il punto di livello liquido più basso coincide proprio con la massima erosione. Anche da questa osservazione si conferma il migliore comportamento della pila di Fuhrmann Simmetrica: in questo caso le onde di superficie sono molto più limitate sia a monte che a valle, così come l'erosione al piede della pila abbiamo detto essere trascurabile. Potremo pertanto avere dei ponti veramente ecologici nel senso più alto del termine, perché l'alveo risentirà, in modo del tutto trascurabile, della presenza del manufatto.

7. BIBLIOGRAFIA.

- ARICI M., SIVIERO E., *Nuovi orientamenti per la progettazione di Ponti e Viadotti*, Atti del corso di aggiornamento professionale Taormina, 28 febbraio - 4 marzo 2005.
- 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.
- BETZ A., *Untersuchung einer Joukowskyschen Tragflache*, ZFM 6, 1915.
- JONES B.M., *The measurement of profile drag by the Pitot traverse method*, ARC RM, 1936.
- BRAITH 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, 07-06-2006, Il Po, Notiziario dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, Serie speciale, All. 1 al n.7.
- BREUSERS H.N.C., RAUDKIVI A.J. (1991), *Scouring*, Balkema, Rotterdam.
- BUFFONI E., *Lezioni di Idrodinamica*, Servizio Editoriale Universitario di Pisa, 2004.
- BUFFONI E., *La natura della turbolenza*, Edizioni ETS, 1999.
- 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.
- EMMETT M., LAURSEN N., TOCH A., *Scour Around Bridge Piers And Abutments*, Iowa Highway Research Board, May 1956.
- ETTEMA R., *Scour at Bridge Piers*. Report No. 216, University of Auckland, School of Engineering, Auckland, New Zeland, 1980.
- FEDERICO F., SILVAGNI G., VOLPI F., Simulazione dell'erosione dei terreni di fondazione di pile di ponti in attraversamento fluviale. In ISCS'99, Italian Society for computer simulation, Yearly Conference, Rome, June 1999.
- FEDERICO F., SILVAGNI G., VOLPI F., *Scour vulnerability of river bridge piers*. Inviata per la pubblicazione su Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002.
- FRANZETTI S., MALAVASI S., PICCININ C., *Sull'erosione alla base delle pile di ponte in acque chiare*. In XXIV CONVEGNO DI
- FUGAZZA M., *Effetti idraulici prodotti dai ponti nei corsi d'acqua*, Corso di Sistemazioni Fluviali, Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale dell'Università di Parma, 2005.
- FUHRMANN G., *Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Ballonmodellen*, Diss. Goettingen 1910 n° Jahrb. D. Motorluftschiff-Studienges, 1911/12.
- 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.
- LAURSEN E.M., *Scour at Bridge Crossings*. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 89, No. HY 3, 1960.
- LAURSEN E.M., *An Analysis of Relief Bridges*. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 92, No. HY 3, 1963.
- MUZZAMMIL M., GANGADHARIAH T., *The mean characteristics of horseshoes vortex at a cylindrical pier*, Journal of Hydraulic Research Vol. 41, No. 3, 2003.
- RAUDKIVI A.J., *Functional Trends of Scour at Bridge Piers*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 112, No. 1, January 1986.
- SCHLICHTING H., *Boundary-Layer Theory*, tradotto da Dr. J. Kestin, McGraw-Hill, Series in Mechanical Engineering, 1968.
- SIVIERO E., *Storia dei Ponti in Italia. I Protagonisti dell'ingegneria Strutturale del Novecento: un secolo di storia dei Ponti tra tradizione e innovazione*, Università IUAV di Venezia, Dip. di Costruzione dell'Architettura, 2004.
- YALIN M.S., *Mechanics of Sediment Transport, 2nd Edition*, Pergamon Press, Queens University, Ontario.

Enrico BUFFONI, nato nel 1950 si è laureato in Ingegneria presso l'Università di Pisa nel 1975. È attualmente Incaricato del Corso di Idrodinamica presso la Facoltà di Ingegneria di Pisa. È Autore di varie pubblicazioni inerenti la turbolenza e la transizione ad essa.

Nicola CONTI, nato nel 1982, si è laureato presso l'Università di Pisa in Ingegneria Idraulica, dei Trasporti e del Territorio nel 2007. Attualmente lavora come Ingegnere Idraulico presso la Società Acque industriali occupandosi di Progettazione, Direzione Lavori e Gestione impianti di depurazione e di potabilizzazione delle acque e di bonifica dei terreni.