

PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

IL VICE SEGRETARIO GENERALE  
Dott.ssa Pierina Martinelli

Il Segretario Generale  
Dr. Franco Nardone

**Commissario Delegato**

O.c.d.p.c. n. 298 del 17.11.2015 e n. 303 del 03.12.2015

*Interventi urgenti di cui all'articolo 1, comma 3 lett.c)  
dell'OCDCPC n. 298/2015 finanziati ai sensi degli artt. 3 del  
OCDCPC 298/2015 e 303/2015*

**RIPRISTINO TOTALE FUNZIONALITA' DEL PONTE SUL FIUME UFITA  
IN LOCALITA' APICE SCALO CON RELATIVA DIFESA IDRAULICA**



Soggetto Attuatore del Commissario  
Delegato  
PROVINCIA di BENEVENTO

**Codice intervento:**

00/U/107

**PROGETTO DEFINITIVO**

Art. 24 D.P.R. 5.10.2010 n. 207

**Titolo Elaborato:  
RELAZIONE IDRAULICA**

**Progetto strutture**

innovazione tecnologica  
materiali e strutture

**ITeMS**

**Responsabili scientifici**

Idraulica: Nicola Fontana  
Strutture: Maria Rosaria Pece  
Geotecnica: Stefania Sica

**Supporto Tecnico-Scientifico**



Università  
degli Studi  
del Sannio

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA

**Studio geologico**

Dott. Geol. Claudio SACCO

**Gruppo di Progettazione**

Arch. Raffaele Rabuano  
Arch. Carminantonio De Santis

**Responsabile Unico del Procedimento**

Ing. Gennaro Fusco

Approvato con Deliberazione n. 84 del 14-6-2016  
Adottata dal Presidente della Provincia di Benevento

Codice elaborato:  
6- R  
Scala:

Il Segretario Generale  
Dr. Franco Nardone

## 1. Premesse

Nelle pagine che seguono sono sintetizzate le calcolazioni sviluppate per la stima delle caratteristiche idrauliche della corrente nel tratto di alveo in corrispondenza dell'attraversamento. Tali valutazioni consentiranno, da un lato, di verificare l'efficacia del bacino di dissipazione da realizzare a valle della soglia e di calcolare le sollecitazioni su di esso dovute alla corrente e, dall'altro, di determinare le caratteristiche della corrente in corrispondenza delle pile, in modo da stimare adeguatamente la massima erosione prevedibile.

Per quanto concerne la batimetria dell'alveo, si è fatto riferimento al rilievo effettuato da TecnoIN SpA nel 2015. Sebbene in occasione dell'evento di piena dell'ottobre 2015 si siano verificate ulteriori modificazioni dell'alveo, si è tuttavia verificato che queste risultano relativamente contenute e, quindi, si è considerato detto rilievo sufficientemente rappresentativo delle condizioni attuali. In Figura 1.1 è stata riportata la planimetria dell'area di interesse, mentre in Figura 1.2 il rilievo di dettaglio del tratto del corso d'acqua.



Fig. 1.1. Ortofoto dell'area di interesse.



**Fig. 1.2.** Rilievo dell'area di interesse.

## 2. Le simulazioni idrauliche

Le analisi sono state effettuate allo scopo di verificare:

- la presenza di un adeguato franco di sicurezza in occasione del passaggio della portata di piena, anche in considerazione del rischio di ostruzione connesso al trasporto di tronchi e di altri corpi solidi voluminosi da parte della corrente;
- l'efficacia degli interventi proposti nel mitigare gli effetti conseguenti al passaggio della portata di piena in termini di erosione in corrispondenza delle pile ed a valle della soglia (che si prevede di ricostruire).

Per tali analisi si è quindi reso necessario definire le caratteristiche idrauliche della corrente, mediante la messa a punto di un modello nel seguito sinteticamente descritto. All'uopo, nelle verifiche si è considerata la portata di piena corrispondente ad un periodo di ritorno  $T=300$  anni, ricavata nella Relazione Idrologica e pari a  $1229.53 \text{ m}^3/\text{s}$ , in considerazione della rilevanza dell'opera e dei dissesti che si sono verificati negli anni passati. Per quanto concerne le condizioni al contorno, si è invece considerato un valore del tirante idrico a valle pari a  $154.12 \text{ m slm}$ , desunto dal profilo di corrente, in moto permanente monodimensionale, ricavato per lo stesso periodo di ritorno dall'Autorità di Bacino dei Fiumi Liri-Garigliano e Volturno. Le simulazioni sono state effettuate con riferimento alla condizione di progetto, ovvero prevedendo il ripristino della soglia in corrispondenza dell'attraversamento e la costruzione, a valle di essa, di una platea, in modo da limitare i fenomeni di erosione conseguenti all'energia in eccesso posseduta dalla corrente. Si è anche considerato l'adeguamento della pila esistente e la ricostruzione, nella posizione originaria, della pila scalzata in occasione dell'evento di piena del 2013.

Per valutare in dettaglio le diverse condizioni di funzionamento, le simulazioni sono state sviluppate considerando due scenari, di seguito sinteticamente descritti:

- scenario 1 (a breve termine). Tale scenario considera il funzionamento del sistema subito dopo la ricostruzione della pila e il ripristino della soglia a valle, per cui la corrente si presenterà, in corrispondenza della pila ricostruita, con tiranti idrici particolarmente elevati;
- scenario 2 (a lungo termine). In tale scenario viene invece analizzata la configurazione altimetrica che si viene a stabilire in seguito all'interrimento della soglia, per effetto della sedimentazione a monte di essa del materiale solido (almeno della frazione più grossolana) convogliata dalla corrente. Tale condizione è stata simulata in maniera approssimata riportando alla quota del ciglio della soglia ( $152 \text{ m slm}$ ) le batimetriche dell'alveo a quota inferiore, e considerando quindi il completo ricoprimento della pila a quote inferiori.

### 2.1 Il modello di calcolo

Allo scopo di definire le caratteristiche del moto (velocità, tiranti idrici, sforzi tangenziali al fondo) nel tronco d'alveo interessato dall'intervento, si è provveduto alla modellazione bidimensionale della corrente, in modo da cogliere gli aspetti che una modellazione monodimensionale non riuscirebbe intrinsecamente a caratterizzare.

In particolare, è stato utilizzato il codice di calcolo bidimensionale SRH-2D (Sedimentation and River Hydraulics) Versione 2.2, messo a punto dall'U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation (2008). Il codice presenta notevole versatilità, poiché consente l'impiego di mesh caratterizzate dalla presenza di elementi triangolari e quadrangolari, in modo da assicurare il miglior compromesso tra accuratezza ed efficienza computazionale.

L'ipotesi principale assunta alla base del modello idraulico consiste nel considerare la dimensione verticale ( $Z$ ) relativa alla profondità molto minore delle due dimensioni in pianta ( $x, y$ ) e, pertanto, trascurabile rispetto a queste ultime (ipotesi di *Shallow Water*). Sulla base della suddetta ipotesi, il problema della circolazione del fluido nel campo tridimensionale trattato con le equazioni di Navier-Stokes può essere ricondotto ad un problema bidimensionale attraverso le equazioni di De Saint Venant:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = e \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial hUU}{\partial x} + \frac{\partial hVU}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + D_{xx} + D_{xy} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial hUV}{\partial x} + \frac{\partial hVV}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + D_{yx} + D_{yy} \quad (2.3)$$

in cui:

- $t$  è il tempo;
- $x$  e  $y$  sono le coordinate cartesiane orizzontali;
- $h$  è il tirante idrico;
- $U$  e  $V$  sono le componenti della velocità media rispettivamente lungo le direzioni  $x$  ed  $y$ ;
- $e$  è la pioggia netta;
- $g$  è l'accelerazione di gravità;
- $T_{xx}$ ,  $T_{xy}$  e  $T_{yy}$  sono gli sforzi turbolenti medi;
- $D_{xx}$ ,  $D_{xy}$ ,  $D_{yx}$ ,  $D_{yy}$  sono i termini dispersivi dovuti all'aver mediato le grandezze sulla verticale;
- $z = z_b + h$  è la quota geodetica del livello idrico in superficie;
- $z_b$  è la quota geodetica del fondo del canale;
- $\rho$  è la densità dell'acqua;
- $\tau_{bx}$  e  $\tau_{by}$  sono le resistenze al moto per attrito sul fondo del canale.

In particolare, le resistenze al moto possono essere calcolate in funzione del coefficiente di Manning, tramite la seguente equazione:

$$\begin{pmatrix} \tau_{bx} \\ \tau_{by} \end{pmatrix} = \rho C_f \begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (2.4)$$

in cui  $C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}}$ , mentre  $n$  è il coefficiente di Manning che tiene conto della scabrezza in alveo. Il

contributo dovuto agli sforzi turbolenti si basa, invece, sulle equazioni proposte da Boussinesq:

$$\begin{cases} T_{xx} = 2(\nu + \nu_t) \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3}k \\ T_{xy} = (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \\ T_{yy} = 2(\nu + \nu_t) \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2}{3}k \end{cases} \quad (2.5)$$

in cui:

- $\nu$  è il coefficiente di viscosità cinematica dell'acqua;

- $\nu_t$  tiene conto dell'effetto della viscosità turbolenta;
- $k$  rappresenta l'energia cinetica della turbolenza.

Per la caratterizzazione della turbolenza è stato utilizzato il modello proposto da Rodi (1993), che calcola le viscosità turbolente come  $\nu_t = C_\mu U_* h$ , in cui il termine  $U_*$  rappresenta la frazione di velocità al fondo, mentre  $C_\mu$  è una costante variabile tra 0.3 ed 1.0. Nel caso del codice SRH-2D viene utilizzato un valore di default  $C_\mu = 0.7$ , eventualmente modificabile dall'utente. Indicando il termine della turbolenza per viscosità come:

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon,$$

le equazioni del tipo  $k$ - $\varepsilon$  impiegate nel modello sono le seguenti:

$$\frac{\partial hk}{\partial t} + \frac{\partial hUk}{\partial x} + \frac{\partial hVk}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{h\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P_h + P_{kb} - h\varepsilon \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial h\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial hU\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial hV\varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{h\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_h + P_{\varepsilon b} - C_{\varepsilon 2} h \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.7)$$

Sulla base delle relazioni indicate, i coefficienti usati da Rodi (1993) vengono espressi come:

$$P_h = h\nu_t \left[ 2 \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + s \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (2.8)$$

$$P_{kb} = C_f^{-1/2} U_* \quad (2.9)$$

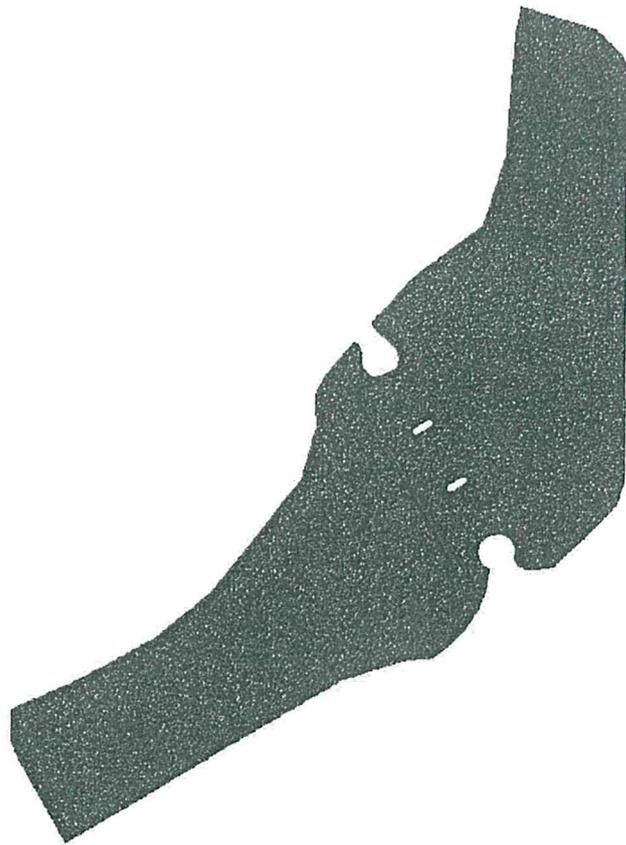
$$P_{\varepsilon b} = \frac{C_{\varepsilon 1} \cdot C_{\varepsilon 2} \cdot C_\mu^{1/2} \cdot C_f^{-3/4} \cdot U_*^4}{h} \quad (2.10)$$

con  $C_\mu = 0.09$ ;  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ;  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ;  $\sigma_k = 1$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ;  $C_{\varepsilon 1} = 1.8 \div 3.6$ .

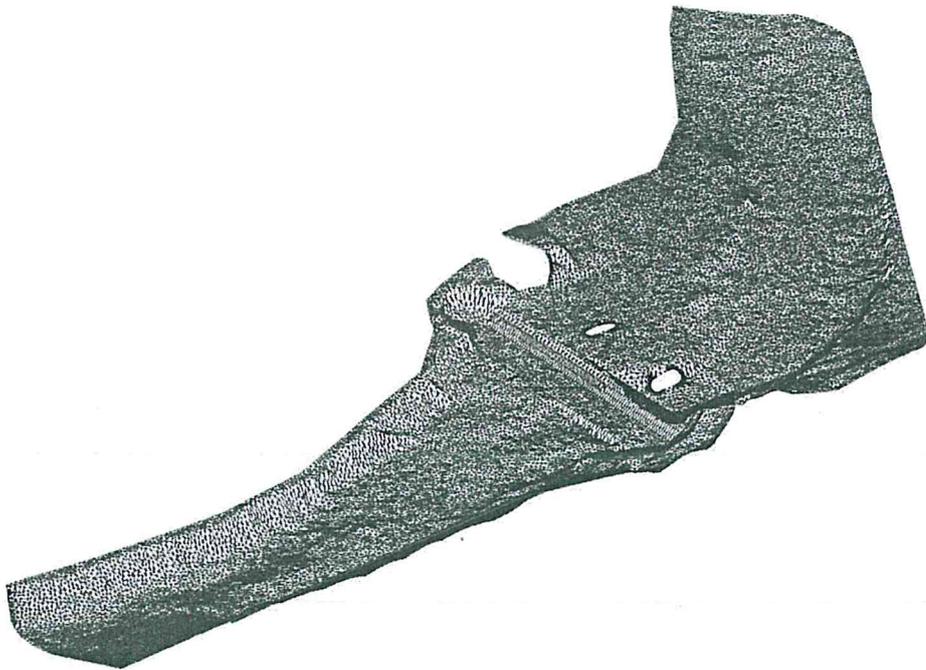
In particolare, i termini  $P_{kb}$  e  $P_{\varepsilon b}$  esprimono le dissipazioni energetiche della turbolenza dovute all'attrito sul fondo in caso di moto uniforme. Per quanto riguarda, invece, gli effetti dovuti alle dispersioni termiche conseguenti all'altezza del tirante idrico, studi condotti da Flokstra (1976) hanno evidenziato che tale aspetto è di secondaria importanza ai fini dei processi che regolano il moto dell'acqua nell'alveo.

## 2.2 I risultati della simulazione

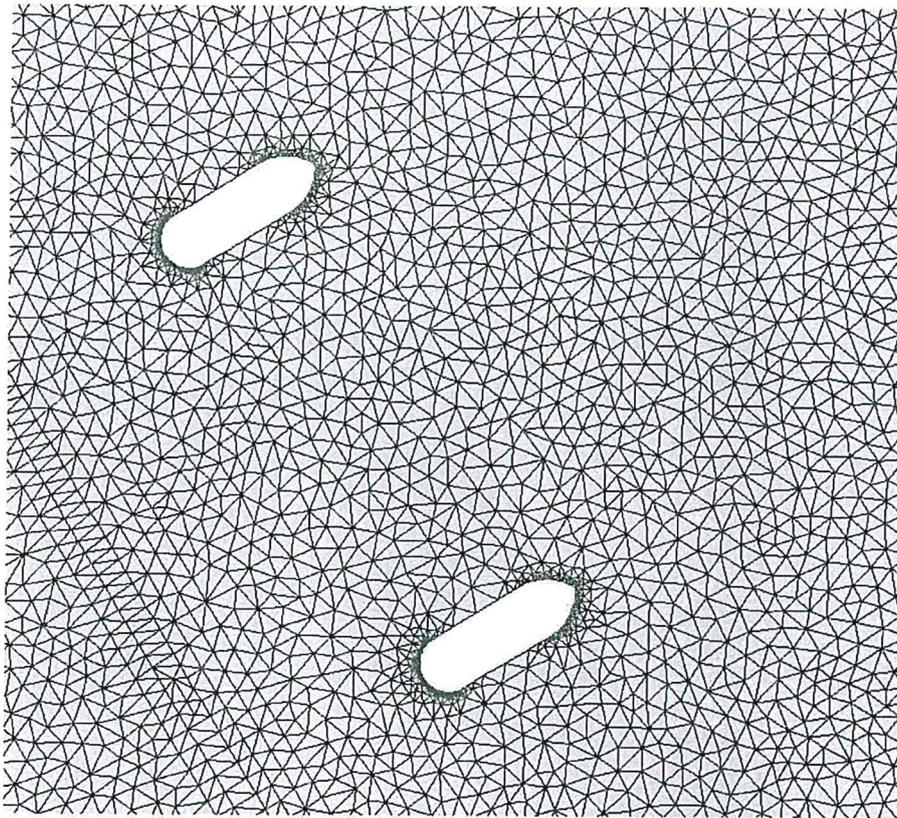
Nelle Figure che seguono sono riportate le condizioni di maggior interesse ai fini delle simulazioni. In particolare, in Figura 2.1 è rappresentata la mesh di calcolo, mentre in Figura 2.2 ne è fornita una rappresentazione tridimensionale. Dettagli delle aree delle pile e della soglia sono invece riportati nelle Figure 2.3 e 2.4. La mesh è del tipo non strutturata, il che garantisce la massima flessibilità ed adattabilità a morfologie e topografie complesse, come nel caso in esame. Essa è costituita da 47032 elementi triangolari, e un numero di nodi pari a 24099, con dimensione massima pari a 1 m ed angolo minimo di 28°, in modo da garantire una mesh di elevata qualità. Per quanto concerne i coefficienti di Manning, si è assunto il valore 0.03 s<sup>1/3</sup>/m per l'alveo naturale e 0.02 s<sup>1/3</sup>/m per la soglia e la platea di fondo.



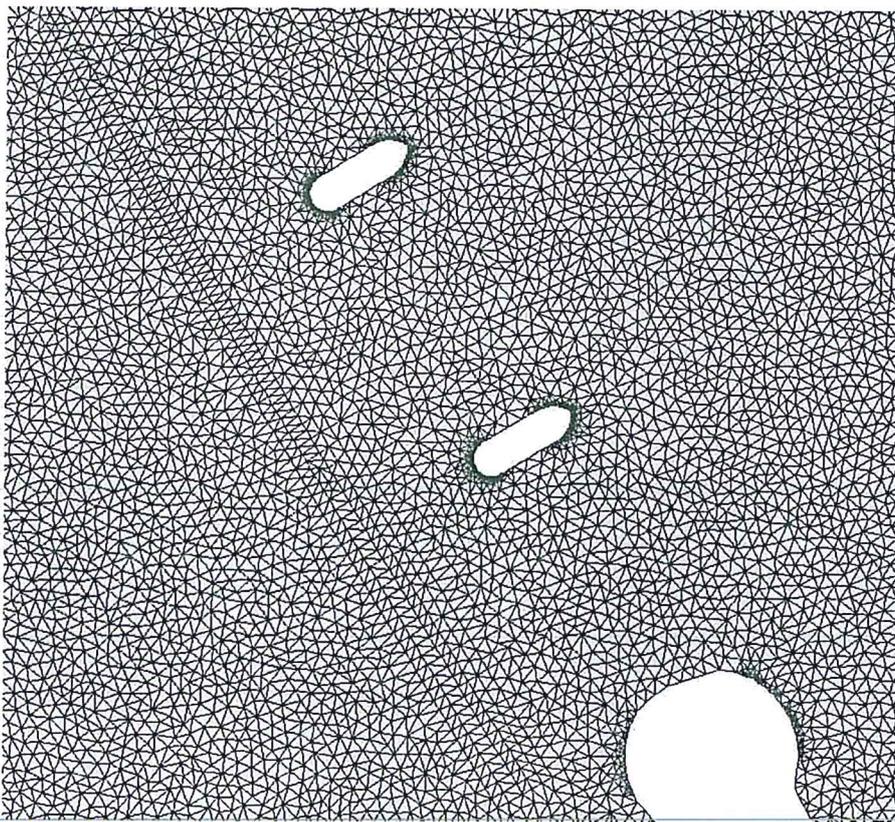
**Fig. 2.1.** Mesh di calcolo utilizzata nelle simulazioni (scenario 1).



**Fig. 2.2.** Vista tridimensionale della mesh di calcolo (scenario 1).

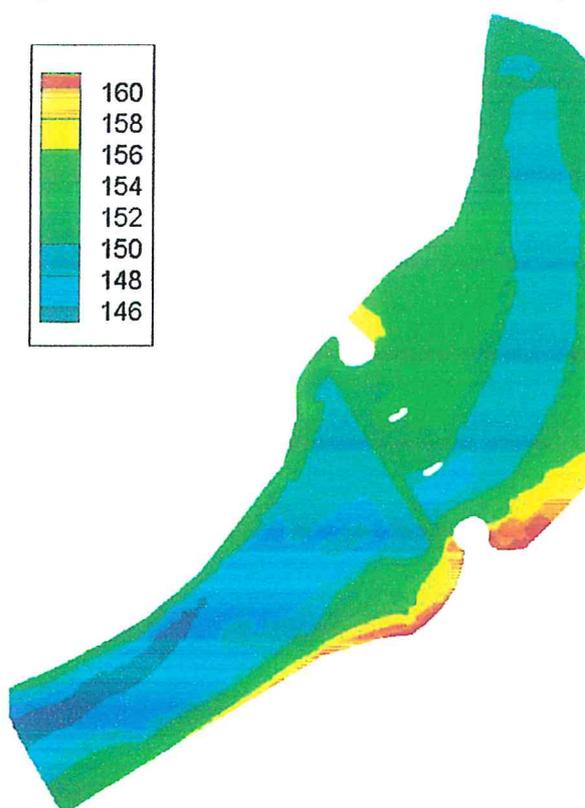


**Fig. 2.3.** Dettaglio della mesh in corrispondenza delle pile (scenario 1).



**Fig. 2.4.** Dettaglio della mesh in corrispondenza della soglia (scenario 1).

Infine, in Figura 2.5 è riportata la batimetria della mesh di calcolo, così come interpolata dal rilievo topografico e modificata per tener conto della realizzazione della soglia e del bacino a valle.



**Fig. 2.5.** Batimetria dell'area di interesse (Quote in m slm - scenario 1).

Nelle successive Figure 2.6-2.9 sono invece rappresentati i risultati della simulazione in termini di tirante idrico, velocità e linee di flusso. Il tirante idrico non risulta mai superiore a 156 m s.l.m., garantendo quindi un adeguato franco di sicurezza rispetto all'intradosso dell'impalcato, che si trova a quote prossime a 158 m s.l.m. E' inoltre interessante osservare il dettaglio delle linee di flusso in corrispondenza delle pile, che evidenziano un angolo di attacco prossimo allo zero. Il dettaglio dei vettori velocità in corrispondenza delle pile è comunque mostrato in Figura 2.8.

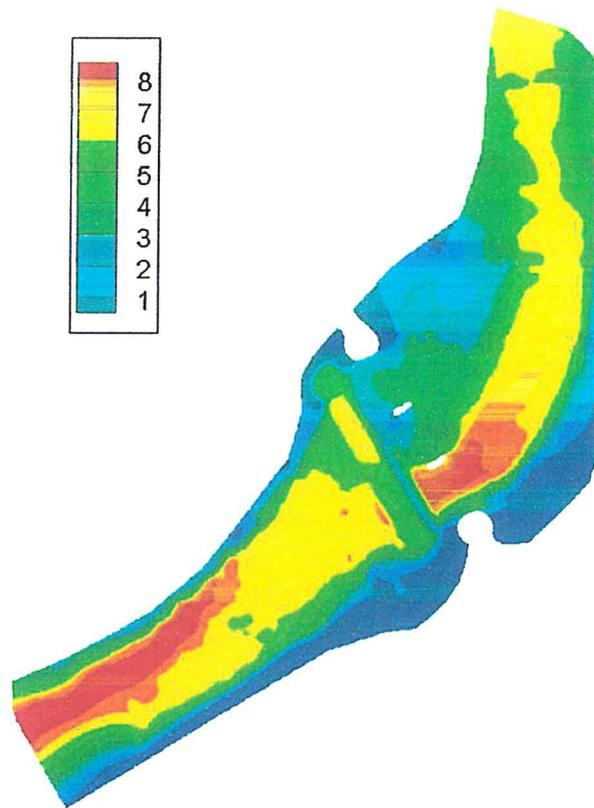


Fig. 2.6. Risultati della simulazione (tiranti idrici in m - scenario 1).

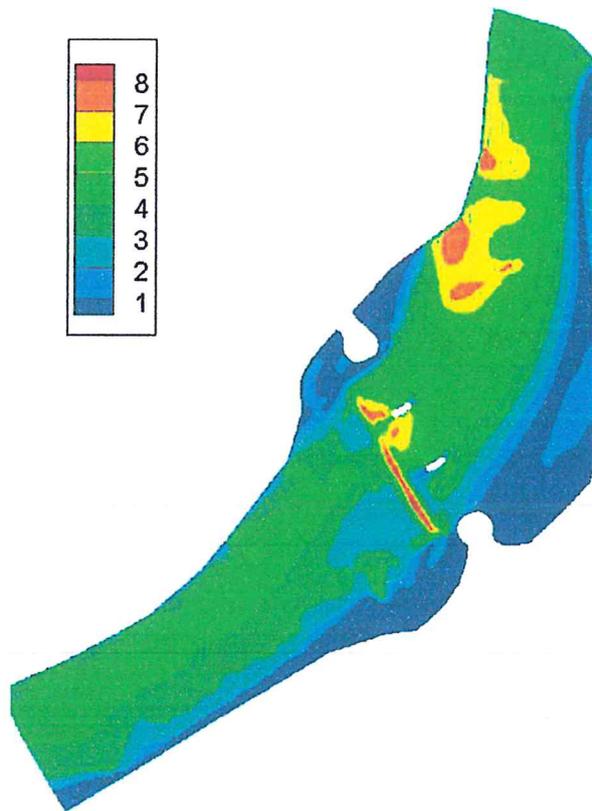


Fig. 2.7. Risultati della simulazione (velocità in m/s - scenario 1).

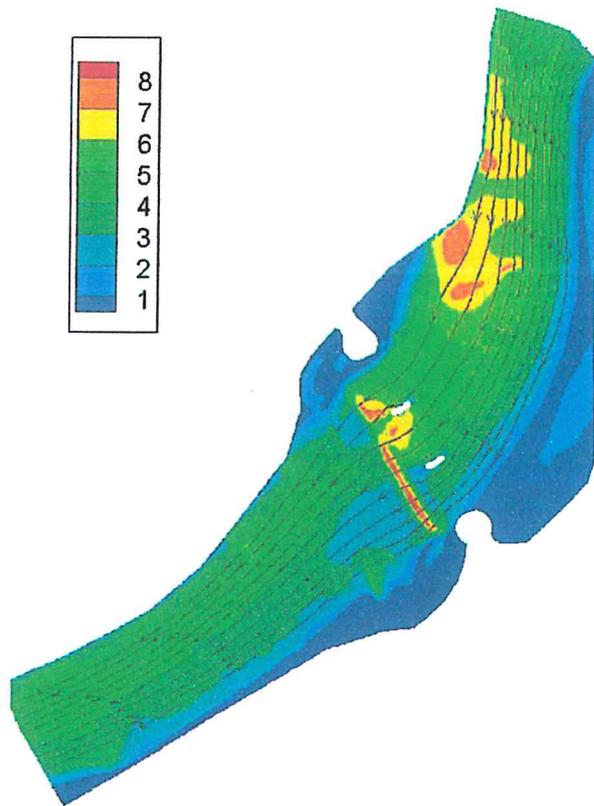


Fig. 2.8. Risultati della simulazione (linee di flusso scenario 1).

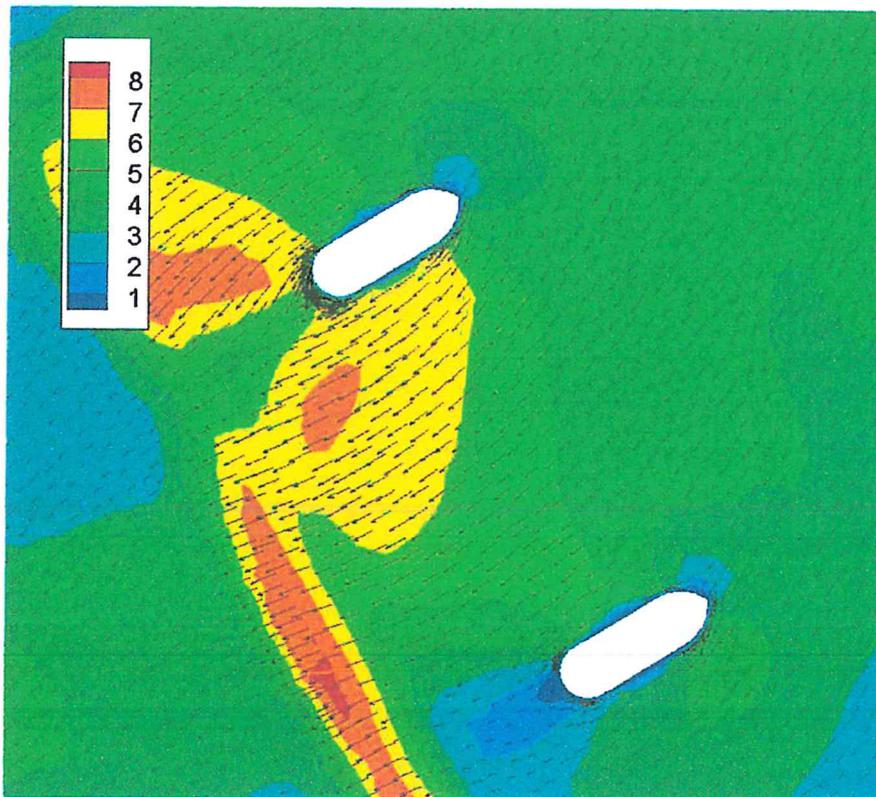
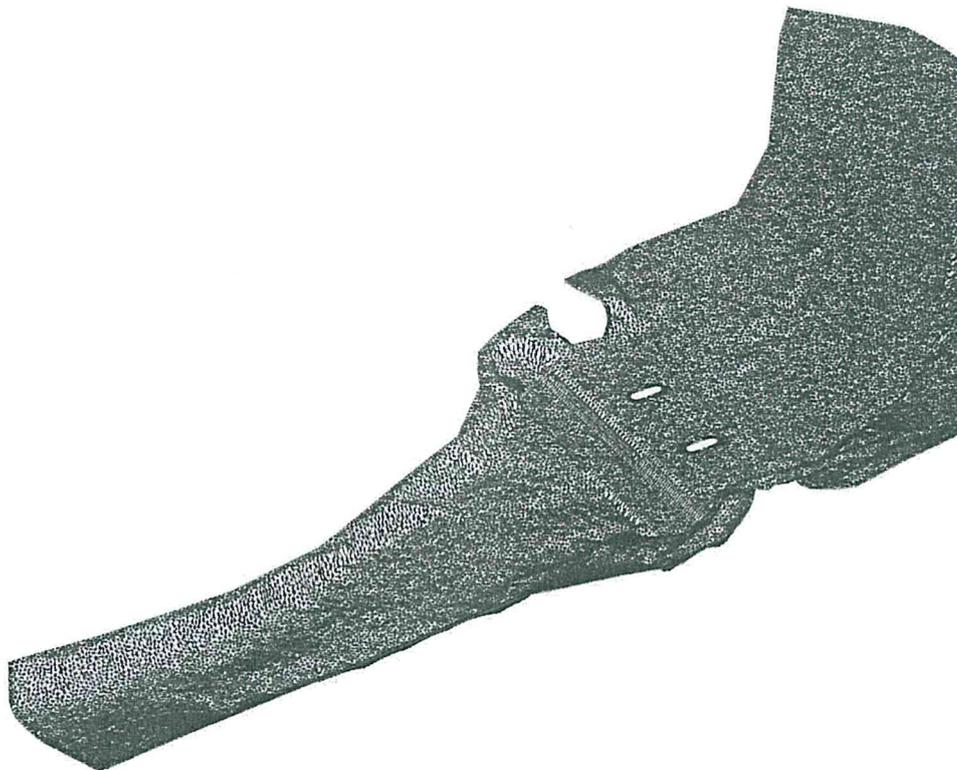


Fig. 2.9. Risultati della simulazione (vettori velocità in corrispondenza delle pile - scenario 1).

Di seguito sono invece sintetizzati i risultati relativi allo scenario 2. In maggior dettaglio, nelle Figure 2.10 e 2.11 sono riportate una vista tridimensionale della mesh modificata e la relativa batimetria, mentre nelle Figure 2.12-2.14 sono rappresentati i risultati della simulazione in termini di tirante idrico, velocità e linee di flusso. Infine, la Figura 2.15 riporta il dettaglio dei vettori velocità in corrispondenza delle pile.

Anche in questo caso è possibile osservare come i tiranti idrici garantiscano sempre un adeguato franco di sicurezza, dell'ordine di 2 m, mentre l'angolo di attacco della corrente in corrispondenza delle pile, seppure non nullo, risulta tuttavia molto limitato.



**Fig. 2.10.** Vista tridimensionale della mesh di calcolo (scenario 2).

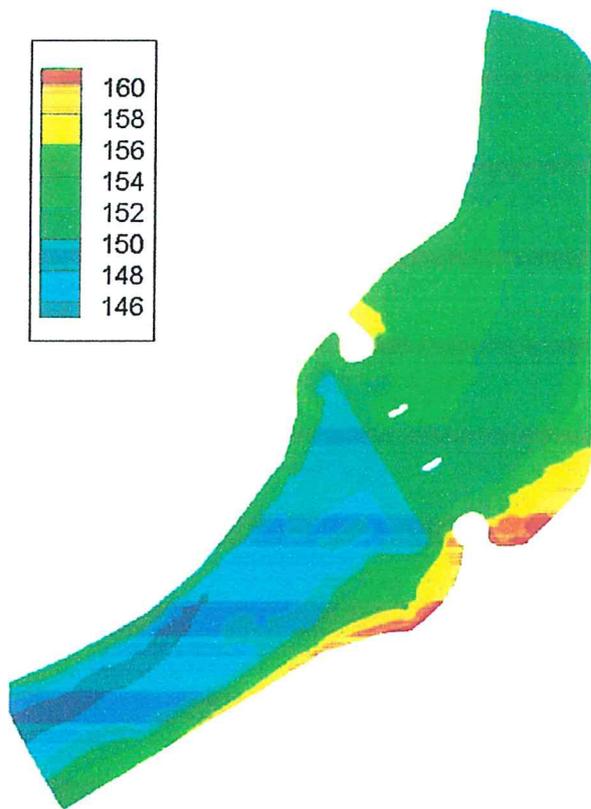


Fig. 2.11. Batimetria dell'area di interesse (Quote in m s.l.m - scenario 2).

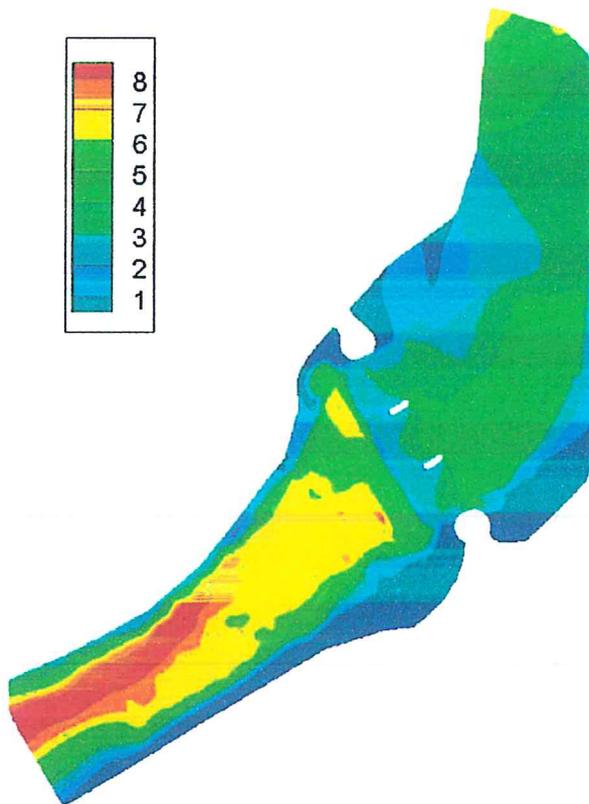


Fig. 2.12. Risultati della simulazione (tiranti idrici in m - scenario 2).

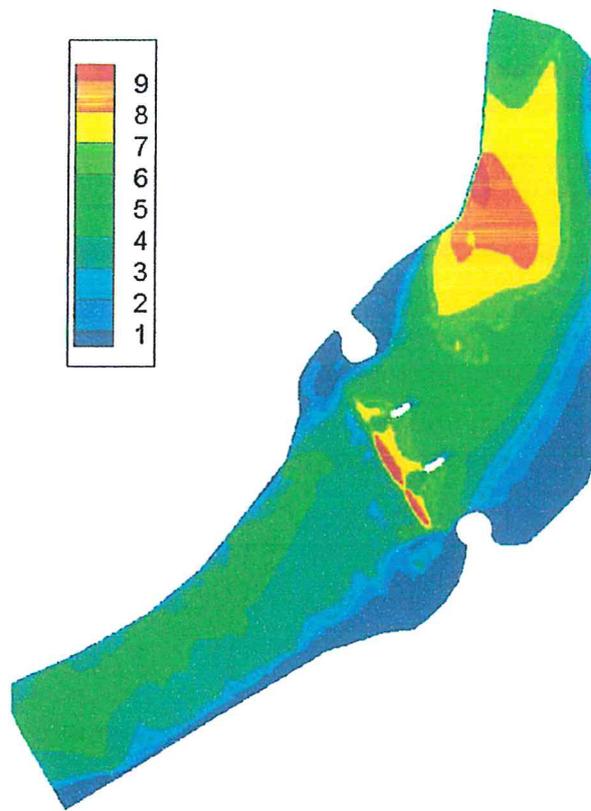


Fig. 2.13. Risultati della simulazione (velocità in m/s - scenario 2).

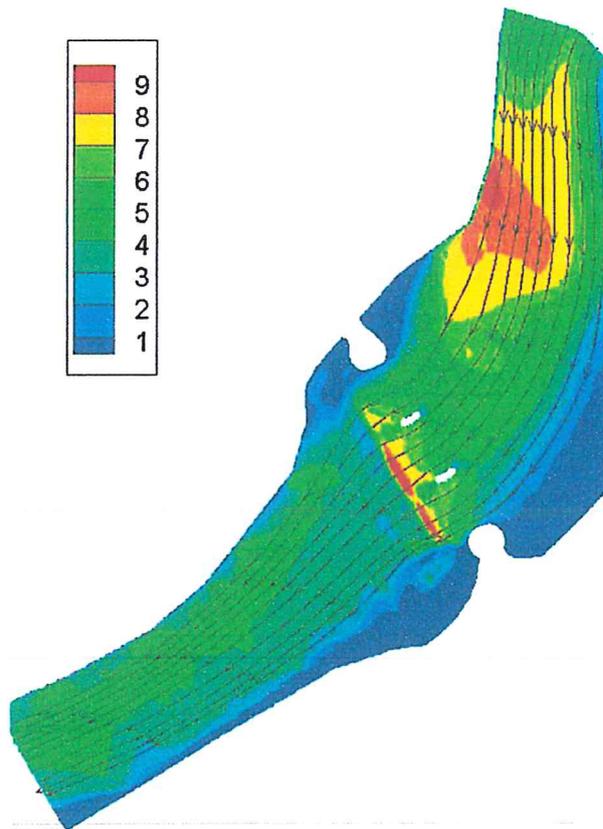
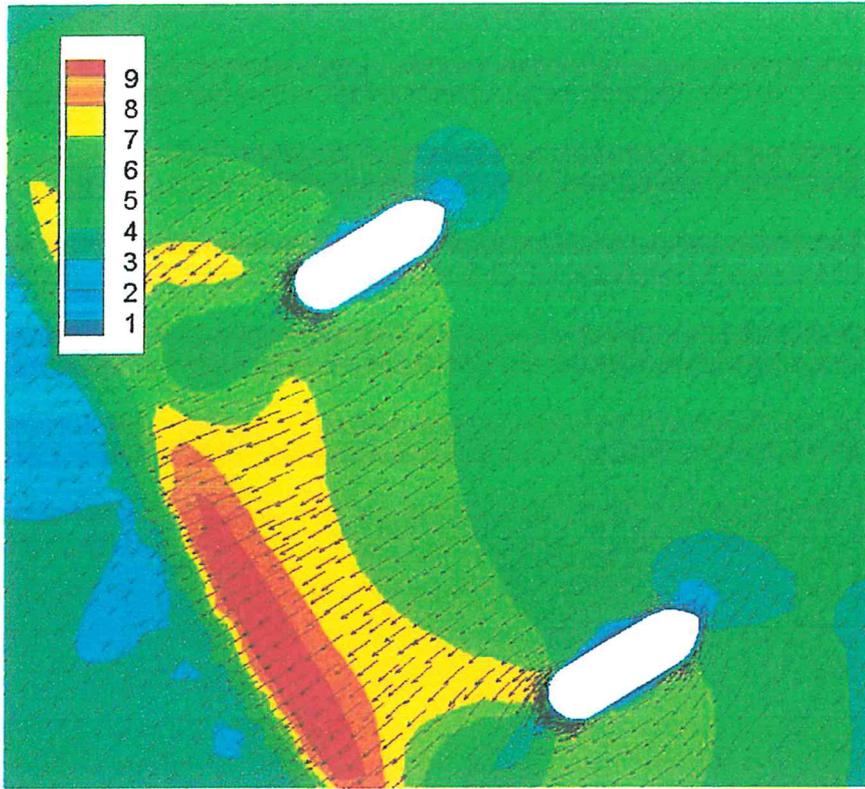


Fig. 2.14. Risultati della simulazione (linee di flusso-scenario 2).



**Fig. 2.15.** Risultati della simulazione (vettori velocità in corrispondenza delle pile - scenario 2).

### 3. Calcolo della massima escavazione in corrispondenza delle pile

#### 3.1 Introduzione

L'erosione localizzata a valle di una pila di ponte collocata in alveo è un fenomeno che dipende da diversi fattori, in particolare dalle caratteristiche della corrente, dalla geometria della pila e del piede della stessa, dalle caratteristiche del materiale di cui è costituito il fondo dell'alveo e dalla forma di fondo di quest'ultimo.

Per quanto riguarda le caratteristiche della corrente liquida, nel paragrafo precedente si è provveduto alla ricostruzione del campo di moto immediatamente a monte della pila, che ha consentito la determinazione di tiranti, velocità e angolo di incidenza della corrente. Per una accurata valutazione dei fenomeni erosivi, si rende però necessario anche caratterizzare opportunamente il materiale di fondo, mediante la determinazione della curva granulometrica o di alcune delle caratteristiche principali (quali, ad esempio, il  $D_{50}$ ,  $D_{84}$  o  $D_{90}$ ) nel caso di materiale incoerente, le caratteristiche di coesione nel caso di materiale coesivo, le caratteristiche di fessurazione in caso di roccia.

Infine, si osserva come non solo la forma e le dimensioni della pila influenzano significativamente l'escavazione al piede, ma rivestono un'importanza non trascurabile la posizione della pila rispetto al fondo alveo (ad esempio se il fondo del piede è sovrapposto o meno al fondo alveo), se la corrente investe la colonna, il piede o entrambi, se il piede poggia su pali di fondazione e, se essi sono presenti, quanti sono e in che posizione sono collocati.

Solitamente lo studio dell'erosione al piede di una pila, in mancanza di un modello fisico sperimentale, che viene tuttavia predisposto solo in casi molto particolari, può essere condotto con riferimento a modelli di letteratura, che sono solitamente basati su risultati di prove di laboratorio su modelli fisici in scala o su rilevazioni effettuate su casi di studio reali. In particolare, nel caso in esame il calcolo è stato condotto seguendo le indicazioni fornite, per l'erosione al piede di una pila poggiata su fondazioni complesse, dall' U.S. Department of Transportation della Federal Highway Administration (Arneson et al., 2012).

#### 3.2 Determinazione dell'erosione complessiva

L'erosione complessiva  $y_s$  viene calcolata come risultato della sovrapposizione di tre singole componenti di erosione, così come riportato nell'equazione successiva:

$$y_s = y_{s\ pier} + y_{s\ pc} + y_{s\ pg} \quad (3.1)$$

in cui:

$y_s$  = profondità totale di erosione [m]

$y_{s\ pier}$  = componente di erosione dovuta all'interazione tra pila e corrente [m]

$y_{s\ pc}$  = componente di erosione dovuta all'interazione tra piede della pila o coronamento dei pali e corrente [m]

$y_{s\ pg}$  = componente di erosione dovuta all'interazione tra pali di fondazione e corrente [m]

Il calcolo di ciascuna componente è descritto nei paragrafi successivi, e i termini principali che compaiono nelle equazioni proposte fanno riferimento allo schema riportato in Figura 3.1. Al termine della descrizione dell'approccio verrà illustrato il calcolo effettuato con riferimento alle due configurazioni prese in esame, ovvero pila esistente e pila ricostruita.

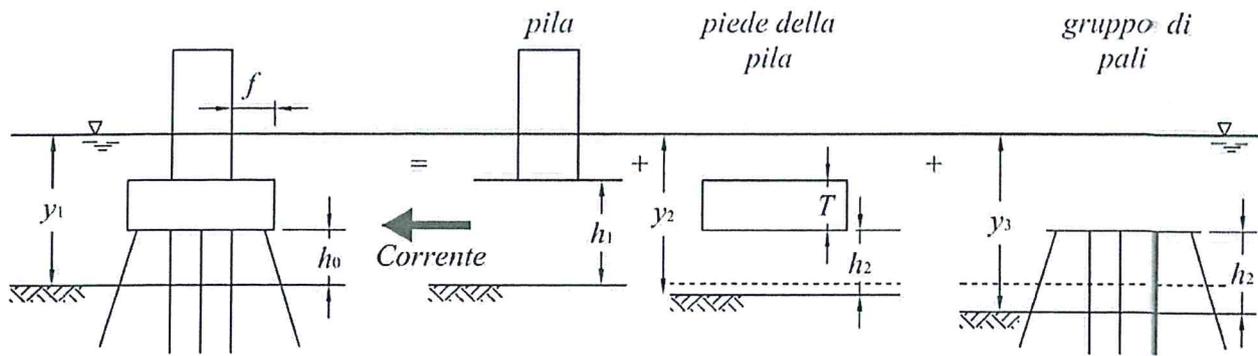


Fig. 3.1. Schema di riferimento per il calcolo dell'erosione per una pila in alveo.

### 3.2.1 Determinazione della componente di erosione dovuta all'interazione tra pila e corrente e

Quando la corrente transita a contatto con la pila e il piede di quest'ultima è inferiore al pelo libero, è possibile calcolare la componente denominata  $y_{s\ pier}$ , così come riportato nella seguente equazione:

$$\frac{y_{s\ pier}}{y_1} = K_{h\ pier} \cdot \left[ 2.0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \left( \frac{a_{pier}}{y_1} \right)^{0.65} \cdot \left( \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot y_1}} \right)^{0.43} \right] \quad (3.2)$$

in cui:

- $y_1$  = tirante della corrente a monte della pila all'inizio del calcolo [m]
- $a_{pier}$  = larghezza della pila [m]
- $V_1$  = velocità media della corrente subito a monte della pila all'inizio del calcolo [m/s]
- $g$  = accelerazione di gravità (9.806 m/s<sup>2</sup>)
- $K_1$  = coefficiente correttivo per la forma delle estremità della pila
- $K_2$  = coefficiente correttivo per l'angolo di incidenza della corrente
- $K_3$  = coefficiente correttivo per la condizione del fondo dell'alveo
- $K_{h\ pier}$  = coefficiente che tiene conto dell'altezza della pila dal fondo alveo e l'effetto schermatura dello sbalzo del piede della pila di lunghezza  $f$

I valori del coefficiente correttivo  $K_1$  si possono desumere, in funzione della forma della sezione trasversale delle pile, dalla Tabella 3.1

Forma della pila	$K_1$
Squadrata	1.1
Arrotondata	1.0
Cilindrica	1.0
Gruppo di cilindri	1.0
Appuntita	0.9

Tab. 3.1. Valori del coefficiente correttivo  $K_1$ .

Il valore del coefficiente correttivo  $K_2$  dipende invece dall'angolo di incidenza della corrente sulla pila, attraverso la seguente equazione:

$$K_2 = \left( \cos \theta + \frac{L}{a} \cdot \sin \theta \right)^{0.65} \quad (3.3)$$

in cui:

- $\theta$  = angolo di incidenza della corrente;

- $a$  = larghezza dell'elemento a contatto con il pelo libero [m]  
 $L$  = lunghezza dell'elemento a contatto con il pelo libero [m]

Se il rapporto  $L/a$  è maggiore di 12, nell'equazione per il calcolo di  $K_2$  si fa comunque riferimento al valore 12.

I valori del coefficiente correttivo  $K_3$  si possono desumere, in funzione delle condizioni del fondo alveo, dalla Tabella 3.2

condizioni del fondo	altezza $H$ delle dune [ft]	$K_3$
acqua chiara	N/A	1.1
fondo piano	N/A	1.1
dune basse	$10 > H \geq 2$	1.1
dune medie	$30 > H \geq 10$	da 1.2 a 1.1
dune alte	$H \geq 30$	1.3

Tab. 3.2. Valori del coefficiente correttivo  $K_3$ .

Il coefficiente  $K_{h\ pier}$ , mediante il quale si tiene conto dell'altezza della pila dal fondo alveo e dell'effetto di schermatura dello sbalzo, di lunghezza  $f$ , del piede della pila, può essere calcolato con l'equazione seguente o con l'abaco di Figura 3.2 in funzione del rapporto  $fl/a_{pier}$  e  $h_1/a_{pier}$ .

$$\begin{aligned}
 K_{h\ pier} = & (0.4075 - 0.0669 \cdot f/a_{pier}) - (0.4271 - 0.0778 \cdot f/a_{pier}) \cdot h_1/a_{pier} + \\
 & + (0.1615 - 0.0455 \cdot f/a_{pier}) \cdot (h_1/a_{pier})^2 - (0.0269 - 0.012 \cdot f/a_{pier}) \cdot (h_1/a_{pier})^3
 \end{aligned} \quad (3.4)$$

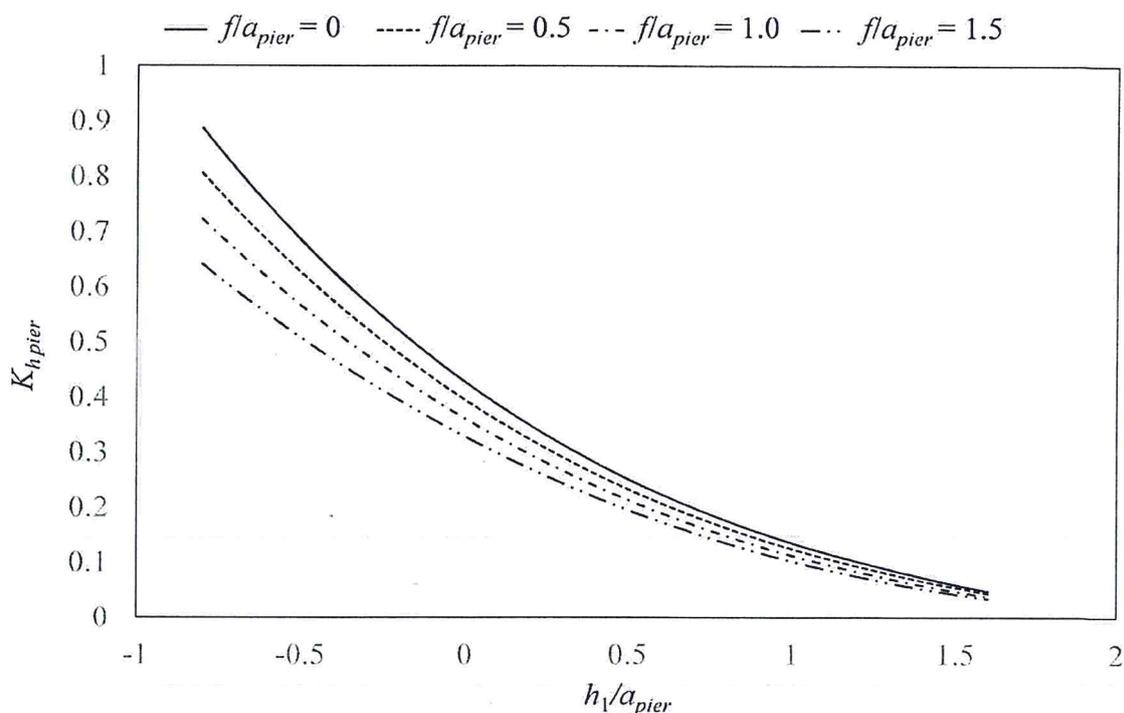


Fig. 3.2. Coefficiente di erosione da pila sospesa.

### 3.2.2 Determinazione della componente di erosione dovuta all'interazione tra piede della pila o coronamento dei pali e corrente

Il calcolo di tale contributo diventa necessario allorché il piede della pila (o il coronamento dei pali di fondazione) si trova a contatto con la corrente perché tale condizione è prevista da progetto, ovvero perché essa è il risultato di una escavazione sia di lungo periodo, sia dovuta al contributo di cui al paragrafo precedente.

Ci sono due casi in cui ci si può trovare, in funzione della posizione reciproca del fondo del piede e del fondo dell'alveo. Il calcolo nei rispettivi due casi viene condotto in modo differente come descritto nel seguito.

#### Caso 1. Fondo del piede della pila al di sopra del fondo alveo e a contatto con la corrente.

Il calcolo del contributo  $y_{s\,pc}$  relativo a questa configurazione viene effettuato considerando che:

$T$  = spessore del piede della pila esposta alla corrente [m]

$h_2$  =  $h_0 + y_{s\,pier}/2$  [m]

$y_2$  =  $y_1 + y_{s\,pier}/2$  [m]

$V_2$  =  $V_1(y_1/y_2)$  = velocità della corrente modificata [m/s]

dove:

$h_0$  = distanza originaria tra il fondo del piede della pila e il fondo alveo [m]

Il contributo all'erosione in tale caso si può calcolare attraverso la seguente equazione:

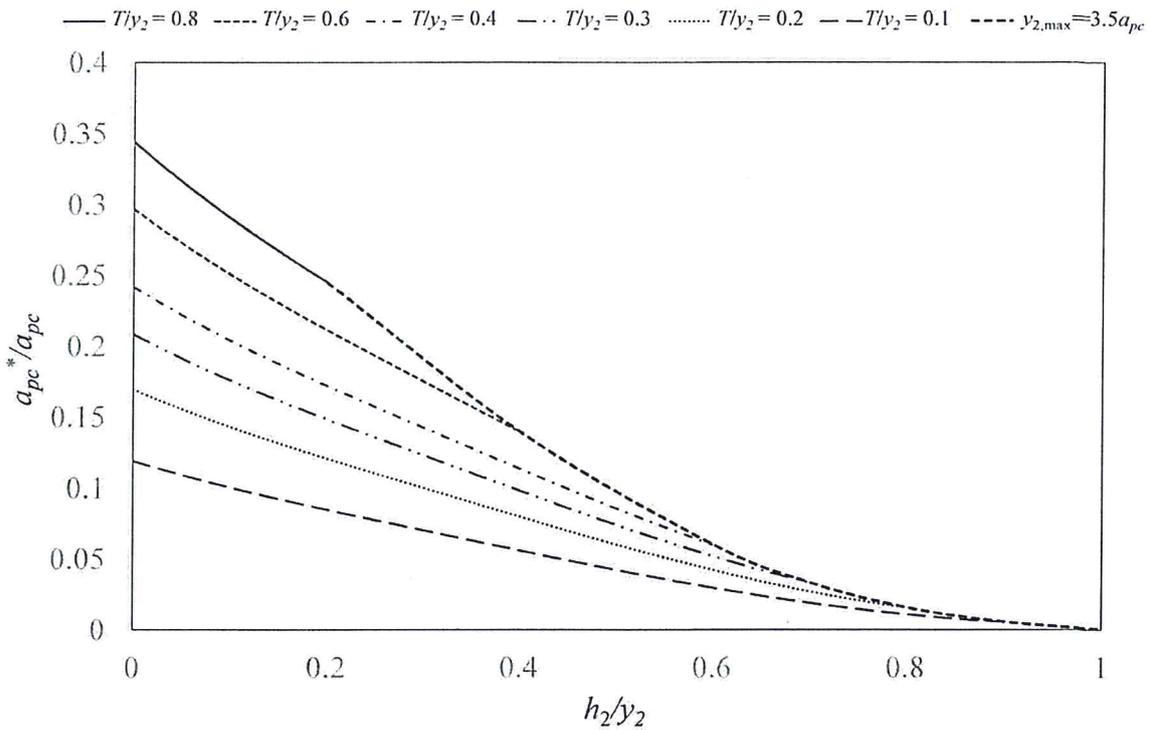
$$\frac{y_{s\,pc}}{y_2} = 2.0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_W \cdot \left( \frac{a_{pc}^*}{y_2} \right)^{0.65} \cdot \left( \frac{V_2}{\sqrt{g \cdot y_2}} \right)^{0.43} \quad (3.5)$$

in cui:

- il coefficiente correttivo  $K_1$  si calcola con riferimento al piede della pila, che è l'elemento a contatto con la corrente
- $a_{pc}^*$  si calcola attraverso l'abaco di Figura 3.3, in cui il rapporto  $a_{pc}^*/a_{pc}$  è rappresentato in funzione del rapporto  $h_2/y_2$  e del rapporto  $T/y_2$  o, analogamente, tramite l'equazione di seguito riportata. Per la determinazione di  $a_{pc}^*$ , il valore di  $y_2$  va considerato al massimo pari a  $3.5a_{pc}$ .

$$\frac{a_{pc}^*}{a_{pc}} = \exp \left[ -2.705 + 0.51 \cdot \ln(T/y_2) - 2.783 \cdot (h_2/y_2)^3 + 1.751 / \exp(h_2/y_2) \right] \quad (3.6)$$

in cui  $a_{pc}$  è la larghezza del piede della pila o del coronamento dei pali di fondazione.



**Fig. 3.3.** Larghezza equivalente del piede della pila o del coronamento dei pali di fondazione.

Il coefficiente  $K_W$  che compare nell'equazione (3.5) viene definito fattore di correzione per pile ampie in acque basse. Tale fattore di correzione deve essere applicato se:

- 1) il rapporto  $y_2/a_{pc} < 0.8$
- 2) il numero di Froude  $Fr_2 < 1$
- 3)  $a_{pc} > 50 D_{50}$

In tal caso il calcolo di  $K_W$  si effettua attraverso una delle seguenti equazioni, in funzione del valore del rapporto  $V/V_c$ :

$$K_W = 2.58 \cdot \left(\frac{y}{a}\right)^{0.34} \cdot Fr_1^{0.65} \quad \text{per } V/V_c < 1 \quad (3.7)$$

$$K_W = 1.0 \cdot \left(\frac{y}{a}\right)^{0.13} \cdot Fr_1^{0.25} \quad \text{per } V/V_c \geq 1 \quad (3.8)$$

in cui:

$V_c$  è la velocità critica per il trasporto di una particella con diametro pari a  $D_{50}$  [m/s], da calcolare attraverso la seguente equazione:

$$V_c = 5.75 \cdot u_c^* \cdot \log\left(5.53 \frac{y_1}{D_{50}}\right) \quad (3.9)$$

dove:

$$u_c^* = K_u (0.0377 + 0.041 \cdot D_{50}^{1.4}) \quad \text{per } 0.1 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm} \quad (3.10)$$

$$u_c^* = K_u (0.1 \cdot D_{50}^{0.5} - 0.0213 / D_{50}) \quad \text{per } 1 \text{ mm} < D_{50} < 100 \text{ mm} \quad (3.11)$$

in cui:

$K_u = 0.3048$  se si usa il sistema di misura internazionale

$K_u = 1.0$  se si usa il sistema di misura inglese

$D_{50}$  = va inserito nell'equazione di  $u_c^*$  in mm.

### Caso 2. Fondo del piede della pila al di sotto o allineato al fondo alveo.

In tal caso i valori di  $y_2$  e  $V_2$  si calcolano analogamente a quanto fatto per il Caso 1, mentre l'equazione per la determinazione del contributo all'erosione è la seguente:

$$\frac{y_{s\,pc}}{y_f} = 2.0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_W \cdot \left( \frac{a_{pc}}{y_f} \right)^{0.65} \cdot \left( \frac{V_f}{\sqrt{g \cdot y_f}} \right)^{0.43} \quad (3.12)$$

in cui, oltre ai termini di cui già si è detto con riferimento al Caso 1:

$y_f$  = distanza dal fondo alveo (dopo l'erosione, anche quella dovuta all'interazione con la pila) al fondo del piede della pila [m] =  $h_1 + y_{s\,pier}/2$

$V_f$  = velocità media della corrente nella zona al di sotto della parte sommitale del piede della pila [m/s]

$K_W$  = coefficiente funzione di  $y_f$ ,  $a_{pc}$ , e del numero di Froude  $Fr_f = V_f/(gy_f)^{1/2}$

La velocità  $V_f$  può essere calcolata attraverso la seguente equazione:

$$\frac{V_f}{V_2} = \frac{\ln\left(10.93 \frac{y_f}{k_s} + 1\right)}{\ln\left(10.93 \frac{y_2}{k_s} + 1\right)} \quad (3.13)$$

in cui:

$k_s$  = scabrezza dei granelli del fondo dell'alveo (normalmente considerato pari al  $D_{84}$  per materiali sabbiosi e pari a  $3.5 \cdot D_{84}$  per ghiaia e materiale grosso) [m]

Inoltre, nel caso in esame, tutti i coefficienti correttivi presenti nell'equazione (3.12) si calcolano con riferimento alle caratteristiche del piede della pila.

### *3.2.3 Determinazione della componente di erosione dovuta all'interazione tra gruppo di pali di fondazione e corrente*

Per il calcolo di questa aliquota si tiene conto del numero di pali di fondazione, del numero di righe e colonne su cui sono disposti, dell'interasse tra i pali stessi e dell'aliquota di essi esposti direttamente alla corrente.

Tipicamente, è possibile fare riferimento a due configurazioni:

- il caso in cui i pali sono allineati tra loro e nei confronti della corrente (angolo di incidenza della corrente nullo);
- il caso, più generale, in cui i pali non sono allineati alla corrente

La strategia di calcolo della componente di erosione è la medesima in entrambi i casi, ma cambia il modo in cui si calcola la larghezza proiettata dei pali. Il metodo di calcolo di quest'ultima è illustrato di seguito.

La grandezza più significativa da calcolare è la larghezza effettiva di una pila equivalente al gruppo di pali, che viene determinata attraverso la seguente equazione:

$$a_{pg}^* = a_{proj} \cdot K_{sp} \cdot K_m \quad (3.14)$$

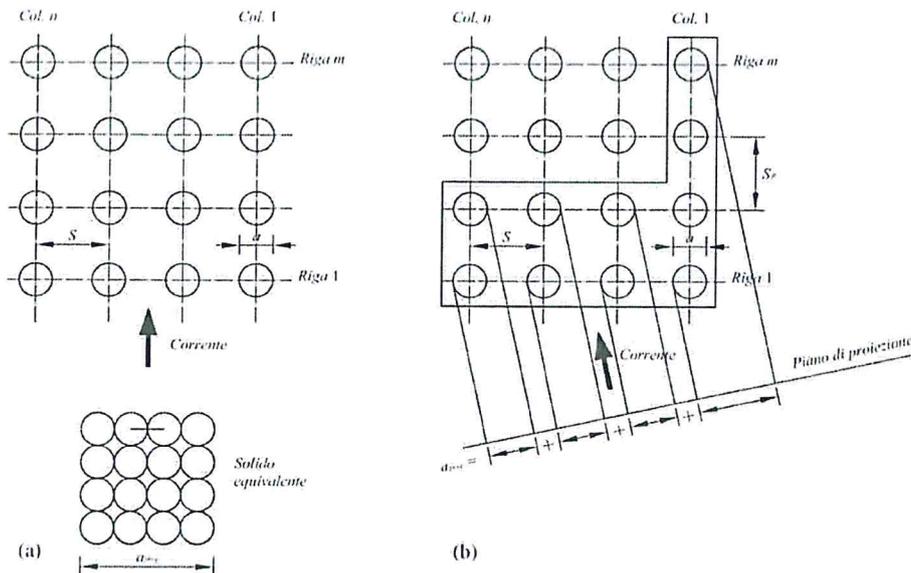
in cui:

$a_{proj}$  = somma delle larghezze dei pali proiettate e non sovrapposte (per maggiore comprensione si faccia riferimento alla Figura 3.4).

$K_{sp}$  = coefficiente per la spaziatura dei pali (Figura 3.5 o equazione 3.15).

$K_m$  = coefficiente per il numero  $m$  di righe allineate (Fig. 3.6), che assume valore unitario per gruppi di pali obliqui o sfalsati.

$$K_{sp} = 1 - 4/3 \left[ 1 - 1/(a_{proj}/a) \right] \left[ 1 - (S/a)^{-0.6} \right] \quad (3.15)$$



**Fig. 3.4.** Schema di riferimento per il calcolo della larghezza dei pali proiettata nel caso di (a) corrente allineata e (b) corrente obliqua.

Nota il valore della proiezione, è necessario calcolare i valori di tirante  $y_3$  e velocità  $V_3$  da utilizzare nel calcolo della componente di erosione:

$$y_3 = y_1 + y_{s\ pier}/2 + y_{s\ pc}/2 \quad (3.16)$$

$$V_3 = V_1 \cdot (y_1/y_3) \quad (3.17)$$

Pertanto, noti i valori di tirante e velocità, la componente di erosione per interazione con i pali di fondazione può essere calcolata con la seguente equazione:

$$\frac{y_{s\ pg}}{y_3} = K_{hpg} \left[ 2.0 \cdot K_1 \cdot K_3 \cdot \left( \frac{a_{pg}^*}{y_f} \right)^{0.65} \cdot \left( \frac{V_3}{\sqrt{g \cdot y_3}} \right)^{0.43} \right] \quad (3.18)$$

in cui:

$K_{hpg}$  = fattore di altezza del gruppo di pali, che può essere calcolato in funzione del rapporto  $h_3/y_3$  (imponendo un valore massimo di  $y_3=3.5a_{pg}^*$ ) tramite l'equazione (3.19), oppure dal grafico di Figura 3.7.

$h_3$  =  $h_0 + y_{s\ pier}/2 + y_{s\ pc}/2$  [m]

$$K_{hpg} = \left[ 3.08 \left( \frac{h_3}{y_3} \right) - 5.23 \left( \frac{h_3}{y_3} \right)^2 + 5.25 \left( \frac{h_3}{y_3} \right)^3 - 2.10 \left( \frac{h_3}{y_3} \right)^4 \right]^{\frac{1}{0.65}} \quad (3.19)$$

Calcolato anche quest'ultimo contributo, è quindi possibile procedere alla determinazione dell'erosione complessiva  $y_s$  al piede di una pila in alveo sommando le diverse aliquote, così come riportato nell'equazione (3.1).

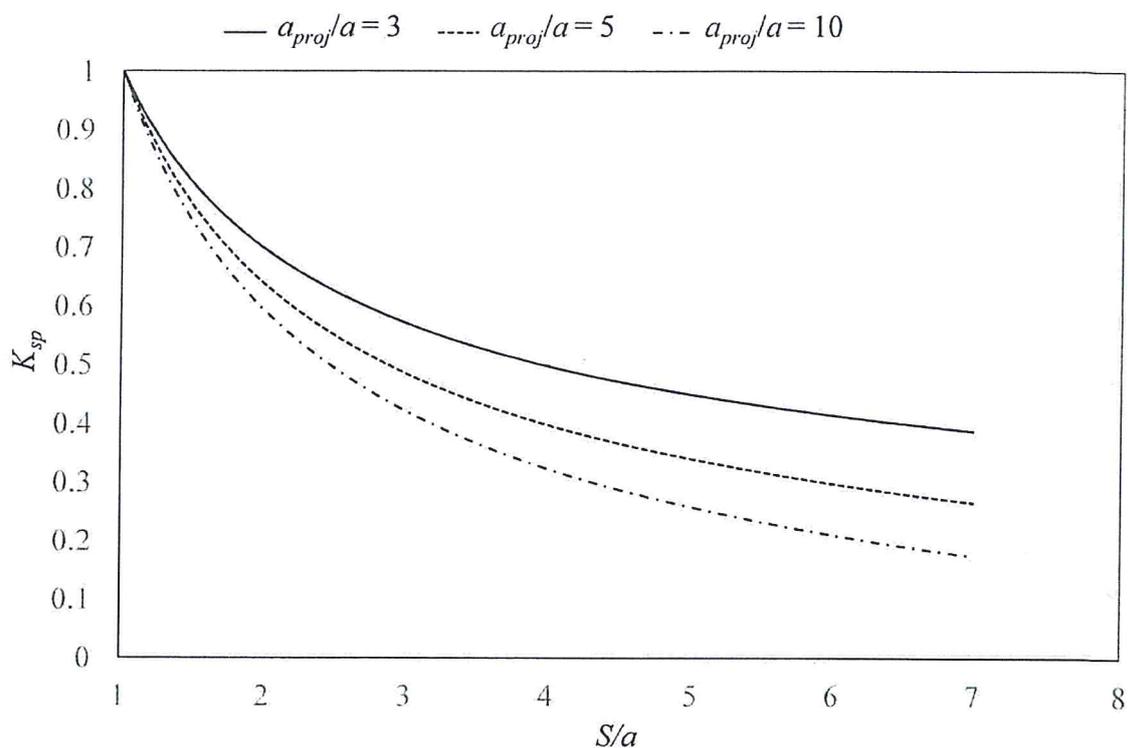


Fig. 3.5. Fattore  $K_{sp}$  di spazio tra i pali.

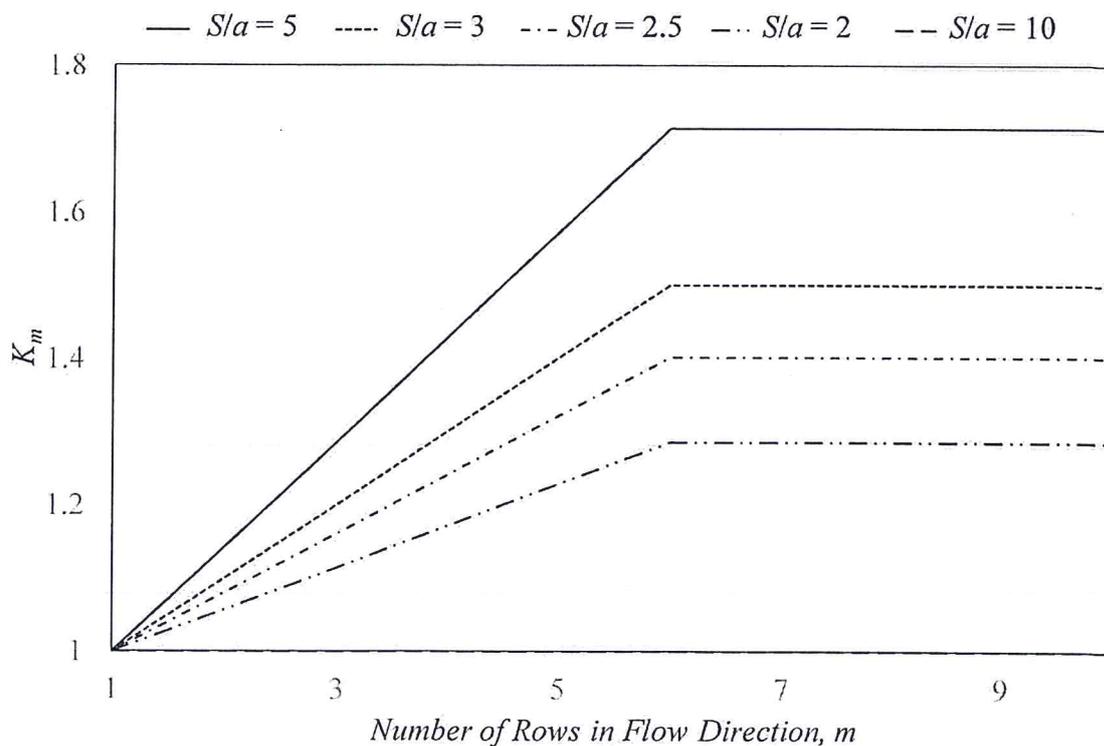
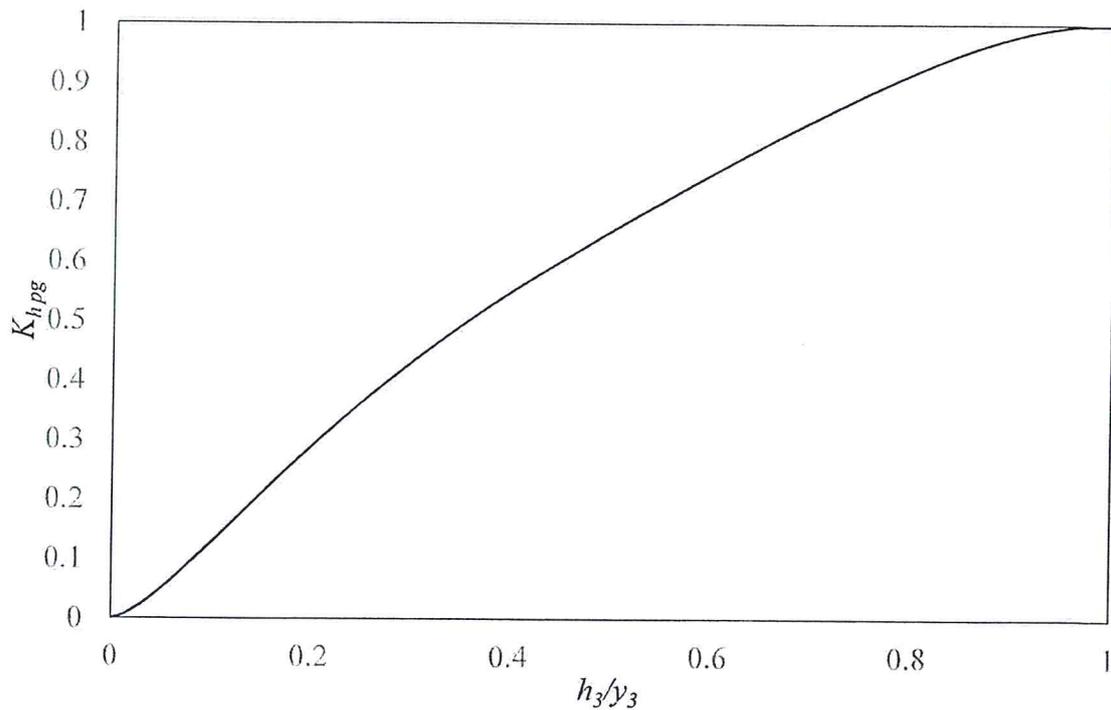


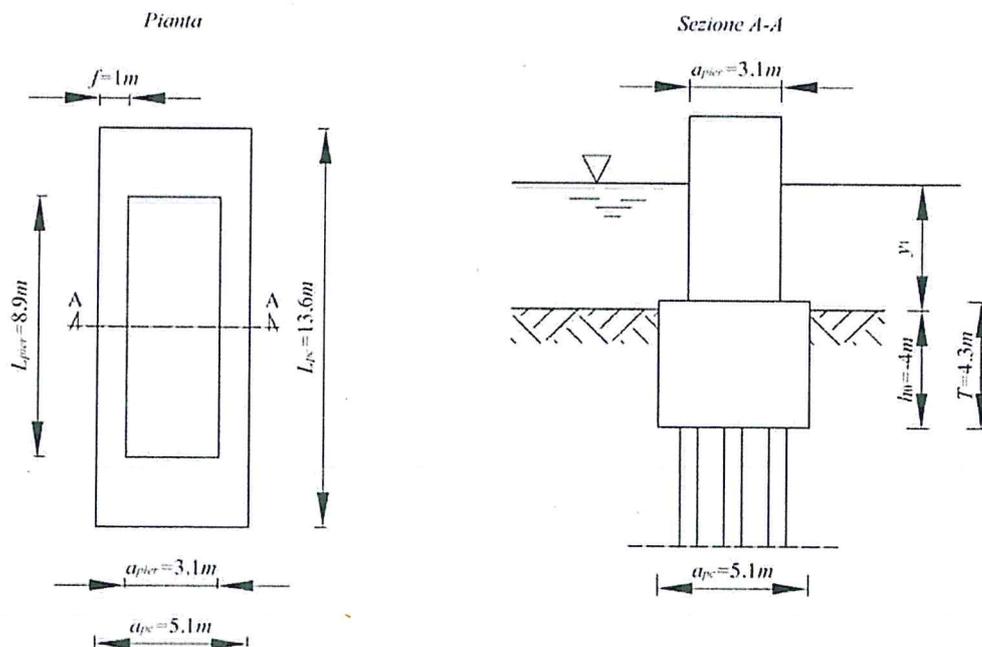
Fig. 3.6. Fattore correttivo  $K_m$  in funzione del numero di righe di pali allineate.



**Fig. 3.7.** Fattore  $K_{hpg}$  di correzione dell'altezza del gruppo di pali.

### 3.3.1 Calcolo dell'erosione della pila esistente

Nel seguito è descritto il calcolo dell'erosione al piede della pila esistente, il cui schema di calcolo è riportato per comodità di lettura in Figura 3.8.



**Fig. 3.8.** Schema di calcolo della pila esistente.

Le grandezze cinematiche della corrente che sono state desunte dall'analisi idraulica sono le seguenti:

$$\text{tirante } y_1 = 4.0 \text{ [m]}$$

$$\text{velocità della corrente } V_1 = 3.5 \text{ [m/s]}$$

$$\text{angolo di incidenza della corrente } \theta = 0^\circ$$

Per quanto riguarda invece le caratteristiche dei terreni su cui è fondata la pila utili allo sviluppo del calcolo, in assenza di una analisi granulometrica di dettaglio si è considerato:

$$D_{50} = 0.01 \text{ [m]}$$

$$D_{84} = 0.02 \text{ [m]}$$

Note le grandezze geometriche della pila, si calcola il coefficiente  $K_{h \text{ pier}}$  dall'equazione (3.4) e i coefficienti  $K_1$  dalla Tabella 3.1,  $K_2$  dall'eq. (3.3) e  $K_3$  dalla Tabella 3.2;

$$K_{h \text{ pier}} = 0.35$$

$$K_1 = 1.0$$

$$K_2 = 1.0$$

$$K_3 = 1.1$$

Noti tali coefficienti, attraverso l'equazione (3.2) è possibile calcolare la prima aliquota di erosione dovuta all'interazione tra pila e corrente,  $y_{s \text{ pier}}$ :

$$y_{s \text{ pier}} = 2.02 \text{ [m]}$$

Si procede quindi con la determinazione delle grandezze per il calcolo dell'aliquota dovuta all'interazione tra piede e corrente:

$$h_2 = -2.99 \text{ [m]}$$

$$y_2 = 5.01 \text{ [m]}$$

$$V_2 = 2.79 \text{ [m/s]}$$

Poiché il valore di  $h_2$  è negativo, e quindi il fondo del piede della pila è al di sotto del nuovo livello di piano campagna stabilito a seguito del contributo  $y_{s \text{ pier}}$ , si procede nel calcolo considerando il caso 2. Pertanto, si calcolano le seguenti grandezze relative al piede:

$$y_f = 1.31 \text{ [m]}$$

$$V_f = 2.23 \text{ [m/s]}$$

la velocità critica:

$$k_s = 0.07$$

$$V_c = 1.57 \text{ [m/s]}$$

e i relativi coefficienti:

$$K_1 = 1.0$$

$$K_2 = 1.0$$

$$K_3 = 1.1$$

$$K_W = 1.0$$

Note le grandezze relative al piede e i coefficienti, attraverso l'equazione (3.12) è possibile calcolare la seconda aliquota, dovuta all'interazione tra piede della pila e corrente  $y_{s \text{ pc}}$ :

$$y_{s \text{ pc}} = 6.26 \text{ [m]}$$

Si procede infine con la determinazione delle grandezze per il calcolo dell'aliquota dovuta all'interazione tra piede e gruppo di pali di fondazione:

$$h_3 = 0.14 \text{ [m]}$$

$$y_3 = 8.14 \text{ [m]}$$

$$V_3 = 1.72 \text{ [m/s]}$$

Seguendo il metodo per il calcolo della larghezza dei pali proiettata ( $a_{proj}$ ) schematizzato in Fig. 3.4, e con riferimento alla pianta effettiva dei pali relativi alla configurazione in esame, si ricava:

$$a_{proj} = 1.60 \text{ [m]}$$

Sapendo che il diametro dei pali è:

$$a = 0.6 \text{ [m]}$$

e l'interasse tra gli stessi è assunto, cautelativamente, pari a:

$$S = 4.0 \text{ [m]}$$

è possibile determinare il valore del coefficiente:

$$K_{sp} = 0.55$$

e, quindi, sapendo che il coefficiente  $K_m$  è pari a 1 per gruppo di pali sfalsati, si determina il valore di:

$$a_{pg}^* = 0.66 \text{ [m]}$$

In funzione del rapporto  $h_3/y_3$  si determina il coefficiente:

$$K_{hpg} = 0.066$$

e, quindi, sapendo che i coefficienti assumono i valori:

$$K_1 = 1.0$$

$$K_3 = 1.1$$

si calcola, attraverso l'equazione (3.18), la terza aliquota di erosione dovuta all'interazione tra gruppo di pali e corrente  $y_{s\ pg}$ :

$$y_{s\ pg} = 0.11 \text{ [m]}$$

In conclusione, determinate le tre aliquote di erosione, è possibile calcolare il valore dell'erosione totale, che risulta pari a:

$$y_s = 8.39 \text{ [m]}$$

### 3.3.2 Calcolo dell'erosione della pila ricostruita

Nel seguito è descritto il calcolo dell'erosione al piede della pila esistente, il cui schema di calcolo è riportato in Figura 3.9.

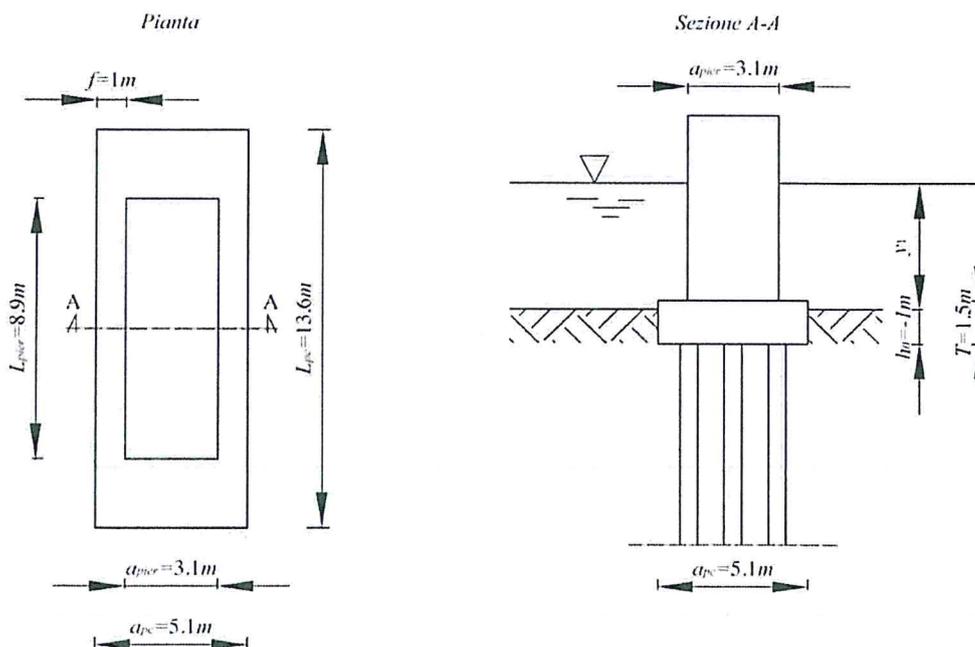


Fig. 3.9. Schema di calcolo della pila ricostruita.

Le grandezze cinematiche della corrente desunte dall'analisi idraulica sono le seguenti:

$$\text{tirante } y_1 = 7.5 \text{ [m]}$$

$$\text{velocità della corrente } V_1 = 4.0 \text{ [m/s]}$$

$$\text{angolo di incidenza della corrente } \theta = 0^\circ$$

Per quanto concerne invece le caratteristiche del materiale di fondo, si è fatto riferimento agli stessi valori utilizzati per la pila esistente:

$$D_{50} = 0.01 \text{ [m]}$$

$$D_{84} = 0.02 \text{ [m]}$$

Note le grandezze geometriche della pila, si calcola il coefficiente  $K_{h \text{ pier}}$  dall'equazione (3.4) e i coefficienti  $K_1$  dalla Tab. 3.1,  $K_2$  dall'eq. (3.3) e  $K_3$  dalla Tabella 3.2;

$$K_{h \text{ pier}} = 0.32$$

$$K_1 = 1.0$$

$$K_2 = 1.0$$

$$K_3 = 1.1$$

Noti i coefficienti, attraverso l'equazione (3.2) si calcola la prima aliquota di erosione dovuta all'interazione tra pila e corrente,  $y_{s \text{ pier}}$ :

$$y_{s \text{ pier}} = 2.17 \text{ [m]}$$

Si procede successivamente con la determinazione delle grandezze per il calcolo dell'aliquota dovuta all'interazione tra piede e corrente:

$$h_2 = 0.09 \text{ [m]}$$

$$y_2 = 8.59 \text{ [m]}$$

$$V_2 = 3.49 \text{ [m/s]}$$

Poiché il valore di  $h_2$  è positivo, e quindi il fondo del piede della pila è al di sopra del nuovo livello di piano campagna stabilito a seguito del contributo  $y_{s \text{ pier}}$ , si procede nel calcolo considerando il caso 1.

Pertanto, in funzione dei rapporti  $h_2/y_2$  e  $T/y_2$  si calcola:

$$a_{pc}^* = 0.79 \text{ [m]}$$

la velocità critica:

$$k_s = 0.07$$

$$V_c = 1.62 \text{ [m/s]}$$

e i relativi coefficienti:

$$K_1 = 1.1$$

$$K_2 = 1.0$$

$$K_3 = 1.1$$

$$K_W = 1.0$$

Note le grandezze relative al piede e i coefficienti, attraverso l'equazione (3.5) si calcola la seconda aliquota di erosione dovuta all'interazione tra piede della pila e corrente,  $y_{s \text{ pc}}$ :

$$y_{s \text{ pc}} = 2.92 \text{ [m]}$$

Si procede infine con la determinazione delle grandezze per il calcolo dell'aliquota dovuta all'interazione tra piede e gruppo di pali di fondazione:

$$h_3 = 1.54 \text{ [m]}$$

$$y_3 = 10.04 \text{ [m]}$$

$$V_3 = 2.99 \text{ [m/s]}$$

Seguendo il metodo per il calcolo della larghezza dei pali proiettata ( $a_{proj}$ ), schematizzato in Figura 3.4, e con riferimento alla pianta effettiva dei pali relativi alla configurazione in esame si addiende

a:

$$a_{proj} = 3.2 \text{ [m]}$$

Sapendo che il diametro dei pali è:

$$a = 0.8 \text{ [m]}$$

e l'interasse tra gli stessi è assunto, cautelativamente, pari a:

$$S = 1.4 \text{ [m]}$$

È possibile determinare il valore del coefficiente:

$$K_{sp} = 0.715$$

e, quindi, sapendo che il coefficiente  $K_m$  è pari a 1 per gruppo di pali sfalsati, si determina il valore di:

$$a_{pg}^* = 2.29 \text{ [m]}$$

In funzione del rapporto  $h_3/\gamma_3$  si determina il coefficiente:

$$K_{hpg} = 0.96$$

e, quindi, sapendo che i coefficienti:

$$K_1 = 1.0$$

$$K_3 = 1.1$$

si calcola, attraverso l'equazione (3.18), la terza aliquota dovuta all'interazione tra gruppo di pali e corrente  $y_{s pg}$ :

$$y_{s pg} = 1.40 \text{ [m]}$$

Infine, una volta determinate le tre aliquote, è possibile calcolare dalla loro somma il valore dell'erosione totale:

$$y_s = 6.49 \text{ [m]}$$

## 4. Calcolo della massima escavazione in corrispondenza delle spalle

### 4.1 Introduzione

Altro aspetto non trascurabile riguarda la stima dei fenomeni erosivi che possono determinarsi, in occasione degli eventi di piena, in corrispondenza delle spalle del ponte, a causa delle rapide variazioni di intensità e di distribuzione delle velocità.

Difatti, ciascuna spalla, nello sporgere nell'alveo, costringe la corrente ad una brusca deviazione, dando luogo a vortici ad asse orizzontale, molto simili a quelli a ferro di cavallo delle pile, localizzati lungo il lato sporgente verso il fiume della spalla, mentre vortici ad asse verticale si creano a partire dal bordo di distacco della corrente della faccia posteriore della spalla (Fig. 4.1).

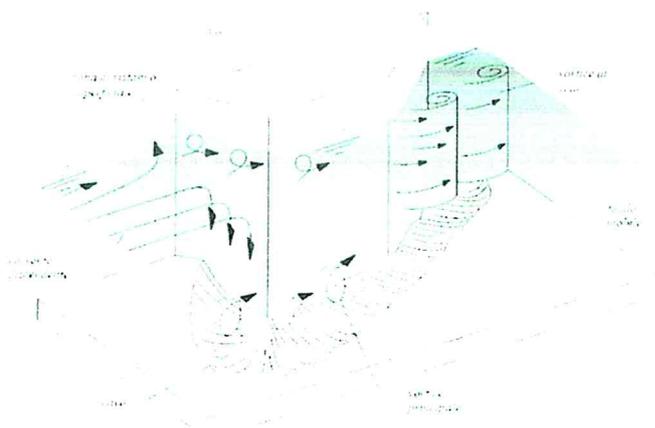


Fig. 4.1. Scavo prodotto da una spalla del ponte in alveo.

Al solito, la profondità  $y_s$  dello scavo nel materiale costituente il fondo dell'alveo è funzione di numerose variabili: quelle della corrente indisturbata (tirante, velocità e angolo di incidenza), del materiale (densità, diametro delle particelle) e della geometria della spalla (sporgenza, coefficiente di forma e di contrazione).

Come per le pile, lo studio dei fenomeni che determinano tale erosione, in mancanza di un modello fisico sperimentale che viene allestito per casi molto particolari, viene normalmente condotto con riferimento a modelli presenti in letteratura, definiti sulla base di prove di laboratorio su modelli fisici in scala o su rilevazioni effettuate su reali casi di studio.

Come regola generale, in questi studi si è osservato come le spalle più vulnerabili siano quelle che si trovano in corrispondenza o nelle immediate vicinanze delle rive del canale principale. Nei casi in cui, invece, la spalla si presenta arretrata rispetto alla linea di riva, ad esempio per la presenza di un'ampia area golenale, si sono osservati scavi locali con profondità di erosione fino a quattro volte la profondità media della corrente defluente sull'area golenale.

Anche per le spalle del ponte il calcolo è stato effettuato seguendo le indicazioni fornite da Arneson et al. (2012) nella HEC 18 per l'erosione al piede di una spalla.

### 4.2 Determinazione della profondità di erosione

Per la stima della massima profondità di erosione sono state utilizzate diverse relazioni, scegliendo poi tra i valori risultanti quello ragionevolmente più cautelativo. Il calcolo è descritto in linea teorica nei paragrafi successivi, al termine dei quali sono riportati i risultati ottenuti per il caso in esame.

#### 4.2.1 Equazione di Froehlich (1989)

L'equazione di Froehlich (1989) è stata derivata da analisi dimensionali e analisi di regressione dei dati di laboratorio disponibili:

$$\frac{y_s}{y_a} = 2.27 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \left( \frac{L'}{y_a} \right)^{0.43} F^{0.61} + 1 \quad (4.1)$$

in cui:

$y_s$  = massima profondità di scavo [m]

$y_a$  = altezza media della corrente in corrispondenza della spalla [m]

$L'$  = lunghezza della corrente "attiva" ostruita dalla spalla, rappresentata nello schema di Figura 4.2 [m]

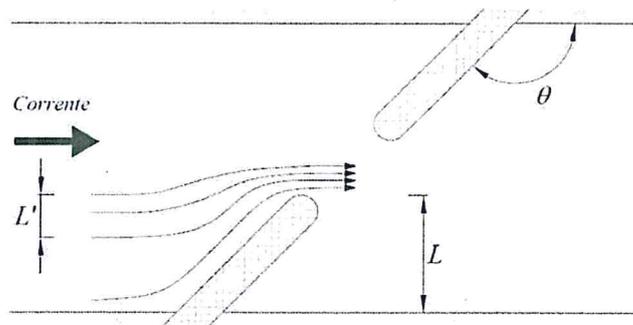
$F$  = numero di Froude della corrente, calcolato in corrispondenza della spalla

$K_1$  = coefficiente di correzione per la forma della spalla, i cui valori sono riportati, per alcune configurazioni, in Figura 4.3

$K_2$  = coefficiente di correzione per l'angolo di inclinazione rispetto alla corrente (per la cui definizione si veda la Figura 4.2), dato dalla relazione seguente:

$$K_2 = \left( \frac{\theta}{90} \right)^{0.13} \quad (4.2)$$

Per spalle inclinate verso valle ( $\theta < 90^\circ$ ) la profondità di erosione sarà minore, mentre la stessa sarà maggiore per spalle inclinate verso monte ( $\theta > 90^\circ$ ).



**Fig. 4.2.** Angolo di inclinazione  $\theta$  della spalla del ponte rispetto alla corrente, e lunghezza della corrente attiva ostruita dalla spalla.

La lunghezza  $L'$  della corrente "attiva" viene definita sulla base delle minori velocità della corrente che si verificano in corrispondenza della sezione dell'alveo ostruita dalla spalla del ponte (Fig. 4.2).

#### 4.2.2 Equazione di Melville e Coleman (2000)

In questo caso la massima escavazione  $y_s$ , per ostacoli perpendicolari al flusso della corrente indisturbata, è data come:

$$\begin{aligned} y_s &= 2 \cdot K_1 \cdot L && \text{per} && \frac{L}{y_a} < 1 \\ y_s &= 2 \cdot K^* \cdot \sqrt{y_a \cdot L} && \text{per} && 1 \leq \frac{L}{y_a} \leq 25 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$y_s = 10 \cdot y_a \quad \text{per} \quad \frac{L}{y_a} > 25$$

in cui:

$L$  = sporgenza della spalla protesa in alveo (Fig. 4.2), proiettata lungo il piano ortogonale alla corrente [m]

$K_1$  = coefficiente di correzione per la forma della spalla, già visto in precedenza

$K^*$  = coefficiente che può essere calcolato dalla relazione:

$$K^* = K_1 + (1 - K_1) \cdot \left( 0.1 \cdot \frac{L}{y_a} - 1.5 \right) \quad (4.4)$$

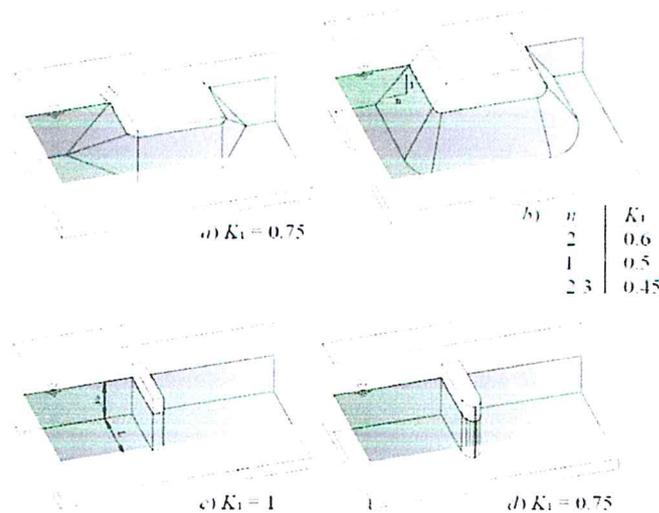


Fig. 4.3. Valori di  $K_1$  al variare della geometria della spalla.

#### 4.3.1 Calcolo dell'erosione per la spalla in sinistra idraulica

Di seguito è riportato il dettaglio delle calcolazioni effettuate per la stima dell'erosione in corrispondenza della pila in sinistra idraulica. Va evidenziato come le valutazioni sono state effettuate assumendo valori cautelativi delle grandezze in gioco, quando non note o non determinabili, rimandando alla fase di progettazione esecutiva una valutazione di maggior dettaglio.

I dati assunti ai fini della determinazione della profondità di erosione sono:

- Portata in corrispondenza della spalla  $Q_a = 20.0 \text{ [m}^3/\text{s]}$
- Tirante idrico medio in corrispondenza della spalla  $y_a = 4.00 \text{ [m]}$
- Angolo di inclinazione della spalla rispetto al lato di valle dell'argine  $\theta = 90^\circ$ , per cui  $K_2 = 1.00$
- Lunghezza della spalla protesa in alveo, misurata ortogonalmente alla corrente  $L = 10 \text{ [m]}$
- Lunghezza della corrente attiva  $L' = 5 \text{ [m]}$
- La struttura della spalla presenta delle pareti pressoché verticali con sezione orizzontale semicircolare, per cui si è deciso di adottare un valore del coefficiente di forma  $K_1 = 0.75$

#### Equazione di Froehlich (1989)

La portata "attiva", ostruita dalla presenza della spalla, e la corrispondente velocità, risultano pari a:

$$Q_a = 20 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

$$V_a = Q_a / A_c = Q_a / (y_a \cdot L) = 20 / (4 \cdot 10) = 0.5 \text{ [m/s]}$$

il numero di Froude associato a tale moto è:

$$F = \frac{V_a}{\sqrt{g \cdot y_a}} = \frac{0.5}{\sqrt{9.806 \cdot 4}} = 0.08$$

Pertanto, la profondità massima di erosione, fornita dall'espressione 4.1, risulta essere:

$$\begin{aligned} y_s &= \left[ 2.27 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \left( \frac{L'}{y_a} \right)^{0.43} F^{0.61} + 1 \right] \cdot y_a = \\ &= \left[ 2.27 \cdot 0.75 \cdot 1 \cdot \left( \frac{5}{4} \right)^{0.43} 0.08^{0.61} + 1 \right] \cdot 4 = 1.401 \cdot 4 = 5.60 \text{ [m]} \end{aligned}$$

*Equazione di Melville e Coleman (2000)*

Il rapporto  $L/y_a$  risulta:

$$\frac{L}{y_a} = \frac{10}{4} = 2.50$$

maggiore dell'unità ed inferiore al limite di 25, per cui è necessario calcolare il valore del coefficiente  $K^*$ :

$$K^* = K_1 + (1 - K_1) \cdot \left( 0.1 \cdot \frac{L}{y_a} - 1.5 \right) = 0.75 + (1 - 0.75) \cdot (0.1 \cdot 2.50 - 1.5) = 0.438$$

Da questo è possibile, tramite la seconda equazione delle (4.3), ricavare il valore della profondità massima di erosione:

$$y_s = 2 \cdot K^* \cdot \sqrt{y_a \cdot L} = 2 \cdot 0.438 \cdot \sqrt{4 \cdot 10} = 5.53 \text{ [m]}$$

#### 4.3.2 Calcolo dell'erosione per la spalla in destra idraulica

Per la spalla in destra idraulica sono stati assunti i seguenti dati ai fini della determinazione della profondità di erosione:

- Portata in corrispondenza della spalla  $Q_a = 10.0 \text{ [m}^3/\text{s]}$
- Tirante idrico medio in corrispondenza della spalla  $y_a = 2.00 \text{ [m]}$
- Angolo di inclinazione della spalla rispetto al lato di valle dell'argine  $\theta = 90^\circ$ , per cui  $K_2 = 1.00$
- Lunghezza della spalla protesa in alveo, misurata ortogonalmente alla corrente  $L = 10 \text{ [m]}$
- Lunghezza della corrente attiva  $L' = 3 \text{ [m]}$
- La struttura della spalla presenta delle pareti pressoché verticali con sezione orizzontale semicircolare, per cui si è deciso di adottare un valore del coefficiente di forma  $K_1 = 0.75$

*Equazione di Froehlich (1989)*

La portata "attiva", ostruita dalla presenza della spalla, e la corrispondente velocità, risultano pari a:

$$Q_a = 10 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

$$V_a = Q_a / A_c = Q_a / (y_a \cdot L) = 10 / (2 \cdot 10) = 0.5 \text{ [m/s]}$$

il numero di Froude associato a tale moto è:

$$F = \frac{V_a}{\sqrt{g \cdot y_a}} = \frac{0.5}{\sqrt{9.806 \cdot 2}} = 0.11$$

Infine, la profondità massima di erosione, data dalla (4.1), risulta essere:

$$\begin{aligned} y_s &= \left[ 2.27 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \left( \frac{L'}{y_a} \right)^{0.43} F^{0.61} + 1 \right] \cdot y_a = \\ &= \left[ 2.27 \cdot 0.75 \cdot 1 \cdot \left( \frac{3}{2} \right)^{0.43} 0.11^{0.61} + 1 \right] \cdot 4 = 1.536 \cdot 2 = 3.07 \text{ [m]} \end{aligned}$$

*Equazione di Melville e Coleman (2000)*

Il rapporto  $L/y_a$  risulta:

$$\frac{L}{y_a} = \frac{10}{2} = 5$$

maggiore dell'unità ed inferiore al limite di 25, per cui è necessario calcolare il valore del coefficiente  $K^*$ :

$$K^* = K_1 + (1 - K_1) \cdot \left( 0.1 \cdot \frac{L}{y_a} - 1.5 \right) = 0.75 + (1 - 0.75) \cdot (0.1 \cdot 5 - 1.5) = 0.5$$

Da questo è possibile, tramite la seconda equazione delle 4.3, ricavare il valore della profondità massima di erosione:

$$y_s = 2 \cdot K^* \cdot \sqrt{y_a \cdot L} = 2 \cdot 0.5 \cdot \sqrt{2 \cdot 10} = 4.47 \text{ [m]}$$

Per entrambe le spalle, i valori della profondità massima di erosione ottenuti con l'applicazione del modello di Froehlich sono risultati compatibili con i corrispondenti ottenuti dal modello di Melville e Coleman. Assumendo a base della progettazione la condizione più cautelativa, i valori da adottare risultano essere:

- spalla in sinistra idraulica  $y_s = 5.60$  [m]
- spalla in destra idraulica  $y_s = 4.50$  [m]

ottenuti, rispettivamente, dal modello di Froehlich e da quello di Melville e Coleman.

## 5. Erosioni localizzate a valle della soglia

### 5.1 Introduzione

Un aspetto di primaria importanza nella progettazione della soglia da ricostruire a valle dell'attraversamento riguarda la stima dell'erosione che può prodursi sul fondo dell'alveo a valle di essa. Come ben noto in letteratura, il problema riguarda due distinti processi di scavo:

- quello nella zona di impatto del getto stramazzante se il fondo non è protetto;
- quello a valle della platea se, invece, il fondo è rivestito.

Lo scavo prodotto dall'azione del getto sfiorante da una briglia sul fondo di un corso d'acqua non protetto (Fig. 5.1) è stato trattato da Schoklitsch (1932), che ha fornito una relazione per il calcolo della profondità di erosione  $s_{max}$ .

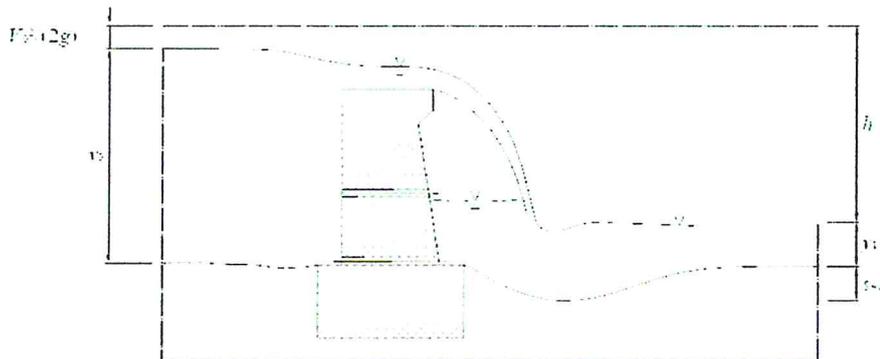


Fig. 5.1. Scavo prodotto a valle di una briglia.

Nel caso in cui il fondo dell'alveo a valle della briglia sia invece stato rivestito con materiale rigido (ad es. con calcestruzzo o massi), la corrente che abbandona tale superficie può provocare in un certo intorno del tratto successivo erosioni anche di apprezzabile entità (Fig. 5.2).

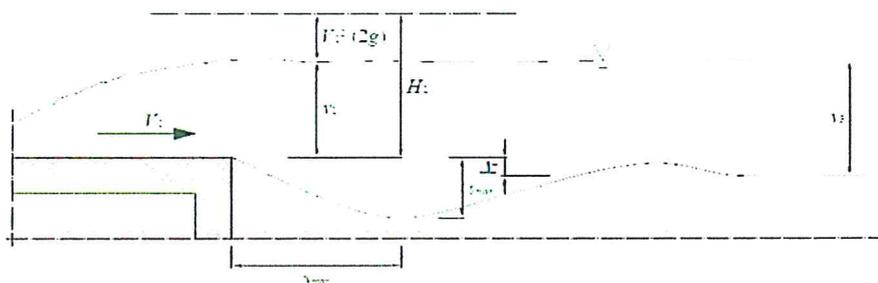


Fig. 5.2. Scavo prodotto a valle di una platea.

Lo stesso Schoklitsch (1932) ha proposto anche per questo processo di erosione una espressione, sempre di carattere empirico, per la valutazione dello scavo massimo  $s_{max}$ .

Nel seguito è descritta la procedura di calcolo in linea analitica, riportando in coda ai rispettivi paragrafi i risultati numerici ottenuti per il caso in esame.

Va all'uopo precisato che, a vantaggio di sicurezza, si è proceduto alla stima della massima erosione a valle della soglia. Si è inoltre proceduto alla stima della massima escavazione prevista a valle della platea, in modo che si possano adeguatamente dimensionare interventi di protezione. Si ribadisce inoltre come anche in tale caso siano stati assunti, per la granulometria del materiale di fondo, valori sostanzialmente cautelativi in assenza di una adeguata campagna di caratterizzazione.

Tali valori dovranno essere successivamente verificati ed, eventualmente, adeguati in fase di progettazione esecutiva.

### 5.2.1 Determinazione della profondità di erosione a valle della soglia

Per la stima della massima profondità di erosione, nel caso di assenza del rivestimento del fondo dell'alveo a valle del piede della soglia, è stata utilizzata la relazione empirica definita da Schoklitsch (1932). I termini principali che compaiono nell'equazione (5.1) fanno riferimento allo schema riportato in Figura 5.1:

$$s_{\max} = 4.75 \cdot \frac{h^{0.2} \cdot q^{0.57}}{d_{90}^{0.32}} - y_1 \quad (5.1)$$

in cui:

- $s_{\max}$  = la massima profondità di scavo [m]
- $q$  = portata unitaria [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ]
- $d_{90}$  = diametro caratteristico del materiale di fondo [mm]
- $y_0$  e  $y_1$  = altezze, rispettivamente a monte e a valle, della soglia [m]
- $V_0$  = velocità media a monte del salto [m/s]
- $h$  = dislivello [m], dato da:

$$h = y_0 + \frac{V_0^2}{2 \cdot g} - y_1 \quad (5.2)$$

### 5.2.2 Determinazione della profondità di erosione a valle della platea

Nel caso ci sia la presenza di un rivestimento del fondo dell'alveo a valle del piede della soglia, il problema dell'erosione può comunque presentarsi laddove la corrente liquida abbandona la platea stessa.

I termini principali che compaiono nell'equazione (5.3), formulata da Schoklitsch (1932), fanno riferimento allo schema riportato in Figura 5.2:

$$s_{\max} = 0.378 \cdot H_2^{0.5} \cdot q^{0.35} + 2.15 \cdot \Delta z \quad (5.3)$$

in cui:

- $s_{\max}$  = massima profondità di scavo [m]
- $q$  = portata unitaria [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ]
- $y_2$  e  $H_2$  = tirante e carico totale della corrente sulla platea, rispettivamente [m]
- $V_2$  = velocità media della corrente sulla platea [m/s]
- $\Delta z$  = dislivello tra la quota della platea e quella del fondo dell'alveo a valle [m]

### 5.3.1 Stima della profondità di erosione a valle della soglia

La soglia, da ricostruire in calcestruzzo, presenta un'altezza, al netto delle fondazioni, di 3.00 m. I tiranti idrici a monte e a valle della soglia stessa, riferiti al livello medio del mare, sono rispettivamente  $y_0' = 154.9$  m s.l.m. e  $y_1' = 154.5$  m s.l.m., mentre la quota del fondo dell'alveo risulta essere  $y_{fa} = 149.0$  m s.l.m.

La portata unitaria della corrente è  $q = 20$   $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  e la sua velocità media a monte della soglia è  $V_0 = 3.5$  m/s. La granulometria del materiale costituente il fondo a valle della soglia è definita dal valore del diametro caratteristico  $d_{90} = 30$  mm.

Il carico totale  $H_0'$  a monte della soglia è:

$$H_0' = y_0' + \frac{V_0^2}{2 \cdot g} = 154.9 + \frac{3.5^2}{2 \cdot 9.806} = 155.52 \text{ [m s.l.m.]}$$

da questo si ricava il dislivello  $h$ :

$$h = H_0' - y_1' = 155.52 - 154.9 = 1.02 \text{ [m]}$$

mentre il tirante a valle della soglia, riferito al fondo dell'alveo, risulta pari a:

$$y_1 = y_1' - y_{fa} = 154.5 - 149.0 = 5.5 \text{ [m]}$$

Infine, si ricava la profondità massima di erosione:

$$s_{\max} = 4.75 \cdot \frac{h^{0.2} \cdot q^{0.57}}{d_{90}^{0.32}} - y_1 = 4.75 \cdot \frac{1.02^{0.2} \cdot 20^{0.57}}{30^{0.32}} - 5.5 \cong 3.40 \text{ [m]}$$

### 5.3.2 Stima della profondità di erosione a valle della platea

A valle della soglia in calcestruzzo si prevede la costruzione di una platea di spessore non inferiore a 1.50 m, in modo da garantirne adeguata stabilità ed evitarne il dissesto a seguito del passaggio delle portate di piena. Il tirante idrico sulla platea, individuato in precedenza dal simbolo  $y_0$ , risulta essere  $y_2 = 5.5$  m; la portata unitaria della corrente è sempre  $q = 20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e la sua velocità media è  $V_2 = 3.5 \text{ m/s}$ . La granulometria del materiale costituente il fondo a valle della soglia è definita dal diametro caratteristico  $d_{90} = 30 \text{ mm}$ . Infine, il dislivello tra il fondo dell'alveo e il fondo della platea è posto pari a  $\Delta z = 0$ .

Il carico totale  $H_2$  sulla platea è:

$$H_2 = y_2 + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} = 5.5 + \frac{3.5^2}{2 \cdot 9.806} = 6.12 \text{ [m]}$$

da cui si ricava la profondità massima di erosione:

$$s_{\max} = 0.378 \cdot H_2^{0.5} \cdot q^{0.35} + 2.15 \cdot \Delta z = 0.378 \cdot 6.12^{0.5} \cdot 20^{0.35} + 2.15 \cdot 0 \cong 2.70 \text{ [m]}$$

## Bibliografia

Arneson L.A., Zevenbergen L.W., Lagasse P.F., Clopper P.E. (2012). *Evaluating scour at bridges*. Hydraulic Engineering Circular No. 18, Publication No. FHWA HIF 12-003, Fifth Edition, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.

Flokstra C. (1976). *Generation of two-dimensional horizontal secondary currents*. Rep. No. S163, Part II, Delft Hydraulics Laboratory, Delft, The Netherlands.

Froehlich D.C. (1989). *Abutment Scour Prediction*, Presentation, Transportation Research Board, Washington, DC.

Melville B.W., Coleman S.E. (2000). *Bridge scour*. Water Resources Publication, Highlands Ranch, Colorado, USA.

Rodi W. (1993). *Turbulence models and their application in hydraulics*. 3<sup>rd</sup> Ed., IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherlands

Schoklitsch A. (1932). *Kolkbildung unter Über-fallstrahlen*. *Wasserwirtschaft* 25(24): 341-343 (In German).

U.S. Department of the Interior (2008). *SRH-2D version 2: Theory and User's Manual. Sedimentation and River Hydraulics – Two-Dimensional River Flow Modeling*. Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado