

CONTRIBUTO AL DIMENSIONAMENTO DI UNA BRIGLIA A FESSURA CON PROFILO LINEARE DOPPIO

(*) Professore Ordinario di «Sistemazioni Idraulico-Forestali», Dipartimento di Ingegneria e Tecnologie Agro-Forestali, Facoltà di Agraria, Università di Palermo; viale delle Scienze - 90128 Palermo; vferro@unipa.it

Le opere aperte determinano un arresto selettivo del materiale solido trasportato dalla corrente fluviale e, pertanto, permettono sia il mantenimento dell'equilibrio dei tratti a valle della sistemazione sia l'alimentazione solida del litorale interessato dalla presenza della foce del corso d'acqua.

Nella nota per il caso di fessura a profilo lineare doppio (trapezia rovescia sormontata da rettangolare, trapezia rovescia sormontata da trapezia diritta) vengono presentate le equazioni disponibili per la soluzione dei classici problemi della tecnica. Vengono fornite, infine, sia per il caso del problema di verifica che per quello di progetto delle soluzioni analitiche in forma chiusa.

Parole chiave: sistemazione dei corsi d'acqua; briglie aperte; briglie a fessura; dimensionamento idraulico.

Key words: stream rehabilitation; open check dams; slit-check dams; hydraulic design.

Citazione - FERRO V., 2011 - *Contributo al dimensionamento di una briglia a fessura con profilo lineare doppio*. L'Italia Forestale e Montana, 66 (1): 41-54. doi: 10.4129/ifm.2011.1.04

INTRODUZIONE

L'obiettivo della sistemazione idraulica del tratto montano di un corso d'acqua è assicurare una condizione di stabilità per il cavo fluviale, mediante il raggiungimento di una condizione di equilibrio permanente tra la portata solida e quella liquida (BENINI, 1984), facendo ricorso ad interventi di tipo strutturale capaci, nel rispetto della vigente normativa in tema di tutela ambientale, di conservare e preservare gli ecosistemi preesistenti a valle (FERRO, 2006, 2008).

In questa visione ecosistemica del corso d'acqua (FIEBIGER, 1984, 1986), (FERRO e PUGLISI, 2004), (KETTL, 1989), in cui vengono presi in esame sia il carattere naturale del sistema fluviale (componente biotica) sia i processi che derivano dalle conoscenze e dalle azioni antropiche (componente abiotica), le *briglie aperte* assumono una precisa valenza ambientale (FERRO e FERRERI, 1988), (ZOLIN, 1995). Queste opere consentono, infatti, un arresto *non indiscriminato* del materiale solido trasportato dalla corrente, per cui solo il materiale grossolano, prevalentemente trasportato dalle

correnti di piena, viene trattenuto a monte del manufatto mentre quello di piccole e medie dimensioni prosegue verso valle migliorando, peraltro, l'efficacia della sistemazione stessa.

Nel caso di *briglie di consolidamento* il convogliamento di una parte del materiale solido a valle dell'opera, oltre ad evitare l'approfondimento del fondo alveo proprio a valle della briglia, contribuisce al mantenimento dell'equilibrio del corso d'acqua nel tronco vallivo che risulterebbe altrimenti alterato dalla cresciuta capacità di trasporto della corrente fluviale (D'AGOSTINO *et al.*, 2004). Inoltre durante il periodo di morbida la corrente fluviale, in relazione alla sua capacità di erosione e trasporto, può anche essere in grado di rimuovere parte del materiale depositatosi durante la piena, convogliandolo a valle e ripristinando, pertanto, a monte del manufatto una zona di deposito. Il risultato di questa azione naturale di *autopulizia* può in ogni caso essere migliorato con qualche modesto intervento antropico. Pertanto, nel caso in cui la briglia aperta abbia una funzione di consolidamento, il dimensionamento dovrà privilegiare la capacità di *sele-*

zione *granulometrica* del manufatto e la necessità di effettuare una laminazione della portata solida in arrivo (D'AGOSTINO *et al.*, 2004).

Nel caso di briglie aperte con funzioni di *trattenuta*, poiché l'opera ha la possibilità di arrestare prevalentemente il materiale di maggiori dimensioni, il manufatto presenta in corrispondenza degli eventi di piena la sua massima efficacia sistematoria dato che la capacità di invaso a monte della briglia risulta disponibile per l'accumulo del solo materiale grossolano (CAVINATO *et al.*, 1996).

Anche nel caso di opere con funzione di *trattenuta* una adeguata progettazione del manufatto può consentire un funzionamento della briglia caratterizzato da una apprezzabile capacità di autopulizia (ARMANINI e BENEDETTI, 1996), (ARMANINI e LARCHER, 2001), (BENEDETTI, 1997), (BRATH *et al.*, 1992), (LARCHER e ARMANINI, 2000), (KASAI *et al.*, 1996) (MATSUURA *et al.*, 1996).

Nel caso di briglie con funzione di *trattenuta* le opere devono essere costruite in siti idonei dal punto di vista orografico, nei quali sia possibile, cioè, invasare volumi solidi rilevanti senza fare ricorso ad opere caratterizzate da valori notevoli dell'altezza fuori terra del manufatto (MAIONE, 1988), (MAIONE *et al.*, 2000), (MILANO, 2003), (MIZUYAMA *et al.*, 1996).

In ambiente mediterraneo le briglie aperte sono state prevalentemente utilizzate per la funzione di consolidamento, con lo specifico obiettivo di conseguire la sistemazione idraulica del corso d'acqua effettuando una selezione granulometrica del materiale solido trasportato al fine di garantire l'alimentazione solida alla foce del corso d'acqua (D'ASARO, 2002), (D'ASARO e GRILLONE, 2005), (FERRO, 2006).

In ambiente alpino le opere aperte hanno trovato applicazione con riferimento alla funzione di *trattenuta*, indispensabile per contrastare gli effetti delle colate detritiche (D'AGOSTINO *et al.*, 2004), mentre ancora poco frequente è l'uso con l'obiettivo di consolidare il fondo e le sponde del corso d'acqua.

Nonostante le numerose ricerche di tipo sia teorico sia sperimentale effettuate in questi ultimi anni (ARMANINI e BENEDETTI, 1996), (ARMANINI e LARCHER, 2001), (BENEDETTI,

1997), (BRATH *et al.*, 1992), (BUSNELLI *et al.*, 2001), (CAROLLO *et al.*, 2008), (CATELLA *et al.*, 2002), (CERATO, 1995, 1996), (CLAUZEL e PONCET, 1963), (COLA, 1970, 1972), (DI STEFANO *et al.*, 2007), (DI STEFANO e FERRO, 2008) (DRAGOGNA, 1967, 1970a, 1970b, 1975), (DELLA GIACOMA *et al.*, 1989), (FERRO, 1988, 1990, 2000a, 2000b, 2006, 2009), (FERRO e FERRERI, 1988), (FERRO e BONSAUGUE, 2007), (GENET, 1953), (JOHNSON e MCCUEN, 1989), (MILANO, 2003), (MILANO *et al.*, 1998), (PASSERINI, 1957), (POGGIOLINI, 1961), (PUGLISI, 1967, 1968, 1972, 1973) abbiano consentito di porre le basi per effettuare un dimensionamento delle briglie aperte che fosse il più possibile scevro da regole empiriche o dedotte dalla sola osservazione *ex-post* delle opere già realizzate, il funzionamento idraulico delle opere aperte, selettive o filtranti è complesso e risulta non del tutto chiarito nei suoi molteplici aspetti.

Tra le diverse tipologie di briglie selettive proposte, e di cui sono state effettuate sia realizzazioni prototipali (CLAUZEL e PONCET, 1963), (GENET, 1953) che seriali (ARMANINI e BENEDETTI, 1996), (CATELLA *et al.*, 2002), (DELLA GIACOMA *et al.*, 1989), (GORFER, 1951), (ZOLIN, 1995), particolare diffusione ha avuto la briglia selettiva *a fessura* che presenta una apertura che interessa tutto il corpo dell'opera e che può raggiungere anche la base della stessa.

Per il caso di briglia a fessura con *profilo lineare (trapezia dritta* con base minore di larghezza L adagiata sul fondo alveo, *trapezia rovescia* cioè con base maggiore di larghezza L adagiata sul fondo alveo, e *rettangolare*) (Fig. 1), inserita in un alveo a sezione rettangolare di larghezza B , assegnando al manufatto una capacità di selezione granulometrica nei confronti del materiale solido trasportato a monte dell'opera, sono stati già risolti in forma analitica sia il problema di verifica che quello di progetto (DI STEFANO *et al.*, 2007).

BONSAUGUE *et al.* (2008) hanno recentemente dimostrato che la forma della fessura che consente di mantenere la velocità media nella sezione immediatamente a monte del manufatto costante, cioè indipendente dal valore del tirante idrico all'interno della fessura, è quella con *profilo iperbolico* (Fig. 2).

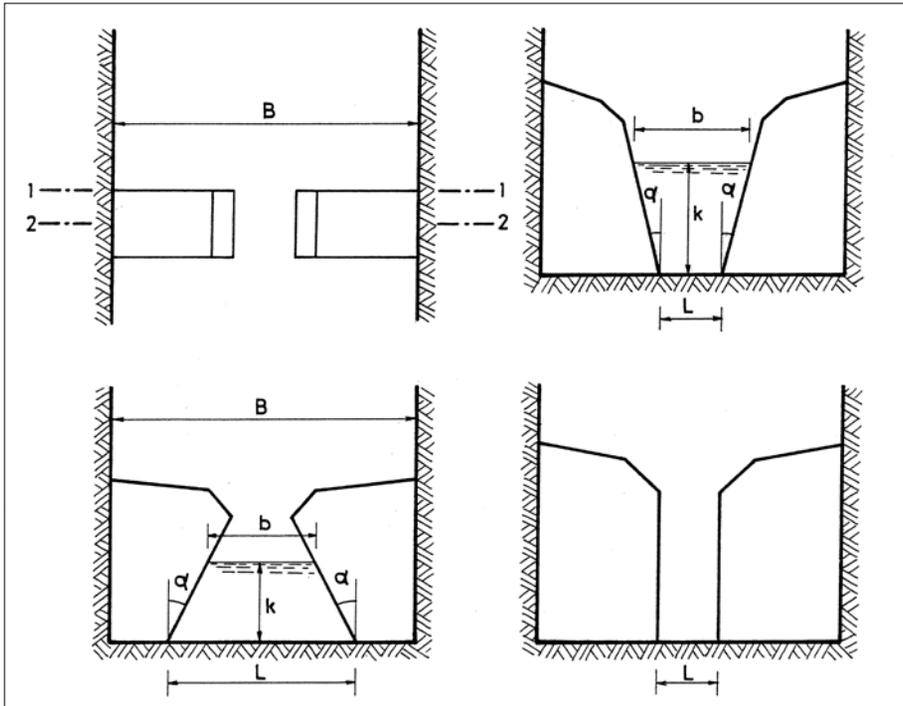


Figura 1 – Schema di diverse tipologie di briglie a fessura lineare.

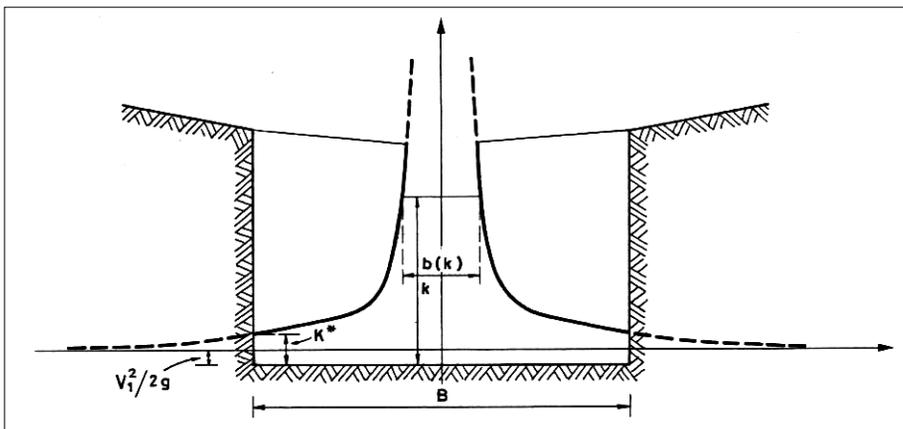


Figura 2 – Schema di briglia a fessura iperbolica.

L'analisi sviluppata facendo ricorso all'equazione del moto e a quella di continuità, scritte in corrispondenza del tratto compreso tra l'alveo fluviale a monte del manufatto e la sezione ristretta dell'opera, ha consentito di stabilire la seguente relazione

$$b(k) = \frac{B V_1}{(2g k - V_1^2)^{1/2}} \quad (1)$$

che intercorre tra la larghezza B della sezione rettangolare dell'alveo, la larghezza $b(k)$ in superficie corrispondente all'altezza critica k nella sezione ristretta della fessura e le caratteristiche idrauliche sintetizzate proprio dall'altezza critica della corrente nella sezione ristretta k nonché dal valore V_1 della velocità media della corrente nella sezione immediatamente a tergo del manufatto.

La legge di variazione (1) può essere agevol-

mente utilizzata per la soluzione sia del problema di progetto (determinazione del profilo $b(k)$ della fessura) che di quello di verifica [determinazione della relazione tra la velocità media V_1 nella sezione 1 dell'alveo, di forma e dimensioni note, immediatamente a monte del manufatto e l'altezza critica k nella sezione ristretta della fessura, per una briglia a fessura iperbolica di nota funzione $b = b(k)$].

Nel seguito della memoria per il caso di fessura a profilo lineare doppio (trapezia rovescia sormontata da rettangolare, trapezia rovescia sormontata da trapezia diritta) vengono presentate le equazioni disponibili per la soluzione dei classici problemi della tecnica. Vengono fornite, infine, sia per il caso del problema di verifica che per quello di progetto delle soluzioni analitiche in forma chiusa.

IL PROBLEMA DI VERIFICA DELLA BRIGLIA A FESSURA CON PROFILO LINEARE DOPPIO

La briglia a fessura, qualunque sia la forma geometrica utilizzata per la sezione ristretta (rettangolare, trapezia rovescia, trapezia diritta, iperbolica) localizzata nel corpo della briglia, costituisce un ostacolo al libero deflusso della corrente fluviale che risulta costretta a passare attraverso una sezione ristretta rispetto a quella dell'alveo in cui è inserito il manufatto (COLA, 1970), (FERRO e FERRERI, 1988).

Gli effetti del restringimento della sezione del corso d'acqua si rivelano, dal punto di vista applicativo, particolarmente interessanti solo quando la corrente in arrivo al manufatto è ipercritica. Questa circostanza, come è noto, si verifica quando il tratto di corso d'acqua a monte del restringimento funziona come un alveo a forte pendenza (i.e. con una pendenza del fondo i maggiore di quella critica i_c). CITRINI e NOSEDA (1977) ricordano che *gli idraulici francesi chiamano talvolta, sbrigativamente, fiumi o torrenti rispettivamente gli alvei a debole o a forte pendenza; e, per analogia, chiamano fluviali o torrentizie rispettivamente le correnti lente o veloci.*

In Fig. 3a, b sono rappresentati, per il caso di sezione rettangolare molto larga e per due valo-

ri dell'indice di scabrezza di Gauckler-Strickler ($c = 12$ e $c = 33 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$) che costituiscono gli estremi del *range* di variabilità del suddetto indice (CHOW, 1959), (BENINI, 1990), (ARMANINI, 1999), i valori del coefficiente di Chezy χ e della pendenza critica i_c al variare del tirante idrico di moto uniforme h . Le figure mostrano che, per valori del tirante idrico h maggiori di 0,3 m, il coefficiente χ risulta sempre superiore a $10 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ e la pendenza i_c è sempre inferiore al 10%.

Anche nel caso di sezione rettangolare stretta, di cui in Fig. 3c, d si riporta il caso corrispondente ad una larghezza di 5 m ed un valore di c pari a $24 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$, rimangono confermate le suddette conclusioni.

Anche per il caso degli alvei in ghiaia privi di grossi massi, tipici di alcuni tratti montani, gli studi già condotti (BATHURST, 1982), (MARCUS *et al.*, 1992), (FERRO, 2003), (REID e HICKIN, 2008) indicano valori di c mediamente pari a $13 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ e quindi di fatto coincidente con il valore minimo indicato in CHOW (1959) e ARMANINI (1999).

Una corrente veloce, quale è quella che generalmente defluisce in un torrente, può manifestare due diversi comportamenti incontrando un ostacolo (FERRO, 2006):

- possiede un contenuto energetico tale da superare l'ostacolo senza mutare le sue caratteristiche di corrente veloce;
- è costretta invece a rallentare a monte dell'ostacolo, in modo da presentarsi in corrispondenza della sezione ristretta con il minimo contenuto energetico che ne consenta il passaggio in condizioni di stato critico.

Il secondo caso (b) è l'unico, notoriamente, che consente di perseguire gli obiettivi propri della sistemazione. Nel suddetto caso a monte dell'opera la corrente è costretta a rallentare per acquistare il minimo contenuto energetico, di valore superiore a quello relativo alla condizione di moto uniforme corrispondente all'alveo a forte pendenza tipico di un torrente, che consente il passaggio attraverso la sezione ristretta. Tale passaggio avverrà in condizioni di stato critico.

Nel caso (b), il restringimento è tanto marcato (*fessura stretta*) che a monte della sezione

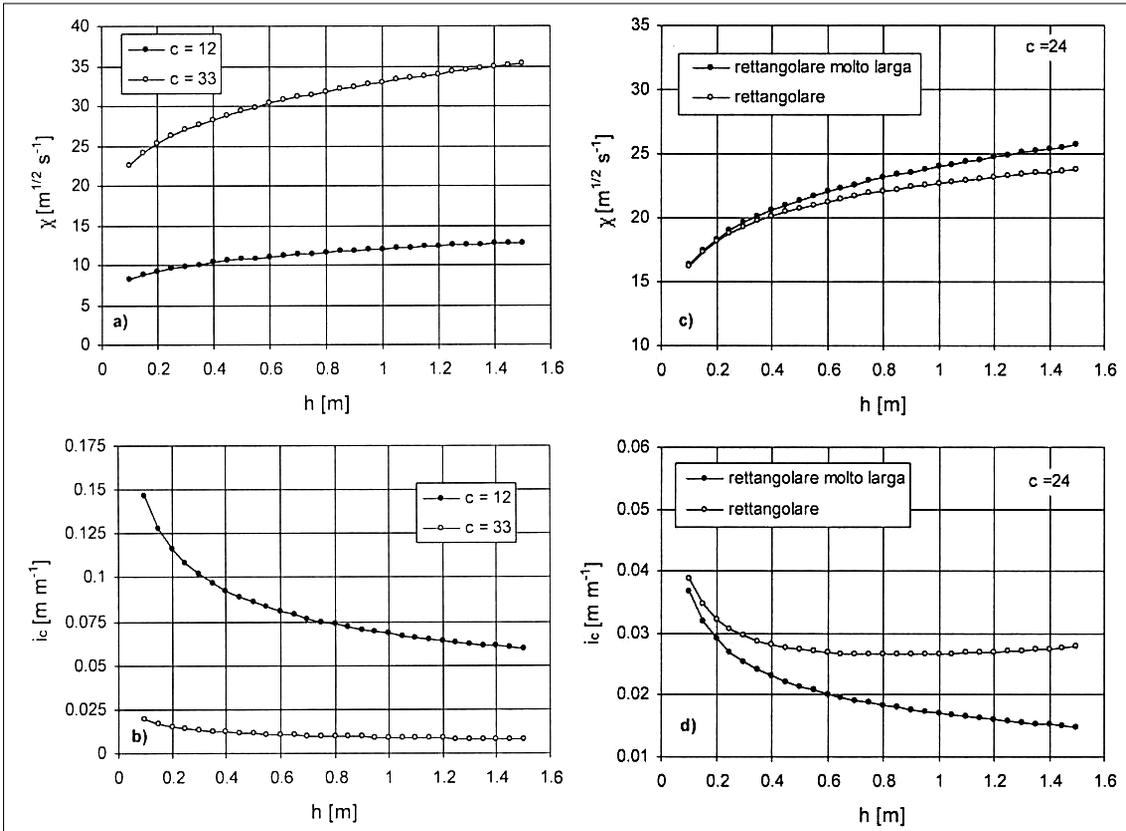


Figura 3 – Relazione tra il coefficiente di Chezy χ ed il tirante idrico h e tra la pendenza critica i_c ed il tirante idrico h per differenti geometrie della sezione trasversale dell'alveo.

in cui è inserita la briglia si verifica il passaggio, mediante risalito idraulico, dalla corrente veloce ed uniforme in arrivo al manufatto ad una corrente lenta ritardata. Il profilo di corrente a valle del manufatto è invece quello di una corrente veloce ritardata che tende asintoticamente al moto uniforme (D'AGOSTINO *et al.*, 2004), (FERRO, 2006).

Una briglia a fessura ben dimensionata deve provocare le condizioni di moto descritte per il caso di *fessura stretta*, dato che il rallentamento della corrente determina una zona, corrispondente alla lunghezza del tratto d'alveo interessato dalla corrente lenta immediatamente a monte del manufatto, in cui si verifica il deposito di materiale solido.

Lo studio del funzionamento idraulico delle briglie a fessura può essere effettuato, come suggerito da COLA (1970) e da FERRO e FERRETTI (1988), con un approccio di tipo energetico

che consiste nell'imporre che la corrente attraversi la fessura, qualunque sia la sua forma, con il minimo contenuto energetico, che è quello corrispondente alla sua condizione di stato critico, e che nel suddetto attraversamento la linea dei carichi totali si mantenga parallela al fondo:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = k + \frac{\bar{k}}{2} \quad (2)$$

in cui si è indicato con h_1 il tirante idrico nella sezione 1 (Fig. 4) dell'alveo, a sezione rettangolare di larghezza B , a monte della briglia, con V_1 la corrispondente velocità media, con k l'altezza critica nella sezione ristretta 2 e con \bar{k} la corrispondente altezza critica media (FERRO, 2006).

Questa impostazione viene sviluppata, tenuto conto dei fondamenti teorici delle correnti a superficie libera (CITRINI e NOSEDA, 1977), trascurando l'evoluzione del fondo alveo, a

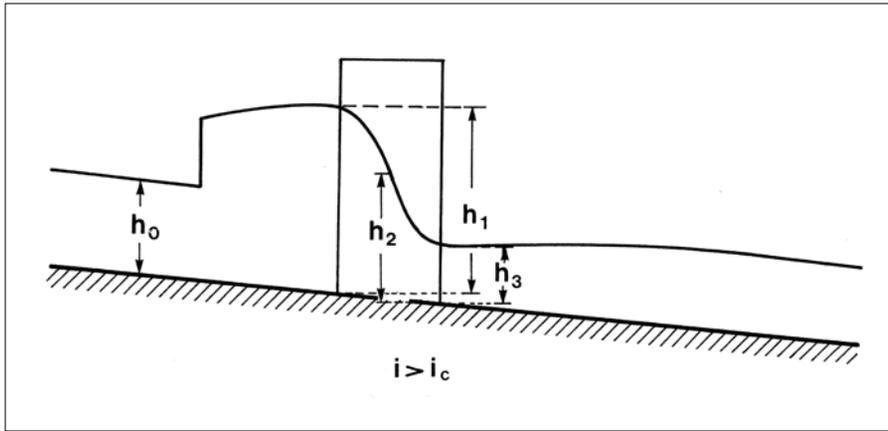


Figura 4 – Profili di corrente in moto permanente nel caso di briglia con fessura stretta.

monte della briglia, dipendente dall'invaso dei sedimenti, dato che i volumi solidi depositati possono variare nel tempo e determinare sia fenomeni di riempimento che di autosvuotamento a monte del manufatto.

All'equazione del moto (2) deve essere accoppiata la seguente equazione di continuità:

$$B h_1 V_1 = \sigma(k) \sqrt{g \bar{k}} \quad (3)$$

avendo indicato con $\sigma(k)$ la sezione idrica della fessura corrispondente all'altezza idrica k .

Ricavando h_1 sia dalla (2) che dalla (3) ed eguagliando le due espressioni, BONSANGUE e FERRO (2007) hanno ottenuto la seguente relazione:

$$\frac{\sigma(k) \sqrt{g \bar{k}}}{B V_1} = k + \frac{\bar{k}}{2} - \frac{V_1^2}{2g} \quad (4)$$

che è stata risolta dai suddetti Autori solo per il caso di fessura trapezia rovescia.

Dalla (4), tenuto conto della definizione di altezza critica media (FERRO, 2006), ed indicando con $L(k)$ la larghezza in superficie corrispondente all'altezza critica k nella sezione ristretta si ottiene:

$$\sigma(k) + \frac{B V_1 + \left(k + \frac{\sigma(k)}{2 L(k)} - \frac{V_1^2}{2g} \right)}{\sqrt{g \frac{\sigma(k)}{L(k)}}} \quad (5)$$

La (5), che è una generalizzazione della soluzione di BONSANGUE e FERRO (2007), è l'equazione generale delle briglie a fessura variabile che può essere utilizzata per risolvere i seguenti due problemi della tecnica:

- 1) per una briglia con fessura di nota forma e dimensioni, per la quale è quindi nota la funzione $L(k)$, determinare la relazione tra la velocità media V_1 , nella sezione 1 dell'alveo, di forma e dimensioni note, immediatamente a monte del manufatto, e l'altezza critica k nella sezione ristretta della fessura (*problema di verifica*);
- 2) per una briglia a fessura di nota forma geometrica, inserita in un alveo con sezione trasversale di forma e dimensioni note, determinare la relazione $L(k)$ corrispondente ad un assegnato valore della velocità media V_1 nella sezione 1 dell'alveo immediatamente a monte del manufatto (*problema di progetto*).

Dalla (5) si ottiene la seguente equazione:

$$\frac{g^{1/2} \sigma(k)^{3/2}}{L(k)^{1/2}} = B k V_1 + \frac{B \sigma(k)}{2 L(k)} V_1 - \frac{B}{2g} V_1^3 \quad (6)$$

che, con le opportune semplificazioni, può essere riscritta:

$$V_1^3 - 2g \left(k + \frac{\sigma(k)}{2 L(k)} \right) V_1 + \frac{2g^{3/2} \sigma(k)^{3/2}}{B L(k)^{1/2}} = 0 \quad (7)$$

La (7) è, pertanto, una equazione di terzo grado che ha la seguente forma canonica:

$$V_1^3 + pV_1 + q = 0 \quad (8)$$

in cui

$$p = -2g \left(k + \frac{\sigma(k)}{2L(k)} \right) \quad (9a)$$

e

$$q = \frac{2g^{3/2} \sigma(k)^{3/2}}{BL(k)^{1/2}} \quad (9b)$$

Consideriamo una fessura a profilo lineare costituita da una zona inferiore, di altezza H , di forma trapezia rovescia, di larghezza al fondo pari alla larghezza B della sezione e con una scarpa delle pareti laterali della fessura pari a s ($s = \tan \alpha$, essendo α (Fig. 5a) l'angolo che la parete forma con la verticale), e da una zona superiore di forma rettangolare, di altezza indefinita e di larghezza costante e pari a b .

La sezione idrica $\sigma(k)$ e la larghezza in superficie $L(k)$ e assumono le seguenti espressioni:

$$\sigma(k) = a_1 (B - sk)k + a_2 [(B - b)H - sH^2 + bk] \quad (10a)$$

$$L(k) = a_1 (B - 2sk) + a_2 b \quad (10b)$$

in cui i coefficienti a_1 e a_2 assumono i seguenti valori:

$$a_1 = 1; a_2 = 0 \text{ per } k \leq H \quad (11a)$$

$$a_1 = 0; a_2 = 1 \text{ per } k > H \quad (11b)$$

Utilizzando le (10) e le (11) l'equazione di terzo grado (8) può essere particolarizzata per il caso geometrico in esame e, per l'analisi delle sue radici, può essere calcolato il quoziente Q_{pq} avente la seguente espressione generale:

$$Q_{pq} = \left(\frac{p}{3} \right)^3 + \left(\frac{q}{2} \right)^2 = - \frac{8k^3 L(k)^3 + \sigma(k)^3 + 6k L(k) \sigma(k)^2 + 12 \sigma(k) L(k)^2}{27 L(k)^3} + \frac{\sigma(k)^3}{B^2 L(k)^2} \quad (12)$$

L'esplorazione numerica condotta mediante la (12), particolarizzata utilizzando le (10) e (11), ha dimostrato che il quoziente risulta sempre negativo, per qualsiasi valore delle variabili B , b , s e k .

Poiché risulta sempre $Q_{pq} < 0$ la (8) ammette tre radici reali distinte. L'unica soluzione

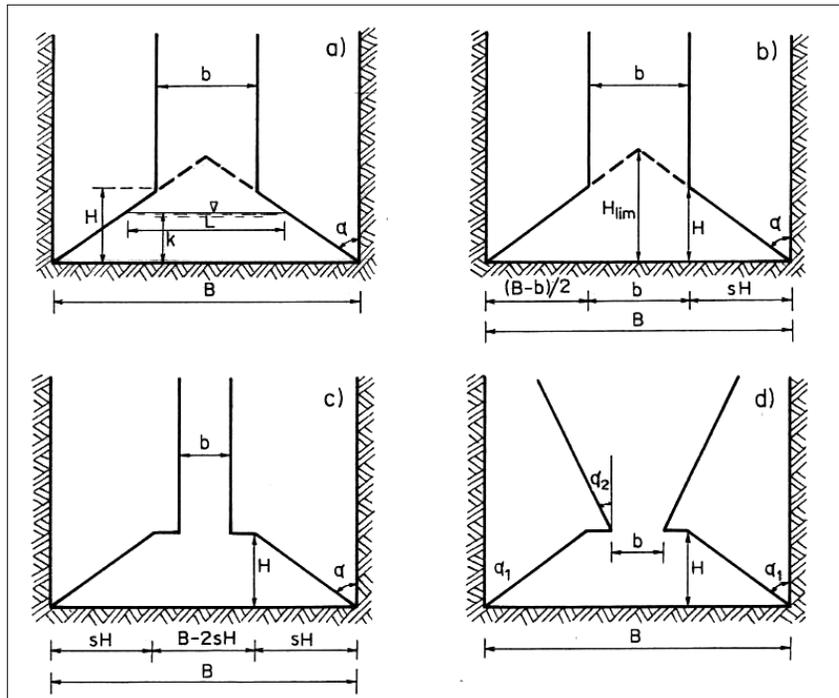


Figura 5 – Schema di briglie a fessura con profilo lineare doppio.

avente significato fisico, cioè sempre positiva, a cui corrisponde un tirante idrico h_1 maggiore dell'altezza critica della corrente in alveo, dato che il tirante h_1 deve appartenere ad un profilo di corrente lenta ritardata, è la seguente:

$$V_1 = -2 \sqrt{\frac{2g}{3} \left(k + \frac{\sigma(k)}{2L(k)} \right)} \cos\left(\frac{\beta + \pi}{3}\right) \quad (13)$$

in cui $\sigma(k)$ e $L(k)$ si valutano, rispettivamente, con le relazioni (10a) e (10b) mentre l'angolo β assume la seguente espressione generale:

$$\beta = \arccos \left\{ \frac{3^{3/2} \sigma(k)^{3/2}}{2^{3/2} B L(k)^{1/2} \left(k + \frac{\sigma(k)}{2L(k)} \right)^{3/2}} \right\} \quad (14)$$

La Fig. 5b mostra che è possibile definire un valore limite dell'altezza, H_{lim} , della fessura trapezia rovescia a cui corrisponde una larghezza b della fessura rettangolare pari a zero. In altri termini, la fessura inferiore diventa di forma triangolare quando la larghezza b , pari a $B - 2sH$, si annulla e cioè

$$H_{lim} = \frac{B}{2s} \quad (15)$$

Inoltre la larghezza b , come mostrato in Fig. 5c, può risultare più contenuta della base minore della fessura trapezia assumendo cioè valori minori di $B - 2sH$.

L'esplorazione numerica condotta, al variare di B , b , H e s , utilizzando la soluzione (13), con $\sigma(k)$ e $L(k)$ valutati, rispettivamente, con le relazioni (10a) e (10b) e β con l'equazione (14), ha dimostrato che per valori dell'altezza dell'opera $H < H_{lim}$ (fessura inferiore di forma trapezia rovescia), per rapporti $b/(B-2sH)$ minori di 1 (fessura superiore rettangolare di larghezza b ristretta rispetto alla base superiore della fessura trapezia) e per rapporti b/B minori di 0,5 il valore massimo della velocità V_1 , $V_{1,max}$, si verifica sempre per un valore del tirante k pari all'altezza H della fessura trapezia.

La Fig. 6 riporta, a titolo d'esempio per il caso $H = 3$ m e $s = 1$, per assegnati valori di B e b , i valori della velocità V_1 in funzione

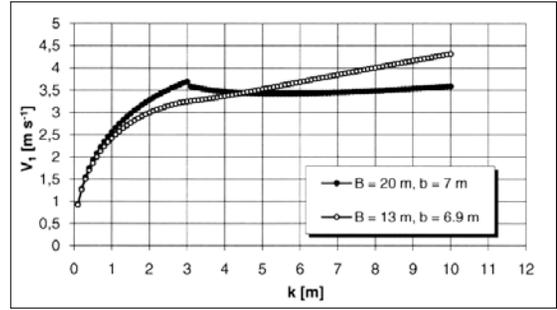


Figura 6 – Relazione, per una briglia a profilo lineare doppio (trapezia rovescia sormontata da rettangolare), tra la velocità media della corrente V_1 nella sezione immediatamente a monte del manufatto e l'altezza critica k in corrispondenza della fessura.

dell'altezza critica k in corrispondenza della fessura, calcolati con la (13), la (14) e le (10).

In particolare, sono stati scelti due differenti valori della larghezza dell'alveo B e della fessura rettangolare b in maniera da ottenere nel primo caso ($B = 20$ m e $b = 7$ m) un rapporto $b/B = 0,35$, e quindi minore del valore limite 0,5, e nel secondo caso ($B = 13$ m e $b = 6,9$ m) un valore del suddetto rapporto pari a 0,53.

In entrambi i casi, per i valori assegnati a B , s e H , risulta $H < H_{lim}$ (H_{lim} è pari a 10 m nel primo caso e a 6,5 m nel secondo) ed il rapporto $b/(B-2sH)$ è minore di 1 (0,50 nel primo caso e 0,98 nel secondo).

La Figura 6 dimostra che nel primo caso, $b/B < 0,5$, la funzione $V_1(k)$ presenta un massimo per $k = H = 3$ m mentre nel secondo caso, $b/B > 0,5$, la funzione $V_1(k)$ risulta monotona crescente.

Consideriamo adesso una fessura a profilo lineare costituita da una zona inferiore, di altezza H , di forma trapezia rovescia, di larghezza al fondo pari alla larghezza B della sezione e con una scarpa delle pareti laterali della fessura pari a s_1 ($s_1 = \tan \alpha_1$, essendo α_1 (Fig. 5c) l'angolo che la parete forma con la verticale), e da una zona superiore di forma ancora trapezia, di altezza indefinita e con scarpa delle pareti laterali della fessura pari a s_2 ($s_2 = \tan \alpha_2$).

La sezione idrica $\sigma(k)$ e larghezza in superficie $L(k)$ assumono le seguenti espressioni:

$$\sigma(k) = a_1 (B - s_1 k) k + a_2 [B H - s_1 H^2 + b (k - H) + s_2 (k - H)^2] \quad (16a)$$

$$L(k) = a_1 (B - 2 s_1 k) + a_2 [b - 2 s_2 (k - H)] \quad (16b)$$

in cui $s_1 > 0$ e $s_2 < 0$ ed i coefficienti a_1 e a_2 assumono i valori stabiliti dalle (11).

Anche in questo caso, utilizzando le (16) e le (11) l'equazione di terzo grado (8) può essere particolarizzata per la geometria della fessura in esame e può essere calcolato il quoziente Q_{pq} mediante la (12).

Poiché, ancora una volta, risulta sempre $Q_{pq} < 0$ la (8) ammette tre radici reali distinte e l'unica soluzione avente significato fisico è fornita dalla (13) in cui $\sigma(k)$ e $L(k)$ si valutano, rispettivamente, con le relazioni (16a) e (16b) mentre l'angolo β assume l'espressione (14).

La Fig. 7 riporta, a titolo d'esempio per il caso $B = 50$ m, $b = 20$ m e $H = 5$ m, i valori della velocità V_1 in funzione dell'altezza critica k in corrispondenza della fessura, calcolati con la (13) e la (14) e facendo ricorso alle (10) per il caso di fessura a profilo lineare con zona superiore rettangolare (Fig. 5c) e alle (16) per il caso con zona superiore trapezia (profilo doppio trapezio) (Fig. 5d). Nel caso di profilo doppio trapezio il calcolo è stato effettuato, a titolo d'esempio, per due valori della scarpa s_1 della sezione trapezia rovescia inferiore pari a, rispettivamente, -3 e -1.

La Fig. 7 mostra che nel caso di profilo doppio trapezio il valore massimo, $V_{1,max}$, della velocità V_1 immediatamente a monte del manufatto si realizza sempre per un tirante idrico k pari a H e che questa condizione di massimo non ha, come nel caso di sezione superiore

rettangolare (Fig. 5c), nessuna limitazione derivante dalle caratteristiche dimensionali del manufatto. La scelta del profilo doppio trapezio, a parità di caratteristiche geometriche sia della sezione (larghezza B) sia della zona trapezia inferiore (b e s_1), consente di stabilire che per $k = H$ si realizza *sempre* il valore massimo della velocità $V_{1,max}$. Inoltre la suddetta scelta, per fissati B , b e s_2 , al crescere di s_1 permette di ridurre (Fig. 7), per qualsiasi valore di k , i valori della velocità V_1 .

In altri termini, se la briglia a fessura a profilo lineare costituita da una zona inferiore trapezia rovescia e da una superiore trapezia diritta viene dimensionata per un valore di portata Q_p , cui corrisponde il valore massimo della velocità $V_{1,max}$, in tutte le altre condizioni di funzionamento, cioè quando la portata assume valori sia minori sia maggiori di quella di progetto, i valori di velocità a tergo del manufatto risultano *sempre* più contenuti rispetto al valore $V_{1,max}$ corrispondente alla portata Q_p di progetto.

Per una briglia così dimensionata, pertanto, anche per valori di portata più grandi di quella di progetto Q_p non si verifica uno svuotamento della piazza di deposito a monte del manufatto e quindi questo tipo di dimensionamento e questa tipologia di fessura sono capaci di privilegiare l'azione di consolidamento che il manufatto è capace di esercitare. Solo portate molto inferiori a quella di progetto in corrispondenza alle quali può cessare il comportamento a "fessura stretta", scelto a base del progetto, la corrente veloce che attraversa il manufatto può determinare l'autosvuotamento parziale del volume trattenuto a monte della briglia.

L'impiego di una briglia a fessura a profilo doppio trapezio risulta, in definitiva, meno adatto al caso di una sistemazione con finalità di trattenuta del manufatto dato che non si potrebbe fare affidamento su una capacità di autosvuotamento e quindi la piazza di deposito a monte della briglia avrebbe una efficienza nel tempo più limitata, al meno di non effettuare periodiche operazioni di pulizia della capacità a monte dell'opera.

Per calcolare il valore massimo $V_{1,max}$ si deve fare ricorso alla (13), alla (14) e alla (16a) imponendo $k = H$.

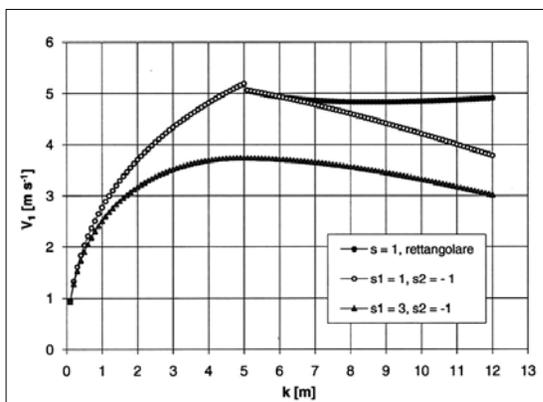


Figura 7 – Relazione, per una briglia a profilo lineare doppio trapezio tra il valore massimo della velocità media della corrente V_1 nella sezione immediatamente a monte del manufatto e l'altezza critica k in corrispondenza della fessura.

Dalla (13) si ottiene:

$$V_{1,max} = -2 \sqrt{\frac{g}{3b} (2bH + BH - s_1 H^2) \cos\left(\frac{\beta + \pi}{3}\right)} \quad (17)$$

in cui la larghezza b assume valori minori o eguali a $(B - 2s_1H)$, e l'angolo β assume il seguente valore:

$$\beta = \arccos \left\{ \frac{3^{3/2} (BH - s_1 H^2)^{3/2}}{2^{3/2} B b^{1/2} \left(H + \frac{BH - s_1 H^2}{2b} \right)^{3/2}} \right\} \quad (18)$$

L'impiego delle (17) e (18) consente di risolvere il problema di verifica dato che è possibile calcolare il massimo valore della velocità media $V_{1,max}$ per una briglia a profilo lineare doppio trapezio di note caratteristiche geometriche (b , s_1 e H) inserita in una sezione di nota larghezza B . Il valore di velocità $V_{1,max}$ così calcolato dovrà risultare inferiore al valore medio V_c della velocità della corrente che consente di arrestare il materiale avente un diametro caratteristico maggiore o eguale ad un prefissato diametro d . Per la valutazione della suddetta velocità critica, non essendo in atto disponibili relazioni determinate in condizioni di moto permanente (FERRO, 2006), conviene fare riferimento ad una scala empirica, che mette in relazione i valori di V_c a quelli del diametro delle particelle solide da arrestare, come quella determinata sulla base dei dati di Sanjon, Kramer e della USWES di Vicksburg (FERRO, 2006), (FERRO *et al.*, 2004):

$$V_c = 0.1215 + 0.2024 \sqrt{d} \quad (19)$$

in cui il diametro d delle particelle da arrestare in alveo è espresso in mm e la V_c in $m s^{-1}$.

IL DIMENSIONAMENTO IDRAULICO DELLA BRIGLIA A FESSURA A PROFILO DOPPIO TRAPEZIO

Per quanto esposto nel precedente paragrafo, ai fini del dimensionamento della fessura conviene riferirsi alla condizione idraulica, cioè al valore del tirante idrico $k = H$ che determina il massimo valore, $V_{1,max}$, della velocità V_1 a monte del manufatto.

Dalla (17) si ottiene la seguente relazione:

$$\frac{V_{1,max}^2 b}{g} = \frac{4(2bH + BH - s_1 H^2)}{3} \cos^2\left(\frac{\beta + \pi}{3}\right) \quad (20)$$

e dalla (18), con semplici passaggi, si perviene alla seguente equazione:

$$\cos \beta = \frac{3^{3/2} b (BH - s_1 H^2)^{3/2}}{B (2bH + BH - s_1 H^2)^{3/2}} \quad (21)$$

Il sistema di due equazioni (20) e (21) consente di risolvere il problema di progetto che consiste nella determinazione dell'altezza H da assegnare, per fissati b e s_1 , al manufatto in maniera che sia possibile arrestare in alveo il materiale avente un diametro caratteristico maggiore o eguale ad un prefissato diametro d . Infatti nota la larghezza B , per fissati valori di b e di s_1 , è possibile calcolare al variare di H e, mediante la (21), il corrispondente valore dell'angolo β . Utilizzando la (20) per ogni valore di H e del corrispondente angolo β , per fissati B , b e s_1 , è possibile calcolare $V_{1,max}^2$ a cui corrisponde, mediante la (19) un valore del diametro d del materiale solido da arrestare in alveo. L'utilizzo descritto delle eq. (20), (21) e (19) consente di pervenire pertanto, per fissati B , b e s_1 , alla *curva di progetto* che mette in relazione l'altezza del manufatto H con il diametro d del materiale da arrestare in alveo.

La Fig. 8 mostra, a titolo d'esempio per un alveo di larghezza pari a 50 m, per tre valori della larghezza della fessura ($b = 10, 20$ e 30 m) e per una scarpa s_1 della sezione trapezia rovescia pari a 1, la relazione (*curva di progetto*) tra l'altezza H da assegnare alla fessura ed il diametro caratteristico del materiale da arrestare in alveo.

L'eq. (20), dividendo ambo i membri per B^2 , può essere espressa nei seguenti termini adimensionali:

$$\frac{V_{1,max}^2 b}{g B} \frac{b}{B} = \frac{4}{3} \left(2 \frac{b}{B} \frac{H}{B} + \frac{H}{B} - s_1 \frac{H^2}{B^2} \right) \cos^2\left(\frac{\beta + \pi}{3}\right) \quad (22)$$

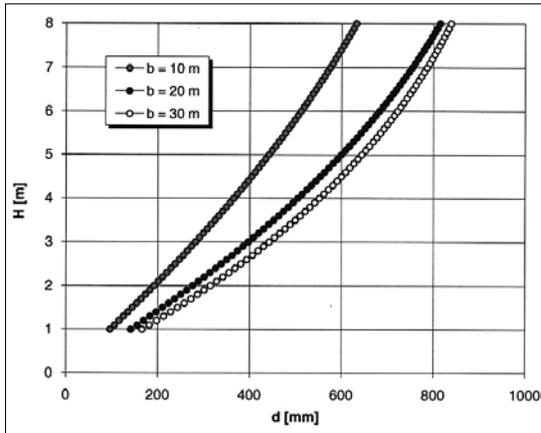


Figura 8 – Relazione tra l'altezza H da assegnare alla fessura ed il diametro caratteristico d del materiale da arrestare in alveo.

da cui si deduce la seguente quantità adimensionale Y :

$$Y = \frac{V_{1,max}^2}{g B} = \frac{4}{3} \left(\frac{2 \frac{b}{B} \frac{H}{B} + \frac{H}{B} - s_1 \frac{H^2}{B^2}}{\frac{b}{B}} \right) \cos^2 \left(\frac{\beta + \pi}{3} \right) \quad (23)$$

Anche la relazione (21), con semplici passaggi, può essere espressa in termini adimensionali pervenendo alla seguente equazione:

$$\cos \beta = 3^{3/2} \frac{b}{B} \frac{\left(\frac{H}{B} - s_1 \frac{H^2}{B^2} \right)^{3/2}}{\left(2 \frac{b}{B} \frac{H}{B} + \frac{H}{B} - s_1 \frac{H^2}{B^2} \right)^{3/2}} \quad (24)$$

La deduzione della *curva di progetto* a partire dalle eq. (23) e (24) può essere effettuata, per fissata scarpa s_1 e rapporto b/B , determinando al variare del rapporto H/B il corrispondente valore del raggruppamento adimensionale Y . In altri termini, per fissata scarpa s_1 , la curva di progetto è la relazione monotona crescente tra i raggruppamenti H/B e Y a parametro il rapporto b/B .

La Fig. 9, a titolo d'esempio per il caso $s_1 = 1$, riporta le curve di progetto tracciate facendo ricorso alle (23) e (24) nell'ipotesi che il rapporto b/B assuma i valori 0.1 e 0.5.

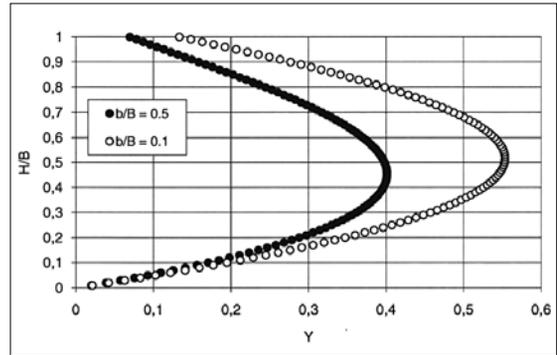


Figura 9 – Curve di progetto tracciate utilizzando le equazioni (23) e (24) per i casi b/B pari a 0,1 e 0,5.

In definitiva, il dimensionamento idraulico di una briglia a profilo doppio trapezio non richiede, proprio per la sua particolare geometria, la conoscenza di una singola portata di progetto ma piuttosto occorre fissare il valore del diametro del materiale da arrestare in alveo. A questo diametro corrisponde, infatti, sia il *massimo* valore di velocità che consente di arrestare a monte del manufatto il materiale solido, avente un diametro maggiore o eguale al valore prefissato, sia un particolare valore della portata della corrente. Variazioni della portata comportano solo riduzioni della velocità della corrente a tergo del manufatto rispetto al valore fissato in sede di progetto e, pertanto, non riducono la capacità di trattenuta del manufatto.

Le conclusioni di questo studio, tenuto conto di alcune ipotesi semplificative utilizzate, potranno trovare ulteriori riscontri sia mediante una sperimentazione di laboratorio con un modello fisico a scala ridotta sia mediante una apposita attività di monitoraggio su briglie aperte realizzate.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

A partire dagli anni '50 ebbe inizio in Francia, con i primi prototipi di Poncet e Genet, un processo innovativo finalizzato all'introduzione nella pratica sistematoria delle opere di tipo aperto. Il suddetto processo ha incentivato sia la ricerca di soluzioni progettuali rispondenti alle differenti funzioni del manufatto (selezione granulometrica del materiale solido, azione

di trattenuta non indiscriminata del materiale solido, conservazione degli ecosistemi a valle, ecc.) sia la realizzazione di molteplici tipi di briglie aperte, alcune delle quali sono ancora in fase di sperimentazione, mentre altre sono di uso corrente, anche in Italia.

Nonostante le numerose ricerche di tipo sia teorico sia sperimentale effettuate in questi ultimi anni abbiano posto le basi per effettuare un dimensionamento delle briglie aperte, il più possibile scevro da regole empiriche o dedotte dalla sola osservazione ex-post delle opere già realizzate, il loro funzionamento idraulico non è ancora del tutto chiarito nei suoi molteplici aspetti.

Nella memoria è stato affrontato sia il problema di verifica sia quello di progetto per una briglia a profilo lineare doppio (trapezia rovescia sormontata da rettangolare, trapezia rovescia sormontata da trapezia diritta) con particolare riferimento alla sua funzione di consolidamento.

L'analisi è stata sviluppata facendo ricorso all'equazione del moto e a quella di continuità, scritte in corrispondenza del tratto compreso tra l'alveo fluviale a monte del manufatto e la sezione ristretta dell'opera, secondo una impostazione analitica messa a punto in un precedente studio. In particolare è stata stabilita la relazione che intercorre tra il valore della velocità media nella sezione immediatamente a tergo del manufatto e le caratteristiche geometriche dell'alveo e della fessura nonché di quelle idrauliche, sintetizzate dall'altezza critica della corrente nella sezione ristretta.

Per i due casi di profilo lineare doppio esaminati lo studio ha consentito di determinare la relazione che intercorre tra il valore massimo della velocità media nella sezione immediatamente a tergo del manufatto e le caratteristiche geometriche sia dell'alveo di inserimento sia della fessura. Imponendo, infine, che il suddetto valore massimo eguagli proprio quel valore di velocità che consente di arrestare il materiale avente un diametro caratteristico maggiore o eguale ad un prefissato valore, sono state dedotte, nei due casi esaminati, le relazioni di progetto che permettono di calcolare la larghezza al fondo della fessura di fissata scarpa

per noti valori della larghezza dell'alveo e del diametro del materiale da arrestare.

In conclusione, il dimensionamento idraulico di una briglia a fessura a profilo lineare doppio, come per il caso di fessura trapezia rovescia già studiato in un precedente lavoro, non richiede, proprio per la sua particolare geometria, la conoscenza di una singola portata di progetto ma è sufficiente fissare il valore del diametro del materiale da arrestare in alveo. A questo diametro corrisponde, infatti, sia il *massimo* valore di velocità che consente di arrestare a monte del manufatto il materiale solido, avente un diametro maggiore o eguale al valore prefissato, sia un particolare valore della portata della corrente. Variazioni della portata, rispetto al valore corrispondente al diametro di progetto, comportano però solo riduzioni della velocità della corrente a tergo del manufatto rispetto al valore fissato in sede di progetto e, pertanto, non riducono la capacità di trattenuta del manufatto.

Ulteriori verifiche dei risultati teorici conseguiti potranno essere ottenuti sia mediante una sperimentazione su modello fisico a scala ridotta sia monitorando briglie aperte già realizzate.

SUMMARY

Hydraulic design of an open check-dam with a linear slot

The open check-dam produces a discriminating retention of fluvial sediment transport and is able to preserve the equilibrium of the fluvial reaches downstream from the rehabilitation works.

In this paper, for the case of an open check-dam with a linear slot, the equations available for solving technical problems are presented.

Finally, some closed form equations useful to solve the technical problems (verification and design) are deduced.

BIBLIOGRAFIA

- ARMANINI A., 1999 – *Principi di Idraulica Fluviale*. Ed. Bios, Cosenza.
- ARMANINI A., BENEDETTI G., 1996 – *Sulla larghezza di apertura delle briglie a fessura*. Atti del XXV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Torino, 16-18 settembre, vol. III: 13-24.

- ARMANINI A., LARCHER M., 2001 – *Rational criterion for designing opening of slit-check dam*. Journal of Hydraulic Engineering, Proc. ASCE, 127 (2): 94-104.
- BATHURST J.C., 1982 – *Flow resistance in boulder-bed streams*. In: Gravel Bed Rivers: Fluvial processes, engineering and management, Hey R.D., Bathurst J.C., Thorne C.R. Eds., Wiley, Chichester, p. 443-465.
- BENEDETTI G., 1997 – *Analisi teorica e sperimentale del funzionamento delle briglie aperte*. Dendronatura, 2: 53-65.
- BENINI G., 1984 – *Antichi contributi italiani alla sistemazione dei torrenti*. Atti del Seminario "Idraulica del Territorio Montano", Bressanone, p. 481-488.
- BENINI G., 1990 – *Sistemazioni idraulico-forestali*. Ed. UTET, Torino.
- BONSANGUE S., DI STEFANO C., FERRO V., 2008 – *Contributo al dimensionamento idraulico delle briglie a fessura iperbolica*. Quaderni di Idronomia Montana, 28/2: 239-250.
- BRATH A., MILANO V., PAGLIARA S., VITI C., 1992 – *Ricerca sperimentale sulle briglie selettive del tipo a fessura*. Idrotecnica, 4: 229-244.
- BUSNELLI M., STELLING G., LARCHER M., 2001 – *Numerical morphological modeling of open-check*. Journal of Hydraulic Engineering, Proc. ASCE, 127 (2): 105-114.
- CAROLLO F.G., FERRO V., PAMPALONE V., 2008 – *Briglie con savanella a profilo W*. In: Sistemazione dei bacini montani e difesa del suolo. Ed. Nuova Bios, p. 427-448; ISBN 88-6093-042-1.
- CATELLA M., PARIS E., SOLARI L., 2002 – *Risultati preliminari sul comportamento delle briglie a fessura nel bacino montano dell'Alta Versilia*. Atti del XXVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, vol. V: 205-214.
- CAVINATO A., FISTAROL A., FORNARI E., PICCOLI G., 1996 – *Laminazione dell'idrogramma solido mediante briglie selettive a fessura aperta*. Interpraevent 1996, Band 5: 99-108.
- CERATO M., 1995 – *Sulla progettazione ed il funzionamento delle briglie filtranti: alcune esperienze in provincia di Trento*. L'Italia Forestale e Montana, 50 (2): 147-169.
- CERATO M., 1996 – *Sulla progettazione ed il funzionamento delle briglie filtranti*. In: S. Fattorelli S., Fedeli E.C. e Nardin D. (eds.), Atti del Corso Sviluppo e Gestione dei Bacini Idrografici, Istituto Italo Latino Americano-AIDI-PAT, p. 73-87.
- CHOW V.T., 1959 – *Open-channel Hydraulics*. MacGraw-Hill, New York.
- CITRINI D., NOSEDA G., 1977 – *Idraulica*. Ed. Ambrosiana, Milano, 468 p.
- CLAUZEL L., PONCET A., 1963 – *Barrages filtrants et correction torrentielle par ségrégation des matériaux charriés*. Revue Forestière Française, 15 (4): 280-292. doi:10.4267/2042/24540
- COLA R., 1970 – *Sul funzionamento delle briglie selettive*. Rassegna Tecnica del Friuli-Venezia Giulia, 5: 3-10.
- COLA R., 1972 – *Criteri di progettazione esecutiva delle opere idrauliche del torrente Pesarina*. Atti delle giornate di studio "Nuovi criteri di progettazione e nuove opere di sistemazione dei torrenti", Udine, p. 48-55.
- D'AGOSTINO V., DALLA FONTANA G., FERRO V., MILANO V., PAGLIARA S., 2004 – *Briglie aperte*. In: Opere di sistemazione idraulico-forestale a basso impatto ambientale. Ed. McGraw-Hill, 283-384; ISBN 88-386-6145-6.
- D'ASARO F., 2002 – *Efficacia di un intervento di stabilizzazione dei versanti e possibilità di uso integrato dell'opera di sistemazione ai fini del miglioramento della qualità delle acque*. Quaderni di Idronomia Montana, 18: 79-93.
- D'ASARO F., GRILLONE G., 2005 – *Sistemazioni idrauliche e fitodepurazione in alveo. Descrizione di un caso "involontario"*. Quaderni di Idronomia Montana, 25: 485-492.
- DELLA GIACOMA F., FERRARI L., ARMANINI A., 1989 – *From the check dam to the development of functional check dams for a most effective torrent control*. In: "Atti dello International Workshop on Fluvial Hydraulics in Mountain Regions", Trento, 3-6 October, B169-B182.
- DI STEFANO C., FERRO V., BONSAUGUE S., 2007 – *Contributo al dimensionamento delle briglie a fessura lineare*. Quaderni di Idronomia Montana, 27: 403-420; ISBN 88-6093-027-8.
- DI STEFANO C., FERRO V., 2008 – *Briglie a fessura*. In: Sistemazione dei bacini montani e difesa del suolo. Ed. Nuova Bios, 403-426; ISBN 88-6093-042-1.
- DRAGOGNA G., 1967 – *Sistemazione dei torrenti: le briglie selettive*. Monti e Boschi, 18 (6): 47-55.
- DRAGOGNA G., 1970a – *Briglie selettive e briglie di salvaguardia*, Annali Accademia Italiana di Scienze Forestali, vol. XIX: 441-479.
- DRAGOGNA G., 1970b – *La briglia selettiva di salvaguardia*. Il Frantoio, 7 (9), 5 p.
- DRAGOGNA G., 1975 – *Trasporto di massa e briglie selettive*. "Interpraevent", Innsbruck, p. 75-89.
- FERRO V., 1988 – *Contributo al dimensionamento di briglie selettive a reticolo con elementi longitudinali. Ricerca sperimentale*. Atti del XXI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, L'Aquila, Parte I, p. 539-557.
- FERRO V., 1990 – *Un criterio di dimensionamento per le briglie selettive a reticolo con elementi trasversali. Ricerca sperimentale*. Rivista di Ingegneria Agraria, 21 (4): 225-240.
- FERRO V., 2000a – *Contributo al dimensionamento delle briglie a finestra*. Rivista di Ingegneria Agraria, 31 (4): 207-215.
- FERRO V., 2000b – *Simultaneous flow over and under*

- a gate*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Proc. ASCE, 126 (3): 190-193.
- FERRO V., 2003 – *Flow resistance in gravel bed channels with large-scale roughness*, Earth Surface Processes and Landforms, 28: 1325-1399. doi:10.1002/esp.589
- FERRO V., 2006 – *La sistemazione dei bacini idrografici*. Seconda edizione, McGraw-Hill, 848 p.; ISBN 88-386-6327-0.
- FERRO V., 2008 – *La ricerca nel settore dell'ingegneria naturalistica*. Quaderni di Idronomia Montana, 28 (3): 49-126; ISBN 88-6093-053-7.
- FERRO V., 2009 – *Modern strategies for torrent control check dams: slit and W-weir check dams*. Check dams, morphological adjustments and erosion control in torrential streams, © Nova Science Publishers, Inc., Conesa C., Lenzi M.A. Eds.; ISBN 978-1-60876-146-3.
- FERRO V., BONSAUGUE S., 2007 – *Sul dimensionamento idraulico della briglia a fessura trapezia rovescia*. L'Italia Forestale e Montana, 2: 99-115. doi:10.4129/IFM.2007.2.03
- FERRO V., FERRERI G., 1988 – *Sul funzionamento idraulico di alcuni tipi di briglie non convenzionali*. Rivista di Ingegneria Agraria, 19 (1), 44-55.
- FERRO V., PUGLISI S., 2004 – *Introduzione e classificazione delle opere*. In: "Opere di sistemazione idraulico-forestale a basso impatto ambientale". Ed. McGraw-Hill, p. 1-10; ISBN 88-386-6145-6.
- FIEBIGER G., 1984 – *Functional Bautypen der Wildbach- und Lawinenverbauung als Grundlage der Geschiebebewirtschaftung*. Interpraevent, Band 1, p. 123-133.
- FIEBIGER G., 1986 – *Bedload management on torrent control by functional check dams*. Beiträge ur Wildbacherosions und Lawinenforschung, Mitt. der FBVA, vol. 159: 325-332.
- GENET E., 1953 – *Un nouveau type de barrage de correction: le barrage-peigne*. Compte rendu général du voyage d'études dans les Alpes Fracaise du Groupe de Travail FAO/EFC/TORR", 1 Session, 1952, Nancy.
- GORFER G., 1991 – *Per una difesa del territorio. La sistemazione dei bacini montani in provincia di Trento attraverso i secoli*. Azienda Speciale di Sistemazione Montana, Provincia di Trento, Edizioni Arca s.r.l.
- JOHNSON P.A., MCCUEN R.H., 1989 – *Slit dam design for debris flow mitigation*. Journal of Hydraulic Engineering, Proc. ASCE, 115 (9): 1293-1296.
- KASAI S., OHGI Y., MIZOGUCHI I., MATSUDA A. ARAMAKI H., TANAMI M., 1996 – *Structural characteristics of wood-debris entrapment facilities*. Interpraevent, Band 5: 271-277.
- KETTL W., 1989 – *Evoluzione delle sistemazioni idraulico forestali: dallo scopo della sistemazione allo sviluppo delle tipologie costruttive*. Quaderni di Idronomia Montana, 8: 35-65.
- LARCHER M., ARMANINI A., 2000 – *Dimensionamento della larghezza dell'apertura delle briglie a fessura*. Atti del XXVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Genova, vol. I: 289-297.
- MAIONE U., 1998 – *La sistemazione dei corsi d'acqua montani*. Ed. Bios, Cosenza.
- MAIONE U., CAVALAZZI F., SIMONETTI M., 2000 – *Le briglie a fessura*. L'Acqua, 3: 77-91.
- MARCUS W.A., ROBERTS K., HARVEY L., TACKMAN G., 1992 – *An evaluation of methods for estimating Manning n in small mountain stream*. Mountain Research and Development, 12: 227-239. doi:10.2307/3673667
- MATSAMURA K., NAKAMUR A. T., HIROSE T. 1996 – *New development of sabo dams filled with sediment from construction field*. Interpraevent 1996, Band 5: 47-58.
- MILANO V., 2003 – *Criteri di progettazione delle briglie selettive a fessura*. Atti del XXIV Corso sulle Tecniche di difesa dall'inquinamento. Ed. BIOS, Cosenza.
- MILANO V., PAGLIARA S., VENUTELLI M., 1998 – *Criteri progettuali sulle sistemazioni torrentizie con briglie selettive a fessura*. Idrotecnica, 3: 45-52.
- MIZUYAMA T., KOBASHI S., MIZUNO H., 1996 – *Development and improvement of open dams function of structures against debris flow*. Interpraevent 1996, Band 5: 59-65.
- PASSERINI G., 1957 – *Per la difesa degli abitati dai "trasporti in massa"*. L'Acqua e il Suolo, IX (1): 40-60.
- POGGIOLINI G., 1961 – *Briglie filtranti nella sistemazione dei torrenti*. L'Acqua e il Suolo, XIII (1): 28-31.
- PUGLISI S., 1967 – *L'impiego di dispositivi filtranti nella correzione dei torrenti. Nota introduttiva*. L'Italia Forestale e Montana, 22 (1): 12-24.
- PUGLISI S., 1968 – *Resoconto delle esperienze in corso con dispositivi filtranti in alcuni torrenti dell'Appennino Lucano*. L'Italia Forestale e Montana, 23 (6): 26-73.
- PUGLISI S., 1972 – *Nuove opere per la correzione dei torrenti*. Nuovi criteri di progettazione e nuove opere di sistemazione dei torrenti. Atti delle Giornate di Studio di Idraulica, Udine, 12-13 Dicembre, p. 36-40.
- PUGLISI S., 1973 – *Barrage a claire-voie et prefabriques*. Mitteilungen der Forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Wien, 102 Helft, p. 253-271.
- REID D.E., HICKIN E.J., 2008 – *Flow resistance in step mountain streams*, Earth Surface Processes and Landforms, 33: 2211-2240. doi:10.1002/esp.1682
- ZOLIN G., 1995 – *Impatto ambientale delle briglie filtranti*. L'Italia Forestale e Montana, 50 (3): 329-340.