



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

**DOTTORATO DI RICERCA IN GESTIONE AMBIENTALE DEI BACINI IDROGRAFICI
E TECNICHE DI RAPPRESENTAZIONE DEL TERRITORIO**

CICLO XVI

CONDENSATO IN LINGUA ITALIANA DELLA TESI:

Local scouring in natural and artificial step pool systems

**EROSIONE LOCALIZZATA IN STRUTTURE
A GRADINATA NATURALI ED ARTIFICIALI**

Coordinatore: Ch.mo Prof. Mario Aristide Lenzi

Supervisore: Ch.mo Prof. Mario Aristide Lenzi

Co-supervisore: Ing. Andrea Marion

Dottorando: Francesco Comiti

31 Ottobre 2003

INTRODUZIONE, METODOLOGIE E STRUTTURA DELL'ELABORATO

I corsi d'acqua soggetti a prevalenti fenomeni erosivi o per caratteristiche naturali (forte pendenza, assenza di sorgenti di sedimento a monte) o per interventi antropici (sbarramenti a monte che intercettano tutto il trasporto solido, restringimento delle sezioni, difese spondali) vengono sistemati tramite una serie di opere trasversali (briglie o soglie di fondo) poste in sequenza, così da determinare un profilo longitudinale dal tipico aspetto "a gradinata".

Poche sono le ricerche indirizzate alla comprensione della dinamica dell'alveo in presenza di una sequenza di opere trasversali. Da sottolineare che in questo caso, a differenza delle opere considerate "isolate", il dislivello tra i peli liberi di monte e di valle ed il cuscinio d'acqua di valle sono funzione, oltre che della portata unitaria, del tirante idraulico presente tra due opere, a sua volta determinato dalla pendenza di compensazione o di equilibrio e dalla granulometria dell'alveo.

Tale problema è strettamente analogo alla scavo localizzato originato da un "tumbling flow", ovvero da quel particolare regime idraulico (presente nei torrenti con morfologia naturale a gradinata o "step-pool") che si instaura per l'alternanza ravvicinata di gradini e pozze di erosione e che presenta caratteristiche di dissipazione energetica del tutto peculiari. I torrenti montani a forte pendenza (>3-5 %) presentano spesso infatti una morfologia naturale a gradinata, detta a *step pool*. Del resto, la sistemazione di tali torrenti mediante opere trasversali di consolidamento quali briglie e soglie di fondo determina la formazione di una analoga sequenza di salti e pozze rendendo in tal modo a gradinata il profilo longitudinale del corso d'acqua. Nonostante ci sia comune accordo sul fatto che le buche di scavo a valle di *step* naturali (*pools*) siano originate dall'erosione localizzata a valle degli stessi, poche sono le ricerche che hanno cercato di valutare la loro dimensione in base alle variabili idrauliche e sedimentologiche. L'attività di ricerca di dottorato ha coinvolto sia prove sperimentali di laboratorio che rilievi di campo.

Nel periodo Gennaio – Maggio 2002 diverse prove sperimentali sono state condotte presso il laboratorio "G. Poleni" del dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima e Geotecnica dell'Università di Padova, utilizzando una canaletta inclinabile dalle pareti di vetro lunga 10 m, larga 0.5 m e profonda 0.65 m. Non era prevista alcuna alimentazione solida da monte.

L'attività sperimentale (28 prove) ha riguardato l'influenza dell'interasse tra soglie di fondo sull'entità dello scavo localizzato all'equilibrio. Si è utilizzata una miscela granulometrica composta da ghiaia pressochè uniforme e si sono testati quattro valori di pendenza iniziale: 0.03, 0.045, 0.062, 0.08.

Tale intervallo aveva lo scopo di estendere verso il basso il range di pendenze già sperimentato dal sottoscritto durante la propria attività di tesi di laurea presso HR Wallingford (UK), rimanendo su valori caratteristici di alvei sistemati tramite sequenze di opere trasversali. Tre sono le distanze tra soglie sperimentate: 1.5 m, 0.75 m e 0.5 m. Una stessa prova presentava tre valori diversi di interasse, ed ovviamente una portata liquida ed una pendenza iniziale. La combinazione di diverse portate liquide con le varie pendenze ed i vari interassi ha condotto ad avere 112 buche di scavo le cui dimensioni (i.e. profondità, lunghezza e volume) e forma sono state correlate con le rispettive variabili idrauliche e geometriche.

Le misurazioni hanno riguardato il rilievo del pelo libero tramite un'asta idrometrica (ogni 5 cm) e quello del fondo utilizzando un profilatore laser (ogni 2.5 cm). Una delle prove è stata filmata da una telecamera posta lateralmente alla canaletta, in modo da documentare la dinamica del processo di scavo.

A livello internazionale, dati di campagna relativi a dimensioni e caratteristiche delle erosioni localizzate a valle di soglie e briglie sono poco numerosi. Se poi si considerano solamente opere costituenti sistemazioni a gradinata, allora ci si trova di fronte all'assenza totale di misurazioni disponibili. Appare così evidente quanto fosse necessaria una campagna di misure tesa alla formazione di un insieme statisticamente significativo di dati relativi a tali scavi localizzati; questo al fine sia di validare le formule disponibili ottenute su modello fisico a scala ridotta, sia di fornire relazioni statistiche basate unicamente su tali dati di campagna. Un confronto tra esperienze di laboratorio e misurazioni di campagna potrà inoltre essere utile per l'allestimento di futuri studi su modelli a scala ridotta, andando ad indicare quali caratteristiche considerate finora trascurabili giochino invece un ruolo nel fenomeno fisico a scala reale. L'attività di campagna ha coperto non solo gli scavi derivanti da opere trasversali, bensì anche le caratteristiche dei *pool* naturali, ovvero le pozze presenti nei torrenti montani che esibiscono una struttura morfologica a gradinata o a *step-pool*. A tale riguardo in letteratura vi sono diversi studi di campagna, tuttavia nessuno ha finora cercato di analizzare le dimensioni dei *pool* con l'ottica di porli in relazione agli scavi derivanti da soglie di fondo. Complessivamente sono stati misurati (profondità massima e lunghezza) 73 scavi a valle di briglie e soglie e 37 pozze a valle di step naturali, in 10 torrenti delle Alpi Orientali.

E' stata inoltre condotta una livellazione geometrica tramite autolivello di due tratti sistemati secondo criteri fluviomorfologici con briglie in massi e calcestruzzo lungo il T. Maso di Spinelle. Un confronto tra il profilo longitudinale subito dopo la costruzione delle opere e quello attuale influenzato da un evento di piena con tempo di ritorno all'incirca decennale avvenuto nel 1998 ha permesso interessanti osservazioni sulla dinamica erosivo-

deposizionale di un alveo posto a gradinata, indicando inoltre il grado di stabilità delle opere relativamente al fenomeno di scavo localizzato. La struttura dell'elaborato si presenta articolata come segue.

Capitolo 1 (*Introduction*). Introduzione delle peculiarità idrauliche dei torrenti montani a forte pendenza, con una prima evidenziazione dell'analogia fra sistemazione a gradinata e struttura naturale a *step pool*. Lo scopo della tesi viene infine esplicitato.

Capitolo 2 (*Natural step pool systems*). Viene presentata una breve descrizione delle strutture naturali a *step pool*, con uno stato dell'arte aggiornato sintetico diviso negli aspetti idraulici, geometrici, dei processi formativi e di quelli destabilizzanti.

Capitolo 3 (*Local scouring at grade-control structures*). Tale sezione si presenta molto articolata: dopo una prima descrizione (sottocap. 3.1) delle principali caratteristiche delle sistemazioni idrauliche tramite briglie e soglie, il sottocapitolo 3.2 presenta un riassunto delle conoscenze attuali riguardo l'idraulica e l'erosione derivanti da opere trasversali isolate, mentre il sottocapitolo 3.3 si occupa di analizzare gli stessi aspetti ma in un contesto di opere poste a gradinata.

Capitolo 4 (*Flume experiments*). In questo capitolo vengono prima descritti gli apparati sperimentali e le caratteristiche delle prove effettuate in laboratorio (vedi sopra), successivamente vengono presentati i risultati ottenuti da tali esperienze, divisi secondo vari aspetti delle dimensioni d'equilibrio degli scavi a valle di soglie. Particolare risalto viene dato ad i fenomeni di interferenza tra le opere, precedentemente mai descritti nella letteratura scientifica.

Capitolo 5 (*Field measurements*). Tale capitolo contiene sia la presentazione che i risultati derivanti dall'attività di campo (vedi sopra). Inizialmente vengono esposti due casi di studio su altrettanti torrenti sistemati con briglie in massi, mentre successivamente tutti i dati relativi agli scavi a valle di salti artificiali vengono analizzati e confrontati con alcuni dati di laboratorio. Di seguito viene descritta la selezione granulometrica riscontrata in un tratto sistemato con briglie. Per finire, vengono presentate le metodologie ed i risultati del confronto statistico fra le dimensioni dei *pool* naturali e di quelli a valle di opere, e viene proposta una spiegazione del variare della geometria delle strutture naturali a gradinata con la pendenza del canale.

Capitoli 6 (*Closure Discussion*) and 7 (*Conclusions*). Vengono riassunte le principali novità introdotte dal presente lavoro di ricerca, sia per lo scavo a valle di opere trasversali che per la comprensione della geometria e della dinamica strutturale delle sequenze naturali a gradinata.

RISULTATI PRINCIPALI E CONCLUSIONI

Attività di laboratorio

Per l'analisi dei dati di laboratorio, si è fatto riferimento allo schema geometrico-idraulico presentato in Fig. 1, dove S è la pendenza iniziale, S_{eq} la pendenza di equilibrio, y_s la massima profondità di scavo, l_s la lunghezza di scavo, L l'interdistanza tra le opere, h_c il tirante critico, h_u il tirante di moto uniforme, ed infine a_1 è il salto morfologico uguale a $(S - S_{eq})L$ (Gaudio et al, 2000).

Considerando poi l'energia critica specifica sulla soglia $H_s = 1.5h_c$, la densità relativa del sedimento ρ ed un generico percentile della curva granulometrica D , si è ottenuta la seguente relazione adimensionale tramite l'applicazione del teorema pi-greco:

$$\frac{y_s}{H_s} = \Phi \left[\frac{a_1}{H_s}, \frac{a_1}{\Delta D} \right] \quad (1).$$

Successivamente è stata effettuata un'analisi di regressione multipla non lineare utilizzando dati relativi a prove ad alta pendenza (7-15%) effettuate precedentemente a Wallingford, Regno Unito (Comiti, 1999) ed ad esperimenti riguardanti prove a bassa pendenza (<1.6%, Gaudio et al. 2000); si sono ottenute le seguenti due equazioni valide nel caso in cui l'interdistanza tra le opere sia abbastanza grande da permettere l'instaurarsi di un profilo di equilibrio di moto uniforme a valle della buca di scavo.

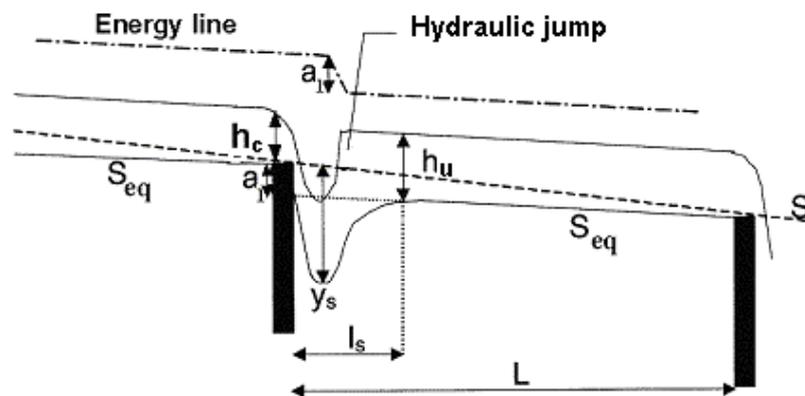


Fig. 1 – Schema delle variabili considerate nell'analisi di laboratorio.

$$\frac{y_s}{H_s} = 0.4359 + 1.4525 \left(\frac{a_1}{H_s} \right)^{0.8626} + 0.0599 \left(\frac{a_1}{\Delta D_{95}} \right)^{1.4908} \quad (2)$$

$$\frac{l_s}{H_s} = 4.479 + 0.023 \left(\frac{a_1}{H_s} \right)^{-1.808} + 2.524 \left(\frac{a_1}{\Delta D_{95}} \right)^{1.129} \quad (3)$$

Infatti, come si vede dal grafico in Fig. 2 dove la Serie 1 si riferisce alle prove di Wallingford con $L=1$ m e la Serie 2 a quelle con $L=0.5$ m, un fenomeno di “interferenza” tra le soglie riduce lo scavo. Il fenomeno sembra svilupparsi dal momento in cui il tratto a valle della fossa di scavo non raggiunge pendenze positive ed il salto morfologico a_1 risulta pari a SL . La lunghezza effettiva di scavo risulta, inoltre, fortemente ridotta rispetto a quanto prevedibile senza interferenza (Fig. 3). Una motivazione si potrebbe ricondurre all’equilibrio delle particelle sulle pareti della fossa di scavo: non potendo i grani disporsi in modo tale da superare certi valori di pendenza, la massima profondità risulta così fisicamente limitata. Tale interferenza – comandata da valle – sarà quindi chiamata “geometrica”.

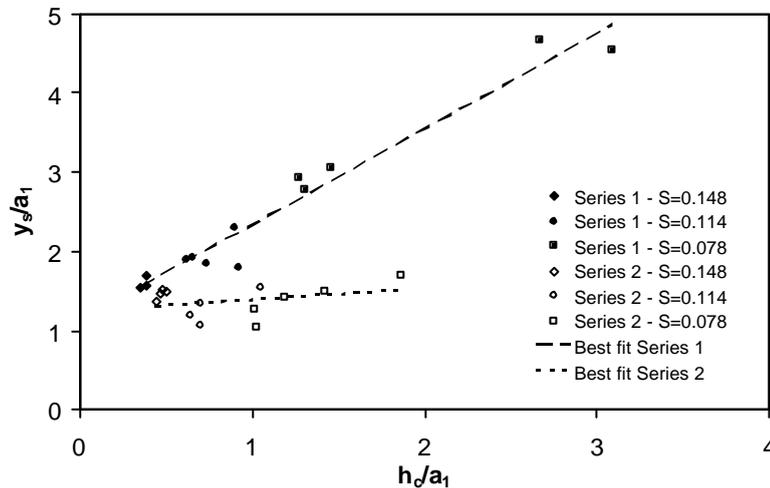


Fig. 2 – Influenza di portate crescenti (h_c) normalizzate rispetto al salto morfologico sulla profondità massima di scavo adimensionale.

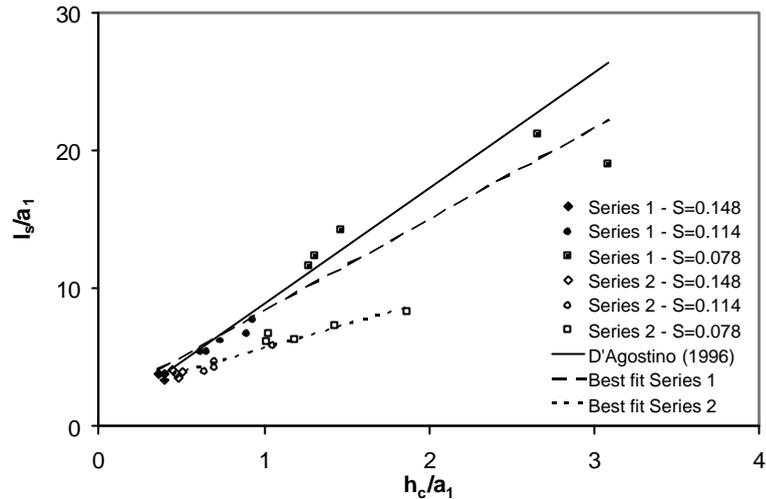


Fig. 3 – Influenza di portate crescenti (h_c) normalizzate rispetto al salto morfologico sulla lunghezza di scavo adimensionale.

A supporto di tale ipotesi, è stata inoltre riscontrata un' invarianza geometrica delle buche di scavo, sia sotto forma di auto-affinità dei profili che seguendo il procedimento (Fig. 4) proposto da Franke (1968).

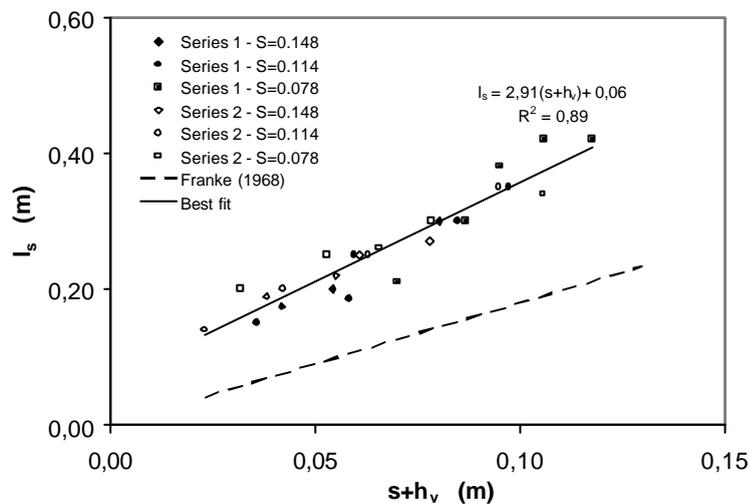


Fig. 4 – Rapporto tra lunghezza di scavo e la lunghezza di diffusione del getto pari alla somma del cuscino d'acqua di valle h_v e della profondità di scavo $s=y_s-a_1$.

Allo scopo di tenere conto degli effetti di interferenza sulla massima profondità di scavo, è stata elaborata una nuova relazione funzionale, dove anche il grado di eterogeneità – “gradation coefficient”, s_g (Bunte and Abt, 2001) – dei sedimenti viene preso in considerazione:

$$\frac{y_s}{H_s} = f_1 \left[\frac{a_1}{\Delta D}, \frac{a_1}{H_s} \right] f_3 [s_g] f_4 \left[\frac{L}{H_s} \right] \quad (4).$$

Da un'analisi di regressione multipla non lineare effettuata sui nuovi dati sperimentali di Padova assieme a quelli precedentemente ottenuti a Wallingford, si è ricavata la seguente equazione:

$$\frac{y_s}{H_s} = 2.68 \left(\frac{a_1}{H_s} \right)^{0.43} s_g^{-0.19} \left(1 - e^{-0.14 \frac{L}{H_s}} \right) \quad (5),$$

dove l'ultimo fattore permette di modellare la riduzione della massima profondità di scavo adottando un relazione esponenziale negativa desunta dalla Fig. 5.

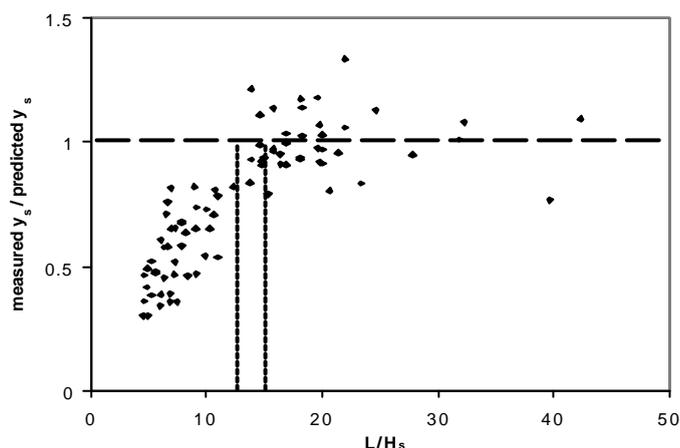


Fig. 5 – Il rapporto di riduzione della massima profondità di scavo funzione del parametro L/H_s .

Attraverso i dati di laboratorio di Padova, si è verificata l'assenza di auto-similarità delle buche di scavo (Fig. 6), ma si è confermata l'esistenza di un forte grado di auto-affinità (Fig. 7), già osservato precedentemente per le prove di Wallingford. Tale affinità risulta essere valida sia per prove interferenti che non, perciò supportando l'ipotesi che un'invarianza geometrica sia alla base del fenomeno di riduzione delle dimensioni di scavo.

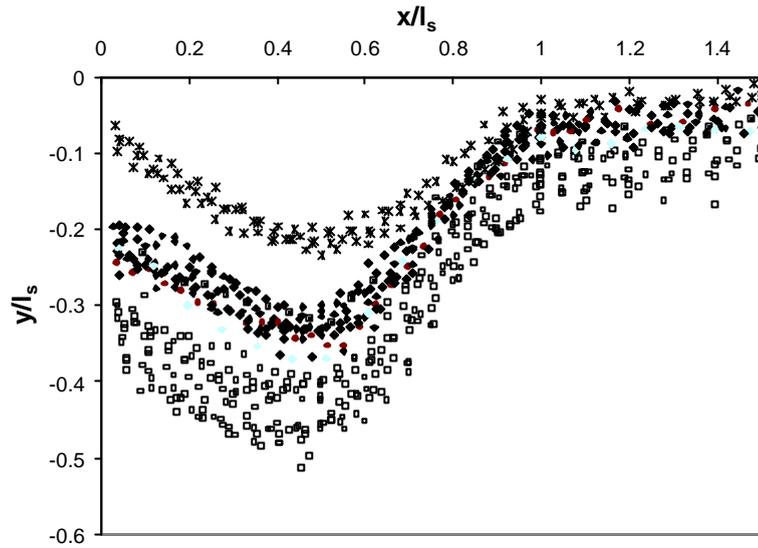


Fig. 6 – Profili di scavo per le prove di Padova non interferenti differenziate per le diverse pendenze; è evidente al non auto-similarità.

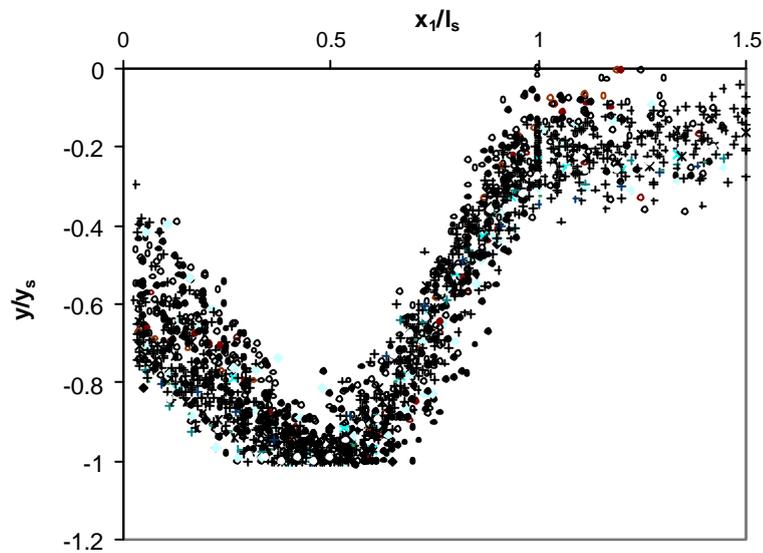


Fig. 7 – Auto-affinità delle buche di scavo per tutte le prove di Padova.

Per le lunghezze di scavo delle prove non-interferenti si è ottenuta la seguente relazione:

$$l_s = 6.56H_s \quad (6);$$

successivamente si è pervenuti ad una semplice espressione e per l'area all'interno della buca:

$$A = 0.564 y_s l_s \quad (7),$$

dalla quale moltiplicando per la larghezza – in casi di scavi bidimensionali – si può ottenere il volume eroso.

Le prove di Padova con pendenza iniziale del 0.03 hanno esibito particolari fenomeni di deformazione del fondo, derivanti dall'instaurarsi di onde stazionarie generate da ogni soglia (Fig. 8). E' stato osservato un fenomeno di interferenza denominata "morfodinamica", nel quale il treno di onde stazionarie generato a monte altera l'idrodinamica e i conseguenti processi di erosione del fondo. La lunghezza d'onda della prima cresta è stata normalizzata con il tirante sulla soglia h_s , ed si è così evidenziata una sua forte correlazione con il numero di Froude relativo alle condizioni sulla soglia (Fig. 9).

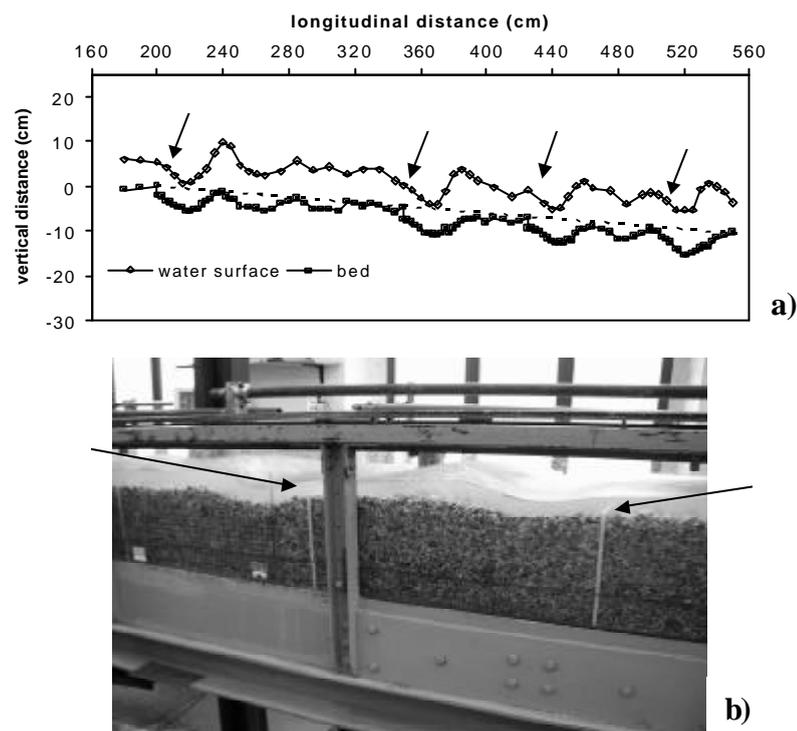


Fig. 8 – Onde stazionarie durante una prova con pendenza $S=0.03$.

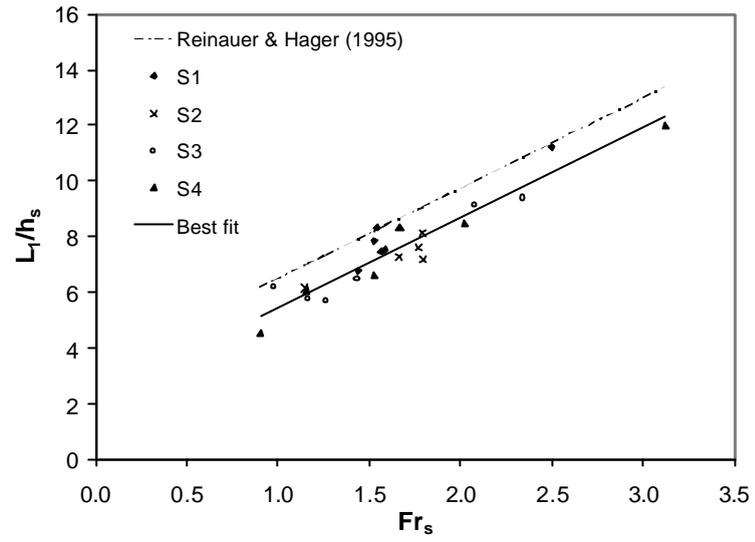


Fig. 9 – Relazione tra prima lunghezza d'onda normalizzata e numero di Froude del flusso sulla soglia.

Attività di campo

Per l'analisi dei dati raccolti in campo a valle di briglie e soglie, si è fatto riferimento allo schema geometrico presentato in Fig. 10, dove S è la pendenza iniziale, S_{eq} la pendenza di equilibrio, y_s la massima profondità di scavo e l_{max} la sua distanza dalla soglia, l_s la lunghezza di scavo, l_b la distanza della berma di fine pozza, L l'interdistanza tra le opere, S_e la pendenza di risalita della buca, ed infine z è il dislivello tra berma e gavetta della soglia, all'incirca corrispondente al salto morfologico a_1 .

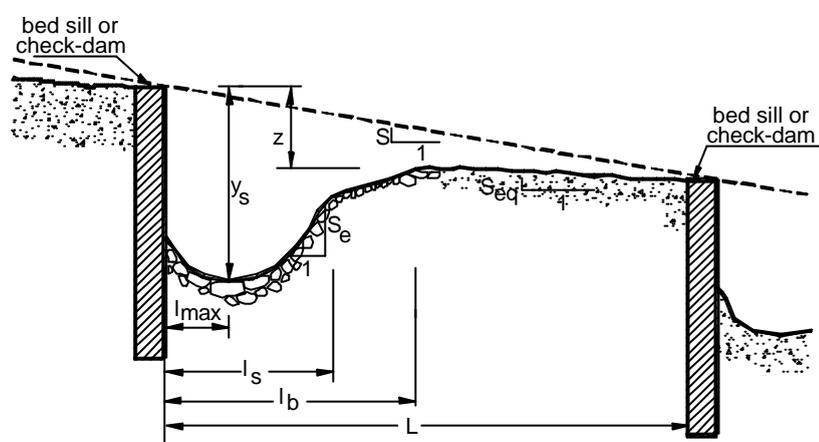


Fig. 10 – Schema delle variabili considerate per le misure di campo.

Dalla regressione delle massime profondità di scavo, lunghezze di scavo e distanze della berme, si sono ottenute le seguenti equazioni:

$$\frac{y_s}{h_c} = 1.21 \frac{z}{h_c} + 0.96 \quad (8)$$

$$\frac{l_s}{z} = 1.05 \left(\frac{h_c}{z} \right)^2 + 1.54 \frac{h_c}{z} + 1.89 \quad (9)$$

$$\frac{l_b}{z} = 6.38 \frac{h_c}{z} + 1.35 \quad (10).$$

E' stato successivamente verificato come una normalizzazione tramite l'energia teorica del getto $E = z + H_s$ permetta di raggruppare i dati relativi a tutte le dimensioni delle buche di scavo all'interno di un ristretto intervallo di variazione, evidenziando altresì una correlazione negativa tra efficienza di scavo e "rapporto di caduta" z/h_c (Figs. 11-13).

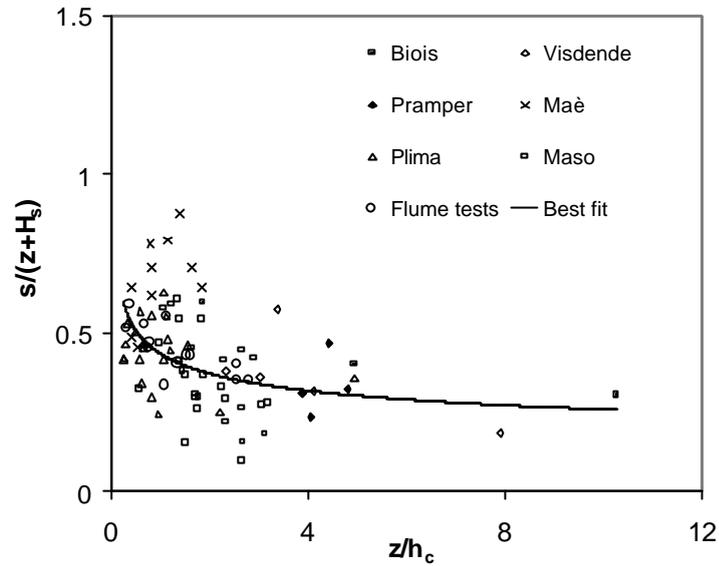


Fig. 11 – Efficienza di scavo per la profondità $s=y_s-z$.

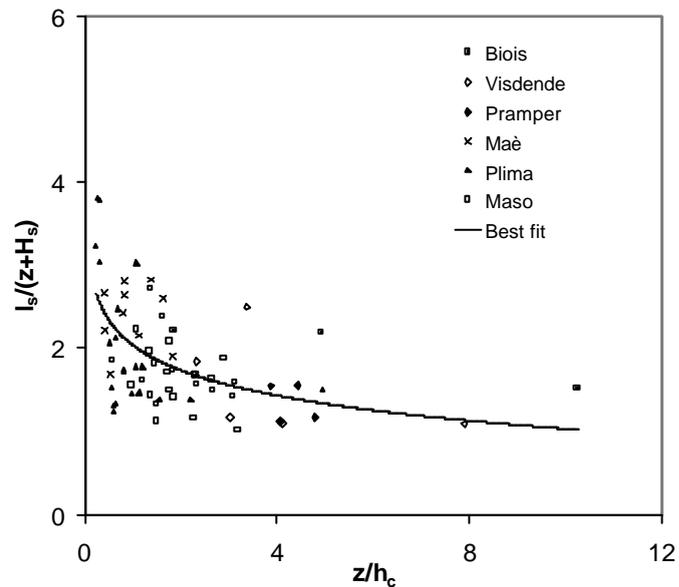


Fig. 12 – Efficienza di scavo per la lunghezza di scavo l_s .

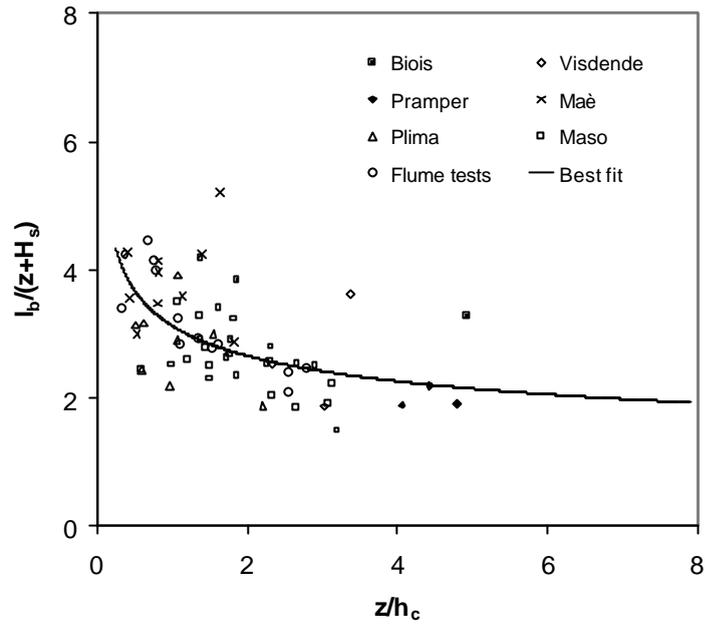


Fig. 13 – Efficienza di scavo per la distanza della berma l_b .

Tramite i dati di campo è stata inoltre validata l'equazione 2 per la massima profondità di scavo, ottenendo un errore medio pari al 13% (Fig. 14).

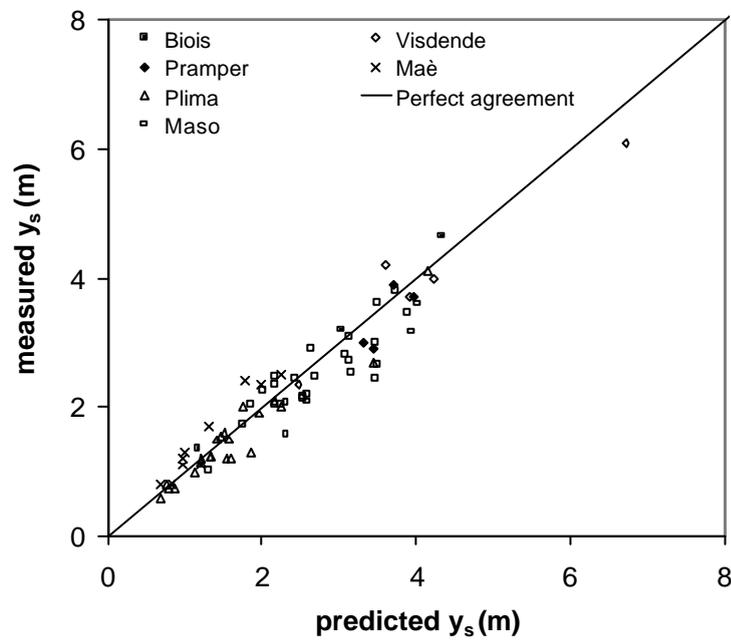


Fig. 14 – Confronto tra valori misurati e predetti tramite l'equazione 2.

I rilievi della granulometria superficiale nei torrente Maè a Forno di Zoldo e Cordevole ad Arabba hanno permesso di descrivere graficamente e quantitativamente la selezione diametrica operata dalla presenza di opere trasversali (briglie e soglie) con riferimento alla distribuzione presente a valle delle buche, nel tratto presentante una pendenza di equilibrio (Fig. 15). Il diametro medio degli elementi al fondo delle buche risulta essere pari al $D_{80}-D_{87}$ della curva cumulata di riferimento, mentre per le berme invece al $D_{90}-D_{95}$.

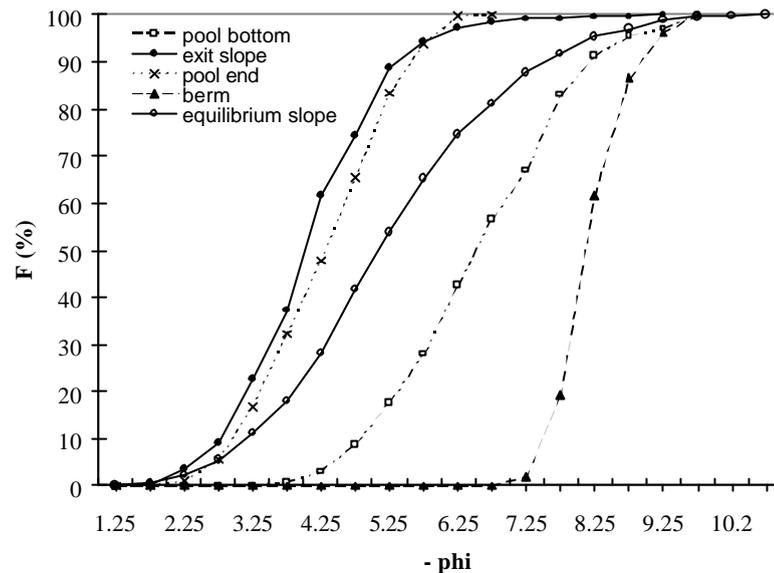


Fig. 15 – Curve granulometriche cumulate relative a diverse zone di un alveo sistemato con soglie di fondo (T. Maè, Belluno).

Per quanto riguarda i rilievi delle strutture naturali a gradinata (*step pool*), si è fatto riferimento al seguente schema (Fig. 16).

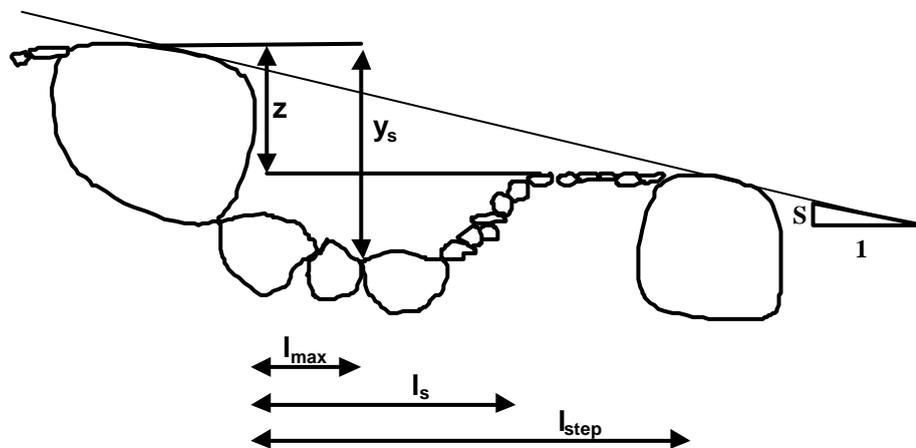


Fig. 16 – Schema per la definizione delle principali variabili misurate nei torrenti con strutture naturali a gradinata.

Come si vede in Fig. 17, adottando la stessa normalizzazione attraverso il tirante critico della massima profondità di scavo (Eq. 8), i punti relativi alla profondità delle pozze naturali appaiono avere un andamento lineare molto simile a quello esibito dalle pozze “artificiali”, cioè a valle di opere trasversali.

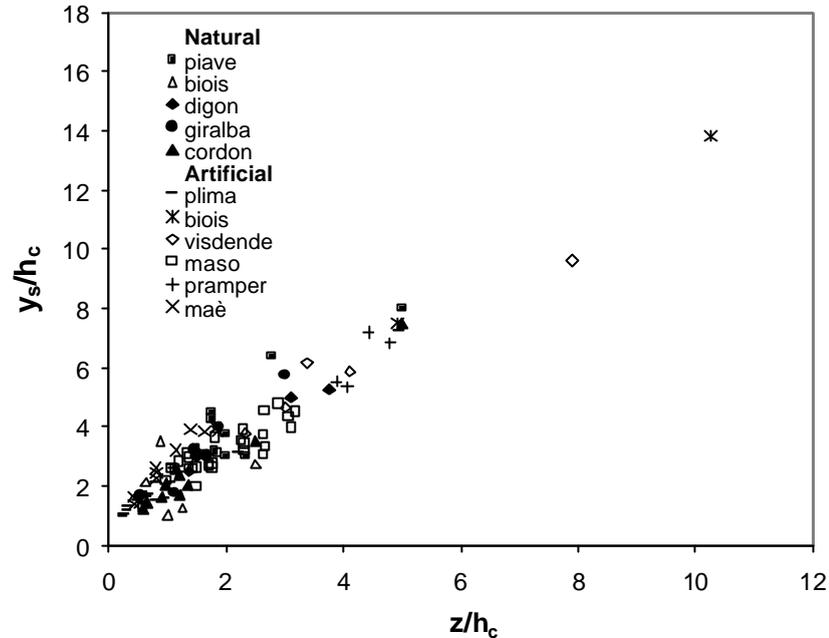


Fig. 17 – Massima profondità di scavo/delle pozze rispetto in funzione del rapporto di caduta.

Si è proceduto quindi a valutare statisticamente sia tramite il test t di Student che con l'utilizzo (Statsoft, 2002) di tre test non parametrici (Mann-Whitney U , Kolmogorov-Smirnov e Wald-Wolfowitz) se i due gruppi “pozze naturali N” e “pozze artificiali A” possano ritenersi campioni estratti da uno stesso campione, perciò suggerendo una loro stretta analogia formativa. I risultati dei tre test non parametrici (più attendibili per via di una eterogeneità delle varianze campionarie) sono riportati nelle Tabelle 1 e 2. Dalla prima, si evince come in generale tutte le dimensioni caratteristiche delle pozze, con la distanza della berma posta a confronto con la distanza dello step successivo (Fig. 18), dimostrino una somiglianza significativa se normalizzate tramite l'energia teorica del getto E . Confrontando i rapporti geometrici delle pozze, soltanto la pendenza di risalita S_e ed il rapporto l_{max}/l_s risultano differenti tra i due gruppi.

Tabella 1 – Grandezze delle pozze normalizzate tramite l'energia del getto E. Sono evidenziati le differenze tra i gruppi significative al livello $p=0.05$.

	Media		Dev. Stand.		Mann-Whitney p	Wald-Wolfowitz p	Kolmogorov-Smirnov p
	N	A	N	A			
y_s/E	0.95	0.92	0.27	0.18	>0.10	>0.10	>0.10
s/E	0.47	0.43	0.22	0.16	>0.10	>0.10	>0.10
l_s/E	2.11	1.88	1.05	0.63	>0.10	>0.10	>0.10
l_b/E l_{step}/E	3.00	2.90	1.37	0.78	>0.10	<0.05	>0.10

Tabella 2 – Rapporti geometrici delle pozze. Sono evidenziati le differenze tra i gruppi significative al livello $p=0.05$.

	Media		Dev. Stand.		Mann-Whitney	Wald-Wolfowitz	Kolmogorov-Smirnov
	N	A	N	A			
l_{max}/l_s	0.53	0.37	0.17	0.11	<0.001	<0.05	<0.001
l_b/y_s l_{step}/y_s	3.28	2.86	1.23	0.87	>0.10	>0.10	>0.10
l_{step}/l_s l_b/l_s	1.57	1.51	0.49	0.26	>0.10	>0.10	>0.10
l_b/s l_{step}/s	7.02	6.50	3.27	1.83	>0.10	>0.10	>0.10
S_e	0.51	0.33	0.29	0.11	<0.05	>0.10	<0.05

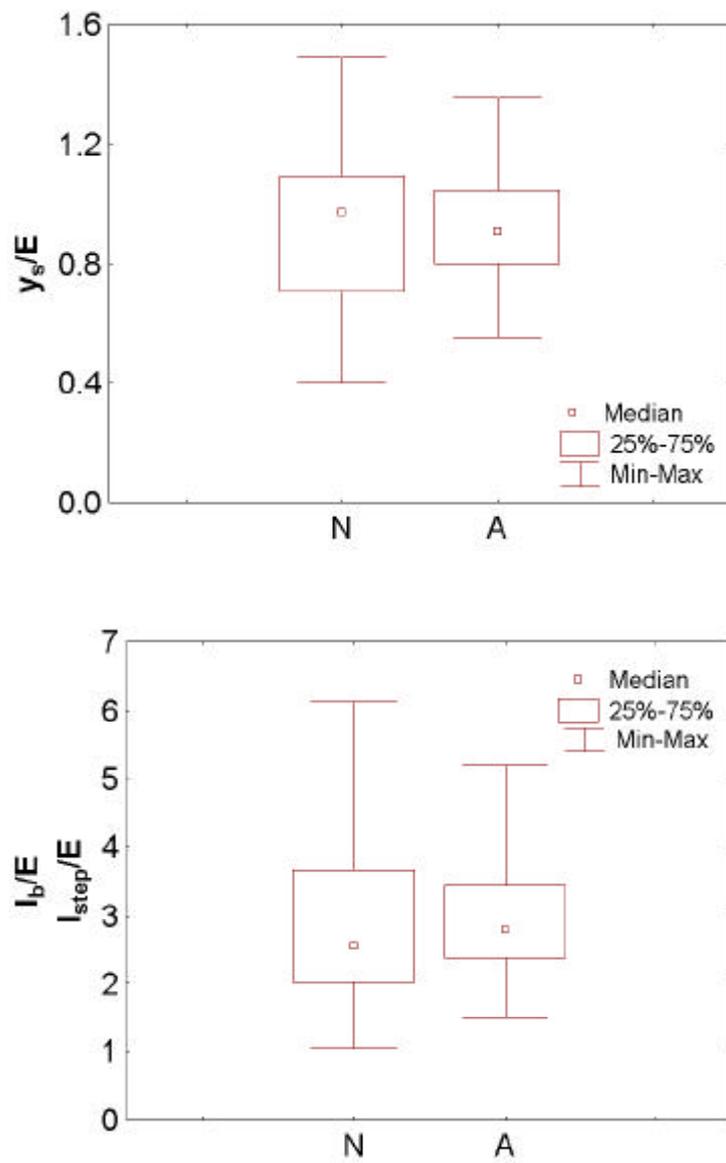


Fig. 18 – Confronto tra dimensione verticale (sopra) e longitudinale (sotto) delle pozze tra sistemi naturali (N) ed artificiali (A).

Partendo dall'osservazione che il rapporto tra lo sviluppo orizzontale dello scavo (distanza della berma e distanza step) e la profondità residua della pozza ($s=y_s-z$) è risultato essere poco variabile e non correlato con il rapporto di caduta z/h_c , si è derivata da considerazioni geometriche un'espressione dove il rapporto $c=(H/L)/S$ – introdotto da Abrahams et al. (1995) – è funzione della pendenza media del collettore, così spiegando la tendenza osservata da vari Autori per *step pool* naturali.

La relazione (Eq. 11, Fig. 19) prevede un parametro, k , pari al succitato rapporto L/s , il quale considerando sia i strutture naturali che artificiali varia grosso modo fra 6 e 8.

$$\frac{H/L}{S} = \frac{k \cdot S + 1}{k \cdot S} \quad (11).$$

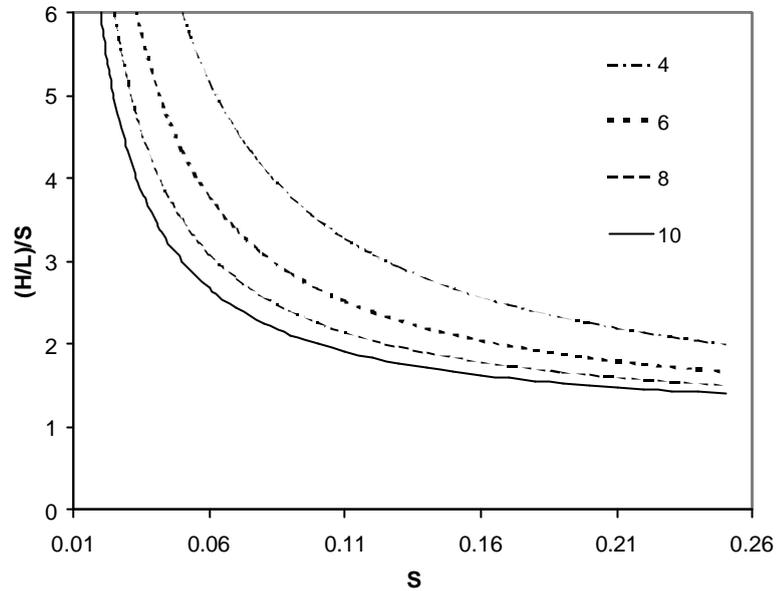


Fig. 19 – Andamento dell’equazione 11 per diversi valori del parametro k .

Come si vede in Fig. 20, tale espressione appare aderire molto bene ai dati di campo, dove al posto della pendenza media del canale si è usata una “pendenza locale” data dal rapporto tra distanza step/berma e dislivello di caduta.

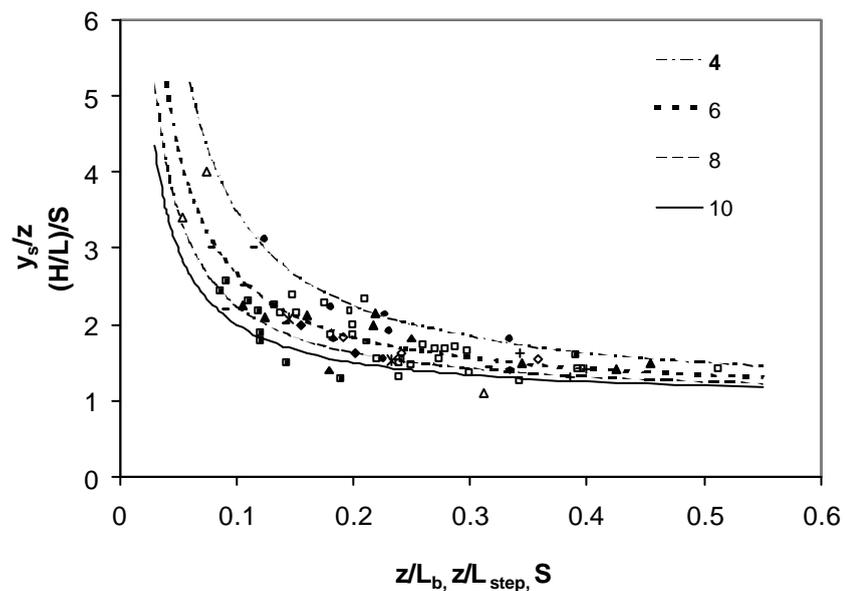


Fig. 20 – Andamento dell’equazione 11 per diversi valori del parametro k e coppie di valori derivati dalle misure di campo in strutture naturali e artificiali.

Conclusioni

I dati di laboratorio e di campo hanno permesso di ottenere diverse formulazioni empiriche e semi-empiriche per la previsione della massima profondità di scavo, della lunghezza di scavo e del volume eroso, introducendo il nuovo concetto di energia teorica del getto e della relativa efficienza di scavo. E' stato inoltre descritto e modellato un fenomeno di interferenza geometrica tra opere poste a distanze ravvicinate su pendenze elevate, ed uno di interferenza morfodinamica nel caso si formino onde stazionarie su pendenze minori. L'analogia geometrica ed idraulica tra strutture a gradinata naturali ed artificiali è stata infine verificata statisticamente, fornendo così un nuovo modello geometrico-idraulico per spiegare la geometria complessiva delle sequenze a *step pool* naturali.