



UNIVERSITÀ DI PISA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CdL in Ingegneria civile, dell'ambiente e del territorio

TESI DI LAUREA TRIENNALE

“Studio sperimentale di strutture idrauliche a basso impatto ambientale”

Relatore

Dott. Ing. Stefano Pagliara

Candidato

Luca Dell'Amico

Anno accademico 2012 - 2013



"..è più facile studiare il moto dei corpi celesti infinitamente lontani che quello del ruscello che scorre ai nostri piedi.."

*Galileo Galilei
(tratto da "Discorso intorno a due Scienze nuove")*

Introduzione

Premessa

Nel corso del secolo scorso, grazie al notevole sviluppo tecnologico, legato ai rilevanti progressi scientifici, si è registrato, tra l'altro, un correlato miglioramento socio-economico, che ha innescato l'incremento della presenza antropica sul territorio, attraverso forti processi di urbanizzazione, industrializzazione e, in genere, di sfruttamento del territorio stesso. Tutti questi cambiamenti, avvenuti senza una chiara e studiata strategia d'intervento, hanno comportato una radicale trasformazione dell'uso del suolo, cui si è associato un sensibile aumento dell'impatto ambientale, che ha comportato, inevitabilmente, situazioni di forte squilibrio degli ecosistemi, in molti casi purtroppo irreversibili, altamente pericolosi e dannosi non solo per l'uomo.

Casi evidenti dell'antropizzazione del territorio e dell'impatto ambientale, smodato ed errato, sono, ad esempio, la realizzazione di una sempre più complessa e fitta rete viaria, l'incessante disboscamento di ampie aree da destinare all'agricoltura intensiva, la costante espansione dei centri urbani, la sistematica riduzione degli ambiti fluviali e l'eccessiva regolazione delle acque. Tutto ciò ha comportato, nel tempo, la realizzazione di onerosi ed invasivi interventi di protezione dalle piene, che purtroppo non sempre sono stati sufficienti ad evitare grossi disastri, come testimoniano le cronache degli ultimi anni; partendo da questa oggettiva situazione di rischio, si evince la necessità di una nuova filosofia di sviluppo, che si concentri sulla compatibilità con il sistema ambientale in cui l'uomo vive; in altri termini, serve una politica d'interventi, orientati al recupero dei luoghi naturali degradati e una maggiore attenzione alla progettazione sostenibile ed eco-compatibile dei nuovi interventi.

Il recente interesse della comunità scientifica nei confronti delle sistemazioni ambientali dei corsi d'acqua, necessarie per il ripristino delle funzioni e delle caratteristiche originarie degli ecosistemi fluviali, ha prodotto, negli ultimi anni, numerose ricerche (prevalentemente in laboratorio), al fine di individuare meccanismi di funzionamento e criteri progettuali per il dimensionamento di strutture diverse da quelle tradizionalmente utilizzate, in quanto la realizzazione di opere di sistemazione idraulica tradizionale comporta molteplici problematiche, dovute spesso

proprio ad un'errata valutazione dell'influenza degli interventi per quanto concerne in trasporto del materiale e, quindi, sulla variazione della morfologia dell'alveo.

Obbiettivi

Scopo della presente ricerca è valutare l'efficienza e l'efficacia delle opere non convenzionali di riqualificazione dei corsi d'acqua, analizzando l'applicabilità dei risultati ottenuti nelle indagini condotte in laboratorio; in altre parole, sarà valutata la funzionalità delle opere e l'influenza di queste sulla morfologia naturale dei corsi d'acqua.

L'intervento di sistemazione deve tenere conto, infatti, delle diverse problematiche che investono la sicurezza idraulica, la frammentazione dell'ecosistema e del paesaggio. La comunità scientifica ha rivolto, da qualche anno, l'attenzione verso sistemazioni idrauliche che preservassero l'ambiente, individuando soluzioni quali briglie in massi, briglie selettive e rampe in pietrame a basso impatto ambientale.

Le strutture idrauliche sono progettate al fine di contribuire a stabilizzare i confini di un canale; tuttavia, il controllo della loro efficacia ha indicato che molte di queste, contrariamente alle aspettative, hanno causato una forte instabilità del corso d'acqua: ciò è avvenuto, in quanto troppo spesso le strutture sono scelte ed installate senza un adeguato studio preliminare.

Vari studi condotti in passato hanno rilevato che la forma di un fiume è associata ad un'interazione di 8 variabili correlate tra loro: pendenza, larghezza, profondità, velocità, scarico, scabrezza del confine, dimensioni dei sedimenti trasportati e loro concentrazione. La complessità di studio dei fenomeni idrodinamici, legata alle numerose variabili interessate, ha impedito di disporre di un quadro conoscitivo esaustivo; tra gli obbiettivi, vi è quindi la verifica e l'ampliamento delle conoscenze pregresse, attraverso nuove esperienze di laboratorio, concentrandosi sulla variazione della forma e dell'altezza della struttura, sulla portata e sulla configurazione di scarico, ipotizzando la pendenza nulla sul tratto fluviale preso in esame.

Sotto tali ipotesi, si procede con diversi esperimenti al fine di ricavare formule empiriche da applicare a strutture realizzate in alvei naturali, evitando così sovradimensionamenti strutturali, i quali comportano eccessivi costi e forti impatti ambientali; il fine, dunque, è quello di comprendere le dinamiche idrauliche e di valutare il fenomeno erosivo in varie condizioni di esercizio, per scegliere di volta in volta quale tipo di struttura sia la più idonea a essere utilizzata.

Cap. 01 – Descrizione dell'apparato sperimentale

1.1 Il modello

L'apparato con cui sono state effettuate le prove è il canale "1C", sito presso il Dipartimento di Idraulica dell'Università di Pisa; il canale, di vetro, è lungo 6 mt, alto 0,5 mt e largo 0,35 mt (Figura 1).



Figura 1 - Vista generale canale 1C

L'impianto è costituito da un circuito chiuso, composto da una pompa di sollevamento, da una tubazione adduttrice e da una vasca di calma pressoché cubica, posta ai piedi del canale. Da essa, una pompa ad asse orizzontale, attinge una potenza di 7,5 kW, che riesce ad erogare una portata massima pari a circa 30 lt/s. La tubazione adduttrice, in PVC, che trae l'acqua direttamente dalla vasca, ha un diametro di 80 mm ed è dotata di un misuratore di portata di tipo elettromagnetico. È presente, infine, in fondo al canale, una paratoia che permette di regolare il deflusso della corrente subcritica; invece, per quanto concerne la regolazione della corrente supercritica di monte, è possibile agire direttamente sulle valvole di regolazione, poste lungo la condotta adduttrice.



Figura 2 - Dettagli del modello

All'interno di questo circuito chiuso, si sono realizzate strutture diverse, per forma (lineare, trapezoidale corta, trapezoidale lunga) e per altezza (variabile dai 2 ai 4 cm), attraverso cui è stato simulato il passaggio di portate dai 2 ai 5 lt/s, sia tenendo la paratoia regolata, sia lasciandola completamente aperta. Il canale è stato riempito con materiale granulare ben selezionato e livellato all'inizio di ogni esperimento all'altezza di 32 cm.

1.2 Modalità di esecuzione delle prove

Ciascuna prova ha inizio con il rilevamento del fondo a secco, opportunamente livellato in modo tale da non creare discontinuità. Per il canale, le sezioni di misura in senso longitudinale sono state scelte ad interasse variabile tra i 5 e i 30 cm, più fitte nei pressi della struttura posta in esame, per valutare al meglio, la profondità

massima e, in generale, la conformazione dello scavo. Trasversalmente, invece, si è scelto di rilevare, ove non fosse presente la struttura, le variazioni di profondità ogni 3 cm, a partire dal centro, fino a raggiungere 1 cm dai bordi: procedendo come appena descritto, è stato possibile avere a disposizione valori abbastanza fedeli delle grandezze d'interesse. Lo strumento adoperato per effettuare le misurazioni è l'idrometro, appoggiato su un carrello.

In senso longitudinale, inoltre, è stato rilevato anche l'altezza del "tail water", ovvero l'altezza del pelo libero della corrente d'acqua in 5 posizioni prefissate e costanti per tutti gli esperimenti: all'entrata nel canale, all'interno (o in prossimità) della struttura, ad 1 mt, a 2 mt e a 2,60 mt dalla struttura stessa.



Figura 3 - L'idrometro utilizzato

Sono state eseguite 58 prove; ognuna di queste iniziava, dopo aver opportunamente livellato il letto e controllato l'altezza e la forma della struttura, con una portata molto bassa ($< 1 \text{ lt/s}$), in modo tale da riempire in parte il canale, senza alterare le caratteristiche geometriche del fondo. In seguito, si procedeva ad aumentare la portata fino al valore prestabilito per la prova, agendo sulla valvola d'apertura e verificandone il valore sull'apposito schermo

del dispositivo elettromagnetico. Se la prova, poi, prevedeva la regolazione del deflusso, si apriva solo parzialmente la paratoia, fino a verificare che il livello dell'acqua fosse costante; in caso contrario, si apriva totalmente la paratoia, con lo scopo di poter osservare che il deflusso dell'acqua dal canale nella vasca fosse libero. Qui finiva la fase di preparazione ed iniziava la prova, non appena si vedeva iniziare lo scavo.

Prima di procedere al rilievo del profilo liquido era necessario attendere che la situazione si fosse stabilizzata e ciò avveniva tra i 60 ed i 120 secondi dall'avvio. Invece, per il rilievo dello scavo, si procedeva - come già descritto in precedenza - sempre con l'idrometro, dopo 5, 10, 20, 40 e 60 minuti e successivamente di ora in ora, partendo dalla struttura e arrivando al punto in cui il fondo non era stato condizionato dal continuo passaggio del liquido. I tempi d'esecuzione sono stati variabili, in funzione non solo della portata, ma anche della forma e dell'altezza della struttura e dell'apertura parziale o totale della paratoia. Mediamente e con poche

eccezioni, lo scavo non raggiungeva mai la sua configurazione stabile prima di 120 minuti; in taluni casi, è stato addirittura necessario proseguire l'esperimento fino a 300 minuti. Alla fine di ogni esperienza, inoltre, era di fondamentale importanza, rilevare anche l'altezza del livello idrico e confrontarlo con i valori misurati all'inizio, al fine di definire l'altezza di moto uniforme h_0 . Una volta completato il rilievo del profilo liquido, si passava alla misurazione del profilo longitudinale di scavo, operando in condizioni asciutte, interrompendo quindi l'alimentazione della pompa ed attendendo che il modello si svuotasse.

1.3 Descrizione delle strutture

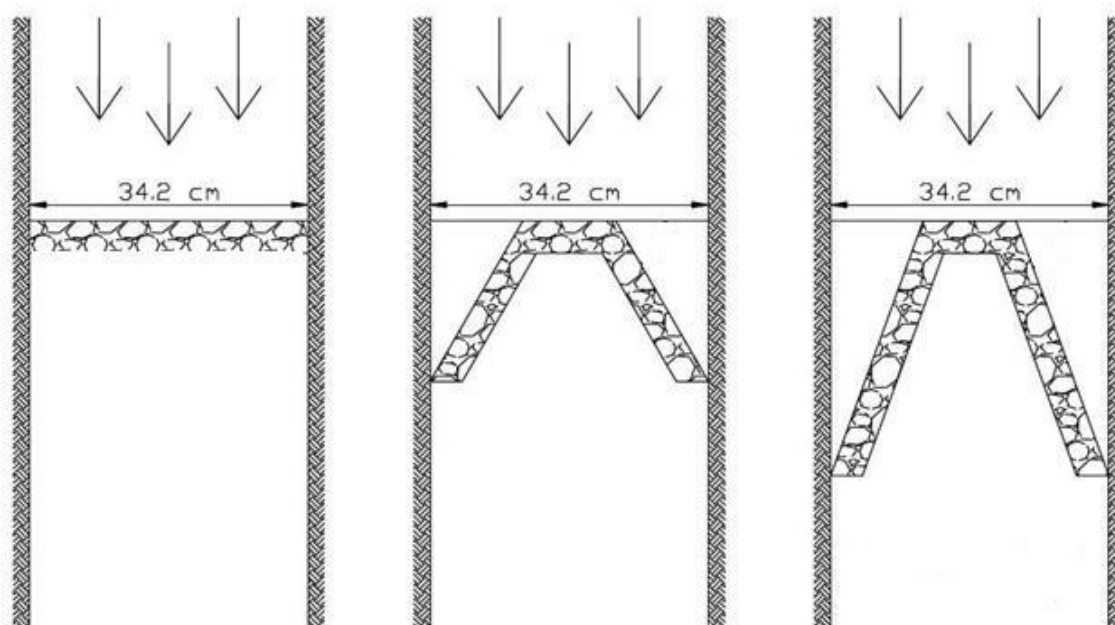


Figura 4 - Vista in pianta delle strutture; da sinistra verso destra: lineare, trapezoidale corta, trapezoidale lunga

Quelle sopra riportate sono le rappresentazioni qualitative, in pianta, delle diversi tipi di struttura presi in esame durante questi esperimenti:

- La struttura lineare (a sinistra) non presenta particolari caratteristiche geometriche e, anche per questo motivo, è stata la prima ad essere installata. In totale, facendo variare l'altezza e la portata, sono state eseguite 14 esperienze.
- La struttura trapezoidale corta (al centro) è così chiamata, in quanto la forma assunta dalla biglia assomiglia molto di più ad un semicerchio anche se,

più propriamente, le parti laterali hanno un'inclinazione di 60° rispetto all'asse trasversale, lasciato inalterato rispetto alla struttura precedente.

- La *struttura trapezoidale lunga* (a destra), infine, è stata l'ultima forma testata per la maggiore difficoltà d'installazione; per costruirla è stata divisa in tre parti la larghezza del canale ed è stata riempita con pietrame la parte centrale; per le pareti laterali è stata progettata un'inclinazione di 70° rispetto all'asse trasversale e sono poi state disposte le pietre in maniera da formare una struttura simmetrica. Su questo tipo di struttura sono stati eseguiti nell'insieme 22 test.

Per ogni struttura testata, infine, si precisa che è stata disposta una base inferiore composta da pietrame di maggiori dimensioni, con la volontà di migliorare la stabilità della struttura stessa ed evitare cedimenti, che potessero compromettere i risultati dei nostri esperimenti.

1.4 Caratterizzazione dei materiali

Il letto di un corso d'acqua naturale è costituito da una miriade di particelle individuali, ciascuna delle quali costituisce un'entità separata, le cui proprietà sono state studiate dettagliatamente sia dai geologi, sia dagli ingegneri idraulici. I geologi hanno studiato queste proprietà per scoprire le origini del sedimento e per studiarne la natura degli agenti di trasporto. Gli ingegneri idraulici, invece, hanno esaminato queste proprietà, poiché esse hanno importanza rilevante sul fenomeno del trasporto dei sedimenti nei corsi d'acqua. Tra le proprietà delle particelle individuali, quelle che giocano un ruolo fondamentale nel presente studio sono:

- il peso specifico;
- la dimensione;
- la forma;

Il "peso specifico" è definito come il peso dell'unità di volume del materiale costituente le particelle sedimentarie e dipende, in maniera preponderante, dalla composizione mineralogica delle particelle. Questa è un importante elemento, oltre che per il peso specifico, poiché la presenza (o l'assenza) di certi minerali dà importanti indizi sulla storia della roccia madre del deposito dovuto all'erosione del bacino imbrifero. Esiste un'ampia scala di minerali: quelli a minor peso specifico risultano senz'altro i minerali argillosi, come caolinite e sericite, maggior peso specifico

presentano calcite, dolomite, feldspar e quarzo, mentre minerali pesanti sono considerati augite, carnet, e magnetite. Il materiale impiegato nella presente ricerca, invece, è costituito da granelli omogenei di plastica.

Di tutte le proprietà delle particelle sedimentarie, la “dimensione” del sedimento è una delle più importanti e comunemente usata. Perciò è necessaria una breve, ma dettagliata discussione. Se tutte le particelle fossero delle sfere, allora specificando il diametro avremmo caratterizzato completamente la dimensione delle stesse, ma le particelle sedimentarie che costituiscono i letti dei corsi d’acqua naturali hanno forme assai varie; questa irregolarità della loro forma rende del tutto inefficace un’ordinaria classificazione e dunque, il diametro come indice della dimensione delle particelle perde il suo usale significato. Per tali ragioni, per caratterizzare le dimensioni delle particelle sedimentarie costituenti i letti dei corsi d’acqua, sono stati introdotti dei parametri specifici:

- Diametro nominale della particella, d_N : è definito come il diametro della sfera avente lo stesso volume della particella. Il diametro nominale fornisce un’idea della dimensione fisica della particella.

- Diametro del setaccio, d : in molti casi, una serie di setacci è utilizzata per la separazione dei sedimenti in varie classi di misura, purché le particelle abbiano un diametro superiore ad un certo valore. La forma delle maglie dei setacci è quadrata.

La classificazione dei setacci non è puramente basata sulla dimensione, bensì i setacci classificano le particelle per la loro più piccola sezione trasversale, proprio perché una particella di forma allungata ma con una sezione trasversale molto piccola potrebbe passare attraverso il setaccio. Il diametro del setaccio di una particella è dato dalla misura della maglia del setaccio attraverso il quale la particella riesce giusto a passare. Sono stati condotti alcuni studi per determinare le relazioni tra i vari parametri di misura ed è stato trovato che per materiali naturali c’è una correlazione lineare tra diametro del setaccio, d , e diametro nominale, d_N . In termini matematici possiamo scrivere:

$$d \approx 0,9 d_N$$

Gli studiosi sono interessati a definire anche la “forma” delle particelle sedimentarie per varie ragioni: in particolare, gli ingegneri idraulici lo sono perché questa influenza la velocità media della corrente, la quale defluisce sul letto formato da tali particelle; inoltre, essa agisce sulla velocità di caduta, sulla stabilità dei litorali e delle spiagge e sul trasporto solido del letto. La forma della particella dipende inizialmente dalla roccia madre e dall’azione degli agenti atmosferici; in seguito, la forma viene modificata da abrasioni, corrosioni e rotture. Infine, quando raggiunge

un deposito sedimentario, il moto della particella è governata da meccanismi come schiacciamenti, frazionamenti, macinazioni ed erosioni chimiche. Poiché le particelle sedimentarie col tempo si erodono e vengono ad assumere una molteplicità di forme, impossibili da descriverle nei particolari.

Per definire la forma è in genere necessario definire un singolo parametro il quale deve essere riconducibile ad un'analisi quantitativa. La "sfericità" si basa sul volume delle particelle. Inizialmente tale grandezza è stata definita come il rapporto tra l'area della superficie della sfera avente lo stesso volume della particella e l'area della superficie della particella; pertanto, per una particella sferica, la sfericità deve essere uguale all'unità, mentre deve essere minore di tale valore per qualsiasi particella non sferica. Tale definizione di sfericità, basata su eccellenti considerazioni teoriche, risultava difficile da applicare, perché ottenere la vera area della superficie per particelle molto piccole risulta assai complicato e dunque la sfericità successivamente è stata definita nel modo seguente:

$$Sfericità = \sqrt[3]{\frac{V_{particella}}{V_{sfera}}}$$

dove al numeratore si ha il volume della particella mentre al denominatore per V_{sfera} si intende il volume della sfera circoscritta. Il concetto di sfericità è un importante passo avanti nella descrizione della forma. Pertanto non tiene conto della grossezza della particella, data dal rapporto tra gli assi principali; può così accadere che particelle aventi la stessa sfericità manifestino una differente grossezza. Considerando d_n il diametro nominale e a l'asse maggiore, allora la relazione sopra si riduce alla semplice forma seguente:

$$Sfericità = \frac{d_n}{a}$$

I materiali usati nei nostri test, sono quelli costituenti la struttura in elevazione e il piano di posa: i primi, sono usati propriamente da ostacolo per l'acqua, mentre i secondi sono responsabili del processo di escavazione. Questi ultimi hanno le seguenti caratteristiche:

- $D_{50} = 3,52 \times 10^{-3}$ [m]



Figura 5 - Materiale utilizzato per letto del fiume

- $\rho = 1,29 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$

I dati riportati sono stati verificati attraverso prove di laboratorio standard.



Figura 6 - Materiale utilizzato per le strutture

Per la struttura in elevazione (e per la sua base), invece, sono stati utilizzate pietre di vario materiale, con altezza dai 2 ai 4 cm, a seconda delle necessità dell'esperimento. La foto riportata a fianco mostra, appunto, le dimensioni del materiale e la sua forma: si è cercato di scegliere pietre con spigoli levigati e forma più possibile regolare.

Cap. 02 – Elaborazione dei dati

2.1 Definizione delle variabili

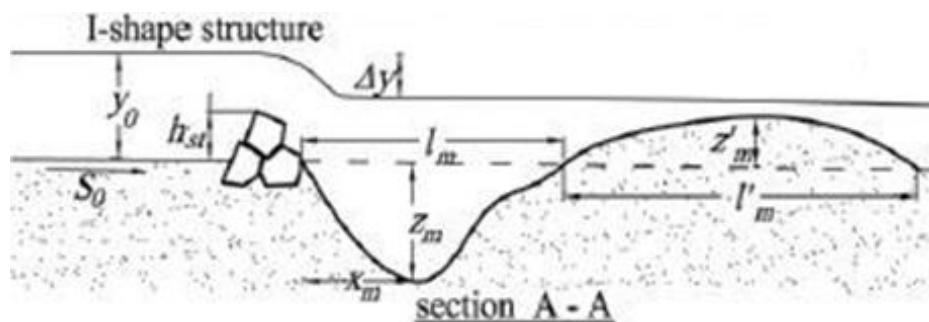


Figura 7 - Profilo del canale

La figura riportata di sopra mostra una sezione qualitativa del canale

utilizzato per gli esperimenti; il verso dell'acqua è quella indicata dalla freccia. Tuttavia, per una completa comprensione dei fenomeni, che saranno di seguito esaminati, è di fondamentale importanza definire alcuni concetti base:

z [cm]	profondità dello scavo
Δy [cm]	differenza di altezza del pelo libero prima (y_0) e dopo la struttura (y_1)
L [cm]	lunghezza del contorno della struttura
L_M [cm]	lunghezza di scavo (o del riporto)
h_s [cm]	altezza della struttura
x [cm]	distanza longitudinale tra scavo dal punto di partenza
b [cm]	larghezza del canale, pari a 34,2 cm
T_w [cm]	Tail Water, ovvero livello del pelo libero della corrente d'acqua.
g [m/s ²]	accelerazione di gravità
U [m/s]	velocità
d_{50}	diametro corrispondente al 50% del passante, pari a 3,52 mm
ρ [Kg/m ³]	densità
Q [m ³ /s]	portata
Fr	numero di Froude, adimensionale, calcolato come $\frac{U}{\sqrt{gH}}$

F_D	numero di Froude densimetrico, adimensionale	$\frac{Q}{l h_s \sqrt{g d_{50} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)}}$
η	parametro adimensionale, la cui relazione è essere calcolata come: $\eta = f\left(\frac{y_t}{y_0}, \frac{b}{y_0}, \frac{h_s}{b}, \frac{F_0}{F_d^2}\right)$ da cui otteniamo:	$\frac{F_d^2 \Delta y}{h_s}$

Uno dei parametri più importanti è il “numero di Froude”, pari al rapporto tra la velocità meda della corrente e la velocità delle piccole oscillazioni. Tale quantità adimensionale ci consente di dividere le correnti di regime subcritico ($Fr < 1$), da quelle a regime supercritico ($Fr > 1$).

Inoltre, una variante del precedente parametro è il “numero di Froude densimetrico” (F_D), che consente di raffrontare le caratteristiche del fondo mobile con quelle della corrente; in pratica, risulta pari al rapporto tra la spinta idrodinamica S , esercitata su una generica particella da una corrente a velocità U , e il peso sommerso P' della particella stessa.

Infine, il parametro η , molto usato nella nostra analisi, data la sua formulazione, mette in relazione tutte o quasi le variabili che sono state studiate ed utilizzate.

2.2 Descrizione qualitativa del fenomeno

Queste esperienze si propongono di continuare a studiare le rampe in pietrame, partendo da conoscenze pregresse già acquisite, dovute a precedenti esperimenti, sempre condotti presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa, con l'obiettivo di comprenderne le dinamiche idrauliche e di valutare l'effetto corrosivo che si realizza a valle delle stesse, in diverse condizioni di esercizio; nel caso specifico, è posta attenzione agli effetti generati dal fenomeno erosivo, in condizioni di diversa forma, portata ed altezza della struttura, variando le condizioni di deflusso, ma sempre mantenendo un'inclinazione nulla del fondo.

Procedendo nel verso del moto, l'energia in possesso del fluido è data dalla somma del termine cinetico e dei termine di posizione, trascurando il termine legato alla pressione, in quanto pressoché ininfluenza. Al passaggio del fluido attraverso la struttura, il valore delle singole componenti varia, pur rimanendo costante la loro somma. Ad aumentare è il termine cinetico, ovvero la velocità del fluido, che, una volta passata la struttura, genera un trasporto di materiale. Tale spostamento

comporta uno scavo, che avrà geometria e profondità differenti, da studiare in relazione alle variabili sopra citate.

2.3 Forma lineare ($l/b = 1$)

Analizziamo ora le 14 esperienze effettuate con questo tipo di struttura:

N. #	h_s [cm]	Q [lt/s]	T_{w200} [cm]	Fr	F_D	Z_{MAX} [cm]	Δy [cm]
02	3	2	35,7	0,2023	1,95	3,7	0,7
04	3	3	35,7	0,2663	2,92	3,9	0,4
05	3	2	35,0	0,2424	1,95	3,0	0,4
06	3	3	35,8	0,2582	2,92	5,4	0,8
12	2	2	35,7	0,2623	2,92	2,6	0,3
13	2	3	34,9	0,2851	4,38	1,6	0,3
16	4	2	36,3	0,1488	1,46	4,1	1,0
17	4	2	34,7	0,1575	1,46	5,4	1,8
18	4	3	36,6	0,1859	2,19	7,0	1,2
19	4	3	35,5	0,1906	2,19	8,0	1,7

Tabella 1 - Dati esperimenti con struttura lineare in ordine cronologico

Volendo partire nell'analisi dei risultati, considerando l'altezza della struttura costante al variare della portata, si evince che, esiste un legame di proporzionalità, sebbene non lineare, tra la portata stessa e la lunghezza dello scavo (L), nonché con la profondità massima (z_{MAX}). Inoltre, a parità di portata (cfr. tabella), è possibile ottenere scavi di profondità rilevante semplicemente aumentando di poco l'altezza della struttura. Tutti gli esperimenti sono svolti in regime subcritico ($Fr_{MAX} < 0,33$).

Q = 2 lt/s		Q = 3 lt/s	
h_s [cm] = 2	Z_{MAX} [cm] = 1,6	h_s [cm] = 2	Z_{MAX} [cm] = 4,4
h_s [cm] = 3	Z_{MAX} [cm] = 3,7	h_s [cm] = 3	Z_{MAX} [cm] = 5,4
h_s [cm] = 4	Z_{MAX} [cm] = 5,4	h_s [cm] = 4	Z_{MAX} [cm] = 8,0

Tabella 2 - Dati esperimenti con struttura lineare $Z_m = f(Q, h_s)$

In ciascuno degli esperimenti, abbassando la paratoia di valle per regolare il livello del pelo libero, si verifica un innalzamento del cuscino d'acqua e una conseguente diminuzione delle azioni tangenziali, le quali producono uno scavo minore, sebbene più protratto nel tempo. Dalle foto, si arguisce che questo tipo di struttura genera uno scavo, non soltanto simmetrico, ma concentrato nella parte appena successiva alla struttura ed abbastanza contenuto nelle dimensioni. Non è anomalo, ottenere due scavi simmetrici e paralleli. Come si può vedere dalle foto, in tutti i

casi, l'altezza della duna formatasi con il materiale scavato è abbastanza consistente e tale da modificare il livello del pelo libero, una volta stabilizzato lo scavo.

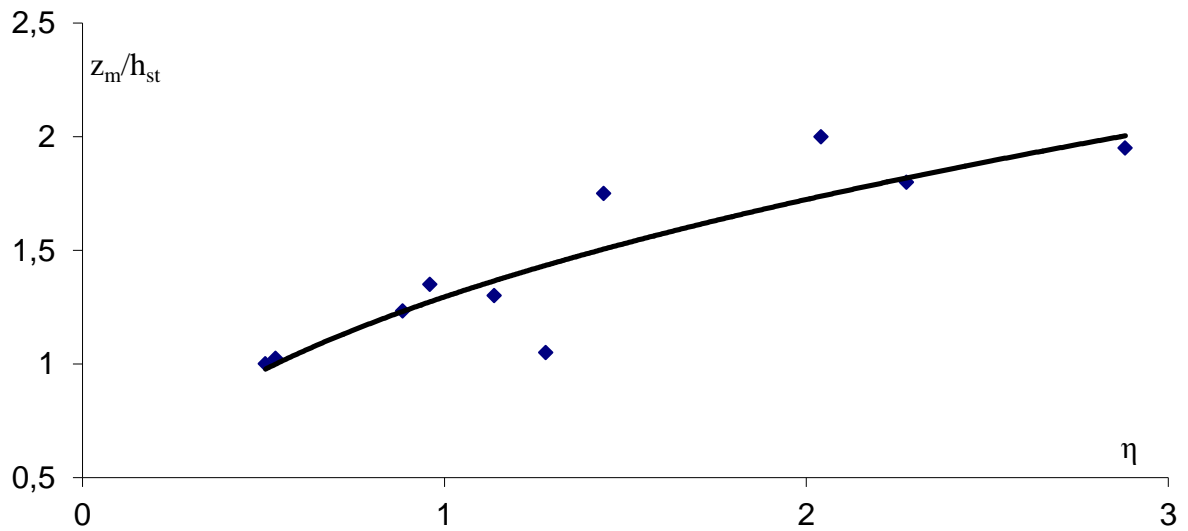


Grafico 1 - Interpolazione dati relativi a struttura lineare

Il grafico sopra riportato mostra un'interpolazione dei vari esperimenti presi in esame; più precisamente è riportato il rapporto tra la massima profondità di scavo e l'altezza della struttura, in relazione al parametro adimensionale η .

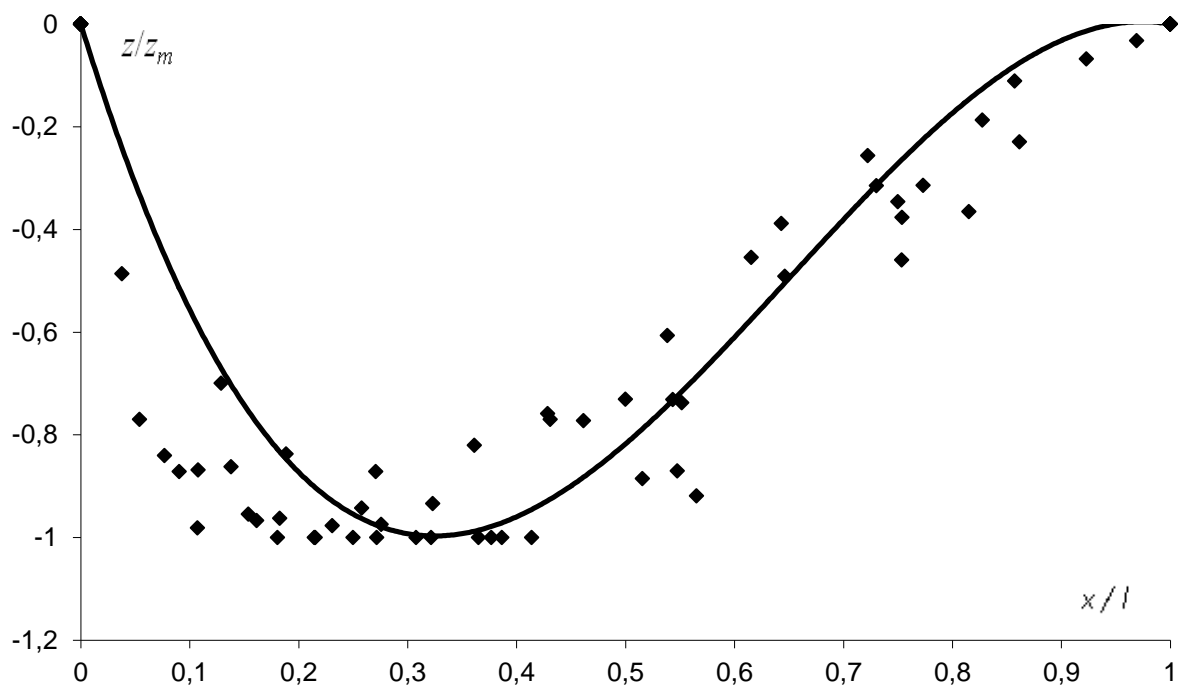


Grafico 2 - Interpolazione dati relativi a struttura lineare

Osserviamo ora il rapporto tra lo scavo e lo scavo massimo registrato, al variare del rapporto x/l . Si può notare una forma semi-parabolica, con concavità rivolta verso

l'alto ed il vertice posto tra 0,3 e 0,4, quindi leggermente a sinistra rispetto alla metà del grafico.

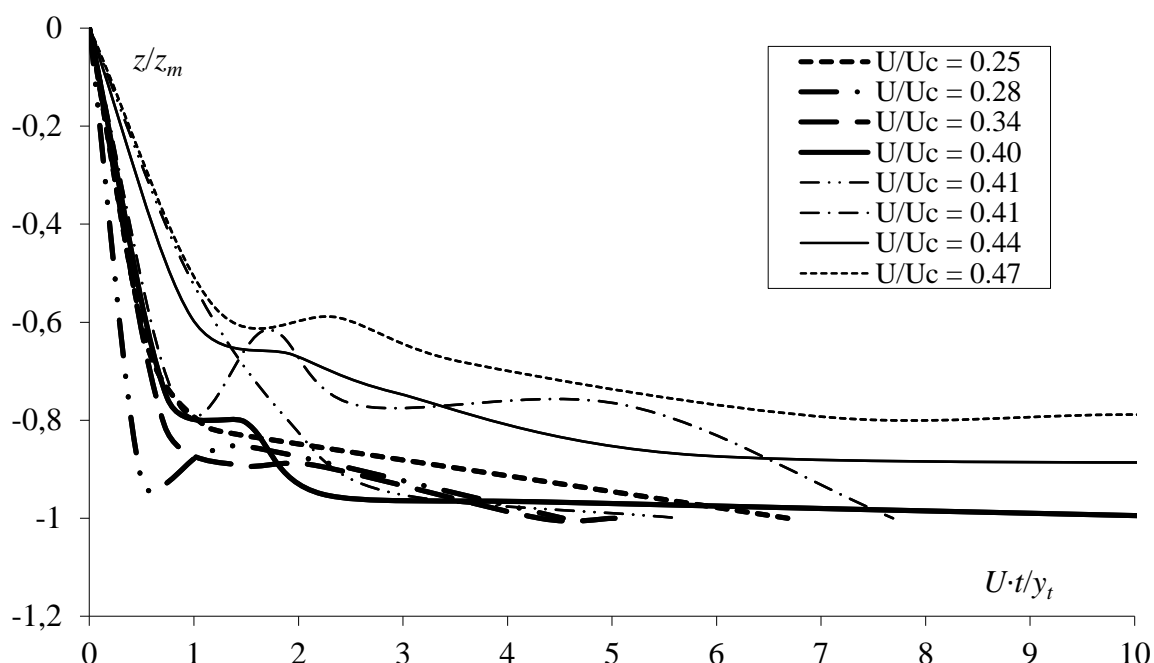


Grafico 3 - Confronto dati relativi a struttura lineare

Da quest'ultimo grafico è possibile valutare sempre il rapporto tra lo scavo e quello massimo, in funzione del parametro adimensionale in ordinata; al variare del rapporto tra velocità riscontrata e velocità critica, si ottengono andamenti simili. Si può concludere che, all'aumentare del rapporto la curva mantiene all'incirca la sua forma, ma trasla verso l'alto e raggiunge in tempi maggiori la massima profondità. In $x=1$, ad esempio, posso ricavare valori variabili tra -0,9 e -0,55.

2.4 Forma trapezoidale corta ($l/b = 1,7$)

Passiamo adesso alle prove effettuate con struttura trapezoidale corta:

N. #	h_s [cm]	Q [lt/s]	$T_{w\ 200}$ [cm]	Fr	F_D	Z_{MAX} [cm]	Δy [cm]
07	3	2	35,3	0,2334	1,17	1,7	0,3
08	3	2	35,2	0,2424	1,17	3,8	0,6
09	3	3	36,2	0,2582	1,75	3,8	0,5
10	3	3	35,8	0,2582	1,75	4,5	0,9
20	4	2	35,5	0,2023	0,88	3,3	1,3
21	4	2	35,0	0,1892	0,88	6,6	0,5

07 Maggio 2013

22	4	3	36,6	0,2113	1,31	3,7	1,1
23	4	3	35,4	0,2432	1,31	6,7	1,0
24	2	4	36,6	0,3340	3,51	2,8	0,1
26	2	4	36,3	0,3551	3,51	3,7	0,3
29	2	3	36,0	0,5069	2,63	//	0,2

Tabella 3 - Dati esperimenti con struttura trapezoidale corta in ordine cronologico

Confrontando i dati, con quelli della struttura precedente, si nota subito che, a parità di altezza sono generati scavi di lunghezza paragonabile, ma di profondità decisamente inferiore; addirittura negli ultimi due esperimenti, pur crescendo Fr, non ho alcun fenomeno di scavo, dovuto in parte alla poca differenza di valore del termine cinetico tra prima e dopo la struttura. Anche in questa condizione, tutti i test sono svolti in condizioni di regime subcritico, sebbene Fr arrivi ad avere valori superiori a 0,5.

Q = 2 lt/s		Q = 3 lt/s	
h_s [cm] = 2	Z_{MAX} [cm] = 0,0	h_s [cm] = 2	Z_{MAX} [cm] = 3,3
h_s [cm] = 3	Z_{MAX} [cm] = 3,8	h_s [cm] = 3	Z_{MAX} [cm] = 4,5
h_s [cm] = 4	Z_{MAX} [cm] = 6,6	h_s [cm] = 4	Z_{MAX} [cm] = 6,7

Tabella 4 - Dati esperimenti con struttura trapezoidale corta $Z_m = f(Q, h_s)$

La forma caratteristica dello scavo (simmetrico) è allungata e presenta uno o due buchi con profondità più accentuata rispetto al resto dello scavo, mentre la loro lunghezza dipende molto dalla portata di cui la struttura è oggetto. Avevamo qualche dubbio di tenuta per una struttura di piccole dimensioni soggette a portate di 5 lt/s, ma abbiamo potuto constatare che non ci sono stati ne abbassamenti, ne spostamenti della stessa. L'altezza delle dune di materiale è apprezzabile ad occhio nudo, anche se in taluni casi è molto più contenuta, rispetto alla struttura lineare.

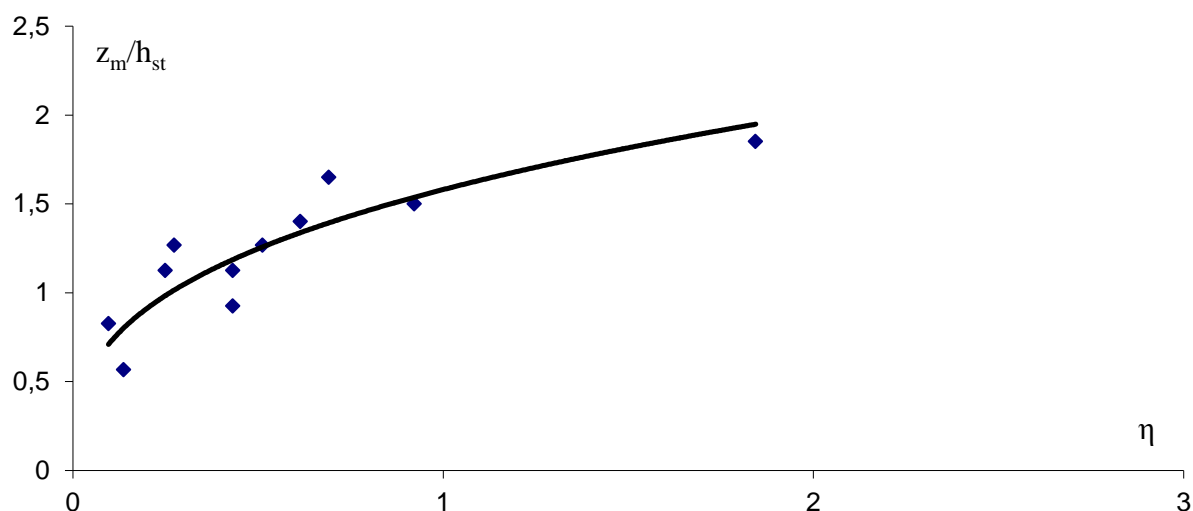


Grafico 4 - Interpolazione dati relativi a struttura trapezoidale corta

Questo grafico, creato seguendo le stesse ipotesi della forma precedente, risulta maggiormente traslato verso il basso e più appiattito. Anche la curvatura appare di lunghezza più compatta.

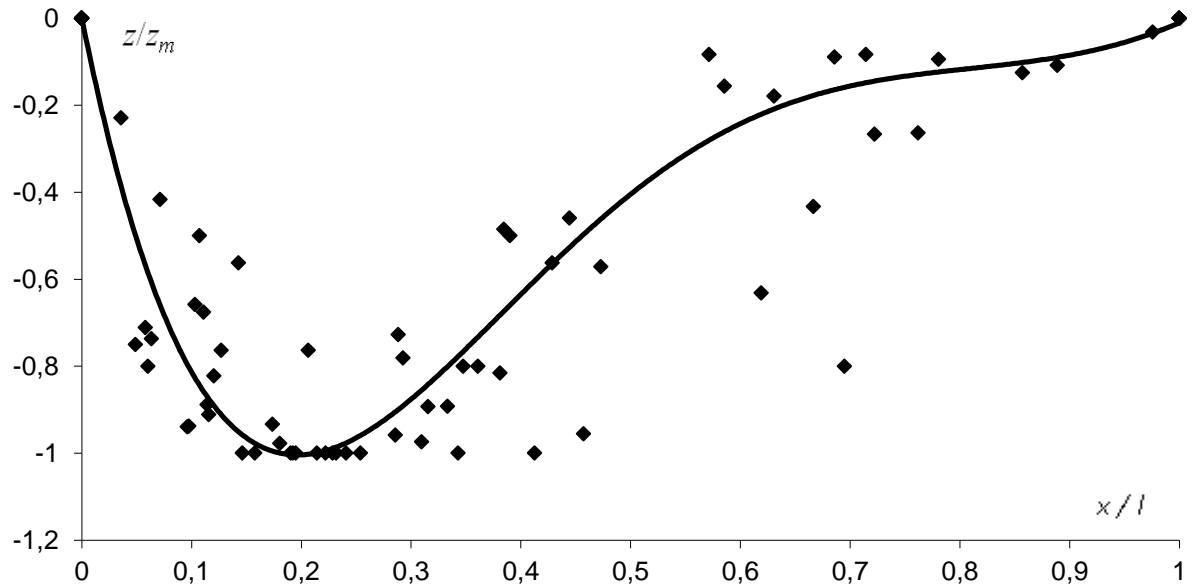


Grafico 5 - Interpolazione dati relativi a struttura trapezoidale corta

Diversamente dalla struttura lineare, si perde la tendenza semi-parabolica, in quanto il vertice risulta essersi spostato verso sinistra (intorno al valore 0,2) e la seconda parte del grafico presenta un andamento rettilineo a tratti, con la pendenza che tende ad attenuarsi procedendo verso destra.

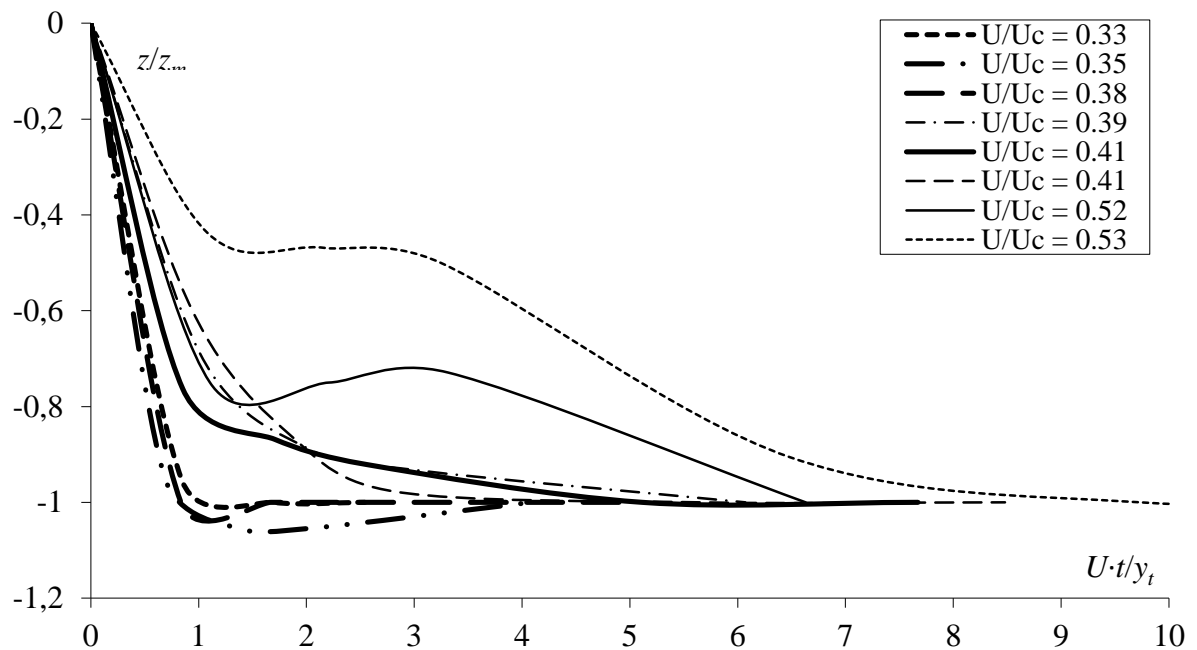


Grafico 6 - Confronto dati relativi a struttura trapezoidale corta

Anche con questo tipo di struttura, la forma del grafico, che mostra - ripetiamo - il rapporto tra la profondità e quella massima registrata, è simile a quella precedente ed è possibile affermare che all'aumentare del rapporto tra velocità registrata e velocità critica aumenta in maniera sensibile il tempo, in cui posso registrare lo scavo massimo. Sempre riferendosi ad $x=1$, ricavo graficamente valori prossimi a -1 se il rapporto è basso, mentre trovo valori pari a circa 0,45 per i rapporti maggiormente elevati.

2.5 Forma trapezoidale lunga ($l/b = 2,3$)

Infine, prendiamo ora in esame i test realizzati con l'ultima forma utilizzata:

N. #	h_s [cm]	Q [lt/s]	T_{w200} [cm]	Fr	F_D	Z_{MAX} [cm]	Δy [cm]
32	3	3	35,6	0,2582	1,28	4,7	0,7
34	4	2	34,7	0,2023	0,64	3,8	0,9
35	4	3	35,4	0,2432	0,96	4,7	1
36	4	3	36,4	0,2362	0,96	4,3	0,6
37	4	4	37,9	0,2361	1,28	3,6	0,2
38	4	4	36,3	0,2818	1,28	5,5	0,5
39	4	4	36,4	0,2976	1,28	5,3	0,4
41	3	2	35,1	0,2333	0,85	1,2	0,4
43	2	2	35,2	0,2978	1,28	0,8	0,1
47	2	4	36,8	0,3242	2,56	3,3	0,1
49	2	5	37,4	0,3522	3,20	3,0	0,1

Tabella 5 - Dati esperimenti con struttura trapezoidale lunga in ordine cronologico

Dai dati raccolti, posso osservare che questa struttura ha un comportamento abbastanza simile a quella trapezoidale corta e produce uno scavo paragonabile, sia in termini di lunghezza dello scavo, sia per profondità massima raggiunta, sia per quanto concerne il "numero di Froude", che rimane costantemente sotto il valore critico. Anche per questa struttura è stato possibile effettuare test con portata pari a 5 lt/s, senza dover registrare cedimenti o spostamenti, inconciliabili coi risultati attesi.

Q = 2 lt/s		Q = 3 lt/s	
h_s [cm] = 2	Z_{MAX} [cm] = 0,8	h_s [cm] = 2	Z_{MAX} [cm] = 2,5
h_s [cm] = 3	Z_{MAX} [cm] = 1,2	h_s [cm] = 3	Z_{MAX} [cm] = 4,7
h_s [cm] = 4	Z_{MAX} [cm] = 3,8	h_s [cm] = 4	Z_{MAX} [cm] = 4,7

Tabella 6 - Dati esperimenti con struttura trapezoidale lunga $Z_m = f(Q, h_s)$

Dalla tabella, si comprende che, benché le condizioni siano le stesse, la Z_M assume sempre

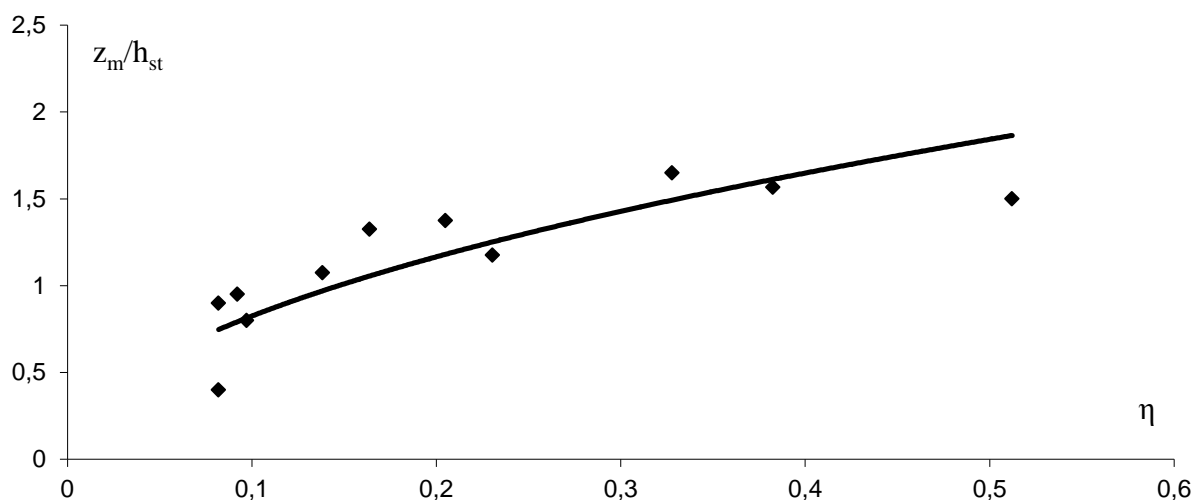


Grafico 7 - Interpolazione dati relativi a struttura trapezoidale lunga

valori abbastanza contenuti. La forma dello scavo risulta allungata e quasi tutte le prove producono due scavi paralleli, sebbene di profondità minore, rispetto alle altre forme.

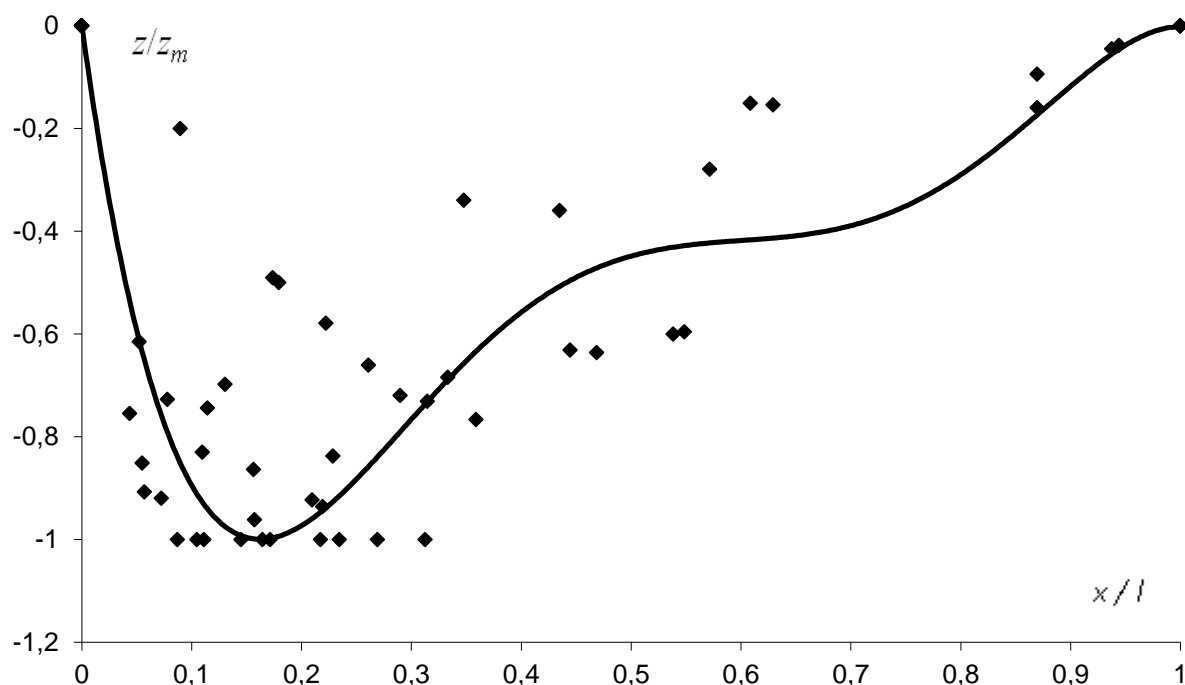


Grafico 8 - Interpolazione dati relativi a struttura trapezoidale lunga

Infine, come si può osservare dal grafico sovrastante, la struttura trapezoidale nel diagramma in questione, perde le caratteristiche citate nelle esperienze preceden-

ti, portando il proprio vertice inferiore tra 0,1 e 0,2 e risalendo con due tratti a pendenza pressoché costante, interrotti da un tratto centrale a pendenza molto più limitata.

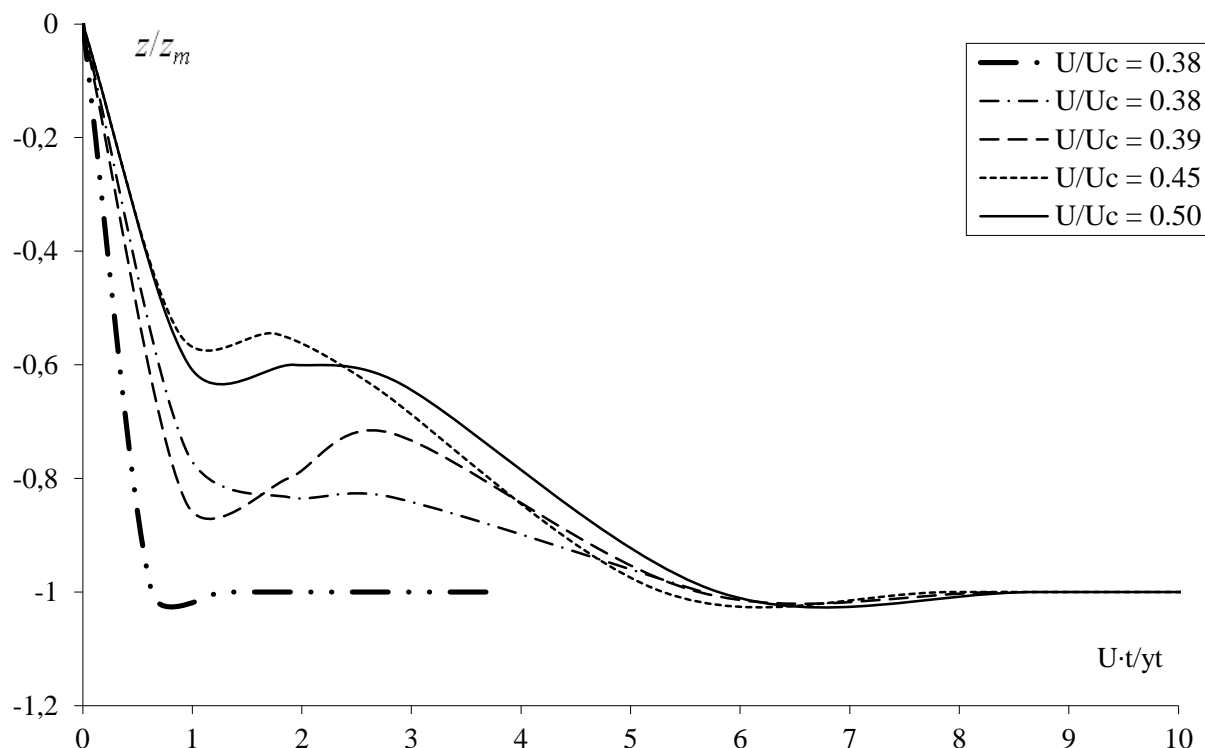


Grafico 9 - Confronto dati relativi a struttura trapezoidale lunga

Analogamente alla struttura trapezoidale corta, si registra uno scavo rapido con rapporto basso tra la velocità registrata e quella critica, mentre aumentando tale valore si ottiene uno scavo più lento, che per raggiungere la stessa profondità può impiegare un tempo anche molto maggiore.

2.6 Confronto tra strutture

Volendo ora, porre a confronto le diverse forme di struttura utilizzate negli esperimenti, andiamo a sovrapporre i grafici presi in considerazione singolarmente.

Relativamente alle variabili considerate, dalla sovrapposizione dei grafici, risulta evidente che aumentando l'angolo, rispetto all'asse trasversale, il grafico assume una forma sempre più schiacciata verso l'asse delle ordinate.

Per valori bassi di η la differenza tra struttura e struttura è rilevante, mentre tende a diminuire andando verso destra, quasi dando l'idea di convergere ad un asintoto orizzontali. Uno scavo meno accentuato, a parità di condizioni, lo ottengo sempre

grazie ad una struttura trapezoidale lunga, mentre sicuramente meno efficaci sono questo aspetto risultano essere le strutture lineari.

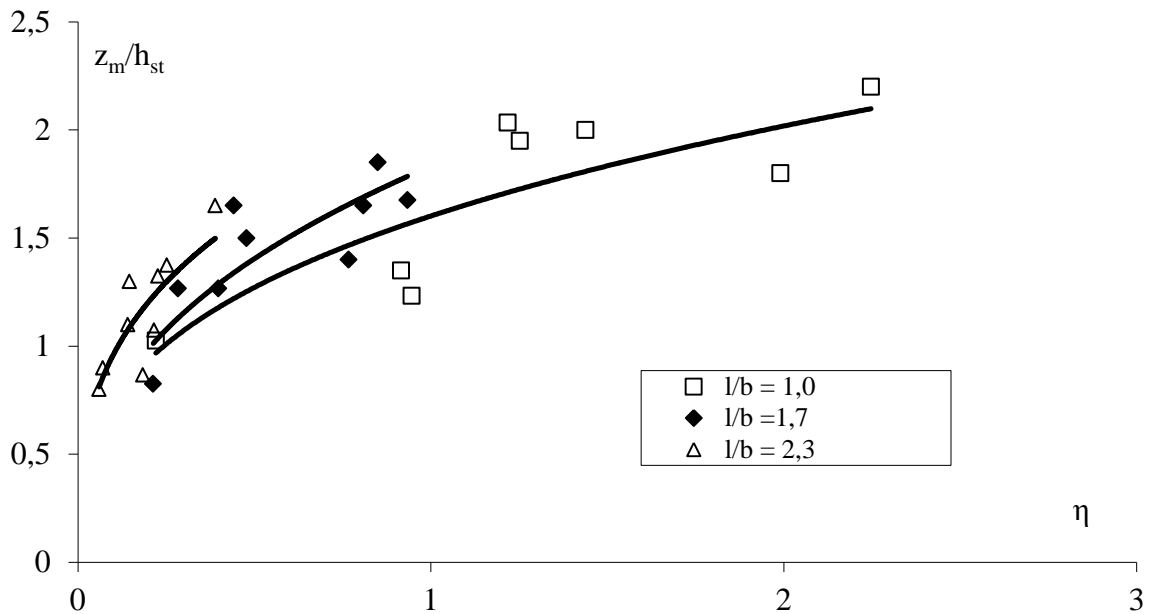


Grafico 10 - Confronto dati relativi ai diversi tipi di strutture

Si deduce, dal grafico sotto riportato, come e quanto può variare il profilo longitudinale dello scavo ed a qualche distanza dovremmo aspettarci il raggiungimento della sua profondità massima.

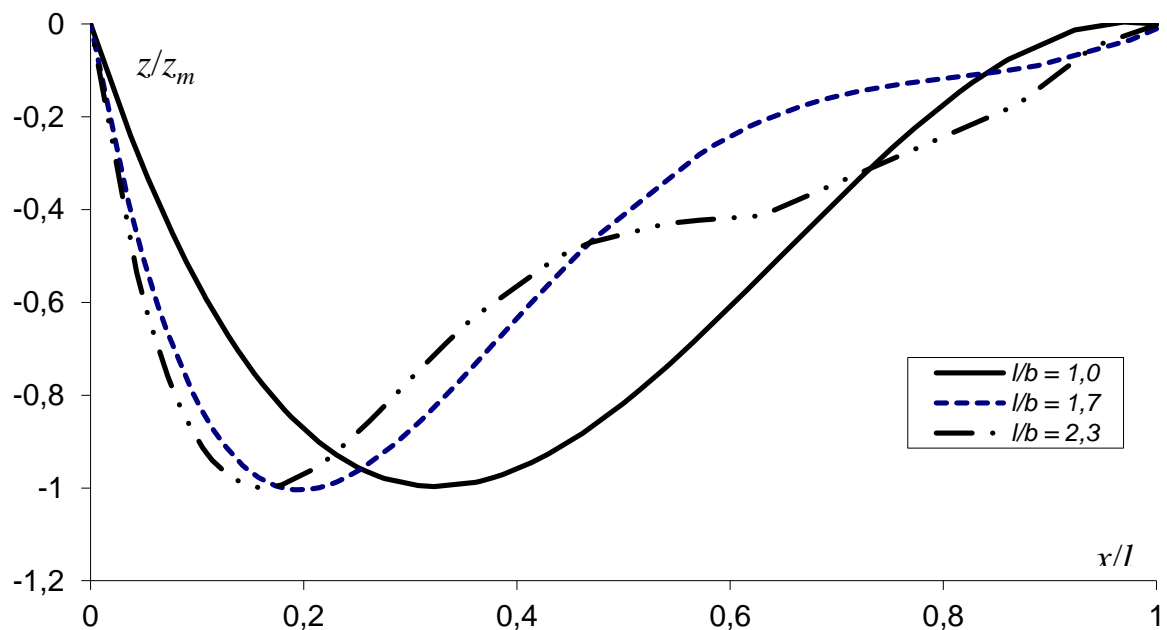


Grafico 11 - Confronto dati relativi ai diversi tipi di strutture

Più la struttura presenta elevata angolazione rispetto al suo asse trasversale, più vicino ad essa sarà il punto di massimo scavo e tanto più rapida sarà la risalita. Ad uno scavo massimo più ravvicinato corrisponde, dunque, una lunghezza longitudinale più contenuta ed una maggior sviluppo del fiume di trasporto del materiale. Per quanto concerne, invece, l'ultimo grafico, non si ritiene opportuno compararli, in quanto risultano molto simili tra loro, al variare della struttura esaminata.

2.7 Analisi degli esperimenti in base al "Tail water"

Volendo approfondire l'analisi del comportamento delle strutture e della geometria dello scavo, in condizioni di diverso livello del pelo libero dell'acqua (minimo o massimo) è da evidenziare ulteriormente che, le esperienze con livello minimo risultano generalmente più rapide e comportano uno scavo di profondità maggiore, sviluppando maggiormente anche in senso longitudinale. Ciò è dovuto al fatto che, con un livello d'acqua inferiore, a parità di portata, aumenta sensibilmente l'influenza delle azioni tangenziali. Prendendo in esame i dati relativi agli esperimenti eseguiti con portata pari a 3 lt/s ed altezza della struttura di 4 cm, posso calcolare la differenza tra lo scavo eseguito in condizioni di deflusso controllato e deflusso libero; per tutti i tipi di struttura testati, è possibile arguire che l'abbassamento del livello del pelo libero comporta uno scavo simile (in senso geometrico), ma più lungo di circa 25-30% e più profondo, sebbene la differenza di profondità di quest'ultimo sarà attenuata dal lavoro svolto dalla struttura.

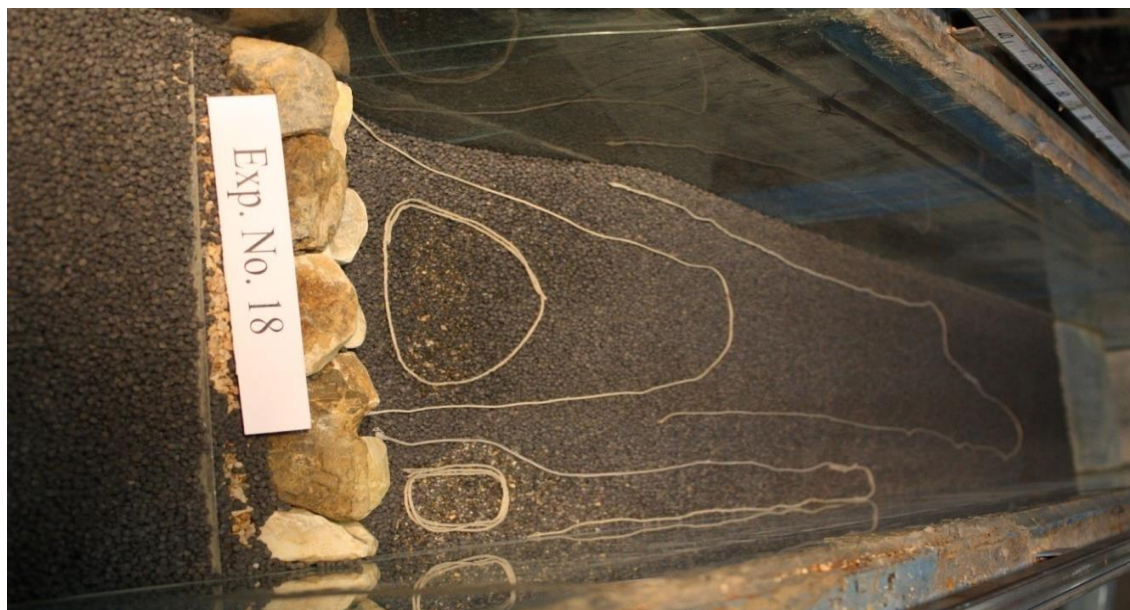


Figura 8 - Esperimento n. 18



Figura 9 - Esperimento n. 19

Come si può facilmente osservare dalle foto scattate al termine degli esperimenti, per la struttura lineare, le azioni tangenziali esercitano una forza che incide sulla profondità e la lunghezza dello scavo, quanto più basso è il livello del pelo libero del fluido. Com'è possibile leggere nella tabella sotto riportata, gli scavi effettuati in condizioni di deflusso libero, simili geometricamente, aumentano le proprie dimensioni di circa il 30% rispetto a quelli con deflusso regolato.

	Tail Water [cm]	L [cm]	L₀ [cm]	Z_{MAX} [cm]
Exp. 18	Massimo – 36,6	164	30	7,0
Exp. 19	Minimo – 35,5	214	40	8,0

Tabella 7 - Dati esperimenti a confronto (n.18 e n.19)

Esito analogo lo si può ottenere analizzando e mettendo a confronto gli esperimenti #22 e #23, caratterizzati sempre da un'altezza della struttura pari a 4 cm e con una portata di 3 lt/s; i due esperimenti in esame, tra di loro, si differenziano per la modalità del deflusso, mentre rispetto al #35 e al #36, cambia anche la forma della struttura utilizzata.

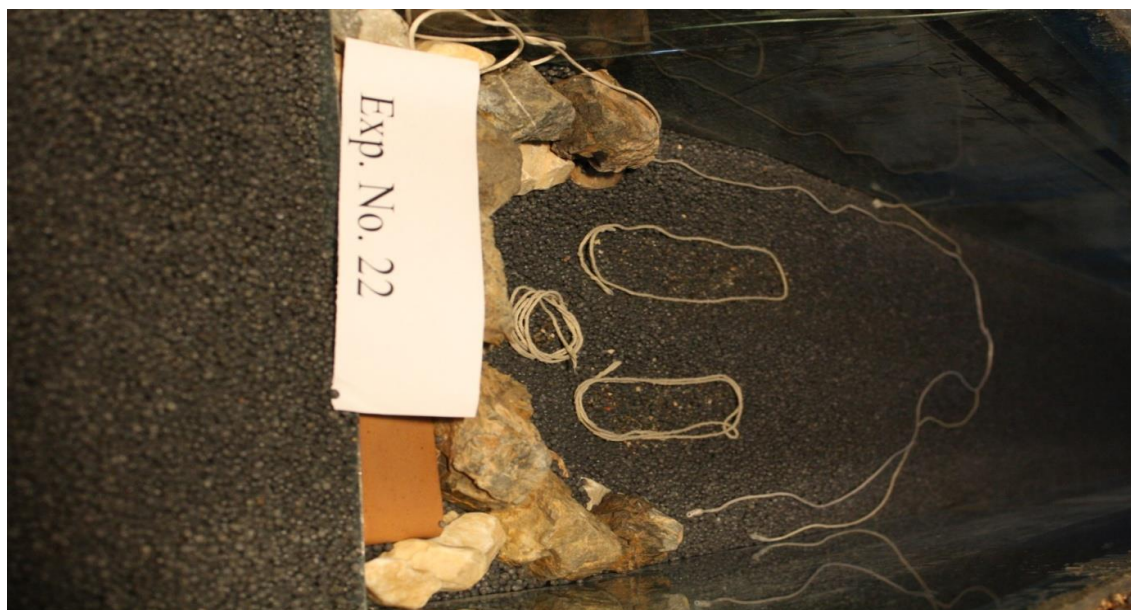


Figura 10 - Esperimento n. 22



Figura 11 - Esperimento n. 23

Come si evince dalle fotografie riportate, lo scavo dell'esperimento #22 è molto più contenuto sia in profondità, sia in senso longitudinale; inoltre, è possibile evidenziare che la geometria dello scavo risulta diversa: nel prima esperienza si sono formati due scavi paralleli, mentre nel corso della seconda, si è creato uno scavo unico di larghezza paragonabile.

	Tail Water [cm]	L [cm]	L ₀ [cm]	Z _{MAX} [cm]
Exp. 22	Massimo – 36,6	95	48	3,7
Exp. 23	Minimo – 35,4	210	80	6,7

Tabella 8 - Dati esperimenti a confronto (n.22 e n.23)

Infine, facendo un'analisi tra le diverse strutture utilizzate, andiamo a confrontare gli esperimenti con le stesse caratteristiche, eseguiti con la forma trapezoidale.



Figura 12 - Esperimento n. 36



Figura 13 - Esperimento n. 37

Come è possibile osservare dalla foto, gli esperimenti #35 e #36 sono stati eseguiti con le stesse caratteristiche, ad eccezione - volutamente - del livello del pelo libero del fluido; il risultato, come detto, risulta simile per forma, profondità e lunghezza.

Quello eseguito con la paratoia completamente aperta e in condizioni deflusso libero presenta caratteristiche maggiormente accentuate.

	Tail Water [cm]	L [cm]	L ₀ [cm]	Z _{MAX} [cm]
Exp. 36	Massimo – 36,4	111	55	4,3
Exp. 35	Minimo – 35,4	205	80	4,7

Tabella 9 - Dati esperimenti a confronto (n.22 e n.23)

Sebbene siano riportati e confrontati i risultati degli esperimenti eseguiti con stessa portata ed altezza della struttura, anche gli altri eseguiti non si discostano particolarmente dalla situazione appena descritta; in linea generale, è possibile affermare quanto sostenuto nel confronto di queste strutture. In altre parole, in condizioni di deflusso libero (e livello del pelo libero più basso possibile), lo scavo aumenta le proprie dimensioni, sia per quanto riguarda la profondità massima registrata, sia per lo sviluppo longitudinale raggiunto. Ritengo pertanto, che per condizione di maggiore sicurezza, in fase di progetto si tenga conto della condizione di deflusso libero, quale vincolo maggiormente restrittivo per il progettista chiamato ad progettare tali strutture. Tengo a ricordare che, uno studio preliminare poco attento ed accurato, è una delle classiche cause che comportano un uso non corretto della struttura, non in grado di rispondere alle esigenze per cui è stata messa in opera e che in taluni casi può anche essere dannoso per l'ambiente circostante, dovendo prevedere maggiori oneri per la manutenzione, ordinaria e straordinaria, e la modifica dell'opera.

2.8 Analisi e classificazione attraverso il parametro η

Come già scritto in precedenza, il parametro η (adimensionale), è molto importante per questa ricerca, in quanto esso mette in relazione tutte le variabili da noi studiate (portata, tipo di scarico, forma ed altezza della struttura) ed inoltre deduce l'indipendenza dalla larghezza del canale, usato per gli esperimenti in laboratorio.

È possibile classificare, in base al parametro η , la geometria del letto alla fine di ciascun esperimento, analizzando volta per volta la geometria dello scavo, in funzione anche dell'angolo col cui è stata messa in opera la struttura.

Possiamo ricordare che:

$$\eta = f \left(\frac{y_t}{y_0}, \frac{b}{y_0}, \frac{h_s}{b}, \frac{F_{0s}}{F_d^2} \right)$$

da cui, combinando e semplificando i vari fattori, otteniamo:

07 Maggio 2013

$$\eta = \frac{\Delta y F_d^2}{h_s}$$

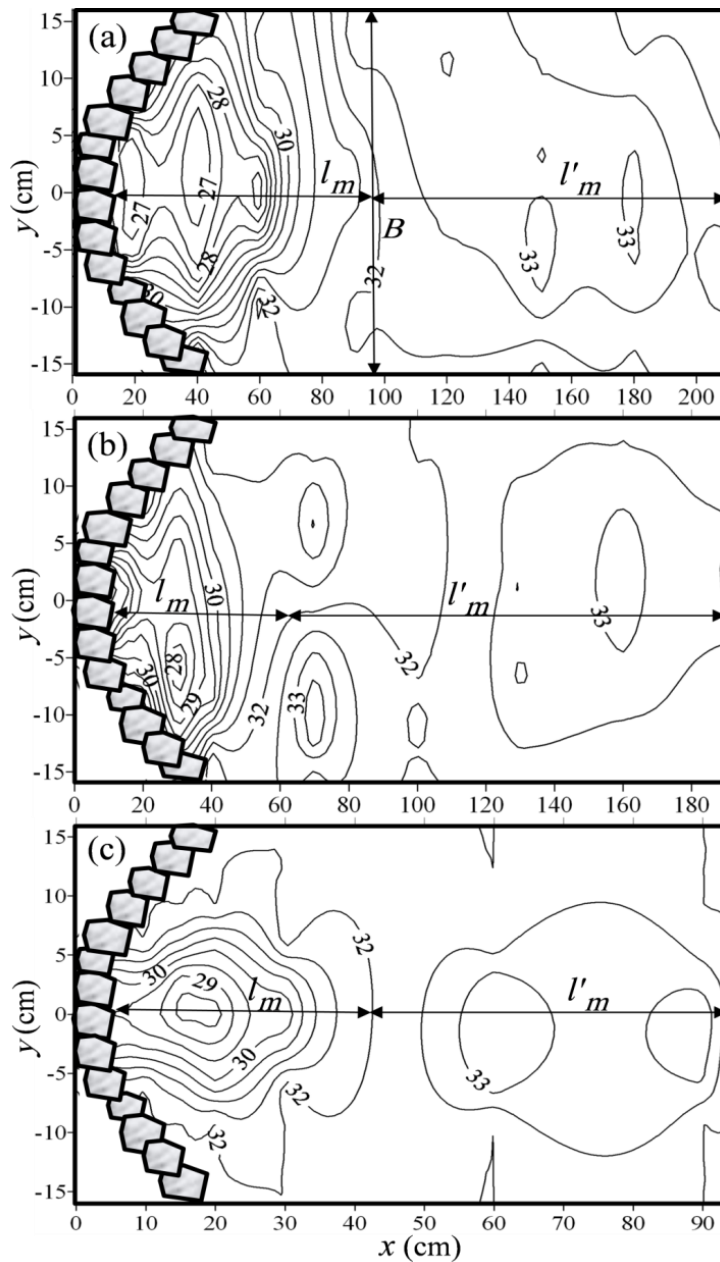


Figura 13 - Modellazione in pianta delle 3 tipologie di scavo dall'alto in basso: tipo 1, tipo 2, tipo 3

In base ai dati sperimentali forniti dagli esperimenti, possiamo distinguere tre tipologie di scavo:

- Tipo n.1: lungo scavo e lungo riporto;
- Tipo n.2: corto scavo e lungo riporto;
- Tipo n.3: corto scavo e corto riporto;

La prima tipologia di deflusso è caratterizzata dall'aver un lungo scavo ed un lungo riporto, con entrambi i rapporti l/b molto maggiori di 2,5 e l'altezza massima del riporto posizionata a ridosso della parte terminale; la seconda tipologia si caratterizza dall'aver uno scavo corto ($l/b < 2$) e un riporto lungo ($l/b > 2,5$) con l'altezza massima del riporto collocata nel tratto centrale del profilo; infine, la terza tipologia ha la particolarità di avere entrambi i rapporti minori di 2 e l'altezza massima del riporto a ridosso della struttura, come si può evincere dal grafico sottostante.

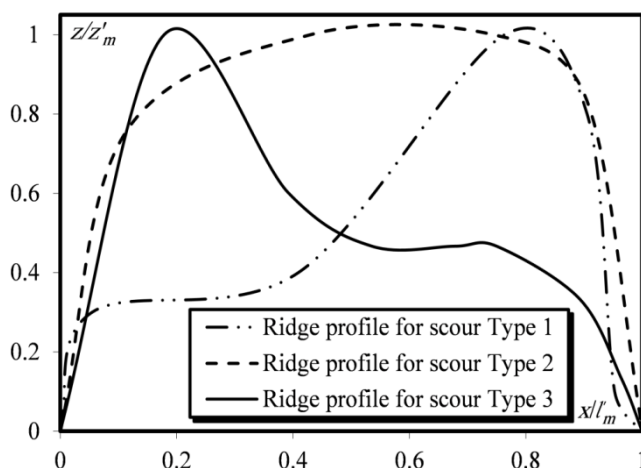


Grafico 12 – Confronto profili del riporto in base alla tipologia di scavo

La figura sotto riportata mostra, invece, come, al variare del parametro η di riferimento per ciascun tipo di struttura sottoposta ad analisi, possa variare il tipo di configurazione finale; da sinistra verso destra sono riportati in ordine i casi analizzati (struttura lineare, trapezoidale corta e lunga), mentre in ordinata e ascissa sono inseriti rispettivamente $\Delta y / h_s$ ed F_D rispettivamente. Gli spazi tratteggiati indicano le regioni d'incertezza e di passaggio da un tipo di scavo ad un altro.

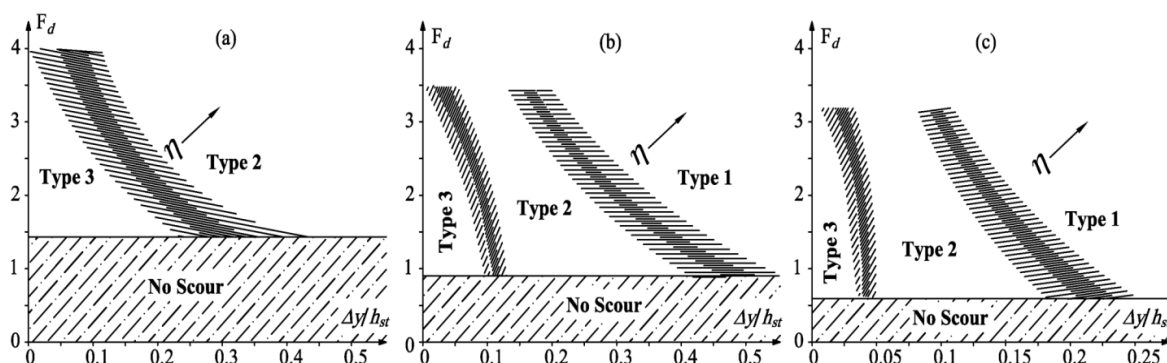


Grafico 13 - Confronto tra le tipologie di scavo per struttura: a) lineare b) trapezoidale corta c) trapezoidale lunga

Basandoci sul raffronto tra tutti gli esperimenti eseguiti e riportati qui sopra, è possibile affermare che aumentando il valore di η , il riporto aumenta sempre la

sua lunghezza e la zona di “non-scavo” si riduce decisamente aumentando il rapporto l/b .

Soffermandoci sull’analisi dei dati, il nostro fenomeno può essere descritto con delle semplice espressioni matematiche, dedotte per interpolazione dai grafici precedenti, che mettono in relazione di volta in volta, la maggior parte dei parametri da noi analizzati; è possibile un’ulteriore semplificazione, ragionando sul fatto che ogni struttura studiata avrà un proprio predefinito rapporto l/b : lineare (1), trapezoidale corta (1,7) e lunga (2,3).

$$\frac{Z_m}{h_s} = 1,3 \left(\frac{l}{b}\right)^{0,9} \eta^{0,4}$$

$$\frac{L_m}{h_s} = 8,8 \left(\frac{l}{b}\right)^{1,9} \eta^{0,6}$$

$$\frac{x_m}{L_m} = 0,4 \left(\frac{l}{b}\right)^{-2} \eta^{-0,4}$$

Dalla prima equazione sarà possibile ricavare una stima del valore massimo della profondità dello scavo; dalla seconda potremmo conoscere la lunghezza del ripor- to del materiale. Infine dall’ultima potremmo risalire alla collocazione del punto di massimo scavo che sarà sempre più prossimo alla base della struttura, incremen- tando il valore del rapporto l/b . Le presenti espressioni sono valide per valori di η compresi tra 0,05 e 15.

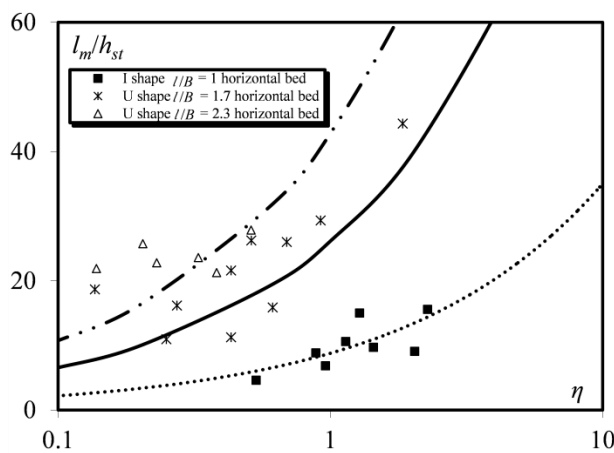
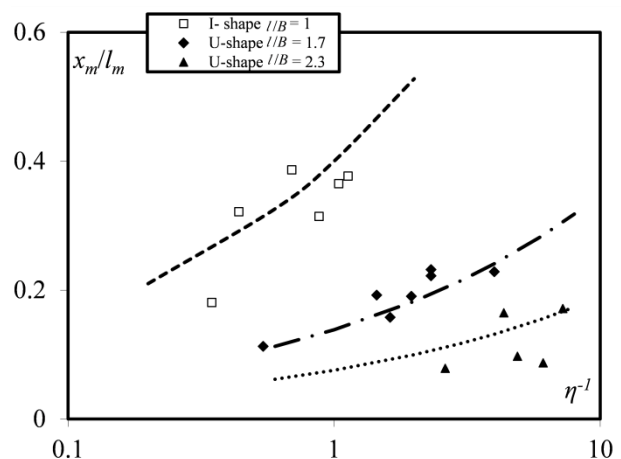


Grafico 12 - Grafici relativi a l_m/h_a e x_m/l_m espressi in funzione del parametro η



Cap. 03 – Post elaborazione dati

Conclusioni

Giungendo a conclusione del percorso di analisi e confronto tra le diverse strutture utilizzate nel corso degli esperimenti svolti, ritengo che il tipo di struttura maggiormente rispondente alle nostre esigenze (o almeno agli obiettivi di questa tesi), sia l'ultima struttura testata, ovvero quella con forma trapezoidale lunga, con angolo α di 70° rispetto alla sezione trasversale.

Tale struttura risulta la migliore da qualsiasi aspetto voglia essere analizzata:

- Si ottengono scavi di minore profondità, in relazione all'altezza della struttura; notevole è la differenza - come detto - rispetto alla struttura lineare ed anche con la struttura trapezoidale corta, sebbene in modo meno evidente, non riusciamo ad ottenere risultati paragonabili, tali da cambiare la nostra valutazione.
- Scavi di minore lunghezza, in funzione della portata; anche in quest'ambito la struttura lineare risulta la più inadatta ad essere messa in opera, mentre sotto questa luce la struttura trapezoidale corta si avvicina molto ai livelli richiesti, ma non li raggiunge mai.
- Maggiore facilità di classificare gli scavi, in base al parametro η ; come avevamo notato in precedenza, mentre le altre due forme possono essere classificate in 3 gruppi, per la struttura trapezoidale lunga, tale catalogazione può essere ridotta a 2: viene a mancare, infatti, il raggruppamento intermedio e ciò comporta indubbiamente un grosso vantaggio a favore del progettista.
- Minore influenza dovuta alla variazione del livello del pelo libero e, quindi, delle azioni tangenziali; un elemento apparentemente quasi irrilevante, ma che non è da sottovalutare per un'analisi accurata nel tempo, è l'incremento e l'abbassamento del livello del pelo libero dell'acqua, ovvero in altri termini, la variazione delle azioni tangenziali e il loro "peso" formazione dello scavo e della sua geometria.

Tutte queste motivazioni sopraesposte, mi portano ad affermare che la struttura trapezoidale lunga sia la più idonea ad essere messa in opera, nelle condizioni prese in esame, senza contare il fatto che qualsiasi struttura in pietrame, diversamente da quanto accade per una in calcestruzzo, non impedisce alla fauna fluviale di

attraversarla, riducendo al massimo, di fatto, l'impatto ambientale sul territorio e sulla fauna che vive nelle zone limitrofe ad esso, in particolare sulle specie fluviali. Inoltre, i materiali di origine naturale, in confronto al classico calcestruzzo, sono maggiormente economici e più facili da sostituire nel tempo e da smaltire.

Inoltre, il nuovo parametro adimensionale η ha mostrato che il numero di Froude densimetrico, altezza di caduta e altezza della struttura sono i principali parametri su cui si basa la stima della massima profondità attesa, della massima lunghezza del riporto e della posizione dello scavo. I risultati mostrano che:

- la posizione del punto di profondità massima longitudinale dipende dal rapporto l/b ; infatti, aumentando tale parametro il punto di massimo si sposta avvicinandosi alla struttura.
- La struttura lineare non è in grado di controllare la larghezza dello scavo, mentre quella trapezoidale riesce a controllare la larghezza del foro.
- Aumentando il valore di η lo scavo cambia configurazione passando dalla tipologia 3, alla numero 2 ed, infine, alla tipologia numero 1.

Variabili utilizzate

z [cm]	profondità dello scavo
Δy [cm]	differenza di altezza del pelo libero prima (y_0) e dopo la struttura (y_1)
L [cm]	lunghezza del contorno della struttura
L_M [cm]	lunghezza di scavo (o del riporto)
h_s [cm]	altezza della struttura
x [cm]	distanza longitudinale tra scavo dal punto di partenza
b [cm]	larghezza del canale, pari a 34,2 cm
T_w [cm]	Tail Water, ovvero livello del pelo libero della corrente d'acqua.
g [m/s ²]	accelerazione di gravità
U [m/s]	velocità
d_{50}	diametro corrispondente al 50% del passante, pari a 3,52 mm
ρ [Kg/m ³]	densità
Q [m ³ /s]	portata
Fr	numero di Froude, adimensionale, calcolato come $\frac{U}{\sqrt{gH}}$
F_D	numero di Froude densimetrico, adimensionale $\frac{Q}{l h_s \sqrt{g d_{50} (\frac{\rho_s}{\rho} - 1)}}$
η	parametro adimensionale, la cui relazione è essere calcolata come: $\eta = f \left(\frac{y_t}{y_0}, \frac{b}{y_0}, \frac{h_s}{b}, \frac{F_0}{F_d^2} \right)$ da cui otteniamo: $\frac{F_d^2 \Delta y}{h_s}$

Alcuni riferimenti bibliografici

- Barenblatt, G.I., 1987. Dimensional Analysis. Gordon and Breach Science Publishers, ISBN 3-7186-0438-8.
- Ben Meftah, M., Mossa, M., 2006. Scour holes downstream of bed sills in lowgradient channels. *J. Hydr. Res.* 44 (4), 497e509.
- Bhuiyan, F., Hey, R.D., Wormleaton, P.R., 2007. Hydraulic evaluation of wweir for river restoration. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 133 (6), 596e609.
- Bormann, N.E., Julian, P.Y., 1991. Scour downstream of grade-control structures. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 117 (5), 579e594.
- D'Agostino, V., Ferro, V., 2004. Scour on alluvial bed downstream of gradecontrol structures. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 130 (1), 24e37.
- Mason, P.J., Arumugam, K., 1985. Free jet scour below Dams and Flipbuckets. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 111 (2), 220e235.
- Pagliara, S., 2007. Influence of sediment gradation on scour downstream of block ramps. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 133 (11), 1241e1248.
- Pagliara, S., Carnaciana, I., 2011. Influence of wood debris accumulation on bridge pier scour. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 137 (2), 254e261.
- Pagliara, S., Palermo, M., 2008. Scour control downstream of block ramps. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 134 (9), 1376e1382.
- Rosgen, D.L., 2001. The cross-vane, W-Veir and J-Hook vane structures: their description, design and application for stream stabilization and river restoration. In: *Proc., Wetland Engineering and River Restoration Conf. (CD-ROM)*. ASCE, Reston, Va.
- Scurlock, S.M., Thornton, C.I., Abt, S.R., 2011. One-dimensional modeling techniques for Energy dissipation in U-weir grade-control structures. In: *World Environmental and Water Resources Congress*. ASCE, pp. 2496e2507.
- Scurlock, S.M., Cox, A.L., Thornton, C.I., Baird, D.C., 2012a. Maximum velocity effects from vane-dike installations in channel bends. In: *World Environmental and Water Resources Congress*. ASCE, pp. 2614e2626.
- Scurlock, S.M., Thornton, C.I., Abt, S.R., 2012b. Equilibrium scour downstream of three-dimensional grade-control structures. *J. Hydraul.Eng., ASCE* 138 (2), 167e176.
- Shields JR., F.D., Knight, S.S., Cooper, C.M., 1995. Incised stream physical habitat restoration with stone weirs. *Regulated Rivers: Res. Manage.* 10, 181e198.

Alcuni ringraziamenti

Mi ritengo molto fortunato per aver potuto intraprendere gli studi universitari ed essere riuscito a concluderli (anche se con un po' di ritardo). Tutto ciò grazie ai miei genitori che mi hanno sempre incoraggiato a proseguire, nonostante alcuni momenti di sconforto e di risultati a volte poco incoraggianti.

Un grosso ringraziamento, infine, anche al prof. Stefano Pagliara per avermi accettato quale suo tesista e a Sahameddin Mahmoudi Kurdistani per avermi seguito aiutandomi durante gli esperimenti, consigliandomi e correggendomi, di volta in volta nel corso di questi mesi.

Diritti e Copyright

Ogni diritto sui contenuti del presente elaborato è riservato ai sensi della normativa vigente. La riproduzione, la pubblicazione e la distribuzione, totale o anche solo in parte, di tutto il materiale originale contenuto in queste pagine (tra cui, a titolo esemplificativo e non esaustivo, i testi, le immagini, le elaborazioni grafiche, i contenuti del DVD allegato) sono espressamente vietate in assenza di autorizzazione scritta. Ogni abuso sarà perseguito secondo i termini di legge.

Sommario

Introduzione

Premessa pag. 03

Obbiettivi pag. 04

Cap. 01 - Descrizione dell'apparato sperimentale

Il modello pag. 05

Modalità di esecuzione delle prove pag. 06

Descrizione delle strutture pag. 08

Caratterizzazione dei materiali pag. 09

Cap. 02 - Elaborazione dei dati

Descrizione delle variabili pag. 13

Descrizione qualitativa del fenomeno pag. 14

Forma lineare ($l/b = 1$) pag. 15

Forma trapezoidale corta ($l/b = 1,7$) pag. 17

Forma trapezoidale lunga ($l/b = 2,3$) pag. 20

Confronto tra strutture pag. 22

Analisi degli esperimenti in base al "Tail water" pag. 24

Analisi e classificazione in base al parametro η pag. 28

Cap. 03 - Post elaborazione dati

Conclusioni pag. 33

Variabili utilizzate pag. 34

Alcuni riferimenti bibliografici pag. 35

Alcuni ringraziamenti pag. 36

Diritti e copyright pag. 36