



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

FLORE

Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

Indagine sperimentale sul trasporto e deposito di materiale con granulometria uniforme e diversa densità

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

Original Citation:

Indagine sperimentale sul trasporto e deposito di materiale con granulometria uniforme e diversa densità / E.Viparelli; L.Solari; G. Parker. - ELETTRONICO. - (2010), pp. 1-10. (XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche Palermo 14-17 settembre 2010).

Availability:

The webpage <https://hdl.handle.net/2158/433880> of the repository was last updated on

Publisher:

Walter Farina

Terms of use:

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

Publisher copyright claim:

La data sopra indicata si riferisce all'ultimo aggiornamento della scheda del Repository FloRe - The above-mentioned date refers to the last update of the record in the Institutional Repository FloRe

(Article begins on next page)

INDAGINE SPERIMENTALE SUL TRASPORTO E DEPOSITO DI MATERIALE CON GRANULOMETRIA UNIFORME E DIVERSA DENSITÀ

E. Viparelli¹, L. Solari² & G. Parker^{1,3}

- (1) Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois, Urbana-Champaign, USA, email: eviparel@illinois.edu , parkerg@ad.uiuc.edu.
- (2) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze, Italia, email: luca.solari@dicea.unifi.it
- (3) Department of Geology, University of Illinois, Urbana-Champaign, USA.

SOMMARIO

Nella presente memoria viene affrontato lo studio dei processi di assortimento granulometrico indotto da correnti fluviali nel caso di misture composte da sedimenti di ugual diametro ma diversa densità. Esempi di questo tipo di misture sono quelle che ritrovano nei depositi a seguito attività estrattive di minerali pesanti. Questo problema consente di esaminare la generalità dei modelli di trasporto solido noti e già impiegati con successo per l'interpretazione di alcuni dei processi di assortimento di misture di sedimenti eterogenei ma uguale densità. L'indagine è stata svolta mediante un'attività sperimentale di laboratorio in una canaletta alimentata con una portata liquida e solida costante, in cui si assiste alla formazione di un deposito in accrescimento e che si propaga verso valle. I primi risultati mostrano che si realizza un processo di selezione granulometrica per cui la densità del deposito diminuisce verso valle. Il deposito inoltre mostra un assortimento verticale non comune caratterizzato da una densità crescente dal fondo verso la superficie.

1 INTRODUZIONE

I processi di assortimento granulometrico dei sedimenti rivestono un ruolo fondamentale nella morfodinamica fluviale a diverse scale spaziali sia in senso longitudinale sia in senso verticale (per una recente rassegna su questo argomento si veda Parker, 2008). Il profilo longitudinale dei corsi d'acqua naturali risulta generalmente associato ad un processo di raffinamento del diametro dei sedimenti d'alveo da monte verso valle associato ad un profilo longitudinale con pendenze del fondo via via decrescenti (e.g. Hoey & Ferguson, 1994). Le forme di fondo quali le barre esibiscono un assortimento dei sedimenti generalmente costituito da sedimenti più grossolani nella parte di monte e sedimenti più fini nella parte di valle; nel caso di dune si osserva che il materiale più grossolano viene preferibilmente accumulato nei cavi. In senso verticale una manifestazione tipica dell'assortimento granulometrico consiste nel processo di corazzamento d'alveo a seguito del quale i sedimenti presenti sulla

superficie dell'alveo presentano una distribuzione mediamente più grossolana rispetto a quelli presenti negli strati dell'alveo meno esposti all'azione della corrente (Powell, 1998).

Uno schema interpretativo di riferimento per la modellazione del trasporto solido delle misture di sedimenti è costituito dallo schema di Hirano (1971) secondo il quale i sedimenti mobilitati e scambiati dalla corrente con l'alveo sono quelli presenti in uno 'strato attivo' di superficie il cui spessore è, nel caso più semplice di fondo piano, funzione del diametro dei sedimenti più grossolani. Introducendo lo schema di Hirano nell'equazione di conservazione della massa dei sedimenti opportunamente generalizzata al caso di misture di sedimenti ed adottando adeguate relazioni per la stima del trasporto solido (e.g. Egiazaroff, 1965), è possibile ottenere dei modelli, ad esempio di tipo unidimensionale, in grado di predire le variazioni della quota media del fondo e del diametro dei sedimenti in ciascuna sezione al variare del tempo (e.g. Parker & Sutherland, 1990).

Un aspetto che appare poco studiato risulta quello dell'assortimento granulometrico di misture composte da sedimenti di ugual diametro ma diversa densità. Esempi di questo tipo di misture sono quelle che ritrovano nei depositi a seguito attività estrattive di minerali pesanti. In letteratura i modelli per il calcolo del trasporto solido considerano generalmente misture composte da sedimenti di densità costante. In questi casi uno dei meccanismi responsabili dell'assortimento granulometrico risiede nel trasporto differenziale dei diversi diametri da parte della corrente, in quanto, a seguito del fenomeno di hiding, generalmente i sedimenti più fini risultano più mobili di quelli grossolani. Nel presente caso di misture di sedimenti di ugual diametro ma diversa densità il fenomeno di hiding non è presente e l'assortimento granulometrico si riconduce a fattori di tipo gravitazionale.

Nella presente memoria vengono illustrati i risultati preliminari relativi ad un'indagine sperimentale di laboratorio volta allo studio dell'assortimento granulometrico di misture composte da sedimenti di ugual diametro ma diversa densità. La configurazione sperimentale adottata è analoga a quella impiegata da Paola *et al.* (1992) per lo studio dell'assortimento granulometrico di misture lungo un deposito di sedimenti in accrescimento e che si propaga verso valle soggetto ad una portata liquida e solida in ingresso costante. I primi risultati mostrano che, durante la formazione del deposito, si assiste ad un processo di selezione granulometrica per cui la densità del deposito diminuisce verso valle. Il deposito inoltre mostra un assortimento verticale di particolare interesse ed in qualche modo opposto a quanto deducibile dagli esperimenti di Paola *et al.* (1992); risulta infatti che il deposito presenta una densità crescente dal fondo verso la superficie.

2 ATTIVITÀ SPERIMENTALE

L'attività sperimentale, attualmente in corso, si svolge presso l'Hydrosystems Laboratory dell'Università dell'Illinois ad Urbana-Champaign in un canale lungo 7.0 m e largo 12.7 cm e soggetto ad una alimentazione liquida e solida costante (Figura 1). La misura della portata liquida proveniente dalla vasca di carico del laboratorio viene effettuata con un misuratore elettromagnetico sulla tubazione di alimentazione del canale. L'alimentazione solida, invece, viene effettuata con una tramoggia per garantire un apporto solido costante nel tempo non solo in termini volumetrici ma anche come

assortimento granulometrico. Il livello idrico di valle viene controllato con uno stramazzo rettangolare ed è mantenuto costante durante le prove. Il programma sperimentale prevede la realizzazione di quattro serie di prove (Tabella 1) caratterizzate dagli stessi valori di portata liquida, Q , e livello idrico di valle, ξ_d , e da una portata solida immessa a monte, G_s , variabile tra 60 e 490 gr/min.

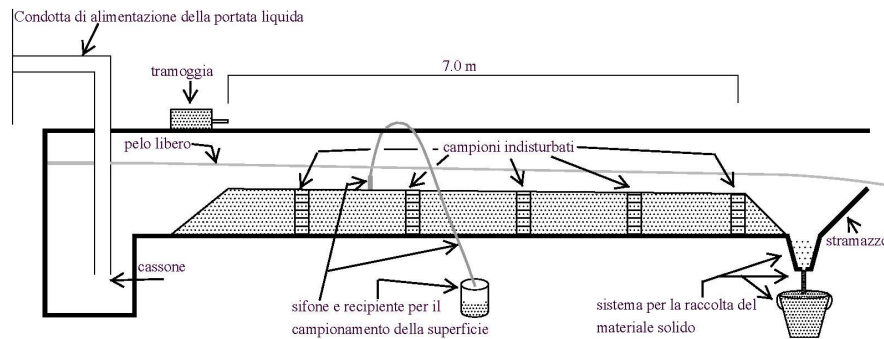


Figura 1. Il canale di laboratorio con indicazione delle tecniche di campionamento del fondo.

	Q (l/s)	ξ_d (cm)	G_s (gr/min)
Prova 1	6.0	23	60
Prova 2	6.0	23	135
Prova 3	6.0	23	270
Prova 4	6.0	23	490

Tabella 1. Descrizione delle prove sperimentali. Q è la portata liquida, ξ_d il livello idrico di valle e G_s la portata solida immessa a monte.

Il materiale solido utilizzato in tutte le prove è una miscela con densità di 3.33 t/m^3 costituita da ugual proporzioni di due componenti costituite da sabbia e granato di densità rispettivamente pari a 2.65 e 4.0 t/m^3 . Particolare attenzione è stata posta nella scelta delle caratteristiche granulometriche delle due componenti per evitare di mescolare materiali di dimensioni tra di loro significativamente differenti. Questo accorgimento è di fondamentale importanza per scongiurare la possibilità di osservare delle variazioni della densità dovute non solo al deposito selettivo di materiale con diversa densità, ma anche al deposito selettivo di materiale di diversa granulometria. Si noti che quest'ultimo meccanismo è stato già osservato ad esempio durante gli esperimenti condotti al St. Anthony Falls Laboratory di Minneapolis (Paola et al., 1992, Seal et al., 1997, Toro-Escobar et al., 2000, Solari & Parker, 2000). Le caratteristiche granulometriche del materiale solido impiegato (diametro medio geometrico, D_g , diametro mediano, D_{50} , novantesimo percentile della distribuzione, D_{90} , e lo scarto quadratico medio geometrico, σ_g) sono riportate in Tabella 2.

Ogni serie di prove è costituita da quattro diversi esperimenti: tre condizioni di non equilibrio, con una lunghezza del deposito rispettivamente di 3.0, 5.0, e 7.0 m, e dalla condizione finale di equilibrio. Alla fine di ogni esperimento le quote del pelo libero e

del fondo vengono misurate ogni 10 cm con un idrometro, successivamente si procede al campionamento della superficie del deposito con un sifone (Figura 1). Il materiale solido aspirato con il sifone viene analizzato per determinarne la densità.

	Sabbia	Granato	Miscela
D_g (mm)	0.56	0.60	0.58
D_{50} (mm)	0.59	0.63	0.61
D_{90} (mm)	0.81	0.81	0.81
σ_g	1.37	1.29	1.34

Tabella 2. Caratteristiche granulometriche della sabbia, del granato e della miscela. D_g è il diametro medio geometrico, D_{50} il diametro mediano, D_{90} il novantesimo percentile e σ_g è lo scarto quadratico medio geometrico delle distribuzioni granulometriche della sabbia, del granato e della miscela.

In tutti gli esperimenti si è osservata la formazione di forme di fondo di piccola scala (ampiezza di 0.5-1.5 cm e lunghezza d'onda di 30-60 cm) il cui movimento causa un continuo rimescolamento dello strato superficiale del deposito ed una variazione di densità verso valle e sulla verticale (e.g. *Blom et al.*, 2006). Per ottenere una misura significativa della densità di tale strato si è, quindi, deciso di procedere al campionamento dell'intera superficie del deposito prelevando dei campioni di dimensioni sufficientemente grandi da mediare l'effetto delle forme di fondo (larghezza pari a quella del canale, lunghezza pari a 25 cm e profondità pari all'ampiezza delle forme di fondo). Se da un lato tale tecnica di misura garantisce l'attendibilità dei risultati sperimentali, dall'altro causa un notevole incremento della durata di ogni serie di prove perché in un canale alimentato con tramoggia (non a ricircolo) durante gli esperimenti con materiale non uniforme solo la condizione di equilibrio è indipendente dalle condizioni iniziali (*Parker & Wilcock*, 1993); di conseguenza, la condizione iniziale per tutti gli esperimenti non di equilibrio (deposito lungo 3.0, 5.0 e 7.0 m), non può che essere quella di canale alimentato con la portata liquida nota e senza alcun deposito di materiale solido. Per l'esperimento in condizioni di equilibrio (quarto di ogni serie), invece, la condizione iniziale è costituita dal deposito lungo 7.0 m dopo il campionamento della superficie. Si noti che se si fosse utilizzata una tecnica di prelievo della superficie rappresentata da ridotti campioni prelevati in prefissate sezioni di misura, il disturbo del deposito sarebbe stato ragionevolmente contenuto e pertanto sarebbe stato possibile utilizzare i depositi di 3.0 e 5.0 m come condizioni iniziali per i successivi esperimenti.

Il deposito è tipicamente costituito da un tratto di monte, in cui le pendenze di fondo sono dell'ordine di qualche unità per mille ed il tirante idrico è dell'ordine di (5 – 10) cm e da una estremità di valle costituita da un fronte, Figura 2, che migra, con pendenze simili a quelle associate all'angolo di riposo del materiale. Nel tratto di monte la dinamica dei sedimenti risulta governata dai processi del trasporto solido di fondo e della migrazione delle forme di fondo; sul fronte, data l'elevata pendenza, il movimento dei sedimenti è puramente di tipo gravitazionale.

La definizione delle condizioni di equilibrio tanto in un corso d'acqua naturale quanto in un canale di laboratorio è estremamente delicata e, spesso, dipende dalle misure disponibili. In generale, si può ammettere che una condizione di equilibrio sia rappresentata dalla costanza nel tempo dei valori medi dei parametri idraulici quali, ad

esempio, profondità della corrente, pendenza di fondo, portata solida o composizione granulometrica dello strato superficiale e della portata solida, ma non sempre tutte queste grandezze possono essere agevolmente misurate.

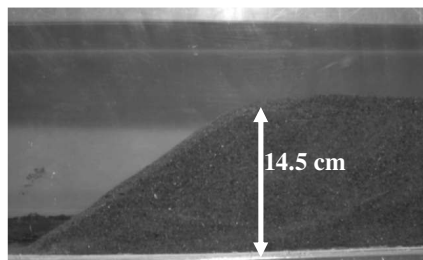


Figura 2. Il fronte del deposito al termine di un esperimento.

Nei presenti esperimenti, le condizioni di equilibrio per ogni prova si definiscono confrontando profili di fondo e misure del pelo libero registrate a distanza di diverse ore; se le differenze tra due misure successive sono ragionevolmente trascurabili, si considera raggiunto l'equilibrio e si procede al campionamento dello strato superficiale e della stratigrafia del deposito. I campioni indisturbati vengono prelevati nelle sezioni a 1.0, 2.5, 4.0, 5.5 e 7.0 m (Figura 1) con il campionatore utilizzato da *Blom et al.* (2003). Tale campionatore è costituito da una scatola metallica alta 30 cm e con base rettangolare 15 x 10 cm. Una delle pareti laterali è realizzata con una lamina mobile per poter sezionare il campione in diversi strati e misurare la variazione delle caratteristiche granulometriche del deposito lungo la verticale (o stratigrafia). I campioni così prelevati vengono sezionati in 5 o 6 strati a seconda delle dimensioni del campione stesso. Ogni strato viene asciugato nel forno del laboratorio e si procede, poi, alla misura della sua densità. Nel successivo paragrafo si presentano i risultati sperimentali relativi alla Prova 4; si precisa che le altre prove fino ad ora effettuate hanno mostrato risultati qualitativamente simili.

3 RISULTATI SPERIMENTALI

La Prova 4 è quella costituita dal valore massimo del rapporto portata solida su portata liquida (Tabella 1).

H (cm)	U (m/s)	i (m/m)	Fr	$\rho_{ss,m}$ (t/m ³)	τ_b^*
7.40	0.65	0.0077	0.76	3.35	0.35

Tabella 3. Risultati sperimentali relativi all'esperimento finale di equilibrio per la Prova 4; (H rappresenta il tirante idrico; U velocità media; i, pendenza di fondo; Fr, numero di Froude; $\rho_{ss,m}$, densità media dello strato superficiale del fondo e τ_b^* , parametro di Shields).

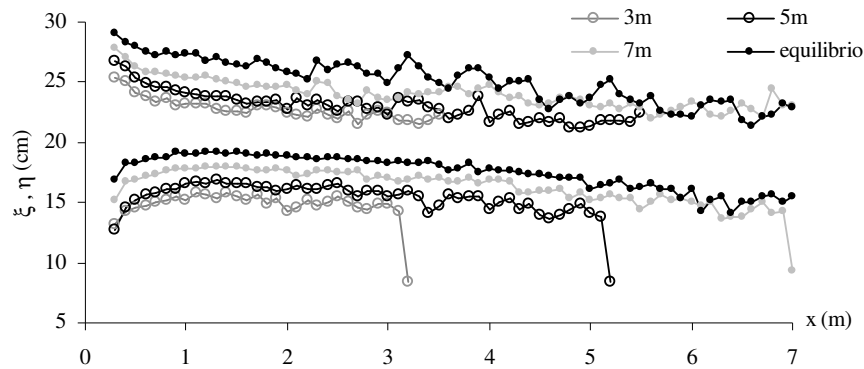


Figura 3. Profili longitudinali e livelli idrici misurati durante gli esperimenti relativi alla Prova 4. η e ξ indicano rispettivamente le quote di fondo e del pelo libero; x è una coordinata longitudinale definita in modo che $x = 0.0$ m rappresenta l'estremità di monte del canale e $x = 7.0$ m quella di valle.

In Tabella 3 sono illustrati alcuni dei principali dati sperimentali relativi all'esperimento finale di equilibrio per la Prova 4; data la contenuta larghezza del canale di laboratorio, nella stima di τ_b^* è stato rimosso l'effetto delle pareti mediante la procedura presentata da *Chien & Parker* (1994). Si noti che la densità media dello strato superficiale risulta essere praticamente uguale a quella della portata solida immessa (3.33 t/m^3). Questo risultato si giustifica considerando la contemporanea presenza di forme di fondo di piccola scala e di un relativamente elevato valore del parametro di Shields, maggiore di tre volte il valore di riferimento per un significativo trasporto (circa 0.05). Da un lato, le forme di fondo causano un continuo rimescolamento dello strato superficiale, dall'altro l'elevato valore del parametro di Shields garantisce una tendenza alla egual mobilità delle due componenti e, quindi, la mancanza di uno strato superficiale di corazzamento del fondo (*Parker & Klingeman*, 1982).

L'evoluzione del deposito e le misure del pelo libero registrate durante gli esperimenti sono riportati nelle Figure 3 e 4. In particolare, in Figura 3 si riportano i profili longitudinali del fondo e del pelo libero misurati alla fine di ogni esperimento ed in Figura 4 l'evoluzione del profilo del fondo verso la condizione di equilibrio da partire dell'esperimento a 7m. La durata degli esperimenti varia da 3.5 ore, per costruire un deposito lungo 3 m, a circa 15 ore per raggiungere la condizione di equilibrio. La durata delle altre prove aumenta al diminuire della portata solida immessa a monte.

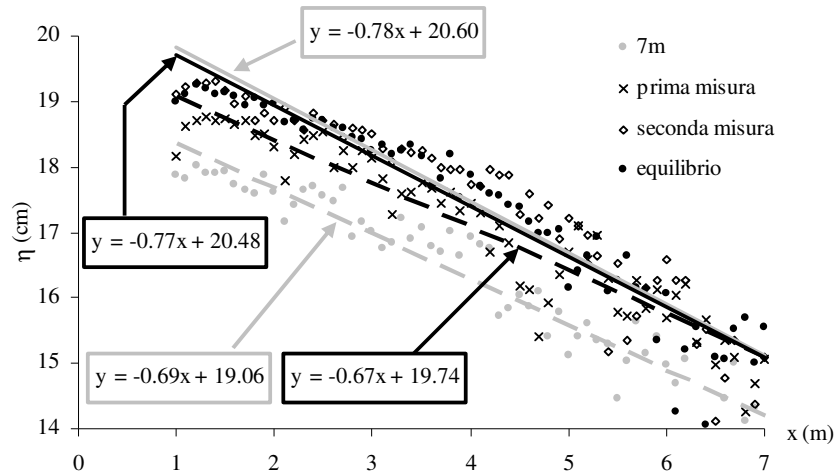


Figura 4. Evoluzione del profilo longitudinale verso la condizione di equilibrio.

Dal confronto dei profili è evidente come durante la formazione del deposito il fronte migra verso valle con pendenza ed altezza pressochè costanti, mentre le quote di fondo e del pelo libero nella zona di monte, aumentano nel tempo. E', quindi, possibile dividere il deposito in due zone formatesi con processi tra loro differenti: una zona profonda e di altezza relativamente costante (associata alla condizione al contorno di valle imposta dallo stramazzo) formatasi al passaggio del fronte, in cui l'assortimento granulometrico è governato da successive frane del materiale che si accumula sulla sommità del fronte stesso, ed una zona più superficiale dominata dall'interazione dei sedimenti con la corrente, formatasi a seguito della diminuzione della portata solida verso valle. Dal confronto tra i profili longitudinali riportati in Figura 4 ed interpolati linearmente per stimare le pendenze medie, si osserva come il deposito raggiunge la condizione di equilibrio in due fasi distinte. Ad una prima fase in cui si osserva una traslazione verticale del profilo longitudinale (profili "7.0 m" e "prima misura") segue una fase di aumento della pendenza media - da 0.0067 a 0.0077 - caratterizzata da una rotazione attorno all'estremità di valle del deposito (profili "seconda misura" ed "equilibrio").

La variazione della densità dello strato superficiale nella direzione della corrente riportata in Figura 5 mostra come in tutti gli esperimenti si osserva un "alleggerimento" della superficie del deposito verso valle, indice dell'avvenuto deposito selettivo del materiale trasportato. In particolare il tratto più a monte del deposito presenta una densità maggiore di quella della miscela immessa, mentre nella parte di valle si osserva l'opposto. Si noti che, a rigore, in condizioni in equilibrio non dovrebbe osservarsi alcuna variazione longitudinale sia dei parametri idraulici sia della densità ρ_{ss} della superficie del deposito. La variazione di ρ_{ss} osservata nella Prova 4 suggerisce che la prova, sebbene il deposito presenti una pendenza complessiva invariante nel tempo (si veda la Figura 4), presenta una condizione finale di non completo equilibrio; ciò è dovuto al fatto che tale condizione è stata definita confrontando i soli profili

longitudinali e le quote del pelo libero registrate a distanza di qualche ora, indipendentemente dalle composizioni granulometriche della portata solida e della superficie del deposito. Si noti che negli esperimenti con materiale non uniforme la condizione di equilibrio viene generalmente raggiunta prima in termini di trasporto solido totale (o invarianza nel tempo del profilo longitudinale e delle quote del pelo libero), poi di trasporto solido in ogni intervallo granulometrico (o invarianza nel tempo e nello spazio delle caratteristiche granulometriche della superficie del deposito e della portata solida) (Viparelli *et al.*, in stampa).

La stratigrafia del deposito, ottenuta con misure di densità degli strati in cui si sono suddivisi i campioni indisturbati, è riportata in Figura 6, dove la quota media di ogni strato, z , è stata adimensionalizzata con la rispettiva quota del fondo nella sezione di misura, η .

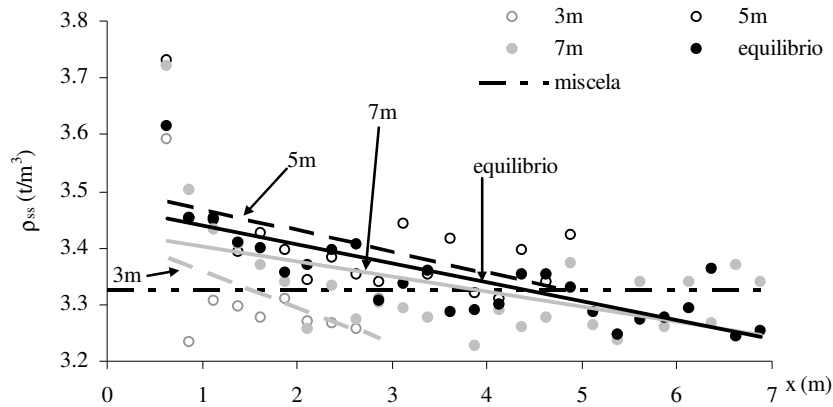


Figura 5. Variazione verso valle della densità della superficie del deposito, ρ_{ss} , durante gli esperimenti della Prova 4. La linea nera con tratto e due punti rappresenta la densità del materiale solido immesso a monte (3.33 t/m^3).

Il campione prelevato nella sezione a 7.0 m è stato diviso in soli tre strati perchè la parte più profonda è andata persa durante le misure. La stratigrafia è caratterizzata da un aumento della densità nella parte alta del deposito ($z/\eta > 0.5 - 0.7$) e da una successiva diminuzione nella parte più profonda, andamento opposto rispetto a quanto osservato nel caso di miscele di materiale con granulometria eterogenea ed uguale densità (e.g. *Kleinhans*, 2005). Questa differenza si spiega considerando che nel caso di materiale con granulometria uniforme e diversa densità le particelle più pesanti restano intrappolate nella parte alta del deposito mentre quelle più leggere e più mobili riescono a raggiungerne la parte più profonda. Analogo comportamento si osserva nel caso delle forme di fondo di piccola scala che causano un continuo rimescolamento dello strato superficiale con accumulo di materiale più leggero nei cavi. Questo fenomeno è responsabile della minor densità dello strato più superficiale del deposito rispetto a quelli immediatamente sottostanti. Il confronto tra i diversi profili riportati in Figura 6 mostra, infine, una generale diminuzione della densità verso valle; ulteriore conferma dell'avvenuto deposito selettivo del materiale con diversa densità.

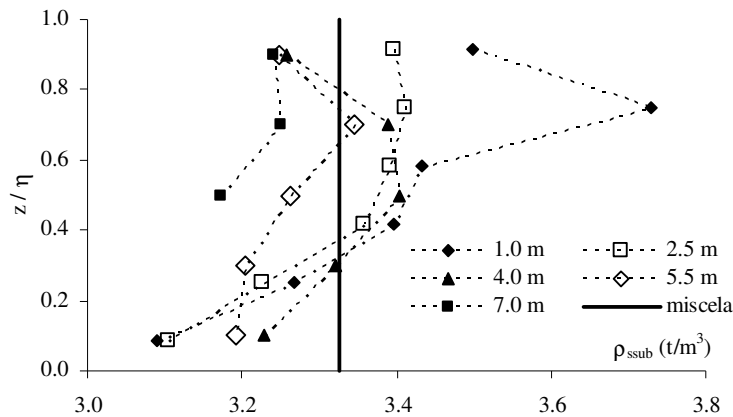


Figura 6. Variazione della densità nel deposito, ρ_{sdep} . z è una coordinata verticale definita in modo che $z = 0.0$ m rappresenta il fondo del canale e $z = \eta$ la superficie del deposito. La linea nera e continua rappresenta la densità della miscela immessa a monte (3.33 t/m^3).

4 DISCUSSIONE E SVILUPPI FUTURI

I presenti risultati sperimentali rivelano in senso longitudinale una diminuzione della densità del deposito, mentre i rilievi stratigrafici mostrano un assortimento verticale caratterizzato da un deposito avente una densità crescente dal fondo verso la superficie in prossimità dello strato attivo. Quest'ultimo risultato appare in controtendenza rispetto a quanto osservato negli esperimenti condotti su misture di sedimenti con diverse granulometrie ma uguale densità (si veda Paola *et al.*, 1992) in cui le particelle più grandi, e quindi più pesanti, si accumulano alla base del deposito.

I meccanismi responsabili dell'assortimento granulometrico osservato sono costituiti solo in parte dal trasporto solido differenziale dei sedimenti di diversa densità. In particolare durante gli esperimenti sono stati osservati altri due meccanismi: uno associato alla presenza di forme di fondo che, durante la loro migrazione, causano un continuo rimescolamento dello strato superficiale con accumulo di materiale più leggero nei cavi; l'altro meccanismo, di tipo puramente gravitazionale, riguarda il processo di selezione granulometrica che si realizza sul fronte del deposito. In particolare, nella parte sommitale del fronte si assiste alla formazione di un cuneo con inclinazioni via via crescenti a cui segue un collasso del materiale che dà luogo ad un assortimento dei sedimenti che vede le particelle più leggere accumularsi alla base del deposito.

Gli sviluppi futuri del presente lavoro riguardano la modellazione matematica dei meccanismi osservati e la messa a punto di un modello in grado di interpretare i risultati sperimentali. Una prima applicazione di un modello morfodinamico costituito dall'equazione di conservazione della massa, opportunamente generalizzata per il caso di materiale con diversa densità, con uno schema di strato attivo di Hirano, alla presenti condizioni sperimentali mostra che, sebbene la diminuzione della densità della

superficie del deposito venga correttamente riprodotta, l'entità di questa diminuzione risulta sottostimata. Questo risultato suggerisce la necessità di introdurre, mediante uno schema interpretativo attualmente in corso di sviluppo, i meccanismi qui richiamati al fine di sviluppare un modello morfodinamico avente una validità generale in grado di descrivere i processi di selezione granulometrica nei diversi tipi di misture.

Ringraziamenti. Il secondo autore ha svolto il presente lavoro durante un periodo di ricerca presso l'Hydrosystems Laboratory dell'Università dell'Illinois in parte finanziato dal CNR con il bando 'Mobilità di breve durata' con il sostegno del prof. Massimo Rinaldi e dell'ing. Giorgio Lollino del CNR-IRPI di Torino. Si ringraziano i docenti del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze ed in particolare il prof. Enio Paris per l'aiuto ricevuto. Gli autori ringraziano, inoltre, la prof. Kimberly Hill, Università del Minnesota a Minneapolis, per l'aiuto nell'interpretazione della stratigrafia del deposito.

BIBLIOGRAFIA

- Blom, A., Ribberink, J.S. & de Vriend, H.J. Vertical sorting in bed forms: flume experiments with a natural and a trimodal sediment mixture, *Water Res. Res.*, 2003, 39 (2).
- Blom A, Parker, G., Ribberink, J.S. & de Vriend, H.J., Vertical sorting and the morphodynamics of bed – form dominated rivers: an equilibrium sorting model, *J. Geophys. Res.*, 2006, 11.
- Chien, Y. & Parker, G. Incipient sediment motion on non-horizontal Slopes, *J. of Hydr. Res.*, 1994.
- Egiazaroff, I. V. Calculations of nonuniform sediment concentrations. *J. Hydraul. Div.*, ASCE, 1965, 91, 225-247.
- Hoey, T.B. & Ferguson, R. Numerical Simulation of Downstream Fining by Selective Transport in Gravel Bed Rivers: Model Development and Illustration. *Water Res. Res.* 1994, 30(7), 2251-2260.
- Hirano, M. River bed degradation with armouring. *Trans. JSCE*, 1971, 195, 55-65.
- Kleinhans, M. G. Grain-size sorting in grain flows at lee side of deltas, *Sedimentology*, 2005.
- Paola, C., Parker, G., Seal, R., Sinha, S.K., Southard, J.B. & Wilcock, P.R. Downstream Fining by Selective Deposition in a Laboratory Flume. *Science*. 1992, 258, 1757-1760.
- Parker, G. Transport of Gravel and Sediment Mixtures. In *Sedimentation Engineering. Process, Measurements, Modelling and Practice*. Asce Manuals and Reports on Engineering Practice no. 110. 2008.
- Parker, G. & Wilcock, P.R., Sediment feed and recirculating flumes: a fundamental difference, *J. Hydr. Eng*, 1993, 119 (11).
- Parker, G. & Sutherland, A.J., Fluvial armor. *J. Hydraul. Res.*, 1990, 28, 529-544.
- Parker, G. & Klingeman, P. On why gravel bed streams are paved, *Water Res. Res.*, 1982, 18 (5).
- Powell, M.D. Patterns and processes of sediment sorting in gravel-bed rivers. *Progress in Physical Geography*, 1998; 22; 1.
- Seal R., Paola, C., Parker, G., Southard, J.B. & Wilcock, P.R. Experiments on Downstream Fining of Gravel: I. Narrow Runs, *J. Hydr. Eng*, 1997, 123 (10).
- Solari, L. & Parker, G. The Curious Case of Mobility Reversal in Sediment Mixtures, *J. Hydr. Eng*, 2000, 126 (3).
- Toro-Escobar, C.M, Paola, C., Parker, G., Wilcock, P. R. & Southard J.B., Experiments on Downstream Fining of Gravel: II. Wide and Sandy Runs, *J. Hydr. Eng.*, 2000, 126 (3).
- Viparelli E., O. Sequeiros, A., Cantelli, Wilcock P.R. & Parker, G. Modeling of River Morphodynamics with creation/consumption of grain size stratigraphy. Part 2: Numerical model, *J. Hydr. Res.*, in stampa, P3674.