

# Scuola Politecnica e delle Scienze di Base



Università degli Studi di Napoli Federico II



**Corso di Laurea Magistrale**

**in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio**

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA)

Presentazione Tesi di Laurea:

## **PHYSICAL AND NUMERICAL MODELLING ON MIXED - SEDIMENT PROCESSES IN RIVERS**

- *Morfodinamica fluviale* -

**Relatore:** Prof. Ing. Massimo Greco

**Candidato:**

**Supervisor:**

Velia Ferrara M67/143

Dr. Ir. Astrid Blom ,

Ph.D. Clara Orrù ,

Ing. Guglielmo Stecca



Delft University of Technology

Faculty of Civil Engineering and  
Geosciences  
Section of Environmental Fluid Mechanics



## ABSTRACT

Il gruppo di ricerca della sezione di River Engineering presso la Facoltà di Ingegneria Civile e Geoscienza della Delft University of Technology (The Netherlands), lavora principalmente su modelli morfodinamici volti alla descrizione della naturale evoluzione dei fiumi. Il progetto a cui ho preso parte durante i 10 mesi di tirocinio, ha visto la collaborazione di due dottorandi ed un post-dottorando supervisionati da Dr. Ir. A. Blom.

L'obiettivo di questa tesi è la descrizione dei processi fisici osservati durante un esperimento condotto presso il Water Lab del dipartimento di Environmental Fluid Mechanics, al fine di acquisire maggiori conoscenze sui processi di trasporto che coinvolgono più frazioni di sedimenti. Nella canaletta utilizzata è stato posato un letto costituito da sabbia e ghiaia a pendenza uniforme. La porzione superiore del letto è stata divisa in compartimenti di cui il primo è costituito da sola ghiaia, i successivi invece sono stati riempiti con una miscela di ghiaia e sabbia con percentuale di sabbia crescente verso valle. Nella parte finale della canaletta, il letto è costituito da sola sabbia. La portata alimentata da monte e l'altezza dell'acqua a valle sono costanti e non c'è approvvigionamento di nuovi sedimenti oltre quelli che costituiscono il letto stesso. L'esperimento è stato condotto in condizioni subcritiche ed il trasporto di fondo coinvolge esclusivamente la frazione più fine (trasporto parziale). La sabbia presente nei compartimenti viene trasportata verso valle per azione dell'acqua e la porzione di letto bimodale vede un graduale irruvidimento della superficie esposta al flusso idrico formando uno strato immobile di ghiaia, detto di corazzamento, che riduce la capacità di trasporto della frazione fine, nascosta all'azione dell'acqua. La formazione di quello che viene chiamato *static armour layer*, porta ad una brusca transizione nella distribuzione granulometrica dei sedimenti sulla superficie del letto a valle dell'ultimo compartimento del tratto bimodale. La degradazione osservata in questo tratto è fortemente influenzata dal contenuto di sabbia iniziale presente nei compartimenti. Durante l'esperimento, l'onda di degradazione aumenta lentamente nel tempo viaggiando verso valle.

Il tratto unimodale, costituito da sola sabbia invece, è governato da fenomeni di trasporto totale. Il letto è in grado di aggiustare la propria pendenza al fine di raggiungere condizioni di equilibrio. In tal senso, riducendo la pendenza, anche la capacità di trasporto decresce con una riduzione della velocità del flusso. Il carico di sedimenti misurato a valle della canaletta decresce gradualmente nel tempo ed il letto di sabbia riesce a raggiungere l'equilibrio morfodinamico, condizione sotto la quale il trasporto di sedimenti risulta nullo. In generale l'equilibrio morfodinamico è caratterizzato da condizioni di moto uniforme.

Nonostante ciò è stato osservato che, nel primo tratto, ove si instaurano condizioni di trasporto parziale, il letto non riesce a modificare del tutto la propria pendenza rispetto alla portata d'acqua fissata a monte e l'altezza dell'acqua imposta a valle. Questo ci porta a dire che, in condizioni di trasporto parziale di sedimenti, il raggiungimento dell'equilibrio morfodinamico è presumibilmente governato dalla presenza di una curva di rigurgito di tipo M1.

I dati sperimentali sono stati utilizzati per validare un modello numerico monodimensionale. Tale modello è basato sulle equazioni di bilancio del St.Venant-Hirano e, sebbene globalmente simili discretamente l'evoluzione idromorfologica misurata durante l'esperimento, non è in grado di catturare le variazioni di porosità nel tempo (Figura 1).

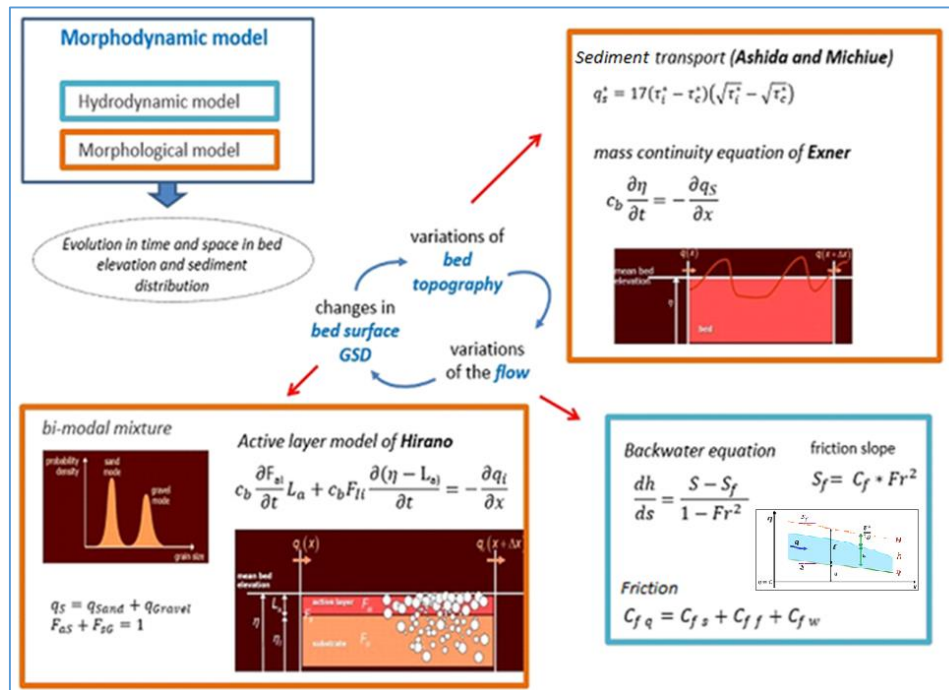


Figura 1 : Schema riassuntivo delle equazioni utilizzate

## INTRODUZIONE

I fiumi naturali presenti sul pianeta sono sistemi dinamici in continua evoluzione in risposta sia ad azioni antropiche che naturali. Le variazioni idromorfologiche, spaziali e temporali, volte al raggiungimento di un nuovo stato di equilibrio del sistema, possono essere descritte tramite modelli volti alla conoscenza dei meccanismi e dei processi che si sviluppano in un alveo fluviale e sono essenziali al fine di garantire la salvaguardia dell'ambiente e dei beni economici che interessano il bacino.

Le difficoltà nello studio di tale evoluzione temporale e spaziale consistono nel fatto che il raggiungimento delle condizioni di equilibrio si verifica in tempi di azione molto lunghi e sia a piccola che a larga scala. Per questo motivo risulta essenziale lo studio sperimentale di tali fenomeni in laboratorio allo scopo di incrementare e dare un contributo allo studio idromorfodinamico e quindi alla predizione dell'evoluzione dei sistemi fluviali tramite modelli numerici sviluppati ad-hoc.

L'obiettivo della ricerca è lo studio, in mancanza di nuovi sedimenti alimentati da monte, delle variazioni di portata solida, in condizioni di trasporto parziale e corrente lenta osservati durante l'esperimento. Le misure sono state effettuate con elevata frequenza, utilizzando un carrello mobile che lungo tutta la lunghezza della canaletta ha misurato il profilo idrico e topografico. Un secondo carrello invece, è stato equipaggiato con nuovi strumenti per l'analisi d'immagine al fine di misurare la curva granulometrica che si sviluppa sulla superficie del letto installato nella canaletta. I dati sperimentali, sono stati sviluppati utilizzando un modello numerico per sedimenti misti, tramite il quale è stato possibile lo studio delle variazioni idromorfodinamiche osservate.

## ESPERIMENTO

### Set-up dell'esperimento

La canaletta utilizzata è di lunghezza pari a 14 m, larghezza pari a 0.40 m ed altezza 0.45 m. La durata complessiva dell'esperimento è di 25 ore durante le quali sono state mantenute condizioni subcritiche del flusso idrico. Il letto è costituito da una frazione di sabbia, con diametro medio pari a  $D_{50}=1$  mm, ed una frazione di ghiaia con  $D_{50}=14$  mm, (Figura 2).

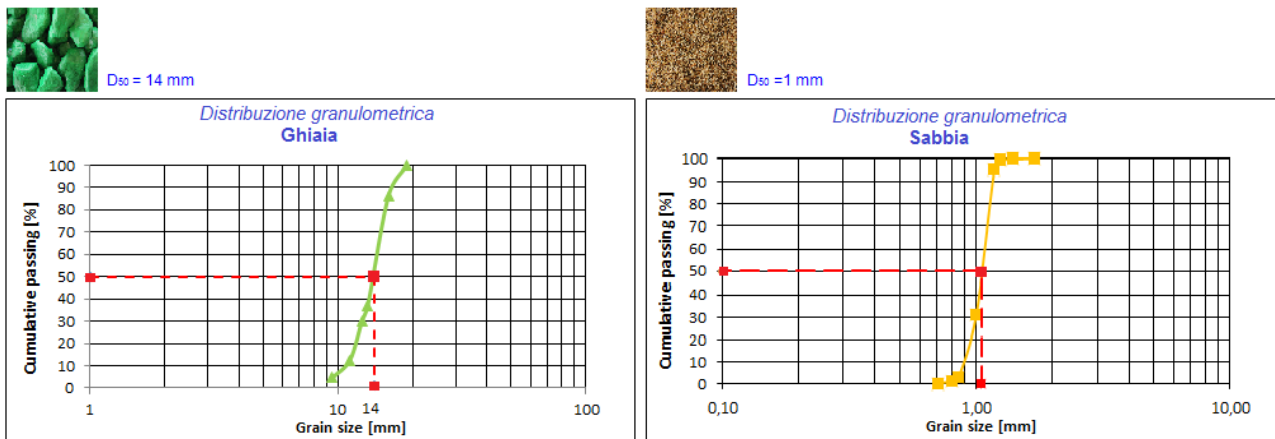


Figura 2 : Distribuzione granulometrica della frazione di ghiaia (sinistra), e della frazione di sabbia (destra).

La frazione più grossolana è stata colorata in verde al fine di misurare la distribuzione areale dei sedimenti sulla superficie del letto tramite la tecnica d'immagine elaborata da Orrù et al. (2014), (Figura 3). I dati sperimentali così ottenuti, sono stati convertiti in volumetrici utilizzando il modello sviluppato da Parker(1991a,b).

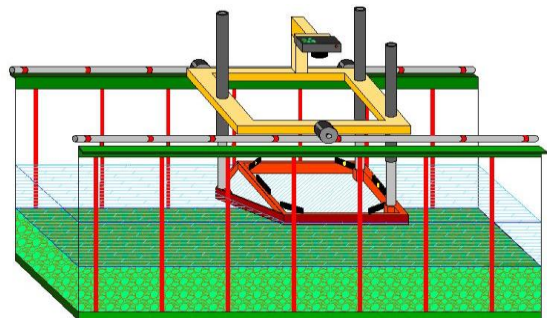


Figura 3 : Carrello utilizzato per l'analisi d'immagine

Il letto iniziale, installato nella canaletta con pendenza uniforme pari a 0.0055, per i primi 4 m è costituito dalla mistura bimodale, la restante parte vede invece sola sabbia.

Il primo tratto è diviso in 10 compartimenti, ognuno di lunghezza pari a 0.40 m ed altezza 0.20 m. Da monte verso valle ogni compartimento è stato riempito con una percentuale sempre crescente di sabbia, il primo vede quindi sola ghiaia, nei successivi la percentuale di sedimenti fini, nella mistura, cresce del 10% fino alla sezione in cui il letto è costituito da sola sabbia ( $x = 4$  m). Durante la preparazione dell'esperimento tali compartimenti sono stati realizzati utilizzando lastre in metallo di spessore pari a 2 mm ed altezza pari a 0.39 m, poi rimosse ad operazione conclusa, (Figura 4).

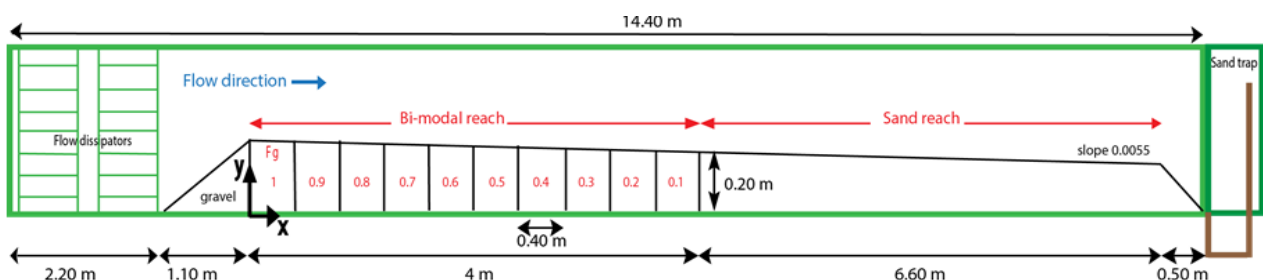


Figura 4 : Condizioni iniziali della canaletta

La portata d'acqua impostata a monte è pari a  $0.0368 \text{ m}^3/\text{s}$  ed è mantenuta costante per tutta la durata dell'esperimento. L'altezza dell'acqua a valle è stata fatta variare durante le prime 3 h, e mantenuta costante per le successive 22 h. Tale altezza è stata misurata in continuo tramite un laser fissato a valle della canaletta ( $x = 10.4 \text{ m}$ ). Il profilo idrico e quello morfologico sono stati misurati, da monte verso valle ogni 30 minuti, tramite un carrello mobile munito di due laser. Il carico di sedimenti che raggiunge la sezione finale è stato misurato raccogliendo campioni di sabbia in uscita dalla canaletta ogni ora circa, una volta asciutti, sono stati pesati e convertiti in portata volumetrica.

### Risultati dell'esperimento:

Sotto l'azione del flusso d'acqua nel tratto bimodale si sviluppano condizioni di trasporto parziale di sedimenti, viceversa quello unimodale è governato da condizioni di trasporto totale. Questo fa sì che i due tratti raggiungano condizioni di equilibrio morfodinamico differenti.

L'evoluzione morfologica osservata nel tratto bimodale è influenzata dal contenuto iniziale di sabbia disponibile al trasporto. Verso valle la degradazione tende ad aumentare poiché la percentuale di sedimenti fini del letto risulta crescente. Tale processo è osservato maggiormente durante le prime ore di esperimento. Questo porta, nel tempo, al fenomeno di corazzamento dell'alveo ossia, la ghiaia immobile, si organizza in uno strato che intrappola la sabbia nel letto e tende a ridurre gradualmente la disponibilità di sedimenti fini al trasporto verso valle. Tale strato di ghiaia è detto *static armour layer*.

In carenza di nuovi sedimenti da monte, nel tratto bimodale, lo strato di corazzamento non modifica in maniera significativa la pendenza del letto sotto l'azione dell'acqua, quindi, l'equilibrio morfodinamico è governato dalla presenza di un profilo di rigurgito di corrente lenta che si sviluppa da valle verso monte. A tale scopo è importante sottolineare che, in condizioni di trasporto parziale, lo stato stazionario morfodinamico può essere governato da una backwater curve.

Il tratto unimodale invece, si modifica in conseguenza al trasporto totale di sedimenti, riducendo la propria pendenza nel tempo e raggiungendo le condizioni di equilibrio. Durante le prime ore di esperimento, la porzione iniziale del tratto è interessata da fenomeni di degradazione, mentre verso valle si sviluppano fenomeni di deposizione. Successivamente, l'onda di degradazione si propaga verso valle, dando così luogo alla formazione di forme di fondo. Nel tempo il carico di sedimenti provenienti da monte tende a diminuire quindi l'altezza delle dune si riduce. Si specifica che, durante l'ultima ora di misurazioni, lievi modifiche morfologiche erano ancora in corso.

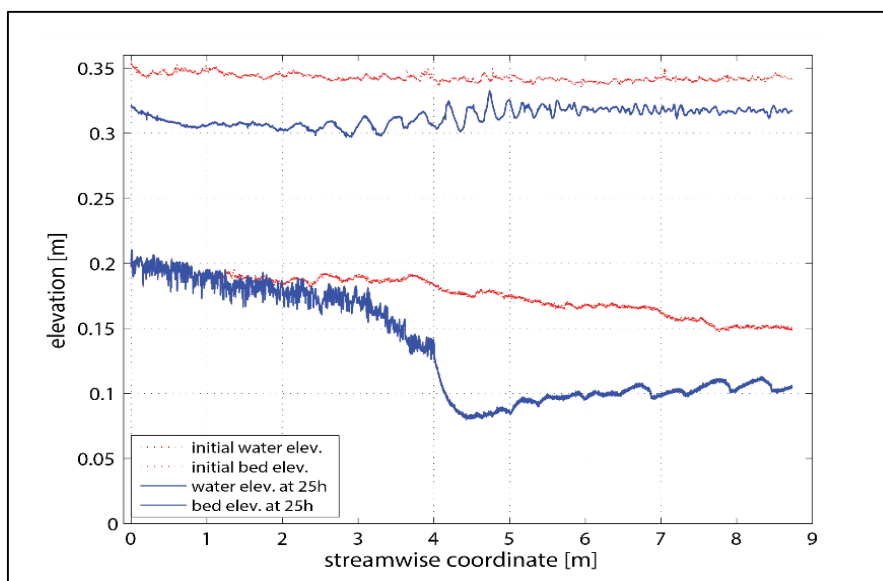


Figura 5 : Profilo idrico e morfologico iniziale (rosso) e finale (blu) misurati durante l'esperimento.

I due diversi regimi di trasporto portano a differenti tassi di degradazione nei due tratti. Si crea, così, un salto nell'elevazione del letto nella zona di transizione, come mostra il profilo finale in Figura 5. La brusca diminuzione dell'altezza topografica, induce un'improvvisa espansione del flusso d'acqua (effetto Bernoulli).

## MODELLO NUMERICO

### Set-up del Modello Numerico

Il modello numerico monodimensionale per sedimenti misti, sviluppato in Matlab®, viene utilizzato per simulare i processi fisici osservati durante l'esperimento tramite uno schema alle differenze finite, con strategia di soluzione asincrona. Il modello disaccoppiato analizza lo sviluppo idromorfodinamico in due moduli, uno riferito al flusso idrico e l'altro all'evoluzione morfologica, risolti a cascata. Il primo si basa sulle equazioni del de St.Venant con approssimazione stazionaria. Il profilo idrico si adatta immediatamente ai cambiamenti del fondo, l'autovalore che porta l'informazione morfologica viaggia più lentamente di quella idrica. L'evoluzione idrodinamica, quindi, viene discretizzata in una sequenza di stadi stazionari influenzati dal fondo che cambia nel tempo (Figura 6).

Il modulo morfodinamico descrive le variazioni di elevazione del letto e la sua composizione. Il bilancio di massa sui sedimenti sviluppato da Exner, viene utilizzato nella formulazione proposta da Hirano (1972), che considera lo strato attivo, ovvero la porzione di letto in contatto con il flusso idrico che interagisce con lo stesso.

Il sistema di equazioni così definito viene chiuso tramite una serie di relazioni empiriche. Il trasporto di fondo calcolato tramite il modello proposto da Ashida e Michiue (1972), incorpora la formulazione proposta da Viparelli et al. (2010a) che permette di calibrare il tasso di nascondimento tramite una legge esponenziale nella valutazione della portata solida. Riassumendo, i parametri di calibrazione del modello numerico sono: (a) un prefactor nella formulazione di Ashida e Michiue (1972), (b) la porosità del letto installato nella canaletta, (c) il coefficiente di nascondimento nella formulazione proposta da Viparelli et al. (2010a), (d) la costante nella relazione di Manning-Strickler per il calcolo della scabrezza di grano, (e) lo spessore dello strato attivo nel modello di Hirano.

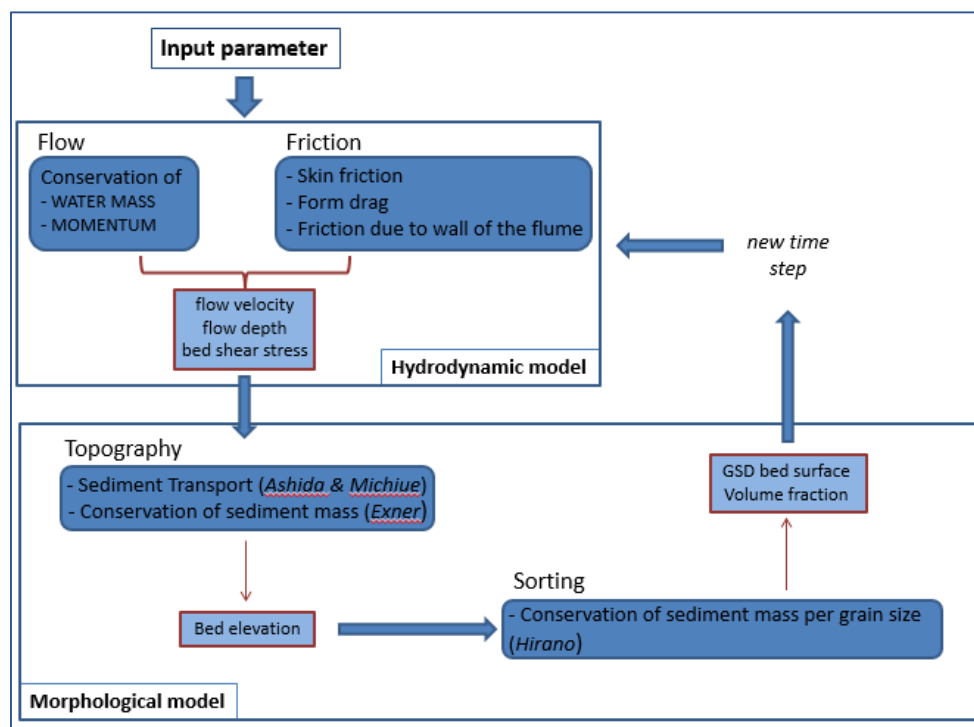


Figura 6 : Schema riassuntivo del modello morfodinamico.

I risultati ottenuti utilizzando tali parametri sono stati successivamente confrontati con i dati misurati in laboratorio. Le condizioni iniziali ed al contorno, necessarie a definire il sistema di equazioni di bilancio, sono impostate come da esperimento.

Si specifica che, in riferimento al modulo idrodinamico, la resistenza idraulica è stata calibrata applicando il modulo per il flusso in combinazione con i profili di elevazione del letto, misurati sperimentalmente, confrontando i profili idrici. Il coefficiente di attrito idraulico rappresenta la sovrapposizione lineare dell'attrito dovuto ai grani, la resistenza dovuta alle forme di fondo e quello delle pareti laterali della canaletta.

### Risultati del modello numerico

I risultati del modello numerico mostrano una buona corrispondenza tra i profili idrici simulati e quelli osservati sperimentalmente. Il profilo topografico invece, non risponde al meglio all'evoluzione morfologica misurata in laboratorio. In Figura 7 è presentato il profilo finale ottenuto tramite il modello e quello misurato dopo 25 ore di esperimento. Nel confronto, si nota un disaccordo tra il profilo topografico misurato e calcolato. Il modello sovrastima la degradazione nel tratto finale del letto bimodale, tra le ascisse 2 e 4 metri. Tale errore, apprezzabile seppur contenuto, è probabilmente dovuto al fatto che il modello numerico non riesce a catturare l'aumento di porosità, nel tempo, osservato sperimentalmente. Tale errore fa sì che anche nel confronto dei profili idrici, è presente una leggera sovrastima rispetto a quello effettivamente misurato, ma in generale si osserva una efficace capacità predittiva del modello.

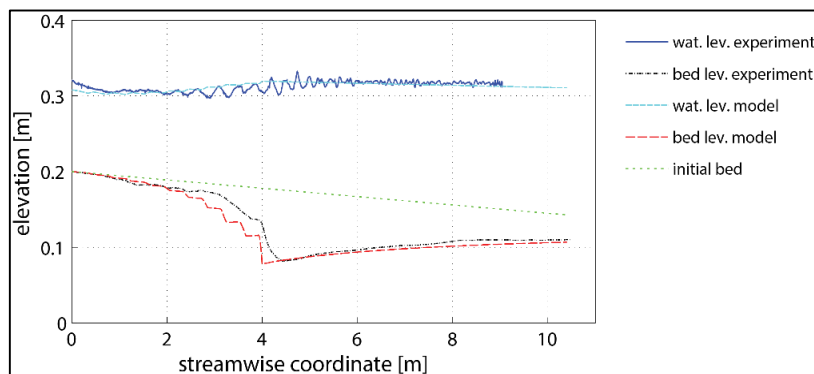


Figura 7 : Confronto tra il profilo finale misurato e il calcolato

Considerando ora la capacità di trasporto di sedimenti nel tempo si nota che, come mostrato in Figura 8, la curva ottenuta dal modello segue abbastanza bene la temporale riduzione di portata solida misurata a valle della canaletta.

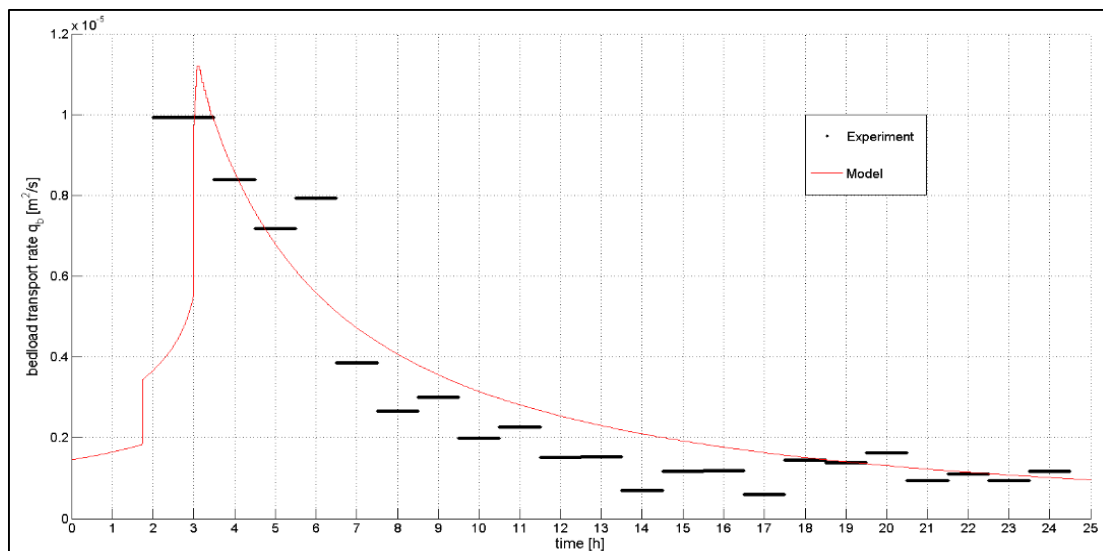


Figura 8 : Confronto tra la portata solida misurata a valle della canaletta e simulata dal modello numerico

Il graduale corazzamento dell'alveo è rappresentato in Figura 9 in termini di frazione volumetrica di ghiaia contenuta nella porzione superiore del letto. Dal confronto si nota che il modello, nelle prime ore di simulazione, sottostima leggermente la percentuale di sedimenti più grossolani presenti sulla superficie. Nonostante ciò, come mostrato in Figura 8, nelle ore finali i risultati ottenuti dal modello, sono paragonabili a quelli misurati, riuscendo così a descrivere il graduale corazzamento dell'alveo osservato sperimentalmente.

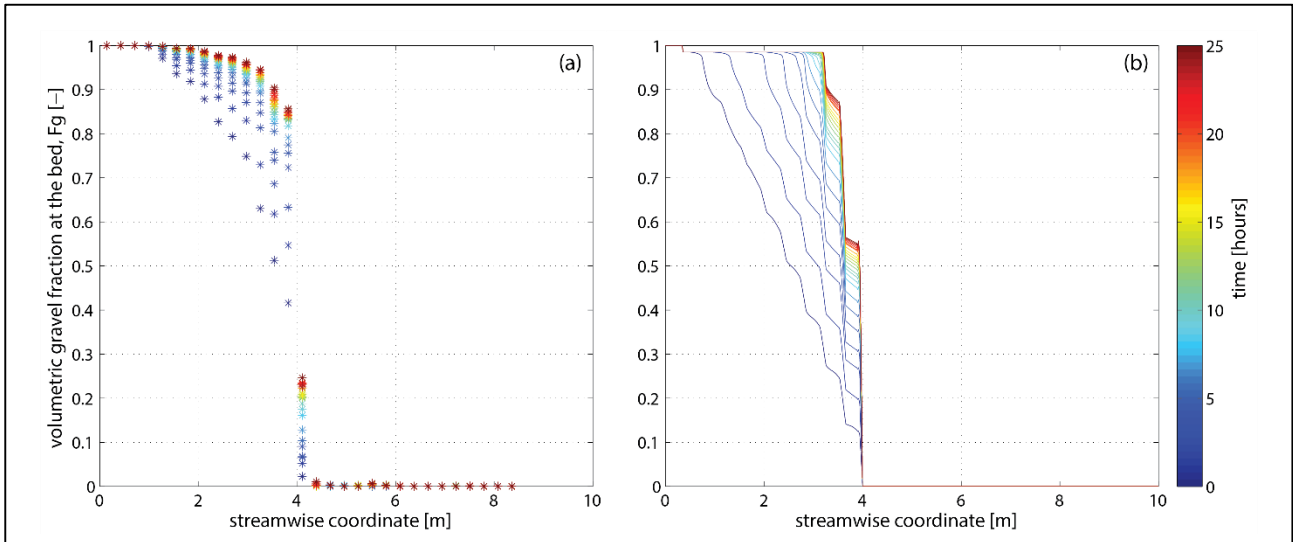


Figura 9 : Evoluzione temporale della frazione granulometrica di ghiaia misurata in laboratorio (a), e calcolata dal modello numerico sulla superficie del letto (b).

## CONCLUSIONI

L' esperimento è stato condotto allo scopo di ottenere nuovi dati sperimentali, approfondendo lo studio dei processi di trasporto solido che si verificano in letti costituiti da più frazioni granulometriche ed in condizioni di flusso subcritico. I dati misurati in laboratorio sono stati utilizzati per validare un modello numerico unidimensionale idromorfodinamico per sedimenti misti. Il trasporto parziale di sabbia che si verifica nel tratto bimodale di monte e quello totale che si sviluppa nel tratto unimodale di valle, portano a due stati di equilibrio diversi in risposta alla mancanza di nuovi sedimenti alimentati da monte. L'equilibrio morfodinamico generalmente è governato da condizioni di moto uniforme, tuttavia, il tratto bimodale vede condizioni di equilibrio in presenza di un profilo di rigurgito in condizioni subcritiche. Questo è dovuto al fatto che, in condizioni di trasporto parziale, il letto non riesce a modificarsi del tutto sotto l'azione dell'acqua, al fine di rendere nullo il trasporto. La degradazione osservata è influenzata dalla percentuale di sabbia contenuta nel letto iniziale, crescente verso valle. Il primo compartimento, composto di sola ghiaia non si modifica sotto le condizioni idriche e morfologiche impostate a monte e valle. Il tratto compreso tra 2 e 4 metri, costituito da una percentuale maggiore di sedimenti fini aumenta, nel tempo, la propria pendenza per incementare la capacità di trasporto. Tali meccanismi portano al corazzamento dell'alveo, ossia si viene a formare uno strato di ghiaia immobile che riduce la capacità di trasporto della sabbia in parte intrappolata nel letto. Il tratto unimodale, costituito da sola sabbia, essendo governato da condizioni di trasporto totale, riesce a modificarsi completamente sotto l'azione dell'acqua. La pendenza si riduce nel tempo e l'equilibrio morfodinamico viene raggiunto in condizioni di moto uniforme e letto piatto.

I diversi meccanismi di degradazione, nei due tratti, portano alla formazione di un dislivello nell'elevazione del letto nella zona di transizione tra il tratto bimodale di monte e quello unimodale di valle, provocando un'espansione del flusso, dovuto all'effetto Bernoulli, che risulta in un aumento dell'altezza idrica.

Il confronto tra i dati sperimentali e quelli calcolati è complessivamente buono. Il modello numerico descrive discretamente il corazzamento dell'alveo e l'evoluzione idromorfodinamica osservata in laboratorio. Tuttavia il profilo morfologico misurato in laboratorio mostra una degradazione meno accentuata nel tratto bimodale. L'errore nella simulazione è probabilmente dovuto al fatto che il modello non è in grado di catturare l'aumento di porosità che si verifica nel tempo.





## BIBLIOGRAFIA

- Ashida, K. and Michiue, M. (1972). Study on hydraulic resistance and bedload transport rate in alluvial streams. *Trans. Jpn. Soc. Civ. Eng.*, (206), 56-69.
- Hirano, M. (1971). River bed degradation with armouring. *Trans. Jpn. Soc. Civ. Eng.*, 3(195),55-65.
- Orrú, C., Chavarrías, V., Uijttewaal, W. S. J., and Blom, A. (2014). Image analysis for measuring the size stratification in sand-gravel laboratory experiments. *Earth Surface Dynamics*, 2(1), 217-232.
- Parker, G. (1991a). Selective sorting and abrasion of river gravel I: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(2), 131-147.
- Parker, G. (1991b). Selective sorting and abrasion of river gravel II: Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(2), 150-171.
- Viparelli, E., Haydel, R., Salvaro, M., Wilcock, P. R., and Parker, G. (2010). River morphodynamics with creation/consumption of grain size stratigraphy 1: laboratory experiments. *Journal of Hydraulic Research*, 48(6), 715-726.