

# Capitolo 4

## Esperimenti e analisi dei risultati

### Premessa

L'attività sperimentale è stata svolta nel Laboratorio di Grandi Modelli Idraulici (GMI) del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università della Calabria.

Le esperienze sono state effettuate su sedimenti non coesivi (sabbia) e su miscele di sedimenti non coesivi e coesivi (sabbia e limo/argilla), in moto permanente e vario, utilizzando la canaletta descritta nel cap. 3, con pendenza longitudinale del fondo fissata pari a  $S_0=0,05$  %.

Le prove si sono svolte in quattro serie: tre in moto permanente (serie A, C e D) e una in moto vario (serie B; Tab. 4.1). Le serie A e B sono state effettuate con fondo mobile di sola sabbia e poi ripetute utilizzando la miscela coesiva precedentemente scelta; la serie C, invece, è stata effettuata soltanto con letto di sabbia, mentre la serie D con letto coesivo.

Le prove hanno avuto durata di 1, 3, 6, 12, 24, 48, 72 e 144 h per la serie A, di 12, 48 e 96 h per la serie C e di 24 e 48 h per la serie D. La serie B, invece, comprendeva quattro prove in moto vario di durata non superiore a 7 h, due con idrogramma simmetrico ( $B_1$  e  $B_3$ ) e due con idrogramma asimmetrico ( $B_2$  e  $B_4$ ).

La portata idrica media è stata pari a  $Q_m=22,37$  l/s per la serie A, a  $Q_m=18,22$  l/s per la serie C e a  $Q_m=27,52$  l/s per la serie D. Per la serie B, invece, le prove in moto vario sono state caratterizzate dalla portata di picco degli idrogrammi simmetrici e asimmetrici,  $Q^*$ , costantemente pari a 22,65 l/s, simile a quella di moto permanente della serie A (Tab. 4.1).

Tabella 4.1. Serie di prove sperimentali eseguite

Serie	Sedimento costituente il fondo mobile	Grandezze idrauliche	Prova	Durata (h)
A Moto permanente	Sabbia/miscela coesiva	$S_0=0,05\%$ $Q_m=22,37 \text{ l/s}$ $h_u=10,3 \text{ cm}$ (altezza di moto uniforme di riferimento)	A <sub>1</sub>	1
			A <sub>2</sub>	3
			A <sub>3</sub>	6
			A <sub>4</sub>	12
			A <sub>5</sub>	24
			A <sub>6</sub>	48
			A <sub>7</sub>	96
			A <sub>8</sub>	144
B Moto vario	Sabbia/miscela coesiva	$S_0=0,05\%$ $Q^*=22,65 \text{ l/s}$	B <sub>1</sub> idrogr. simm.	4,33
			B <sub>2</sub> idrogr. asimm.	6,67
			B <sub>3</sub> idrogr. simm.	5,17
			B <sub>4</sub> idrogr. asimm.	7
C Moto permanente	Sabbia	$S_0=0,05\%$ $Q_m=18,22 \text{ l/s}$ $h_u=10,3 \text{ cm}$ (altezza di moto uniforme di riferimento)	C <sub>1</sub>	12
			C <sub>2</sub>	48
			C <sub>3</sub>	96
D Moto permanente	Miscela coesiva	$S_0=0,05\%$ $Q_m=27,52 \text{ l/s}$ $h_u=10,3 \text{ cm}$ (altezza di moto uniforme di riferimento)	D <sub>1</sub>	24
			D <sub>2</sub>	48

## 4.1 Prove in moto permanente

### 4.1.1 Procedura sperimentale

Per le prove in moto permanente, la procedura sperimentale aveva inizio con la realizzazione del fondo mobile, costituito dalla sola sabbia o dalla miscela coesiva. I sedimenti incoerenti venivano sistemati direttamente all'interno del vano e livellati in continuità con il fondo fisso di monte e valle, mediante un regolo in alluminio di lunghezza pari a 3 m, mentre i sedimenti coesivi venivano prima miscelati con la sabbia, mediante un'impastatrice elettrica, e successivamente sistemati all'interno del vano medesimo (Fig. 4.1).



Figura 4.1. Fondo mobile (sabbia uniforme).

In seguito, si acquisiva lo *zero* di riferimento dello stramazzo Thomson, la cui determinazione avveniva in condizioni idrostatiche (con superficie libera nel cassone alla quota del vertice dello stramazzo). La posizione dell'asta idrometrica nel piezometro corrispondente allo *zero* dello stramazzo si otteneva sottraendo alla lettura  $h'_{p,in}$ , effettuata al piezometro posto sul lato destro del cassone e collegato a esso mediante un tubicino, la lettura  $h'_M$  effettuata 50 cm a monte del vertice dello stramazzo:

$$zero_T = h'_{p,in} - h'_M \quad (4.1)$$

Prima dell'avvio effettivo di ogni prova, si lasciava saturare il fondo mobile per 24 h.

Nelle prove in moto permanente, per evitare che, all'apertura della saracinesca, l'acqua potesse erodere il fondo mobile, perfettamente orizzontale, si disponeva su di esso una lastra di acciaio zincato di spessore pari a 0,6 mm. Raggiunte, dopo circa 1 h, le condizioni di regime per la portata, si trascinava la lastra metallica verso monte mediante un argano a manovella, lasciando così scoprire il fondo mobile e dando inizio alla prova. Per garantire la stessa scabrezza, sulla lastra era stato incollato uno strato degli stessi sedimenti incollati sul fondo fisso di PVC (sabbia con  $d_{50}=0,86$  mm).

La portata idrica, durante le prove in moto permanente, veniva costantemente misurata con lo stramazzo Thomson, assieme ai tiranti idrici all'interno della canaletta, per verificare che le grandezze idrauliche non variassero. Al termine di ogni prova, si spegneva istantaneamente la pompa e si lasciava svuotare lentamente la canaletta, attraverso i dreni posti sul lato inferiore della parete laterale di PVC. Quest'operazione era utile per poter effettuare, in assenza di riflessi generati dall'acqua sul letto eroso, il rilievo della superficie con lo *Scanner Laser 3D*, gestito dal *software Poligon Editing Tool vers.2.4*. Tale rilievo avveniva con l'acquisizione di 22 immagini, ciascuna di dimensioni  $0,3 \text{ m} \times 0,275 \text{ m}$ , con un'opportuna zona di sovrapposizione, lunga circa 0,15 m, in modo da poter successivamente elaborare i dati e ricostituire l'intero letto mobile lungo 3 m. A tal fine, piccoli coriandoli colorati venivano disposti sul fondo mobile prima dell'inizio della prova, in modo da costituire dei punti fiduciali (*markers*).

Al termine di ogni scansione, i singoli rilievi venivano salvati dal *software* attraverso l'uso dei seguenti comandi:

- *one scan*: permette di effettuare la scansione;
- *Scan* e, successivamente, *Convert*, all'apertura della finestra *File-Import-Digitizer-One scan*: salva il risultato della scansione in formato camera “.cam”;

L'unione delle immagini avveniva, invece, attraverso l'uso dei seguenti comandi:

- *File-Import-Element*: importa tutte le scansioni nell'ordine cronologico di acquisizione;
- *Build-Registration-Inizial-Manual*: effettua l'unione delle singole scansioni, individuando i punti in comune nelle zone di sovrapposizione delle immagini (Fig. 4.2);
- *Build-Merge*: effettua l'unione complessiva delle 22 immagini;
- *File-Open-Export-Elements*: effettua il salvataggio in formato “.asci” del *file* contenente le coordinate (x,y,z) dei punti rilevati per il fondo eroso (Fig. 4.3).

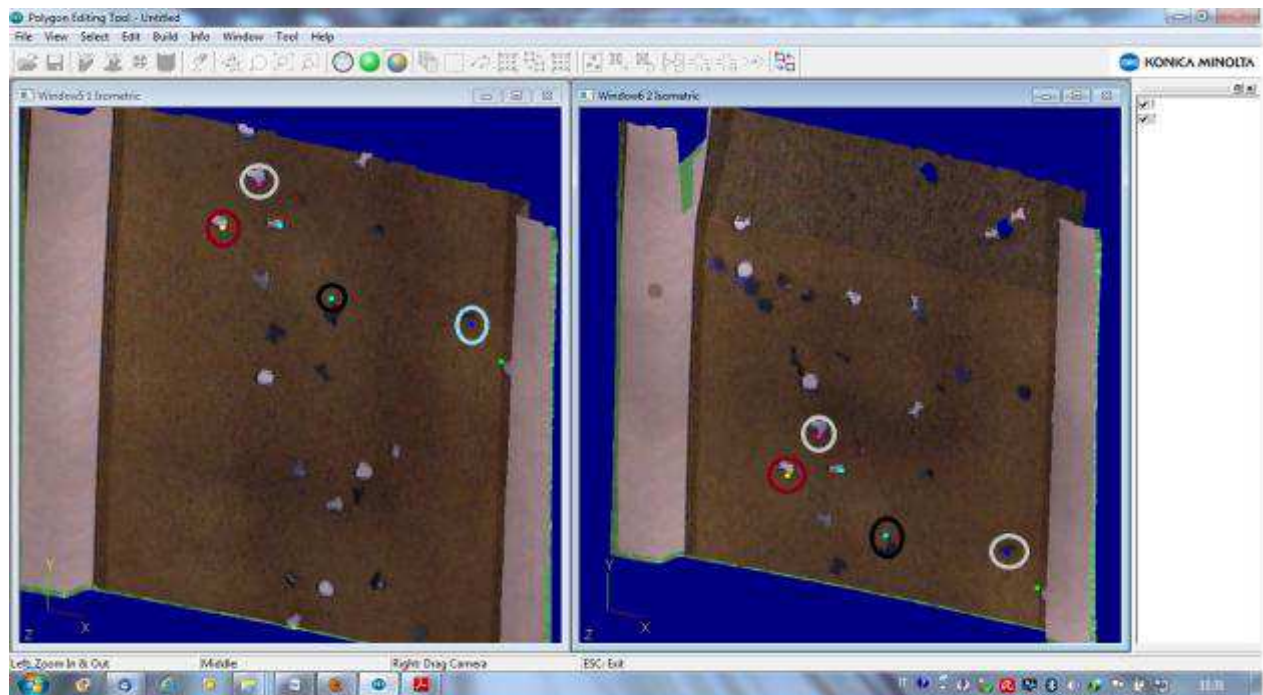


Figura 4.2. Unione di due scansioni attraverso l'utilizzo dei *markers*.

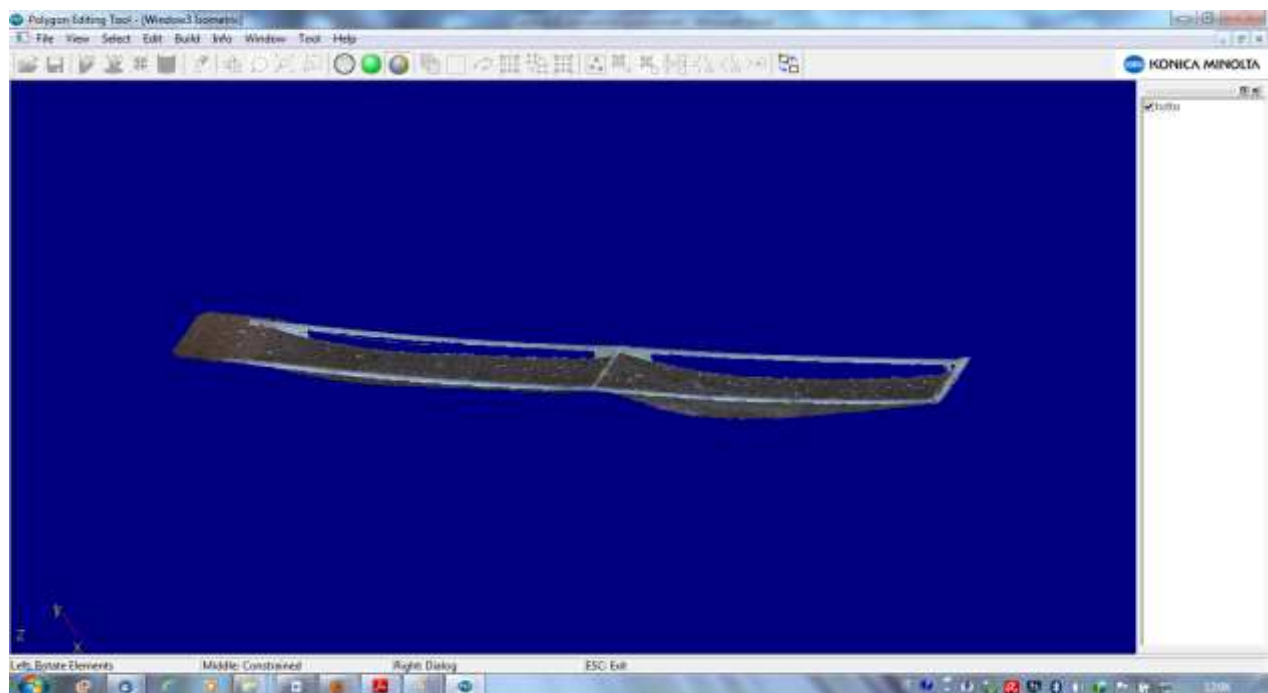


Figura 4.3. Risultato dell'unione delle 22 immagini: esempio del letto eroso di sola sabbia, dopo 24 h.

#### 4.1.2 Risultati

Come detto in precedenza, i valori delle portate si sono misurati con lo stramazzo Thomson. A causa di oscillazioni del carico all'interno della vasca di accumulo, i valori della portata  $Q$  (Tab.

4.2) presentavano piccole variazioni; pertanto, si è deciso di considerare come portata di moto permanente la media dei valori rilevati, che è risultata  $Q_m=22,37$  l/s.

Tabella 4.2. Portate registrate nelle prove in moto permanente (serie A) e loro valore medio.

Prova	Durata prova (ore)	$Q$ (l/s)	$Q_m$ (l/s)
A1	1	22,36	22,37
A2	3	22,32	
A3	6	22,32	
A4	12	22,29	
A5	24	22,41	
A6	48	22,37	
A7	96	22,4	
A8	144	22,48	

La profondità d'acqua, raggiunte le condizioni di regime per la portata, è stata misurata con l'asta idrometrica in mezzeria, in tre sezioni trasversali: 1) sezione posta alla transizione tra letto fisso di monte e letto mobile; 2) sezione d'imposta della soglia di fondo; 3) sezione posta alla transizione tra letto mobile e letto fisso di valle. Le tre profondità d'acqua sono state, quindi, mediate, ottenendo l'altezza idrica media,  $h_m$ .

Sono state, poi, calcolate le seguenti grandezze: area bagnata,  $A=B \cdot h_m$ ; velocità media nella sezione trasversale,  $U = \frac{Q_m}{A}$ ; numero di Froude,  $Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot h_m}}$ ; velocità critica per il moto incipiente (osservato visivamente facendo crescere la portata gradualmente e individuandone il valore critico,  $Q_c$ ),  $U_c = \frac{Q_c}{A}$ .

Nella Tabelle 4.3a,b si riportano i valori delle grandezze idrauliche rispettivamente per le serie di prove A e C:

Tabella 4.3a. Grandezze idrauliche relative al moto permanente (serie A, sabbia)

$h_m$ (m)	$A$ (m <sup>2</sup> )	$Q_m$ (m <sup>3</sup> /s)	$U$ (m/s)	$U_c$ (m/s)	$U/U_c$ (adim.)	$Fr$ (adim.)
0,107	0,052	0,022	0,44	0,328	1,36	0,437

Tabella 4.3b. Grandezze idrauliche relative al moto permanente (serie C)

$h_m$ (m)	$A$ (m <sup>2</sup> )	$Q_m$ (m <sup>3</sup> /s)	$U$ (m/s)	$U_c$ (m/s)	$U/U_c$ (adim.)	$Fr$ (adim.)
0,107	0,052	0,018	0,36	0,328	1,11	0,358

Successivamente, si sono misurati con l'asta idrometrica i profili longitudinali del fondo iniziale e della superficie libera, riportati in Tab. 4.4 e Fig. 4.5 assieme alla linea dei carichi totali ( $LCT$ ), che è stata ottenuta sommando il carico cinetico al profilo della superficie libera.

Le relative quote sono state misurate rispetto a un piano orizzontale, passante per la linea di discontinuità tra fondo fisso e mobile, in cui il punto di mezzeria è stato scelto come origine della terna di assi cartesiani di riferimento per tutti i calcoli successivi (Fig. 4.4).

Tabella 4.4. Dati relativi al profilo longitudinale del fondo fisso e dell'altezza idrica e alla  $LCT$  ( $z_{f-o}$  è la quota del fondo fisso misurata rispetto all'orizzontale,  $h_{i-o}$  l'altezza idrica misurata rispetto all'orizzontale,  $H=h_{i-o}+U^2/(2g)$  il carico totale)

$x$ (cm)	$z_{f-o}$ (cm)	$h_{i-o}$ (cm)	$H$ (cm)
-30	0,21	9,94	11,09
-20	0,07	9,91	11,03
-10	-0,02	9,92	11,02
0,00	0,00	10,01	11,09
20	-0,1	10,01	11,07
40	-0,25	9,96	11,00
45	-0,3	9,97	11,00
60	-0,35	9,94	10,96
100	-0,59	9,96	10,93
151	-0,67	9,9	10,87
200	-1,14	9,8	10,71
250	-1,52	9,89	10,72
300	-1,43	9,97	10,80

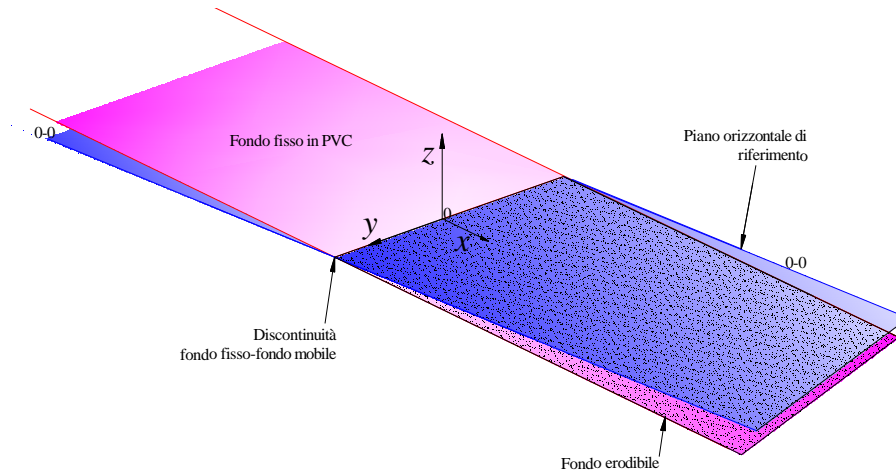


Figura 4.4. Sistema di assi cartesiani di riferimento (linea rossa: contorno della canaletta; linea blu: contorno del piano orizzontale di riferimento).

Dai rilievi effettuati, si è ricavata accuratamente la pendenza del fondo fisso,  $S_0=0,005$ , della superficie libera,  $S_w=0,0002$ , e della  $LCT$ ,  $S_f=0,00112$ .

Quest'ultima pendenza è stata utilizzata per determinare il valore dello sforzo tangenziale medio al fondo. Il risultato di tale metodo di calcolo indiretto, valido a rigore in condizioni di moto uniforme, è stato, successivamente confrontato con altri metodi di letteratura, viste le condizioni di moto permanente (corrente decelerata) instauratesi nella canaletta.

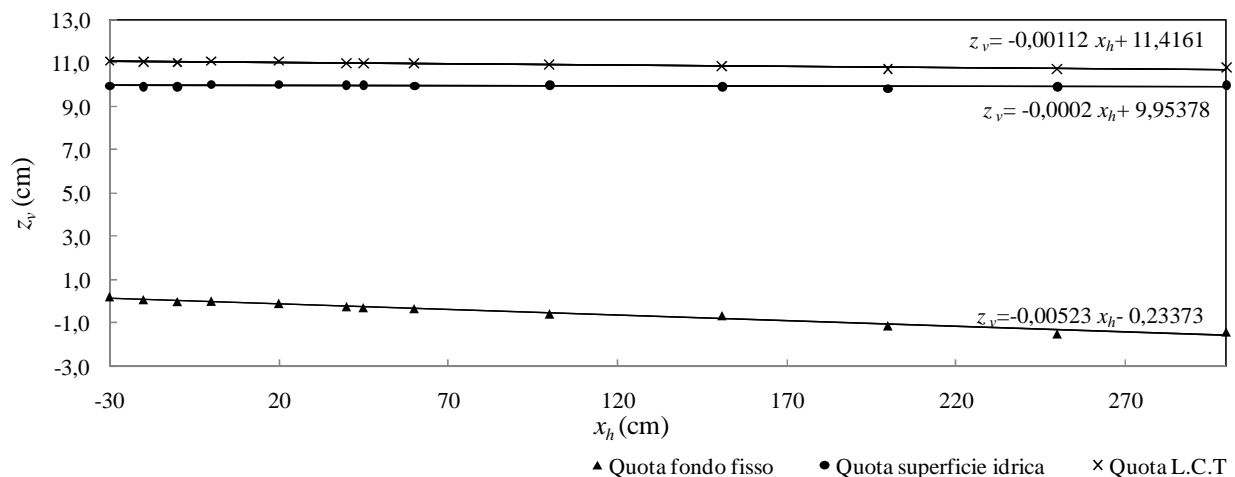


Figura 4.5. Profilo longitudinale del fondo iniziale e della superficie libera e  $LCT$   
( $x_h$ : asse orizzontale di riferimento;  $z_v$ : asse verticale di riferimento)

In Fig. 4.6 si riportano i profili longitudinali del fondo iniziale e della superficie idrica, assieme alla  $LCT$ .



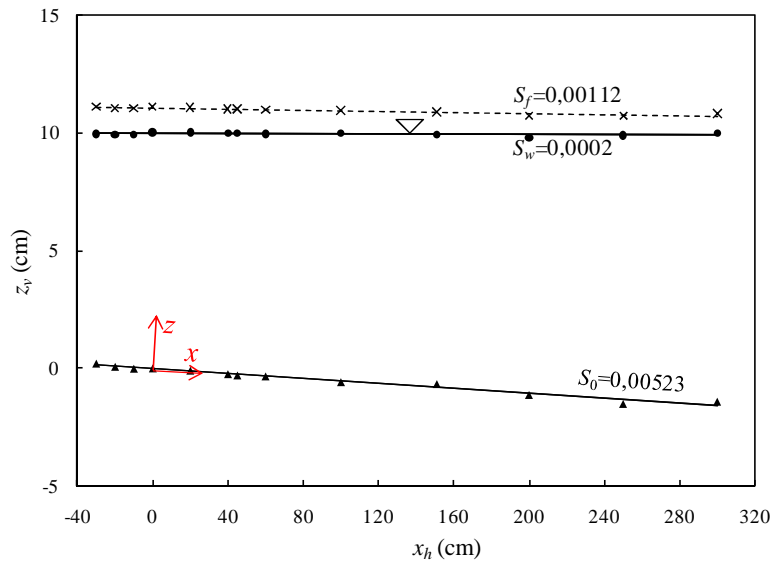


Figure 4.6. Profilo longitudinale del fondo iniziale e della superficie libera e *LCT*, con sistema di riferimento per il calcolo degli sforzi tangenziali

La temperatura dell'acqua, misurata con un termometro digitale, è risultata pari a  $T=17,4^{\circ}\text{C}$ , alla quale corrisponde la viscosità cinematica  $\nu=1,07 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Il profilo della superficie libera rilevato ha permesso di constatare che l'altezza idrica subiva una variazione da 10,01 cm, nella sezione iniziale del fondo mobile, a 11,40 cm, nella sezione finale del fondo medesimo, essendo il moto non uniforme, ma permanente.

Assumendo, quindi, l'altezza media  $h_m=10,7 \text{ cm}$  (Tabb. 4.3a,b), è stato possibile calcolare il raggio idraulico,  $R_h$ :

$$R_h = \frac{Bh_m}{B + 2h_m} = 7,4 \text{ cm} \quad (4.2)$$

con  $B=48,5 \text{ cm}$ . Si è, quindi, calcolata la velocità d'attrito,  $u^*$ , come segue:

$$u^* = \sqrt{gR_h S_f} = 2,856 \text{ cm/s} \quad (4.3)$$

Si è, infine, ottenuto lo sforzo tangenziale al fondo:  $\tau_b = \rho u^{*2} = 0,82 \text{ Pa}$ .

Poiché il valore del rapporto  $B/h_m$  è pari a  $4,53 < 5$ , si ricade nella condizione di canale stretto, con influenza delle pareti laterali (Julien, 2010). Pertanto, si è proceduto alla separazione delle sezioni con il metodo di Vanoni e Brooks (1957), ottenendo l'indice di resistenza di Darcy-Weisbach,  $f=0,035$ , l'indice di resistenza alle pareti laterali,  $f_w=0,02$ , e l'indice di resistenza al fondo,  $f_b=0,042$ , nonché il raggio idraulico al fondo,  $R_b=0,089$ , con le formule seguenti:

$$f = \frac{8u^{*2}}{U^2} \quad (4.4)$$

$$f_w = 0,0026 \left[ \log \frac{Re}{f} \right]^2 - 0,0428 \left[ \log \frac{Re}{f} \right] + 0,1884 \quad (4.5)$$

$$f_b = f + \frac{2h}{B(f - f_w)} \quad (4.6)$$

$$R_b = \frac{f_b}{f} R_h \quad (4.7)$$

Ai fini delle simulazioni numeriche di cui si dirà nel cap. 5, si sono ricavate anche l'altezza idrica media nel primo tratto di fondo mobile, compreso tra il fondo fisso di monte e la soglia di fondo ( $h_{m,f}=10,3$  cm), la corrispondente velocità media  $U_f=43,1$  cm/s, che compare nelle eq.ni (4.4) e (4.5), e il numero di Reynolds,  $Re$ :

$$Re = \frac{4UR_h}{\nu} = 1,2 \cdot 10^5 \quad (4.8)$$

Sostituendo  $R_b$  con  $R_h$  nell'eq. (4.3), si sono ricavati la velocità d'attrito,  $u^*=3,12$  cm/s, e lo sforzo tangenziale al fondo,  $\tau_b=\rho u^{*2}=0,97$  Pa.

In una corrente a superficie libera, la distribuzione dello sforzo tangenziale lungo la verticale, in condizioni di moto uniforme, è lineare e può essere determinata mediante la seguente relazione:

$$\tau_b = -\rho \overline{u'w'} + \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (4.9)$$

dove  $\mu$  è la viscosità dinamica,  $u'$  e  $w'$  sono le componenti di agitazione turbolenta rispettivamente in direzione longitudinale ( $x$ ) e in direzione verticale ( $z$ ) e  $\bar{u}$  è la componente media della velocità locale assiale.

Le velocità locali assiale,  $u$ , e verticale,  $w$ , si ottengono come segue:

$$u = \bar{u} + u', \quad w = \bar{w} + w' \quad (4.10)$$

In corrispondenza della superficie libera ( $z=h$ ) lo sforzo tangenziale è nullo, mentre al fondo ( $z=0$ ) si ricava come  $\tau_b=\rho u^{*2}$ .

Ritornando all'eq. (4.9), per valori del rapporto  $z/h$  maggiori di 0,2, essendo piccola la variazione della media della velocità nel tempo, il termine  $\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$  può essere trascurato, per cui  $\tau_b = -\rho \overline{u'w'}$  (Termini e Sammartano, 2012).

Secondo Roussinova *et al.* (2009), nella regione  $0,2 < z/d < 0,7$  si può ricavare la velocità d'attrito,  $u^*$ , attraverso la regressione lineare delle misure degli sforzi di Reynolds, dove il contributo degli sforzi viscosi è trascurabile. In condizioni di moto non uniforme, lo sforzo tangenziale può essere

stimato attraverso lo sforzo di Reynolds al fondo (Song e Chiew, 2001), considerando un andamento dei dati non lineare (Fig. 4.7).

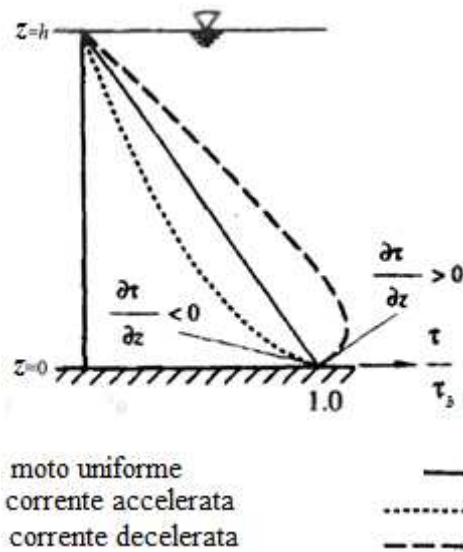


Figura 4.7. Distribuzione dello sforzo di Reynolds in condizioni di moto uniforme e non uniforme (Graf e Altinakar, 1998).

In corrente decelerata, infatti, la distribuzione dello sforzo di Reynolds presenta una forma convessa, con un massimo che si verifica in corrispondenza del fondo (Song e Chiew, 2001).

Song e Chiew (2001) hanno derivato analiticamente la seguente formula per la distribuzione lungo la verticale dello sforzo tangenziale in condizioni di moto permanente:

$$\frac{\tau(z)}{\rho} = \left( \frac{R_b}{h} \right) \left\{ g(h-z) \left( S_0 - \frac{dh}{dx} \right) + U^2 \frac{dh}{dx} \left[ \frac{(1+m)^2}{m(m+2)} \right] \left( 1 - \left( \frac{z}{h} \right)^{\frac{2+m}{m}} \right)^{\frac{m+2}{m}} \right\} \quad (4.11)$$

dove  $dh/dx$  è la pendenza longitudinale della superficie libera, mentre  $m$  è la costante della legge di potenza della distribuzione di velocità, che può essere ricavata dalla seguente relazione (Tang, 1963):

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{4,7} \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0,06} \quad (4.12)$$

Per misurare i profili di velocità si è utilizzato l'ADV, sia con la *down-looking probe* che con la *side-looking probe* (Fig. 4.8), avente un volume di campionamento cilindrico di diametro pari a 6 mm e di altezza pari a 7 mm. La frequenza di acquisizione è stata fissata pari a 25 Hz.

Figura 4.8. ADV (*side-looking probe*).

La durata del campionamento, superiore a 300 s, ha garantito che la velocità media temporale fosse stabile nel tempo. Dopo il campionamento dei dati è stato eseguito un filtraggio con il programma *WinADV*, il cui funzionamento si basa sul metodo statistico *phase-space threshold* (Goring e Nikora, 2002, modificato da Wahl, 2003). Esso elimina automaticamente i dati, in base al valore medio e allo scarto quadratico medio, impostando il grado di correlazione e il parametro *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). Essi sono stati fissati rispettivamente maggiori del 70% e del 15%. Quest'ultimo valore esprime il rapporto tra il segnale e il rumore, in funzione della potenza del segnale utile rispetto a quella del rumore.

I valori della velocità sono stati misurati in 5 o 6 punti, lungo ogni verticale, per valori del rapporto  $z/h$  compresi tra 0,2 e 0,7, nella mezzeria di tre differenti sezioni: la prima (sez. 1) in corrispondenza della transizione tra il fondo fisso di monte e il fondo mobile ( $x=0$ ); la seconda (sez. 2) sulla soglia di fondo ( $x=151$  cm); e la terza (sez. 3) in corrispondenza del passaggio tra il fondo mobile e il fondo fisso di valle ( $x=300$  cm).

Successivamente, si è diviso il letto mobile in due zone: la prima (I) a monte della soglia di fondo e la seconda (II) a valle della soglia stessa.

Si è potuto valutare, quindi, lo sforzo tangenziale nella zona I, mediando gli sforzi ottenuti per le sezz. 1 e 2; analogamente, si è ricavato lo sforzo tangenziale nella zona II, mediando gli sforzi ottenuti per le sezz. 2 e 3.

Si è valutata, inoltre, la pendenza della superficie libera,  $dh/dx$ , lungo l'asse longitudinale di mezzeria, ottenendo  $dh/dx=0,005$  come pendenza della retta di regressione lineare ai minimi quadrati (Fig. 4.9):

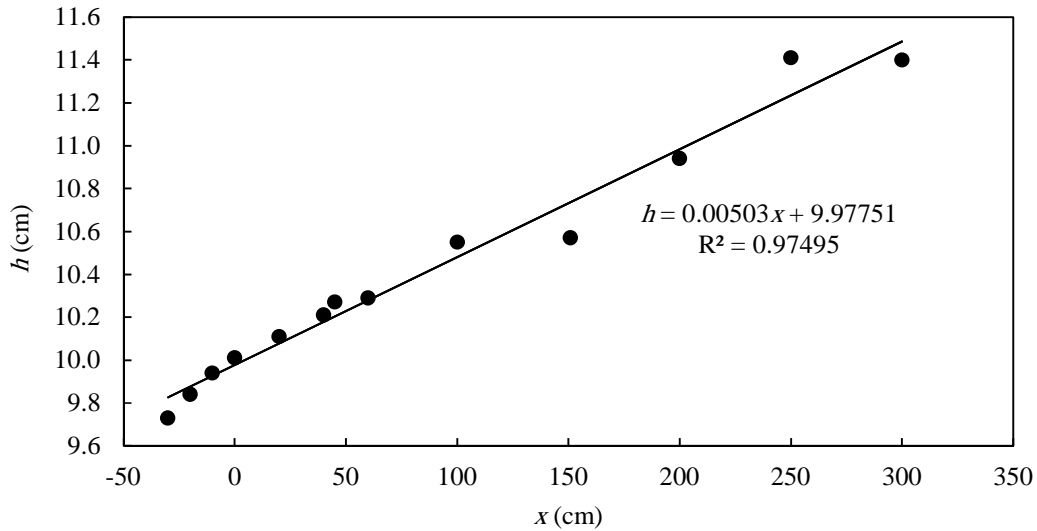
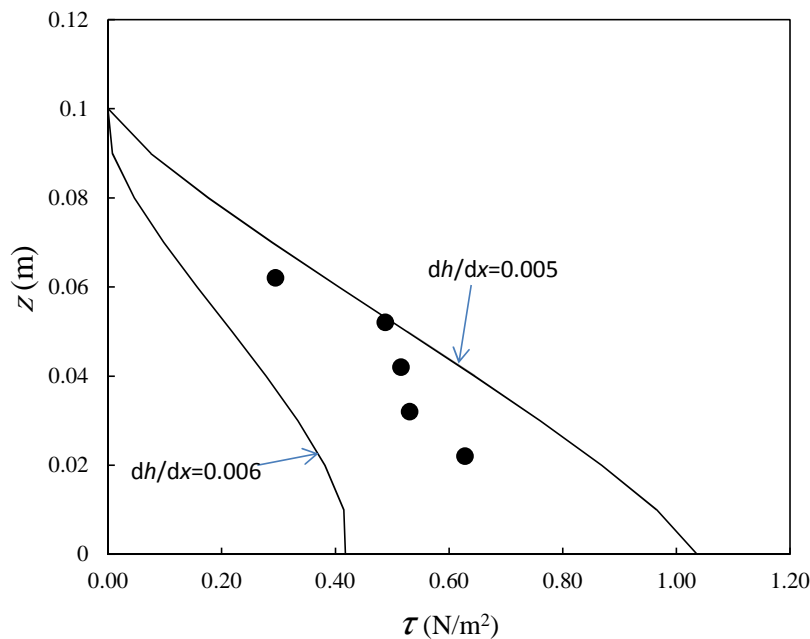


Figure 4.9. Profilo idrico sul fondo mobile.

La Fig. 4.10 mostra la distribuzione dello sforzo tangenziale nella sezione  $x=0$  cm, misurata con l'interpolazione dei dati utilizzando l'eq. (4.11).


 Figura 4.10. Confronto tra sforzi tangenziali misurati ( $\bullet$  = eq. 4.9) e calcolati ( $—$  = eq. 4.11) al variare di  $dh/dx$  (sez. 1).

Si può notare che essa non descrive correttamente la distribuzione dello sforzo tangenziale lungo la verticale, a causa della sensibilità che l'eq. (4.11) ha alla variazione della pendenza  $dh/dx$ . Per  $dh/dx=0,006$ , infatti, si osserva una distribuzione di sforzi tangenziali significativamente diversa dalla precedente, ma ancora non soddisfacente (Fig. 4.10).

Procedendo in maniera inversa, noti i valori dello sforzo tangenziale ricavati dall'eq. (4.9), per ciascuna sezione si è calcolato iterativamente il valore di  $dh/dx$  che minimizzava i quadrati degli

scarti in ordinata tra i punti sperimentali e i punti della curva ottenuta dall'eq. (4.11). Si è pervenuti ai seguenti risultati:  $dh/dx=0,00538$  per la sez. 1,  $dh/dx=0,00529$  per la sez. 2,  $dh/dx=0,00524$  per la sez. 3. Le Figg. 4.11a÷c mostrano i grafici dell'eq. (4.11), uno per sezione, in cui si sono inseriti i tre valori suddetti di  $dh/dx$ ; per estrapolazione, si è ricavato lo sforzo tangenziale al fondo (ossia per  $z=0$ ) per ciascuna sezione:  $\tau_{b1}=0,80$  Pa (sez. 1),  $\tau_{b2}=0,76$  Pa (sez. 2) e  $\tau_{b3}=0,70$  Pa (sez. 3).

Si osserva che lo sforzo tangenziale al fondo si riduce da monte a valle; infatti, risulta  $\tau_{b1}>\tau_{b2}>\tau_{b3}$ . Ciò dipende dalla presenza della corrente decelerata, ossia con incremento dei tiranti idrici verso valle.

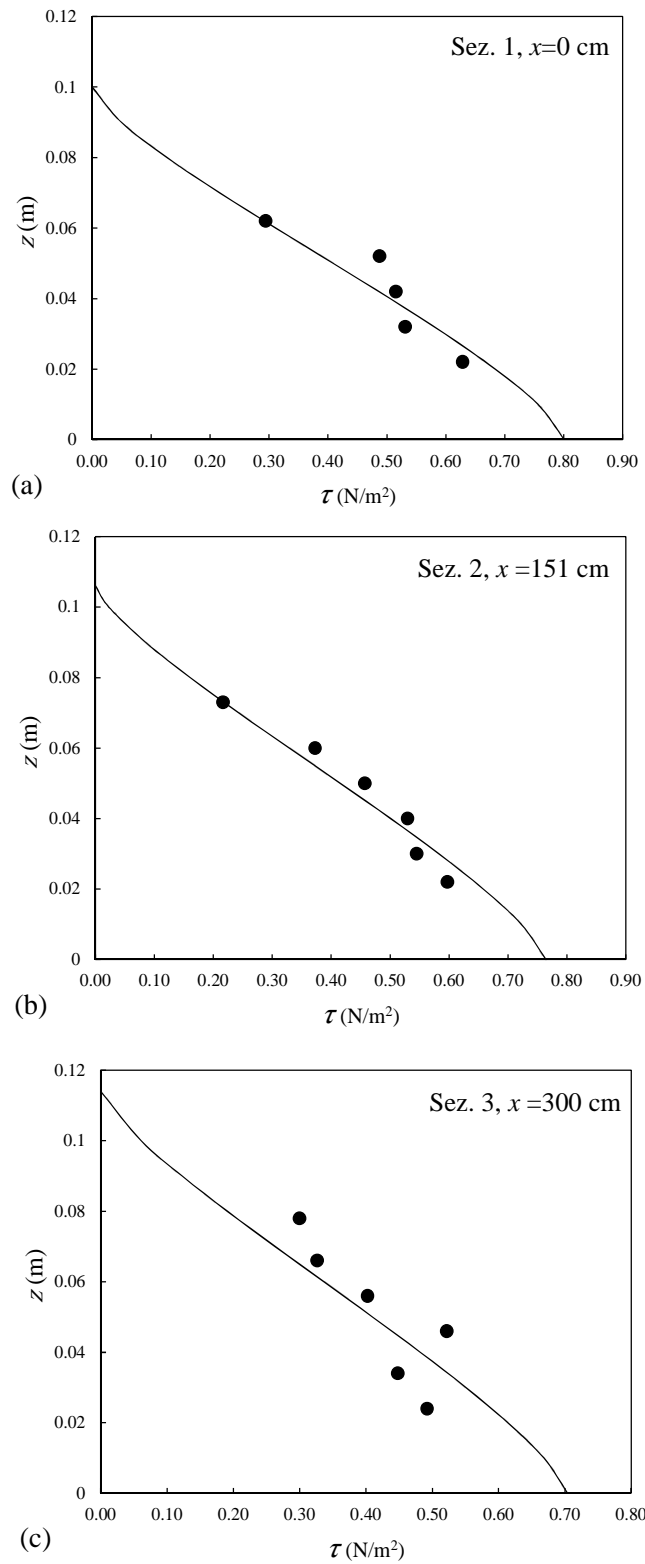


Figura 4.11. Distribuzione degli sforzi tangenziali (eq. 4.11)

e individuazione dello sforzo tangenziale al fondo per estrapolazione: (a) sez. 1; (b) sez. 2; (c) sez. 3.

Per confronto, si sono interpolati i dati sperimentali con la retta di regressione lineare valida in moto uniforme (Figg. 4.12a÷c).

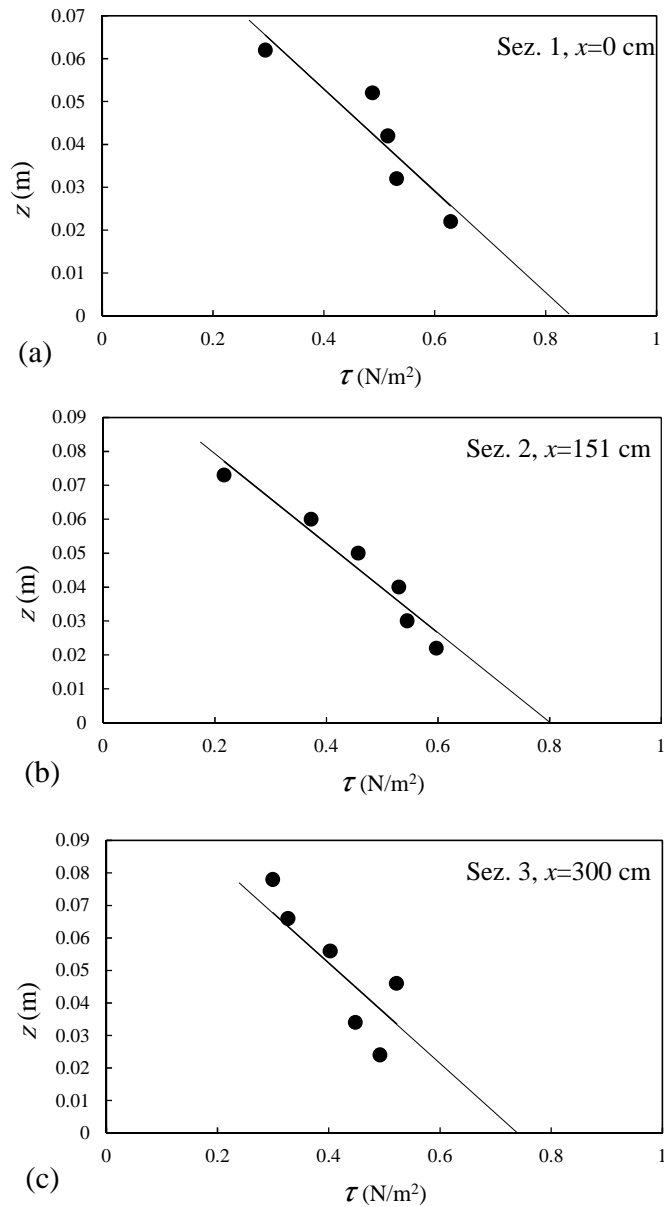


Figura 4.12. Interpolazione lineare degli sforzi tangenziali misurati e individuazione dello sforzo tangenziale al fondo per estrapolazione: (a) sez. 1; (b) sez. 2; (c) sez. 3.

In Tab. 4.5 si riportano i valori degli sforzi tangenziali al fondo ricavati con i due metodi appena descritti:



Tabella 4.5. Confronto tra i valori dello sforzo tangenziale al fondo ottenuti per estrapolazione dalla distribuzione in moto permanente (eq. 4.11) e da quella in moto uniforme (regressione lineare).

Sezione	$\tau_b$ (Pa)	
	Moto permanente: eq. (4.11), Figg. 4.11a÷c	Moto uniforme: regressione lineare, Figg. 4.12a÷c
Sez. 1 ( $x=0$ cm)	0,80	0,84
Sez. 2 ( $x=151$ cm)	0,76	0,80
Sez. 3 ( $x=300$ cm)	0,70	0,74

Un ulteriore metodo per la stima degli sforzi tangenziali in moto permanente è quello di Song e Chiew (2001), i quali attraverso un approccio analitico, ricavarono la seguente espressione per la velocità d'attrito, utilizzando la distribuzione della velocità lungo la verticale e l'equazione di continuità:

$$u^* = \sqrt{gR_b \left[ S_0 - \frac{dh}{dx(1 - \beta_\beta \cdot Fr^2)} \right]} \quad (4.13)$$

dove  $Fr$  è il numero di Froude e  $\beta_\beta$  il coefficiente di Boussinesq, che genericamente ha valori prossimi all'unità e può essere ricavato dalla relazione seguente:

$$\beta_\beta = \frac{(m+1)^2}{m(m+2)} \quad (4.14)$$

La Tab. 4.8 mostra i valori della velocità d'attrito ottenuti dall'eq. (4.13) e i corrispondenti valori dello sforzo tangenziale al fondo ( $\tau_b = \rho u^{*2}$ ). Si è ottenuto:  $\tau_{b1}=0,80$  Pa,  $\tau_{b2}=0,76$  Pa,  $\tau_{b3}=0,70$  Pa, in accordo con quanto ottenuto dall'eq. (4.11).

Tabella 4.6. Calcolo dello sforzo tangenziale mediante l'eq. (4.13) di Song e Chiew (2001)

Sezione	$m$ (adim.)	$U$ (m/s)	$F_r$ (adim.)	$\beta_\beta$ (adim.)	$dh/dx$ (adim.)	$S_0$ (adim.)	$R_b$ (adim.)	$u^*$ (m/s)	$\tau_b$ (Pa)
Sez. 1	6,25	0,46	0,47	1,02	0,00538	0,005	0,081	0,028	0,80
Sez. 2	6,27	0,44	0,43	1,02	0,00529	0,005	0,087	0,028	0,76
Sez. 3	6,30	0,40	0,38	1,02	0,00524	0,005	0,096	0,026	0,70

Concludendo, si può affermare che, non essendo il moto uniforme in canaletta, lo sforzo tangenziale al fondo dev'essere calcolato dalle eq.ni (4.11) o (4.13), che tengono conto della pendenza del profilo della superficie libera,  $dh/dx$ .

Pertanto, lo sforzo tangenziale al fondo nella zona I, ottenuto mediando gli sforzi per le sezz. 1 e 2, è pari a 0,78 Pa; analogamente, lo sforzo tangenziale al fondo nella zona II, ottenuto mediando gli sforzi per le sezz. 2 e 3, è pari a 0,73 Pa.

I valori medi della velocità d'attrito sono  $u_I^* = 28$  cm/s per la zona I e  $u_{II}^* = 27$  cm/s per la zona II, cui corrispondono i numeri di Reynolds d'attrito  $Re_I^* = 45$  e  $Re_{II}^* = 44$ , i quali, essendo compresi tra 4 e 70, indicano moto turbolento di transizione.

Si è, poi, ricercato lo sforzo tangenziale critico al fondo per il moto incipiente dei sedimenti, dapprima nel caso della sola sabbia. Riguardo l'erosione di un fondo mobile incoerente, Kramer (1935) ha messo in relazione lo sforzo tangenziale con le modalità di movimento delle particelle solide, individuando quattro differenti casi:

- 1) assenza di movimento delle particelle;
- 2) trasporto debole, solo per alcune particelle solide e in zone isolate;
- 3) trasporto medio di molte particelle di medie dimensioni;
- 4) trasporto generalizzato, in cui sono in movimento tutte le particelle delle diverse dimensioni, in ogni punto e in ogni istante temporale.

A causa della variazione del profilo idrico (moto permanente), il calcolo dello sforzo tangenziale critico è stato eseguito in mezzo alla prima fossa di scavo localizzato (tra fondo fisso di monte e soglia di fondo), lungo la verticale posta a  $x=75$  cm, con un'altezza idrica pari a 10,3 cm, valore medio tra  $h(x=0)=10,00$  cm e  $h(x=150\text{ cm})=10,6$  cm.

Per definire le condizioni di trasporto solido descritte da Kramer, è stato necessario far variare la portata nella canaletta e mantenere costante l'altezza idrica, fissata pari a 10,3 cm, modificando l'inclinazione della paratoia di valle. Sono state eseguite n. 6 prove (CR1÷CR6) di breve durata, al fine di osservare il movimento dei sedimenti; nella Tab. 4.7 si riportano i valori misurati della portata,  $Q$ , e della velocità media,  $U=Q/A$ , le osservazioni effettuate e le corrispondenti descrizioni di Kramer (1935). Nella prova CR5 si sono osservate le condizioni di trasporto simili a quelle descritte da Kramer (1935) come “trasporto medio”, che sono state assunte come quelle di moto incipiente (per  $Q=16,4$  l/s e  $U=32,9$  cm/s).

Tabella 4.7. Osservazioni sperimentali per l'individuazione del moto incipiente dei sedimenti (sabbia uniforme).

Prova	$Q$ (l/s)	$U$ (cm/s)	Osservazioni sperimentali	Descrizione delle modalità di movimento dei sedimenti (Kramer, 1935)
CR1	3,5	6,9	Assenza di moto.	Assenza di trasporto
CR2	10,5	21,0	Assenza di moto.	Assenza di trasporto
CR3	13,2	26,4	Assenza di moto.	Assenza di trasporto
CR4	15,9	31,7	Le particelle di dimensioni più piccole iniziano a muoversi.	Trasporto debole
<b>CR5</b>	<b>16,4</b>	<b>32,9</b>	<b>Il trasporto solido si manifesta con salti e rotolamenti delle particelle solide.</b>	<b>Trasporto medio</b>
CR6	18,13	36,3	Trasporto diffuso delle particelle di ogni dimensioni su tutta la superficie osservata.	Trasporto generalizzato

Il passo successivo è stato quello di misurare i profili di velocità locale, utilizzando l'ADV. La Fig.4.13 mostra la distribuzione dello sforzo di Reynolds lungo la verticale e, per estrapolazione lineare, il valore dello sforzo tangenziale critico al fondo,  $\tau_{b,cr}=0,53$  Pa:

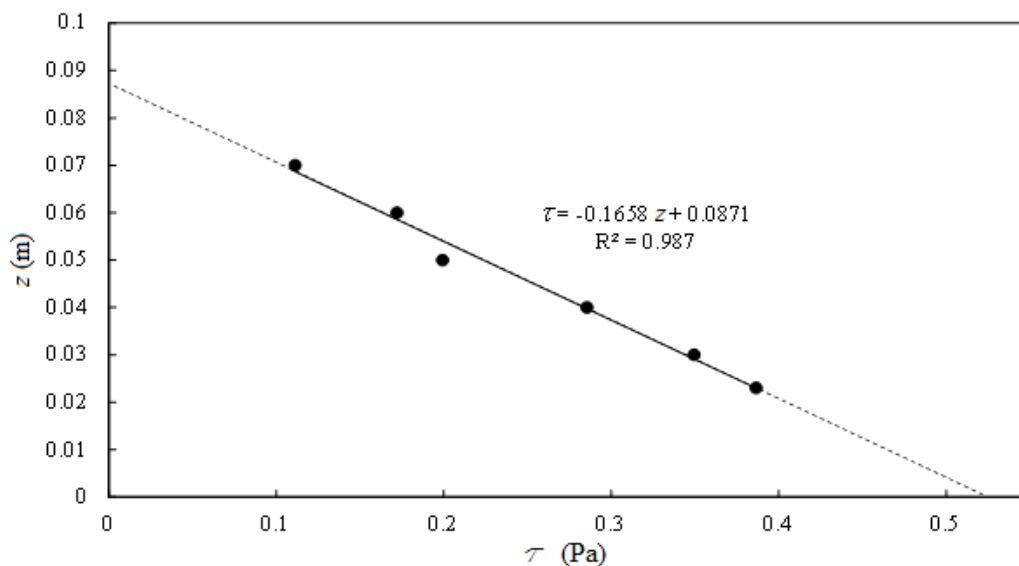


Figura 4.13. Variazione dello sforzo tangenziale lungo la verticale in moto incipiente (sabbia uniforme).

La Fig. 4.13 mostra che, per estrapolazione, lo sforzo tangenziale nullo si otterrebbe paradossalmente a una quota  $z < h$ . Inoltre, il calcolo del numero di Reynolds d'attrito ( $4 < Re_{cr}^* = \frac{d_{50} u_{cr}^*}{\nu} = 18,5 < 70$ , con  $u_{cr}^* = \sqrt{\tau_{b,cr} / \rho} = 0,023$  m/s, con  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>), porta a riconoscere che il moto turbolento non è pienamente sviluppato, bensì è di transizione, ragion per cui l'eq. (4.11) di Song and Chiew (2001) non può essere, a rigore, applicata.

Pertanto, si è utilizzato il seguente metodo di Yalin e da Silva (2001):

$$Y_{cr} = 0,13\Xi^{-0,39}e^{-0,015\Xi^2} + 0,045(1 - e^{-0,068\Xi}) \quad (4.15)$$

dove:

$$\Xi = \sqrt{\frac{\gamma'_s d_i^3}{\rho v^2}} \quad (4.16)$$

$$Y_{cr} = \frac{\tau_{b,cr}}{\gamma'_s d_i} \quad (4.17)$$

in cui  $\gamma'_s$  è il peso specifico alleggerito dei granelli solidi e  $d_i$  un diametro caratteristico dei sedimenti, generalmente posto pari a  $d_{50}$ .

Utilizzando l'eq. (4.15), si è potuto determinare lo sforzo tangenziale al fondo critico,  $\tau_{b,cr}=0,47$  Pa, e la corrispondente velocità d'attrito critica,  $u_{cr}^* = \sqrt{\tau_{b,cr}/\rho} = 0,022$  m/s (Tab. 4.8).

Tabella 4.8. Valori dei parametri di Yalin e da Silva (2001)

$\gamma'_s$ (N/m <sup>3</sup> )	$d_{50}$ (m)	$\Xi$ (adim.)	$Y_{cr}$ (adim.)	$\tau_{b,cr}$ (Pa)	$u_{cr}^*$ (m/s)
16014	0,00086	20,73	0,034	0,47	0,022

Questo risultato è stato confermato anche dall'utilizzo del diagramma di Shields (Fig. 4.14), in cui, per  $Re_{cr}^* = \frac{2d_{50}u_{cr}^*}{\nu} = 17$ , si è potuto ricavare per interpolazione il parametro di Shields pari a 0,032, concordando con quanto valutato da Yalin e da Silva (2001).

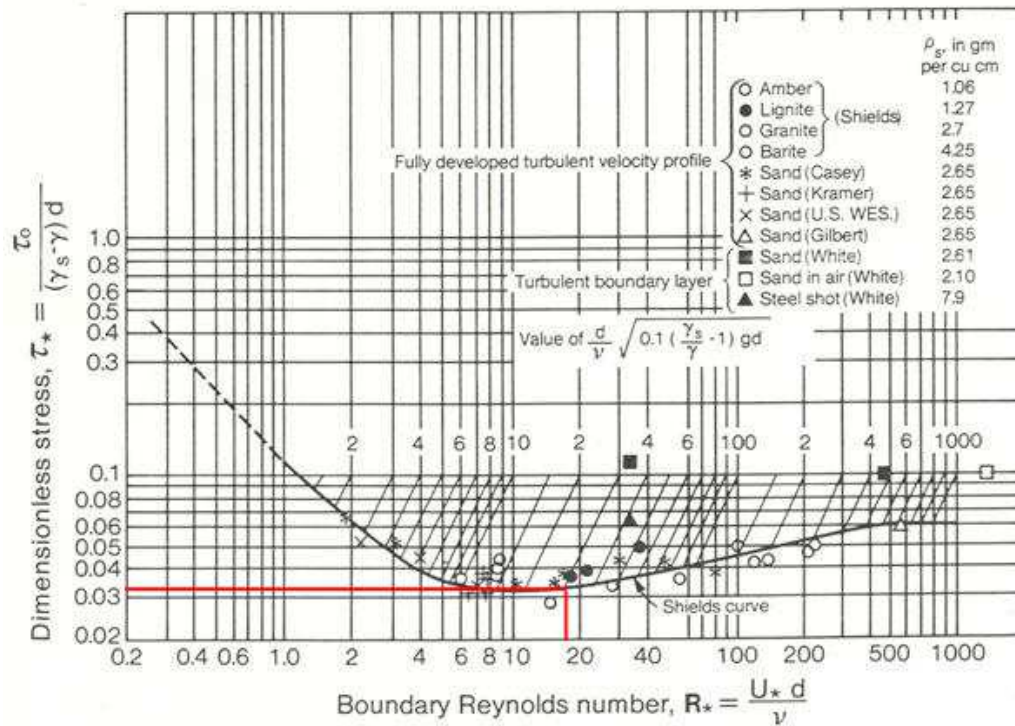


Figura 4.14. Parametro di mobilità critico di Shields per  $Re_{cr}^* = 17$ .

Dai calcoli eseguiti è risultato, dunque, che lo sforzo tangenziale al fondo critico è  $\tau_{b,cr}=0,47$  Pa, minore del precedente ( $\tau_{b,cr}=0,53$  Pa), ottenuto per estrapolazione in condizioni di moto uniforme. Peraltro, la distribuzione degli sforzi tangenziali presenta un andamento convesso in prossimità del fondo (Fig. 4.11), con valori leggermente inferiori a quelli ottenibili per interpolazione lineare.

Per quanto riguarda lo sforzo tangenziale critico per il moto incipiente dei sedimenti per la miscela coesiva, si osserva che, in base alla quantità di argilla presente nella miscela e alla pendenza della linea dei carichi totali, si possono verificare tre diversi tipi di condizioni di moto incipiente, come riportano Kothyari e Jain (2008):

- il primo, caratterizzato da percentuali di argilla minori del 30%, si manifesta con distacchi di singole particelle, generando fosse di scavo localizzato in diverse zone del fondo mobile;
- il secondo si determina con uno sviluppo della fossa di scavo piuttosto lineare ed è tipico per percentuali di argilla superiori al 30%; questo fenomeno si verifica con movimento di piccoli ammassi di sedimenti;
- il terzo, in presenza di forti pendenze della linea dei carichi totali, è caratterizzato da un'erosione di massa, che provoca l'asportazione di ammassi diffusi di particelle di dimensioni maggiori rispetto a quelle dei casi precedentemente descritti.

I test con la miscela coesiva, purtroppo, non consentivano l'osservazione diretta delle condizioni di moto incipiente dei sedimenti, a causa della torbidità dell'acqua.

D'altra parte, le forme e le dimensioni delle piccole fosse di scavo che si formavano alla fine del fondo mobile erano ritenute ottimi indicatori dell'intensità della corrente, valutata in condizioni prossime a quelle di stato critico per il moto incipiente dei sedimenti, e utili per calcolare il relativo sforzo tangenziale. Infatti, alla fine dei test, dopo aver drenato il fondo, ci si è trovati in presenza di erosioni localizzate, la cui ampiezza si riduceva da monte verso valle (Fig. 4.15).

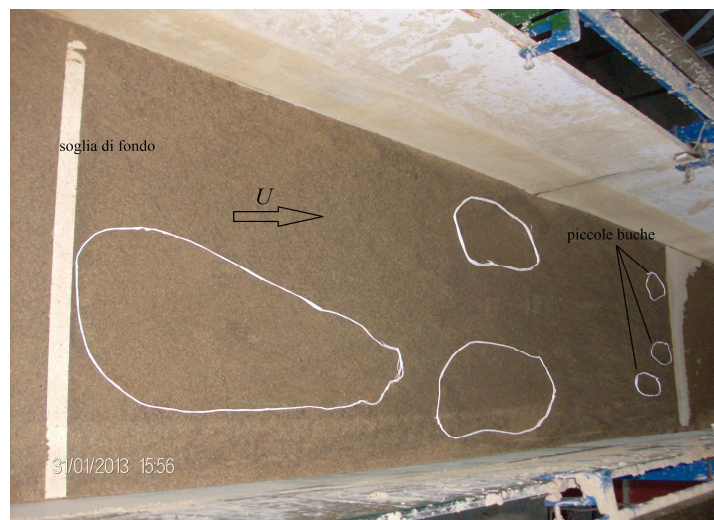


Figura 4.15. Erosione localizzata a valle della soglia di fondo dopo 4 ore (miscela coesiva).

Tale osservazione sperimentale ha permesso di classificare le condizioni di moto incipiente come quelle del primo tipo descritto da Kothyari e Jain (2008).

Lo sforzo tangenziale critico,  $\tau_{b,cr}$ , è stato valutato in una prova preliminare con portata pari a quella delle prove della serie A ( $Q_m=22,37$  l/s), misurando con l'ADV un profilo di velocità all'inizio del fondo fisso di valle e ricavando le fluttuazioni turbolente, poi inserite nell'eq. (4.9), ottenendo  $\tau_{b,cr}=0,70$  Pa. Essendo la profondità d'acqua nella sezione trasversale in questione (all'inizio del fondo fisso di valle) pari a 11,4 cm, con la portata suddetta si ottiene la velocità critica per il moto incipiente dei sedimenti:  $U_c=0,405$  m/s.

In conclusione, si può affermare che:

- lo sforzo tangenziale al fondo, nel caso di sola sabbia, è pari a  $\tau_{b,I}=0,78$  Pa e  $\tau_{b,II}=0,73$  Pa, rispettivamente per le zone I e II;
- lo sforzo tangenziale al fondo critico per la sabbia e per la miscela coesiva è rispettivamente pari a  $\tau_{b,cr}=0,47$  Pa e  $\tau_{b,cr}=0,70$  Pa;
- la velocità critica per il moto incipiente dei sedimenti è  $U_c=0,328$  m/s per la sabbia e  $U_c=0,405$  m/s per la miscela coesiva.

### 4.1.3 Analisi dei risultati

La determinazione dei profili longitudinali è stata possibile solo dopo aver acquisito le superfici erose mediante il software *Polygon Editing Tool (PET)*, vers. 2.4), in dotazione allo Scanner Laser.

Il montaggio complessivo del fondo eroso, convertito in file ASCII, restituiva circa 490'000 punti, ognuno dei quali era definito da una terna di coordinate ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) (Fig. 4.16).

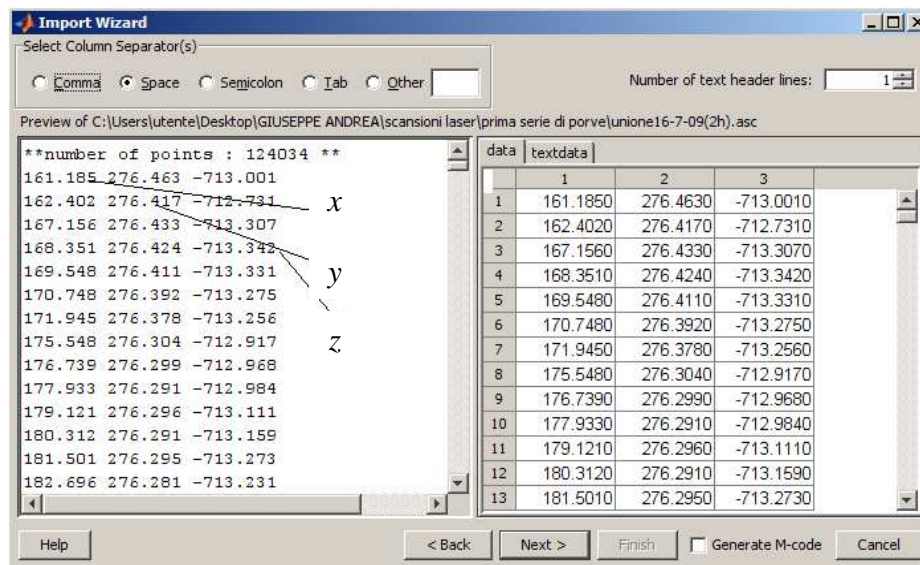


Figura 4.16. Coordinate ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) dei punti rilevati dallo Scanner Laser 3D (*software PET*).

I punti rilevati dallo strumento non presentano nel piano ( $x$ ,  $y$ ) una spaziatura costante, ma variabile nell'intervallo  $0,5 \div 1$  mm. Per il montaggio delle varie immagini acquisite a fine prova (22 scansioni per l'intero fondo mobile lungo 3 m), sono state fissate due bande adesive di spessore 2,5 cm, simmetricamente alla distanza di 10 cm dalla mezzeria della canaletta, in modo da costituire due porzioni di piano di riferimento a quota nota  $z=0$  (Fig. 4.17).

Per semplificare i calcoli delle profondità di scavo, nonché delle aree e dei volumi erosi, il fondo mobile rilevato è stato suddiviso in due zone: la prima, di area  $A_1$ , tra il fondo fisso di monte e la soglia di fondo, e la seconda, di area  $A_2$ , tra la soglia di fondo e il fondo fisso di valle, entrambe larghe 20 cm e simmetriche rispetto all'asse di mezzeria della canaletta. Si sono, quindi, trascurate le strisce adiacenti alle pareti laterali, per non tener conto delle zone che a volte hanno presentato piccoli solchi, a causa dell'interazione tra la corrente idrica e le sponde.



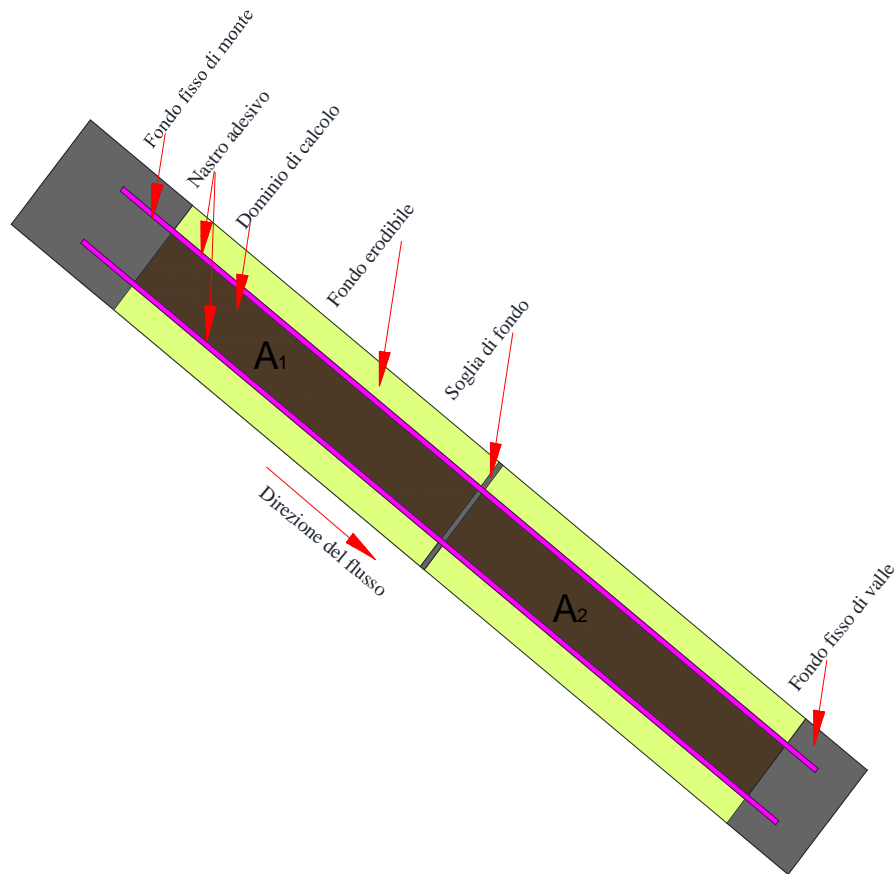


Figura 4.17. Dominio di calcolo rilevato dal Laser Scanner.

La rappresentazione 3D delle fosse di scavo è stata ottenuta elaborando i dati con i *software Excel e Mathematica*. Nelle Figg. 4.18a÷h si riportano le rappresentazioni grafiche delle fosse di scavo e delle curve di livello per le prove della serie A effettuate con il fondo di sola sabbia.

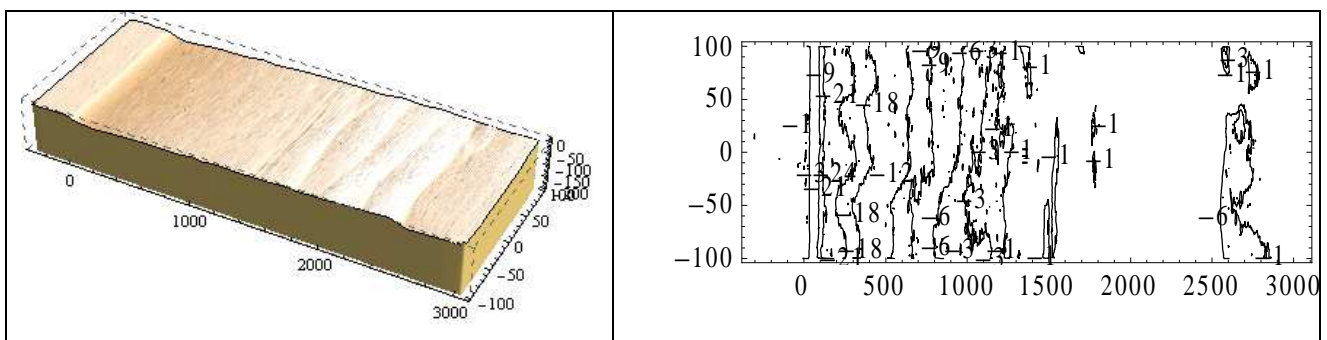


Figura 4.18a. Fossa di scavo localizzata per la prova A<sub>1</sub> (sabbia), di durata 1 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)



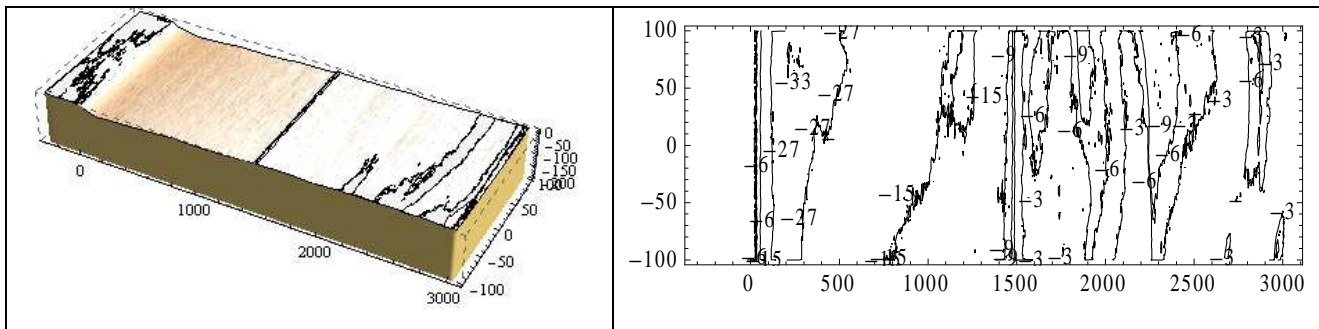


Figura 4.18b. Fossa di scavo localizzato per la prova A<sub>2</sub> (sabbia), di durata 3 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

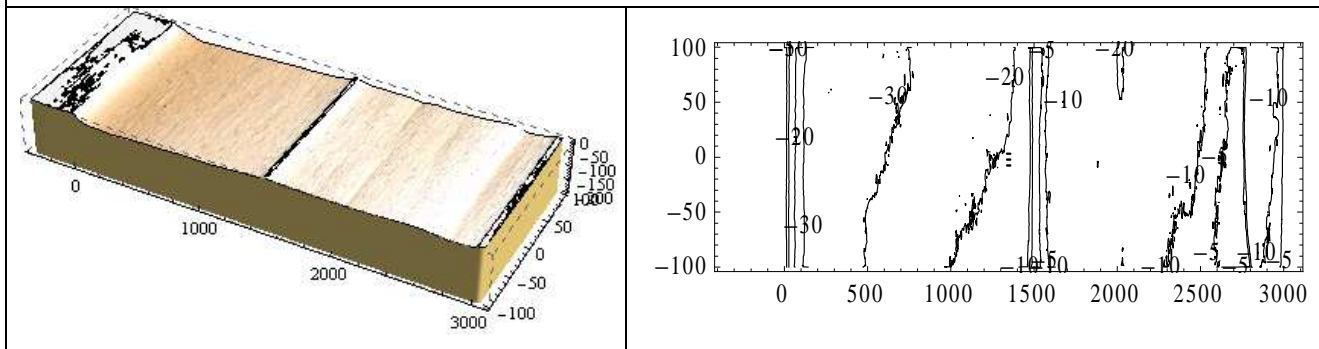


Figura 4.18c. Fossa di scavo localizzato per la prova A<sub>3</sub> (sabbia), di durata 6 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

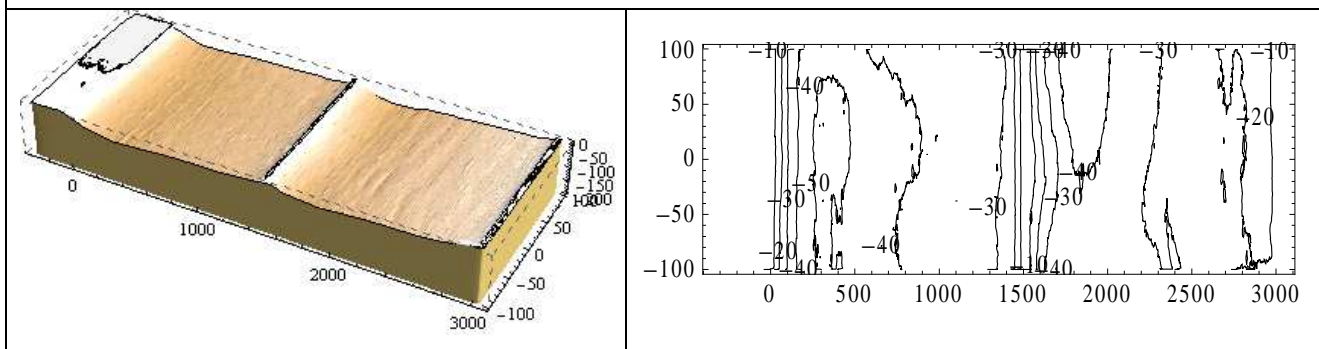


Figura 4.18d. Fossa di scavo localizzato per la prova A<sub>4</sub> (sabbia), di durata 12 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

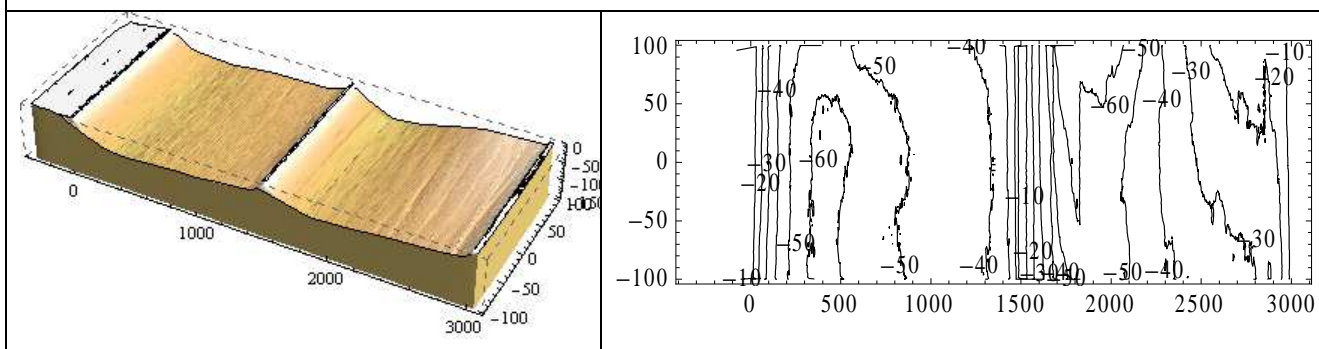


Figura 4.18e. Fossa di scavo localizzato per la prova A<sub>5</sub> (sabbia), di durata 24 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

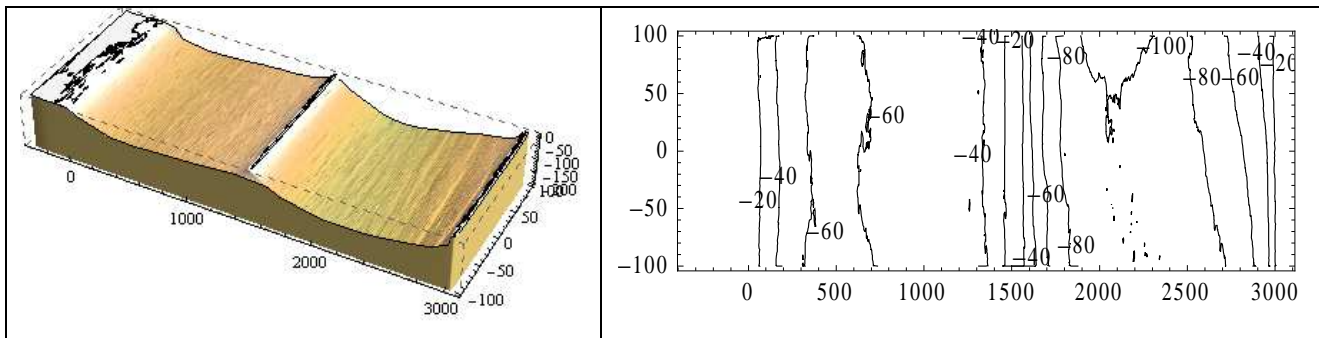


Figura 4.18f. Fossa di scavo localizzato per la prova  $A_6$  (sabbia), di durata 48 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

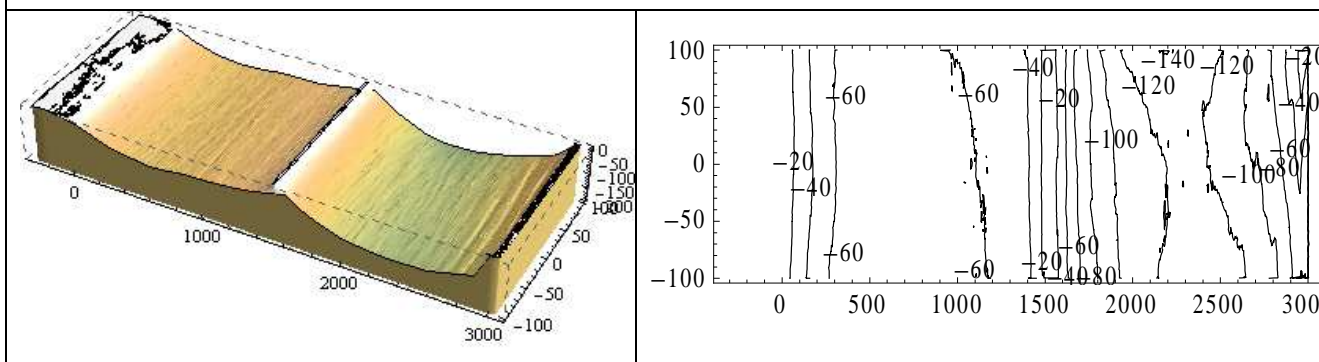


Figura 4.18g. Fossa di scavo localizzato per la prova  $A_7$  (sabbia), di durata 96 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

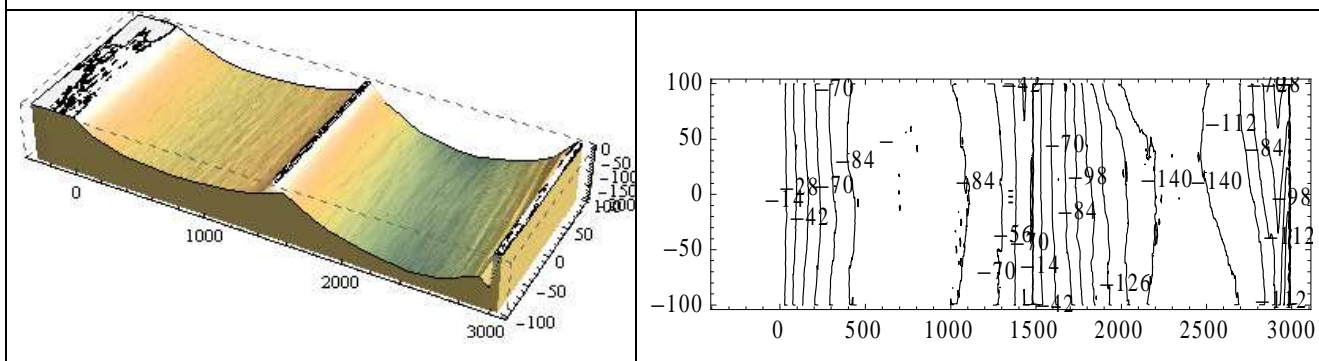


Figura 4.18h. Fossa di scavo localizzato per la prova  $A_8$  (sabbia), di durata 144 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

Una prima osservazione dei rilievi consente di notare la presenza di un fenomeno erosivo bidimensionale, tipica dei sedimenti incoerenti.

Analoghe rappresentazioni grafiche sono state prodotte le prove della serie A con fondo costituito dalla miscela coesiva (Figg. 4.19a÷h).

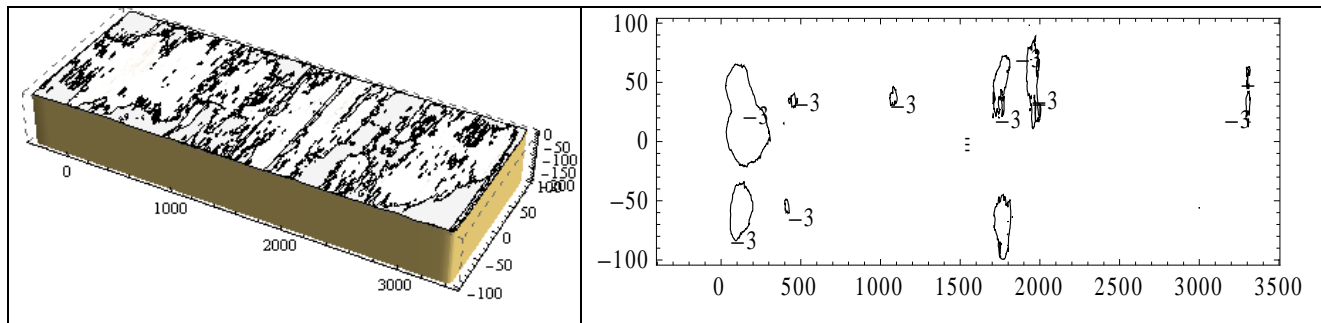


Figura 4.19a. Fossa di scavo localizzato per la prova A<sub>1</sub> (miscela coesiva), di durata 1 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

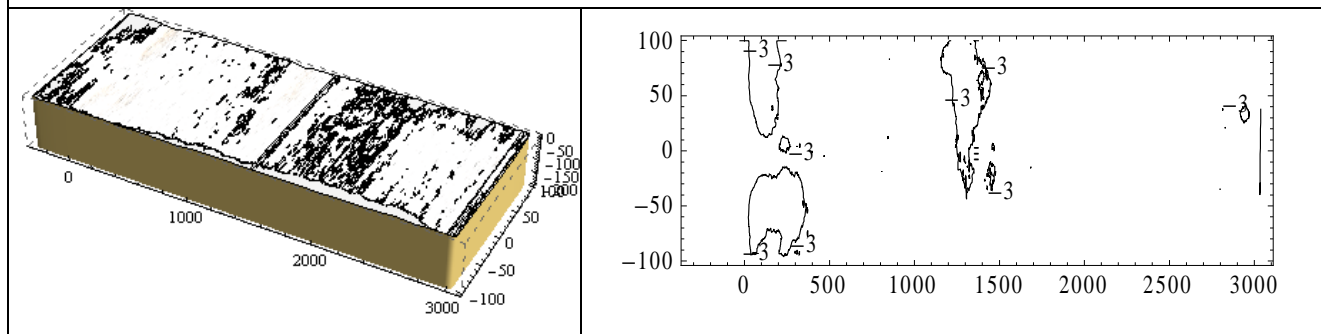


Figura 4.19b. Fossa di scavo localizzato per la prova A<sub>2</sub> (miscela coesiva), di durata 3 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

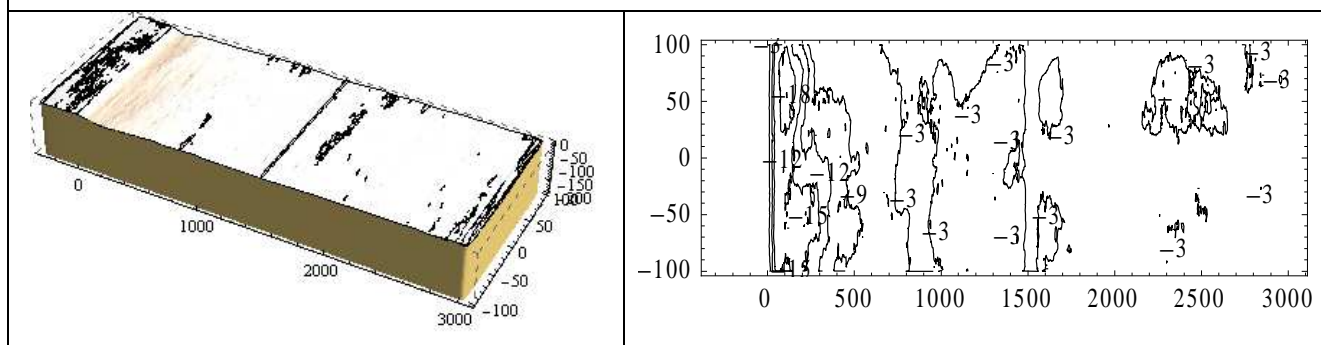


Figura 4.19c. Fossa di scavo localizzato per la prova A<sub>3</sub> (miscela coesiva), di durata 6 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

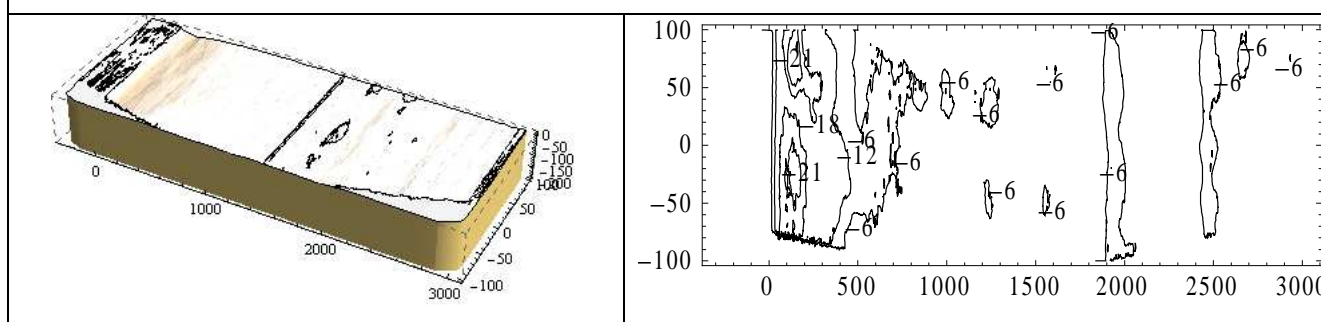


Figura 4.19d. Fossa di scavo localizzato per la prova A<sub>4</sub> (miscela coesiva), di durata 12 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

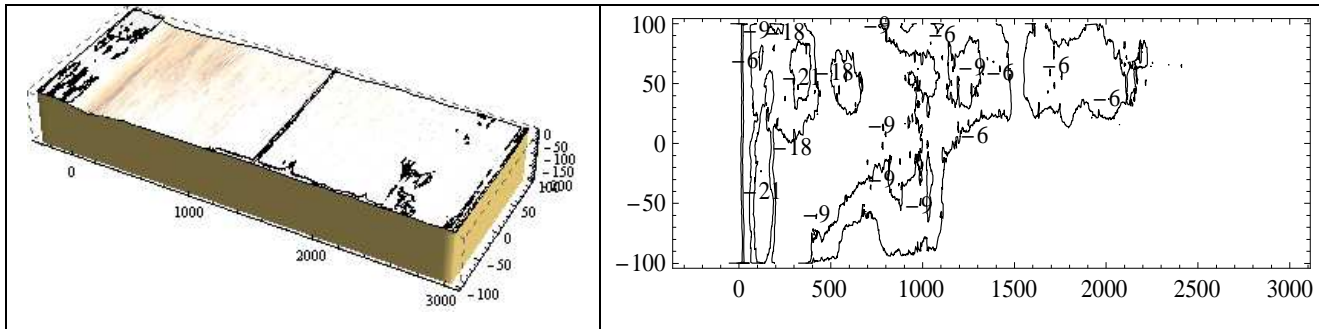


Figura 4.19e. Fossa di scavo localizzato per la prova A<sub>5</sub> (miscela coesiva), di durata 24 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

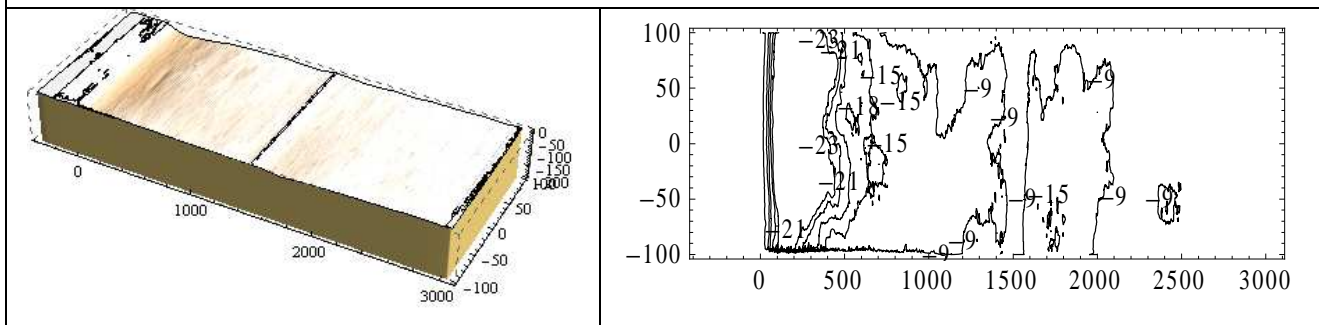


Figura 4.19f. Fossa di scavo localizzato per la prova A<sub>6</sub> (miscela coesiva), di durata 48 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

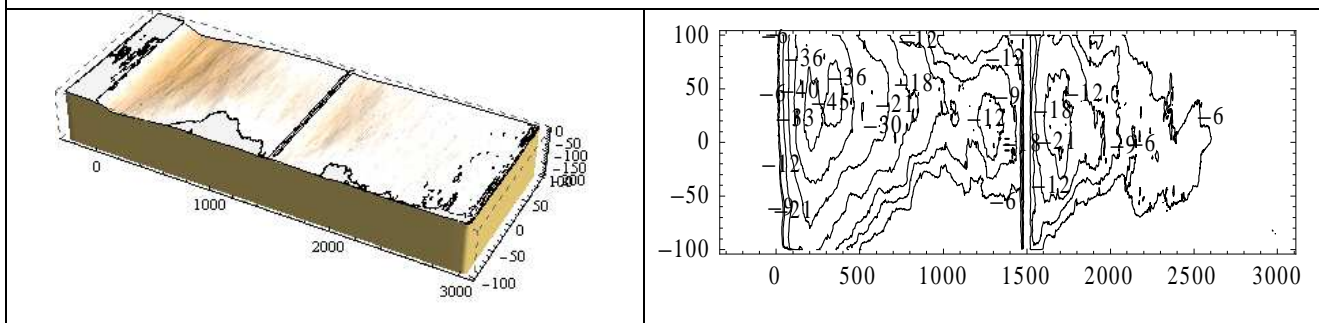


Figura 4.19g. Fossa di scavo localizzato per la prova A<sub>7</sub> (miscela coesiva), di durata 96 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

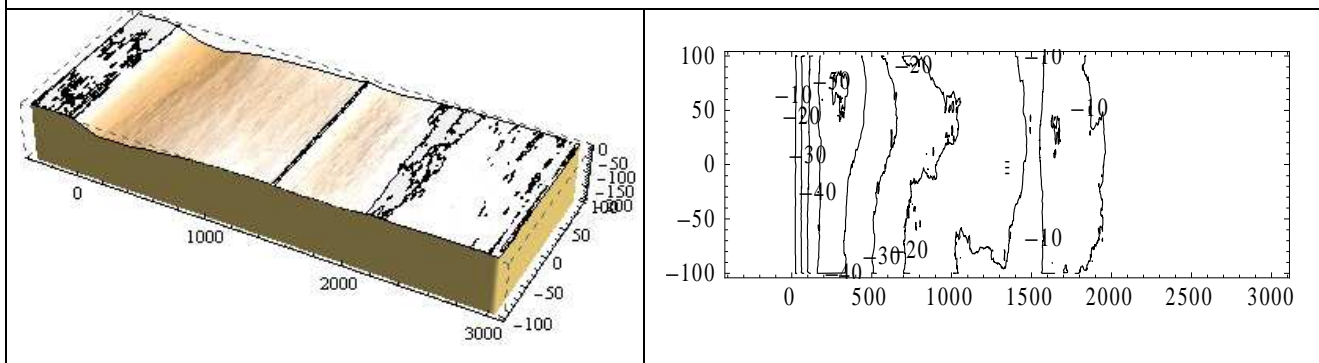


Figura 4.19h. Fossa di scavo localizzato per la prova A<sub>8</sub> (miscela coesiva), di durata 144 h:  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

In questo caso, le rappresentazioni grafiche evidenziano chiaramente la presenza di un fenomeno erosivo tridimensionale. Infatti, si perde l'andamento delle curve di livello per linee trasversali quasi parallele, tipico degli scavi bidimensionali in fondo incoerente.

In Fig. 4.20 si riportano a confronto le curve di livello delle fosse di scavo dopo 96 h, rispettivamente per la sabbia e per la miscela coesiva.

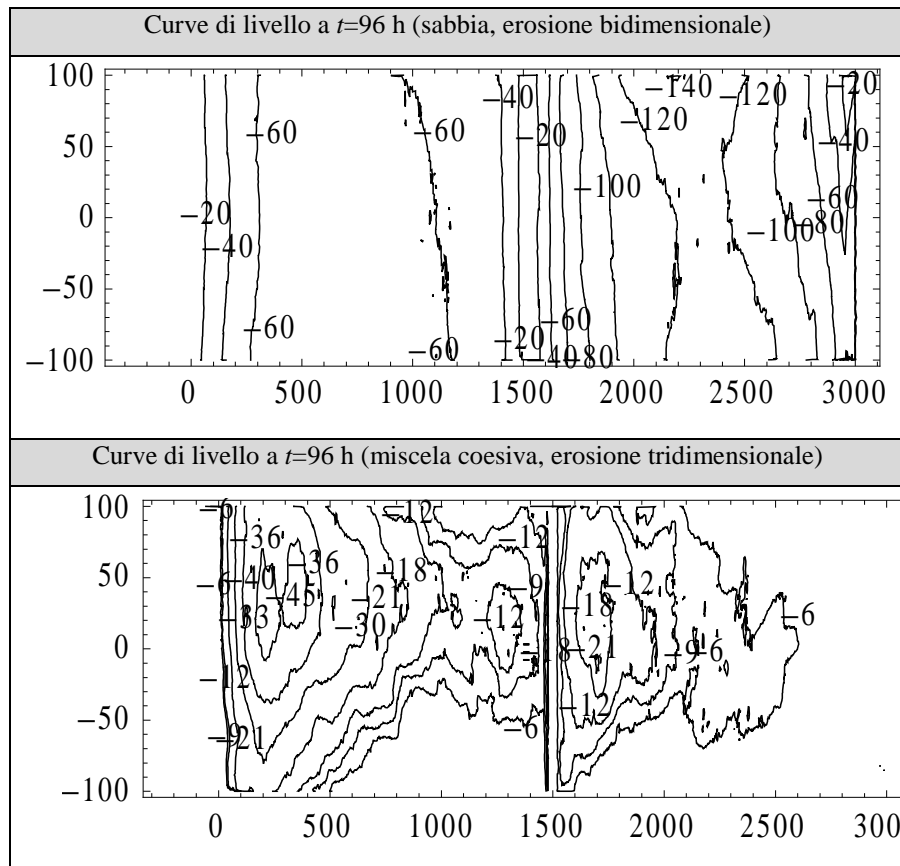
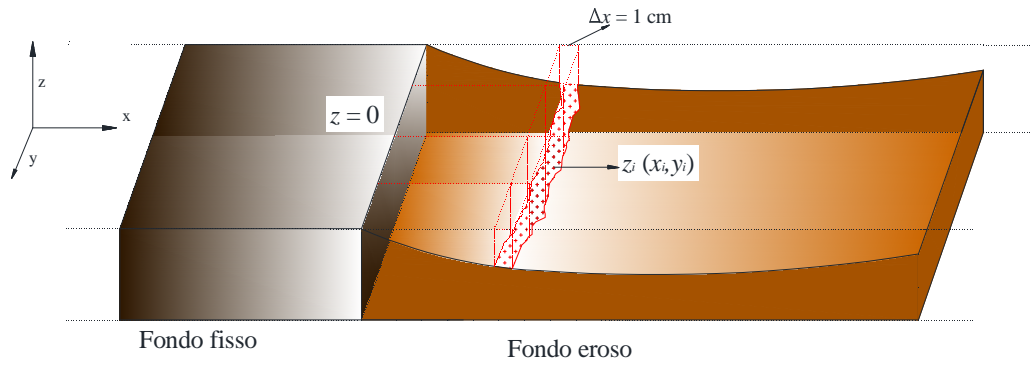


Figura 4.20. Confronto tra le curve di livello a  $t=96$  h per fondo costituito da sabbia e da miscela coesiva.

Successivamente, si è proceduto alla determinazione dei profili di scavo, tramite un codice di calcolo realizzato con il programma *Matlab R 2011* (Allegato A).

Essi si sono ricavati per differenza tra la quota del fondo iniziale e le quote rilevate dallo Scanner Laser,  $z_i(x_i, y_i)$ , dopo aver discretizzato il fondo eroso, proiettato sul piano del fondo iniziale, in strisce di spessore  $\Delta x=1$  cm (Fig. 4.21). Poiché lo Scanner Laser era solidale ai binari paralleli al fondo, la quota rilevata per il fondo iniziale era all'incirca costante da punto a punto e poteva essere considerata nulla:  $z_0=0$ .




 Figura 4.21. Discretizzazione del fondo eroso in strisce di spessore  $\Delta x = 1$  cm.

Si sono ricavate, quindi, le profondità di scavo medie, massime e minime, rispettivamente pari a:

$$\bar{d}_s(x_i) = z_0 - \bar{z}_i(x_i) \quad (4.18)$$

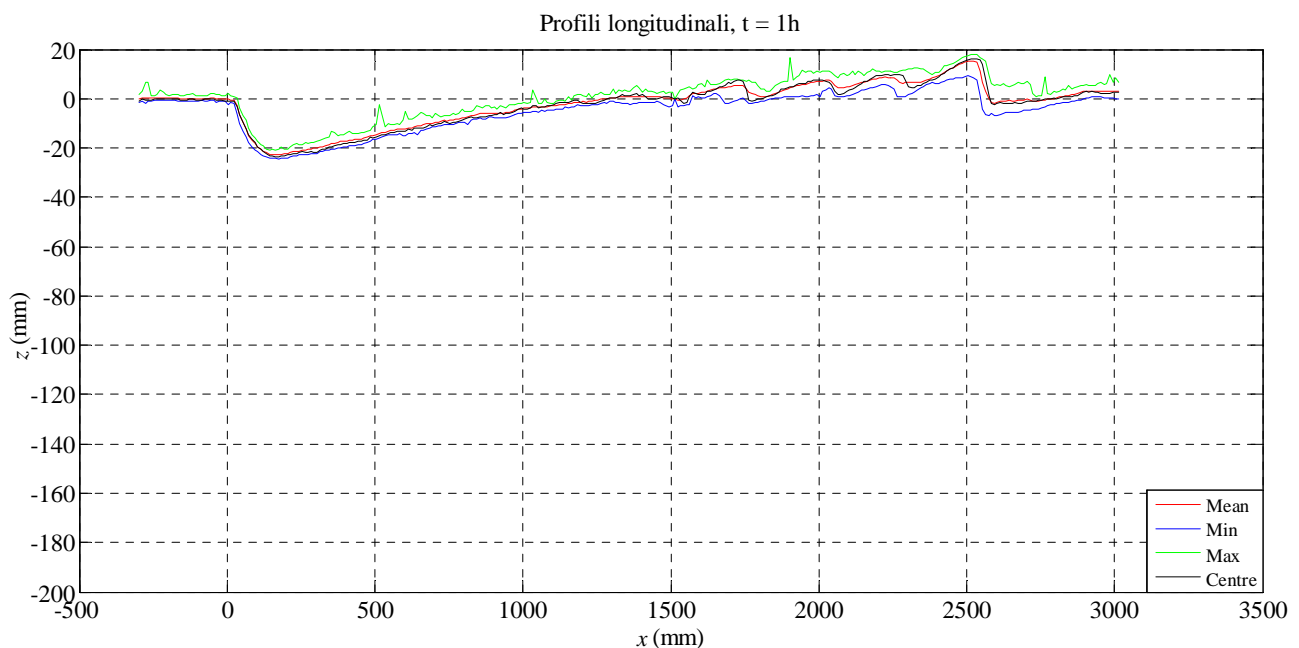
$$\hat{d}_s(x_i) = z_0 - \hat{z}_i(x_i) \quad (4.19)$$

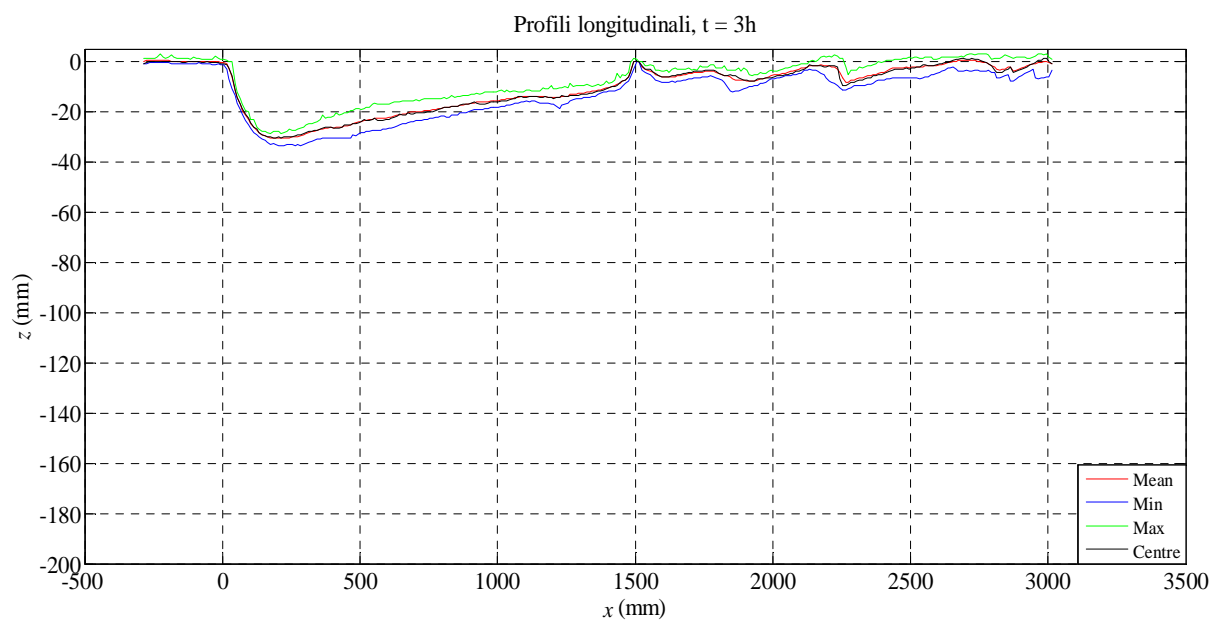
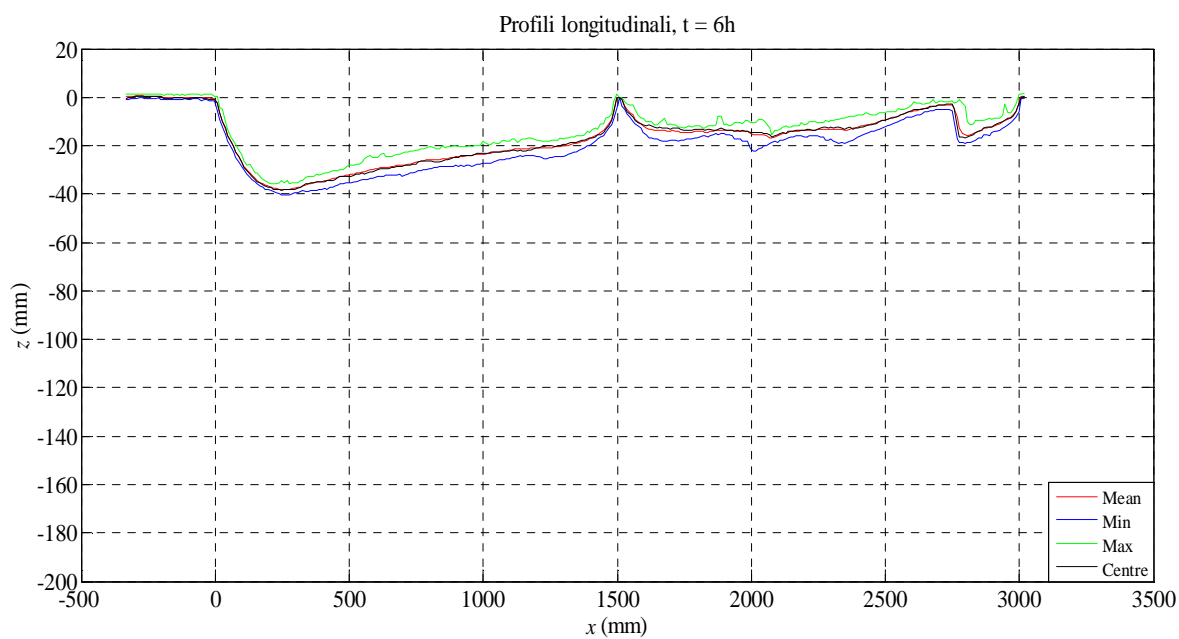
$$\dot{d}_s(x_i) = z_0 - \dot{z}_i(x_i) \quad (4.20)$$

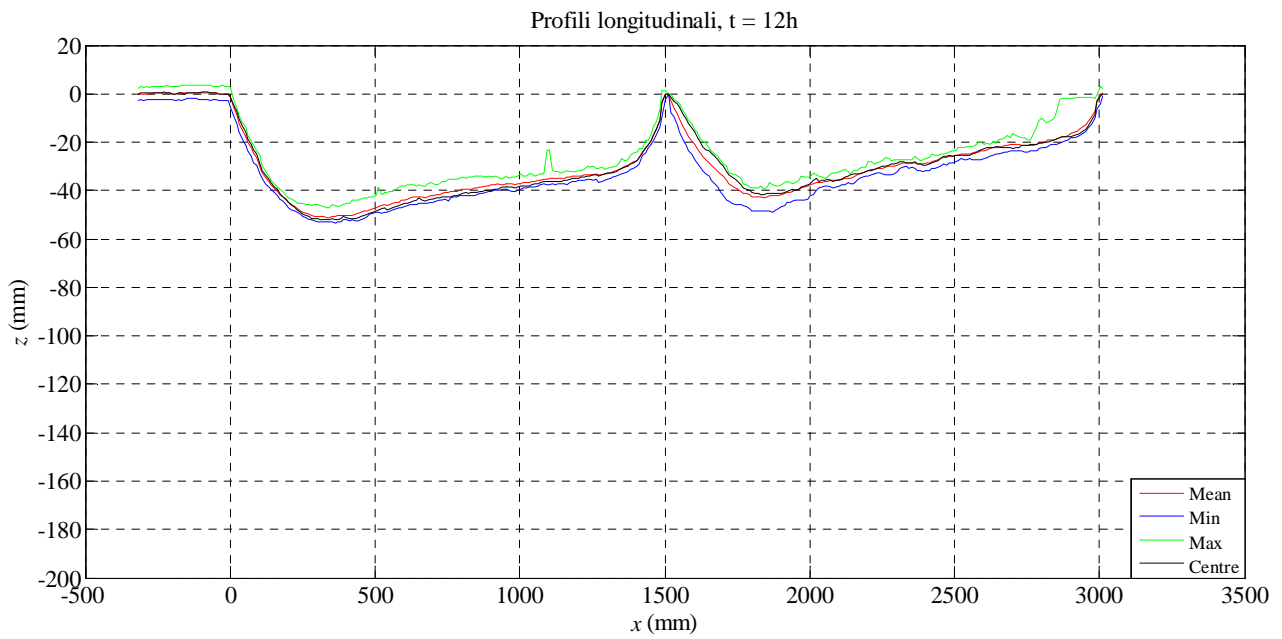
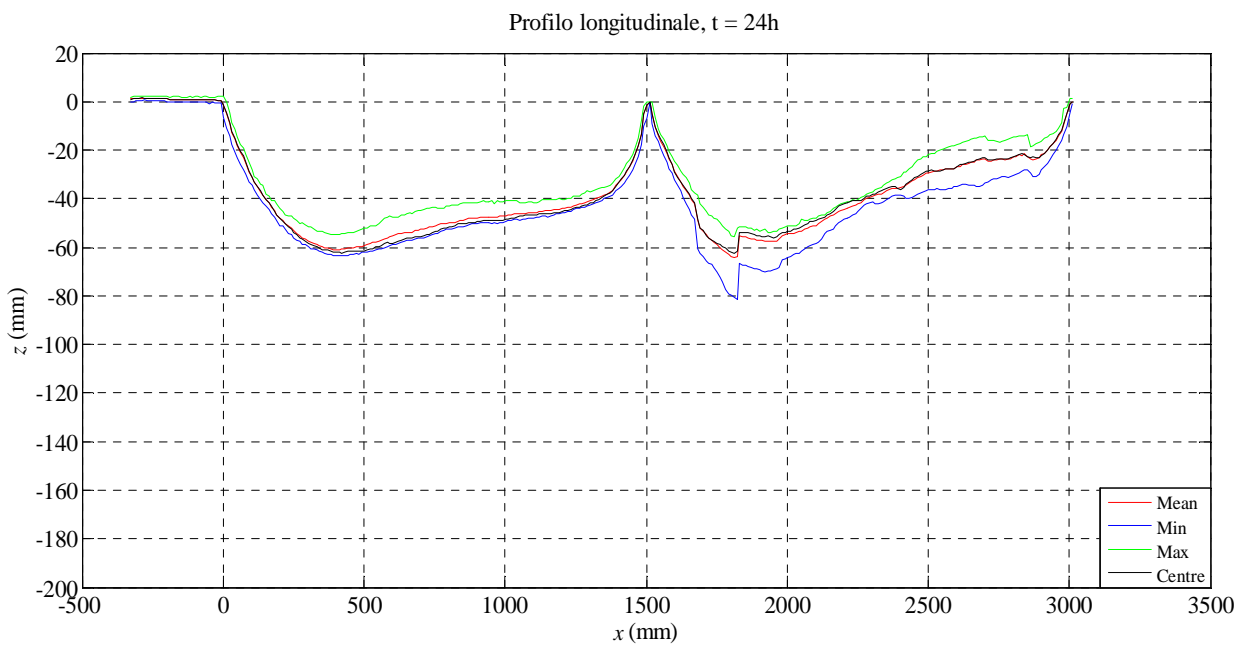
dove:

- $z_0$  è la quota del fondo iniziale, assunta pari a zero;
- $\bar{z}_i(x_i)$ ,  $\hat{z}_i(x_i)$  e  $\dot{z}_i(x_i)$  sono rispettivamente i valori medi, massimi e minimi della quota del fondo per l'i-esima striscia di spessore  $\Delta x = 1$  cm.

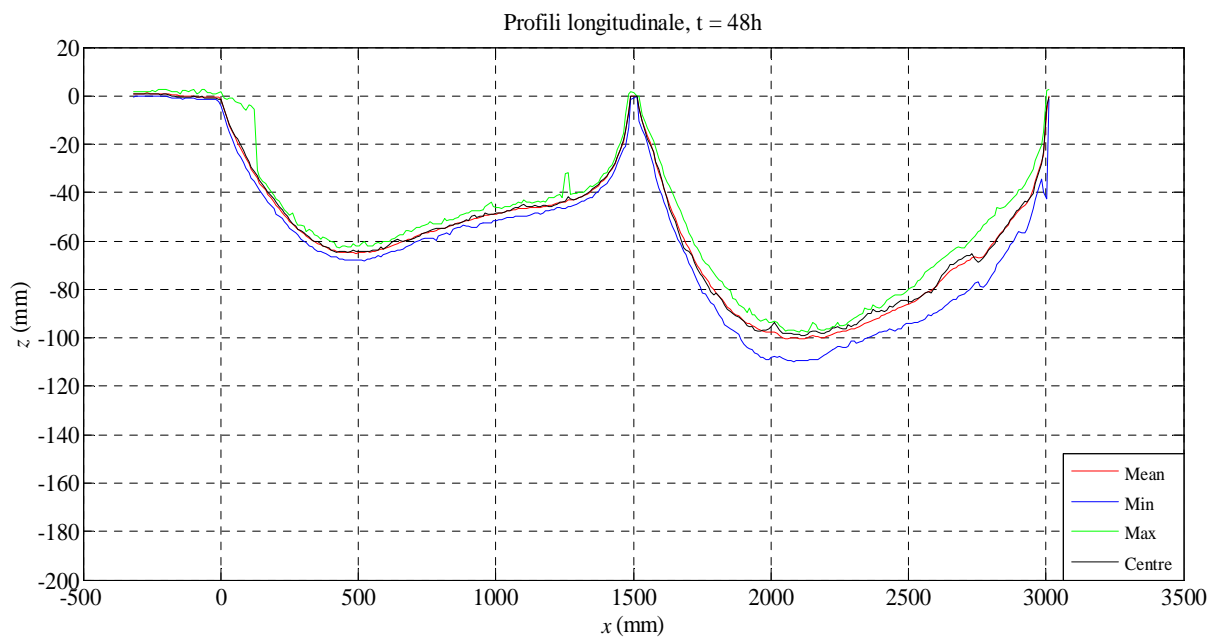
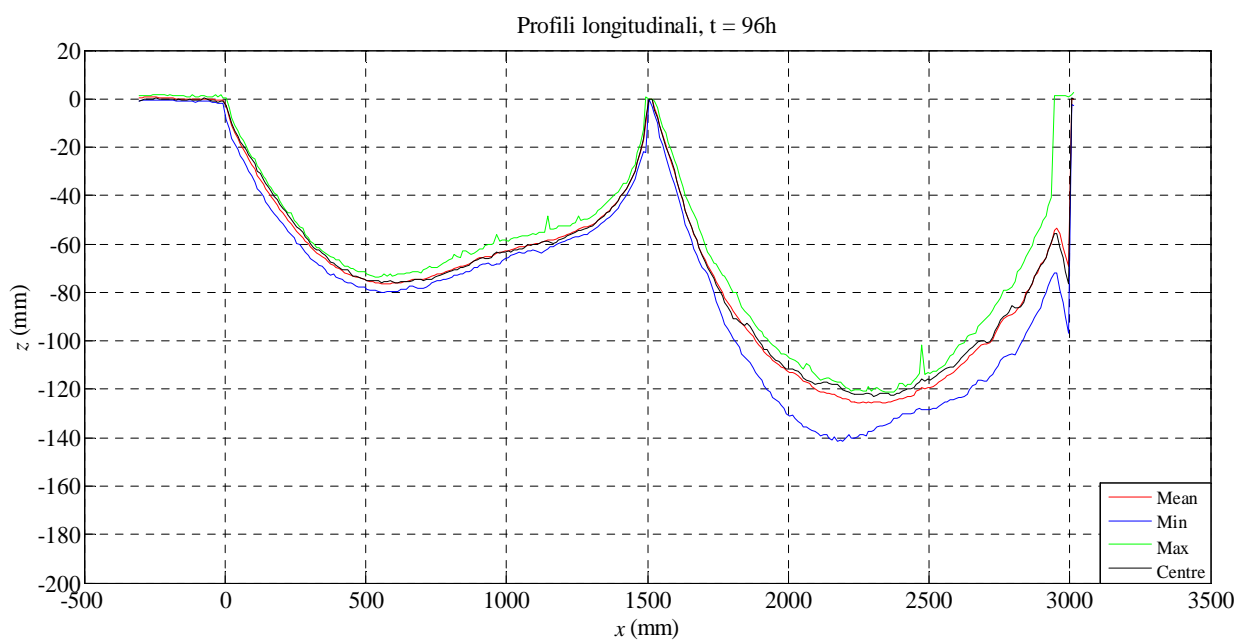
Nelle Figg. 4.22a÷h si riportano i profili longitudinali per le prove della serie A eseguite sul letto di sola sabbia, in cui la linea rossa indica le profondità di scavo medie, la linea blu quelle massime, la linea verde quelle minime e la linea nera il profilo di mezzeria.


 Figura 4.22a. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>1</sub>, sabbia).


 Figura 4.22b. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova  $A_2$ , sabbia).

 Figura 4.22c. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova  $A_3$ , sabbia).


 Figura 4.22d. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>4</sub>, sabbia).

 Figura 4.22e. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>5</sub>, sabbia).




 Figura 4.22f. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>6</sub>, sabbia).

 Figura 4.22g. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>7</sub>, sabbia).

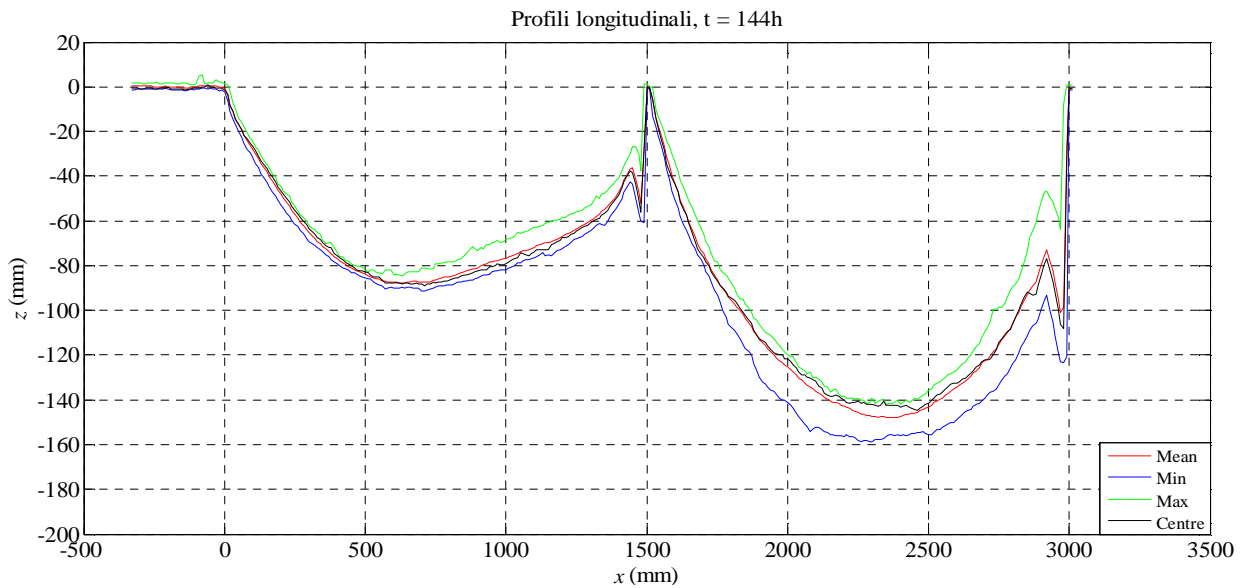


Figura 4.22h. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>8</sub>, sabbia).

Dalle Figg. 4.22a÷h si osserva che le prove di durata 1 h, 3 h e 6 h sono caratterizzate da profili longitudinali che solo nel primo tratto a valle del fondo fisso di monte presentano erosione localizzata, mentre nel secondo tratto, a valle della soglia di fondo, mostrano il fenomeno del deposito, con un esteso accumulo di sedimenti, che dà luogo a una successione di dune.

Inoltre, i profili longitudinali medi, massimi, minimi e di mezzeria si discostano poco l'uno dall'altro anche per le durate maggiori, a conferma del fatto che il fenomeno erosivo è bidimensionale nel letto incoerente. In alcuni casi, nondimeno, i profili suddetti si discostano in maniera più evidente, a causa dell'influenza delle pareti laterali sul fenomeno erosivo e della formazione di vortici in prossimità della faccia di monte della soglia di fondo scoperta dallo scavo.

Nelle Figg. 4.23a÷h si riportano gli analoghi profili longitudinali per le prove della serie A eseguite sul letto costituito dalla miscela coesiva.

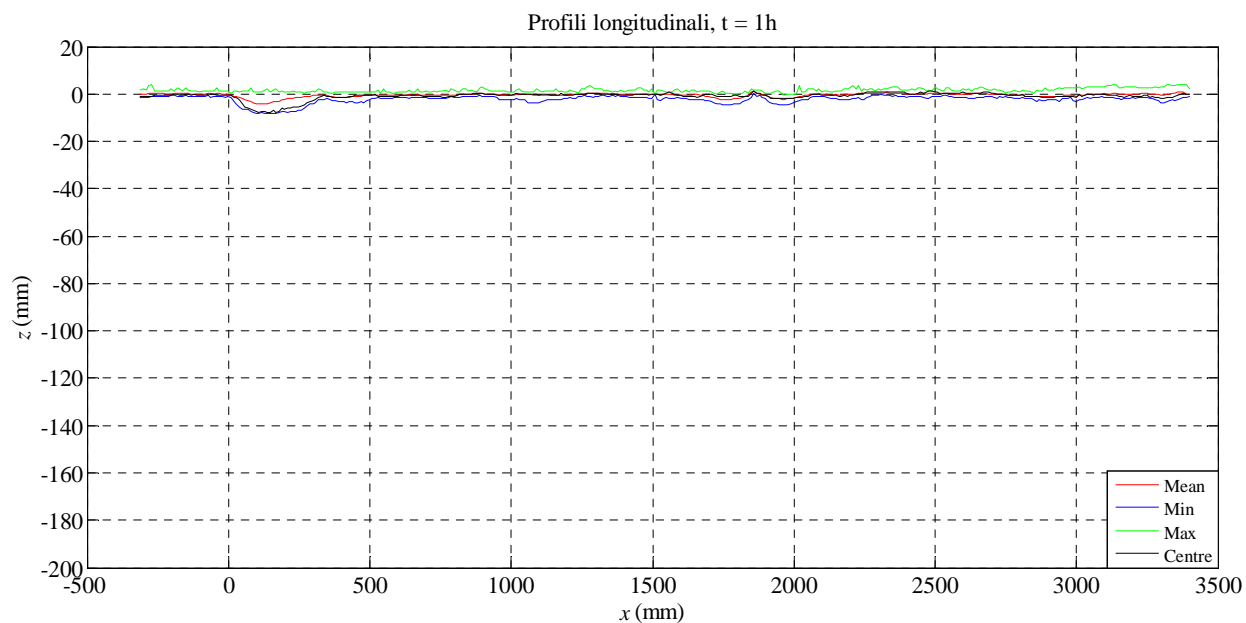


Figura 4.23a. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>1</sub>, miscela coesiva).

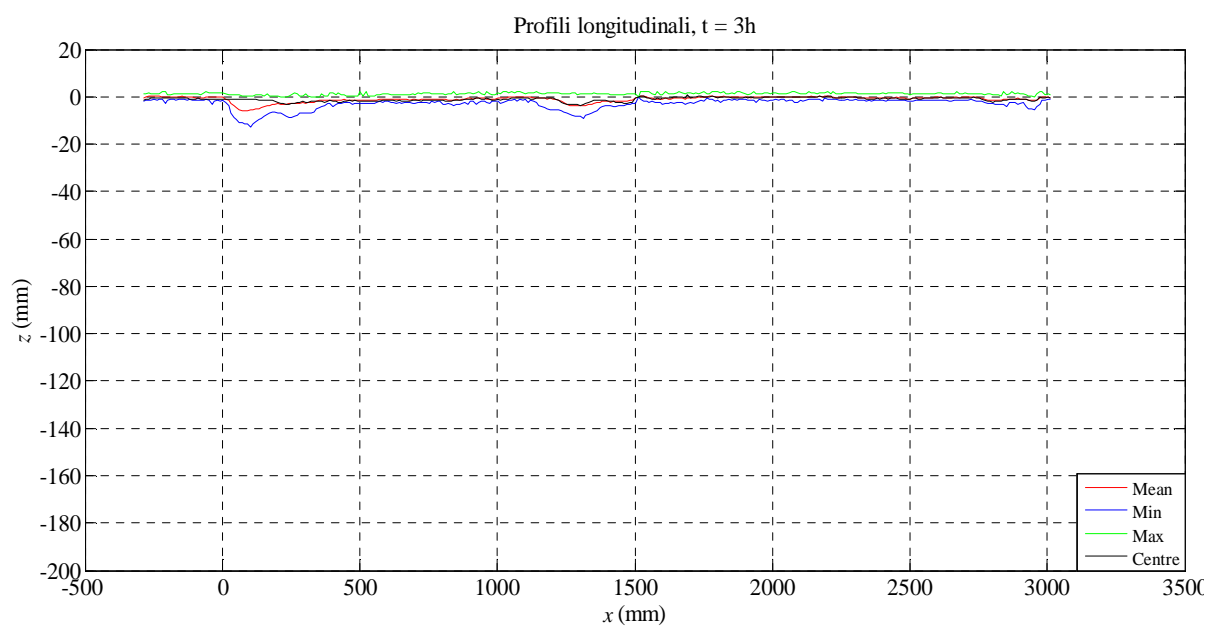
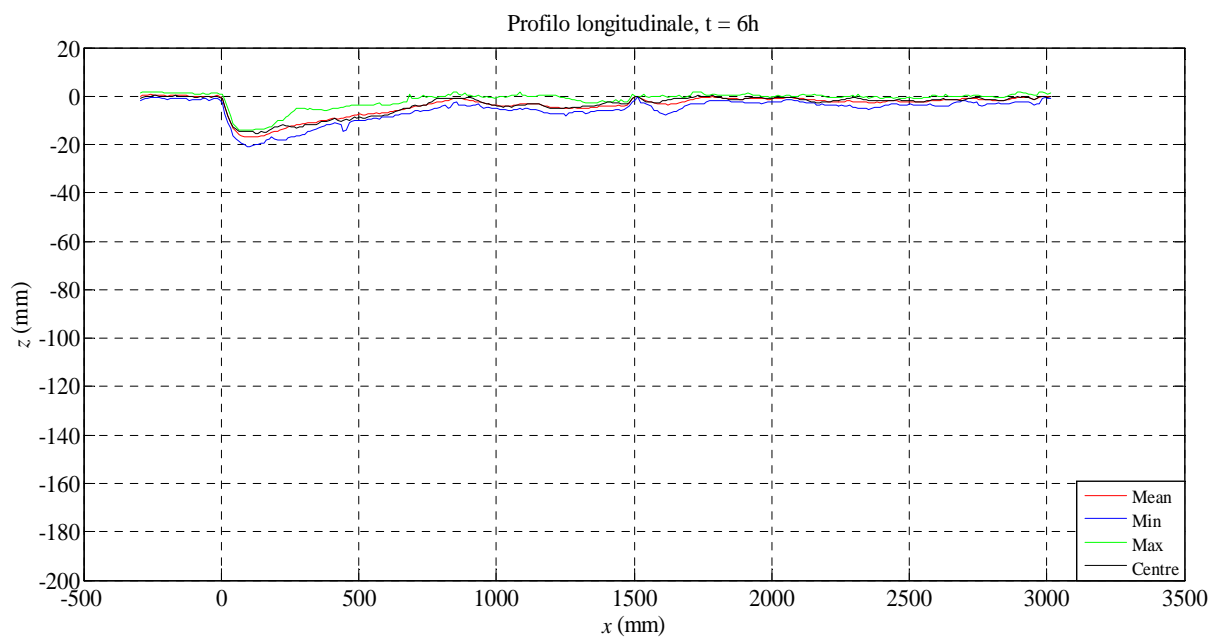
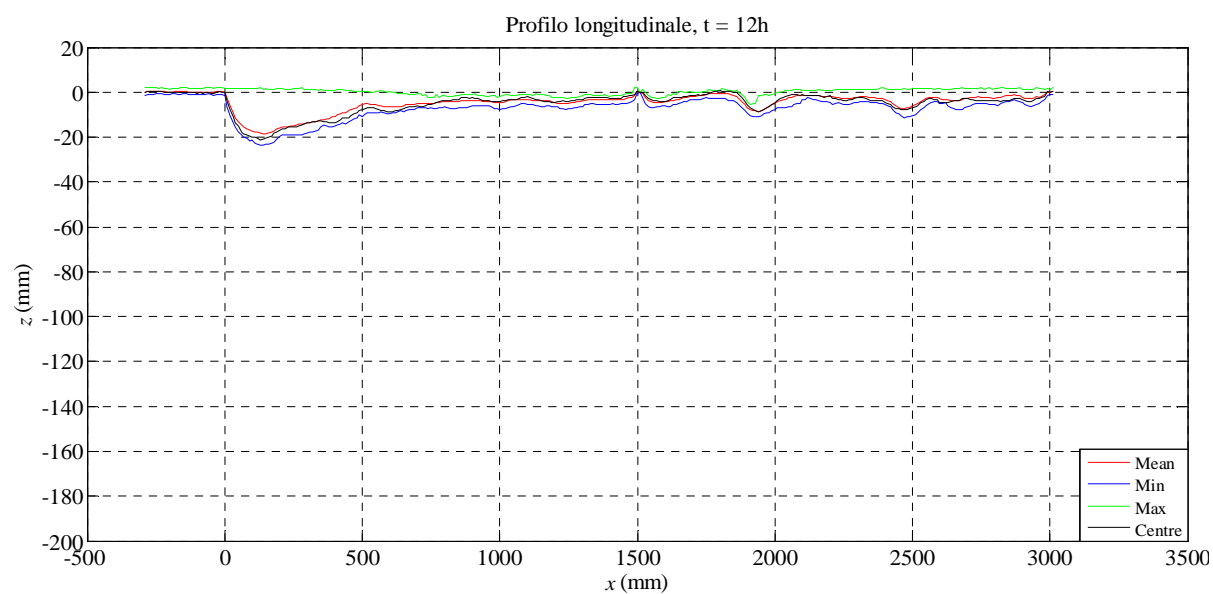
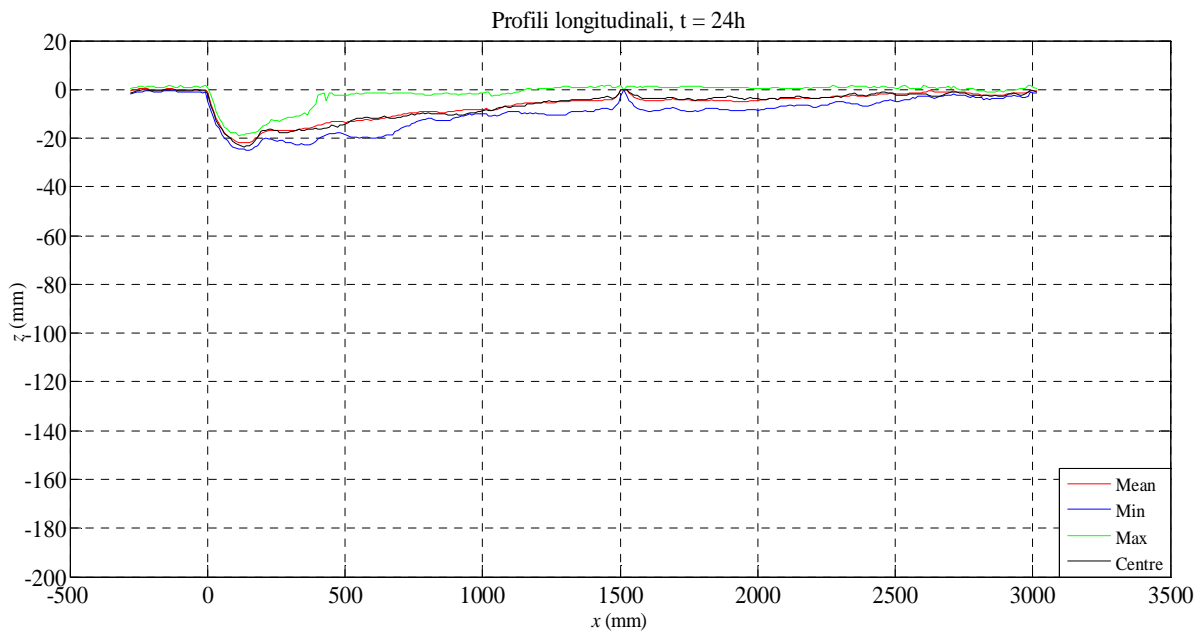
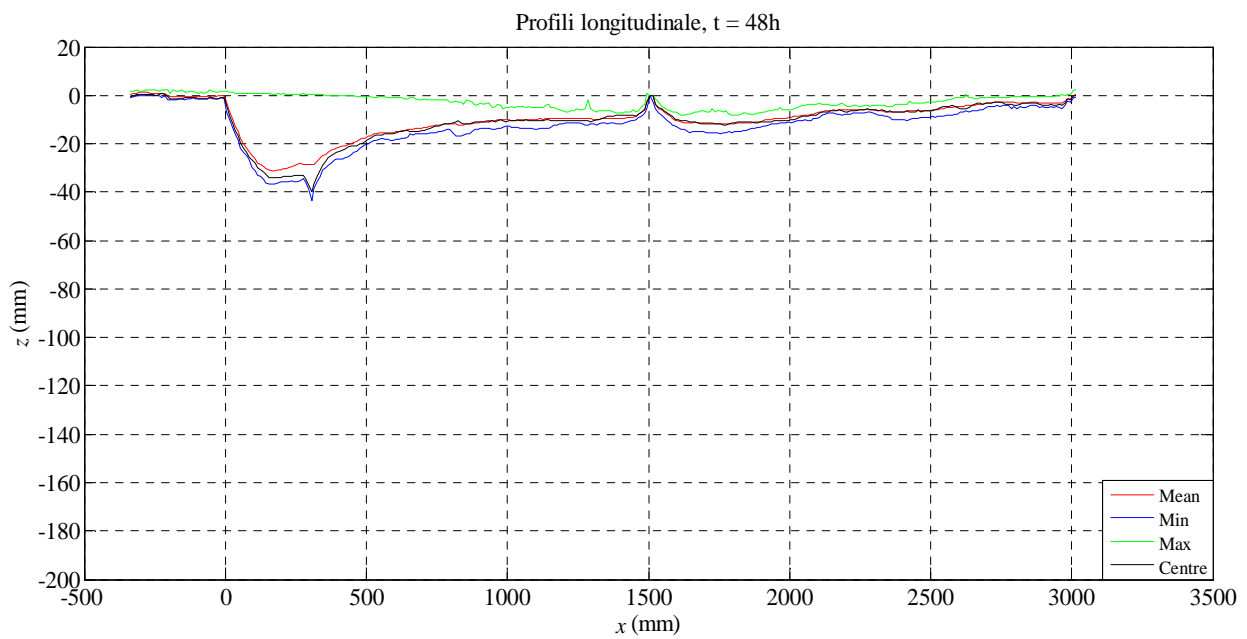
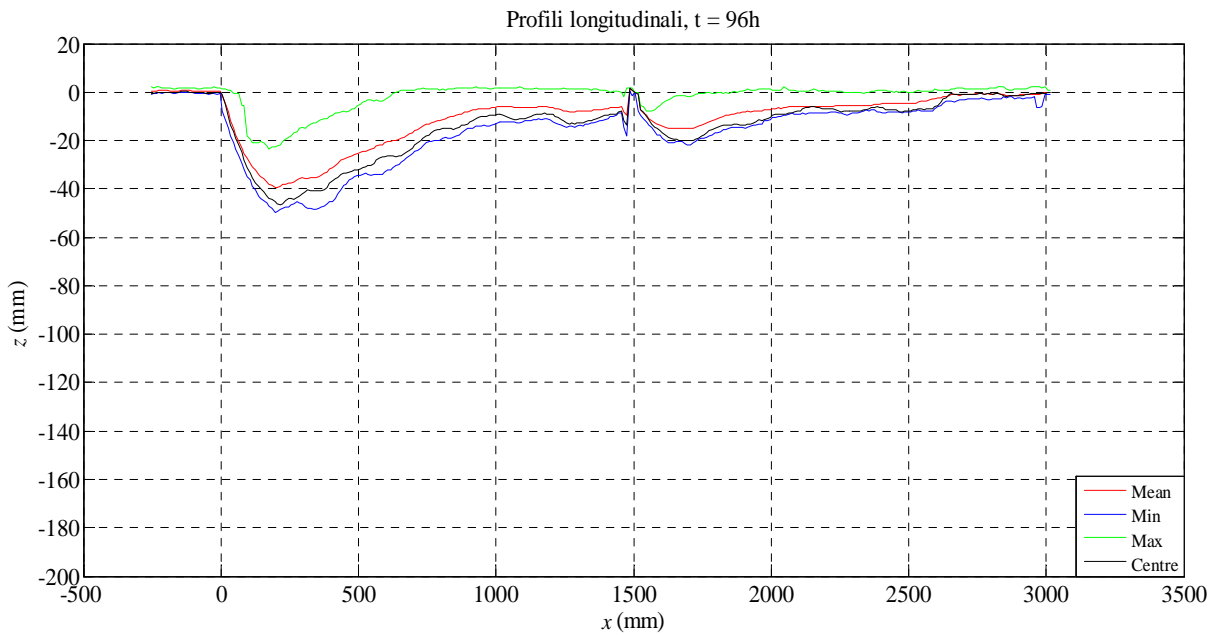
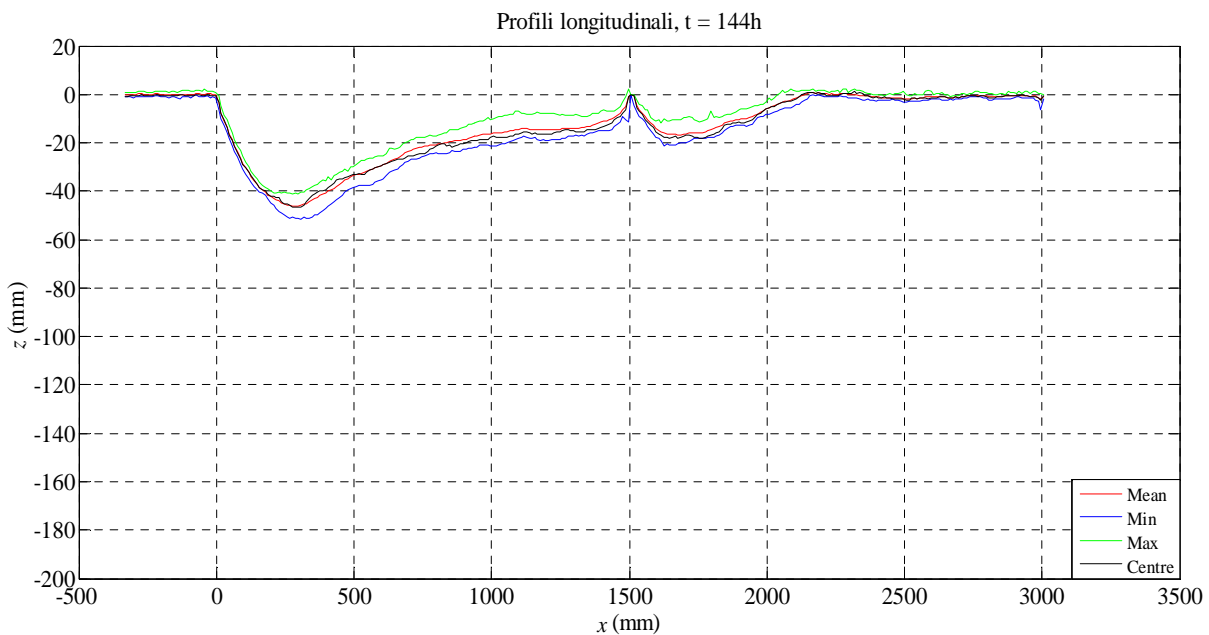


Figura 4.23b. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>2</sub>, miscela coesiva).


 Figura 4.23c. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>3</sub>, miscela coesiva).

 Figura 4.23d. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>4</sub>, miscela coesiva).


 Figura 4.23e. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>5</sub>, miscela coesiva).

 Figura 4.23f. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>6</sub>, miscela coesiva).

Figura 4.23g. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>7</sub>, miscela coesiva).Figura 4.23h. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova A<sub>8</sub>, miscela coesiva).

Dalle Figg. 4.22a÷h si osserva che i profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria si discostano a causa della presenza del materiale coesivo, che rende il fenomeno erosivo tridimensionale.

La prima differenza che si nota tra i profili longitudinali del fondo eroso nel letto di sabbia e in quello costituito dalla miscela coesiva è relativa all'evoluzione temporale delle fosse di scavo. Infatti, nel primo caso la fossa di scavo, oltre ad approfondirsi, subisce un progressivo allungamento; nel secondo, invece, ciò non accade, poiché all'aumentare della profondità di scavo

nel tempo non corrisponde un progressivo allungamento della fossa di scavo. Quanto esposto si può verificare nelle Tabb. 4.9a,b, in cui compaiono le massime profondità di scavo dei profili medi e dei profili massimi, rispettivamente  $\bar{d}_{s,\max}$  e  $\hat{d}_{s,\max}$ , con le relative distanze dal fondo fisso di monte,  $\bar{l}_{s,\max}$  e  $\hat{l}_{s,\max}$ .

Tabella 4.9a. Massime profondità di scavo ricavate dai profili longitudinali medi (serie A).

Durata $t$ (ore)	Fossa di scavo a valle del fondo fisso di monte (sabbia)		Fossa di scavo a valle della soglia di fondo (sabbia)		Fossa di scavo a valle del fondo fisso di monte (miscela coesiva)		Fossa di scavo a valle della soglia di fondo (miscela coesiva)	
	$\bar{d}_{s,\max}$ (mm)	$\bar{l}_{s,\max}$ (mm)	$\bar{d}_{s,\max}$ (mm)	$\bar{l}_{s,\max}$ (mm)	$\bar{d}_{s,\max}$ (mm)	$\bar{l}_{s,\max}$ (mm)	$\bar{d}_{s,\max}$ (mm)	$\bar{l}_{s,\max}$ (mm)
1	22,8	163,8	0,46	1533,8	4,02	108	2,53	1958,55
3	30,53	214,55	7,958	1914,56	6,08	81,85	1,01	1591,94
6	38,14	247,7	16,809	2077,68	16,9	94,15	3,52	1624,16
12	50,99	341,5	42,83	1842,19	18,79	139,9	8,47	1939,93
24	60,9	391,86	64,11	1811,87	21,92	132,7	5,08	1952,68
48	64,98	492,3	100,36	2112,24	31,4	165,74	11,95	1775,74
96	76,51	555,17	125,55	2245,19	39,5	205,7	15,22	1695,76
144	87,81	632,67	147,97	2379,11	46,65	277	16,78	1677,06

Tabella 4.9b. Massime profondità di scavo ricavate dai profili longitudinali massimi (serie A).

Durata t (ore)	Fossa di scavo a valle del fondo fisso di monte (sabbia)		Fossa di scavo a valle della soglia di fondo (sabbia)		Fossa di scavo a valle del fondo fisso di monte (miscela coesiva)		Fossa di scavo a valle della soglia di fondo (miscela coesiva)	
	$\hat{d}_{s,max}$ (mm)	$\hat{l}_{s,max}$ (mm)	$\hat{d}_{s,max}$ (mm)	$\hat{l}_{s,max}$ (mm)	$\hat{d}_{s,max}$ (mm)	$\hat{l}_{s,max}$ (mm)	$\hat{d}_{s,max}$ (mm)	$\hat{l}_{s,max}$ (mm)
1	24,3	173,8	3,17	1532,8	8,24	128,55	4,8	1958,55
3	33,7	214,54	8,49	1604,54	12,64	101,84	3,41	1601,84
6	40,3	267,67	18,2	1687,67	21	94,16	7,68	1614,16
12	53,23	362,19	48,75	1872,19	23,65	129,92	11,1	1939,8
24	63,51	411,86	81,45	1821,86	24,83	152,68	9,16	1752,68
48	68,36	522,27	109,97	2082,27	43,57	305,74	15,48	1752,74
96	80,14	565,17	141,32	2175,18	49,65	195,76	21,9	1695,76
144	91,30	708,03	158,8	2263,03	51,4	307,066	21,32	1627,06

Adimensionalizzando i valori delle Tabb. 4.9a,b ( $\bar{d}_{s,max}$ ,  $\hat{d}_{s,max}$ ,  $\bar{l}_{s,max}$  e  $\hat{l}_{s,max}$ ) con quelli relativi alle prove di durata maggiore pari a 144 h ( $\bar{d}_{s,max 144 h}$ ,  $\hat{d}_{s,max 144 h}$ ,  $\bar{l}_{s,max 144 h}$  e  $\hat{l}_{s,max 144 h}$ ), si osserva quanto segue.

Nel caso del letto di sabbia, nella prima fossa di scavo l'andamento del rapporto  $\bar{d}_{s,max} / \bar{d}_{s,max 144 h}$  con  $\bar{l}_{s,max} / \bar{l}_{s,max 144 h}$  è lineare, con coefficiente angolare della retta interpolante di poco inferiore a 1 (retta inclinata di circa 45°), con coefficiente di determinazione  $R^2=0,98$  (Fig. 4.24). Pertanto, i rapporti  $\bar{d}_{s,max} / \bar{d}_{s,max 144 h}$  e  $\bar{l}_{s,max} / \bar{l}_{s,max 144 h}$  assumono valori pressoché identici ai vari istanti temporali e lo scavo cresce proporzionalmente nelle direzioni  $x$  e  $z$ .



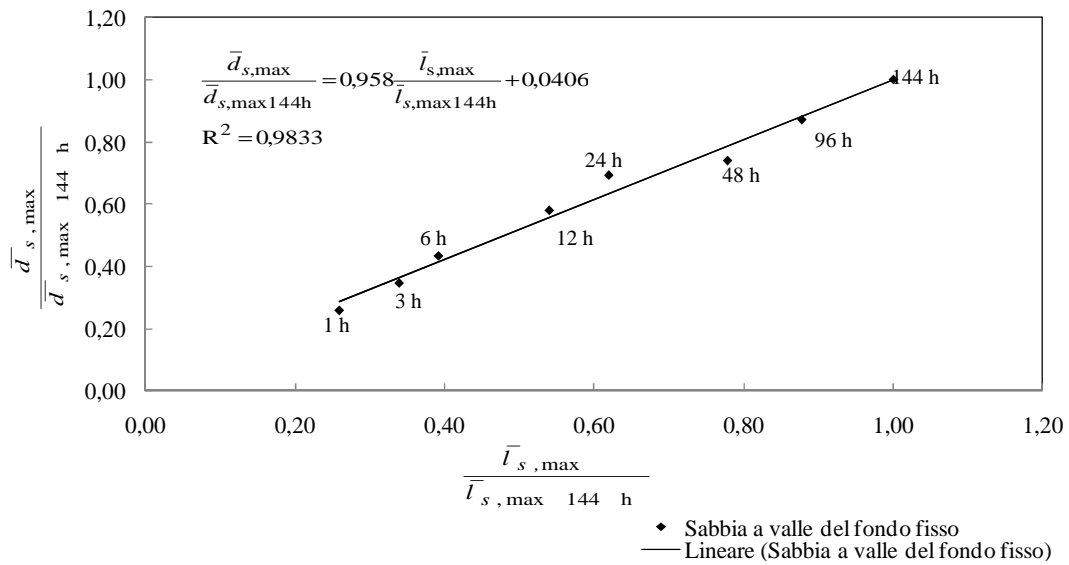


Figura 4.24. Andamento delle massime profondità di scavo e delle relative lunghezze (serie A, sabbia, prima fossa di scavo, profili longitudinali di scavo medi).

Anche nella seconda fossa di scavo si osserva un andamento lineare, confermato da tutti i punti sperimentali (Fig. 4.25a), eccetto quelli relativi alle prove di durata da 1 h a 12 h, che sono stati influenzati dal deposito di sedimenti generato dal trasporto solido proveniente da monte. Escludendo tali punti, si ottiene, come da attendersi, un aumento del coefficiente di determinazione da 0,65 a 0,95 (Fig. 4.25b).

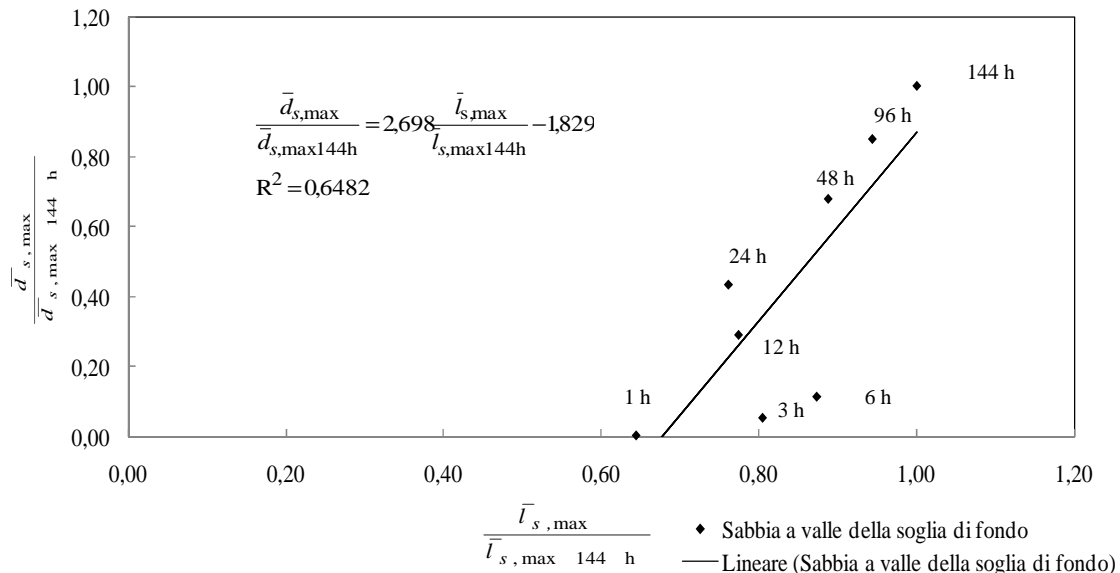


Figura 4.25a. Andamento delle massime profondità di scavo e delle relative lunghezze (serie A, sabbia, seconda fossa di scavo, profili longitudinali di scavo medi).

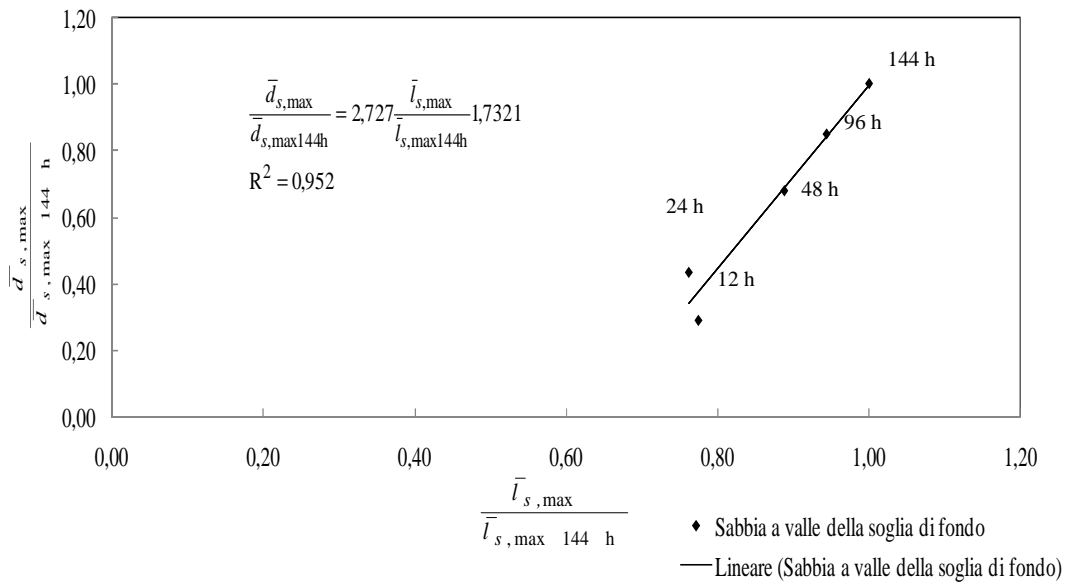


Figura 4.25b. Andamento delle massime profondità di scavo e delle relative lunghezze per i dati che non risentono del fenomeno di deposito (serie A, sabbia, seconda fossa di scavo, profili longitudinali di scavo medi).

Si nota nella Fig. 4.25b che la retta interpolare non risulta inclinata di  $45^\circ$ ; pertanto, i rapporti  $\bar{d}_{s,\max} / \bar{d}_{s,\max 144\text{ h}}$  e  $\bar{l}_{s,\max} / \bar{l}_{s,\max 144\text{ h}}$  non hanno gli stessi valori, probabilmente perché il fenomeno erosivo risente sia dell'influenza dei vortici generati dalla sporgenza della soglia, sia del detto fenomeno di deposito.

Per quanto riguarda il fondo costituito dalla miscela coesiva, nella prima fossa di scavo si conferma l'andamento lineare, anche se con minore coefficiente di determinazione ( $R^2=0,87$ ), a causa della variabilità con cui si posiziona la massima profondità di scavo  $\bar{l}_{s,\max}$ : infatti, la disposizione dei dati nel grafico non segue l'ordine cronologico delle prove, poiché a volte la posizione del massimo scavo arretra nel tempo, per l'asportazione di piccoli agglomerati di miscela coesiva in posizioni imprevedibili (Fig. 4.26).

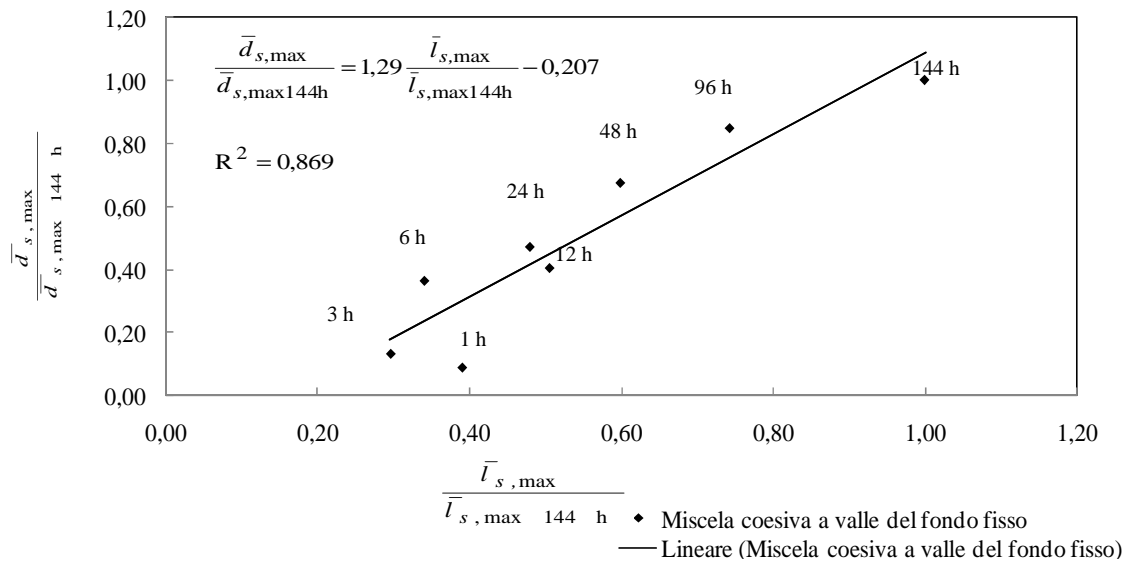


Figura 4.26. Andamento delle massime profondità di scavo e delle relative lunghezze (serie A, miscela coesiva, prima fossa di scavo, profili longitudinali di scavo medi).

Sempre nel caso di miscela coesiva, nella seconda fossa di scavo si risente molto della variabilità con cui si posizionano i valori massimi delle profondità di scavo del profilo longitudinale medio, variabilità causata non solo dalla presenza del materiale fine, ma anche dal deposito dei sedimenti provenienti da monte (Fig. 4.27).

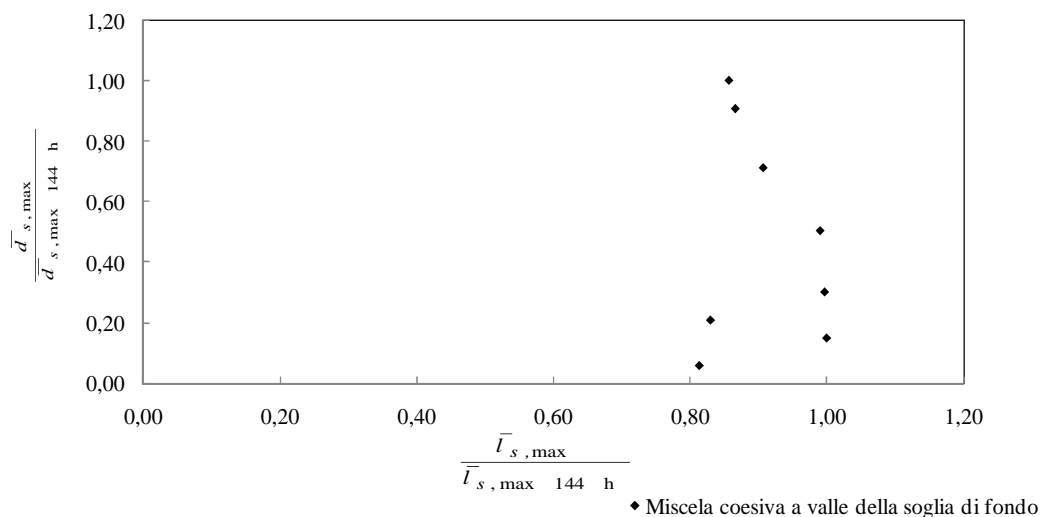


Figura 4.27. Andamento delle massime profondità di scavo e delle relative lunghezze (serie A, miscela coesiva, seconda fossa di scavo, profili longitudinali di scavo medi).

Nelle Tabb. 4.10 e 4.11 si riportano i valori relativi alle Figg. 4.24, 4.25, 4.26 e 4.27.

Tabella 4.10. Rapporti tra le massime profondità di scavo dei profili medi e le relative lunghezze (serie A, sabbia).

Prima fossa di scavo		Seconda fossa di scavo	
$\bar{d}_{s,max} / \bar{d}_{s,max\ 144\ h}$	$\bar{l}_{s,max} / \bar{l}_{s,max\ 144\ h}$	$\bar{d}_{s,max} / \bar{d}_{s,max\ 144\ h}$	$\bar{l}_{s,max} / \bar{l}_{s,max\ 144\ h}$
0,26	0,26	0,00	0,64
0,35	0,34	0,05	0,80
0,43	0,39	0,11	0,87
0,58	0,54	0,29	0,77
0,69	0,62	0,43	0,76
0,74	0,78	0,68	0,89
0,87	0,88	0,85	0,94
1,00	1,00	1,00	1,00

Tabella 4.11. Rapporti tra le massime profondità di scavo dei profili medi e le relative lunghezze (serie A, miscela coesiva).

Prima fossa di scavo		Seconda fossa di scavo	
$\bar{d}_{s,max} / \bar{d}_{s,max\ 144\ h}$	$\bar{l}_{s,max} / \bar{l}_{s,max\ 144\ h}$	$\bar{d}_{s,max} / \bar{d}_{s,max\ 144\ h}$	$\bar{l}_{s,max} / \bar{l}_{s,max\ 144\ h}$
0,09	0,39	0,15	1,00
0,13	0,30	0,06	0,81
0,36	0,34	0,21	0,83
0,40	0,51	0,50	0,99
0,47	0,48	0,30	1,00
0,67	0,60	0,71	0,91
0,85	0,74	0,91	0,87
1,00	1,00	1,00	0,86

Gli andamenti sopra descritti risultano confermati anche dall'analisi dei valori massimi ricavati dai profili longitudinali massimi (Figg. 4.28a,b per la sabbia, Figg. 4.29a,b per la miscela coesiva).

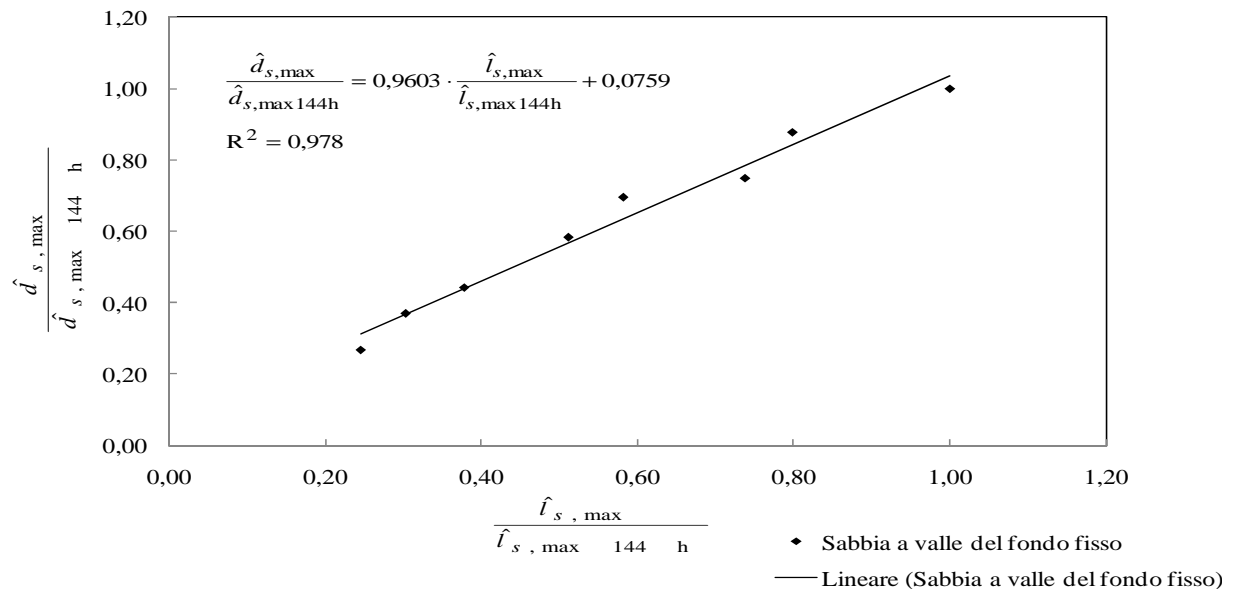


Figura 4.28a. Andamento delle massime profondità di scavo e delle relative lunghezze (serie A, sabbia, prima fossa di scavo, profili longitudinali di scavo massimi).

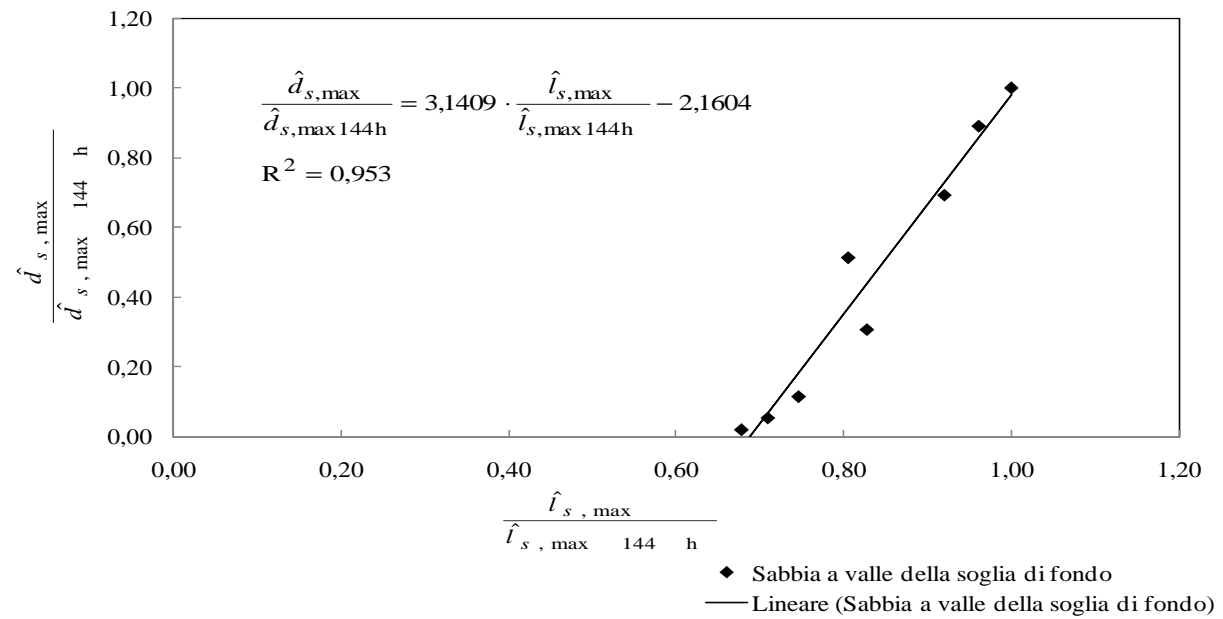


Figura 4.28b. Andamento delle massime profondità di scavo e delle relative lunghezze (serie A, sabbia, seconda fossa di scavo, profili longitudinali di scavo massimi).

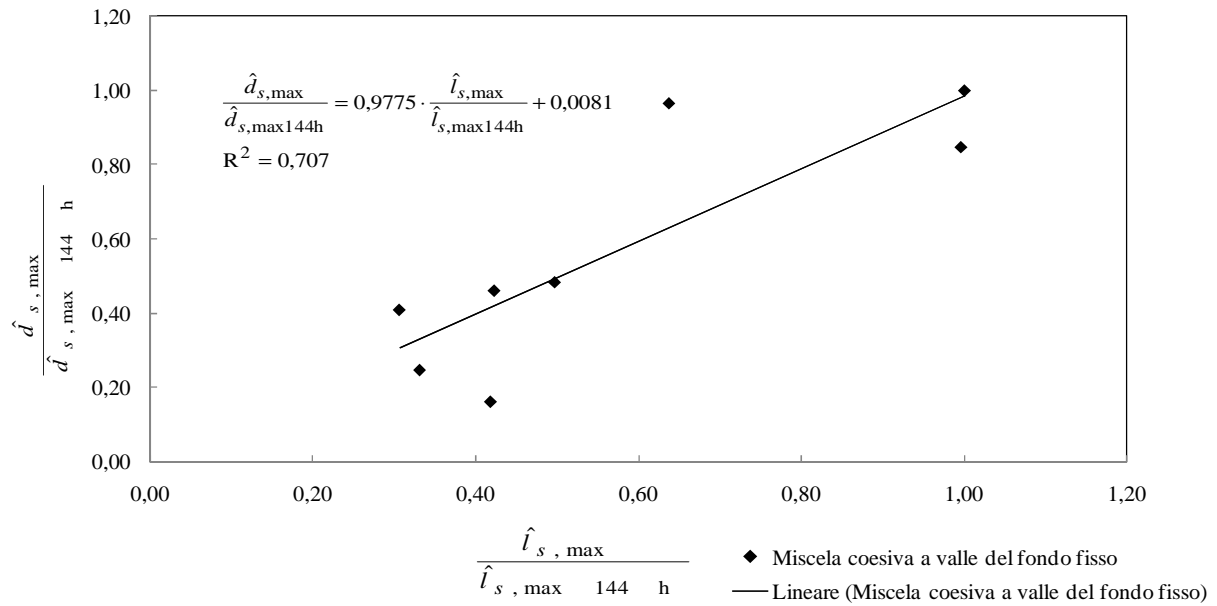


Figura 4.29a. Andamento delle massime profondità di scavo e delle relative lunghezze (serie A, miscela coesiva, prima fossa di scavo, profili longitudinali di scavo massimi).

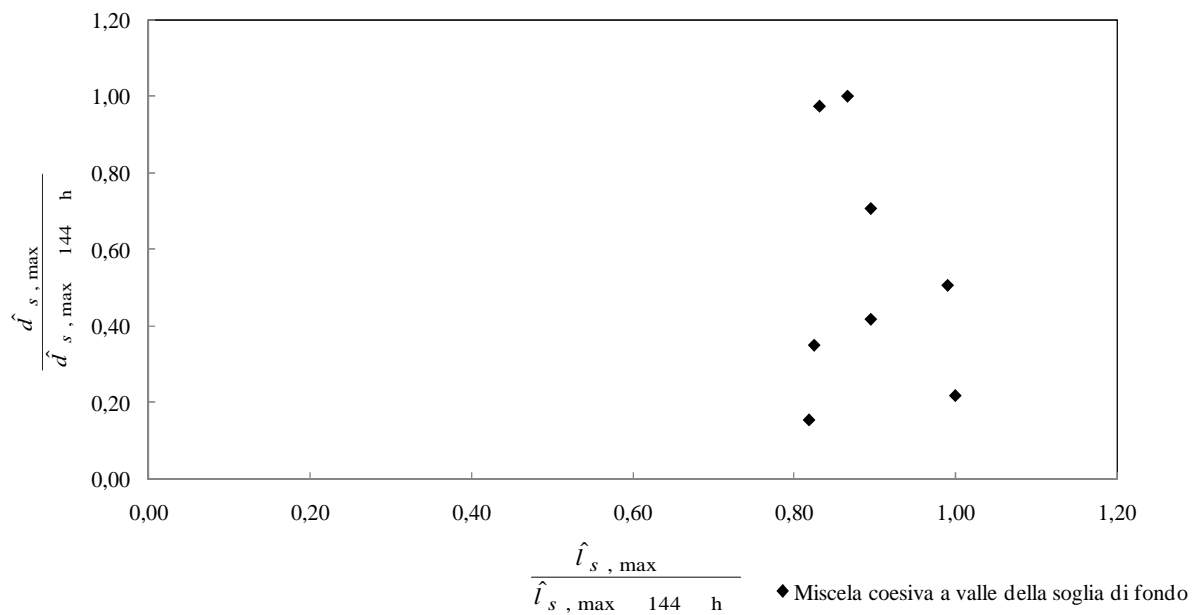


Figura 4.29b. Andamento delle massime profondità di scavo e delle relative lunghezze (serie A, miscela coesiva, seconda fossa di scavo, profili longitudinali di scavo massimi).

Le Tabb. 4.12 e 4.13 riportano i valori numerici dei rapporti rispettivamente per la sabbia e la miscela coesiva:

Tabella 4.12. Rapporti tra le massime profondità di scavo dei profili massimi e le relative lunghezze (serie A, sabbia).

Prima fossa di scavo		Seconda fossa di scavo	
$\hat{d}_{s,\max} / \hat{d}_{s,\max 144\text{ h}}$	$\hat{l}_{s,\max} / \hat{l}_{s,\max 144\text{ h}}$	$\hat{d}_{s,\max} / \hat{d}_{s,\max 144\text{ h}}$	$\hat{l}_{s,\max} / \hat{l}_{s,\max 144\text{ h}}$
0,27	0,25	0,02	0,68
0,37	0,30	0,05	0,71
0,44	0,38	0,11	0,75
0,58	0,51	0,31	0,83
0,70	0,58	0,51	0,81
0,75	0,74	0,69	0,92
0,88	0,80	0,89	0,96
1,00	1,00	1,00	1,00

Tabella 4.13. Rapporti tra le massime profondità di scavo dei profili massimi e le relative lunghezze (serie A, miscela coesiva).

Prima fossa di scavo		Seconda fossa di scavo	
$\hat{d}_{s,\max} / \hat{d}_{s,\max 144\text{ h}}$	$\hat{l}_{s,\max} / \hat{l}_{s,\max 144\text{ h}}$	$\hat{d}_{s,\max} / \hat{d}_{s,\max 144\text{ h}}$	$\hat{l}_{s,\max} / \hat{l}_{s,\max 144\text{ h}}$
0,16	0,42	0,22	1,00
0,25	0,33	0,16	0,82
0,41	0,31	0,35	0,82
0,46	0,42	0,51	0,99
0,48	0,50	0,42	0,89
0,85	1,00	0,71	0,89
0,97	0,64	1,00	0,87
1,00	1,00	0,97	0,83

Dalle Figg. 4.28a,b si evidenzia che i profili di scavo nel fondo di sabbia, oltre ad approfondirsi, mostrano un progressivo allungamento verso valle. Lo stesso non si può dire per il fondo costituito dalla miscela coesiva (Figg. 4.29a,b), poiché all'incremento della massima profondità di scavo non corrisponde l'incremento dell'ascissa cui essa occorre (Tab. 4.13).

Nelle Figg. 4.30a,b (sabbia) e 4.31a,b (miscela coesiva) si riporta l'evoluzione temporale dei profili longitudinali massimi e medi.

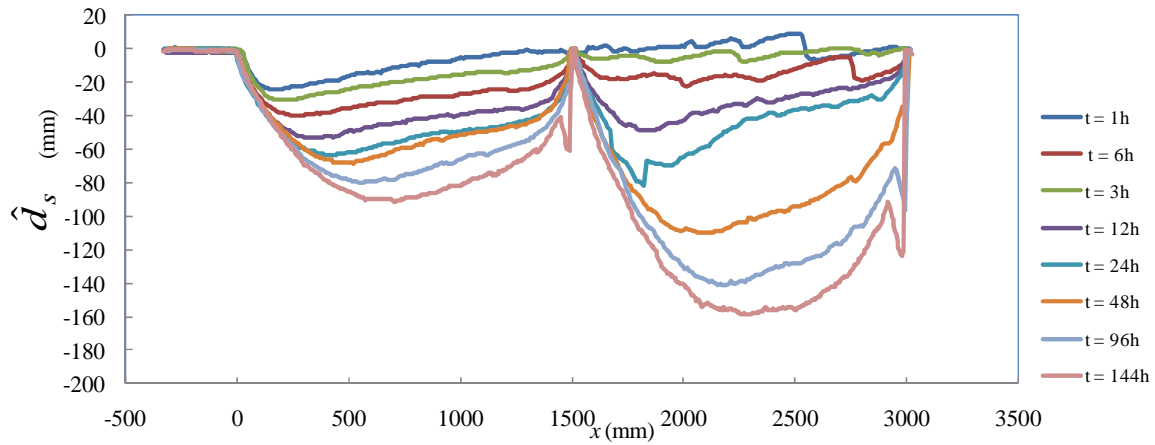


Figura 4.30a. Evoluzione temporale dei profili longitudinali massimi (serie A, sabbia).

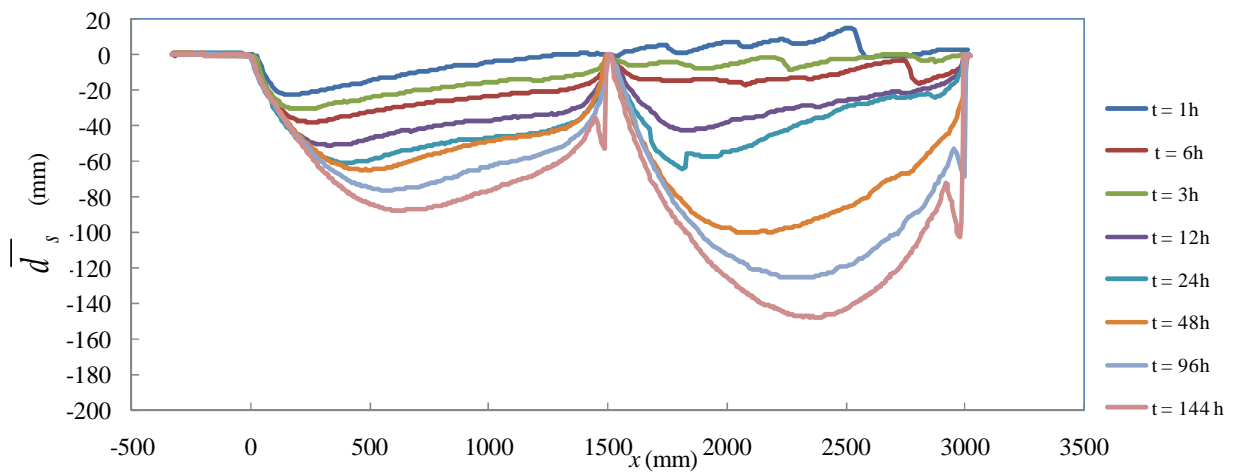


Figura 4.30b. Evoluzione temporale dei profili longitudinali medi (serie A, sabbia).

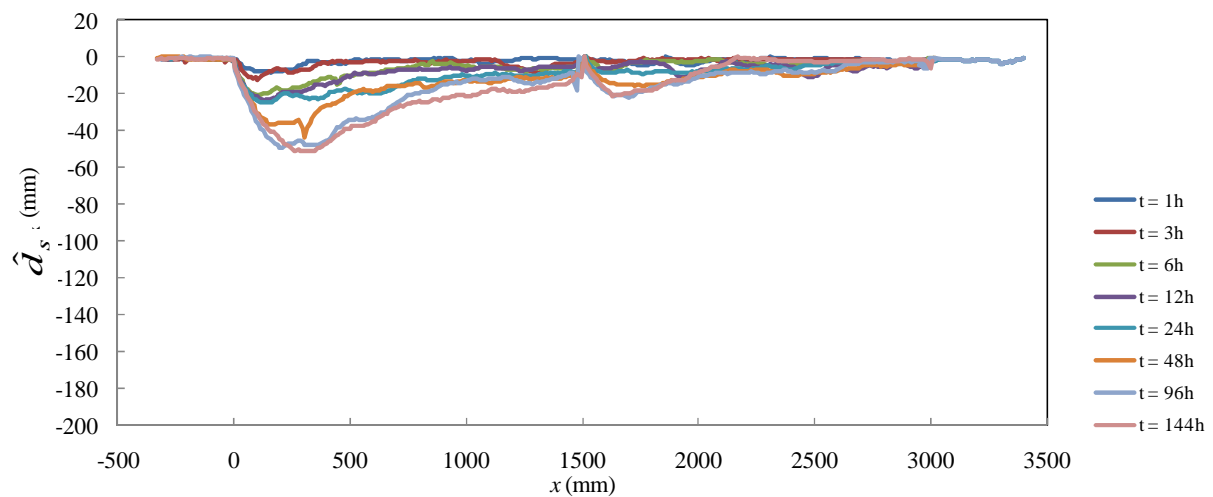


Figura 4.31a. Evoluzione temporale dei profili longitudinali massimi (serie A, miscela coesiva).



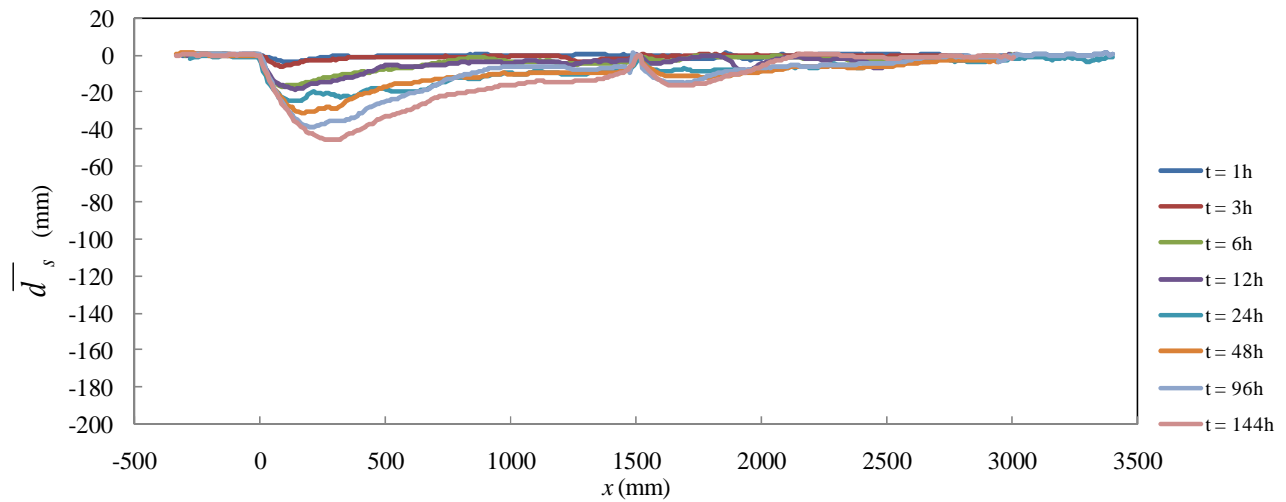


Figura 4.31b. Evoluzione temporale dei profili longitudinali medi (serie A, miscela coesiva).

Un'attenta analisi rileva che l'angolo  $\beta_s$  d'inclinazione del paramento di monte della prima fossa di scavo nel letto di sabbia rimane pressoché inalterato per le prove della serie A, variando tra  $17,35^\circ$  e  $18,72^\circ$  ed essendo in media pari a circa  $18^\circ$  (Fig. 4.32).

Lo stesso non si può dire:

- per il letto di sabbia, nella seconda fossa di scavo, dove, a causa del trasporto solido proveniente da monte, i valori oscillano tra  $2,29^\circ$  e  $29,05^\circ$ ;
- per la miscela, nella prima e nella seconda fossa di scavo, poiché il fenomeno erosivo risente delle forze interparticellari caratteristiche del sedimento coesivo.

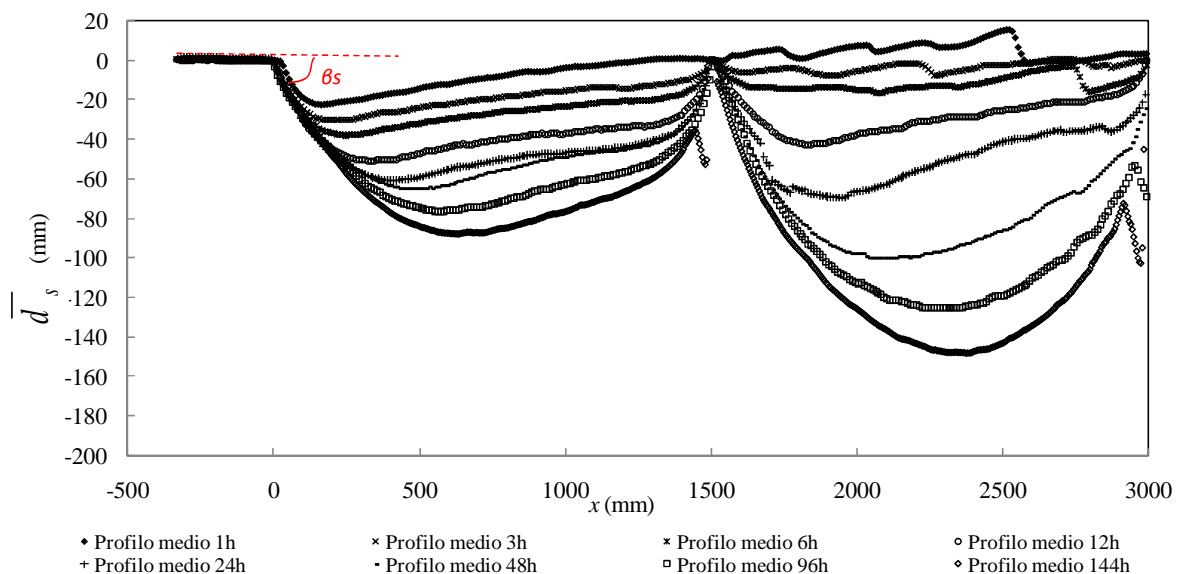


Fig. 4.32. Inclinazione del paramento di monte della prima fossa di scavo (serie A, sabbia, profili longitudinali medi).

Come detto nelle conclusioni del §4.1.2, la velocità critica per il moto incipiente della miscela coesiva ( $U_c=0,405$  m/s) è risultata superiore a quella relativa alla sabbia ( $U_c=0,328$  m/s). Nella serie A, l'intensità della corrente è risultata pari a  $U/U_c=1,36$  per la sabbia (Tab. 4.3a) e  $U/U_c=1,11$  per la miscela coesiva (Tab. 4.3b).

Per confrontare il comportamento a erosione della sabbia con quello della miscela coesiva, si è effettuata la serie di prove C, adoperando il letto incoerente con la stessa intensità della corrente sperimentata nella serie A per la miscela coesiva ( $U/U_c=1,11$ ). Pertanto, si è ridotta la portata a 18,22 l/s (con una diminuzione del 18,6 % rispetto a quella della serie A).

In maniera duale, si è effettuata la serie di prove D, adoperando il letto costituito dalla miscela coesiva con la stessa intensità della corrente sperimentata nella serie A per la sabbia ( $U/U_c=1,36$ ). A tal fine, si è aumentata la portata a 27,52 l/s (con un aumento del 23,0 % rispetto a quella della serie A).

Le prove hanno avuto una durata pari a 12, 48 e 96 h per la serie C e a 24 e 48 h per la serie D (Tab. 4.1).

I profili longitudinali misurati (in mezzeria per la sabbia, medi per la miscela coesiva), confrontati graficamente nelle Figg. 4.33a÷c per la serie C e nelle Figg. 4.33d,e per la serie D, mostrano una notevole sovrapposizione, inducendo a trarre la conclusione che lo scavo localizzato nella miscela coesiva è praticamente pari a quello nella sabbia, a parità d'intensità della corrente (oltre che di pendenza del fondo e di profondità d'acqua).

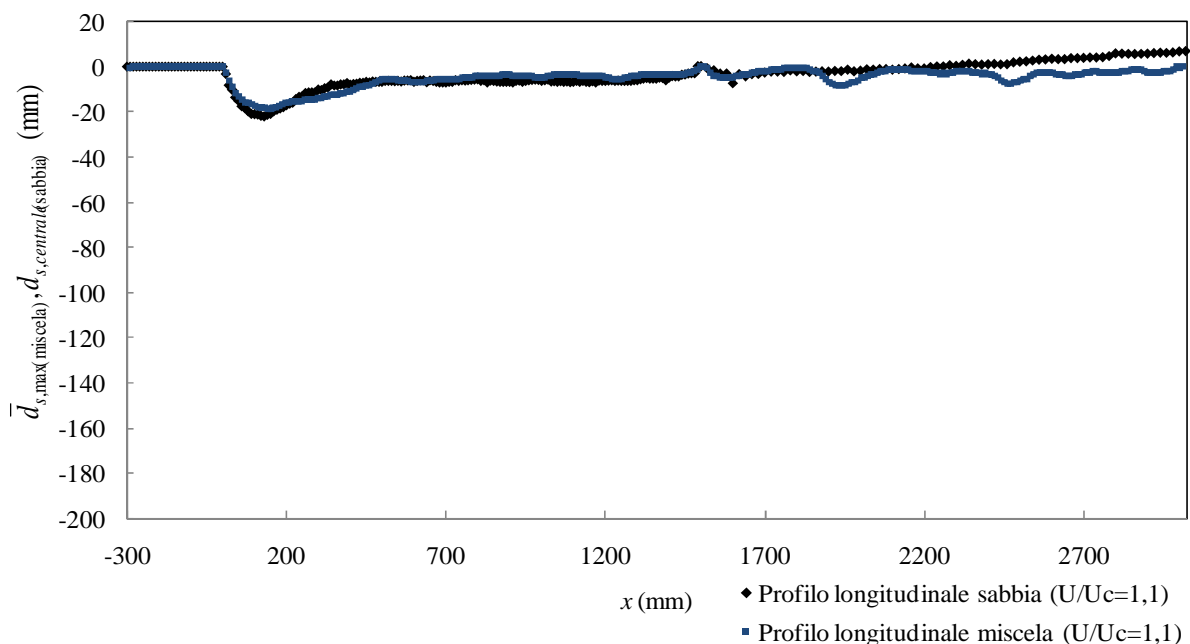


Figura 4.33a. Confronto tra i profili longitudinali misurati in mezzeria (sabbia) e medio (miscela coesiva).

Prova C<sub>1</sub> (durata: 12 h).

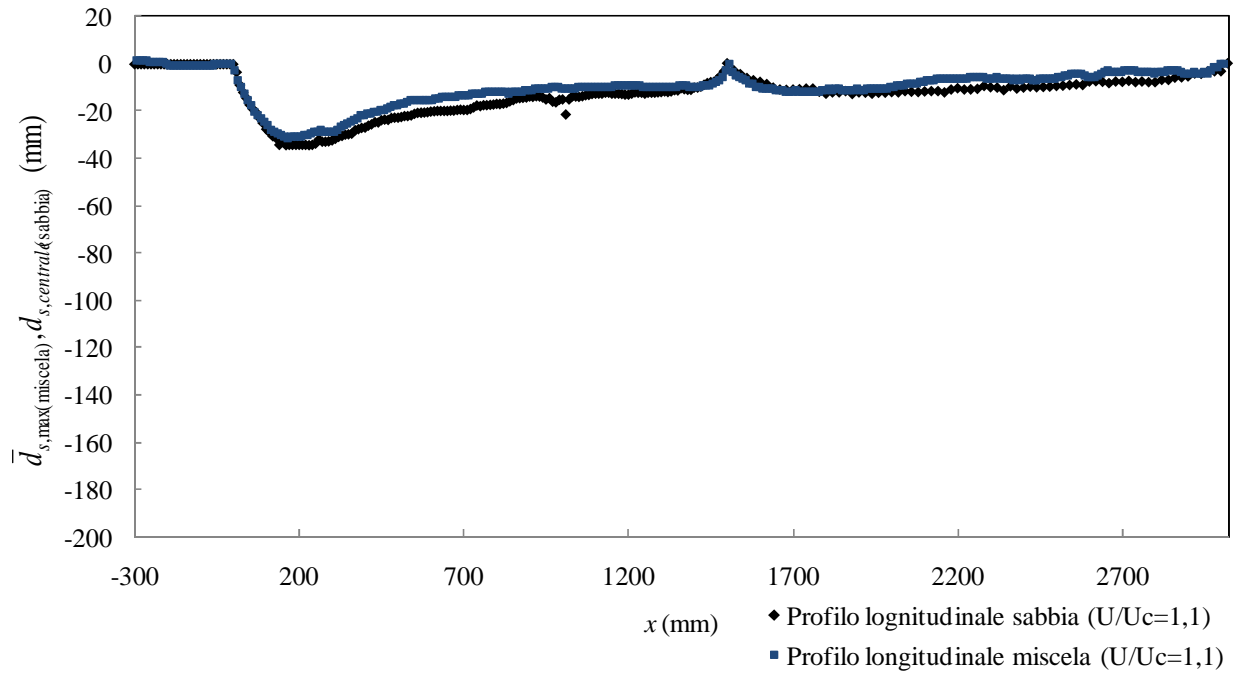


Figura 4.33b. Confronto tra i profili longitudinali misurati in mezzeria (sabbia) e medio (miscela coesiva).

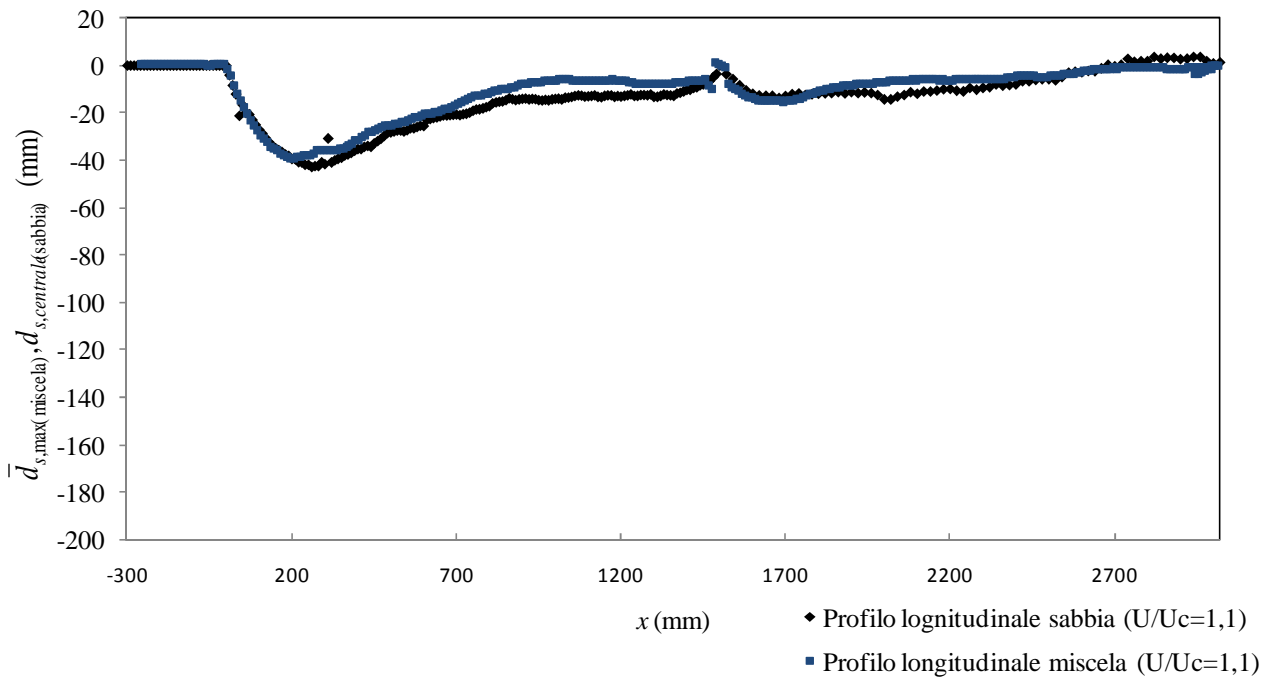
 Prova C<sub>2</sub> (durata: 48 h).


Figura 4.33c. Confronto tra i profili longitudinali misurati in mezzeria (sabbia) e medio (miscela coesiva).

 Prova C<sub>3</sub> (durata: 96 h).

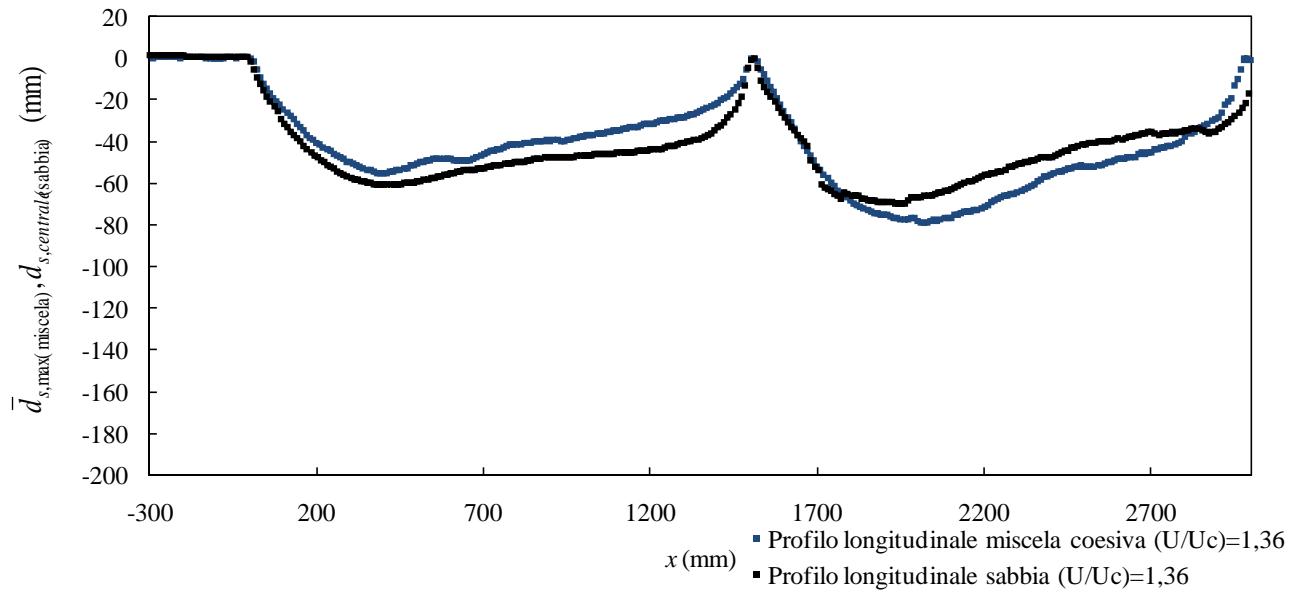


Figura 4.33d. Confronto tra i profili longitudinali misurati in mezzeria (sabbia) e medio (miscela coesiva).

Prova D<sub>1</sub> (durata: 24 h).

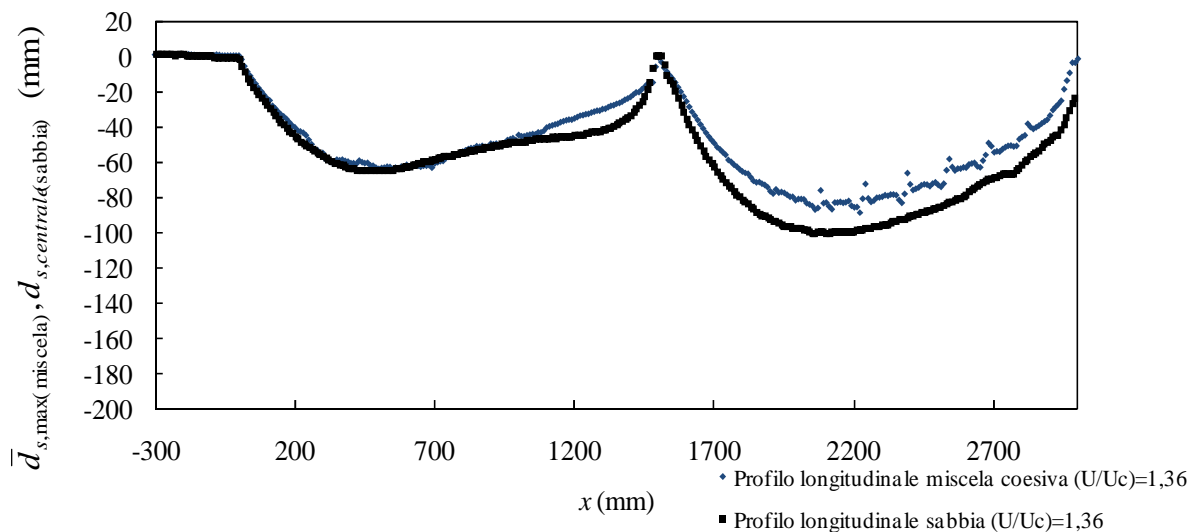
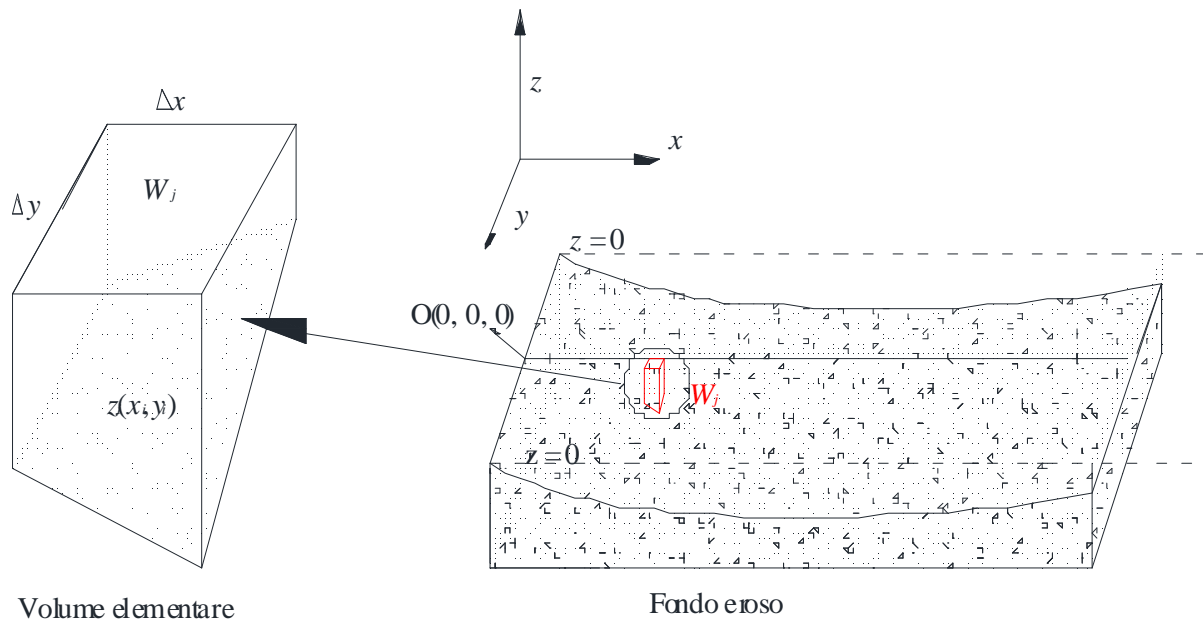


Figura 4.33e. Confronto tra i profili longitudinali misurati in mezzeria (sabbia) e medio (miscela coesiva).

Prova D<sub>2</sub> (durata: 48 h).

### Volumi erosi (serie A)

Per determinare i volumi erosi nelle due fosse di scavo nelle prove della serie A, si è realizzato un algoritmo in *Matlab R 2011* (Allegato B). È stato preliminarmente discretizzato il dominio di calcolo complessivo (largo 0,2 m e lungo 3,00 m) in celle quadrate di lato  $\Delta x = \Delta y = 0,5$  cm, in modo da ricavare i volumi delimitati superiormente dal piano del fondo iniziale, avente quote poste pari a zero,  $z_i(x_i, y_i) = 0$ , e inferiormente dal piano orizzontale avente quota pari alla media,  $\bar{z}_j(x_i, y_i)$ , di quelle dei punti ricadenti nell'area elementare  $j$ -esima (Fig. 4.34):

Figura 4.34. Volume eroso elementare  $i$ -esimo.

$$\bar{z}_j(x_i, y_i) = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} z_i(x_i, y_i)}{N_j} \quad (4.22)$$

dove  $N_j$  è il numero di punti ricadenti nell'area elementare  $j$ -esima.

Il volume elementare  $i$ -esimo per ciascuna di esse risulta:

$$W_j = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \left| \bar{z}_j(x_i, y_i) \right| \quad (4.23)$$

e il volume totale eroso è:

$$W = \sum_{j=1}^N W_j \quad (4.24)$$

dove  $N$  è il numero di celle contenute nel dominio.

I risultati del calcolo sono mostrati in Tab. 4.14, in cui si indicano la prima e la seconda fossa di scavo rispettivamente con i pedici 1 e 2, la sabbia con il pedice  $s$  e la miscela coesiva con il pedice  $c$ :

Tabella 4.14. Volumi erosi (serie A).

Prova	Durata	Sabbia		Miscela coesiva	
	$t$ (ore)	$W_{1,s}$ (dm <sup>3</sup> )	$W_{2,s}$ (dm <sup>3</sup> )	$W_{1,c}$ (dm <sup>3</sup> )	$W_{2,c}$ (dm <sup>3</sup> )
A <sub>1</sub>	1	2,82	0,07	0,26	0,19
A <sub>2</sub>	3	5,64	1,11	0,57	0,15
A <sub>3</sub>	6	7,74	3,44	2,03	0,48

A <sub>4</sub>	12	11,21	8,28	2,16	0,91
A <sub>5</sub>	24	13,61	11,10	3,22	0,87
A <sub>6</sub>	48	14,21	22,32	4,65	2,04
A <sub>7</sub>	96	17,09	28,24	5,16	1,82
A <sub>8</sub>	144	19,69	33,07	7,22	1,43

L'evoluzione temporale dei volumi erosi è riportato nelle Figg.4.35a,b.

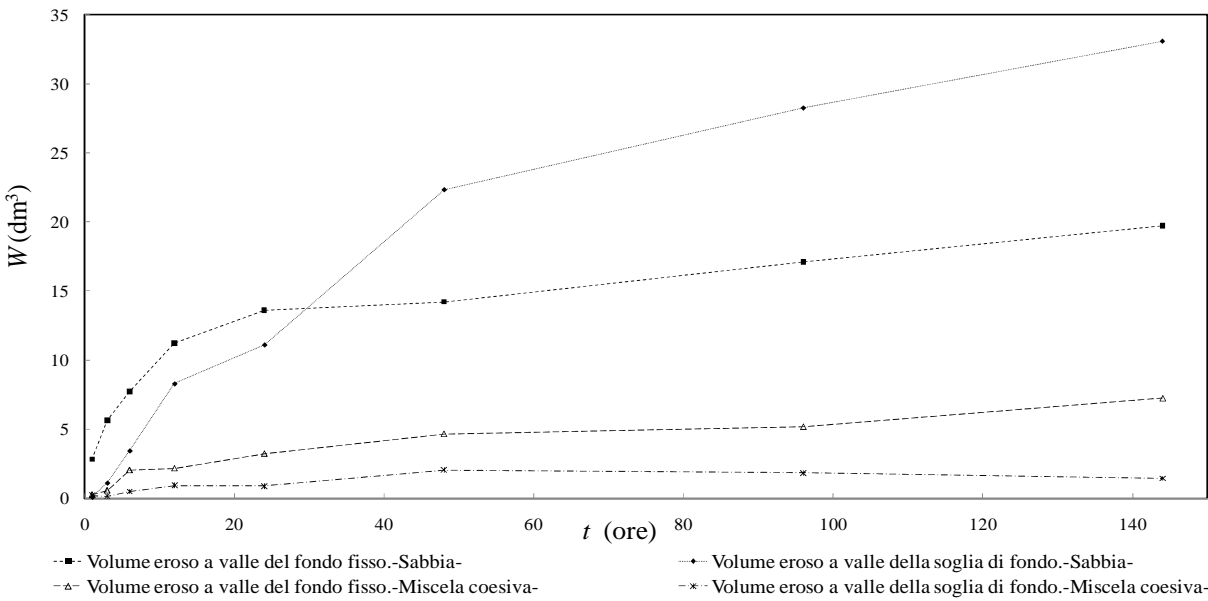


Figura 4.35a. Evoluzione temporale dei volumi erosi (serie A).

Essi, se interpolati, hanno un andamento logaritmico.

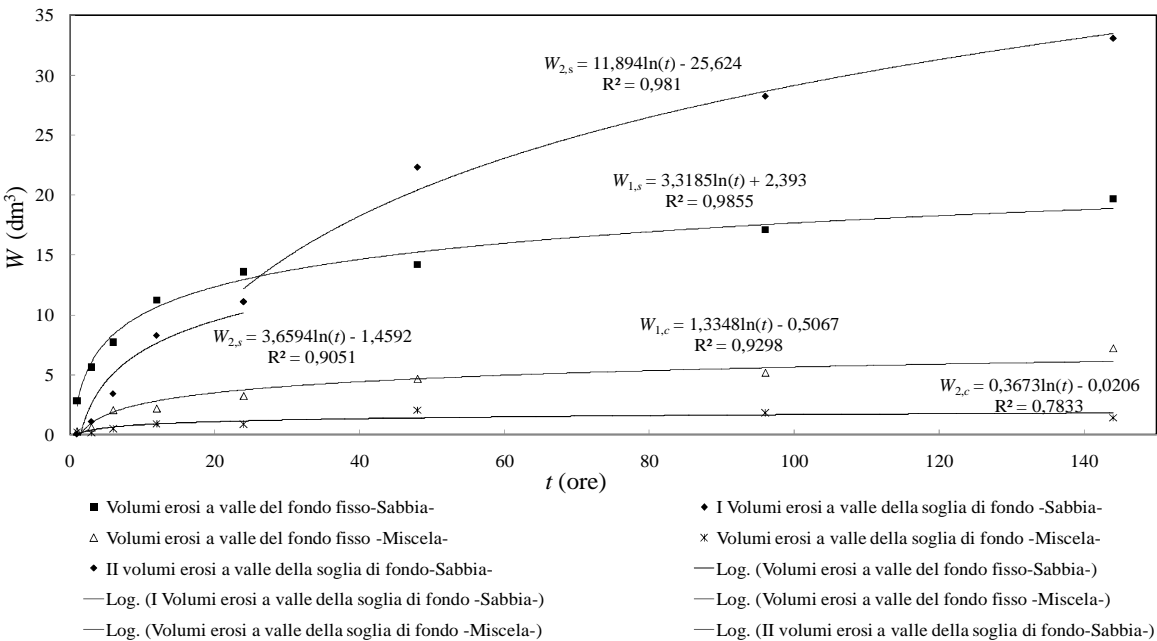


Figura 4.35b. Leggi logaritmiche interpolanti i dati relativi ai volumi erosi (serie A).

Le relazioni risultano, dunque, del tipo:

$$W = a_1 \ln(t) + b_1 \quad (4.25)$$

dove  $a_1$  e  $b_1$  sono due costanti.

Si osserva una notevole riduzione dei volumi erosi per la miscela coesiva rispetto alla sabbia, a conferma dell'effettiva influenza delle proprietà coesive sul fenomeno di scavo localizzato.

Dalla Fig. 4.35a si osserva che, per la sabbia, fino alle 24 h i volumi erosi nella prima fossa di scavo sono maggiori di quelli erosi nella seconda, a causa del trasporto solido proveniente da monte e del conseguente deposito di sedimenti a valle. Dopo le 48 h, invece, tendendo la prima fossa di scavo alle condizioni di equilibrio, si ha un'inversione del fenomeno: i volumi erosi nella seconda fossa di scavo sono maggiori di quelli erosi nella prima, a parità di tempo. Pertanto, i volumi erosi nella seconda fossa di scavo sono stati interpolati separatamente per  $t \leq 24$  h e per  $t \geq 24$  h (Fig. 4.35b).

Sempre con riferimento alla sabbia, il rapporto tra i volumi erosi nella prima e nella seconda fossa di scavo,  $W_{1,s}/W_{2,s}$ , si è rivelato costante per  $t \geq 48$  h e pari mediamente a 0,6 (Tab. 4.15). In Fig. 4.36 è mostrata la legge di potenza interpolante l'evoluzione temporale dei volumi erosi.

Tabelle 4.15. Rapporto tra i volumi erosi nelle due fosse di scavo (serie A, sabbia).

$t$ (ore)	$W_{1,s}/W_{2,s}$ (adim.)
1	37,72
3	5,10
6	2,25
12	1,35
24	1,23
48	0,64
96	0,61
144	0,60

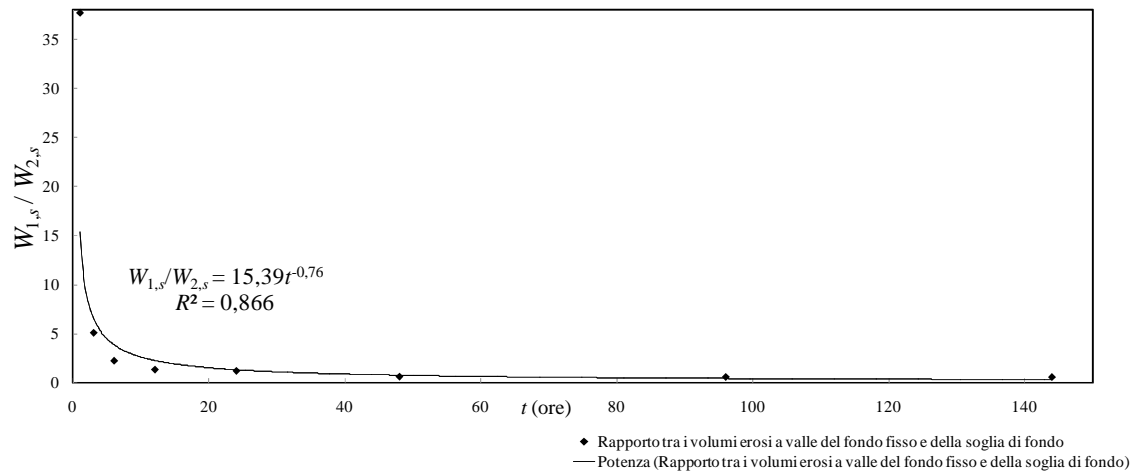


Figura 4.36. Rapporto tra i volumi erosi nelle due fosse di scavo (serie A, sabbia).

L'evoluzione temporale dei volumi erosi è differente per la miscela coesiva, poiché essi non sono risultati crescenti nel tempo in maniera monotona.

In Fig. 4.37 si mostrano le evoluzioni temporali dei tassi erosivi  $dW/dt$ , interpolabili con leggi di potenza. Come noto in letteratura anche per altri casi di scavi localizzati (es.: Gaudio e Marion, 2003), il processo erosivo è piuttosto rapido nella fase iniziale (*short-term phase*), in cui a piccole variazioni temporali corrispondono significative variazioni di volume, per poi smorzarsi in una fase successiva (*long-term phase*).

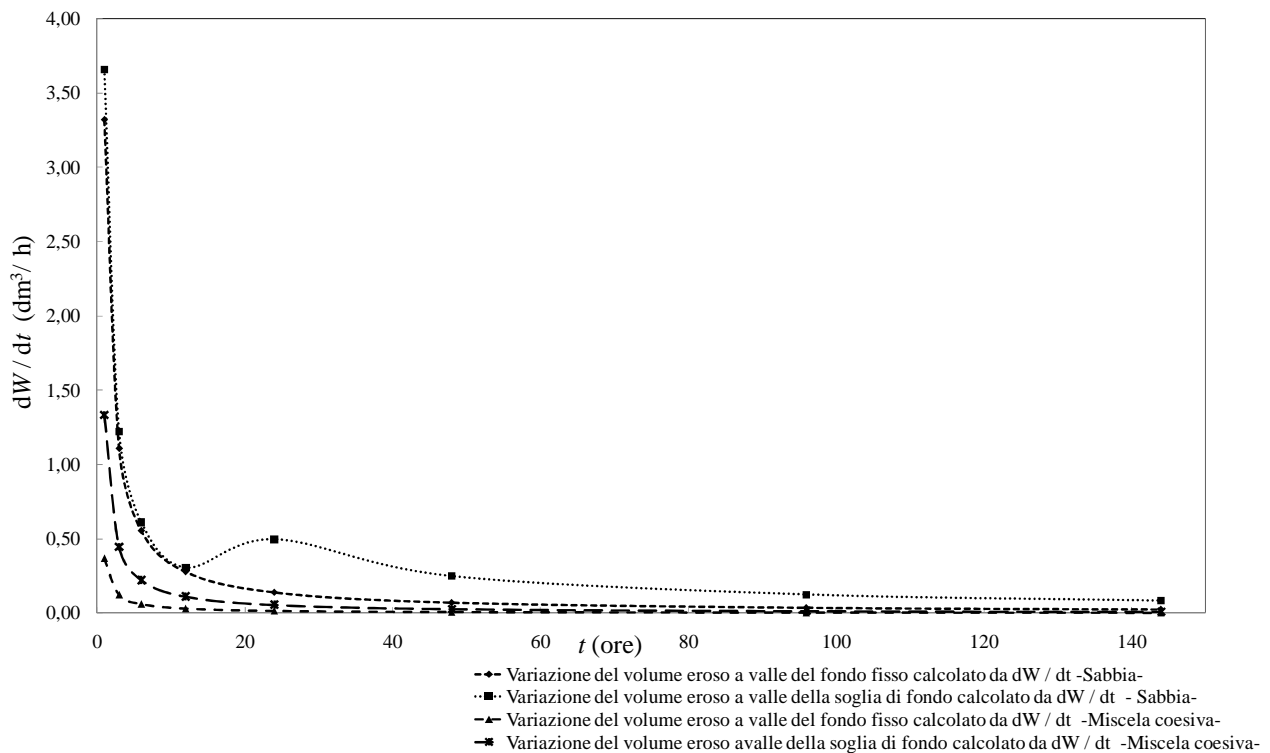


Figura 4.37. Evoluzione temporale dei tassi erosivi (serie A).



Si riportano, quindi, le leggi logaritmiche interpolanti i volumi erosi nel tempo, con le relative derivate (tassi erosivi nel tempo):

$$W_{1,s} = 3,318 \ln t + 2,393 \Rightarrow \frac{dW_{1,s}}{dt} = 3,318 \cdot \frac{1}{t}$$

$$W_{2,s} = 3,6594 \ln t - 1,4592 \Rightarrow \frac{dW_{2,s}}{dt} = 3,6594 \cdot \frac{1}{t} \text{ per } t = 1, 3, 6, 12, 24 \text{ h}$$

$$W_{2,s} = 11,894 \ln t - 25,624 \Rightarrow \frac{dW_{2,s}}{dt} = 11,894 \cdot \frac{1}{t} \text{ per } t = 24, 48, 96, 144 \text{ h}$$

$$W_{1,c} = 1,334 \ln t - 0,506 \Rightarrow \frac{dW_{1,c}}{dt} = 1,334 \cdot \frac{1}{t}$$

$$W_{2,c} = 0,3673 \ln t - 0,0206 \Rightarrow \frac{dW_{2,c}}{dt} = 0,3673 \cdot \frac{1}{t}$$

L'andamento temporale del tasso erosivo può essere confrontato con quello ricavato dalla differenza tra i volumi erosi in due istanti di tempo successivi, che si sceglie di attribuire al tempo medio, come segue ( $k$  indica il generico istante di tempo):

$$\frac{W_{k+1} - W_k}{(t_k + t_{k+1})/2} \quad (4.26)$$

In Tab. 4.16 e nelle Figg. 4.38a,b si riportano i valori numerici per le prove della serie A. Si notano delle irregolarità nei rami delle curve causate:

- dal materiale solido proveniente da monte, che genera depositi a valle della soglia di fondo;
- dalla presenza di argilla nella miscela coesiva, che determina una variazione non sempre crescente dell'evoluzione temporale dei volumi erosi.

Tabella 4.16. Tasso erosivo calcolato con la formula (4.26), in  $\text{dm}^3/\text{h}$  (serie A).

$t$ (h)	Sabbia. Prima fossa di scavo	Sabbia. Seconda fossa di scavo	Miscela coesiva. Prima fossa di scavo	Miscela coesiva. Seconda fossa di scavo
1	2,82	0,07	0,26	0,19
3	1,41	0,52	0,15	-0,02
6	0,70	0,78	0,49	0,11
12	0,58	0,81	0,02	0,07
24	0,20	0,23	0,09	0,00
48	0,03	0,47	0,06	0,05
96	0,06	0,12	0,01	0,00
144	0,05	0,10	0,04	-0,01

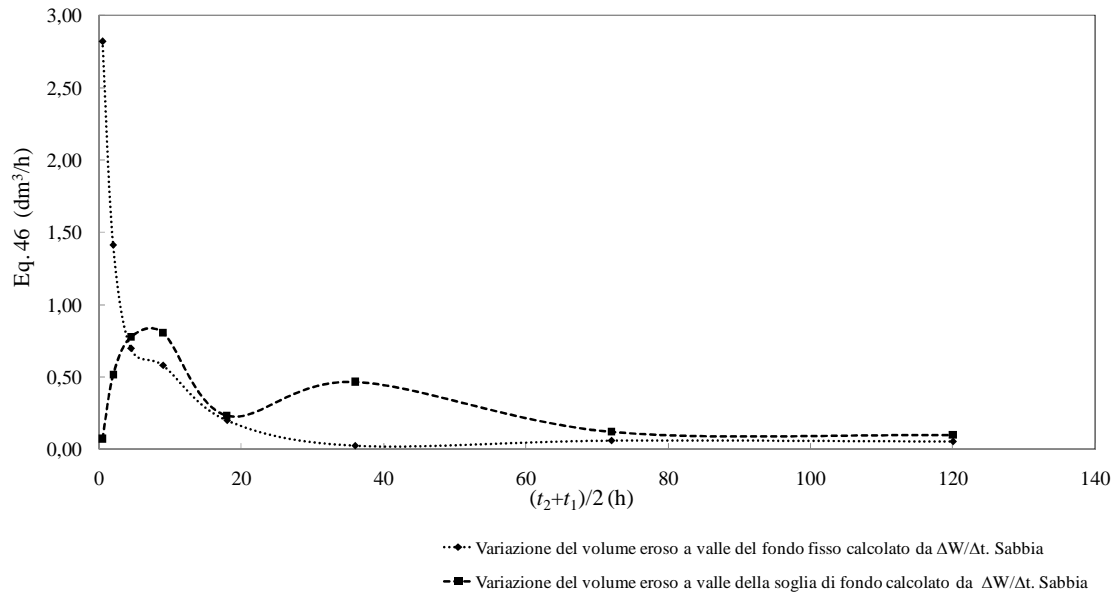


Figura 4.38a. Tasso erosivo calcolato con la formula (4.26) (serie A, sabbia).

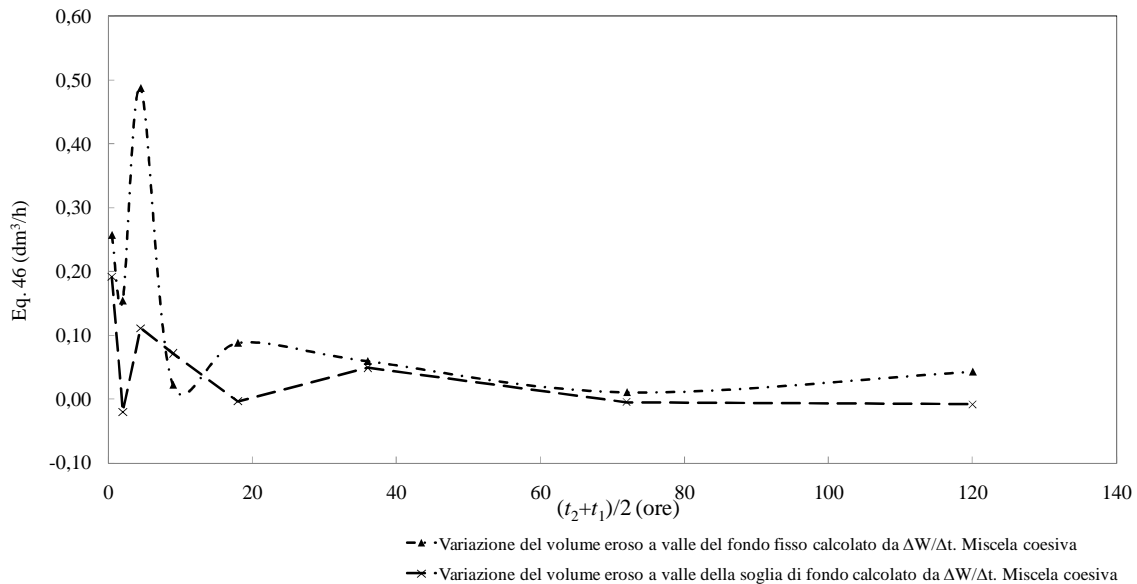


Figura 4.38b. Tasso erosivo calcolato con la formula (4.26) (serie A, miscela coesiva).

Per la prima fossa di scavo, il rapporto tra i volumi erosi nella sabbia e nella miscela coesiva (Tab. 4.14),  $W_{1,s}/W_{1,c}$ , assume nei primi istanti temporali valori che decrescono rapidamente con l'aumentare della durata delle prove. Tale variazione tende a diminuire e solo nella *long-term phase*, dopo le 48 ore, si attesta attorno a un valore pari mediamente a circa 3 (Tab. 4.17 e Fig. 4.39).

Tabella 4.17. Rapporto tra i volumi erosi nella sabbia e nella miscela coesiva per la prima fossa di scavo (serie A).

Prova	$t$ (ore)	$W_{1,s}/W_{1,c}$ (adim.)
A <sub>1</sub>	1	10,97
A <sub>2</sub>	3	9,98
A <sub>3</sub>	6	3,82
A <sub>4</sub>	12	5,19
A <sub>5</sub>	24	4,23
A <sub>6</sub>	48	3,06
A <sub>7</sub>	96	3,31
A <sub>8</sub>	144	2,73

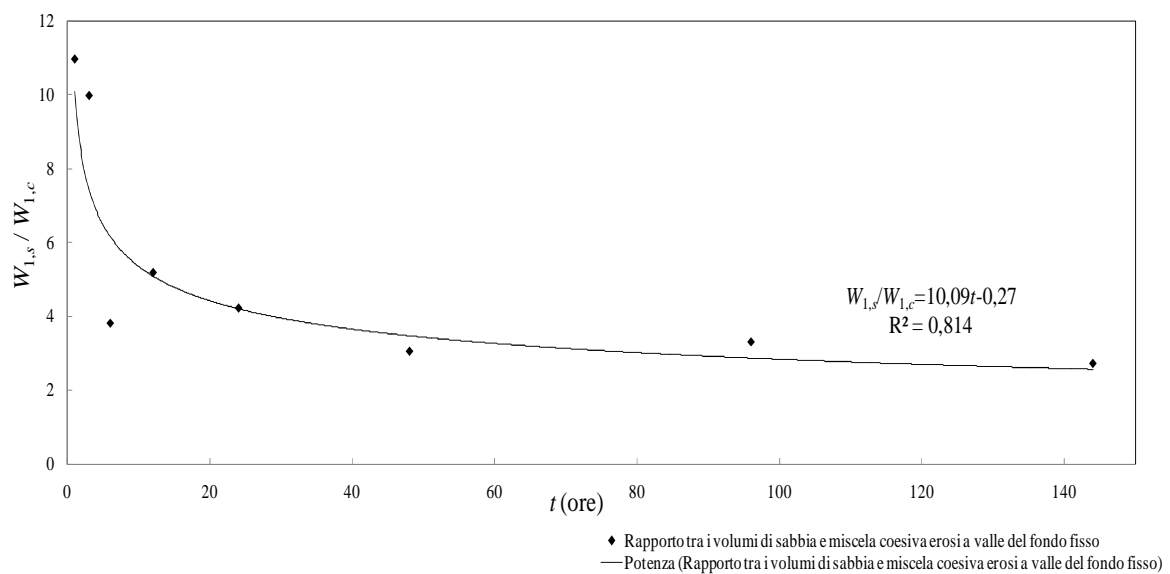


Figura 4.39. Evoluzione temporale del rapporto tra i volumi erosi nella sabbia e nella miscela coesiva per la prima fossa di scavo (serie A).

Continuando l'analisi sperimentale del fenomeno erosivo, si è notata una dipendenza lineare tra le profondità di scavo massime dei profili longitudinali medi e i volumi erosi,  $\bar{d}_{s,\max} = f(W)$ , mostrata nelle Figg. 4.40÷4.43:

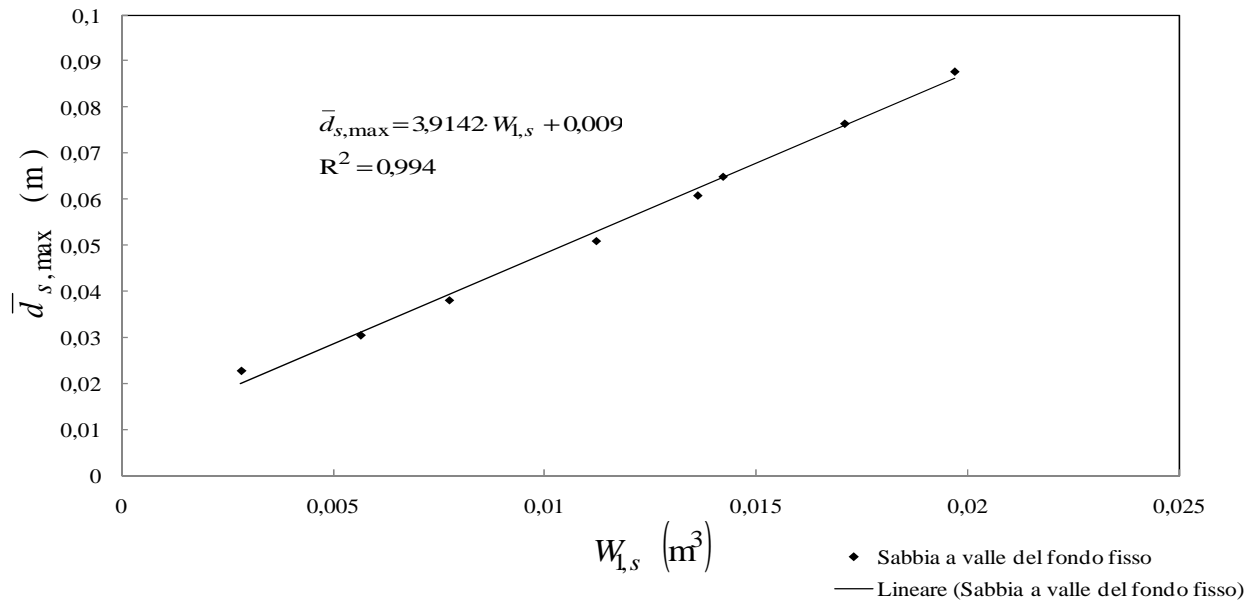


Figura 4.40. Andamento delle profondità di scavo massime dei profili longitudinali medi con i volumi erosi  
 (serie A, sabbia, prima fossa di scavo).

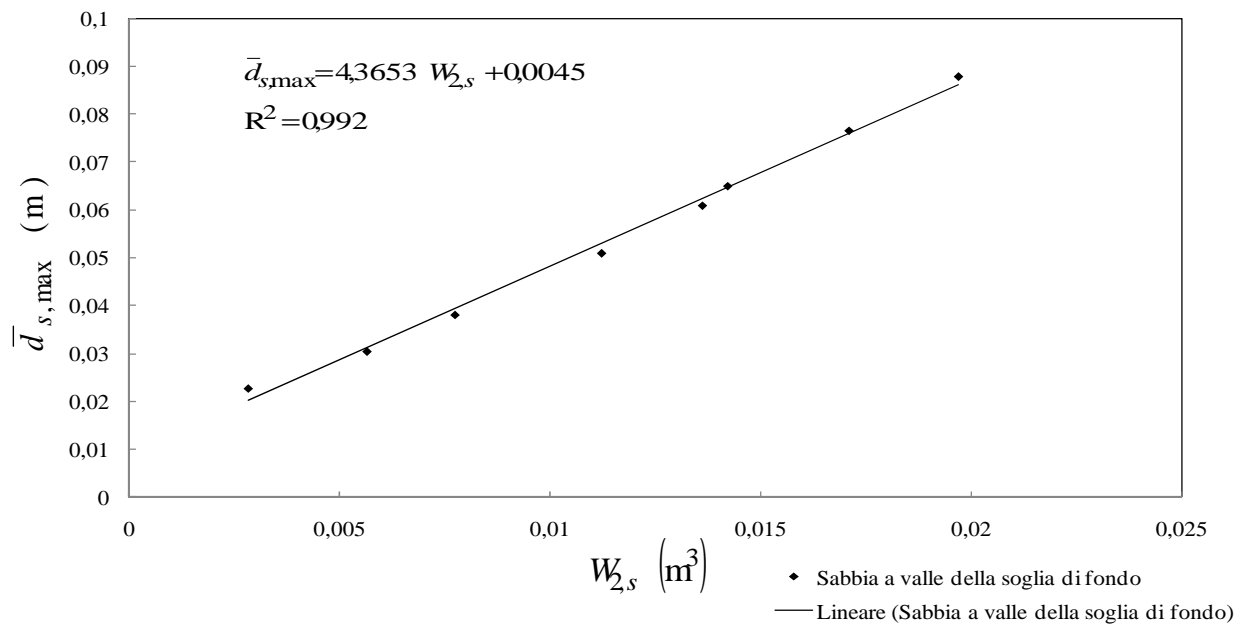


Figura 4.41. Andamento delle profondità di scavo massime dei profili longitudinali medi con i volumi erosi  
 (serie A, sabbia, seconda fossa di scavo).

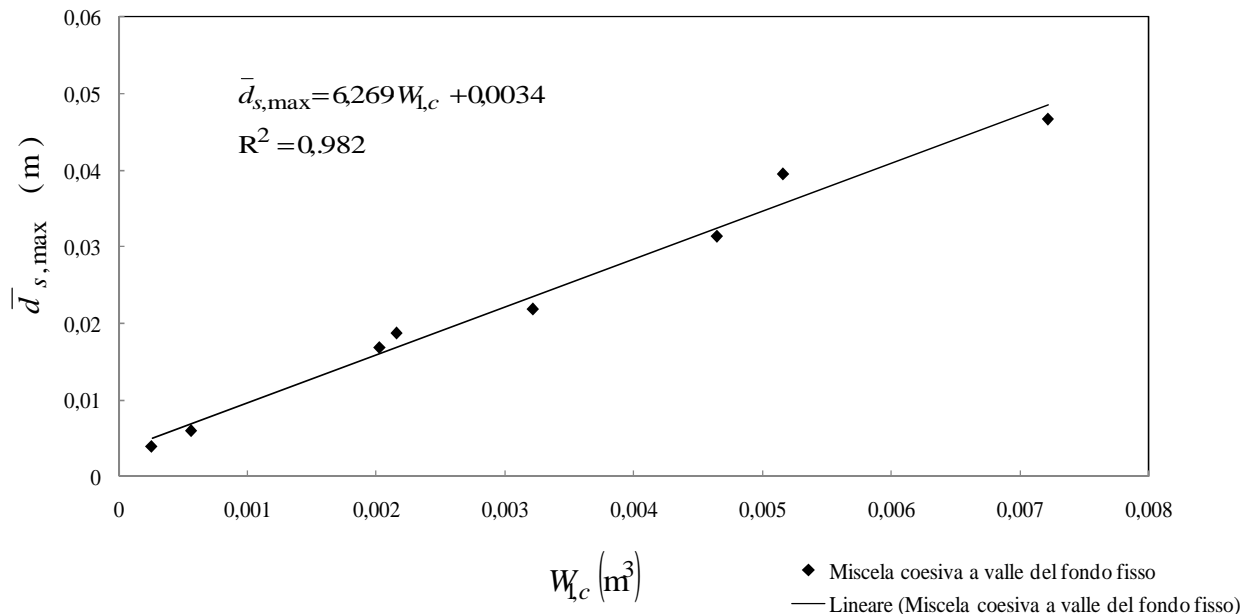


Figura 4.42. Andamento delle profondità di scavo massime dei profili longitudinali medi con i volumi erosi (serie A, miscela coesiva, prima fossa di scavo).

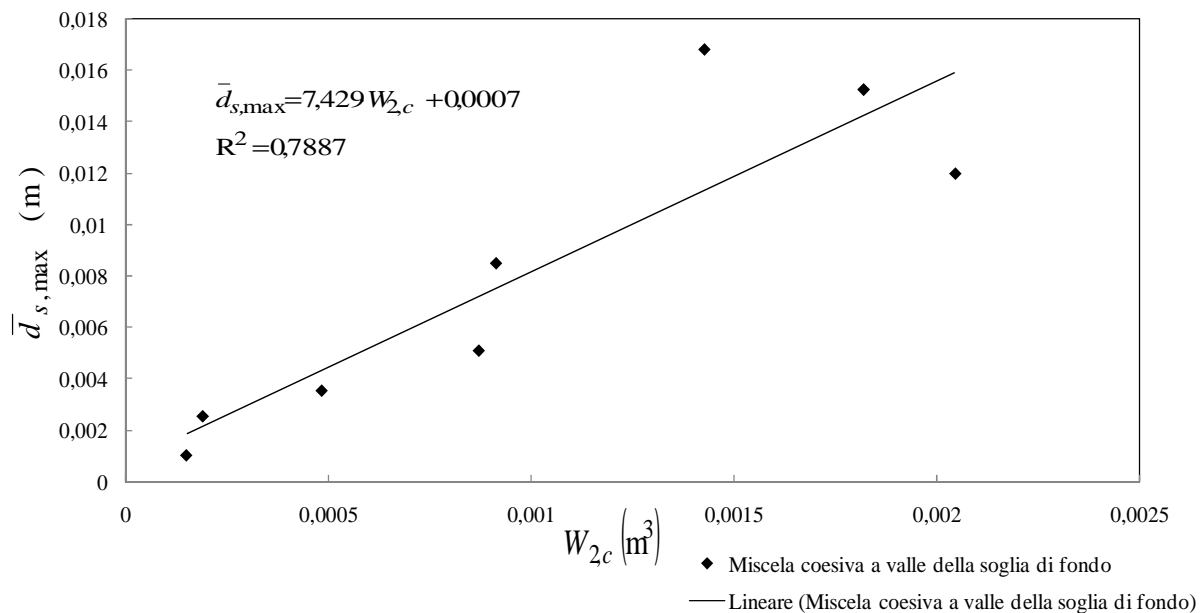


Figura 4.43. Andamento delle profondità di scavo massime dei profili longitudinali medi con i volumi erosi (serie A, miscela coesiva, seconda fossa di scavo).

In quest'ultimo grafico i punti presentano uno scarto maggiore, essendo influenzati dal trasporto solido proveniente da monte. Ciò è stato confermato anche dai valori delle massime profondità di scavo ricavate dai profili longitudinali massimi,  $\hat{d}_{s,max}$ . Difatti, riportando in un unico grafico gli andamenti dei dati sperimentali con i volumi erosi per entrambe le fosse di scavo, oltre alla dipendenza lineare si nota che la retta di regressione relativa alla miscela coesiva ha una pendenza maggiore rispetto a quella della sabbia (Fig. 4.44a):

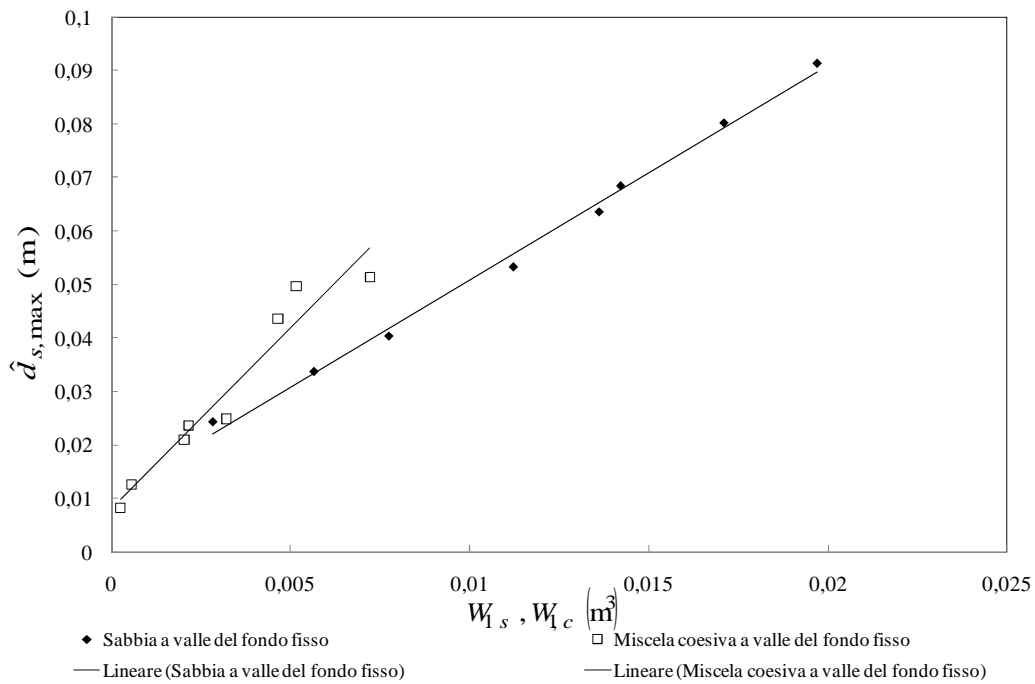


Figura 4.44a. Andamento delle profondità di scavo massime dei profili longitudinali massimi con i volumi erosi (serie A, sabbia e miscela coesiva, prima fossa di scavo).

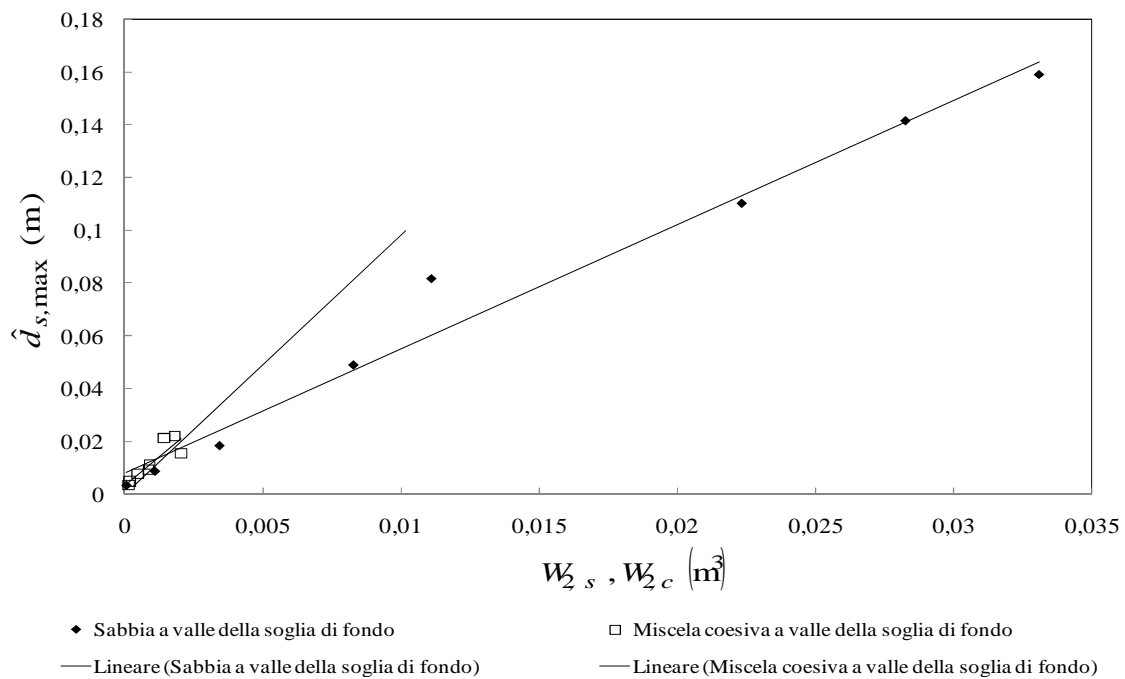


Figura 4.44b. Andamento delle profondità di scavo massime dei profili longitudinali massimi con i volumi erosi (serie A, sabbia e miscela coesiva, seconda fossa di scavo).

L'inclinazione della retta di regressione relativa alla miscela coesiva risulta maggiore di quella della sabbia, poiché, anche se con il solo 5% in peso di materiale fine, si ha una diminuzione dei volumi erosi, a parità di  $\hat{d}_{s,max}$ . La presenza del materiale coesivo influenza, infatti, anche il moto

dei granelli durante il trasporto solido; infatti, nel letto di sabbia si assiste al continuo rotolamento dei sedimenti, mentre nella miscela si osserva il distacco di materiale in forma aggregata (sabbia e materiale fine), cui segue la caduta del materiale incoerente e la sospensione della parte fine (Fig. 4.45), come osservato da Jain e Kothyari (2010).

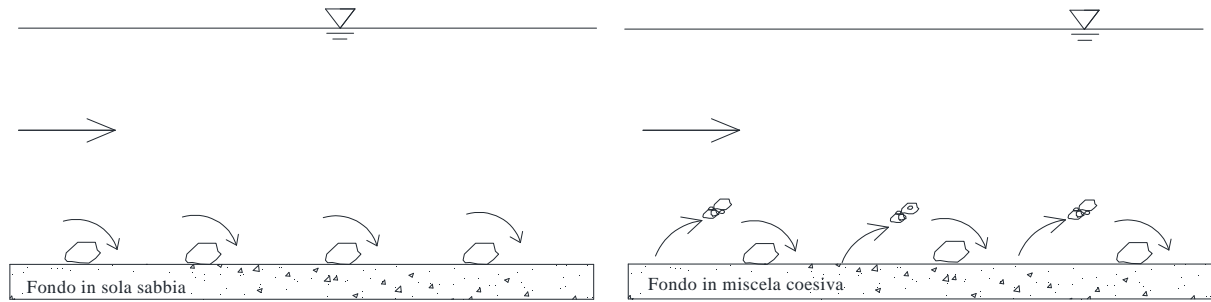


Fig. 4.45. Schema delle modalità di trasporto dei sedimenti.

Successivamente, esprimendo le massime profondità di scavo  $\hat{d}_{s,max}$  e  $\bar{d}_{s,max}$  per il fondo di sabbia in funzione dei volumi erosi, si osserva che, a parità di questi ultimi, le rette interpolatrici sono quasi coincidenti tra loro (Figg. 4.46a,b). Si è, quindi, in presenza di uno scavo che è caratterizzato da una forte simmetria rispetto all'asse di mezzzeria del fondo mobile (Bey *et al.*, 2007; Termini e Sammartano, 2012).

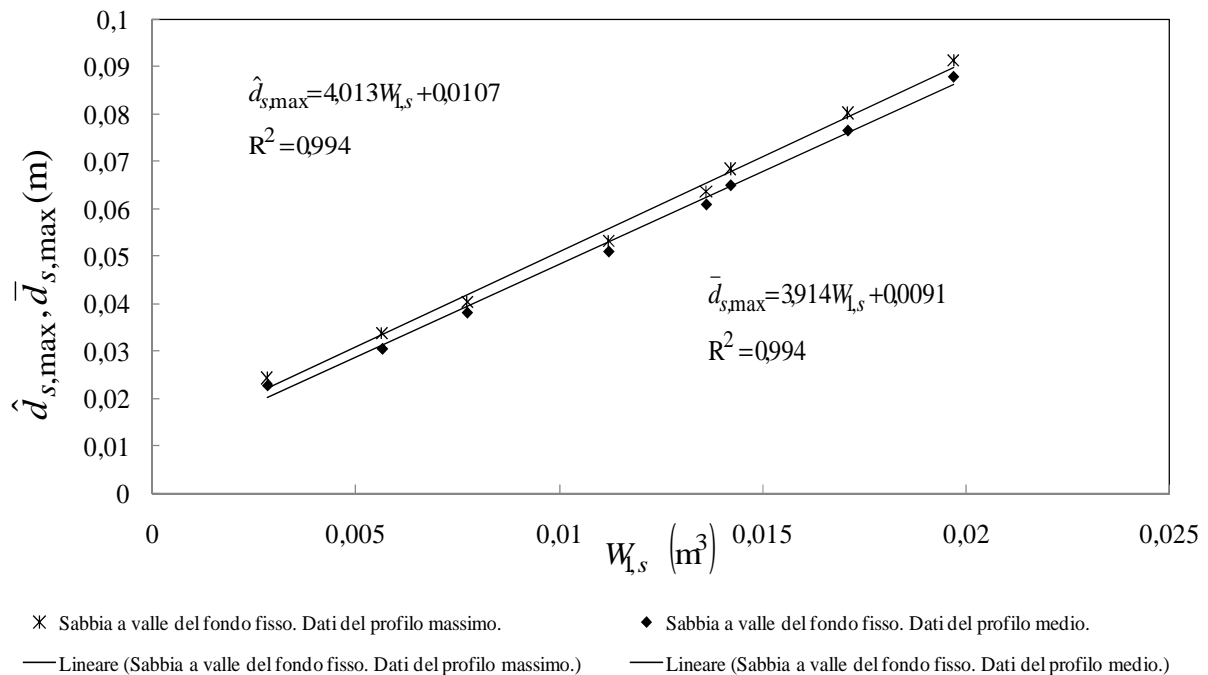


Figura 4.46a. Confronto tra le massime profondità di scavo dei profili medi e massimi per la prima fossa di scavo (serie A, sabbia).

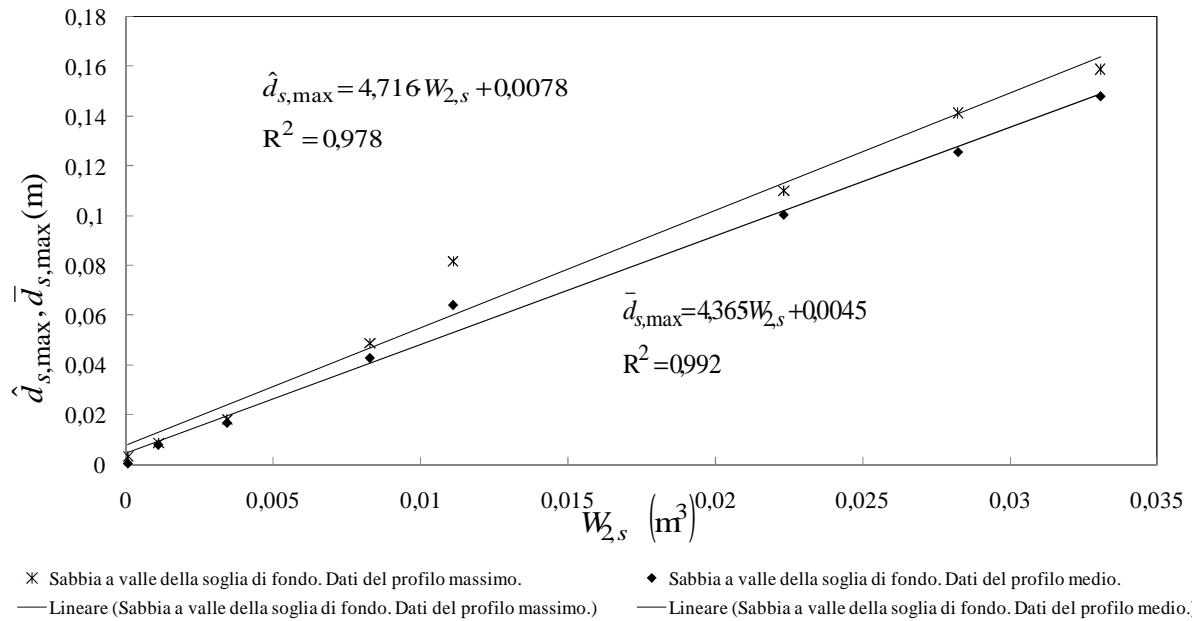


Figura 4.46a. Confronto tra le massime profondità di scavo dei profili medi e massimi per la seconda fossa di scavo (serie A, sabbia).

Questa caratteristica si perde nella miscela coesiva (Figg. 4.47a,b); infatti, le profondità massime ricavate dai profili medi si discostano notevolmente da quelle dei profili massimi, confermando una forte asimmetria del fondo eroso.

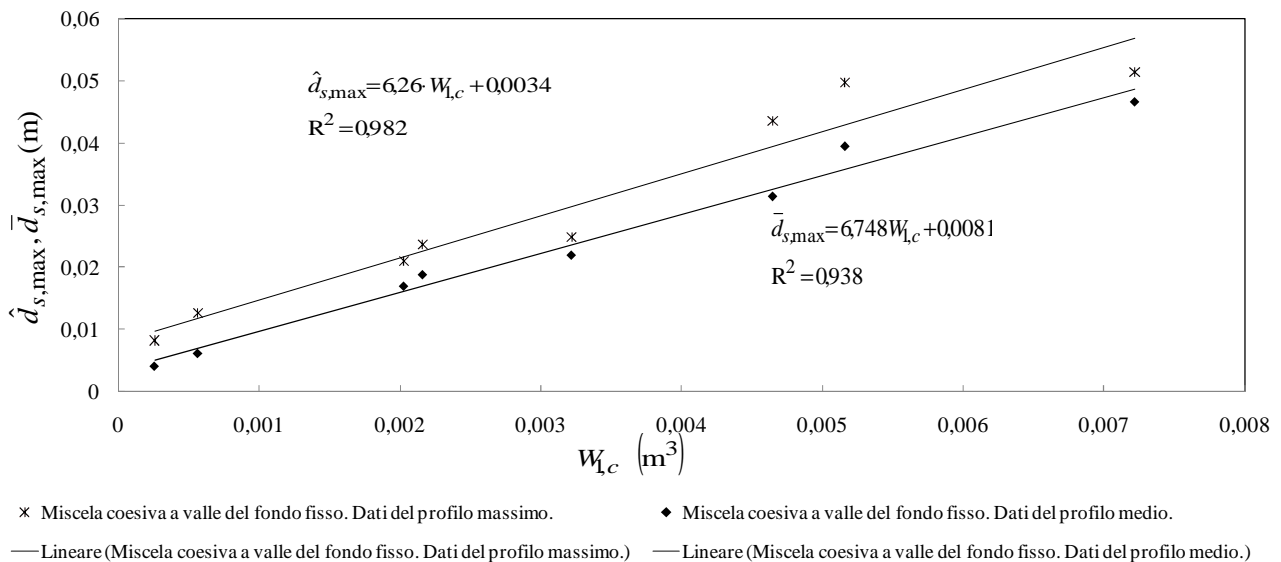


Figura 4.47a. Confronto tra le massime profondità di scavo dei profili medi e massimi per la prima fossa di scavo (serie A, miscela coesiva).



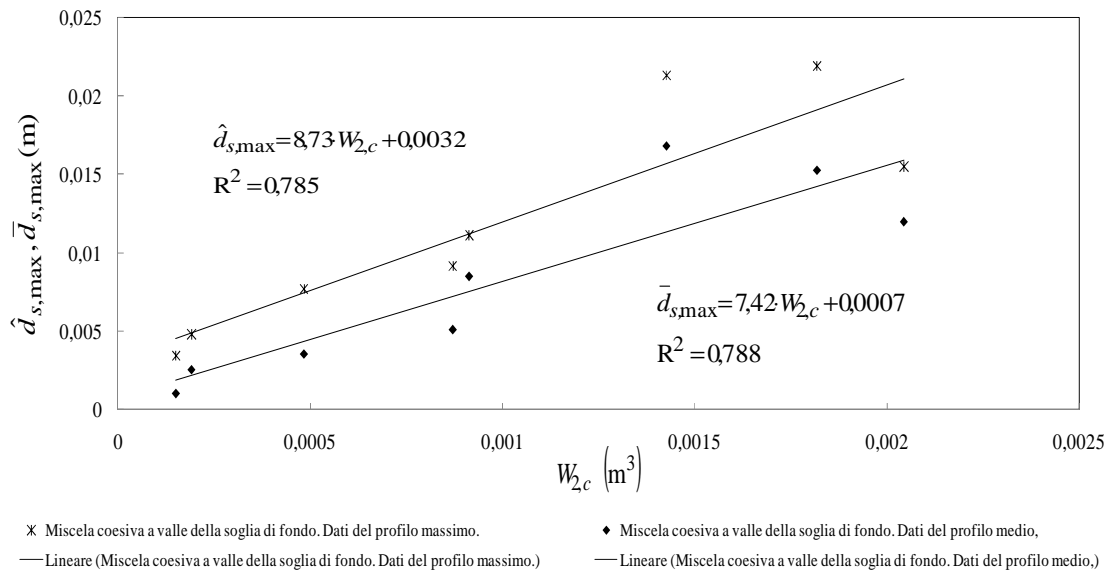


Figura 4.47a. Confronto tra le massime profondità di scavo dei profili medi e massimi per la seconda fossa di scavo (serie A, miscela coesiva).

L'analisi dei profili erosi permette di interpolare l'evoluzione temporale delle massime profondità di scavo ricavate dai profili massimi,  $\hat{d}_{s,max}$ , nelle due fosse di scavo sia per la sola sabbia (Figg. 4.48a,b), sia per la miscela coesiva (Figg. 4.49a,b):

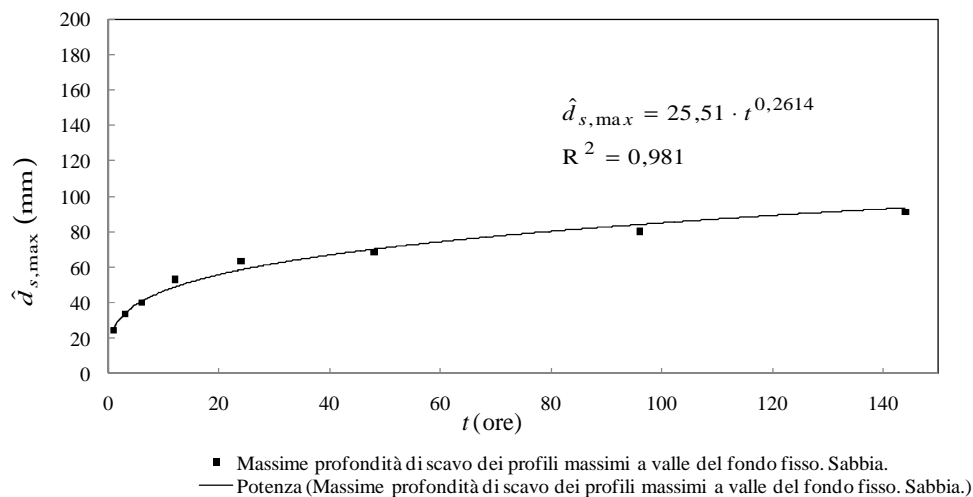


Figura 4.48a. Evoluzione temporale delle massime profondità di scavo dei profili massimi per la prima fossa di scavo (serie A, sabbia).

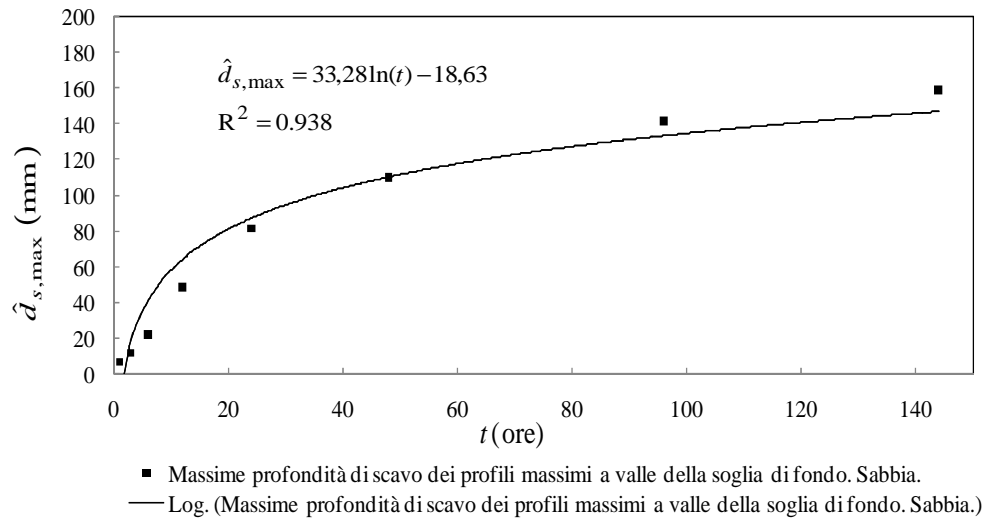


Figura 4.48b. Evoluzione temporale delle massime profondità di scavo dei profili massimi per la seconda fossa di scavo (serie A, sabbia).

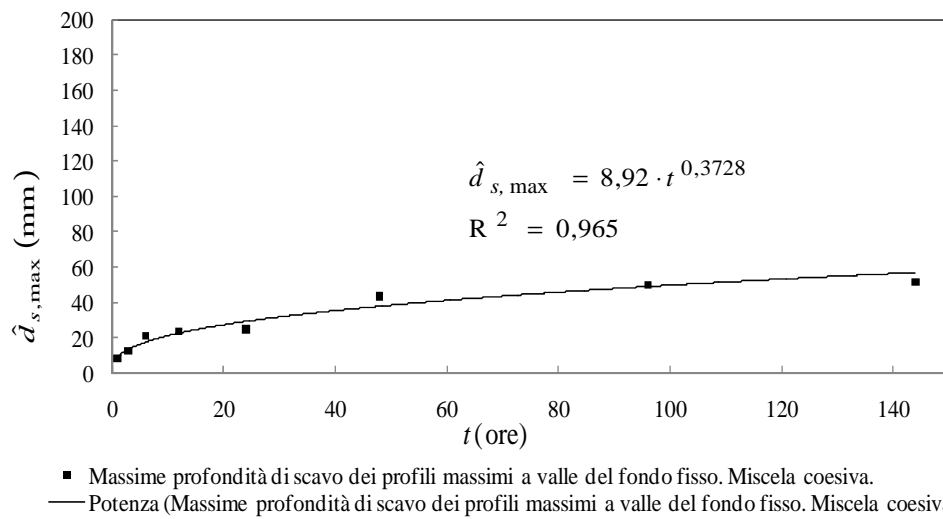


Figura 4.49a. Evoluzione temporale delle massime profondità di scavo dei profili massimi per la prima fossa di scavo (serie A, miscela coesiva).

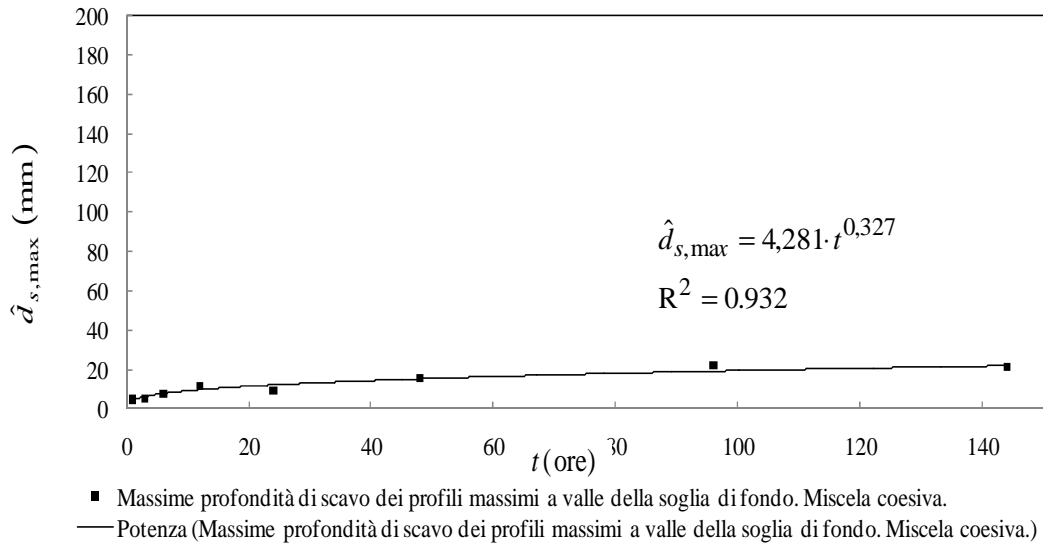


Figura 4.49b. Evoluzione temporale delle massime profondità di scavo dei profili massimi per la seconda fossa di scavo (serie A, miscela coesiva).

Solo per la seconda fossa di scavo nel letto di sabbia si sono interpolati i dati con una legge logaritmica, poiché lo scavo ha risentito maggiormente del trasporto solido proveniente da monte e dei vortici generati dall'interazione tra corrente e soglia di fondo emergente. In tutti gli altri casi si è utilizzata una legge di potenza, come proposto da Breusers (1966) e da Gaudio e Marion (2003).

In merito all'evoluzione temporale delle massime profondità di scavo, si precisa che nel letto in sabbia non si è raggiunta una condizione asintotica di equilibrio, ragion per cui in tutti i calcoli si è considerata come profondità di scavo massima nel tempo quella relativa alla prova di durata maggiore, pari a 144 h. Nel fondo costituito dalla miscela coesiva, invece, si sono ritenute raggiunte le condizioni di equilibrio asintotico solo dopo le 96 h.

Per la prima fossa di scavo, nella miscela coesiva si nota una riduzione delle massime profondità di scavo pari a circa il 43%, rispetto al fondo incoerente. Per la seconda fossa di scavo, invece, la diminuzione arriva all'86%. Quest'ultimo valore, però, è stato condizionato dalla presenza dei vortici formati in prossimità della parete di monte della soglia di fondo, nel caso della sabbia. Nelle Figg. 4.50a,b si mostrano le differenze tra le massime profondità di scavo dei profili massimi misurate nei fondi rispettivamente di sabbia e miscela coesiva,  $\Delta \hat{d}_{s,\max}$ , a parità di durata.

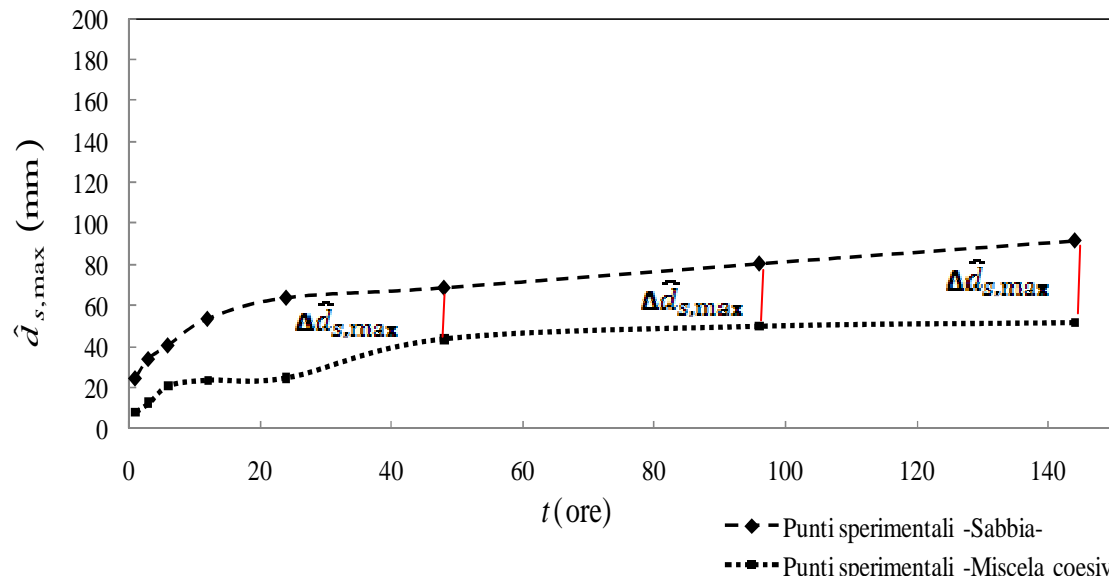


Figura 4.50a. Confronto tra le massime profondità di scavo dei profili massimi per la prima fossa di scavo (serie A, sabbia e miscela coesiva).

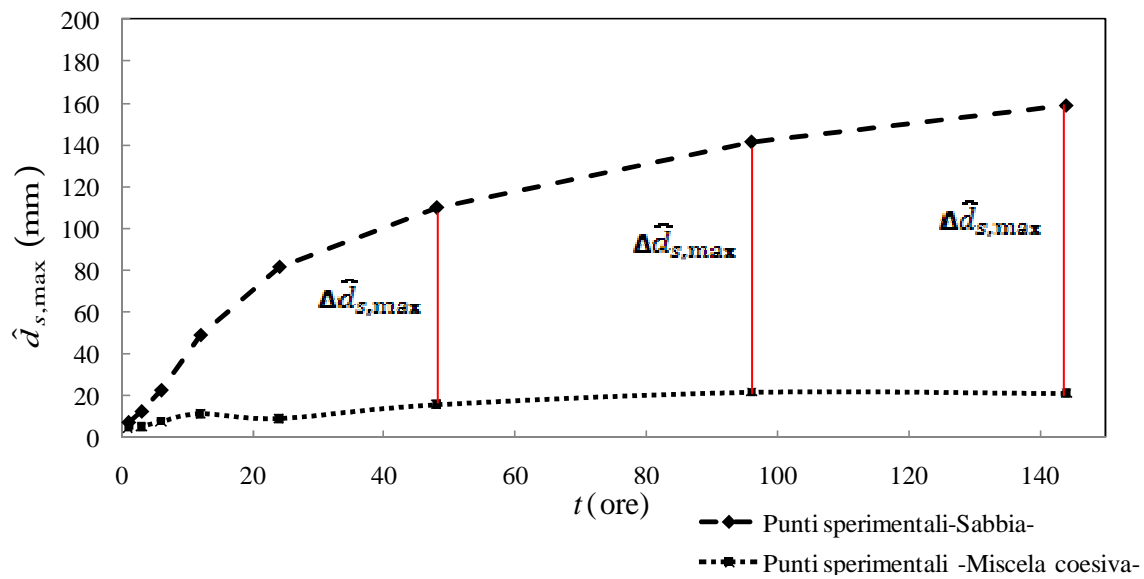


Figura 4.50a. Confronto tra le massime profondità di scavo dei profili massimi per la seconda fossa di scavo (serie A, sabbia e miscela coesiva).

I rapporti tra le  $\hat{d}_{s,max}$  della miscela e della sabbia per la prima fossa di scavo risultano variabili nelle prime ore, mentre dopo le 48 h raggiungono un valore piuttosto costante, pari in media a 0,6 (Tab. 4.18).

Tabella 4.18. Rapporto tra le massime profondità di scavo dei profili massimi misurate nella prima fossa di scavo per la miscela coesiva e per la sabbia (serie A).

Prova	$t$ (ore)	$\hat{d}_{s,max}$ sabbia (mm)	$\hat{d}_{s,max}$ miscela (mm)	$\hat{d}_{s,max}$ miscela / $\hat{d}_{s,max}$ sabbia (adim.)
A <sub>1</sub>	1	24,3	8,3	0,34
A <sub>2</sub>	3	33,7	12,64	0,37
A <sub>3</sub>	6	40,3	21,0	0,52
A <sub>4</sub>	12	53,23	23,65	0,44
A <sub>5</sub>	24	63,51	24,83	0,39
A <sub>6</sub>	48	68,36	43,57	0,64
A <sub>7</sub>	96	80,14	49,65	0,62
A <sub>8</sub>	144	91,3	51,4	0,56

Quanto sopra detto non si verifica nella seconda fossa di scavo (Tab. 4.19).

Tabella 4.19. Rapporto tra le massime profondità di scavo dei profili massimi misurate nella seconda fossa di scavo per la miscela coesiva e per la sabbia (serie A).

Prova	$t$ (ore)	$\hat{d}_{s,max}$ sabbia (mm)	$\hat{d}_{s,max}$ miscela (mm)	$\hat{d}_{s,max}$ miscela / $\hat{d}_{s,max}$ sabbia (adim.)
A <sub>1</sub>	1	6,93	4,8	0,70
A <sub>2</sub>	3	12,12	5,3	0,44
A <sub>3</sub>	6	22,32	7,68	0,34
A <sub>4</sub>	12	48,75	11,45	0,23
A <sub>5</sub>	24	81,45	9,16	0,11
A <sub>6</sub>	48	109,97	15,82	0,14
A <sub>7</sub>	96	141,4	21,9	0,16
A <sub>8</sub>	144	158,8	21,32	0,13

Analizzando, infine, il rapporto  $\hat{d}_{s,max}/h_u$  (essendo  $h_u$  l'altezza di moto uniforme di riferimento mostrata in Tab. 4.1), si è ricavata una legge di potenza interpolante l'andamento delle massime profondità di scavo nel tempo adimensionalizzato  $t/t_1$ , essendo  $t_1$  il tempo morfologico, come proposto da Breusers (1966) per l'escavazione di letti incoerenti a valle di un fondo fisso. Nel

presente caso, il tempo morfologico,  $t_1$ , è stato calcolato come rapporto tra il volume eroso finale,  $W_{s,f}$ , che coincide con il massimo valore misurato nel tempo (pur non essendo raggiunta la condizione asintotica di equilibrio) e la portata solida  $Q_{s,3h}$  calcolata come il volume eroso dopo 3 ore=10800 s,  $W_{s,3h}$ :

$$t_1 = \frac{W_{s,f}}{Q_{s,3h}} \quad (4.27)$$

dove:

$$Q_{s,3h} = \frac{W_{s,3h}}{10800} \quad (4.28)$$

La Fig. 4.51 e la Tab. 4.20 mostrano i risultati dell'analisi per la prima fossa di scavo, sia per la sabbia che per la miscela coesiva.

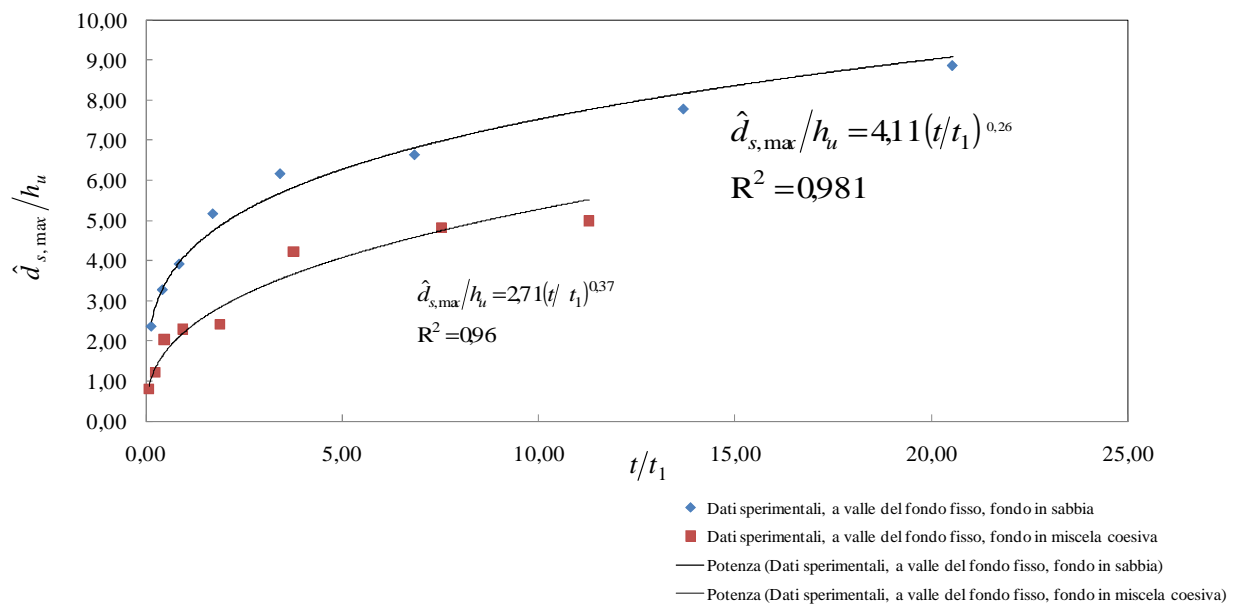


Figura 4.51. Evoluzione temporale del rapporto tra le massime profondità di scavo dei profili massimi e l'altezza di moto uniforme di riferimento per la prima fossa di scavo (serie A, sabbia e miscela coesiva)

L'analogo grafico per la seconda fossa di scavo non è qui riportato, non avendo ottenuto buoni risultati, a causa dei detti fenomeni di deposito a valle soglia di fondo e di creazione di vortici a monte di essa.

Tabella 4.20. Rapporto tra le massime profondità di scavo dei profili massimi e l'altezza di moto uniforme di riferimento per la prima fossa di scavo (serie A, sabbia e miscela coesiva)

Prova	$\hat{d}_{s,\max}/h_u$ (sabbia)	$t/t_1$	$\hat{d}_{s,\max}/h_u$ (miscela coesiva)	$t/t_1$
A <sub>1</sub>	2,36	0,14	0,81	0,08
A <sub>2</sub>	3,27	0,43	1,23	0,24
A <sub>3</sub>	3,91	0,86	2,04	0,47
A <sub>4</sub>	5,17	1,71	2,30	0,94
A <sub>5</sub>	6,17	3,42	2,41	1,88
A <sub>6</sub>	6,64	6,85	4,23	3,76
A <sub>7</sub>	7,78	13,69	4,82	7,52
A <sub>8</sub>	8,86	20,54	4,99	11,28

## 4.2 Prove in moto vario

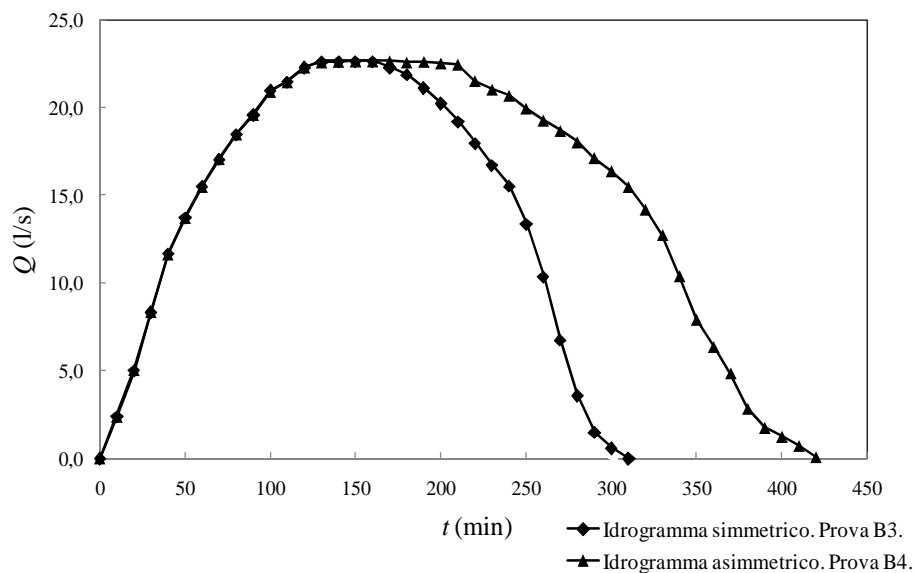
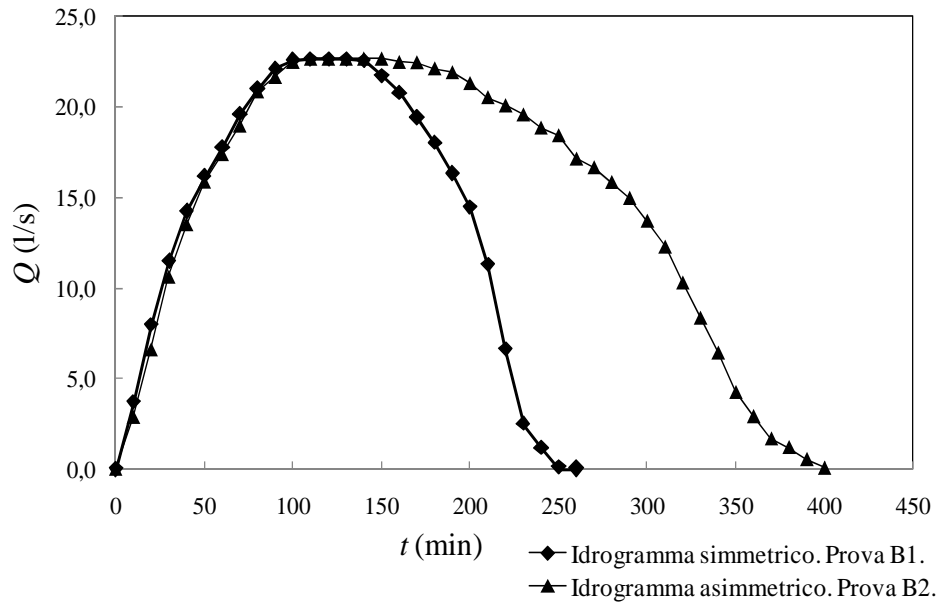
### 4.2.1 Procedura sperimentale

Le prove in moto vario (serie B) sono state eseguite mediante l'utilizzo di una valvola automatizzata ed elettrocomandata, costruita appositamente nel Laboratorio GMI, per la regolazione in automatico della portata.

Sono stati riprodotti quattro idrogrammi di piena (Allegato C), di cui due simmetrici (B<sub>1</sub> e B<sub>3</sub>) e due asimmetrici (B<sub>2</sub> e B<sub>4</sub>). Gli idrogrammi B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub> hanno la stessa portata di picco ( $Q^*=22,65$  l/s), lo stesso tempo di picco ( $t_p=2$  h), ma diversa durata complessiva (rispettivamente pari a  $t_f=4,33$  e  $6,67$  h), essendo diversa la durata della fase di recessione; gli idrogrammi B<sub>3</sub> e B<sub>4</sub>, invece, hanno entrambi la medesima portata di picco dei precedenti, tempo di picco  $t_p=2,20$  h e durata rispettivamente pari a  $t_f=5,17$  e  $7$  h (Tab. 4.1; Figg. 4.52 e 4.53).

Nell'Allegato C si riportano le tabelle con i valori delle portate ai vari istanti di tempo per i quattro idrogrammi di piena.

Le prove sono state svolte soltanto nel caso di letto di sabbia.



La portata di picco è stata fissata circa pari a quella di moto permanente della serie A, al fine di effettuare un confronto tra le massime profondità di scavo delle due serie di prove.

#### 4.2.2 Risultati

Alla fine di ciascuna prova in moto vario, si sono effettuati i rilievi delle fosse di scavo. Per quanto riguarda il letto di sabbia, nel caso dell'idrogramma simmetrico B<sub>1</sub> si è verificata una massima profondità di scavo pari a 29,19 mm e a 4,41 mm rispettivamente nella prima e nella seconda fossa di scavo; nel caso dell'idrogramma asimmetrico B<sub>2</sub>, invece, i valori sono risultati maggiori e pari rispettivamente a 33,00 mm e 6,58 mm.



L'idrogramma  $B_3$  ha provocato, invece, una massima profondità di scavo pari a 30,5 mm nella prima fossa di scavo e a 10,49 mm nella seconda; anche stavolta, nel caso dell'idrogramma asimmetrico  $B_4$  i valori sono risultati maggiori e pari rispettivamente a 33,8 mm e 11,79 mm dell'idrogramma asimmetrico,  $B_4$ .

Nelle Figg. 4.54÷4.57 si riportano le rappresentazioni grafiche delle fosse di scavo e delle curve di livello per le prove della serie B effettuate con il fondo di sabbia:

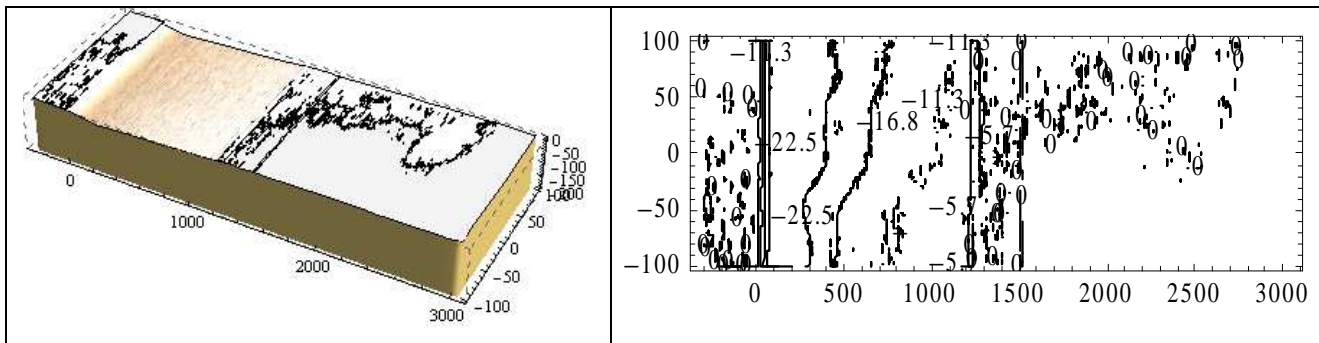


Figura 4.54. Fossa di scavo localizzato per la prova  $B_1$  (idrogramma simmetrico, sabbia):  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

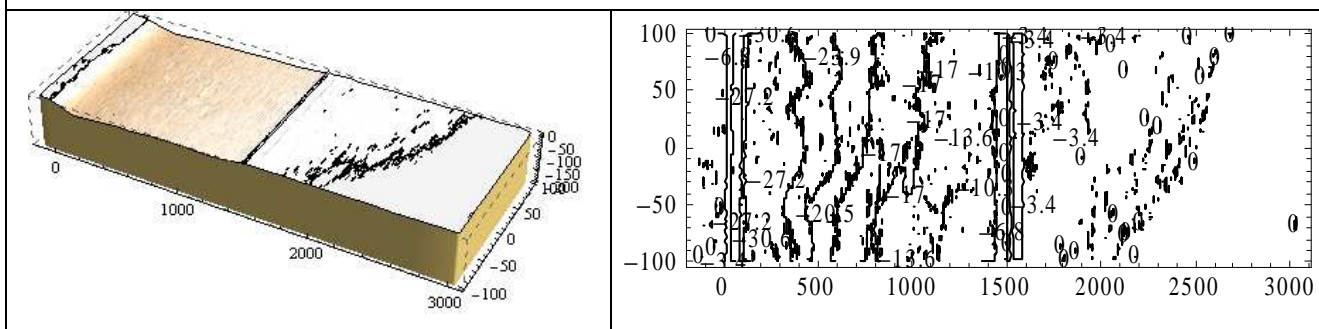


Figura 4.55. Fossa di scavo localizzato per la prova  $B_2$  (idrogramma asimmetrico, sabbia):  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

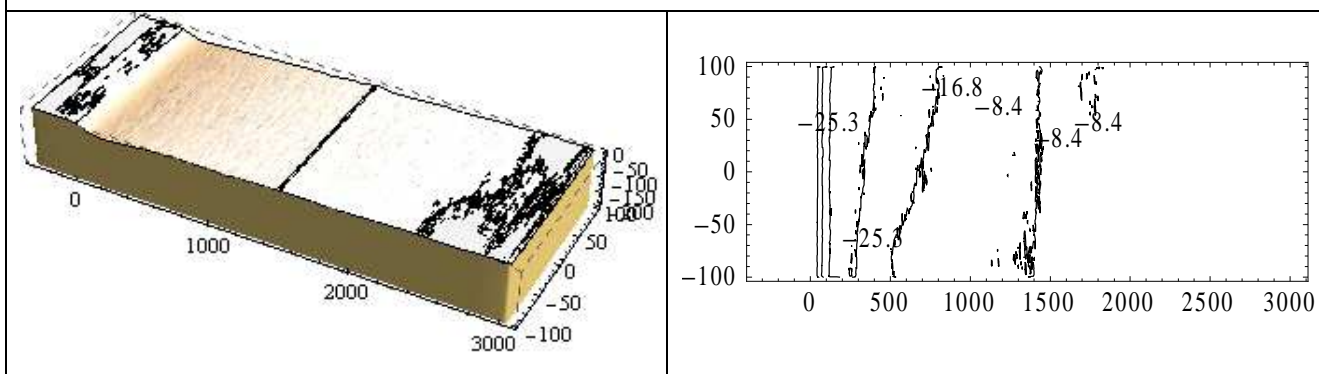
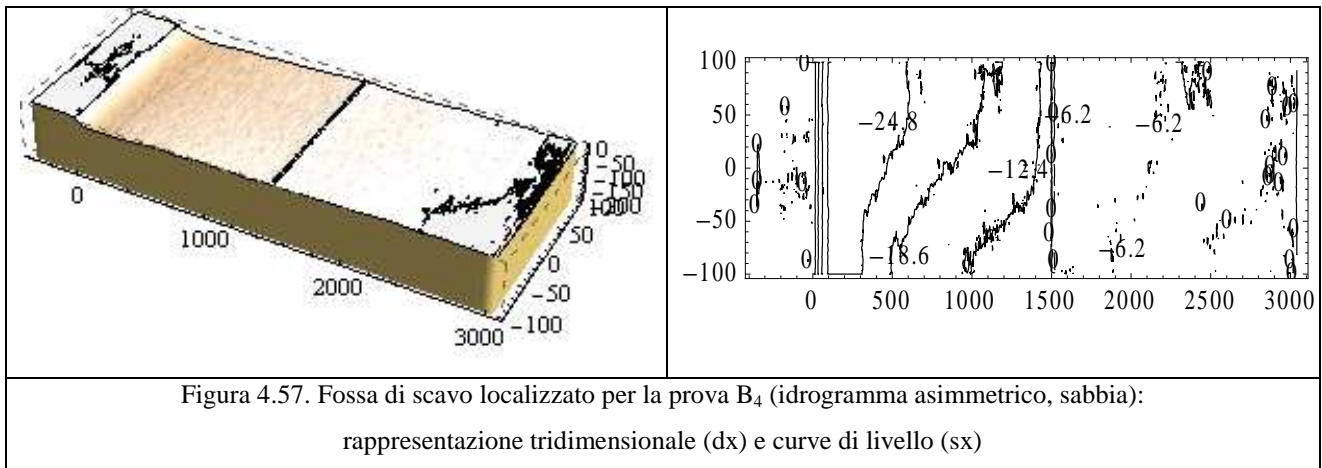


Figura 4.56. Fossa di scavo localizzato per la prova  $B_3$  (idrogramma simmetrico, sabbia):  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)



Nelle Figg. 4.58÷4.61 si riportano i profili longitudinali per le prove della serie B eseguite sul letto di sabbia, in cui la linea rossa indica le profondità di scavo medie, la linea blu quelle massime, la linea verde quelle minime e la linea nera il profilo di mezzzeria.

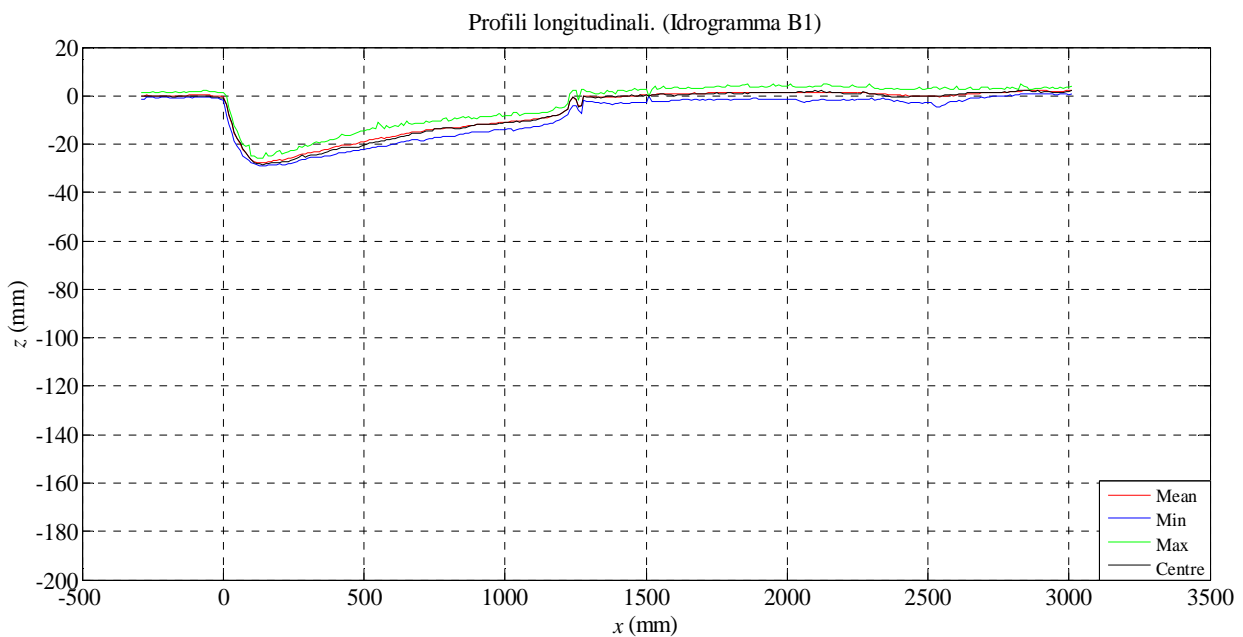


Figura 4.58. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzzeria (prova B<sub>1</sub>, sabbia).

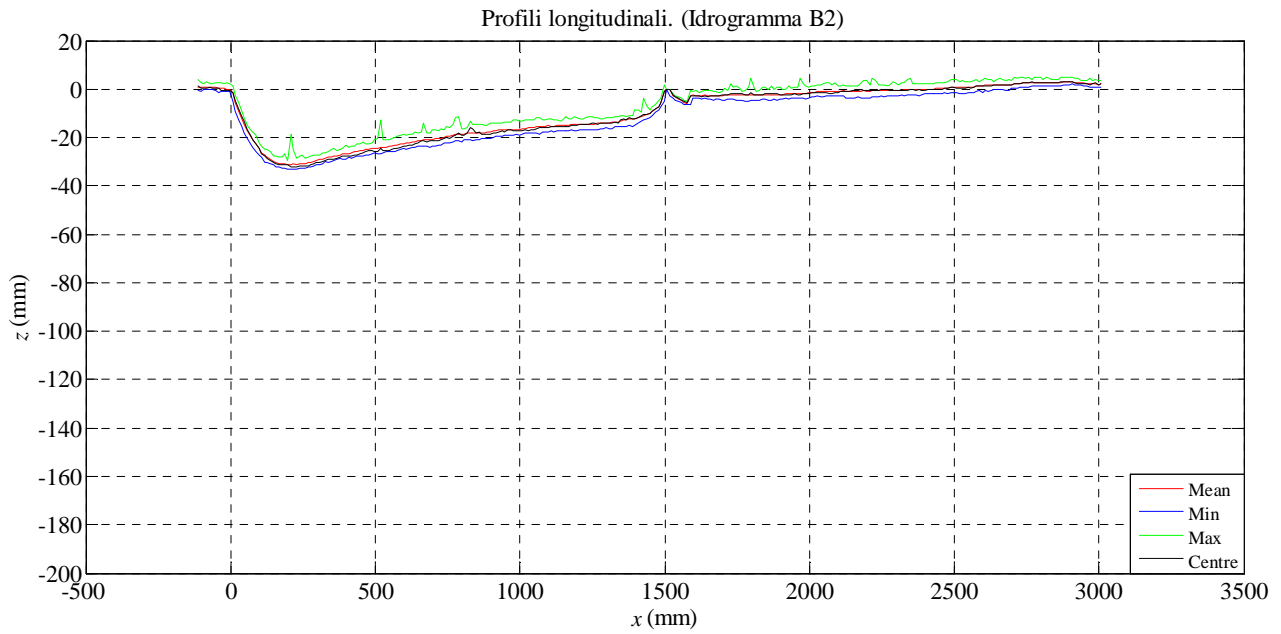


Figura 4.59. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova B<sub>2</sub>, sabbia).

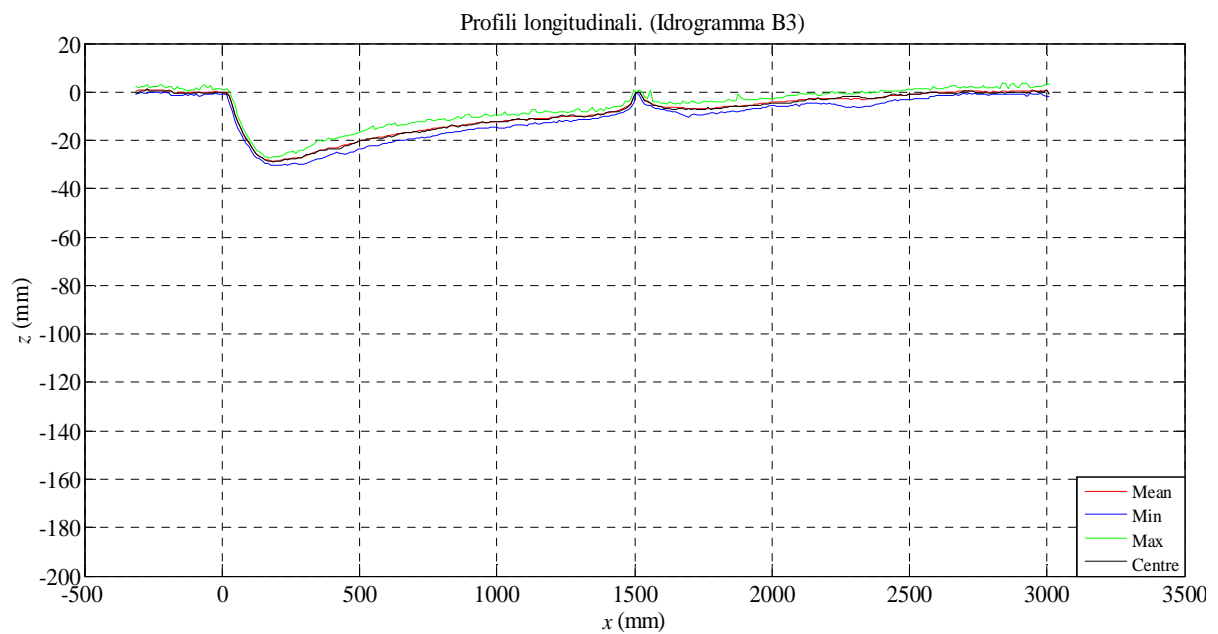


Figura 4.60. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova B<sub>3</sub>, sabbia).

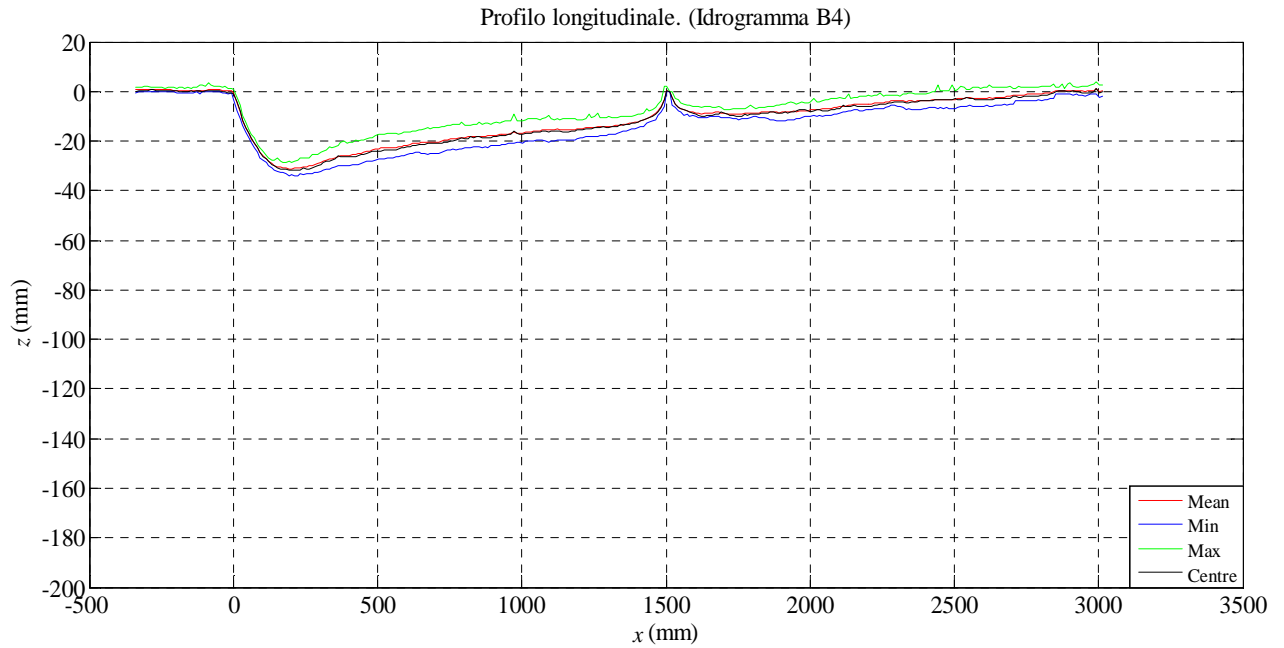


Figura 4.61. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova B<sub>4</sub>, sabbia).

La Tab. 4.21 riporta le massime profondità di scavo dei profili longitudinali massimi per le prove della serie B.

Tabella 4.21. Massime profondità di scavo dei profili longitudinali massimi (serie B, sabbia).

Prova	$t$ (ore)	$\bar{d}_{s,max}$ sabbia prima fossa di scavo (mm)	$\bar{d}_{s,max}$ sabbia seconda fossa di scavo (mm)
B <sub>1</sub>	4 <sup>h</sup> 20'	29,19	4,51
B <sub>2</sub>	6 <sup>h</sup> 40'	33	6,58
B <sub>3</sub>	5 <sup>h</sup> 10'	30,5	10,49
B <sub>4</sub>	7 <sup>h</sup>	33,8	11,79

Nelle Figg. 4.62÷4.65 si riportano le rappresentazioni grafiche delle fosse di scavo e delle curve di livello per le prove della serie B effettuate con il fondo costituito dalla miscela coesiva:

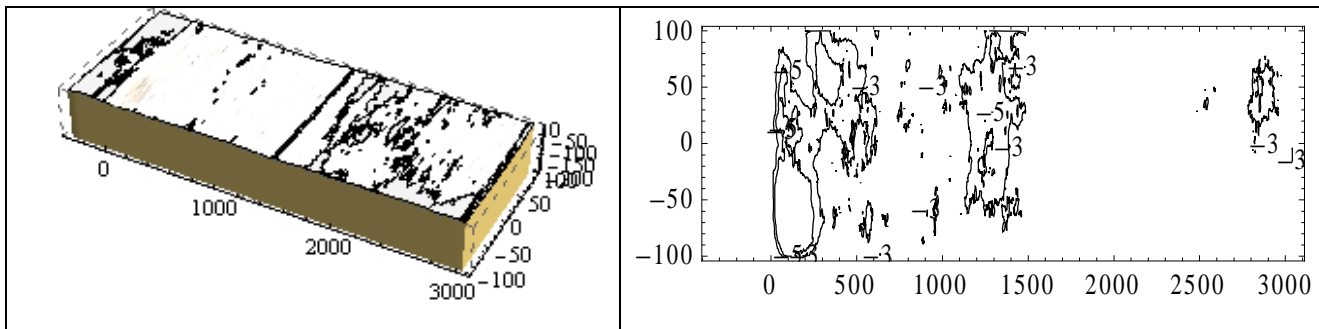


Figura 4.62. Fossa di scavo localizzato per la prova B<sub>1</sub> (idrogramma simmetrico, miscela coesiva):  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

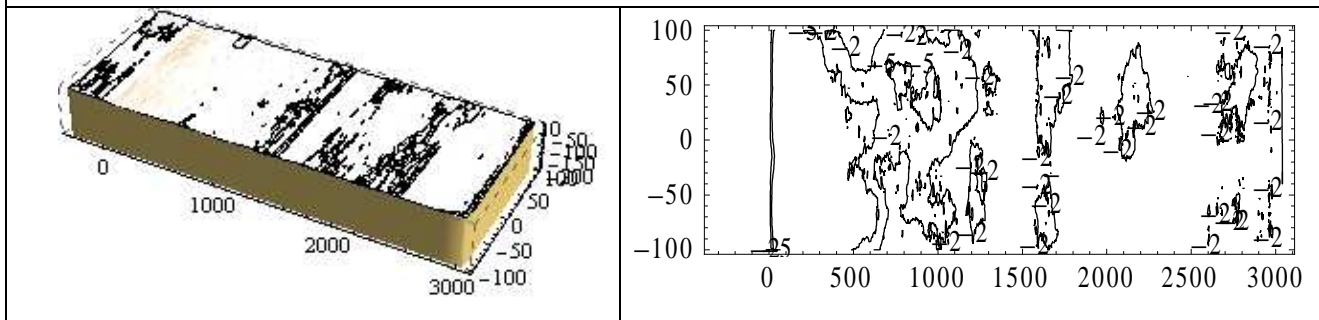


Figura 4.63. Fossa di scavo localizzato per la prova B<sub>2</sub> (idrogramma asimmetrico, miscela coesiva):  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

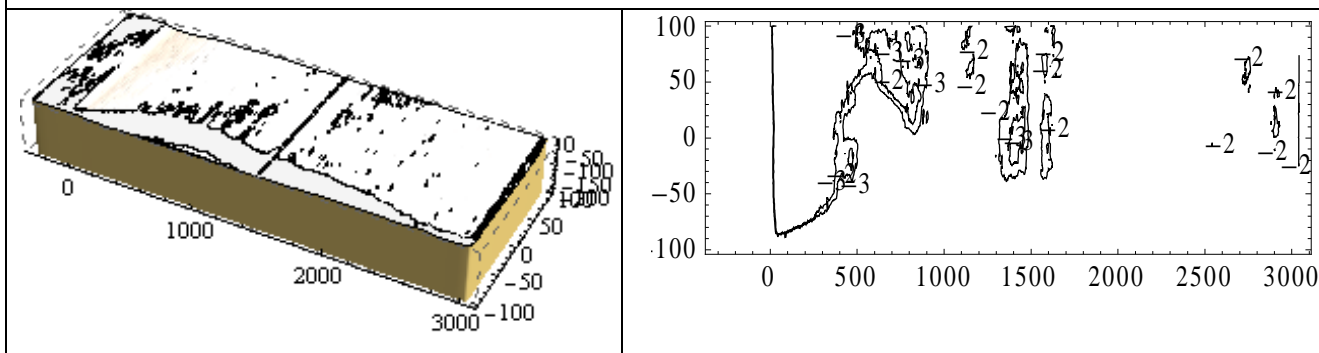


Figura 4.64. Fossa di scavo localizzato per la prova B<sub>3</sub> (idrogramma simmetrico, miscela coesiva):  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

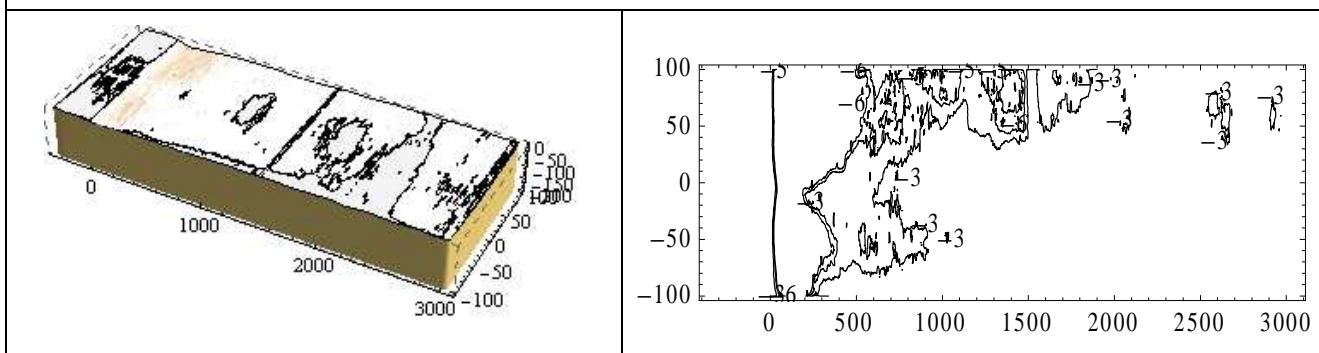


Figura 4.65. Fossa di scavo localizzato per la prova B<sub>4</sub> (idrogramma asimmetrico, miscela coesiva):  
rappresentazione tridimensionale (dx) e curve di livello (sx)

Nelle Figg. 4.66÷4.69 si riportano i profili longitudinali per le prove della serie B eseguite sul letto costituito dalla miscela coesiva:

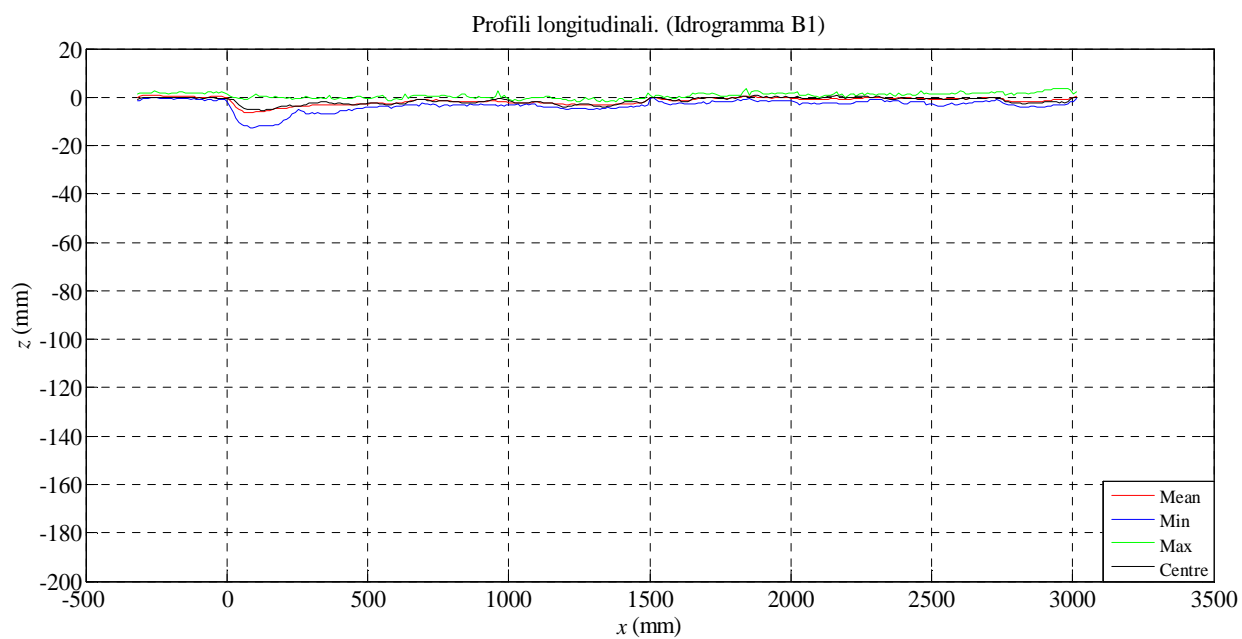


Figura 4.66. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova B<sub>1</sub>, miscela coesiva).

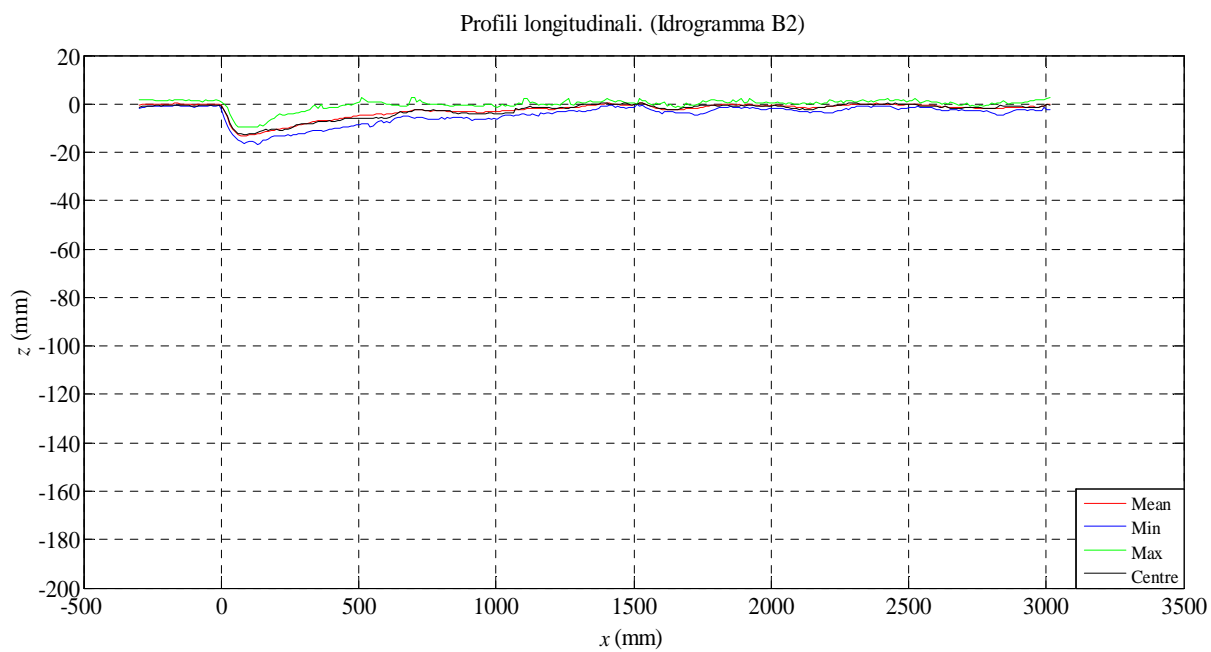
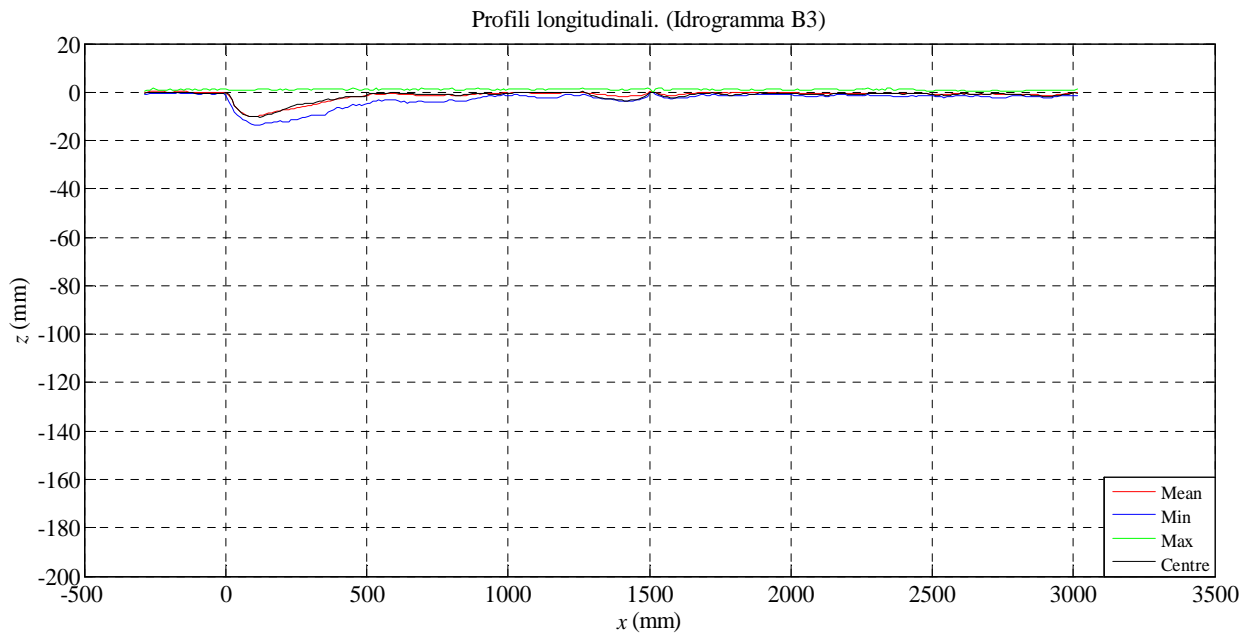
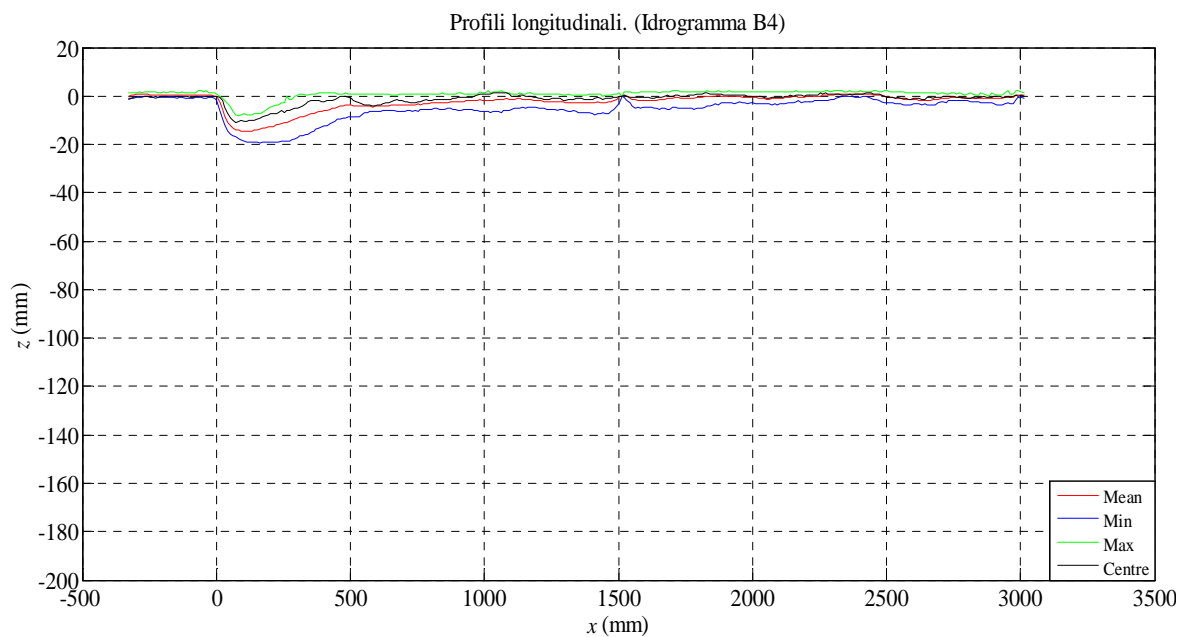


Figura 4.67. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova B<sub>2</sub>, miscela coesiva).


 Figura 4.68. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova B<sub>3</sub>, miscela coesiva).

 Figura 4.69. Profili longitudinali massimo, medio, minimo e di mezzeria (prova B<sub>4</sub>, miscela coesiva).

La Tab. 4.22 mostra le profondità massime di scavo dei profili longitudinali massimi,  $\bar{d}_{s,max}$ , per le prove della serie B effettuate sul fondo costituito dalla miscela coesiva.

Tabella 4.22. Massime profondità di scavo dei profili longitudinali massimi (serie B, miscela coesiva).

Prova	$t_f$ (ore)	$\bar{d}_{s,max}$ miscela (fondo fisso) (mm)	$\bar{d}_{s,max}$ miscela (soglia di fondo) (mm)
B <sub>1</sub>	4 <sup>h</sup> 20'	12,95	4,31
B <sub>2</sub>	6 <sup>h</sup> 40'	16,7	4,65
B <sub>3</sub>	5 <sup>h</sup> 10'	13,83	3,54
B <sub>4</sub>	7 <sup>h</sup>	19,50	5,61

#### 4.2.3 Analisi dei risultati

L'analisi dei risultati ha permesso di osservare che la profondità di scavo finale nel caso degli idrogrammi asimmetrici risulta di poco maggiore rispetto a quella dei corrispondenti idrogrammi simmetrici, sia per la sabbia che per la miscela coesiva in entrambe le fosse di scavo, essendo ciò imputabile alla differente durata del tempo di recessione, come ampiamente osservato anche da Tregnaghi *et al.* (2010). In particolare, nel caso della sabbia, confrontando gli idrogrammi B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub> si osserva un aumento di profondità di scavo dell'1,1 % nella prima fossa di scavo e dell'1,4% nella seconda, mentre nel caso degli idrogrammi B<sub>3</sub> e B<sub>4</sub> gli aumenti sono sempre dell'1,1%. Analogamente per il fondo costituito dalla miscela coesiva: confrontando gli idrogrammi B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub> si osserva un aumento di profondità di scavo dell'1,3 % nella prima fossa di scavo e dell'1,4% nella seconda, mentre nel caso degli idrogrammi B<sub>3</sub> e B<sub>4</sub> gli aumenti sono rispettivamente dell'1,1% e dell'1,6%.

Nella prima fossa di scavo, il rapporto tra le massime profondità ricavate dai profili longitudinali massimi per il letto in sabbia,  $\bar{d}_{s,max}^{sabbia}$ , e per quello costituito dalla miscela coesiva,  $\bar{d}_{s,max}^{miscela}$ , risulta simile per gli idrogrammi simmetrici (2,25 per la prova B<sub>1</sub> e 2,20 per la prova B<sub>3</sub>); analogo risultato si è ottenuto per gli idrogrammi asimmetrici (rapporto di 1,94 per la prova B<sub>2</sub> e di 1,73 per la prova B<sub>4</sub>). Si può, quindi, dedurre che le massime profondità di scavo nella miscela coesiva risultano, per i due idrogrammi simmetrici, circa il 45% di quelle verificatesi nel letto di sabbia. Per gli idrogrammi asimmetrici, invece, la percentuale sale al valore medio del 56% (Tab. 4.23).



Tabella 4.23. Rapporto tra le massime profondità di scavo dei profili massimi misurate nella sabbia e nella miscela coesiva nella prima fossa di scavo (serie B)

Prova	$t_f$ (ore)	$\tilde{d}_{s,max}$ sabbia (mm)	$\tilde{d}_{s,max}$ miscela (mm)	$\tilde{d}_{s,max}$ sabbia / $\tilde{d}_{s,max}$ miscela (adim.)
B <sub>1</sub>	4 <sup>h</sup> 20'	29,19	12,95	2,25
B <sub>2</sub>	6 <sup>h</sup> 40'	33	16,7	1,941
B <sub>3</sub>	5 <sup>h</sup> 10'	30,5	13,83	2,20
B <sub>4</sub>	7 <sup>h</sup>	33,8	19,50	1,73

Nella seconda fossa di scavo, invece, non si possono trarre le medesime conclusioni, per le dette cause (deposito generato dal trasporto solido proveniente da monte e vortici a ridosso della soglia di fondo) (Tab. 4.24).

Tabella 4.24. Rapporto tra le massime profondità di scavo dei profili massimi misurate nella sabbia e nella miscela coesiva nella seconda fossa di scavo (serie B)

Prova	$t_f$ (ore)	$\tilde{d}_{s,max}$ sabbia (mm)	$\tilde{d}_{s,max}$ miscela (mm)	$\tilde{d}_{s,max}$ sabbia / $\tilde{d}_{s,max}$ miscela (adim.)
B <sub>1</sub>	4 <sup>h</sup> 20'	4,51	4,31	1,04
B <sub>2</sub>	6 <sup>h</sup> 40'	6,58	4,65	1,41
B <sub>3</sub>	5 <sup>h</sup> 10'	10,49	3,54	2,96
B <sub>4</sub>	7 <sup>h</sup>	11,79	5,61	2,10

### 4.3 Confronto tra i risultati sperimentali e le formule predittive in letteratura

Sono stati effettuati alcuni confronti per le prove in moto permanente (serie A).

Si è utilizzata la formula di Gaudio e Marion (2003) per stimare la massima profondità di scavo,  $d_{s,max}$ , a valle della soglia di fondo:

$$d_{s,max} = H_s \left( 0,189 \frac{a_1}{\Delta D_{50}} + 0,266 \right) \quad (4.29)$$

dove:

$$a_1 = (S_0 - S_{eq})L \quad (4.30)$$

$$S_{eq} = \frac{(\theta_c \Delta d_{50})^{10/7}}{(nq)^{6/7}} \quad (4.31)$$

$$H_s = 1,5h_c \quad (4.32)$$

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (4.33)$$

Si è ottenuto un valore minore (11 cm) rispetto a quello misurato nel presente lavoro, pari a 15,88 cm (Tab. 4.25):

Tabella 4.25. Stima della massima profondità di scavo con la formula di Gaudio e Marion (2003)

$d_{50}$ (mm)	$n$ (s/m <sup>1/3</sup> )	$h_u$ (m)	$S_{eq}$ (adim.)	$a_1$ (m)	$h_c$ (m)	$H_s$ (m)	$a_1/(\Delta d_{50})$ (adim.)	$d_{s,max}$ (m)
0,86	0,012	0,11	0,00043	0,007	0,06	0,09	4,957	0,11

La massima profondità di scavo calcolata sottostima quella misurata, poiché le condizioni idrauliche in cui si sono svolte le prove di Gaudio e Marion (2003) sono diverse da quelle attuali (nel lavoro degli autori, la corrente transitava con altezza critica sulla soglia di fondo e in moto uniforme sul tratto avente pendenza di equilibrio a valle della fossa di scavo localizzato).

Anche la formula di Lenzi *et al.* (2002) tende a sottostimare lo scavo a valle della soglia di fondo (Tab. 4.26):

$$d_{s,max} = H_s \left[ 0,4359 + 1,4525 \left( \frac{a_1}{H_s} \right)^{0,8626} + 0,0599 \left( \frac{a_1}{\Delta D_{95}} \right)^{1,4908} \right] \quad (4.34)$$

Tabella 4.26. Stima della massima profondità di scavo con la formula di Lenzi *et al.* (2002)

$d_{50}$ (mm)	$n$ (s/m <sup>1/3</sup> )	$h_u$ (m)	$S_{eq}$ (adim.)	$a_1$ (m)	$h_c$ (m)	$H_s$ (m)	$a_1/(\Delta d_{50})$ (adim.)	$d_{s,max}$ (m)
0,86	0,012	0,11	0,00042	0,007	0,06	0,09	4,95	0,11

dove  $n$  è il coefficiente di scabrezza di Manning.

Analoghi confronti si possono fare sul tempo di equilibrio, ovvero, il tempo oltre il quale la fossa di scavo non subisce significative variazioni. Seguendo il lavoro di Jain e Kothiyari (2009), per le miscele coesive, si può determinare un valore adimensionale dello sforzo tangenziale al fondo:

$$\tau_*' = \left( \frac{\tau_b}{\Delta\gamma_s d_{50}} \right) = 0,056 \quad (4.35)$$

che ci permette di individuare sul grafico, riportato in Fig. 4.66, un valore della portata solida adimensionalizzata  $\varphi_{B,i}=0,00072$ , assumendo  $\zeta_{B,i}=1$ .

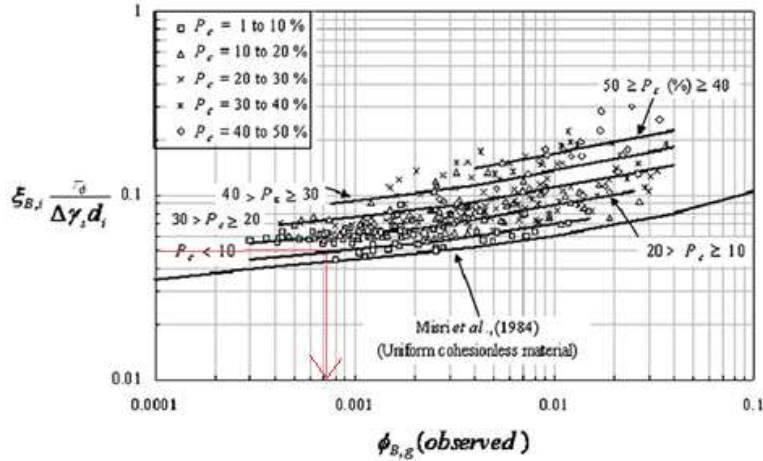


Fig. 4.66. Variazione del trasporto solido in funzione degli sforzi tangenziali (Jain e Kothyari, 2009)

Si può determinare, quindi, la portata solida specifica in peso:

$$q_{Bc,i} = \phi_{B,g} i_b \gamma_s \sqrt{\frac{\Delta\gamma_s g d_{50}^3}{\gamma_s}} = 0,00037 \quad \text{kg/(sm)} \quad (4.36)$$

dove  $i_b=1$ . Moltiplicando per la larghezza del canale, si ricava la portata solida in peso:

$$Q_B = 0,000181 \quad \text{kg/s} \quad (4.37)$$

Dividendo quest'ultima per il peso del materiale eroso a valle del fondo fisso, misurato per la prova più lunga (144 h), si può determinare un tempo di equilibrio pari a circa 99 h.

Per determinare il tempo di equilibrio a valle del fondo fisso nei sedimenti incoerenti, si è utilizzato l'approccio indicato da Termini (2011). Indicando con  $T^*$  un tempo adimensionale, espresso in funzione del parametro di Shields:

$$T^* = 4688 e^{-4,96 \cdot \theta} \quad (4.38)$$

Si può calcolare un tempo di equilibrio  $t_{eq}$  pari a 155 h, di poco maggiore della durata massima delle prove eseguite nella serie A (144 h):

$$t_{eq} = \frac{T^* \cdot b^2}{(\Delta g d_{50}^3)^{0,5}} \quad (4.39)$$