

# Capitolo 3

## Installazione sperimentale

### 3.1 Descrizione dell'installazione sperimentale

L'installazione sperimentale utilizzata nel corso della ricerca è posta nel Laboratorio di Grandi Modelli Idraulici (GMI) dell'Università della Calabria ed è costituita da una canaletta inclinabile a superficie libera, avente sezione trasversale di forma rettangolare, alimentata da un circuito idraulico chiuso, con una condotta in pressione di PVC, avente diametro esterno  $D_e = 200$  mm.

La canaletta è lunga circa 10 m e larga 48,5 cm ed è sostenuta da un travatura metallica inclinabile mediante l'utilizzo di due martinetti meccanici, posizionati a circa 1 m dalla sezione d'imbocco (Figg. 3.1a,b e 3.2).

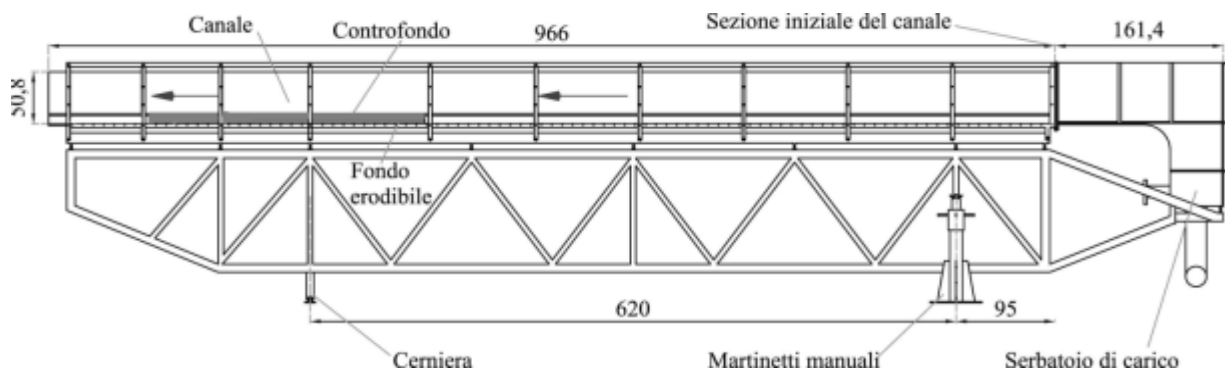


Figura 3.1a. Profilo longitudinale della canaletta.

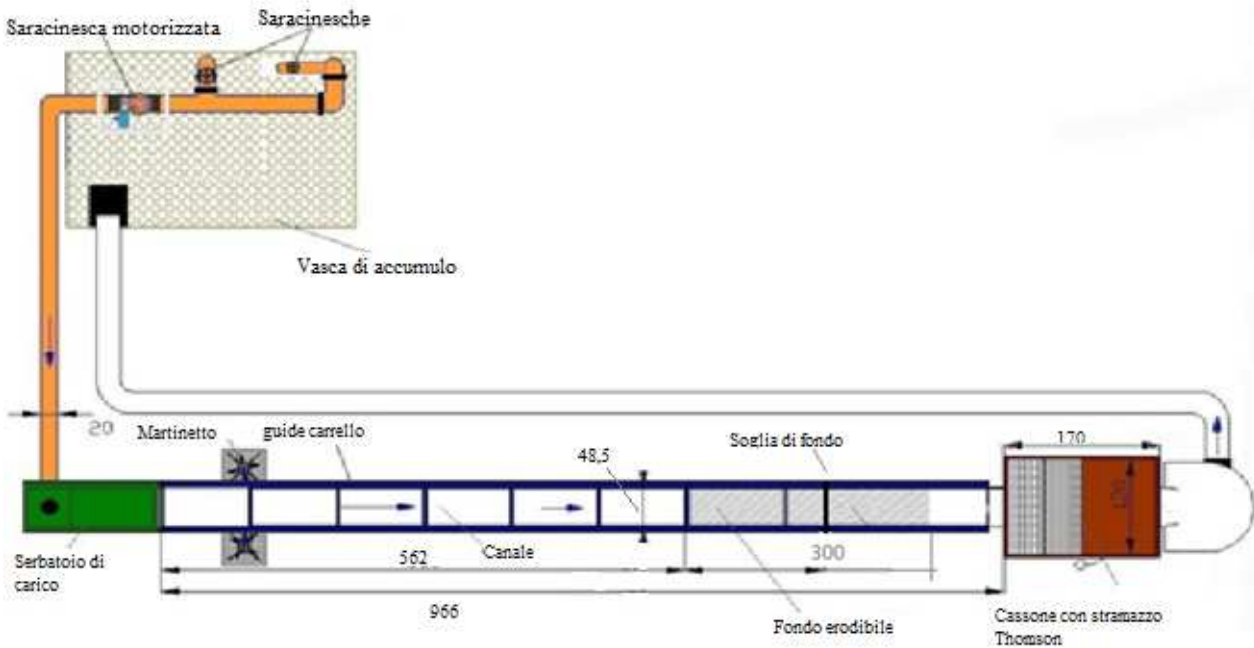


Figura 3.1b. Pianta dell'installazione sperimentale (unità di misura in cm).



Figura 3.2. Installazione sperimentale (Lab. GMI, Università della Calabria).

Il fondo fisso (realizzato in PVC), è stato reso scabro mediante incollaggio di uno strato di sabbia uniforme con  $d_{50} = 0,86 \text{ mm}$ , identico a quella del fondo mobile. La sponda sinistra è stata realizzata con fogli di PVC, mentre quella destra con pannelli di vetro, che permettono l'osservazione diretta del fenomeno erosivo. La canaletta è stata dotata di controfondo, posizionato sotto il fondo fisso, a una distanza di circa 20 cm, in modo da ricavare un vano lungo 300 cm per la collocazione dei sedimenti. Nel vano sono stati installati quattro rubinetti, sulla sponda destra della

canaletta, mediante i quali si poteva effettuare il drenaggio del letto sabbioso. All'interno del rubinetto di drenaggio, per evitare che durante le operazioni di scarico i sedimenti potessero essere trasportati via e causare scavi localizzati all'interno del letto erodibile, è stato inserito un filtro formato da dischetti di canapa e sabbia.

Nella sezione di mezzeria del fondo mobile è stata posizionata una soglia di fondo di 2 cm di spessore e altezza uguale a quella del vano. Ciò ha permesso di studiare simultaneamente il fenomeno di scavo localizzato a valle del fondo fisso e della soglia di fondo (Figg. 3.3a,b).

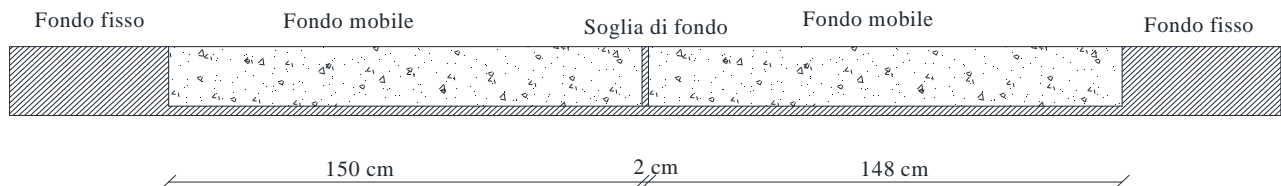


Figura 3.3a. Particolare fondo mobile (prima dell'inizio delle prove).

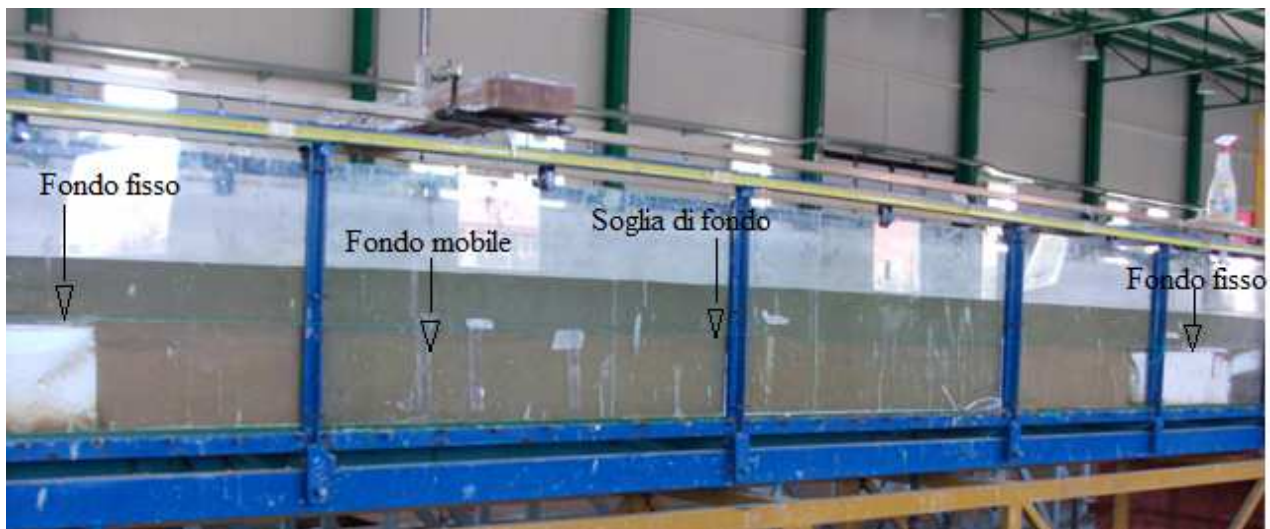


Figura 3.3b. Rappresentazione fotografica del fondo mobile.

La lunghezza del fondo mobile è stata scelta in modo da evitare l'interferenza della soglia con lo scavo localizzato a valle del fondo fisso, secondo quanto proposto da Lenzi *et al.* (2002), ossia valutando la condizione limite di interferenza attraverso il rapporto  $h_c/L=0,06\div0,08$ . Fissando la portata  $Q=22,35$  l/s, si è ottenuta l'altezza critica  $h_c=0,060$  m e la distanza tra fondo fisso di monte e soglia  $L=0,75\div1,00$  m. In sicurezza, al fine di evitare il detto fenomeno di interferenza, si è scelto il valore  $L=1,5$  m, che consentiva anche di posizionare la soglia di fondo nella sezione trasversale del fondo mobile equidistante dai fondi fissi di monte e valle.

In corrispondenza dello sbocco, la canaletta è stata munita di una paratoia a ventola, utile per la regolazione dell'altezza idrica. Sopra ciascuna sponda della canaletta è stato montato un binario

metallico parallelo al fondo. Sui binari sono stati disposti due carrelli indipendenti, entrambi liberi di muoversi secondo gli assi longitudinale e trasversale della canaletta stessa (Fig. 3.4).

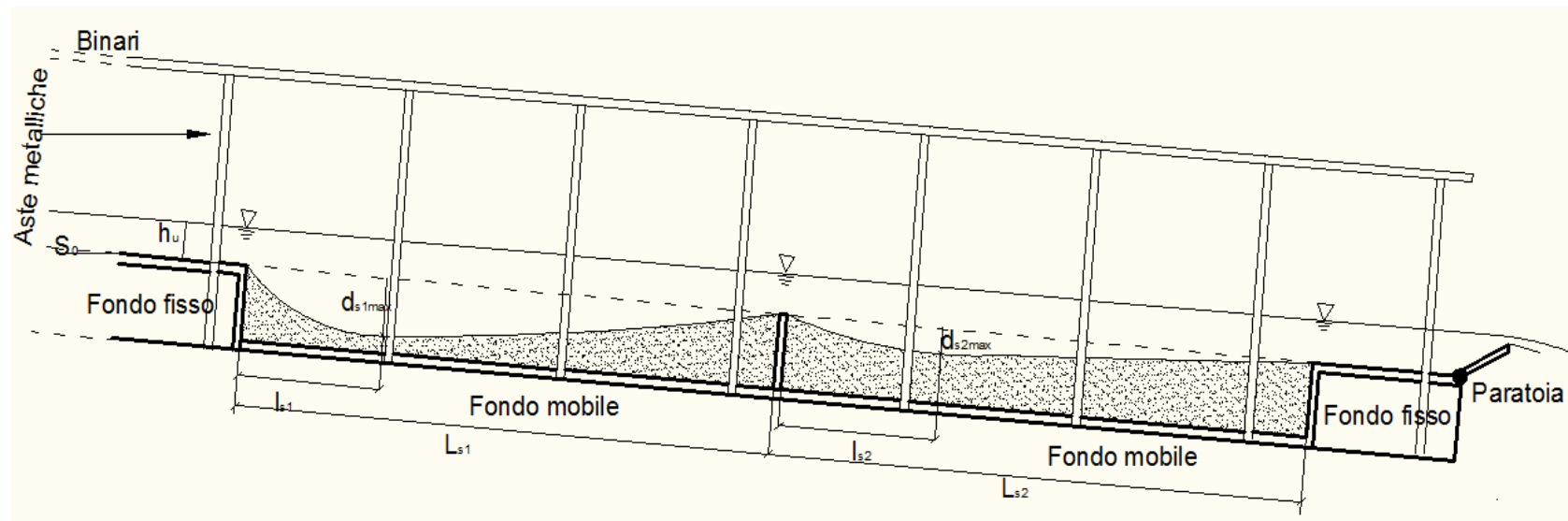


Figura 3.4. Particolare della canaletta: profilo longitudinale del fondo mobile.

Nei due carrelli sono stati sistemati, rispettivamente, uno Scanner Laser 3D e un'asta idrometrica con punta ad ago e nonio decimale. Il primo strumento permette di rilevare la superficie del fondo (sia fisso che mobile) della canaletta, mentre il secondo è stato adoperato per la misura dell'altezza idrica e per verificare le quote del fondo erodibile in punti specifici. A valle della canaletta, inoltre, è stato sistemato un cassone con stramazzo Thomson a contrazione incompleta, per la misura della portata.

Nelle prove in moto permanente, prima dell'avvio di ogni prova, è stata disposta una lamiera zincata di spessore pari a 0,6 mm, utilizzata per proteggere il fondo mobile dall'azione erosiva che si sarebbe generata all'avvio della prova, prima del raggiungimento delle condizioni di regime di moto permanente. Successivamente la lamiera veniva tirata con un cavo, tramite un argano, verso monte e lasciata sul fondo fisso per tutta la durata della prova. Al fine di garantire la stessa scabrezza, sulla lastra è stato incollato lo stesso strato di sabbia del fondo fisso, in modo tale da evitare discontinuità rispetto a quest'ultimo.

Di seguito si descrivono gli strumenti utilizzati durante la campagna sperimentale.

### 3.2 Asta idrometrica con punta ad ago

L'asta idrometrica con punta ad ago è stata utilizzata per determinare le quote della superficie libera, del fondo fisso e del fondo mobile, in modo da ottenere anche la misura della profondità d'acqua. Essa è stata allocata su di un carrello libero di muoversi longitudinalmente e trasversalmente per garantire la lettura delle misure in più punti (Figg. 3.5a,b,c)



Figura 3.5.a. Asta idrometrica.

Le letture sono state effettuate muovendo verticalmente l'asta idrometrica mediante una rotella, e leggendo successivamente le scale graduate (Fig. 3.4.c). L'asta possiede un'accuratezza pari a 0,1 mm e utilizza due scale che ci consentono di leggere fino al millimetro l'una e fino al decimo del millimetro l'altra. Le battute eseguite, naturalmente, hanno come sistema di riferimento un piano orizzontale non noto, quindi, per determinare una generica quota è stato necessario effettuare la differenza tra due battute sulla stessa verticale.



Figura 3.5b. Particolare dell'asta idrometrica.



Figura 3.5c. Nonio decimale.

### 3.3 Stramazzo Thomson

Lo stramazzo Thomson a contrazione incompleta è stato impiegato per la misura della portata. Esso è stato intagliato sulla parete di valle di un cassone metallico di dimensioni 1,8 m per 1,2 m e profondo 1 m (Figg. 3.6a,b,c).

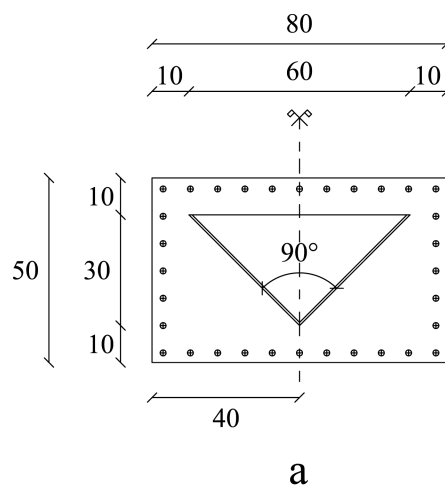


Figura 3.6a. Stramazzo Thomson.



Figura 3.6b. Spigolo vivo.





Figura 3.6c. Vena effluente dallo stramazzo Thomson.

Sul fondo del cassone sono state inserite due griglie di legno, utilizzate per permettere all'acqua di arrivare in condizioni di calma allo stramazzo. La portata idrica è stata valutata mediante la determinazione di un coefficiente d'efflusso con la relazione di Calomino *et al.* (1988):

$$\mu_T = \left( \mu_0 + \frac{\alpha_T}{h_T} \right) \cdot \left[ 1 + \frac{h_T^4}{r_A \cdot B_T^2 \cdot (h_T + p)^2} \right] \quad (3.1)$$

dove  $\mu_T$  è il coefficiente d'efflusso dello stramazzo Thomson,  $r_A$  un fattore di riduzione dell'area liquida nel cassone (pari a 0,17 in presenza di due griglie – come nel caso in questione – e 0,10 in presenza di una griglia),  $p=0,24$  m il petto dello stramazzo,  $B_T=1,2$  m la larghezza del cassone. I coefficienti  $\alpha_T$  e  $\mu_0$  sono stati stimati dagli autori pari rispettivamente a 0,0022 e 0,296. Nota, quindi, la misura del carico  $h_T$  sul vertice dello stramazzo, la portata si valuta mediante la seguente relazione:

$$Q_T = \mu_T \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_T^{5/2} \quad (3.2)$$

Il carico  $h_T$  si è ricavato per differenza tra il livello segnato in un piezometro collegato al cassone durante l'esecuzione della prova e la lettura dello *zero* di riferimento dello stramazzo Thomson:

$$h_T = h'_{p,fin} - zero_T \quad (3.3)$$

Lo *zero* di riferimento dello stramazzo si è valutato in condizioni idrostatiche, effettuando tre diverse misure. La prima si è eseguita battendo con la punta dell'asta il vertice dello stramazzo,  $h'_V$ ; la seconda,  $h'_M$ , si è letta spostando orizzontalmente l'asta idrometrica di 50 cm dal vertice; la terza mediante il piezometro posto sul lato destro del cassone e collegato con il suo interno mediante un tubicino,  $h'_{p,in}$  (Figg. 3.7 e 3.8):

$$zero_T = h'_{p,in} + h'_{-V} - h'_M \quad (3.4)$$



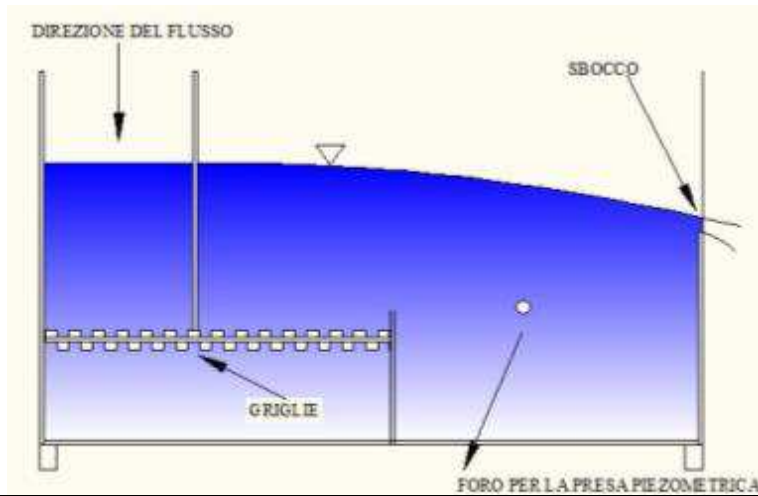


Figura 3.7. Sezione longitudinale del cassone con stramazzo Thomson e particolare della presa piezometrica.

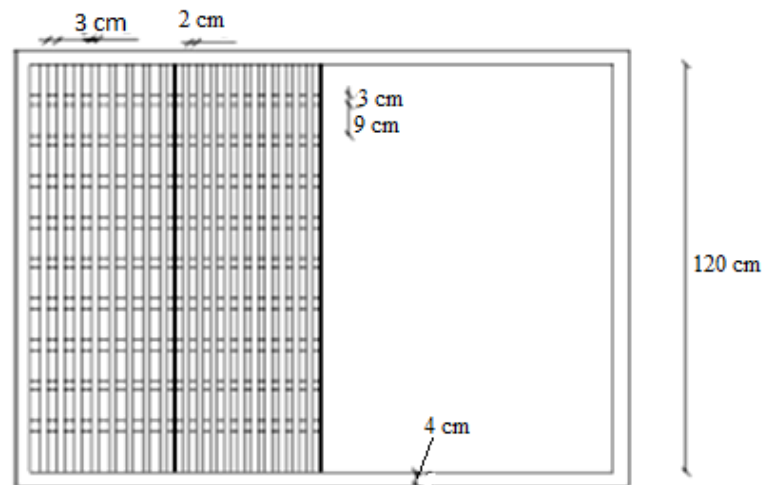


Figura 3.8. Pianta del cassone con stramazzo Thomson.

Nell'ipotesi che le incertezze sui coefficienti siano trascurabili rispetto al carico  $h_T$ , la legge di propagazione dell'errore ci consente di ricavare l'errore relativo sulla portata  $Q_T$  al variare del carico  $h_T$ .

$$\frac{\delta Q_T}{Q_T} = \left| -\frac{\alpha_T}{h_T(\mu_0 h_T + \alpha_T)} + \frac{4h_T^3(h_T + p) - 2h^4}{r_A \cdot B_T^2(h_T + p)^3 + h_T^4(h_T + p)} + \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{h_T} \right| \cdot \delta h_T \quad (3.5)$$

Dal calcolo si evince che l'errore relativo assoluto associato a ciascuna misura è pari a 0,1 mm, mentre l'errore assoluto sulla misura del carico è  $\delta_{Th} = 0,4$  mm.

### 3.4 Scanner Laser 3D

Lo *Scanner Laser 3D* modello Vivid 300/VI-300 è stato utilizzato per effettuare il rilievo della superficie erosa (Fig. 3.9).

Figura 3.9. *Scanner Laser 3D* modello Vivid 300/VI-300.

Esso permette di acquisire, mediante un sistema ottico a triangolazione, oggetti posti a una distanza che oscilla tra 0,55 m e 1,2 m. Ogni punto dell'oggetto viene identificato univocamente da una terna di punti  $(x, y, z)$  relativi a un sistema di riferimento intrinseco. Il campo di acquisizione è di 185 mm x 185 mm se la distanza tra oggetto e strumento è la minima consentita, altrimenti è di 395 mm x 395 mm. Il numero di punti acquisiti varia, dunque, da 30000 a 400 nei due casi e diminuisce al crescere della distanza.

Per i rilievi del fondo della canaletta, i punti acquisiti in ogni singola scansione erano circa 23000. In Tab. 3.1 sono riportate le principali caratteristiche dello strumento:

Tabella 3.1. Caratteristiche dello *Scanner Laser 3D*

Nome modello	VIVID 300/VI-300
Distanza focale ( $f_L$ )	12 mm
Massima potenza del laser	7 MW
Angolo di apertura di diffusione	Orizzontale 23,7°, verticale 0,1°
Tempo di acquisizione	0,6 s
Tempo di trasferimento dati al computer	$\leq 2$ s
Condizioni illuminazione dell'ambiente	$\leq 500$ lx
Riproduzione immagini	Dati 3D: 1/2-inch CCD (380000 elementi); dati a colori: 1/2-inch CCD a colore (380000 elementi)
Dati in uscita	Dati 3D: 200 X 200; dati a colori: 400 X 400
Formato dati in uscita	dati 3D: formato originale (convertito in dati 3D dal <i>software</i> VI-S1) dati a colori: RGB 24-bit immagine raster
Porte	SCSI II, monitor a colori NTSC terminal
Potenza	100÷240V
Fusibile	tipo T2A da 250V
Dimensioni	165 (lunghezza) × 406 (altezza) × 320 (larghezza) mm
Peso	8 kg
Temperatura di funzionamento	10÷35 °C (85% di umidità relativa massima, assenza di condensazione a 35 °C)
Temperatura per conservazione	-20÷50 °C (85% di umidità relativa massima, assenza di condensazione a 35 °C)

L'acquisizione dei punti avviene proiettando dei raggi laser sul fondo oggetto di studio, mediante l'utilizzo di un dispositivo fotosensibile. Il fascio di luce, che viene prodotto nel momento dell'esecuzione del rilievo, è fornito da un laser al diodo, che si muove verticalmente all'oggetto da rilevare attraverso una lente cilindrica, mentre la traslazione del raggio è garantita da uno specchio galvanico che ruota attorno a un asse orizzontale

Una volta riflesso dall'oggetto, il fascio di luce viene proiettato su un dispositivo fotosensibile, chiamato elemento ricevente o piano immagine (*position sensitive photo-detector*, *PSD*). Due amplificatori posizionali all'interno dello strumento provvedono a convertire le foto-correnti, prodotte dal *PSD*, da segnali analogici in segnali digitali, tramite i convertitori A/D. Il *PSD* è costituito da diversi elementi: il *Lateral Effect Photodiode (LEP)* o il *Linear Charge Couplet Device (CCD)* o il *Charge Integrated Device (CID)*. Il *LEP* permette di raggiungere grandi velocità d'acquisizione a costi relativamente minori. I sensori *CCD* riducono sensibilmente l'influenza sulla misura derivante dall'allineamento tra oggetto e sensore, mantenendo comunque una particolare accuratezza nel rilevare una superficie erosa. Lo *Scanner Laser 3D* utilizzato gode di quest'ultimo dispositivo.

### 3.5 Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)

L'ADV Vectrino, utilizzato per la misura della velocità della corrente idrica, basa il suo funzionamento sull'effetto Doppler applicato agli ultrasuoni. Esso è in grado di emettere una breve onda sonora, ricevere l'onda riflessa e misurare la variazione della frequenza ( $\Delta F = F_e - F_r$ ).

Lo strumento è composto da una sonda metallica (*probe*), collegata al trasduttore centrale (Fig. 3.10).



Figura 3.10. ADV Vectrino.

L'impulso ultrasonico emesso dal trasduttore-sorgente si propaga nella massa liquida in movimento con una certa velocità. Se verrà captato da una particella in movimento (solitamente zooplancton o sedimenti sospesi) e, quindi, con caratteristiche diverse dal liquido che la circonda, sarà riflesso in tutte le direzioni e infine intercettato dal trasduttore-ricevente.

A differenza dei classici strumenti basati sull'effetto Doppler, il Vectrino ha un sonar bi-statico; ciò significa che utilizza distinti trasduttori acustici per trasmettere e riflettere le onde.

I trasmettitori e i ricevitori hanno un'apertura angolare stretta, precisamente di  $30^\circ$ , adatta per intercettare un volume di controllo posto a circa 50 mm dal trasduttore sorgente (Fig. 3.11):

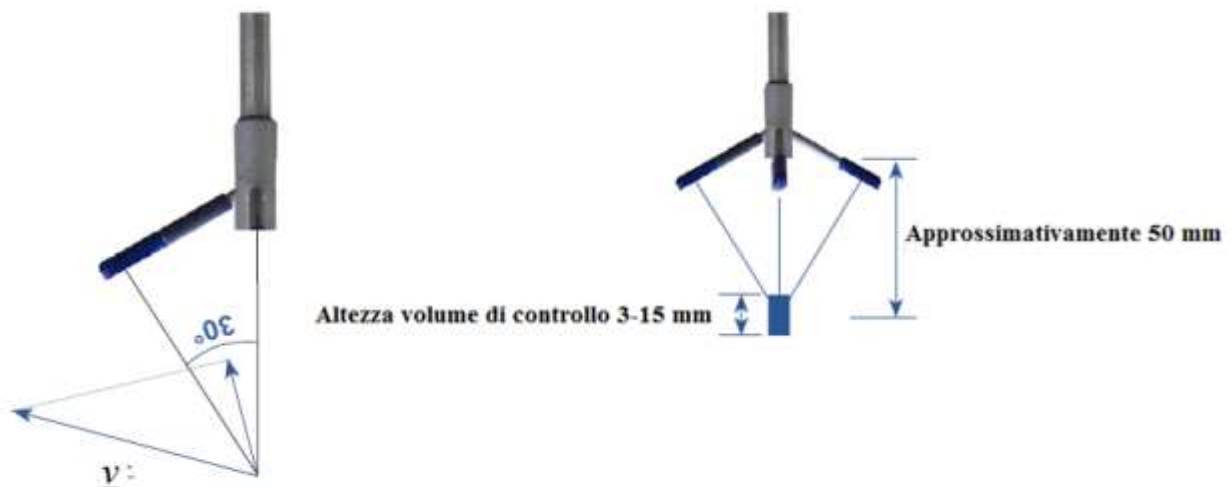


Figura 3.11. Schema del campo di ricezione del *Vectrino Velocimeter*.

L'onda emessa dal trasduttore sarà, quindi, riflessa non appena essa colpirà una particella che attraversa il volume di misura, che ha una geometria cilindrica con altezza pari a 15 mm e diametro pari a 6 mm. L'onda riflessa contiene informazioni sulla posizione dell'oggetto riflettente, sulla natura dell'oggetto riflesso e sulla velocità dello stesso.

I ricevitori, dunque, misurano le componenti della velocità delle particelle riflettenti lungo la bisettrice dell'angolo di  $30^\circ$  formato dai segnali emesso e ricevente; quindi, la velocità misurata sarà traslata di  $15^\circ$  rispetto all'impulso ultrasonico emesso. Tutto ciò significa che lo strumento è molto più sensibile sulle componenti di velocità parallele al raggio emesso, lungo l'asse  $z$ , rispetto agli altri due assi  $x$ ,  $y$ .

Il campione di misure registrato dall'ADV poi sarà convertito dal *software Vetrino Plus v. 1.21* in velocità lungo i tre assi cartesiani  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

La frequenza di campionamento è stata fissata pari a 25 Hz, con un'incertezza di misura pari a 1%.

I campioni di misure sono stati raccolti utilizzando due differenti sonde ADV: la *down-looking probe*, per effettuare le misure lungo una verticale nei punti in prossimità del fondo, e la *side-*

*looking probe*, per le restanti misure in punti posti a una certa distanza dal fondo fisso (Figg. 3.12 e 3.13).



Figura 3.12. Trasmettitori e ricevitori acustici del *Vectrino Velocimeter*. Asta *side-looking*.



Figura 3.13. Trasmettitori e ricevitori acustici dell'ADV *Vectrino* (sonda *down-looking*).

Di seguito si riportano le caratteristiche dello strumento:

Tabella 3.2. Caratteristiche dell'ADV *Vectrino*.

Range	$\pm 0,01- 0,1- 0,3- 1- 2- 4$ m/s
Accuracy	$\pm 0,5\%$ of measured value $\pm 1$ mm/s
Sampling rate (output)	1-25 Hz, 1-200 Hz (Vectrino firmware only)
Internal sampling rate	200-5000 Hz
SAMPLING VOLUME	
Distance from probe	0,05 m
Diameter	6 mm
Height (user selectable)	3-15 mm
DOPPLER UNCERTAINTY	
Uncertainty at 25 Hz	1% of velocity range
ECHO INTENSITY	
Acoustic frequency	10 MHz
Resolution	0,45 dB
Dynamic range	60 dB
SENSORS	

Temperature range	- 4 °C to 40° C
Accuracy/Resolution	1°C/0,1°C
Time response	5 min

L'ADV, fissato su un carrello mobile e adagiato sulle sponde della canaletta, è stato utilizzato per misurare tre serie di profili di velocità, ognuna costituita dalle misure effettuate lungo sette verticali localizzate di mezzeria. Per ogni serie, quattro verticali sono state battute sul fondo fisso e tre su un fondo mobile eroso, costituito prima da sola sabbia, poi da miscela coesiva (per una prova di 24 h). Successivamente, le sette verticali sono state ripetute su un letto orizzontale, in sola sabbia, perfettamente livellato in continuità con i fondi fissi di monte e valle (Figg. 3.14a,b). Per fare ciò è stato necessario fissare il fondo mobile con un particolare prodotto, chiamato *flatting*, solitamente impiegato per proteggere le imbarcazioni dall'azione corrosiva della salsedine.

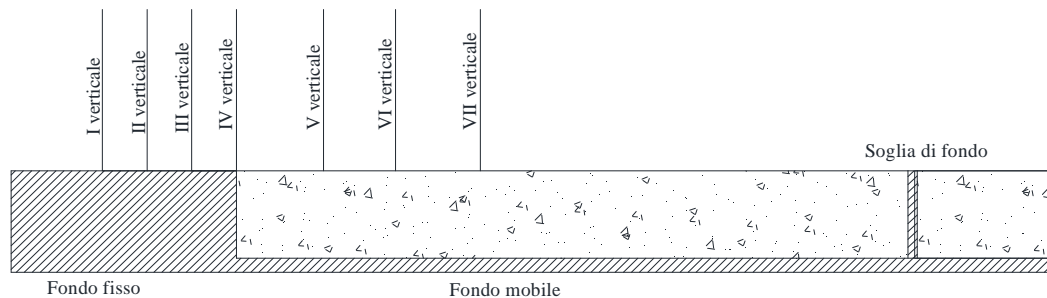


Figura 3.14a. Localizzazione delle misure dei profili di velocità sul fondo eroso.

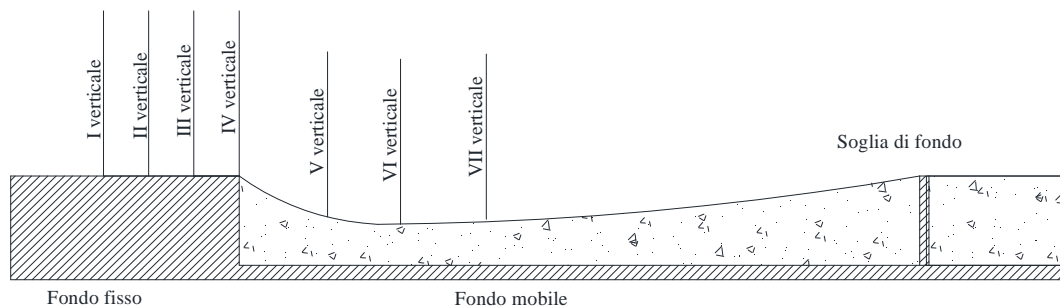


Figura 3.14b. Localizzazione delle misure dei profili di velocità in assenza di erosione.

### 3.6 Valvola regolatrice di portata elettrocomandata

È stata adoperata una valvola regolatrice di portata elettrocomandata per realizzare gli idrogrammi di piena nelle simulazioni in moto vario.

La valvola, realizzata nelle officine del Laboratorio GMI, è costituita da una saracinesca, un motore elettrico e un *inverter*.

Il volantino della saracinesca è stato realizzato con una ruota dentata grande, mentre il motore elettrico fa girare un cilindro metallico che termina con una ruota dentata piccola, disposta ortogonalmente all'asse della prima ruota (Fig. 3.15).

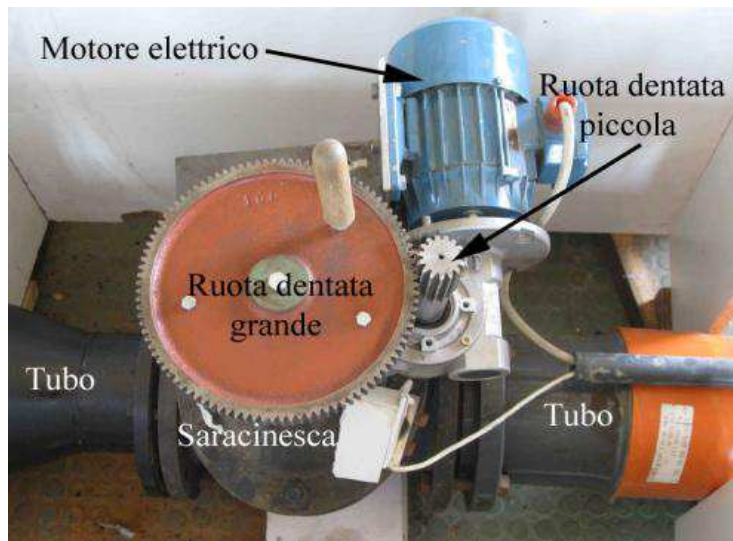


Figura 3.15. Componenti della valvola motorizzata utilizzata per le prove in moto vario.

L'*inverter* è un apparecchio elettrico in grado di convertire una corrente continua in una corrente alternata. Esso è stato utilizzato per far variare la frequenza della corrente elettrica e, quindi, per poter graduare a piacimento il tempo di apertura e di chiusura dell'otturatore (Fig. 3.16).



Figura 3.16. *Inverter* utilizzato per la regolazione della velocità di aperture e chiusura della saracinesca.

### 3.7 Il fondo mobile

Prima di dare inizio all'attività sperimentale, è stata scelta la sabbia e l'argilla da utilizzare per la realizzazione del fondo mobile. Quindi, è stata individuata la giusta percentuale in peso di sabbia e argilla, da impiegare per realizzare la miscela coesiva. In merito a ciò, la letteratura scientifica definisce miscele coesive quelle misture aventi una percentuale minima di argilla, pari a circa il 3% (Mitchener e Torfs, 1996) o il 7÷13% (Torfs, 1995) in peso della miscela complessiva, la cui restante parte deve essere, logicamente, costituita da sabbia. Anche la composizione mineralogica



del materiale fine riveste un ruolo di primo piano; infatti, i principali minerali che forniscono caratteristiche coesive alle miscele sono: caolinite, montmorillonite, bentonite, vermiculite e Illite.

L'argilla disponibile aveva una composizione mineralogica caratterizzata da: caolinite, potash mica, soda mica, quarzo e materiali carboniosi.

Sono state realizzate e provate diverse miscele di sabbia e materiale fine prima di dare inizio alle prove sul fondo coesivo.

La prima miscelazione, costituita dal 90% di sabbia e dal 10% di argilla ventilata (definita tale per le operazioni di essiccamento), ebbe un esito negativo, in quanto le forze di coesione, tipiche di questo materiale, producevano una cementificazione del fondo mobile resistendo, così, all'azione erosiva della corrente idrica. Infatti, al termine della prova di durata maggiore, che nello specifico era stata fissata pari 144 ore, il fondo mobile rimaneva quasi orizzontale. Solo in alcune zone esso presentava un lieve scavo localizzato, con profondità massima pari a 5,84 mm a valle del fondo fisso e a 10,35 mm a valle della soglia di fondo. Pertanto, si decise di sostituire l'argilla con una di diversa composizione mineralogica, proveniente da uno scavo di sbancamento di una collina sita nel Comune di Zumpano, in provincia di Cosenza.

Un campione di questo materiale è stato sottoposto a identificazione mineralogica tramite diffrazione ai raggi X (XRD), presso il Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra (DiBEST) dell'Università della Calabria. Lo studio ha rilevato la presenza di quarzo, K-feldspati, plagioclasti e fillosilicati. Questi ultimi sono stati, poi, analizzati in maniera più approfondita mediante trattamenti successivi: solvatazione con glicole etilenico (gl) e trattamento termico in muffola rispettivamente a 350°C e 550°C. È stato, quindi, possibile identificare i seguenti minerali argillosi: illite (I), caolinite (K), vermiculite (V) e smectite (Sm), che, da letteratura, sono gli unici a garantire proprietà coesive alle miscele.

Dopo aver valutato positivamente i risultati dell'analisi mineralogica, l'argilla è stata fatta essiccare e sono state preparate cinque differenti miscele, di cui la prima mischiata a secco e le restanti quattro in condizioni umide, come suggerito dagli studi condotti da Kothyari e Jain (2008) e da Jain e Kothyari (2009) (Tab. 3.3).

Tabella 3.3. Test preliminari sulle miscele.

Miscela	Percentuale in peso di argilla	Condizione di miscelazione
M <sub>1</sub>	15% (in peso)	( $w_0=0\%$ )
M <sub>2</sub>	30% (in peso)	( $w_0=32\%$ )
M <sub>3</sub>	20% (in peso)	( $w_0=32\%$ )
M <sub>4</sub>	15% (in peso)	( $w_0=32\%$ )
M <sub>5</sub>	5% (in peso)	( $w_0=32\%$ )

Solo dopo aver provato le cinque miscele, si è deciso di impiegare la miscela M<sub>5</sub>. Di seguito si riportano le curve granulometriche della sola sabbia e della miscela coesiva che sono state impiegate nella campagna sperimentale (Figg. 3.17a,b).

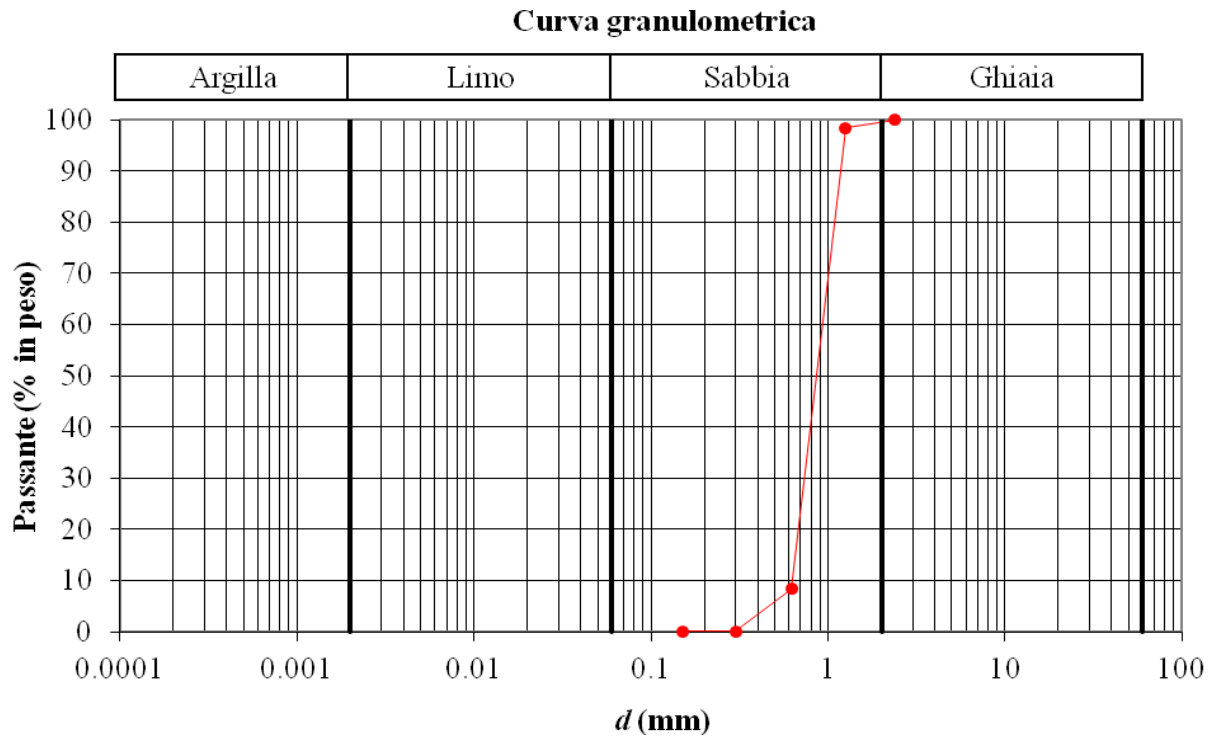


Figura 3.17a. Curva granulometrica del sedimento incoerente (sabbia uniforme).

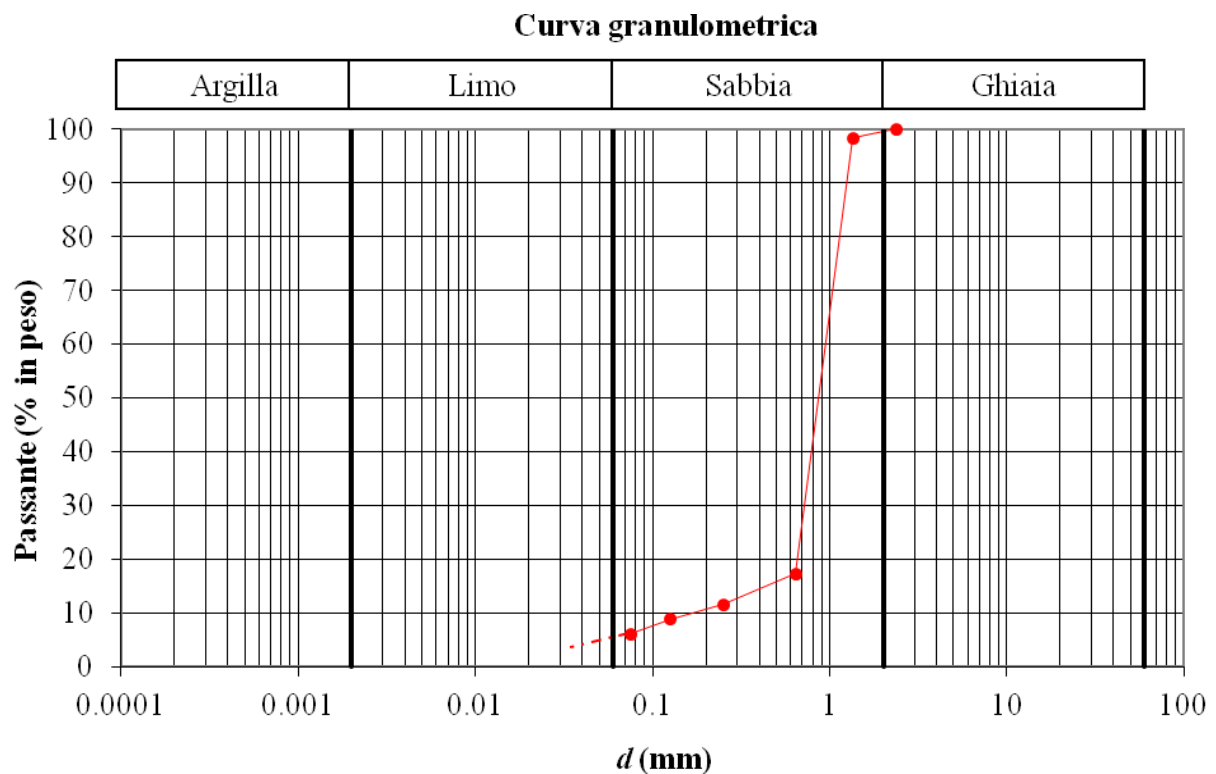


Figura 3.17b. Curva granulometrica della miscela coesiva.

Nelle Tabb. 3.4 e 3.5 si riportano i parametri fisici e gli indici di proprietà di entrambi i fondi mobili:

Tabella 3.4. Parametri fisici e indici di proprietà della sabbia

Peso specifico	$\gamma_s = 25,82 \text{ kN/m}^3$
Peso dell'unità di volume	$\gamma = 14,88 \text{ kN/m}^3$
Contenuto naturale d'acqua	$w = 0,003$
Peso secco unità di volume	$\gamma_d = 14,83 \text{ kN/m}^3$
Peso saturo unità di volume	$\gamma_{sat} = 19,01 \text{ kN/m}^3$
Contenuto d'acqua saturo	$w_{sat} = 0,281$
Porosità	$n_p = 0,426$
Indice di porosità	$e = 0,741$
Grado di saturazione	$S = 0,012$

Tabella 3.5. Parametri fisici e indici di proprietà della miscela coesiva

Peso specifico	$\gamma_s = 25,73 \text{ kN/m}^3$
Peso dell'unità di volume	$\gamma = 15,63 \text{ kN/m}^3$
Contenuto naturale d'acqua	$w = 0,118$
Peso secco unità di volume	$\gamma_d = 13,99 \text{ kN/m}^3$
Peso saturo unità di volume	$\gamma_{sat} = 18,46 \text{ kN/m}^3$
Contenuto d'acqua saturo	$w_{sat} = 0,32$
Porosità	$n_p = 0,457$
Indice di porosità	$e = 0,84$
Grado di saturazione	$S = 0,368$