

STUDIO SPERIMENTALE SULLA MISURA DEL TRASPORTO SOLIDO DI FONDO MEDIANTE L'UTILIZZO DI GEOFONI

Pedro A. Basile ⁽¹⁾, G. Testa ⁽²⁾, F. Moia ⁽¹⁾, M. Peviani ⁽¹⁾ e I. Saccardo ⁽²⁾

⁽¹⁾ *ISMES S.p.A* - ⁽²⁾ *ENEL S.p.A - CRIS*

SOMMARIO

La ricerca condotta dall'ENEL/DSR/CRIS e dall'ISMES, nel campo dei metodi di misura del trasporto solido, é incentrata principalmente sullo sviluppo di un metodo *indiretto* per misurare in *continuo* la portata solida nei fiumi montani. L'esperienza effettuata si basa sul fatto che il trasporto solido di particelle grossolane (principalmente trasporto di fondo) genera delle vibrazioni sul letto del corso d'acqua e quindi la ricezione mediante geofoni delle onde così generate può essere adottata come indicatore del trasporto stesso.

In questo lavoro sono presentati i risultati ottenuti attraverso le prove eseguite in un canale lungo 10 m installato presso il laboratorio di Modelli Fisici dell'ENEL/DSR/CRIS di Milano. Dalle prove effettuate con diverse portate liquide e solide di alimentazione si é determinato che a parità di trasporto solido il livello medio del rumore microsismico di fondo aumenta con l'incremento del d_{50} dei sedimenti. Inoltre, per un determinato d_{50} il livello medio del rumore aumenta con l'aumentare del trasporto. Infine, il trasporto solido di fondo é stato correlato con un parametro adimensionale calcolato in funzione del livello medio del rumore e delle dimensioni dei sedimenti.

ABSTRACT

Recently ENEL/DSR/CRIS and ISMES have performed some research projects in the field of sediment transport measurements mainly focusing their interest in the development of an indirect method for the continuous measuring of sediment discharge in mountain rivers. The method is based on the fact that sediment transport of coarse material in gravel bed streams (mainly as bed load) generates vibration on the bed. The vibrations produced by the collisions among the particles transported as contact and saltation load may be recorded by means of geophones located under the bottom stream and used as an index of the transport rate itself.

In this paper the results obtained in some experiments conducted at ENEL/DSR/CRIS of Milan in a feed laboratory flume 10 m long are presented. Several test were performed using gravel with different grain-size distributions and reproducing different hydraulic conditions. The experimental results concern the influence of grain-size on geophone signal, as well as the relationship between bed load transport and a dimensionless mean signal level.

1. INTRODUZIONE

I cambiamenti morfologici dei corsi d'acqua sono sostanzialmente legati alle variazioni spaziali del trasporto solido delle diverse frazioni granulometriche. Per ottimizzare la progettazione degli interventi nella rete fluviale nonché per tarare i modelli matematici morfologici é necessario misurare l'entità del trasporto solido che si verifica in concomitanza degli eventi di piena.

La misura *diretta e continua* del trasporto solido durante eventi di piena é sempre molto difficile e, in ogni caso, estremamente impegnativa dal punto di vista dei costi. Acquista pertanto crescente interesse lo sviluppo di un metodo che consenta di eseguire la misura *indiretta e continua* della portata solida e, contemporaneamente, permetta di contenere le spese di installazione e manutenzione dell'attrezzatura.

L'attività dell'ISMES e dell'ENEL/DSR/CRIS, nel campo dei metodi di misura del trasporto solido, é incentrata principalmente sullo sviluppo di un metodo *indiretto* per misurare in *continuo* la portata solida nei fiumi montani. L'esperienza effettuata si basa sul fatto che il trasporto solido (principalmente trasporto di fondo) genera delle vibrazioni sul letto del corso d'acqua e quindi la ricezione delle onde così generate può essere adottata come indicatore del trasporto stesso.

In funzione delle condizioni idrodinamiche e della dimensione dei granuli, nel trasporto di fondo le particelle rotolano sul letto (contact load) oppure saltano (saltation load) ma sempre per distanze brevi e comunque rapportabili al valore del loro diametro. Conseguentemente, il "rumore" generato dalla collisione e dal rotolamento del sedimento può essere misurato attraverso l'utilizzo di geofoni installati nel fondo dell'alveo. I geofoni sono infatti dei trasduttori elettromagnetici che generano in uscita una tensione proporzionale alla velocità di oscillazione del terreno e sono utilizzati generalmente nel campo della prospezione sismica sia attiva che passiva.

Numerosi sono stati i tentativi effettuati per la misura indiretta del trasporto solido che generalmente si riferiscono però all'utilizzo di sensori di tipo acustico come proposto da Jonys C. K., 1976; Banziger R. e Burch H., 1990; Taniguchi S. et al., 1992; Rickenmann D., 1992; Sawai K., 1990. Inoltre, i sensori geofonici (e sismometrici) sono stati utilizzati per il monitoraggio delle colate detritiche (debris flow) come riportato da Okuda S. et al., 1980; Suwa H. e Okuda S., 1985; nonché per il controllo dell'instabilità dei versanti in frana come riportato da Carabelli et al., 1988.

L'attività sperimentale dell'ISMES nella misura del trasporto solido con sensori geofonici e sismometrici é iniziata nell'anno 1989 mediante una campagna sperimentale effettuata sul Rio Gallina afferente al bacino idrografico del Sesia, in provincia di Vercelli. L'esperienza é stata eseguita mediante l'installazione di una rete di geofoni in un tratto d'alveo lungo circa 150 m ed i cui risultati sono riportati in Govi et al., 1993.

La ricerca é continuata dal 1992 in collaborazione con l'ENEL/DSR/CRIS utilizzando una stazione sperimentale di campagna localizzata nel torrente Prescudin, afferente al bacino idrografico del torrente Cellina in provincia di Pordenone. Il numero ridotto degli eventi di piena, e le difficoltà riscontrate nel misurare direttamente il volume solido transitato durante gli stessi eventi, hanno suggerito l'opportunità di eseguire uno studio in un canale di laboratorio.

Lo scopo della sperimentazione in laboratorio é quello di valutare l'influenza dell'entità del trasporto solido di fondo sul segnale registrato dai geofoni, di definire il legame funzionale

fra questi due parametri e di analizzare l'effetto della dimensione del materiale solido sul livello medio del rumore microsismico di fondo. Gli esperimenti sono stati condotti presso il laboratorio di Modelli Fisici dell'ENEL/DSR/CRIS di Milano.

2. APPARATO SPERIMENTALE

Le prove sono state condotte in un canale lungo 10 m, largo 1.2 m e profondo 0.8 m presso il laboratorio di Modelli Fisici dell'ENEL/DSR/CRIS di Milano. Nella Figura 1 si riporta uno schema dell'apparato sperimentale.

Il canale é alimentato in circuito chiuso tramite pompe e vasche a livello costante. La portata liquida massima erogabile é pari a 150 l/s. L'acqua, prelevata dalle vasche tramite una tubazione DN 300, passa dapprima attraverso una vasca di carico che ne regolarizza il flusso, attraversa poi il canale e viene infine inviata in una vasca di scarico collegata con i vasconi e le pompe di ricircolo.

La larghezza del canale é stata ridotta a 0.5 m in modo da diminuire la quantità di sedimenti, di sfruttare meglio le capacità delle pompe ed evitare inoltre lo sviluppo di accentuati fenomeni bidimensionali (formazione di barre, ecc.).

Il materiale solido, composto da ghiaia, é stato immesso nella corrente idrica mediante un dispositivo di alimentazione situato nell'estremità di monte del canale. Il dispositivo di alimentazione dei sedimenti é costituito da un canale movimentato da un vibratore elettromagnetico; esso é collegato, tramite funi in acciaio ed ammortizzatori in gomma, ad una tramoggia che funge da "serbatoio" di carico per il sedimento. Il materiale solido é stato immesso nella corrente idrica uniformemente distribuito sull'intera larghezza del canale sperimentale. Il sedimento convogliato dalla corrente, che esce dalla sezione terminale, é stato misurato mediante un dispositivo costituito da una tramoggia in acciaio zincato, posizionata nella vasca di scarico del canale, e collegata ad una cella di carico per eseguire le pesate del sedimento in continuo.

Il fondo mobile del canale é costituito da uno strato di sedimenti, avente un primo tratto orizzontale lungo circa 1 m, il quale regolarizza ulteriormente il flusso liquido ed arriva fino alla sezione d'immissione della portata solida. Immediatamente a valle di esso segue un tratto a pendenza costante pari al 5 %. Infine, nel tratto finale del canale, un muretto in mattoni e calcestruzzo fa da confine fisico per il letto di ghiaia.

La portata liquida é stata misurata mediante un flussimetro elettromagnetico inserito nella condotta di alimentazione. Le quote della superficie libera e del fondo sono state misurate mediante un idrometro a punta in una sezione localizzata 4.5 m a valle del punto d'immissione della portata solida. Il rumore microsismico di fondo é stato misurato mediante tre geofoni ed un sismometro installati in diverse sezioni del canale (sotto i sedimenti), e attraverso un ulteriore geofono posizionato immediatamente a valle del muretto in mattoni e calcestruzzo (vedi Figura 1). Il rumore ambientale (rumore di base) é stato misurato mediante un geofono posizionato sul pavimento del laboratorio, nelle vicinanze del canale. I segnali sono stati acquisiti mediante due unità digitali a tre canali del sistema PRAXS-10 sviluppato dall'ISMES. I geofoni utilizzati sono del tipo MARK L28B a componente verticale i quali hanno una frequenza propria di 4.5 Hz ed una sensibilità di 42 V/m/s; mentre il sismometro é del tipo MARK L4C a componente verticale con frequenza propria di 1 Hz e sensibilità di 160 V/m/s.

3. MATERIALI

Il materiale solido utilizzato negli esperimenti è costituito da ghiaia di fiume levigata, reperita in tre differenti pezzature. Le caratteristiche sedimentologiche dei materiali sono presentate nella Tabella I, dove con d_i si indica il diametro del vaglio per cui i % del materiale è più fine, con σ la deviazione standard geometrica e con s la gravità specifica del sedimento (rapporto fra il peso specifico del sedimento e quello dell'acqua). Nella Figura 2 sono riportate le relative curve granulometriche. La ghiaia n° 4 è costituita da una mistura effettuata con le ghiaie n° 1, n° 2 e n° 3 nelle seguenti proporzioni: 20 % di ghiaia n° 1, 40 % di ghiaia n° 2 e 40 % di ghiaia n° 3.

4. MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLE PROVE E MISURE ESEGUITE

Prima di effettuare ogni singola prova il fondo mobile della canaletta è stato accuratamente livellato. Il materasso di sedimenti è stato predisposto con una pendenza pari al 5% ed inoltre, la tramoggia di alimentazione dei sedimenti è stata riempita di materiale.

Per ciascuna delle singole prove l'operazione d'avvio del sistema di alimentazione acqua-sedimenti è stata eseguita con molta cura. Dapprima si è proceduto a saturare il letto, immettendo una portata liquida sufficientemente piccola, in modo che il parametro di Shields risultasse minore di quello corrispondente alla soglia di criticità del materiale del fondo, cioè trasporto nullo in uscita. Conclusa questa fase, si è proceduto ad incrementare la portata liquida gradualmente fino al valore di regime, in un tempo ragionevolmente breve ma al tempo stesso tale da non sconvolgere il fondo condizionando così il successivo svilupparsi dei fenomeni. Contemporaneamente, è stata iniziata la registrazione del rumore mediante i geofoni, si è inoltre proceduto all'immissione della portata solida prescelta avviando il dispositivo di alimentazione dei sedimenti e all'acquisizione del trasporto in uscita avviando il relativo dispositivo di misura. L'arresto del sistema è stato eseguito in modo analogo all'avvio chiudendo progressivamente tutti i dispositivi.

Durante lo svolgimento delle prove, l'alimentatore dei sedimenti, non è stato appoggiato sui muri della canaletta per evitare che le vibrazioni da esso indotte si trasmettessero attraverso la struttura e disturbassero le misure eseguite mediante i geofoni. Durante ogni prova il trasporto in uscita è stato misurato con continuità. Inoltre, all'inizio ed alla fine di ciascuna prova si è proceduto a rilevare il peso del cassone di raccolta, in questo modo è stato possibile calcolare immediatamente l'entità media del trasporto lungo l'intera durata della prova.

Nel corso delle diverse prove si è inoltre controllato, attraverso il flussimetro elettromagnetico, che la portata liquida rimanesse costante e pari al valore prescelto. È stata altresì controllata la costanza della portata solida immessa. Non sono state osservate forme di fondo accentuate essendo il fondo rimasto sostanzialmente piatto alla fine di ciascuna prova. Tutte le prove sono state condotte in condizioni di equilibrio, cioè moto uniforme e trasporto solido in ingresso uguale a quello in uscita (assenza di erosione e deposito del fondo mobile).

Durante la durata di ogni prova, 20 minuti circa, il rumore microsismico di fondo, come già riportato in precedenza, è stato misurato mediante i geofoni installati nella canaletta. Le quote della superficie libera e del fondo sono state misurate mediante l'idrometro a punta localizzato 4.5 m a valle del punto d'immissione della portata solida.

5. ELABORAZIONE DEI SEGNALI REGISTRATI MEDIANTE I GEOFONI

L'esecuzione di alcune prove preliminari ha consentito di minimizzare l'influenza del rumore generato dai singoli componenti come le pompe, la tramoggia di raccolta e l'alimentatore dei sedimenti, sui segnali registrati dai geofoni.

Un altro aspetto importante è consistito nell'analizzare il segnale registrato durante le prove preliminari per assicurarsi che l'elaborazione venisse effettuata solamente nei range di frequenza in cui è preponderante il rumore provocato dal trasporto solido di fondo.

Tali analisi hanno comportato lo sviluppo ad hoc di programmi per il filtraggio passa banda dei segnali e per la relativa loro analisi nel dominio delle frequenze. Questa procedura è stata effettuata applicando un filtro passa banda di tipo Butterworth, con la possibilità di scegliere a piacimento le frequenze di taglio ed anche l'ordine del filtro stesso. L'analisi del dominio delle frequenze ha comportato inoltre lo sviluppo di un programma per il calcolo del "power spectra" di sequenze casuali molto lunghe in durata.

Dal punto di vista sperimentale particolarmente significative sono le prove preliminari effettuate con fondo della canaletta fisso (trasporto nullo) in modo da studiare solamente le vibrazioni indotte dall'acqua alle differenti portate. Queste prove sono state successivamente confrontate con le prove eseguite a fondo mobile e cioè con trasporto solido sviluppato.

Dall'analisi dei "power spectra" calcolati per le prove in assenza di trasporto è risultato evidente un disturbo costante e monotono nel range di frequenza tra circa 35 e 45 Hz con ampiezze spettrali che non variano sensibilmente alle varie portate liquide. Per esempio, nella Figura 3 si riporta il "power spectra", corrispondente al geofono 2, calcolato su tutta la durata della prova condotta con portate liquide di 70, 90 e 110 l/s. Inoltre si può ben notare come le frequenze al di sotto dei 35 Hz presentino ampiezze spettrali decisamente modeste. Ovviamente questa analisi è stata effettuata su tutti i segnali registrati dai geofoni in canaletta ed ha puntualmente confermato i risultati sopra descritti.

Sulla base di questi risultati si è proceduto a filtrare i segnali registrati durante le prove con trasporto solido nella banda di frequenza 4.5 - 20 Hz per eliminare appunto il disturbo indotto dall'acqua ed esaltare il rumore del trasporto solido. Dall'analisi dei relativi "power spectra" è risultato evidente che le ampiezze spettrali tra 4.5 e 20 Hz sono influenzate in massima parte dal materiale trasportato in quanto le ampiezze spettrali sono decisamente superiori a quelle ottenute per lo stesso range di frequenza di analisi ma con il fondo fisso della canaletta e quindi senza trasporto solido. Per esempio, nella Figura 4 si presenta il "power spectra", corrispondente al geofono 2, calcolato su tutta la durata della prova condotta con portate liquide di 116 l/s e portata solida di 0.793 kg/s.

I segnali acquisiti sono stati elaborati mediante programmi di calcolo opportunamente sviluppati che consentono di stimare il livello medio del rumore microsismico di fondo in intervalli di tempo selezionabili, nonché di calcolare il numero degli impulsi che superano uno o più determinati valori di soglia in ampiezza impostabili a priori.

Il livello medio del segnale è stato calcolato, per ciascun intervallo di tempo (fissato in 5 secondi che corrispondono a 625 campioni), mediante la seguente espressione:

$$LS_k = \frac{\sum_{i=1}^m A_i}{m} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \Delta t \quad (1)$$

dove A_i è l'ampiezza del rumore analizzato, m il numero di campioni in un intervallo di tempo Δt mentre n rappresenta il numero totale di intervalli Δt . Nella Figura 5 si riporta l'andamento

del livello medio del rumore L_s espresso in $\mu\text{m/s}$, mediato ogni 5 secondi, corrispondente al geofono n 1 durante la prova 2S2. Infine, è stato calcolato, per ogni Δt , il numero degli impulsi che eccedono un determinato valore di soglia.

6. PRESENTAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

Sono state condotte quattro serie di prove. Ciascuna delle serie è costituita da cinque prove eseguite con differenti portate liquide e solide di alimentazione. La ghiaia n° 1 ($d_{50}=7.2$ mm) è stata utilizzata per eseguire le prove della serie S1; analogamente, per le serie S2, S3 e S4 sono state rispettivamente adoperate le ghiaie n° 2 ($d_{50}=14.2$ mm), n° 3 ($d_{50}=21.1$ mm), e n° 4 ($d_{50}=15.2$ mm).

Nella Tabella II si presenta una sintesi dei principali parametri idraulici, di trasporto e di quelli relativi alle misure eseguite mediante i geofoni, in cui Q_l rappresenta la portata liquida, Q_b la portata solida, h il tirante, v la velocità media della corrente, F il numero di Froude, u_* la velocità d'attrito, τ_{*50} il parametro di Shields relativo al d_{50} , $\langle L_s \rangle$ il livello medio del rumore, mediato ulteriormente sui quattro geofoni installati sotto il letto di ghiaia ed σ (equazione 5) è il corrispondente valore adimensionale del livello medio del rumore.

Nella Figura 6 si riporta il rapporto fra la velocità media della corrente v , e la velocità d'attrito u_* , in funzione del rapporto fra il raggio idraulico R , e il d_{90} per l'insieme dei dati sperimentali ricavati nelle diverse prove. Si noti che i dati sperimentali possono essere rappresentati in modo abbastanza soddisfacente attraverso la seguente equazione di resistenza al moto:

$$\frac{v}{u_*} = 8.3 \left(\frac{R}{d_{90}} \right)^{1/6} \quad (2)$$

Nella Figura 7 si riporta il trasporto di fondo adimensionale W^* in funzione del parametro di Shields relativo al d_{50} , τ_{*50} , in cui il trasporto adimensionale è definito come (Parker et al, 1982):

$$W^* = \frac{(s-1)gq_b}{\gamma_s u_*^3} \quad (3)$$

dove q_b è la portata solida in peso per unità di larghezza, g è l'accelerazione di gravità, γ_s il peso specifico dei sedimenti. Il parametro di Shields (o tensione tangenziale adimensionale) relativo al d_{50} può essere espresso come:

$$\tau_{*50} = \frac{u_*^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (4)$$

Considerando che la tensione tangenziale adimensionale critica riferita al d_{50} , τ_{*c50} , costante per regime turbolento a parete scabra, è pari a circa 0.055, si osserva che per l'insieme dei dati sperimentali il τ_{*50} varia fra circa 2 τ_{*c50} e 5 τ_{*c50} . Il trasporto adimensionale W^* varia di conseguenza fra 0.3 e 3.

Nella Figura 8a si riporta il trasporto solido q_b in funzione del livello medio del rumore microsismico di fondo mediato sui quattro geofoni installati sotto il letto di ghiaia $\langle Ls \rangle$. Si noti che, a parità di trasporto solido, il livello medio del rumore si incrementa man mano che aumenta il d_{50} del materiale. Si osserva inoltre che, fissando il d_{50} , il livello medio del rumore aumenta con l'incremento del trasporto. Di conseguenza, a parità di rumore, il trasporto solido aumenta con la diminuzione del d_{50} . In base a queste osservazioni sembra possibile, mediante una opportuna adimensionalizzazione del segnale, fare sì che tutti i punti sperimentali si distribuiscano su di un'unica curva.

Il livello medio del rumore è stato quindi adimensionalizzato mediante l'accelerazione di gravità e il diametro d_{50} del materiale del fondo, nel seguente modo:

$$\sigma = \frac{\langle Ls \rangle}{\sqrt{gd_{50}}} \quad (5)$$

Nella Figura 8b si riporta la portata solida q_b in funzione del livello medio del rumore adimensionale σ . Si noti che i valori sperimentali relativi alle diverse serie sono raggruppati intorno ad un'unica curva. Inoltre, la dispersione dei dati è molto contenuta e di conseguenza la correlazione fra entrambi i parametri risulta essere molto soddisfacente.

7. CONCLUSIONI

Sulla base delle prove sperimentali effettuate in laboratorio è risultato che il metodo di misura del trasporto solido di fondo con l'ausilio di misure geofoniche fornisce dei risultati molto soddisfacenti.

Le analisi effettuate hanno permesso di evidenziare alcuni aspetti non sufficientemente chiariti nelle esperienze finora condotte in campagna. Fondamentalmente si è dimostrato che per una determinata dimensione dei sedimenti il livello medio del rumore microsismico aumenta con l'aumentare del trasporto ed inoltre si è osservato che a parità di trasporto solido il livello medio del rumore microsismico aumenta con l'incremento delle dimensioni del materiale (d_{50}).

Sulla base dei risultati sperimentali ottenuti è stato possibile correlare il trasporto solido con un parametro adimensionale calcolato sia come funzione del livello medio del rumore che delle dimensioni del materiale solido. Infatti i punti sperimentali delle 20 prove si dispongono intorno ad un'unica curva evidenziando una dispersione molto contenuta e quindi una soddisfacente correlazione fra entrambi i parametri.

Dalle prove effettuate è inoltre risultato che molta attenzione deve essere rivolta nell'individuare i range di frequenza del rumore microsismico da sottoporre ad analisi in modo da eliminare o quanto meno minimizzare i disturbi indotti dalla portata liquida.

8. REFERENZE

Bänziger, R. e Burch, H. (1990); *"Acoustic sensors (hydrophones) as indicators for bed load transport in a mountain torrent"*. Proc. of the Int. Symp. on Hydrology of Mountainous Regions, Lausanne, Switzerland. IAHS Publ. N° 193, pp 207-214.

Carabelli, E.; Migani, M. e Moia, F. (1988); *"Il monitoraggio 'On Line' delle fratture e dei franamenti di ciglio della frana di Val Pola"*. II° Ciclo di Conferenze di Meccanica e Ingegneria delle rocce, Torino, Italia.

Govi, M.; Maraga, F. e Moia, F. (1993); *"Seismic detectors for continuous bed load monitoring in a gravel stream"*. Journal des Sciences Hydrologiques, 38,2.

Jonys, C. K. (1976); *"Acoustic measurement of sediment transport"*. Scientific series N° 66, Inland Waters Directorate, CCIW Branch, Burlington, Ontario.

Parker, G.; Klingeman, P. e McLean, D. (1982); *"Bedload and Size Distribution in Paved Gravel-Bed Streams"*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE. Vol. 108, N° HY4, pp 544-571.

Rickenmann, D. (1992); *"Bedload transport and discharge in the Erlenbach stream"*. Proc. of the COMTAG Meeting and Workshop on Dynamics and Morphology of Mountain Rivers. Benediktbeuern, Germany.

Sawai, K. (1990); *"Techniques for Sediment Discharge Measurement in Laboratories"*. Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. Vol. 40, Part 3, N° 349, pp. 91-109.

Suwa, H. e Okuda, S. (1985); *"Measurements of debris flows in Japan"*. Proc. of the IV International Conference and Field Workshop on Landslides, pp 391-400. Tokyo.

Taniguchi, S.; Itakura, Y; Miyamoto, K e Kurihara, J. (1992); *"A new acoustic sensor for sediment discharge measurements"*. Proc. of Int. Symp. on Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins, Oslo. IAHS Publ. N° 210, pp 135-142.

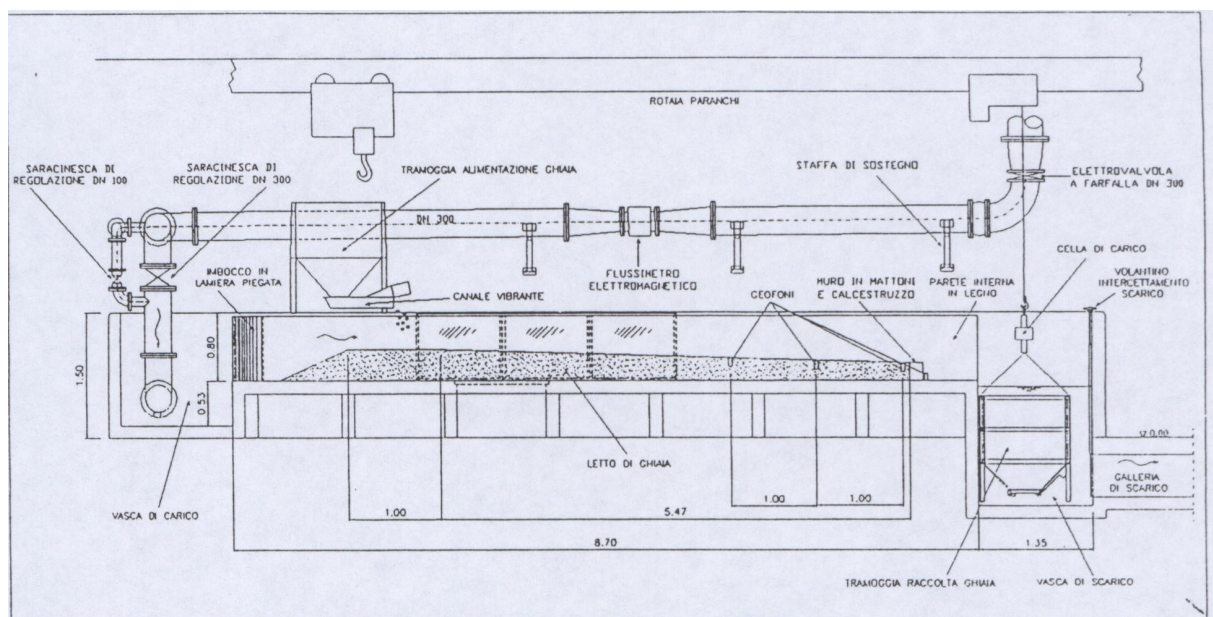


Figura 1: schema dell'apparato sperimentale.

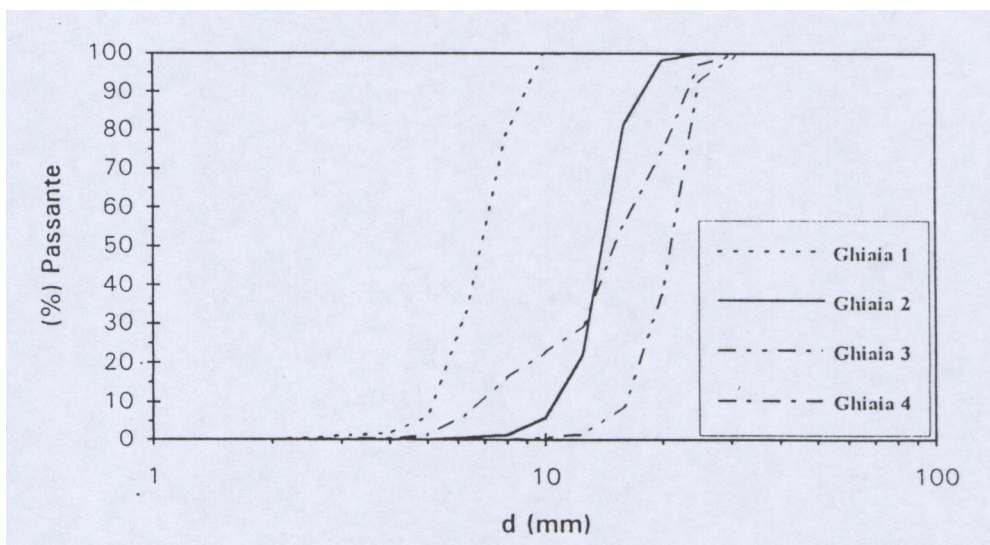


Figura 2: curve granulometriche relative ai sedimenti utilizzati nelle diverse prove.

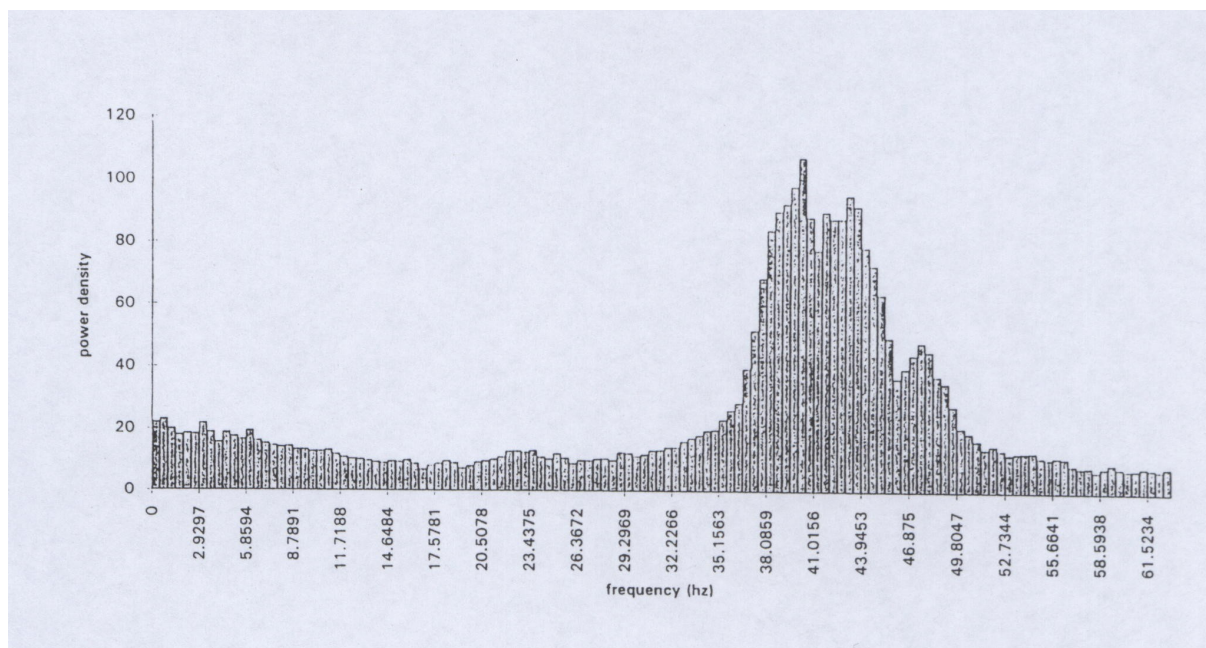


Figura 3: power spectra calcolato su tutta la durata della prova condotta in assenza di trasporto solido con portate liquide di 70, 90, 110 l/s. Geofono n° 2.

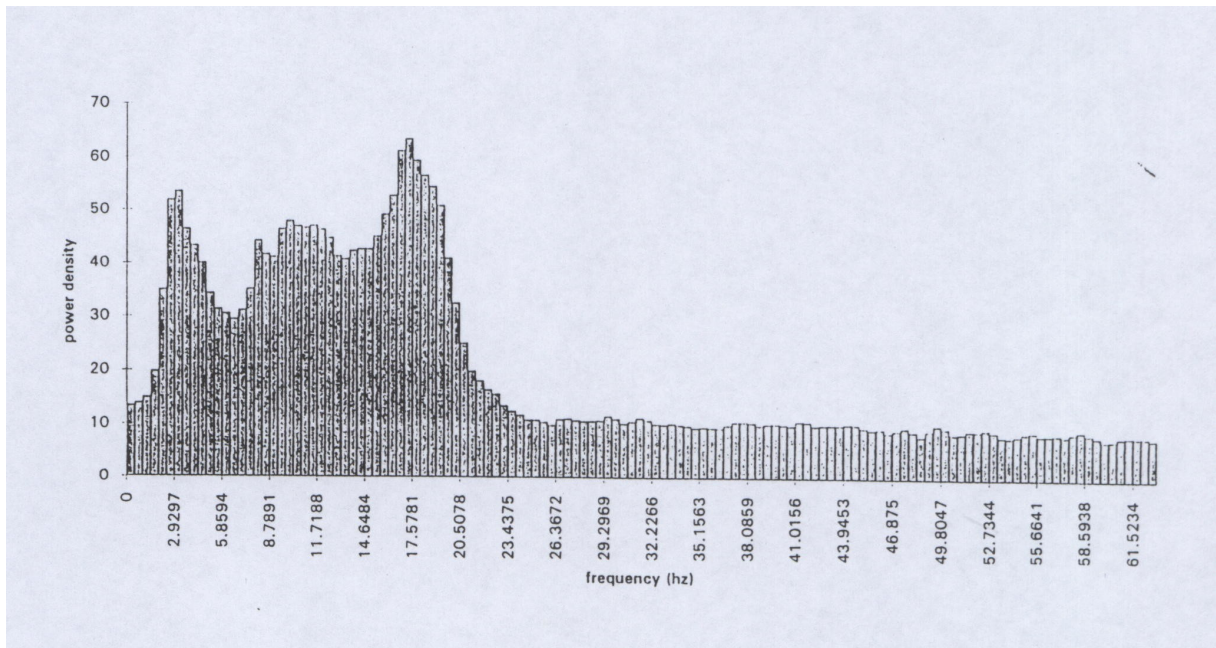


Figura 4: power spectra calcolato su tutta la durata della prova condotta con trasporto solido pari a 0.793 kg/s e portata liquida di 116 l/s. Geofono n° 2.

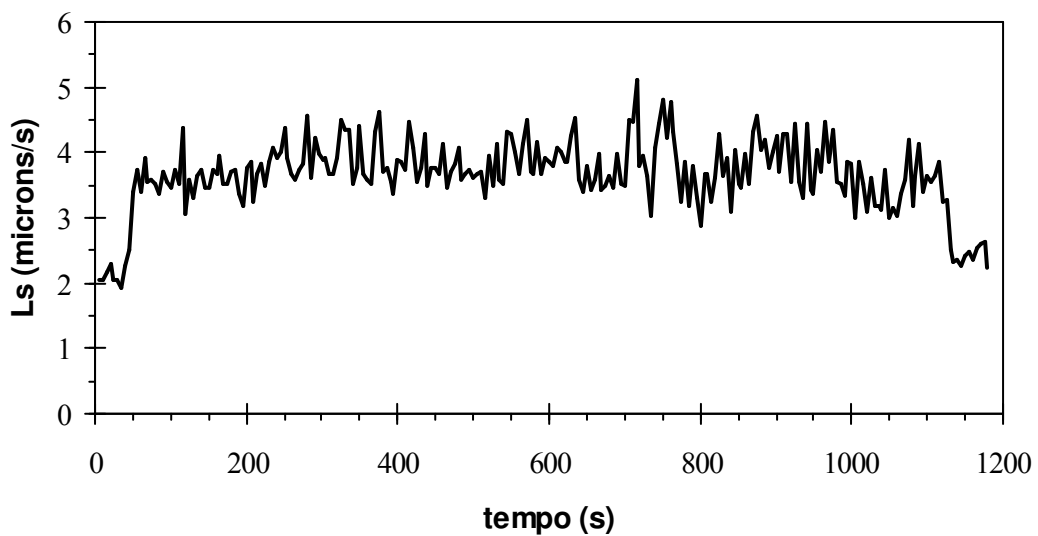


Figura 5: andamento del livello medio del rumore di fondo corrispondente al geofono n° 1 durante la prova 2S2.

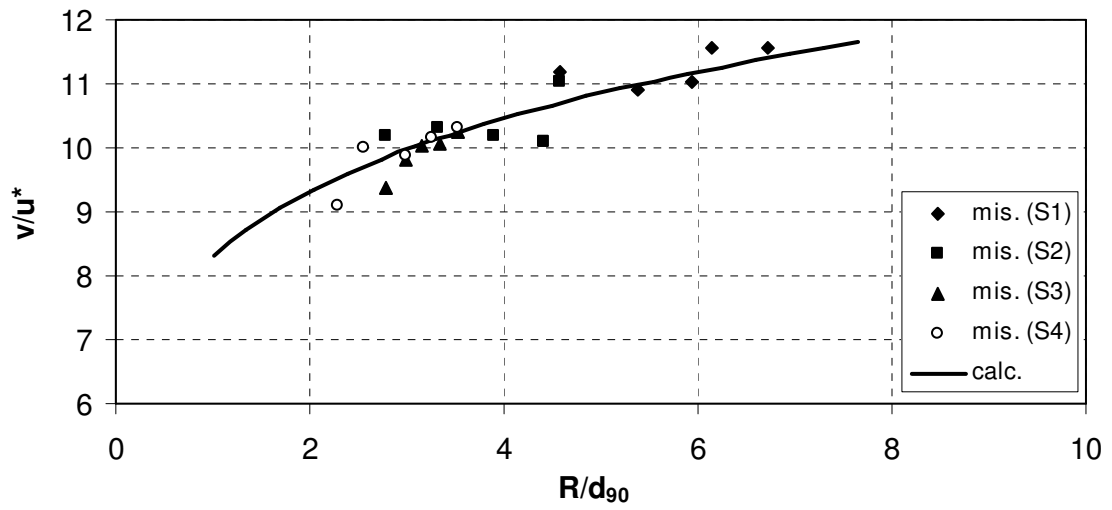


Figura 6: rapporto fra la velocità media della corrente v , e la velocità d'attrito u^* , in funzione del rapporto fra il raggio idraulico R , e il d_{90} per l'insieme dei dati sperimentali.

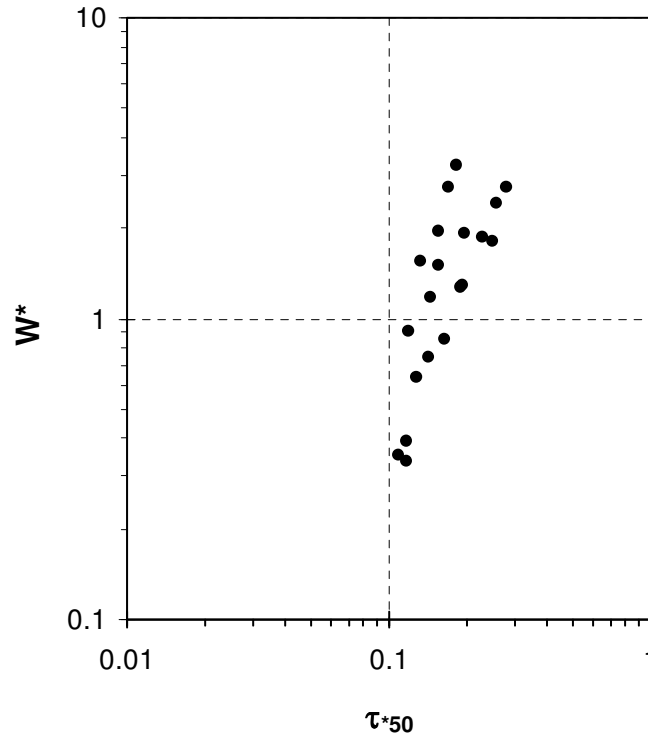


Figura 7: trasporto solido adimensionale W^* in funzione del parametro di Shields τ^*_{50} .

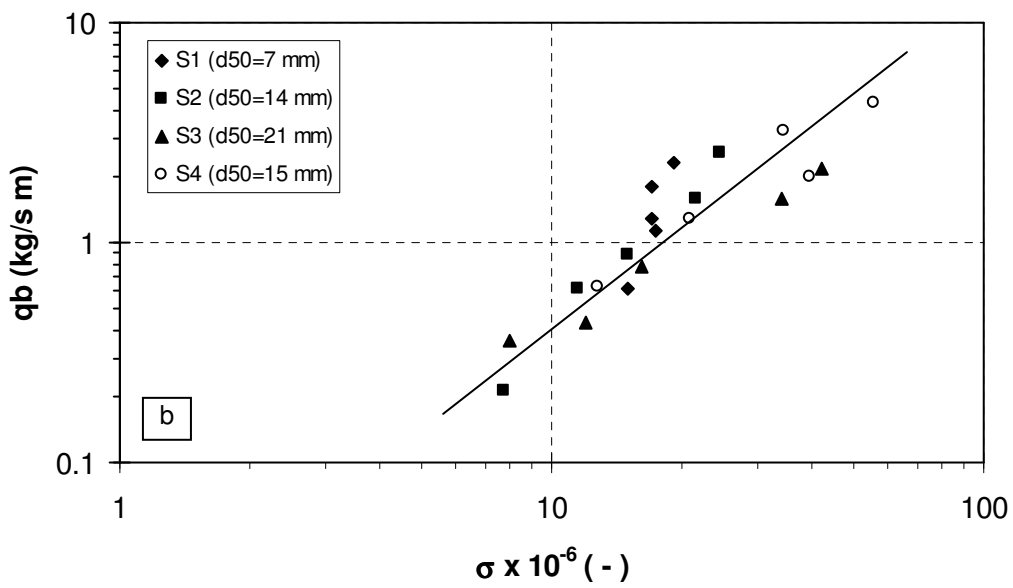
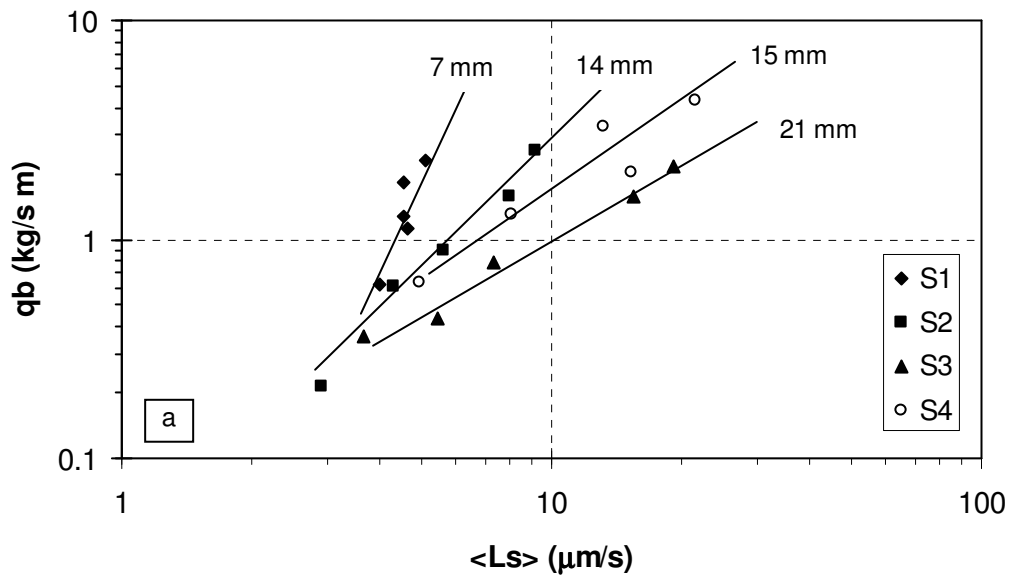


Figura 8: trasporto solido per unità di larghezza q_b in funzione di: (a) livello medio del rumore di fondo. (b) livello medio del rumore di fondo adimensionale.

Tabella I: caratteristiche sedimentologiche dei materiali.

Ghiaia N°	d₁₆ (mm)	d₅₀ (mm)	d₈₄ (mm)	d₉₀ (mm)	σ_g (-)	s (-)
1	5.5	7.2	8.5	9.1	1.2	2.5
2	11.6	14.2	16.6	18.1	1.2	2.5
3	17.0	21.1	24.2	24.8	1.2	2.5
4	7.9	15.2	22.1	23.4	1.6	2.5

Tabella II: riassunto delle condizioni sperimentali delle diverse prove eseguite.

Serie N	Prova N	Q_I (l/s)	Q_b (kg/s)	h (m)	v (m/s)	F (-)	u* (m/s)	τ*₅₀ (-)	<Ls> (μm/s)	σ_x10⁻⁶ (-)
S1	1S1	40.0	0.310	0.050	1.600	2.28	0.143	0.193	3.982	14.98
	2S1	51.5	0.565	0.061	1.689	2.18	0.155	0.227	4.610	17.35
	3S1	62.0	0.637	0.069	1.797	2.18	0.163	0.250	4.509	16.97
	4S1	69.0	0.906	0.072	1.917	2.28	0.166	0.259	4.506	16.96
	5S1	81.0	1.153	0.081	2.000	2.24	0.173	0.283	5.114	19.24
S2	1S2	50.0	0.106	0.063	1.600	2.04	0.157	0.117	2.906	7.78
	2S2	70.0	0.308	0.079	1.774	2.02	0.172	0.141	4.292	11.50
	3S2	92.0	0.441	0.098	1.887	1.93	0.185	0.165	5.617	15.05
	4S2	116.0	0.793	0.117	1.991	1.86	0.197	0.187	8.010	21.46
	5S2	138.0	1.287	0.124	2.226	2.02	0.202	0.195	9.171	24.57
S3	1S3	82.0	0.180	0.095	1.726	1.79	0.184	0.109	3.652	8.03
	2S3	98.0	0.218	0.105	1.867	1.84	0.190	0.117	5.452	11.98
	3S3	112.0	0.390	0.114	1.965	1.86	0.196	0.129	7.354	16.16
	4S3	126.0	0.789	0.124	2.032	1.84	0.202	0.144	15.524	34.12
	5S3	142.0	1.088	0.134	2.119	1.85	0.207	0.154	19.170	42.13
S4	1S4	50.0	0.317	0.068	1.471	1.80	0.162	0.119	4.911	12.72
	2S4	68.0	0.644	0.079	1.722	1.96	0.172	0.133	8.088	20.94
	3S4	88.5	1.005	0.097	1.825	1.87	0.185	0.155	15.309	39.65
	4S4	108.5	1.627	0.110	1.973	1.90	0.194	0.170	13.280	34.39
	5S4	127.5	2.156	0.123	2.073	1.89	0.201	0.183	21.544	55.79