

Politecnico di Milano

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



Potenzialità di tecniche ADCP per la stima del trasporto solido di fondo: misure sperimentali a confronto

Relatore: Chiar.mo Prof. Marco Mancini

Tesi di Laurea di:

Felice Nuzzolo

N° matricola 946661

Anno Accademico 2020/2021

Indice

Abstract	6
Abstract - english	7
Introduzione.....	8
1 Misura della portata solida al fondo: strumentazione	12
1.1 Campionatore di Helley-Smith	12
1.1.1 problemi di misura con campionatore tradizionale.....	13
1.2 Acoustic Doppler Current Profiler	17
1.2.1 Limitazioni dell'Acoustic Doppler Current Profiler	21
2 Stima della portata solida al fondo: metodi indiretti	25
2.1 ADCP	25
2.1.1 Profilo verticale delle velocità e sforzo tangenziale al fondo	25
2.1.2 verifica superamento soglia critica: il parametro di Shields.....	28
2.1.3 Calcolo portata solida di fondo con formule di letteratura.....	31
2.2 Approccio globale	40
3 Stima della portata solida al fondo: metodo diretto con ADCP.....	41
3.1 Misura della velocità del fondo: Loop Method	41
3.2 Stima dello spessore significativo del trasporto secondo Van Rijn	44
3.3 Stima dello spessore significativo del trasporto secondo Du Boys	46
4 Stima della misura solida al fondo: metodo diretto Campionatore Helley-Smith.....	48
5 Caso studio: inquadramento e acquisizione dati	49
5.1 Boretto.....	49
5.2 Ponte di Piave	53
6 Risultati	61
6.1 Misure di portata solida di fondo alla sezione di Boretto - Fiume Po.....	61
6.1.1 Risultati metodi diretti in posizione fissa: campionatore di Helley-Smith.....	63
6.1.2 Risultati metodi diretti: ADCP in posizione fissa.....	63

6.1.3	Risultati metodi indiretti in posizione fissa	66
6.1.4	Risultati metodi indiretti per la sezione - canale di navigazione.....	69
7	Discussione	75
7.1	Misure di controllo con ADCP in assenza di portata solida di fondo: Ponte di Piave	80
8	Conclusioni.....	84
9	Bibliografia.....	86

Indice delle figure

Figura 1 Diagramma di Hjulstrom.....	10
Figura 2 Campionatore di fondo di Helley-Smith.....	12
Figura 3 Dimensioni del campionatore di fondo di Helley-Smith	13
Figura 4 Profili di velocità a monte e all'interno dell'ugello del campionatore di fondo di Helley-Smith.....	15
Figura 5 Variazione percentuale dell'efficienza del campionatore.....	16
Figura 6 Schema effetto Doppler.....	17
Figura 7 Schema onda emessa (A) e onda riflessa (B)	18
Figura 8 ADCP M9 (sinistra) e HydroBoard (destra)	19
Figura 9 Layer omogeneo vs layer non omogeneo.....	19
Figura 10 Schema beam ADCP e aree non misurate	22
Figura 11 Valori caratteristici per ADCP SonTek, 2000.....	24
Figura 12 Abaco di Shields.....	29
Figura 13 Abaco di Shields: soglia critica.....	29
Figura 14 Abaco di Shields modificato - formulazione di Van Rijn.....	30
Figura 15 Coefficiente caratteristico del materiale al variare del diametro.....	32
Figura 16 Andamento $X - K_s / \delta$	38
Figura 17 Andamento ϕ - flow intensity parameter	39
Figura 18 Esempio di tracciato distorto in un Loop, causato da fondo mobile.....	42
Figura 19 Schema della concentrazione di riferimento: Teoria di Van Rijn.....	44
Figura 20 Trasporto solido di fondo: teoria di Du Boys	46
Figura 21 Immagine satellitare del sito di Boretto: ponte stradale Viadana - Boretto.....	49
Figura 22 Ponte stradale Viadana - Boretto	50
Figura 23 Scala delle portate per la sezione di Boretto.....	50
Figura 24 Curva granulometrica per la sezione di Boretto	51
Figura 25 Curve granulometriche per la sezione di Boretto, ricavate dai campioni di sedimento raccolto	53
Figura 26 Sito di Ponte di Piave.....	54
Figura 27 Scala delle portate per la sezione di Ponte di Piave	55
Figura 28 Curve granulometriche per la sezione di Ponte di Piave	56
Figura 29 Classificazione del materiale di sedimento per la sezione di Ponte di Piave	57
Figura 30 Immagine satellitare sito di Ponte di Piave	59
Figura 31 Campata canale navigabile vista da monte – Boretto.....	62
Figura 32 Velocità della corrente (componente Est).....	62

Figura 33 Velocità della corrente (componente Nord).....	62
Figura 34 Bottom Tracks di quattro misurazioni - Boretto (zoom, a destra).....	64
Figura 35 Velocità della corrente con screening cella (sopra) e senza (sotto).....	66
Figura 36 Profili logaritmici: con e senza screening cella	67
Figura 37 Portata solida di fondo per unità di larghezza: Boretto - ADCP fisso	69
Figura 38 Transetti di andata e ritorno - immagine satellitare (zoom, a destra)	70
Figura 39 Velocità di attrito per il transetto di andata	70
Figura 40 Velocità di attrito per il transetto di ritorno	71
Figura 41 Andamento R2 e Velocità della corrente per il transetto di andata	73
Figura 42 Andamento R2 e Velocità della corrente per il transetto di ritorno	73
Figura 43 Portata solida di fondo per unità di larghezza: Boretto - canale navigabile	74
Figura 44 Portata solida per unità di larghezza: ADCP (modello Van Rijn) e campionatore a confronto.....	75
Figura 45 Portata solida per unità di larghezza: ADCP (modello Du Boys) e campionatore a confronto.....	76
Figura 46 Sforzo tangenziale al fondo - portata solida campionata	77
Figura 47 Correlazione tra velocità dei grani di fondo misurata con ADCP e portata solida campionata	78
Figura 48 Correlazione tra tirante idrico e velocità dei grani di fondo misurata con ADCP	79
Figura 49 Velocità della corrente (componente Est).....	80
Figura 50 Velocità della corrente (componente Nord).....	80
Figura 51 Esempio profilo logaritmico per una verticale della sezione di Ponte di Piave	82
Figura 52 Bottom Track Ponte di Piave – immagine satellitare (zoom, a destra)	83
Figura 53 Bottom Track Ponte di Piave	83

Indice delle tabelle

Tabella 1 Scala numerica delle portate per la sezione di Boretto.....	50
Tabella 2 Durata delle portate per la sezione di Boretto	51
Tabella 3 Scala numerica delle portate per la sezione di Ponte di Piave	54
Tabella 4 Durata delle portate per la sezione di Ponte di Piave	55
Tabella 5 Risultati campionatore di fondo di Helley - Smith	63
Tabella 6 Risultati Bottom Tracking ADCP - Boretto	65
Tabella 7 Spessore layer attivo e portata solida con modello di Van Rijn	66
Tabella 8 Spessore layer attivo e portata solida con modello di Du Boys	66
Tabella 9 Velocità di attrito: con e senza screening cella.....	68
Tabella 10 diametro adimensionale, parametro critico di Shields e velocità di attrito critica per la sezione di Boretto	68
Tabella 11 Velocità di attrito per canale navigabile - Boretto.....	72
Tabella 12 valori numerici per sforzo tangenziale al fondo e portata solida campionata.....	78
Tabella 13 Valori numerici: Velocità grani di fondo e portata solida campionata	78
Tabella 14 Valori numerici: tirante idrico e velocità di fondo	79
Tabella 15 Diametro adimensionale, parametro critico di Shields e velocità di attrito critica per la sezione di Ponte di Piave	81
Tabella 16 Parametri del profilo logaritmico interpolato e velocità di attrito di esempio	82

Abstract

In questa tesi si analizzano la stima della portata solida di fondo di una corrente fluviale attraverso formule di letteratura e misure ottenute con due differenti strumentazioni: il campionario di fondo di Helley-Smith e l'Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Il lavoro si concentra sulle potenzialità della tecnica ADCP a confronto con quella del campionario attraverso il confronto di misure eseguite in ambiente fluviale discutendone le limitazioni e le potenzialità di ciascuna.

In particolare, la stima della portata solida di fondo è stata ricavata con approcci sia indiretti che diretti.

I metodi indiretti stimano la portata solida a partire dalla velocità di attrito, ottenuta sia dalle interpolazioni dei profili di velocità, misurate dall'ADCP, sia calcolandola globalmente per la sezione. I metodi diretti fanno invece riferimento sia all'utilizzo del campionario di fondo di Helley-Smith sia alla funzione di "Bottom Tracking" dell'ADCP, grazie alla quale è possibile ricavare la velocità di spostamento del sedimento sul fondo, che in combinazione con lo spessore dello strato attivo, permette di ricavare la portata solida. L'applicazione di queste metodologie è stata eseguita in due campagne di misura: sul fiume Piave che, presentandosi in condizioni estreme di magra, ha permesso di verificare che l'ADCP non rilevasse alcuno spostamento dei sedimenti di fondo in condizioni di assenza di trasporto solido, confermando che la strumentazione non restituisca valori di trasporto solido frutto invece di errori strumentali o di applicazione; sul fiume Po, in sezione di Boretto, che ha permesso di confrontare tra loro i risultati ottenuti dai diversi approcci.

L'uso dell'ADCP per la misura del trasporto solido di fondo è risultato sicuramente una tecnica promettente che presenta numerosi vantaggi, specie se paragonata con la tecnica tradizionale del campionario di fondo, ma richiede ancora lavoro di ricerca per acquisire un campione di dati tale da poter eventualmente stimare parametri di correzione delle misure di portata solida.

Abstract - english

The aim of this thesis is to compare the estimation of bedload solid discharge derived from literature formulas and that one obtained from two different instruments: the Helley-Smith bedload sampler and the Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). For both instruments, the limitations in the field of application of river environment are shown, but the focus has also fallen on the potential of the ADCP. In particular, the estimate of the bedload solid discharge was obtained with both indirect and direct approaches. The indirect methods get the estimation of the solid discharge starting from the friction velocity; the latter obtained both from the interpolations of the velocity profiles, returned by the ADCP, through the logarithmic law, and by pursuing a global approach that allows to obtain it starting from the data of average velocity and hydraulic radius of the river section as well as from the characteristic diameter of the sediment.

The direct methods, in the other hand, refer to both the use of the Helley-Smith bedload sampler and to the Bottom Tracking function of the ADCP, thanks to which it is possible to obtain the speed of movement of the sediment on the riverbed, and then, used in combination with the thickness of the active layer, to derive the bedload solid discharge.

The application of these methodologies was carried out in two measurement campaigns: the first one on the Piave river which, presenting itself in extreme lean conditions, which it made possible to verify that the ADCP did not detect any movement of the riverbed sediments in conditions of absence of solid transport, confirming that the instrumentation does not return solid transport values instead derived from instrumental or application errors; the second one on the Po river, in Boretto section, which made it possible to compare the results obtained from the different approaches.

The use of ADCP for the measurement of bedload river transport has certainly proved to be a promising technique that has numerous advantages, especially compared with the traditional technique as the bedload sampler, but it still requires research work to acquire a sample of data in order to eventually be able to estimate parameters correction of solid flow measurements.

Introduzione

Il trasporto solido dei sedimenti in una corrente fluviale è un fenomeno naturale indotto dalla corrente d'acqua che si manifesta sia in ambiente marittimo che in corsi d'acqua dolce. In questo elaborato di tesi si fa riferimento esclusivamente all'ambiente fluviale. La velocità della corrente, in relazione alla disponibilità di sedimento, mette in moto i grani di materiale solido sia in sospensione che sul fondo alveo, ma in concentrazioni tali da non alterare il comportamento reologico del fluido acqua. La concentrazione volumetrica di sedimento, pertanto, non deve essere superiore al 2%. Il trasporto solido può essere differenziato in trasporto solido sospeso e trasporto solido di fondo.

Per quanto riguarda il trasporto solido sospeso, il materiale è caratterizzato da un diametro molto ridotto e deriva principalmente da fenomeni di erosione dei versanti e delle valli di bacini idrologici causati sia da forti precipitazioni che dallo scioglimento dei ghiacciai. La sua presenza è riconoscibile dal colore scuro o argenteo dopo rispettivamente un evento meteorico o un fenomeno di scioglimento nevoso. Diversi ricercatori hanno condotto studi volti alla stima del trasporto solido in sospensione con diverse tecniche e metodologie, tradizionali e in campo ottico e acustico. I metodi tradizionali si basano su una valutazione gravimetrica in laboratorio, risultando però non sempre facile da ottenere, poiché richiede la raccolta di numerosi campioni di acqua per ogni punto dell'area di ricerca. Non solo, anche la mancanza di continuità intrinseca in questo metodo di analisi è un limite, permettendo la raccolta dati solo in un periodo limitato di osservazione. Per queste ragioni le metodologie tradizionali sono solitamente molto dispendiose sia in termini economici che temporali e pertanto si sono ricercate tecniche innovative come, ad esempio, l'uso di Acoustic Doppler Current Profilers, potenzialmente in grado di ricoprire lunghi periodi temporali di misurazione. Un altro vantaggio dell'ADCP rispetto all'impiego di metodologie tradizionali è quello di avere un'elevata risoluzione temporale e spaziale. Inizialmente l'ADCP ad alta frequenza (>100kHz) veniva utilizzato nel campo del trasporto solido sospeso unicamente per una stima qualitativa del materiale nella colonna d'acqua; studi più recenti hanno poi riscontrato una correlazione tra il backscatter dell'onda acustica emessa dall'ADCP e la concentrazione del sedimento in sospensione. Sono state eseguite stime di portata solida sospesa basate sull'intensità dell'impulso di ritorno, riuscendo a calibrare, attraverso analisi numeriche, un modello di stima grazie all'impiego di ADCP sia in movimento che in posizione fissa. Alcuni dei parametri fisici del modello descriventi la propagazione dell'onda sonora nel mezzo acqua sono stati stimati a partire da formule empiriche, altri misurati. Utilizzando la

regressione si ottiene una relazione tra intensità del suono di ritorno (backscattered sound) e la concentrazione di solido. Come è facile intuire, questa metodologia non è esente da incertezze: in relazione all'effetto Doppler, risulta complessa la misurazione dell'elevata concentrazione di sedimento in prossimità del letto del corso d'acqua, dove per lo strumento risulta difficile il discernimento tra la portata solida e il fondo alveo; questa metodologia si basa inoltre sull'ipotesi, difficilmente rispettabile, di uniformità di distribuzione spaziale della granulometria e che essa sia costante nel tempo, pena l'invalidazione di alcune relazioni alla base della calibrazione.

Per quanto riguarda invece il trasporto solido di fondo, il materiale trasportato sul letto del corso d'acqua è di dimensioni maggiori e corre da sezioni di monte, verso valle, con saltelli sul fondo, rotolando o con scivolamenti intervallati da pause di arresto, in relazione alla velocità della corrente. Anche in questo caso gli approcci sono molteplici e con il passare degli anni si sono sviluppate tecnologie che ne permettono una misurazione o una stima sempre più precisa e meno dispendiosa dal punto di vista economico, temporale e di risorse necessarie. Partendo da metodologie tradizionali come campionatori di fondo, come quello di Helley-Smith, stanno prendendo piede negli ultimi anni tecnologie sempre più innovative di acustica passiva, come i geofoni, e acustica attiva, come gli Acoustic Doppler Current Profilers. In questo elaborato si è focalizzata proprio l'attenzione sull'utilizzo di ADCP per la stima della portata solida di fondo, mettendone in luce gli aspetti positivi, così come evidenziando le limitazioni intrinseche dello strumento e le relative problematiche riscontrate. I risultati ottenuti sono stati poi confrontati con quelli ottenuti adoperando tecnologie tradizionali. Ma, precisamente, cosa si intende con trasporto *solido di fondo*? Esso è il sedimento trasportato verso valle, dalla corrente di un corso d'acqua, per rotolamento, saltazione o trascinarsi, ovvero la percentuale di carico solido che entra in contatto di frequente con il fondo immobile. Questa distinzione tra trasporto solido sospeso e trasporto solido di fondo non è comunque permanente per tutta la lunghezza del corso d'acqua. In base all'idraulica della corrente in diversi tratti fluviali, le particelle possono essere alternatamente parte del carico sospeso e del carico di fondo; pertanto, le particelle sospese ad una determinata sezione trasversale possono essere parte del trasporto di fondo ad un'altra sezione del corso d'acqua, e viceversa. La forte relazione che lega il carico sospeso, il carico di fondo e il fondo alveo stesso, e l'intrinseca natura del fenomeno del trasporto solido di fondo che vede l'alternanza di movimenti e pause di arresto delle particelle, rende il trasporto solido una quantità di non facile determinazione.

Risulta quindi evidente l'Influenza del trasporto solido sulla dinamica fluviale. Lo stato di erosione o di sedimentazione della sezione di un corso d'acqua è determinato dal bilancio tra portata solida entrante e portata solida uscente da un tratto fluviale definito.

Questo fenomeno, insieme all'influenza di processi geologici e lavori idraulici effettuati lungo il corso fluviale, influenza la morfologia del corso d'acqua stesso. Risulta quindi evidente come lo studio del trasporto solido in ambito fluviale sia determinante sia per lo studio delle modificazioni del corso d'acqua, sia per la sicurezza idraulica e non, ad esso correlata.

Questo fenomeno fisico costituisce difatti il punto di unione tra i fenomeni di erosione che interessano prevalentemente la parte montana del bacino che quelli di deposito che si verificano nella zona valliva e alla foce del corso d'acqua. Nel diagramma proposto da Hjulstrom (Figura 1) viene mostrata la dipendenza dei fenomeni di erosione, trasporto e sedimentazione in funzione della velocità critica della corrente e del diametro delle particelle coinvolte in questi fenomeni.

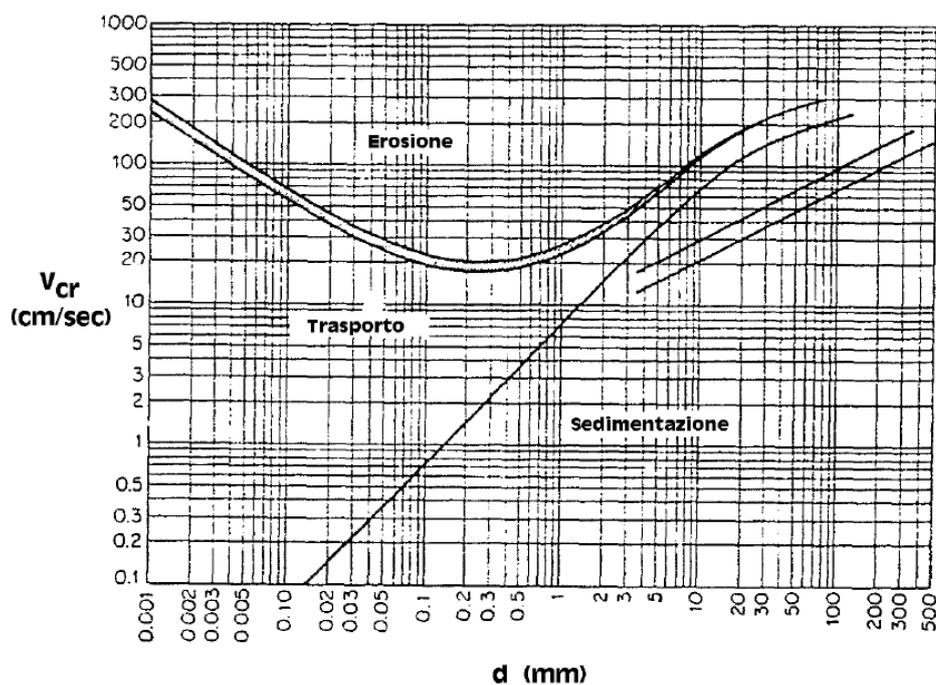


Figura 1 Diagramma di Hjulstrom

Dal punto di vista ingegneristico, l'analisi di tale fenomeno, assume una grande importanza in quanto legato al processo di erosione delle sponde e quindi alla relativa stabilità dell'alveo e delle opere su di esso realizzate. Oppure, al contrario, interessa processi di interrimento all'interno di bacini idrici artificiali in corrispondenza di dighe, limitandone quindi la loro capacità e di conseguenza mettendo potenzialmente a rischio la sicurezza idraulica dell'opera o comunque limitando la disponibilità di

acqua come risorsa idrica dal punto di vista irriguo e/o energetico. O ancora, l'accumulo di sedimento, specie se in zone in cui vi è un'interazione tra il corso d'acqua e opere idrauliche che rappresentano un ostacolo per il deflusso di portate di piena, come possono essere pile di ponti, briglie, traverse fluviali ecc., riducendo la sezione idraulica, rappresenta un elemento aggiuntivo al favorire di eventi di esondazione.

1 Misura della portata solida al fondo: strumentazione

In questo elaborato di tesi si sono confrontate le portate solide di fondo misurate tradizionalmente con campionatore di fondo di Helley-Smith con quelle stimate con Acoustic Doppler Current Profiler. In seguito, vengono descritti entrambi gli strumenti mettendone in luce i relativi vantaggi e le relative limitazioni.

1.1 Campionatore di Helley-Smith

Helley e Smith (1971) introdussero un campionatore di portata solida al fondo basato sulla differenza di pressione (Figura 2), modificando strutturalmente la versione del campionatore di Arnhem (1964). Il campionatore di Helley-Smith presenta ugello, sacca di campionatura e telaio di maggiori dimensioni.

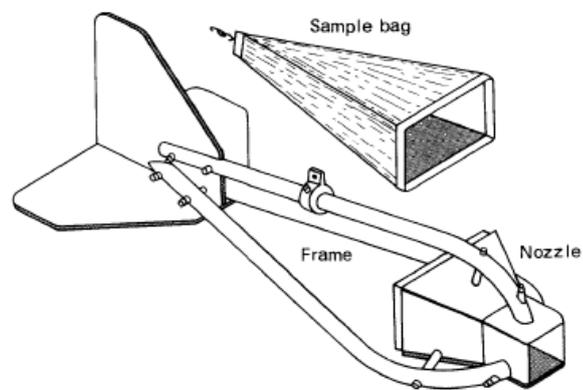


Figura 2 Campionatore di fondo di Helley-Smith

Il campionatore è stato progettato per essere utilizzato in corsi d'acqua con velocità medie fino a 3 m/s. Vengono mostrate le parti di cui è costituito il campionatore di Helley-Smith e le relative dimensioni del modello standard originale (Figura 3). Lo strumento è stato pensato per l'utilizzo da barca, da passerelle/ponti o a guado.

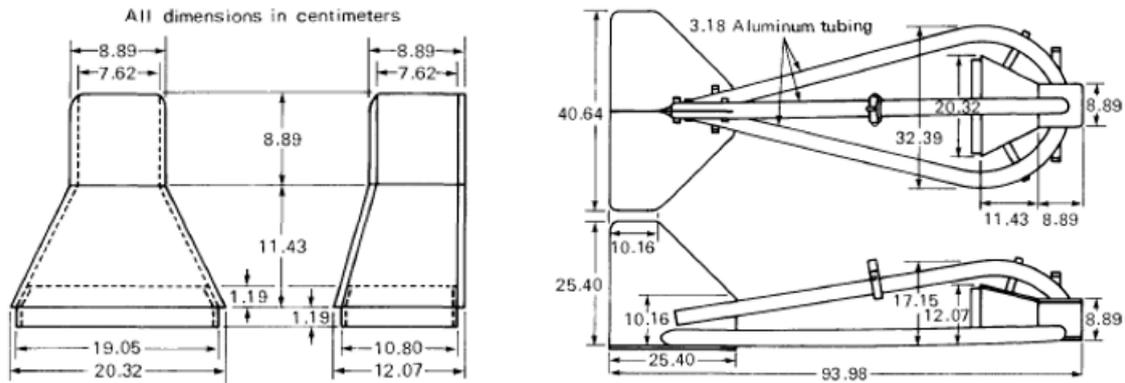


Figura 3 Dimensioni del campionatore di fondo di Helley-Smith

1.1.1 problemi di misura con campionatore tradizionale

Per le caratteristiche intrinseche del campionatore di fondo tradizionale (modello di Helley-Smith e modelli simili da esso derivati, basati sullo stesso principio) e i fenomeni fisici generati dall'introduzione di un corpo in un flusso di corrente, vengono riscontrate alcune problematiche legate al campionamento del materiale di fondo alveo. Esse possono essere riassunte come segue:

- *Posizionamento*: in fase di calata dello strumento sul fondo, le operazioni possono risultare complesse a causa della turbolenza del flusso e alla resistenza idrodinamica (1) impressa dalla corrente del corso d'acqua sul campionatore, rendendo molto complicato il suo posizionamento sul fondo nel punto desiderato, specie in corsi d'acqua con alte velocità della corrente e portate caratterizzate da elevati periodi di ritorno.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad (1)$$

Dove:

- F_D è la resistenza fluidodinamica
- ρ è la densità del fluido
- v è la velocità della corrente
- C_D è il coefficiente di resistenza fluidodinamica
- A è l'area della sezione trasversale occupata dal campionatore

- *Perdita di materiale durante la risalita*: come in fase di calata, anche durante il recupero dello strumento, le operazioni possono risultare complesse a causa di turbolenza e resistenza idrodinamica, causando però, in questo caso, una perdita del materiale prelevato andando così ad inficiare sulla bontà della campionatura.
- *Effetto gap*: l'effetto gap si verifica per un non corretto posizionamento del campionatore sul fondo alveo. Il divario, che si crea tra l'ugello del campionatore e l'alveo, porta ad una riduzione anche considerevole della percentuale di grani di fondo che sarebbe entrata nel campionatore se quest'ultimo fosse stato adeso al letto del corso d'acqua, inficiando quindi anche in questo caso sulla bontà della campionatura.
- *Tempo di campionamento*: il tempo di campionamento è il periodo di tempo in cui il campionatore rimane sul fondo alveo e accumula il sedimento nella sacca di campionatura. Anche questo aspetto è rilevante ai fini di una corretta interpretazione dei risultati ottenuti. Lunghi tempi di campionamento tendono ad attenuare l'effetto di fluttuazioni della velocità di breve termine e tendono a considerare una velocità media, rispettando una distribuzione normale. D'altra parte, tempi brevi di campionatura tendono a mostrare gli effetti di variazioni istantanee di velocità corrispondenti solitamente a distribuzioni asimmetriche (Gomez, Naff e Hubbell, 1989). Dal momento che la capacità del campionatore di fondo è relativamente ridotta, solitamente un range accettabile di tempo di campionamento si attesta tra i 30 e i 60 secondi. In linea di principio non si dovrebbe mai scendere sotto i 10 secondi. Altro aspetto da considerare in relazione al tempo di campionamento è che la sacca del campionatore non debba mai essere riempita per più del 50% per evitare che una quantità considerevole di sedimento accumulato all'interno vada ad ostruire la maglia, compromettendo anche in questo caso la bontà della campionatura.
- *Disturbo indotto dal campionatore*: una calibrazione idraulica in laboratorio del campionatore di fondo di Helley-Smith è stata condotta da Druffel et al. nel 1976. L'efficienza idraulica di un campionatore di fondo è stata definita come rapporto tra la velocità media della portata d'acqua che attraversa il campionatore e la velocità media della portata d'acqua che attraverserebbe l'area occupata dall'apertura dell'ugello del campionatore se quest'ultimo non ci fosse (Hubbell, 1964). Nello studio della calibrazione, sono stati misurati profili di

velocità nell'ugello del campionatore, e in diverse sezioni a monte del campionatore stesso. Profili di velocità tipici vengono riportati in Figura 4. È emerso come l'efficienza del campionatore sia approssimativamente di 1.54. Questo valore è risultato essere costante per tutto il range di velocità utilizzate nella sperimentazione. Range paragonabile a molte condizioni di corsi d'acqua naturali (A Field Calibration of the Sediment - Trapping Characteristics of the Helley-Smith Bedload Sampler by William W. Emmett, GEOLOGICAL SURVEY PROFESSIONAL PAPER 1139).

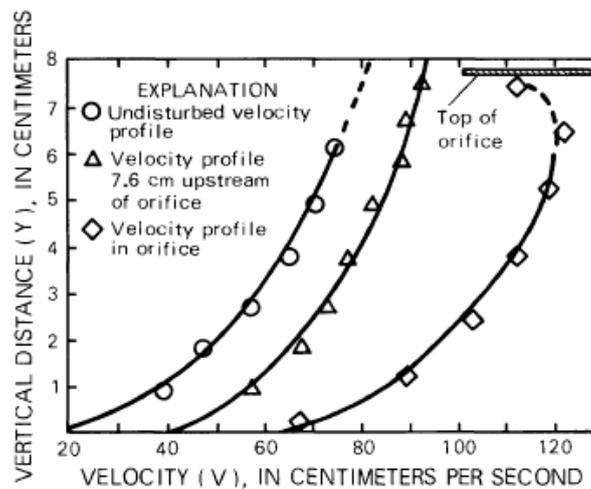


Figura 4 Profili di velocità a monte e all'interno dell'ugello del campionatore di fondo di Helley-Smith

L'efficienza del campionatore può essere vista anche come rapporto tra il volume raccolto e il volume effettivamente trasportato (2).

$$E = \frac{\text{Vol di sedimento raccolto}}{\text{Vol di sedimento effettivamente trasportato}} \quad (2)$$

Essa è legata al progressivo riempimento del sacco di campionamento, al variare della granulometria del sedimento, al tempo di campionamento e alla velocità della corrente in prossimità del fondo. In Figura 5, si mostra come l'efficienza percentuale vari al variare del rapporto tra il prodotto, del tempo di campionamento e la velocità della corrente, e la larghezza dell'ugello del campionatore.

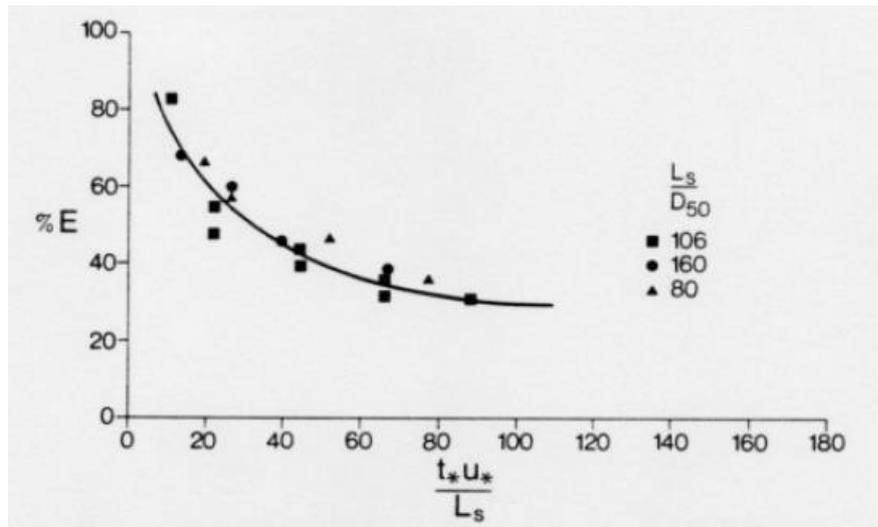


Figura 5 Variazione percentuale dell'efficienza del campionatore

Risulta quindi evidente come anche il solo posizionamento dello strumento sul fondo vada a generare un disturbo sul flusso della corrente; è quindi opportuno valutare l'efficienza idraulica del campionatore utilizzato per poter leggere e interpretare correttamente i risultati ottenuti.

Dallo studio condotto da Druffel et al. emerge inoltre come il sacco del campionatore può essere riempito al 40% della capacità con sedimenti di dimensioni maggiori della mesh (0.2 - 0.25 mm) di cui è costituito il sacco. Al contrario, sedimenti con diametri vicini alla dimensione della maglia del sacco possono penetrare e uscire dalla maglia stessa, causando una decrescita nell'efficienza idraulica e una perdita di sedimento.

Risulta ora evidente come vi sia un interesse sempre più crescente nella ricerca di metodologie alternative per la misura della portata solida. Una delle quali è rappresentata dall' Acoustic Doppler Current Profiler, tecnica acustica attiva che permette di ricavare la portata solida al fondo partendo dalla misura del profilo di velocità della corrente, ovviando alle problematiche sopra descritte, dal momento che non richiede il posizionamento dello strumento sul fondo del corso d'acqua, sfruttando bensì le onde acustiche che penetrano negli strati della colonna d'acqua.

1.2 Acoustic Doppler Current Profiler

L'Acoustic Doppler Current profiler (ADCP) nasce come strumento per la misura della velocità della corrente e della portata in corsi d'acqua sia naturali che artificiali, sfruttando l'effetto Doppler, ovvero quel fenomeno fisico che descrive il cambiamento di frequenza di un'onda a seconda dello stato di moto relativo tra emettitore e/o ricevitore. Dalla misura della velocità della corrente nella colonna d'acqua o sfruttando la funzione di Bottom Tracking dello strumento, come verrà spiegato in dettaglio nei capitoli successivi, si può ricavare la portata solida al fondo.

Come schematizzato in **Figura 6**, un segnale trasmesso di frequenza nota F_0 , giungerà ad un ricevitore con la medesima frequenza se la distanza tra le due antenne non varia, e quindi in condizioni stazionari o di moto relativo costante, o con frequenza diversa se vi è una variazione nella distanza dei due oggetti (questo accade indipendentemente se a muoversi sia l'emettitore e/o il ricevitore); in particolare, se la distanza si riduce la frequenza del segnale ricevuto F_D sarà maggiore di quella del segnale emesso, viceversa, se la distanza aumenta la frequenza F_D sarà minore.

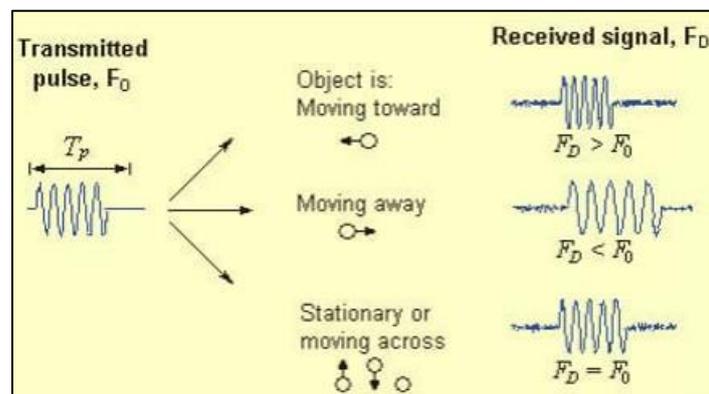


Figura 6 Schema effetto Doppler

L'ADCP usa questo effetto, trasmettendo un'onda di frequenza fissata e ascoltando gli echi di ritorno riflessi da scatters presenti in acqua, ovvero da particelle e/o piccole bolle d'aria presenti nella colonna d'acqua, per misurare la velocità della corrente. In **Figura 7** si vede come l'impulso emesso dal trasduttore si propaghi nel mezzo acqua fino all'intercettazione da parte degli scatters, dove poi, una frazione dell'impulso verrà riflessa in direzione del trasduttore stesso. Una delle assunzioni alla base di questa misura è chiaramente che la velocità degli scatters sia la medesima della corrente d'acqua.

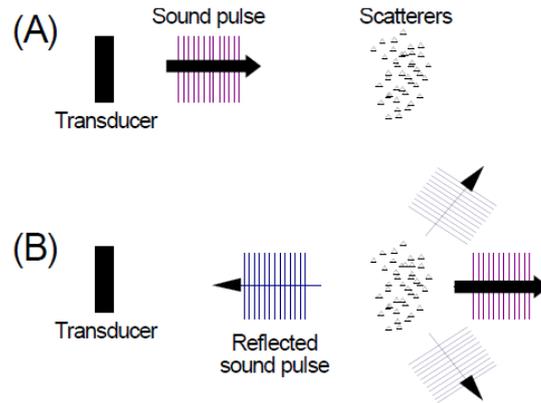


Figura 7 Schema onda emessa (A) e onda riflessa (B)

Quando il suono viene diffuso dall'ADCP, l'onda sonora ricevuta dallo scatter subisce un primo Doppler-shift ad una frequenza più bassa, proporzionale alla velocità relativa tra l'ADCP stesso e lo scatter. Il suono riflesso giungerà poi nuovamente all'ADCP dove verrà recepito con un secondo Doppler-shift. Per cui risulta (3):

$$F_d = 2 F_s(V/C) \quad (3)$$

Dove:

- F_d è la variazione di frequenza - doppio Doppler-shift [Hz]
- F_s è la frequenza del suono emesso [Hz]
- V è la velocità relativa tra la sorgente e il ricevitore [m/s]
- C è la velocità del suono nel mezzo [m/s]

Nello specifico, per le misurazioni analizzate in questo elaborato, è stato utilizzato uno strumento prodotto dalla ditta americana SonTek, denominato River Surveyor versione M9 in grado di profilare le velocità della corrente fino ad un massimo di 40m di profondità, montato su una "HydroBoard" (Figura 8). La strumentazione è corredata inoltre di un'antenna GPS in grado di fornire i dati sulla posizione della strumentazione stessa, identificandone un eventuale tracciato, se utilizzata in movimento.

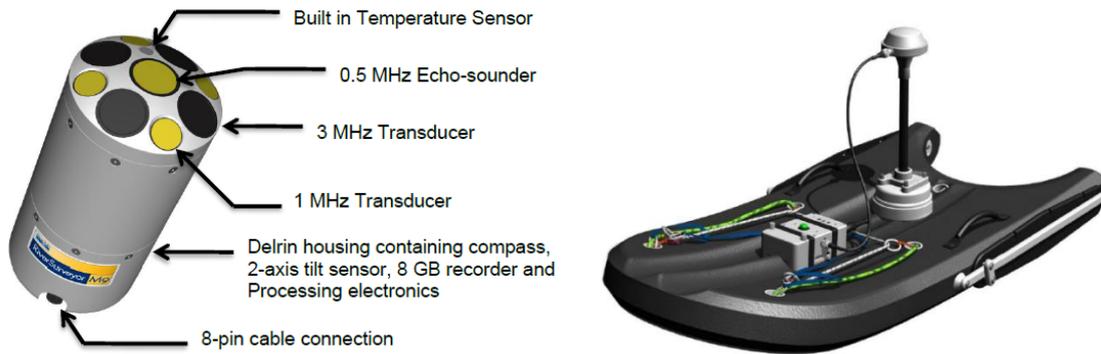


Figura 8 ADCP M9 (sinistra) e HydroBoard (destra)

La strumentazione dispone di un ecoscandaglio a 0.5 Mhz di frequenza in grado di misurare la profondità dell'alveo e di un doppio set di trasduttori a 1Mhz e 3Mhz disposti in configurazione di Janus, ovvero con inclinazione tra 20 e 30 gradi rispetto alla verticale. Ogni trasduttore del set è in grado di misurare una delle componenti del vettore tridimensionale della velocità, restituendo quindi, grazie ad una ricombinazione mediante relazioni trigonometriche, valori in coordinate ENU, ovvero il vettore delle velocità in direzione Est (E), Nord (N), Up-verticale (U), ortogonali tra loro.

Un ulteriore trasduttore, sfruttando la ridondanza dei dati misurati, permette di calcolare la *error velocity*, ovvero la differenza tra la misura della componente verticale della velocità e le due paia di beams opposti. Essa rappresenta un indicatore di omogeneità della corrente nel piano orizzontale, ovvero che la velocità sia la medesima per ogni beam.

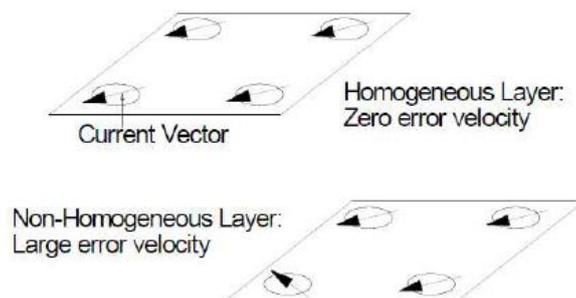


Figura 9 Layer omogeneo vs layer non omogeneo

L'utilizzo di più beams, infatti, se tale ipotesi non venisse rispettata, andrebbe a compromettere la possibilità di utilizzo delle suddette formule trigonometriche necessarie al fine del calcolo della velocità della corrente in quanto si misurerebbero velocità della corrente in punti diversi della

colonna d'acqua. L'ipotesi di omogeneità, che generalmente viene rispettata nei corsi d'acqua, è tanto più osservata quanto il valore della Error Velocity è basso.

Il sistema SmartPulseHD™, implementato per RiverSurveyor M9, per la profilazione della corrente del corso d'acqua funziona come segue:

- RiverSurveyor traccia in modo continuo la velocità dell'acqua e la profondità. In base a questi valori sceglie la configurazione di elaborazione ottimale.
- Ad ogni istante temporale, il sistema manda impulsi multipli, potenzialmente a frequenze multiple, utilizzando differenti tecniche di elaborazione per raggiungere la performance di sistema ottimale.
- Vengono utilizzate tre differenti frequenze: 3 MHz e 1 MHz per i trasduttori e 0.5 MHz per l'ecoscandaglio.
- Vengono utilizzate differenti tipi di impulsi e tecniche di elaborazione: bottom tracking, rilevamento fondo alveo, impulsi coerenti e incoerenti, e a banda larga. Molti di questi impulsi vengono utilizzati in combinazione. Gli esatti tipi di impulsi da utilizzare ad ogni istante temporale dipendono dalle condizioni operative.
- Il sistema traccia velocità e profondità secondo per secondo, e aggiorna tipi di impulso e metodi di elaborazione necessari, a seconda delle condizioni.

In particolare, RiverSurveyor M9 utilizza:

- Impulsi coerenti a 3 MHz di frequenza in condizioni di profondità di fondo alveo inferiore o uguale a 1.5 m o velocità della corrente inferiore o uguale 0.4 m/s. La dimensione delle celle sarà di 0.02 m per lato.
- Impulsi coerenti a 1 MHz di frequenza in condizioni di profondità di fondo alveo comprese tra 1.5 m e 5 m o velocità della corrente inferiore o uguale 0.4 m/s. La dimensione delle celle sarà di 0.06 m per lato.
- Impulsi incoerenti a 3 MHz di frequenza in condizioni di profondità di fondo alveo comprese tra 1.5 m e 5 m o velocità della corrente maggiore di 0.4 m/s. In particolare, la dimensione delle celle sarà di 0.1 m per lato per profondità comprese tra 1.5 m e 2 m, di 0.2 m per

profondità comprese (o uguali) tra 2 m e 4 m, e di 0.4 m per profondità comprese tra 4 m e 5 m.

- Impulsi incoerenti a 1 MHz di frequenza in condizioni di profondità di fondo maggiori di 5 m. In particolare, la dimensione delle celle sarà di 0.5 m per lato per profondità comprese tra 5 m e 10 m, di 1 m per profondità comprese (o uguali) tra 10 m e 20 m, e di 2 m per profondità superiori a 20 m.

1.2.1 Limitazioni dell'Acoustic Doppler Current Profiler

Fenomeni fisici associati alla generazione del suono da parte di un trasduttore, la sua propagazione nel mezzo, l'assorbimento, l'attenuazione e gli scatters nella colonna d'acqua costituiscono limitazioni caratteristiche degli Acoustic Doppler Current Profilers. In particolare, si evidenziano effetti disturbativi del sedimento sull'energia acustica di riflessione dagli scatters e sul tracciamento di fondo alveo, o anche aree del profilo non misurate a causa del pescaggio dell'ADCP stesso o per interferenza *side-lobe*. Ulteriori limitazioni derivano dalle tecniche utilizzate per la configurazione e il processo del segnale acustico che dipendono dalla specifica configurazione strumentale utilizzata dall'operatore che esegue le misure. Tali limitazioni o problematiche vengono descritte a seguire:

- *Effetto del sedimento*: la quantità e le caratteristiche del particolato nella colonna d'acqua possono significativamente influenzare la capacità dell'ADCP di misurare accuratamente il campo delle velocità. L'acqua pura è acusticamente trasparente per cui la mancanza di particolato sospeso in colonna impedirebbe la riflessione dell'onda acustica di ritorno in direzione dell'ADCP. Per questo motivo, in corsi d'acqua particolarmente limpidi con insufficiente materiale in sospensione, non si è in grado di ricostruire il profilo di velocità. D'altra parte, anche l'elevata concentrazione di sedimento in sospensione, condizione generalmente abituale durante un'onda di piena, può altrettanto influire negativamente nella misurazione. L'alta concentrazione di sedimento in prossimità del letto fluviale, infatti, può portare l'ADCP a commettere errori nel discernere l'elevata concentrazione dal fondo stesso, producendo così una misura inaccurata della profondità d'alveo e/o della velocità dell'HydroBoard sulla quale è montata la strumentazione. Inoltre, l'alta concentrazione di sedimento sospeso potrebbe impedire la corretta misurazione della velocità anche a causa

dell'eccessiva attenuazione del segnale acustico che viaggia prima in direzione del fondo e poi riflesso indietro in direzione del trasduttore. Queste limitazioni che influenzano l'operatività dell'ADCP vengono osservate ma non quantificate: esse sono molto dipendenti dal sito in esame e variabili in base alle caratteristiche del particolato e alla profondità dell'alveo. In generale, strumenti acustici a basse frequenze trasmettono più energia nella colonna d'acqua e pertanto riescono a penetrare alte concentrazioni di sedimento rispetto a strumenti che utilizzano frequenze più alte.

- *Aree del profilo non misurate*: gli ADCP dividono la colonna d'acqua in celle e, a seconda della profondità, ne associano la relativa velocità dell'acqua. Uno dei problemi di misura dell'intero profilo di corrente si riscontra già nel primo strato d'acqua sotto il pelo libero. Ciò è dovuto al pescaggio della strumentazione, all'effetto della meccanica del trasduttore e al disturbo del moto in prossimità dello strumento. Il trasduttore dell'ADCP deve essere posizionato al di sotto della superficie del corso d'acqua, pertanto, non è possibile misurare la velocità dell'acqua negli strati sovrastanti. Il pescaggio dello strumento è controllato in modo tale da evitare che esso emerga e che bolle d'aria transitino al di sotto.

Un'altra problematica legata ad una mancanza di rilevazione di dati è quella che interessa l'area definita *side-lobe*.

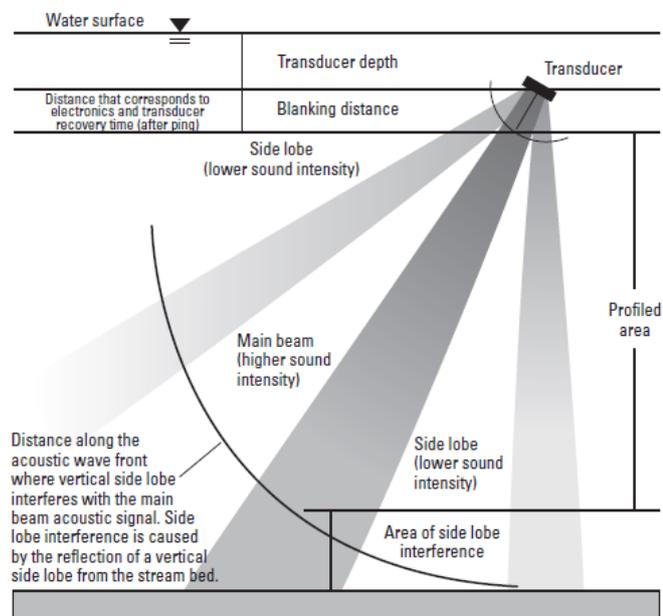


Figura 10 Schema beam ADCP e aree non misurate

La maggior parte dei trasduttori emettono lobi laterali "parassitari" al di fuori del cono acustico principale. L'energia acustica nei lobi laterali è molto minore rispetto a quella del

cono principale. La quantità di energia acustica riflessa dagli scatters nella colonna d'acqua è molto piccola se comparata con quella trasmessa; quella riflessa dal fondo è molto più alta di quella riflessa dagli scatters. Ma l'energia riflessa dal fondo nella zona dei lobi laterali è confrontabile con quella riflessa dagli scatters nella colonna d'acqua del cono principale, e ciò porta a commettere potenzialmente errori nella misura del Doppler shift. La colonna d'acqua affetta dall'interferenza *side-lobe* varia dal 6% per un sistema con inclinazione di 20 gradi, al 13% per uno con inclinazione di 30 gradi (Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat, USGS). Può essere calcolata come (4):

$$D_{SL} = D * (1 - \cos(\theta)) \quad (4)$$

Dove:

- D_{SL} è la distanza dal fondo alveo affetto da interferenza side-lobe.
- D è la distanza tra il trasduttore e il fondo alveo.
- θ è l'angolo di inclinazione del trasduttore rispetto alla verticale.

Essendo quindi impossibile misurare in maniera corretta la velocità della corrente nelle porzioni più alte e più basse della colonna d'acqua, la portata in queste aree deve essere stimata a partire dai dati raccolti nella porzione d'acqua non affetta da queste problematiche. Pertanto, in acque basse la limitazione dello strumento sarà data dalla somma del pescaggio, della distanza delle zone d'ombra, la posizione dell'ultima cella, la dimensione dell'ultima cella e il range d'interferenza della side-lobe.

Un'ulteriore area non misurata da sommare a quelle precedentemente descritte è definita *Blanking distance*: gli strumenti che si servono della tecnologia acustica Doppler non riescono a misurare una zona immediatamente al di sotto della strumentazione stessa poiché i trasduttori, funzionando anche da ricevitori di segnale, necessitano di un istante temporale per passare da una modalità all'altra. La dimensione di questa regione di *campo vicino* dipenderà dalla frequenza acustica (1 MHz, 3MHz nel caso dell'ADCP RiverSurveyor M9 in analisi), dalla tecnica di profilazione (segnale incoerente IC, segnale coerente PC, o banda larga BB), e dalla lunghezza del segnale acustico trasmesso (più la frequenza sarà bassa, più la lunghezza del segnale acustico trasmesso sarà maggiore). Con lo strumento RiverSurveyor M9, utilizzato per la rilevazione dei dati di questo progetto, la *Blanking distance* è settata di

default ad un valore minimo di 0.05 m, ma può eventualmente essere aumentata dall'operatore.

- *Configurazione e caratteristiche:* Condizioni del sito, come profondità del corso d'acqua, velocità della corrente, materiale di fondo, influenzano il set up dello strumento. È quindi necessario ricercare la configurazione che permette di ottenere soluzioni ottimali sito specifiche e aggiornabili ad ogni istante temporale. RiverSurveyor permette di cambiare configurazione manualmente, ma mantenendo l'impostazione automatica sceglie la configurazione ottimale per ogni passo temporale autonomamente in base alla velocità della corrente e alla profondità di fondo alveo, come descritto precedentemente. I valori di profondità massima, velocità relativa, minima dimensione di cella raccomandata, e rumore casuale di fondo (deviazione standard della velocità) per l'ADCP SonTek RiverSurveyor sono riportati in Figura 11.

Figura 11 Valori caratteristici per ADCP SonTek, 2000

Frequency (kHz)	Maximum profiling depth, ^a in ft	Maximum relative velocity, ^b in ft/s	Minimum recommended depth-cell size, in ft	1-second standard deviation, in ft/s
500	390	32	3.28 (1 m)	0.73
1,000	130	32	0.82 (0.25 m)	0.89
1,500	80	32	0.82 (0.25 m)	0.68
3,000	20	32	0.49 (0.15 m)	0.38

^a massima profondità che può profilata dipendentemente da temperatura dell'acqua e sedimento in sospensione.

^b massima velocità misurata dall' Acoustic Doppler Current Profiler, includendo velocità della HydroBoard e della corrente.

2 Stima della portata solida al fondo: metodi indiretti

In questo progetto di tesi la portata solida al fondo si è stimata perseguendo metodi indiretti e metodi diretti: i primi prevedono la stima della portata solida a partire dalla velocità di attrito ottenuta sia dalle interpolazioni dei profili di velocità, restituite dall'ADCP, sia attraverso un approccio globale. I secondi, i così detti metodi diretti, si basano sulla lettura diretta della velocità del fondo e verranno invece presentati nel capitolo successivo.

2.1 ADCP

Nonostante la misura del trasporto solido sia un fenomeno di non facile studio, specie in condizioni reali in campo, l'Acoustic Doppler Current Profiler è uno strumento che si è rivelato essere una valida alternativa non invasiva a quelle che sono le metodologie tradizionali, anche durante eventi di piena con alte portate, dove si verifica un intenso trasporto solido. Il metodo indiretto, con impiego dell'ADCP, permette di stimare quindi la portata solida al fondo partendo dal calcolo del profilo verticale delle velocità della corrente nella sezione del corso d'acqua in esame. Ottenuto il profilo delle velocità si ricava lo sforzo tangenziale al fondo, si verifica il superamento della soglia critica identificata dal parametro di Shields, e infine, sfruttando formule note in letteratura si ricava la portata solida al fondo.

2.1.1 Profilo verticale delle velocità e sforzo tangenziale al fondo

Nell'elaborato di tesi per la generazione dei profili verticali di velocità si è fatto riferimento alla teoria di Prandtl – Von Kàrmàn. Trattandosi di corsi d'acqua naturali è necessario tenere in conto le turbolenze generate dal flusso della corrente. In particolare, la distribuzione delle velocità sarà stabile fino al layer di confine turbolento, al contrario, superato tale limite, con l'avvicinamento al fondo alveo sarà necessario approssimare ad una distribuzione logaritmica (Open-channel hydraulics, Ven Te Chow). Lo sforzo tangenziale in ogni punto del regime turbolento può essere definito, in accordo con Prandtl, come segue (5):

$$\tau = \rho l^2 \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (5)$$

Dove:

- ρ è la densità = w/g , dove w è il peso unitario del fluido (acqua) e g è l'accelerazione gravitazionale
- l è la lunghezza caratteristica, nota come lunghezza di mescolamento (*mixing length*)
- $\frac{dv}{dy}$ = gradiente delle velocità alla distanza normale y dalla superficie solida di fondo

Per la regione vicina alla superficie solida, Prandtl introduce due assunzioni:

- La lunghezza caratteristica di mescolamento è proporzionale alla distanza normale y dalla superficie solida di fondo.
- Lo sforzo tangenziale è costante.

Dalle due assunzioni, considerando quindi sul fondo alveo $\tau = \tau_0$, ne deriva che (6):

$$dv = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \frac{dy}{y} \quad (6)$$

Dove:

- k è la costante di proporzionalità tra l e y , facendo riferimento alla prima assunzione. Questa costante, che prende il nome di costante di Von Kàrmàn, in base a diversi esperimenti sostenuti, vale 0.40.

Integrando l'equazione (6) e definendo la velocità di attrito (*friction velocity* u^*) come $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$, si ottiene (7):

$$v = 2.5 \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \ln \frac{y}{y_0} = 2.5 u^* \ln \frac{y}{y_0} \quad (7)$$

Dove:

- y_0 è la costante di integrazione

L'equazione, definita come legge universale di distribuzione delle velocità di Prandtl – Von Kàrmàn, così ottenuta permette di calcolare le velocità della corrente nella regione turbolenta come funzione logaritmica della distanza y dal fondo alveo.

Nell'elaborato di tesi, trattandosi di sezioni di corsi d'acqua con fondo sabbioso, si ricava la distribuzione delle velocità della corrente a partire dalla formulazione di Nikuradse che, tenendo conto dell'equazione ottenuta da Prandtl - Von Karman, ne introduce una specifica per sezioni con scabrezza sabbiosa di fondo (8):

$$\frac{u(z)}{u^*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{e_s}\right) + 8.5 \quad (8)$$

Dove:

- $u(z)$ è la velocità della corrente in funzione della distanza dal fondo
- u^* è la velocità di attrito
- $k = 0.4$, costante di Von Kàrmàn
- e_s è la scabrezza equivalente in sabbia di Nikuradse (*lunghezza di rugosità*).

Rielaborando la relazione (8) si ottiene la relazione lineare sul piano semilogaritmico della velocità della corrente (9):

$$u(z) = \theta_1 \ln(z) + \theta_2 \quad (9)$$

Dove:

- $\theta_1 = \frac{u^*}{k}$
- $\theta_2 = -\frac{u^*}{k} \ln(e_s) + 8.5u^*$

Stimati i parametri θ_1 e θ_2 è quindi possibile ricavare la distribuzione logaritmica del profilo delle velocità e ricavarne la velocità di attrito u^* come (10):

$$u^* = k \theta_1 \quad (10)$$

Ottenuta quindi la velocità d'attrito si ricava lo sforzo tangenziale al fondo come (11):

$$\tau = \rho u^{*2} \quad (11)$$

2.1.2 verifica superamento soglia critica: il parametro di Shields

Per verificare se la velocità della corrente è in grado di dar luogo al movimento dei grani di sedimento si fa riferimento alla teoria di Shields. Essa è basata su tre ipotesi semplificative:

- Pendenza d'alveo nulla (fondo orizzontale $i = 0$)
- Granulometria uniforme
- Elevato rapporto tra tirante idrico e diametro del grano

Il parametro di Shields è definito come (12):

$$\theta = \frac{\rho u^{*2}}{g(\rho_s - \rho)D} = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)D} \quad (12)$$

Dove:

- θ è il parametro di Shields
- ρ_s è la densità dei grani
- ρ è la densità dell'acqua
- D è il diametro dei grani di sedimenti; la granulometria è assunta essere uniforme ($D=\text{cost}$)

Il parametro di Shields critico θ_c è definito come la soglia oltre la quale la forza della corrente è in grado di mettere in moto i grani di sedimento, per cui (13):

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{g(\rho_s - \rho)D} \quad (13)$$

Esso è funzione del numero di Reynolds, parametro per la valutazione della turbolenza del moto (14):

$$Re = \frac{u^* d}{\nu} \quad (14)$$

Dove:

- Re è il numero di Reynolds
- ν è la diffusività cinematica [m^2/s], pari al rapporto tra viscosità dinamica μ [$\text{Kg}/\text{m}\cdot\text{s}$] e densità ρ [Kg/m^3]

Shields (1936) determinò sperimentalmente la relazione tra questi due parametri e la esplicitò con una rappresentazione grafica (Figura 12):

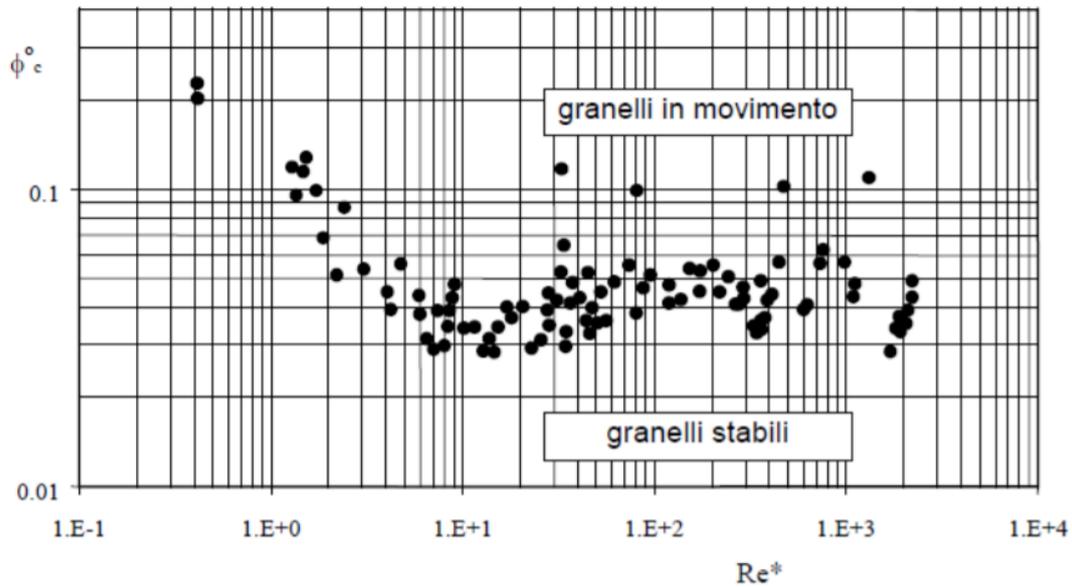


Figura 12 Abaco di Shields

Interpolando la nuvola di punti si ottiene la soglia, dove $\theta = \theta_c$, al di sopra della quale si ha l'incipiente moto dei grani di sedimento (Figura 13), dipendentemente dal numero di Reynolds del grano:

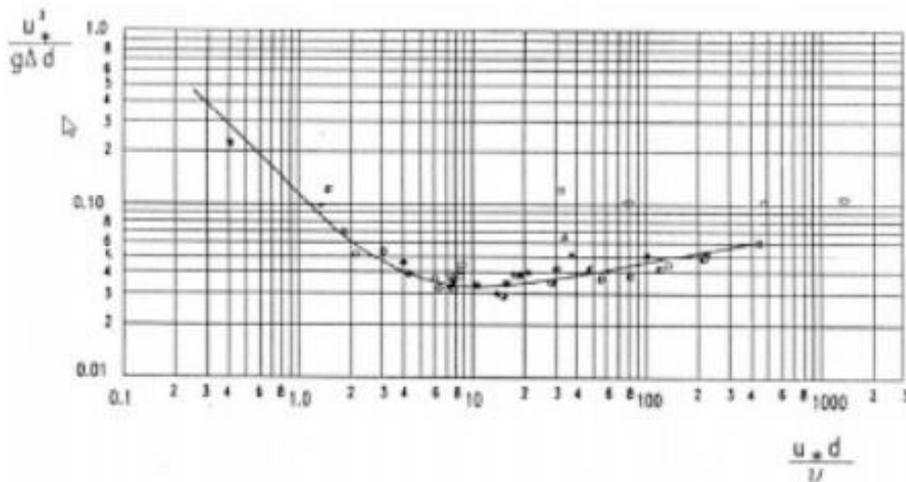


Figura 13 Abaco di Shields: soglia critica

Individuando così un primo tratto, con valori di Reynolds inferiori a 2, dove la velocità critica è fortemente dipendente da Re ; un tratto intermedio, con valori di Reynolds compresi tra 2 e 200, in cui il parametro di Shields assume il suo valore minimo (0.03 ÷ 0.04) e la condizione di mobilità è non meglio definita in relazione sia alla dimensione del grano che alla viscosità del fluido; l'ultimo tratto, con valori di Reynolds maggiori 200, è il più rappresentativo per le condizioni naturali di corsi d'acqua

dove l'effetto della turbolenza gioca un ruolo fondamentale. Generalmente per valori di $Re > 400$ si assume un valore costante del parametro di Shields pari a $\theta_c = 0.056$.

Non sempre però è facile o funzionale stimare il valore del numero di Reynolds del grano di sedimento, pertanto, generalmente per stabilire la condizione di moto incipiente dei grani si fa affidamento alla formulazione proposta da Van Rijn (1984). Combinando il parametro di Shields con il numero di Reynolds attraverso l'equazione (15) si evidenzia la dipendenza del parametro di Shields da D^* , definito come parametro adimensionale della particella.

$$D^* = \left(\frac{Re}{\theta}\right)^{\frac{1}{3}} = D_{50} \left(\frac{g(\rho_s/\rho - 1)}{v^2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

Pertanto, l'abaco di Shields, adottato da Van Rijn, risulta come segue (Figura 14):

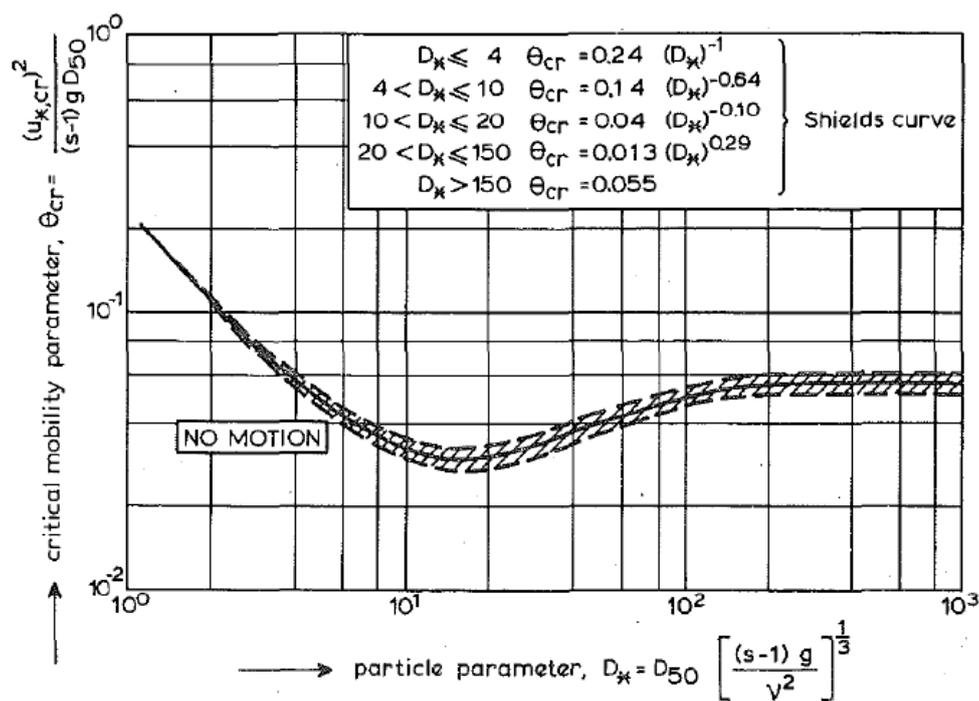


Figura 14 Abaco di Shields modificato - formulazione di Van Rijn

Analogamente all'abaco di Shields nella sua versione originale con dipendenza dal numero di Reynolds, anche in quello in relazione alla dimensione caratteristica D^* del grano viene individuata una soglia di movimento. In relazione quindi al parametro adimensionale della particella vengono individuati differenti valori critici del parametro di Shields θ_c (16):

$$\begin{aligned}
\theta_c &= 0.24 D^{*-1} \text{ per } D^* \leq 4 \\
\theta_c &= 0.14 D^{*-0.64} \text{ per } 4 < D^* \leq 10 \\
\theta_c &= 0.04 D^{*-0.1} \text{ per } 10 < D^* \leq 20 \\
\theta_c &= 0.013 D^{*0.29} \text{ per } 2 < D^* \leq 150 \\
\theta_c &= 0.055 \text{ per } D^* > 150
\end{aligned}
\tag{16}$$

2.1.3 Calcolo portata solida di fondo con formule di letteratura

Nel corso degli anni si sono susseguite diverse teorie per la stima della portata solida di fondo. A seconda delle diverse formulazioni si sono tenuti in considerazione lo sforzo tangenziale al fondo, lo sforzo tangenziale critico, la velocità media della corrente e parametri che tengano conto delle dimensioni dei grani di sedimento e del loro peso specifico, in relazione alla densità dell'acqua; spesso soggette all'influenza della pendenza del corso d'acqua e alla sommergenza dei grani. Gli autori che hanno proposto diverse teorie e formulazioni sono molteplici ma, queste ultime, possono essere riassunte in tre grandi categorie. La prima considera l'eccesso di sforzo tangenziale al fondo rispetto ad uno sforzo tangenziale critico che individua una soglia di moto incipiente per i grani di sedimento. La seconda si basa invece sull'eccesso di portata che genera il superamento di una soglia di portata critica oltre la quale, anche in questo caso, si ha il movimento del particolato di fondo. L'ultima categoria riguarda invece un approccio di tipo probabilistico che considera l'impatto del flusso turbolento della corrente sui grani di fondo.

Tra gli approcci basati sull'eccesso di sforzo tangenziale troviamo:

- Du Boys: La teoria di Du Boys (1879) fu la prima teoria razionale del trasporto solido al fondo. La teoria ipotizza che, trascinato dagli sforzi tangenziali, uno spessore più o meno profondo di particelle solide viene messo in movimento. All'aumentare della profondità gli strati di solido sono caratterizzati da velocità progressivamente decrescenti. La portata solida al fondo per unità di larghezza è quindi esprimibile come (17):

$$q_s = \Psi \tau(\tau - \tau_c) \tag{17}$$

Dove:

- Ψ è il coefficiente caratteristico del materiale [$\text{m}^6\text{kg}^{-2}\text{s}^{-1}$]

Il coefficiente caratteristico del materiale sarà espresso unicamente in funzione del peso specifico immerso del grano, se ci si riferisce alla formulazione di Schoklitsch (1914) (18) o in funzione del peso specifico dei grani che compongono il fondo mobile e del loro diametro medio, se si prende in considerazione la formulazione derivante dagli esperimenti condotti da Zeller (1963) (19). La variazione del coefficiente caratteristico del materiale in relazione al diametro medio dei grani viene mostrata in **Figura 15**.

$$\text{Schoklitsch: } \Psi = \frac{0.54}{(\gamma_s - \gamma)} \quad (18)$$

$$\text{Zeller: } \Psi = \frac{1.8143}{\gamma_s d_{50}^{0.7453}} \quad (19)$$

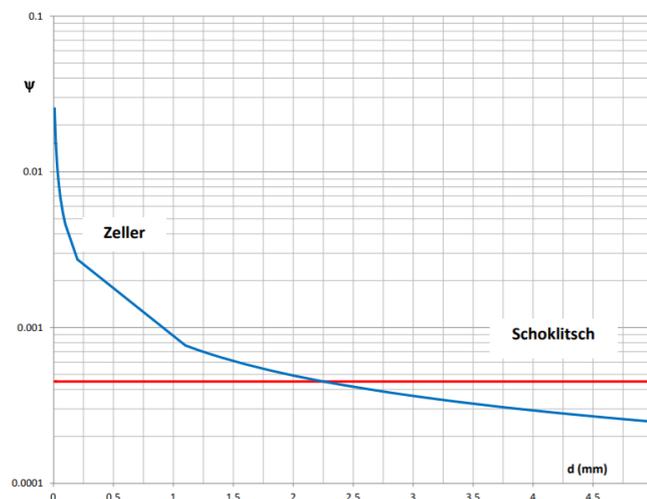


Figura 15 Coefficiente caratteristico del materiale al variare del diametro

Un'ulteriore formulazione del coefficiente caratteristico in funzione della dimensione dei grani è stata proposta da Straub (20):

$$\text{Straub: } \Psi = \frac{0.173}{d_{50}^{0.173}} \quad (20)$$

- Shields: l'equazione di Shields (1936) si presenta simile alla formulazione di Du Boys, ed anch'essa prevede la stima della portata solida di fondo a partire da un eccesso di sforzo tangenziale sul fondo τ rispetto ad un valore critico τ_c ; in particolare si ricava una portata solida adimensionale ϕ (21):

$$\phi = 10 \theta^{1.5} (\theta - \theta_c) \frac{\rho}{\rho_s} \frac{V}{u^*} \quad (21)$$

Dove:

- θ = parametro di Shields [-]
- θ_c = parametro critico di Shields [-]
- ρ = densità dell'acqua [Kg/m³]
- ρ_s = densità delle particelle solide [Kg/m³]
- $u^* = (\tau / \rho)^{1/2}$ è la velocità delle particelle [m/s]
- V = velocità media della corrente [m/s]

A partire dalle portate solide adimensionali di fondo si possono poi ricavare le portate solide di fondo per unità di larghezza, espresse quindi in m³/ms, invertendo l'equazione (22):

$$\phi = \frac{q_s}{d \sqrt{g \Delta d}} \quad (22)$$

- Meyer-Peter e Muller: La formula di Meyer-Peter e Muller (1948), di derivazione sperimentale, è stata ricavata dall'analisi sulla base di un ampio numero di prove eseguite presso il laboratorio del Politecnico di Zurigo ed è stata calibrata su sedimenti del diametro tra 0.4 e 29 mm e per pendenze inferiori del 2%. La portata solida adimensionale ϕ è quindi ottenuta come (23):

$$\phi = 8 \left(\left(\frac{k_s}{k'_s} \right) \theta - \theta_c \right)^{1.5} \quad (23)$$

Dove:

- k_s è il coefficiente di Strickler legato al sedimento
- $k'_s = 26d_{90}^{-1/6}$ è il coefficiente di Strickler globale che individua il parametro di mobilità relativo alla sola resistenza opposta dai granelli

Per pendenze molto ridotte, assimilabili a fondo piano, in via semplificativa assumendo che $k_s = k'_s$ è possibile riscrivere la portata solida di fondo adimensionale ϕ come (24):

$$\phi = 8(\theta - \theta_c)^{1.5} \quad (24)$$

con:

- $\theta_c = 0.047$
- Smart-Jaggi (1983): partendo dalla formulazione di Meyer-Peter e Muller, Smart-Jaggi hanno introdotto per la portata solida di fondo una dipendenza dal d_{30} e d_{90} dei grani e dalla pendenza media di fondo alveo i . La formula, applicabile per corsi d'acqua fino al 3% di pendenza, si presenta come segue (25):

$$\phi = 4\left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0.2} i^{0.6} \theta^{0.5} (\theta - \theta_c) \frac{V}{u^*} \quad (25)$$

- Ashida e Michiue (1972):

$$\phi = 17\theta'^{1.5} \left(1 - \frac{\theta_c}{\theta'}\right) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\theta_c}{\theta'}}\right) \quad (26)$$

Dove:

- $\theta' = \theta \frac{K_s}{K'_s}$
- Van Rijn (1982):

$$\phi = 0.053 \frac{T^{2.1}}{R^{0.2}} \quad (27)$$

Dove:

$$\circ T = \frac{\theta - \theta_c}{\theta_c}$$

- Parker (1990):

$$\phi = 0.00218\theta^{1.5}G \quad (28)$$

Dove:

$$\circ G = \left\{ \begin{array}{l} 5474 \left(1 - \frac{0.853}{\varepsilon}\right)^{4.5} \text{ per } \varepsilon \geq 1.59 \\ \exp[14.2(\varepsilon - 1) - 9.28(\varepsilon - 1)^2] \text{ per } 1 < \varepsilon < 1.59 \\ \varepsilon^{14.2} \text{ per } \varepsilon \leq 1 \end{array} \right\}$$

$$\circ \varepsilon = \frac{\theta}{\theta_c}$$

Con:

$$\theta_c = 0.0386$$

Troviamo in letteratura anche altre formule, meno note:

- Yalin (1972): la portata solida di fondo adimensionale viene espressa come (29):

$$\phi = 0.635r\sqrt{\theta} \left(1 - \ln \frac{1 + rS}{rS}\right) \quad (29)$$

Dove:

$$\circ r = \frac{\theta}{\theta_c} - 1$$

$$\circ S = 2.45 \frac{\sqrt{\theta_c}}{\left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^{0.4}}$$

- Pezzoli (1979): la portata solida di fondo per unità di larghezza è espressa come (30):

$$q_s = \frac{2}{3} d \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \left(\frac{\tau}{\rho}\right)^{1/6} \left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_c}} - 1\right)^{5/3} \quad (30)$$

Dove:

- $\tau = (\rho_s - \rho)gd\theta$
- $\tau_c = (\rho_s - \rho)gd\theta_c$
- $\theta_c = \theta_c^0 \cos i \left(1 - \frac{\tan i}{\tan \varphi}\right)$
- $\theta_c^0 = 0.06 \left(1 + 0.67 \sqrt{\frac{d}{h}}\right)$
- φ è l'angolo di attrito del materiale di fondo
- h è l'altezza del tirante idrico

- Suszka (1991):

$$q_s = 10.4 \sqrt{d^3 g \Delta \theta}^{1.5} \left(1 - \frac{\theta_c^0}{\theta}\right)^{5/2} \quad (31)$$

Dove:

- $\theta_c^0 = 0.0851 \left(\frac{h}{d}\right)^{-0.266}$

Tra gli approcci basati sull'eccesso di portata troviamo invece:

- Schoklitsch: l'equazione di Schoklitsch (1914) è basata sul superamento di una soglia di portata critica q_c , oltre la quale le particelle di fondo si mettono in moto. Essa, si presenta come (32):

$$\phi = \frac{2.5}{\Delta + 1} i^{1.5} \frac{q - q_c}{d \sqrt{g \Delta d}} \quad (32)$$

Dove la portata critica q_c per unità di larghezza è definita come (33):

$$q_c = 0.15t^{-1.12}\sqrt{gd^3} \quad (33)$$

Un approccio probabilistico volto alla stima della portata solida di fondo è presentato invece da:

Einstein (1879): l'impostazione concettuale del trasporto solido di fondo con approccio probabilistico è da attribuire ad Hans Albert Einstein. Questa teoria venne pubblicata sulla rivista *Transactions of American Society of Civil Engineers* con il nome di *Formulas for the transportation of bed load*. La teoria è basata su due osservazioni:

- Non esiste una condizione netta di inizio del moto
- Una particella si mobilita se la portanza supera il suo peso immerso, per cui occorre considerare le velocità locali e non quelle medie

Ne consegue che essendo le condizioni di moto solido strettamente legate alle fluttuazioni di velocità delle particelle è possibile ritenere che l'inizio e la fine del moto possano essere espressi in termini probabilistici.

Le ipotesi alla base di questa teoria sono:

- Le particelle si muovono su di un letto immobile di particelle dello stesso tipo
- Ogni particella si muove a salti intervallati da periodi di stasi
- Il salto medio di ogni particella è costante nonostante il variare delle condizioni idrodinamiche e/o la composizione del letto stesso e pertanto il trasporto dipende unicamente dall'intervallo medio tra due salti consecutivi
- Il sedimento di fondo è caratterizzato da un unico valore medio di diametro e di peso specifico

La portata solida adimensionale è quindi espressa come (34):

$$\Phi = \frac{1}{A^*} \frac{p_1}{1 - p_1} \quad (34)$$

Dove:

- p_1 rappresenta la probabilità di distacco del grano dal fondo ed è esprimibile come (35):

(35)

$$p_1 = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-(B^*\psi + \frac{1}{\eta_0})}^{B^*\psi - \frac{1}{\eta_0}} e^{-\varepsilon^2} d\varepsilon = \frac{A^*\phi}{1+A^*\phi}$$

Dove le costanti numeriche $A^* = 43.15$, $B^* = 0.143$ e $\eta_0 = 0.5$ sono state determinate sperimentalmente da Einstein. ψ è invece *flow intensity parameter* e corrisponde all'inverso del parametro di Shields θ , calcolato, in questa formulazione, considerando il valore della velocità di attrito u^* corrispondente alla sola resistenza del materiale granulare, esprimibile come (36):

$$u^* = \frac{V}{5.75 \log (12.29 \frac{R}{D_{65}} X_E)} \quad (36)$$

Dove X_E , approssimato, può essere espresso come (37):

$$X_E = 1 + 0.921e^{-0.127Re_{*65}^{1.275}} \ln (0.3028Re_{*65}) \quad (37)$$

In Figura 16 viene mostrato l'andamento del parametro X_E (presentato come X) in relazione al rapporto tra la scabrezza $K_S=d_{65}$ e $\delta=11.5\nu/u^*$

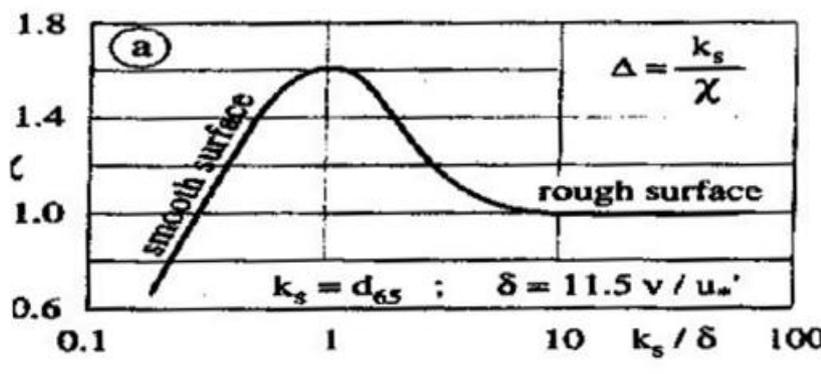


Figura 16 Andamento $X - K_S/\delta$

Per cui p_1 è esprimibile come funzione F del parametro ψ (38):

$$p_1 = A^*\theta = F(B^*\psi) \quad (38)$$

In particolare, in condizioni di bassa mobilità ($\theta < 0.4$) risulta (39):

$$0.465\phi = e^{-0.391\psi} \quad (39)$$

Mentre, in condizioni di alta mobilità (θ che tende all'infinito) risulta (40):

$$\phi = \frac{7.84}{\psi} \quad (40)$$

In Figura 17 viene mostrato visivamente l'andamento e la relazione tra ϕ e il *flow intensity parameter* descritto dall'equazione di Einstein:

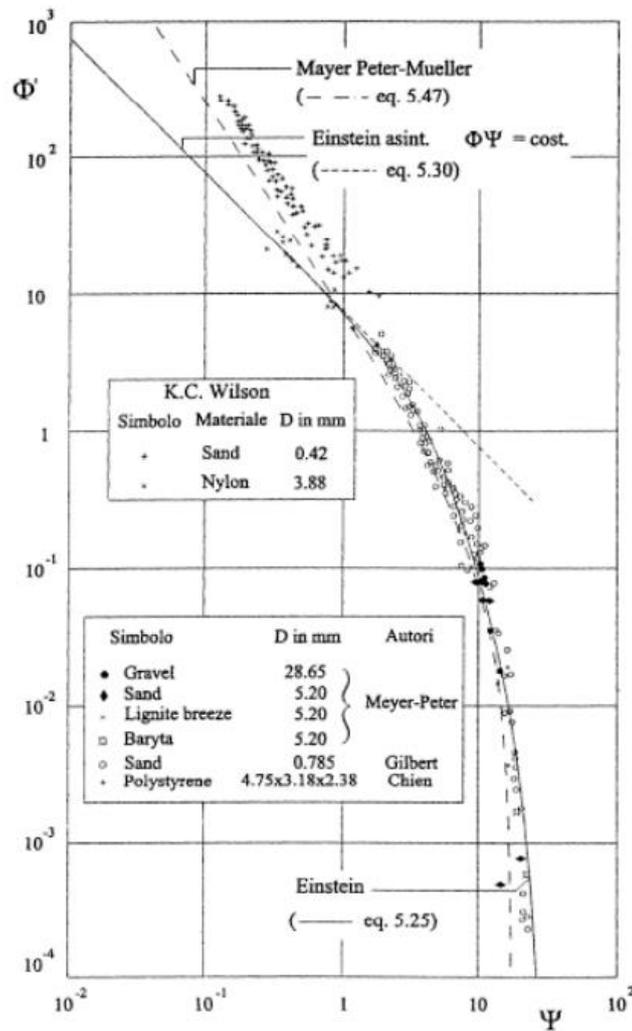


Figura 17 Andamento ϕ - flow intensity parameter

2.2 Approccio globale

Adottando invece un approccio di tipo globale, si calcola la portata solida al fondo a partire dai dati di velocità media e raggio idraulico della sezione fluviale nonché dal diametro caratteristico del sedimento rappresentante la scabrezza di Nikuradse. L'equazione utilizzata in questo elaborato di tesi è la seguente (Armanini, p.5):

$$u^* = \frac{V}{\frac{1}{k} \ln \frac{R}{e_s} + 5.77} \quad (41)$$

Ottenuta la velocità d'attrito, per fondo scabro, caratterizzante la sezione fluviale si procede alla stima della portata solida al fondo analogamente a quanto già descritto precedentemente per l'ADCP, servendosi quindi delle formule note in letteratura.

3 Stima della portata solida al fondo: metodo diretto con ADCP

I metodi diretti fanno invece riferimento sia alla funzione di Bottom Tracking dell'ADCP, grazie alla quale è possibile ricavare la velocità di spostamento del sedimento sul fondo, utilizzata poi, in combinazione con lo spessore dello strato attivo, per ricavare la portata solida, sia all'utilizzo del campionatore di fondo di Helley-Smith.

Il *metodo diretto* con l'utilizzo dell'ADCP permette di stimare la portata solida al fondo partendo dalla misura della velocità del fondo stesso. Ottenuta la velocità delle particelle di fondo, e noto lo spessore dello strato mobile, si può ricavare la portata solida di fondo per ogni transetto (42):

$$q_s = \delta_b \cdot V_b \quad (42)$$

Dove:

- V_b è la velocità dello strato attivo
- δ_b è lo spessore dello strato attivo

A seguire vengono mostrati sia la procedura per la misura della velocità del fondo, che i modelli proposti da Van Rijn e Du Boys per il calcolo dello spessore dello strato attivo.

3.1 Misura della velocità del fondo: Loop Method

La stima della portata solida al fondo con l'impiego dell'ADCP effettuando il *Loop Method* si basa su una procedura elaborata dall'Istituto Geologico degli Stati Uniti (USGS) per la correzione della portata liquida restituita dall'Acoustic Doppler Current Profiler, in condizioni di fondo mobile, quando la strumentazione non è dotata di tecnologia GPS. Facendo riferimento all' "Application of the Loop Method for Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements Biased by Sediment Transport" redatto appunto dall'USGS, in collaborazione con Environment Canada, il Loop Method è basato sul fatto che l'ADCP, in movimento lungo la sezione fluviale, restituisce un tracciato, con riferimento Bottom Tracking, dell'HydroBoard, distorto verso monte a causa del movimento del fondo fluviale. Pertanto, se si eseguono con l'ADCP due transetti consecutivi, lungo la sezione fluviale, in modo tale da, effettuando per l'appunto un loop, ritornare nell'esatto punto di partenza, in caso di trasporto solido di fondo, il tracciato restituito dall'ADCP, Bottom Tracking riferito, risulterà più a

monte nel transetto di ritorno rispetto a quello di andata e la posizione ultima del tracciato non coinciderà con quella iniziale, ma sarà invece traslata verso monte di una quantità proporzionale al trasporto solido di fondo in atto al momento della misurazione (Figura 18).

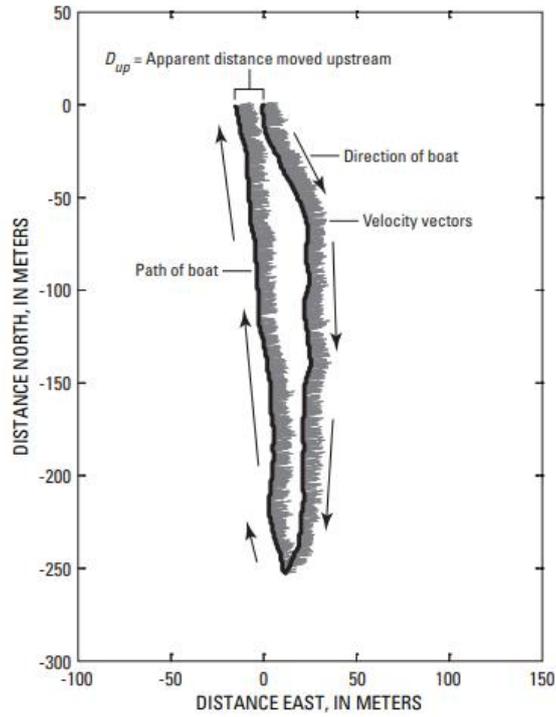


Figura 18 Esempio di tracciato distorto in un Loop, causato da fondo mobile

Dal momento che l'ADCP si è apparentemente spostato verso monte, la velocità della corrente misurata sarà sottostimata e conseguentemente anche la portata liquida. Se la velocità del fondo mobile viene determinata, la portata liquida mancante, frutto dell'errore dovuto al fondo mobile, può essere quindi calcolata e aggiunta in modo tale da correggere la misura.

Anche dal punto di vista del calcolo della portata solida al fondo il Loop Method risulta interessante; La velocità media con cui si muove il fondo mobile V_b , infatti, può essere ricavata come rapporto tra la distanza di traslazione apparente verso monte D_{up} e il tempo t impiegato per eseguire il loop (43).

$$V_b = \frac{D_{up}}{t} \quad (43)$$

Ottenuta la velocità media dei grani di fondo è possibile procedere al calcolo della portata solida.

Anche Il Loop Method non è comunque una procedura priva di potenziali errori; l'USGS considera infatti questo metodo valido unicamente se il fondo mobile è la causa dominante dell'errore nella mancata chiusura del Loop. Le fonti di errore più comuni associati a questa procedura sono:

- Errori sistemici della bussola della strumentazione
- Errori e incertezze derivanti dalla funzione Bottom Tracking
- Imprecisioni nel ritorno al punto di partenza
- Irregolari o insufficienti campionature della sezione trasversale del corso d'acqua a causa della perdita del tracciamento di fondo per velocità non uniforme dell'HydroBoard o ancora per errori durante l'avvicinamento alle sponde

L'influenza e l'impatto che tali errori hanno sulla misura devono essere tenuti in considerazione nell'approcciarsi al Loop Method. In letteratura, essi sono stati osservati e misurati analiticamente e praticamente in misure su campo e in varie condizioni.

L'errore più comune commesso nell'applicazione del Loop Method è quello di ignorare l'effetto che la bussola ha sulla mancata chiusura del loop. Un errore derivante dalla bussola interna dell'ADCP può essere causato dalla distorsione del campo magnetico dovuta ad oggetti vicini all'HydroBoard o allo spostamento della bussola al di fuori del piano orizzontale. L'ampiezza della distorsione dipende dalla forma, materiale e distanza dell'oggetto in riferimento alla bussola. Gli oggetti che provocano distorsioni nel campo magnetico sono generalmente classificati come "hard iron" e "soft iron". I primi, sono magneti permanenti, ferro e acciaio magnetizzati, e conduttori elettrici. Alla seconda categoria appartengono invece quei materiali che, se posti in un campo magnetico possono diventare magnetici, ma, a differenza degli "hard iron", quando vengono rimossi perdono questa capacità (National Geospatial-Intelligence Agency, 2004). Per l'utilizzo dell'ADCP, pertanto, è necessario prestare attenzione ai materiali e agli oggetti nelle prossimità, come possono essere gli elementi stessi della strumentazione necessaria o strutture in prossimità di essa come, ad esempio, le pile dei ponti, in fase di calibrazione della bussola.

Imprecisioni nel tornare all'esatto punto di partenza possono occorrere nel caso di misure effettuate in corsi d'acqua in cui la vegetazione ripariale è particolarmente fitta o la corrente forte, condizioni in cui manovrare la strumentazione diviene un'operazione di non facile esecuzione. Inoltre, anche lo stazionamento eccessivo nelle zone arginali, dovuto ad ostacoli sommersi e non, porta ad un errore nella misura della velocità dei sedimenti di fondo.

Rennie and Millar (2002) hanno condotto studi che hanno portato a dimostrare come la non uniformità nella velocità dell'HydroBoard, durante l'esecuzione del loop, porti ad un ineguale peso, dei diversi tratti della sezione, nel computo della velocità media del fondo mobile. È pertanto considerato errato compiere brusche accelerazioni o decelerazioni. L'USGS raccomanda che la

velocità della barca deve essere stabilita in modo tale da richiedere almeno tre minuti per completare il loop e comunque inferiore a 1.5 volte la velocità media della corrente (Mueller, D.S., and Wagner, C.R., 2006).

Nel caso specifico, per poter confrontare i risultati ottenuti con ADCP, con quelli ottenuti con il campionario di Helley-Smith, si è deciso di eseguire delle misurazioni con battellino fisso, facendo di fatto coincidere il loop con un singolo punto fisso.

3.2 Stima dello spessore significativo del trasporto secondo Van Rijn

$$q_s = \delta_b(1 - \lambda)V_b \quad (44)$$

Dove:

- δ_b è lo spessore dello strato attivo
- λ è la porosità dello strato attivo
- $(1 - \lambda) = C_b$ è la concentrazione dello strato attivo
- V_b è la velocità dello strato attivo superiore

Per la determinazione della concentrazione del layer attivo, Van Rijn propose una sua definizione di concentrazione di riferimento C_a , in base al discostamento di una quantità a del livello di riferimento rispetto al livello medio di fondo alveo, come mostrato in Figura 19 :

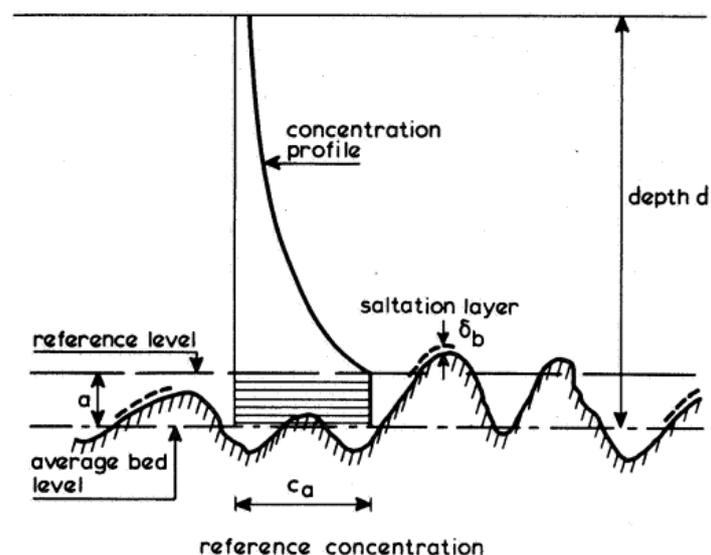


Figura 19 Schema della concentrazione di riferimento: Teoria di Van Rijn

L'equazione descrivente è la seguente (45):

$$C_a = \frac{0.035 D_{50}}{\alpha_2} \frac{T^{1.5}}{a D_*^{0.3}} \quad (45)$$

Dove:

- $\alpha_2 = 2.3$ è il coefficiente di saltazione determinato dalla combinazione di profili di concentrazione sia misurati che calcolati in diverse condizioni di flusso.
- a , il livello di riferimento, in mancanza di una conoscenza accurata della forma del letto fluviale, è assunto essere uguale alla scabrezza equivalente di Nikuradse.
- T è definito come *transport-stage parameter*.

Il *transport-stage parameter* T , definito in relazione alla velocità di attrito rispetto al grano $u^{*'}$ e alla sua velocità di attrito critica u_c^* , è individuato come segue (46):

$$T = \frac{u^{*'}^2 - u_c^{*2}}{u_c^{*2}} \quad (46)$$

Dove:

$$u^{*'} = \frac{V}{5.75 \log\left(\frac{12 R}{3 D_{90}}\right)} \quad (47)$$

In base alle analisi condotte e ai risultati ottenuti, Van Rijn propone la seguente formulazione (48), che con buona approssimazione esprime la concentrazione dello strato attivo di fondo:

$$\frac{C_b}{C_0} = 0.18 \frac{T}{D_*} \quad (48)$$

Con:

- $C_0 = 0.65$ è la concentrazione massima

Sempre in riferimento a Van Rijn lo spessore dello strato attivo può essere espresso come (49):

$$\delta_b = 0.3 D D_*^{0.7} T^{0.5} \quad (49)$$

3.3 Stima dello spessore significativo del trasporto secondo Du Boys

Alternativamente, si può calcolare lo spessore del layer attivo e la relativa portata solida al fondo facendo riferimento alla teoria di Du Boys. Essa si basa sull'ipotesi che il trasporto al fondo avvenga per strati sovrapposti di spessore d , uguali tra loro, che si muovono per effetto dello sforzo tangenziale τ_0 esercitato dalla corrente del corso d'acqua sul fondo. In letteratura il numero di strati n costituenti lo strato attivo è generalmente compreso tra 2 e 10. Il primo strato mette in moto lo strato successivo attraverso uno sforzo di attrito che è proporzionale al peso dello strato (Figura 20).

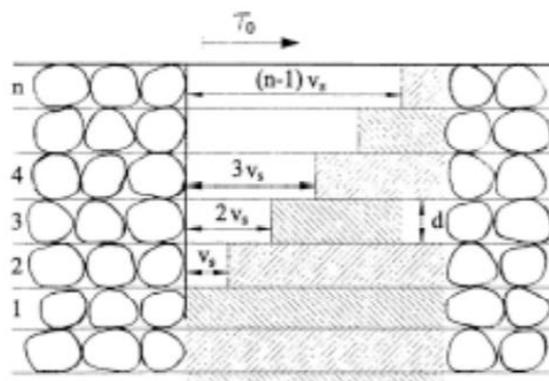


Figura 20 Trasporto solido di fondo: teoria di Du Boys

Poiché negli strati successivi il peso del materiale sovrastante cresce, aumenta anche lo sforzo di attrito tra strato e strato e di conseguenza diminuisce la velocità di spostamento degli strati sottostanti. L'ipotesi alla base di questa teoria è che la velocità degli strati diminuisca linearmente fino ad annullarsi quando lo sforzo tra gli strati raggiunge la condizione di soglia τ_c ; tale soglia individua la separazione tra stato attivo sovrastante e fondo immobile sottostante.

Per cui risulta che lo sforzo tangenziale in corrispondenza dello strato immobile τ_c (50) e lo sforzo tangenziale in corrispondenza della superficie di fondo alveo τ_0 (51) siano esprimibili come segue:

$$\tau_c = f(\gamma_s - \gamma)d_{50} \quad (50)$$

$$\tau_0 = \gamma R i = f(\gamma_s - \gamma) n d_{50} \quad (51)$$

Dove f è il coefficiente d'attrito.

Ne deriva (52):

$$n = \frac{\tau_0}{\tau_c} \quad (52)$$

Pertanto, lo spessore dello strato attivo è (53):

$$\delta_b = nd_{50} \quad (53)$$

E la portata solida con formulazione di Du Boys risulta (54):

$$q_s = \frac{1}{2} * V_m * \delta_b \quad (54)$$

4 Stima della misura solida al fondo: metodo diretto

Campionatore Helley-Smith

Il campionatore di Helley-Smith, come ogni campionatore di sedimenti di fondo, permette la cattura del carico di fondo di un corso d'acqua, rientrando quindi a pieno titolo nella categoria dei metodi diretti per la stima della portata solida al fondo. Esso permette di catturare non solo il sedimento che rotola o che si sposta per traslazione lungo il letto fluviale, ma anche le particelle che vengono trasportate per saltazione, e che quindi per alcuni tratti, non troppo lunghi, perdono il contatto con il fondo. È comunque necessario, nella stima della portata solida di fondo della sezione in esame, tenere in considerazione, così come per l'utilizzo dell'ADCP in condizione fissa, la posizione o le posizioni in cui viene posto il campionatore. La distribuzione dei sedimenti in un corso d'acqua naturale è difatti altamente variabile lungo la sezione trasversale, da una sponda all'altra. Pertanto, è opportuno eseguire diverse campionature mirate che permettano di cogliere la variabilità morfologia dell'alveo e/o la presenza di eventuali ostacoli che possano contribuire ad una notevole riduzione o ad una totale assenza di trasporto solido nei relativi tratti della sezione. Altro aspetto da non trascurare è la dimensione dei grani di sedimento disponibili. Se la curva granulometrica della sezione fluviale di riferimento individua diametri minori o uguali alla spaziatura della trama della sacca di campionatura è opportuno tenere presente che il volume relativo a questa parte di sedimento non verrà raccolto dalla strumentazione.

Raccolti quindi i campioni di sedimento, si passa al processo di essiccazione, che avviene in forno per una durata di 24 ore alla temperatura di 95°C, fino all'ottenimento di una massa corrispondente al peso secco del sedimento raccolto.

Dai campioni raccolti è inoltre possibile, una volta eseguita la setacciatura con diversi diametri filtranti, ricavare la curva granulometrica del sedimento presente e i relativi diametri caratteristici.

5 Caso studio: inquadramento e acquisizione dati

Le due campagne di misura per la redazione di questo elaborato di tesi si svolse in due diverse sezioni fluviali: sul fiume Po in località Boretto e sul fiume Piave in località Ponte di Piave. Le caratteristiche dei due siti vengono descritte a seguire, con un veloce inquadramento geografico e mostrando la scala delle portate, il diametro caratteristico dei sedimenti e la pendenza media dei tratti in analisi, così come le modalità di acquisizione dei dati.

5.1 Boretto

Il sito di Boretto (Figura 21 e Figura 22) è posto in corrispondenza del ponte Viadana-Boretto, paesi rispettivamente posti in prossimità della sponda lombarda ed emiliana del fiume Po, messi in comunicazione dalle strade statali SP358-SP111. La distanza dalla foce nel mare Adriatico è pari a circa 216 Km. L'area totale del bacino idrografico del fiume Po è di 71000 km², mentre quella alla sezione di chiusura del ponte Viadana-Boretto corrisponde a 55183 km².

Lo zero idrometrico più vicino al sito in esame si trova circa 2 km a valle della sezione del ponte, in comune di Boretto in località "Cantiere Navale ARNI (Azienda Regionale per la Navigazione Interna)", ad un'altitudine di 19.9 m.s.l.m.



Figura 21 Immagine satellitare del sito di Boretto: ponte stradale Viadana - Boretto



Figura 22 Ponte stradale Viadana - Boretto

La scala numerica delle portate nella sezione di Boretto viene mostrata in Tabella 1 e rappresentata visivamente in Figura 23.

Altezza idrometrica [m]	Portata [m ³ /s]	Altezza idrometrica [m]	Portata [m ³ /s]	Altezza idrometrica [m]	Portata [m ³ /s]	Altezza idrometrica [m]	Portata [m ³ /s]
-3.4	407	-2.9	523	-1.7	854	1.1	1860
-3.35	417	-2.8	549	-1.5	913	1.9	2210
-3.3	427	-2.7	575	-1.3	973	2.7	2760
-3.25	438	-2.6	602	-0.9	1100	3.5	3370
-3.2	450	-2.5	629	-0.5	1240	4.3	4190
-3.15	462	-2.3	683	-0.1	1380	5.1	5010
-3.1	473	-2.1	739	0.3	1540	5.43	5370
-3	498	-1.9	796	0.7	1700		

Tabella 1 Scala numerica delle portate per la sezione di Boretto

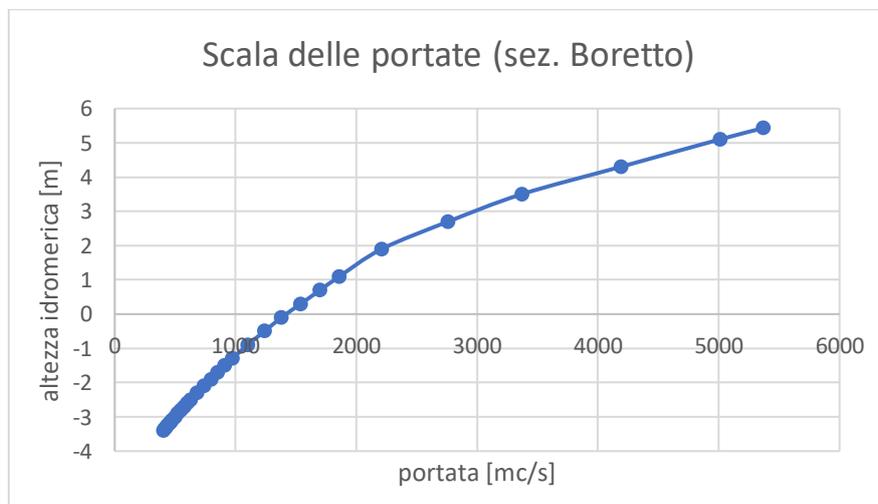


Figura 23 Scala delle portate per la sezione di Boretto

Facendo riferimento a quanto riportato nell'annale idrologico del 2020 di ARPA Emilia-Romagna (ARPAE Agenzia Prevenzione Ambiente Energia Emilia-Romagna) si riportano le durate delle portate (Tabella 2) in particolare per l'anno 2020 e per il periodo compreso tra gli anni 1943 e 2017.

Durata delle portate		
Giorni	Portata [m ³ /s] Anno 2020	Portata [m ³ /s] Anni 1943 - 2017
10	2580	3630
30	1930	2410
60	1450	1810
91	1210	1460
135	1040	1150
182	898	933
274	758	655
355	464	379

Tabella 2 Durata delle portate per la sezione di Boretto

La curva granulometrica in Figura 24, fornita da AIPO, per la sezione di Boretto facente parte del tratto 3, individua un $d_{50} = 0.39 \text{ mm}$.

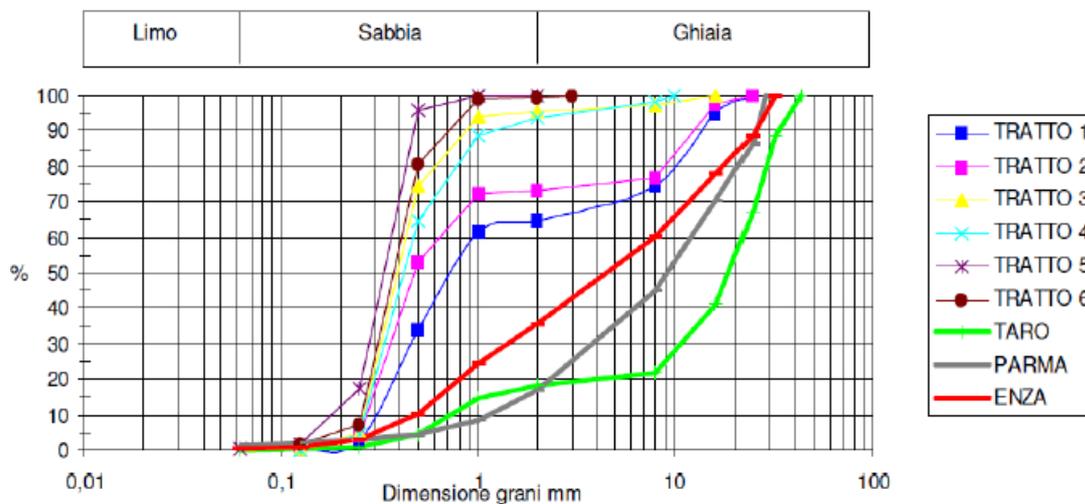


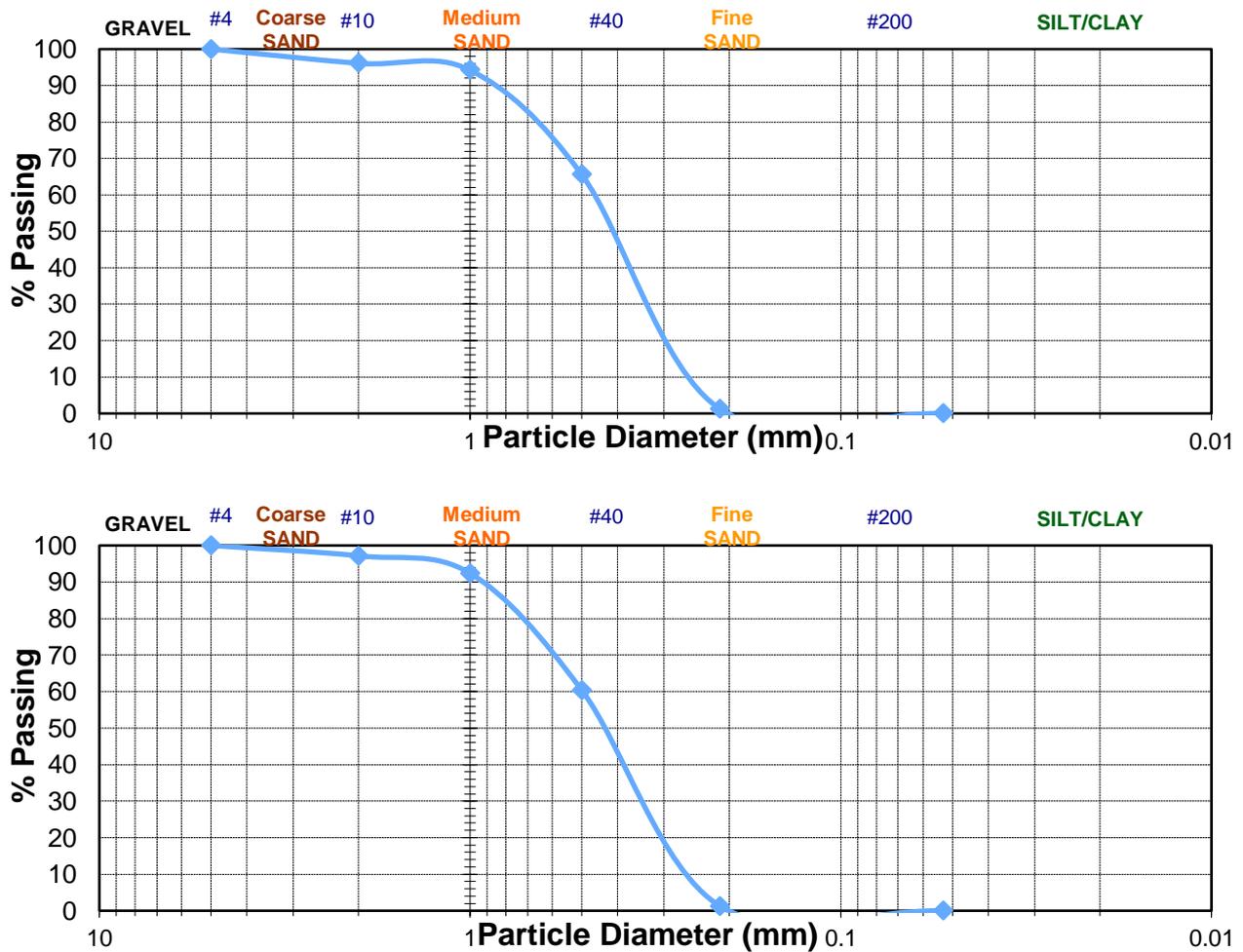
Figura 24 Curva granulometrica per la sezione di Boretto

La pendenza media dell'alveo nel tratto 3 è invece pari a 0.18‰.

La campagna di misurazione per la stima della portata solida di fondo è stata compiuta in data 17/03/2022 gestendo l'ADCP dal ponte (Viadana-Boretto) che ha permesso di compiere le procedure in maniera comoda e sicura. Ai dati raccolti con l'Acoustic Doppler Current Profiler si sono affiancati quelli ottenuti con il campionatore di fondo.

I campioni di sedimento raccolti con il campionatore di fondo sono stati portati in laboratorio al fine di, oltre chiaramente a confrontare i risultati di trasporto solido di fondo ottenuto con le due

differenti strumentazioni, anche a ricostruire una curva granulometrica che potesse verificare o comunque aggiornare la curva granulometrica presentata sopra. Le curve granulometriche ottenute a partire da quattro differenti campionature, eseguite nella giornata delle misure a Boretto, vengono mostrate in Figura 25. Viene evidenziato un d_{50} medio di 0.43 mm; valore leggermente superiore rispetto alla curva granulometrica precedente.



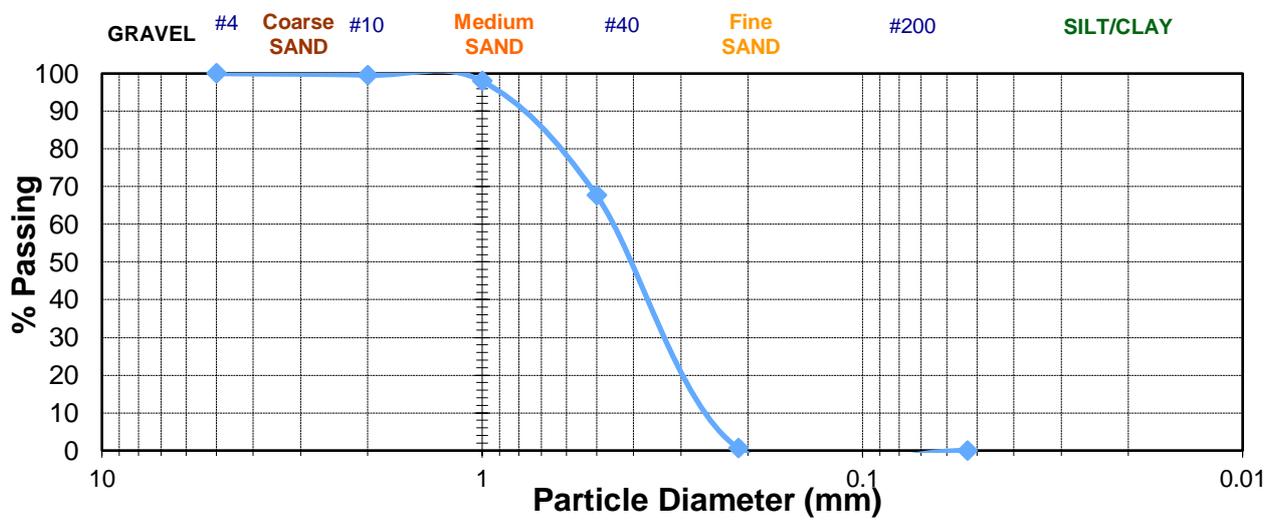
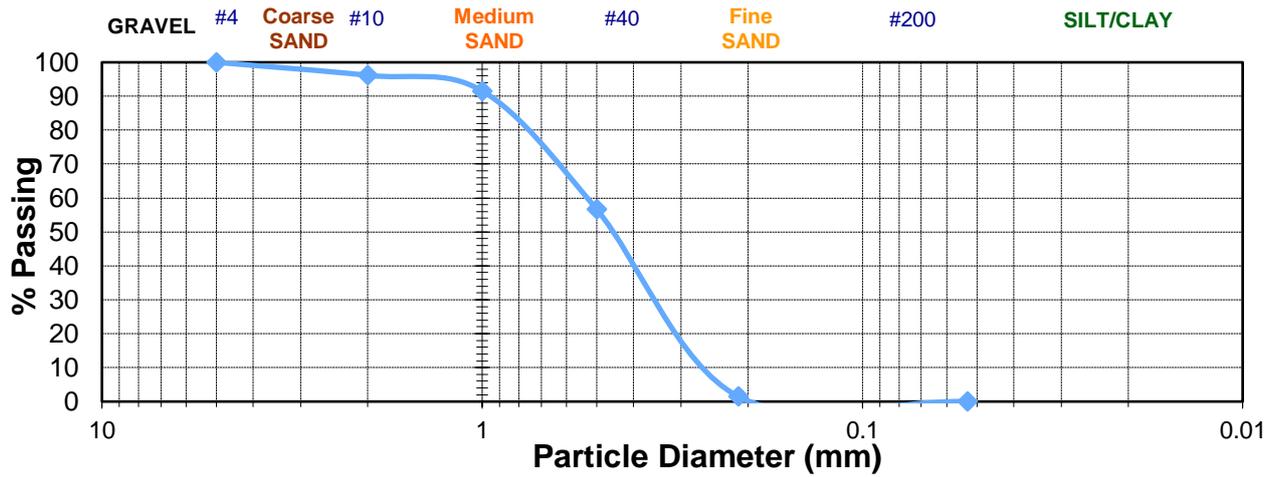


Figura 25 Curve granulometriche per la sezione di Boretto, ricavate dai campioni di sedimento raccolto

5.2 Ponte di Piave

Il sito di Ponte di Piave (Figura 26) è posto in corrispondenza di due attraversamenti, il ponte ferroviario della linea Treviso – Portogruaro e il ponte della strada statale SR53. La distanza dalla foce nel mare Adriatico è pari a circa 40 Km. L'area totale del bacino idrografico del fiume Piave è di 4127 km², mentre quella alla sezione di chiusura di Ponte di Piave corrisponde a 3553 km². Lo zero idrometrico, in corrispondenza del ponte stradale della SR53, è posto a 2.42 m.s.l.m. identificato da un'asta idrometrica di ARPA Veneto.



Figura 26 Sito di Ponte di Piave

La scala numerica delle portate nella sezione di Ponte di Piave viene mostrata in Tabella 3 e rappresentata visivamente in Figura 27 .

Altezza idrometrica [m]	Portata [m ³ /s]	Altezza idrometrica [m]	Portata [m ³ /s]	Altezza idrometrica [m]	Portata [m ³ /s]
0.35	2.92	1.25	141	3.5	480
0.45	9.67	1.5	179	4	554
0.55	20.1	1.75	217	4.5	650
0.65	34.1	2	255	5	745
0.75	51.7	2.25	294	5.5	838
0.85	72.7	2.5	331	6	928
0.95	94.7	2.75	369	6.5	1044
1	102	3	406	7	1161

Tabella 3 Scala numerica delle portate per la sezione di Ponte di Piave

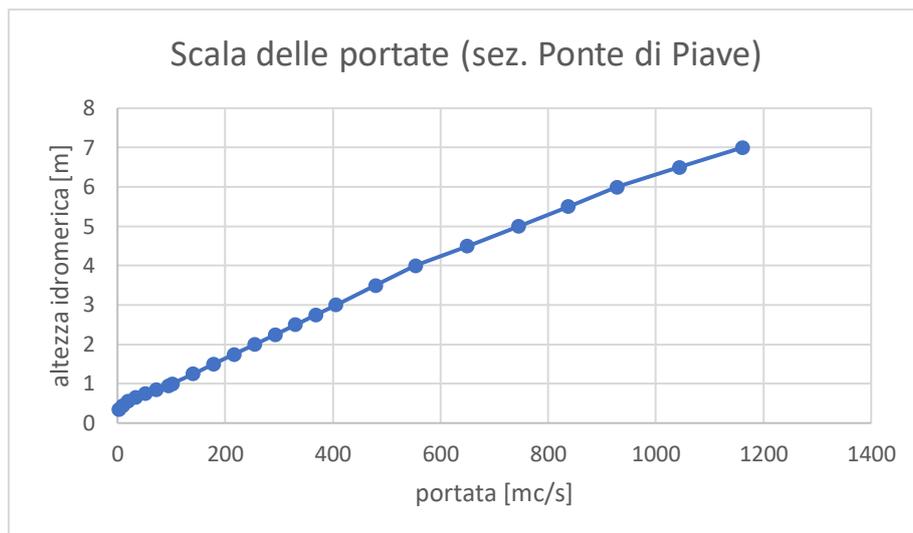


Figura 27 Scala delle portate per la sezione di Ponte di Piave

Facendo riferimento alla relazione idrologica condotta da ARPA Veneto per il decennio 2008-2017 si riportano le durate delle portate (Tabella 4) in particolare per gli anni 2008, 2012, 2015, 2016 e 2017:

Durata delle portate					
Giorni	Portata [m ³ /s] Anno 2008	Portata [m ³ /s] Anno 2012	Portata [m ³ /s] Anno 2015	Portata [m ³ /s] Anno 2016	Portata [m ³ /s] Anno 2017
10	330	318	123	133	101
30	168	147	54	92	44.9
60	111	81.4	33.3	63.8	31
91	66.5	52.4	25.4	45.3	25
135	38.8	35.5	19.9	31	17.1
182	18.4	13.6	14.2	17.6	12.2
274	9.42	5.72	4.6	6.26	3.58
355	4.33	3.17	2.13	2.05	2.05

Tabella 4 Durata delle portate per la sezione di Ponte di Piave

Per quanto riguarda la granulometria del sedimento caratteristico del tronco fluviale in analisi non esiste in letteratura una curva granulometrica ufficiale; pertanto, per la ricerca del diametro medio si è fatto riferimento alle distribuzioni cumulate della dimensione del particolato, ottenute dal Prof. Marco Mancini, Prof. Giovanni Ravazzani, Ing. Mouna Feki, Ing. Lisdey Veronica Herrera Gòmez (in collaborazione con Distretto delle Alpi Orientali) a partire da campionamenti effettuati nell'area di analisi. Vengono mostrate le curve granulometriche ottenute (Figura 28).

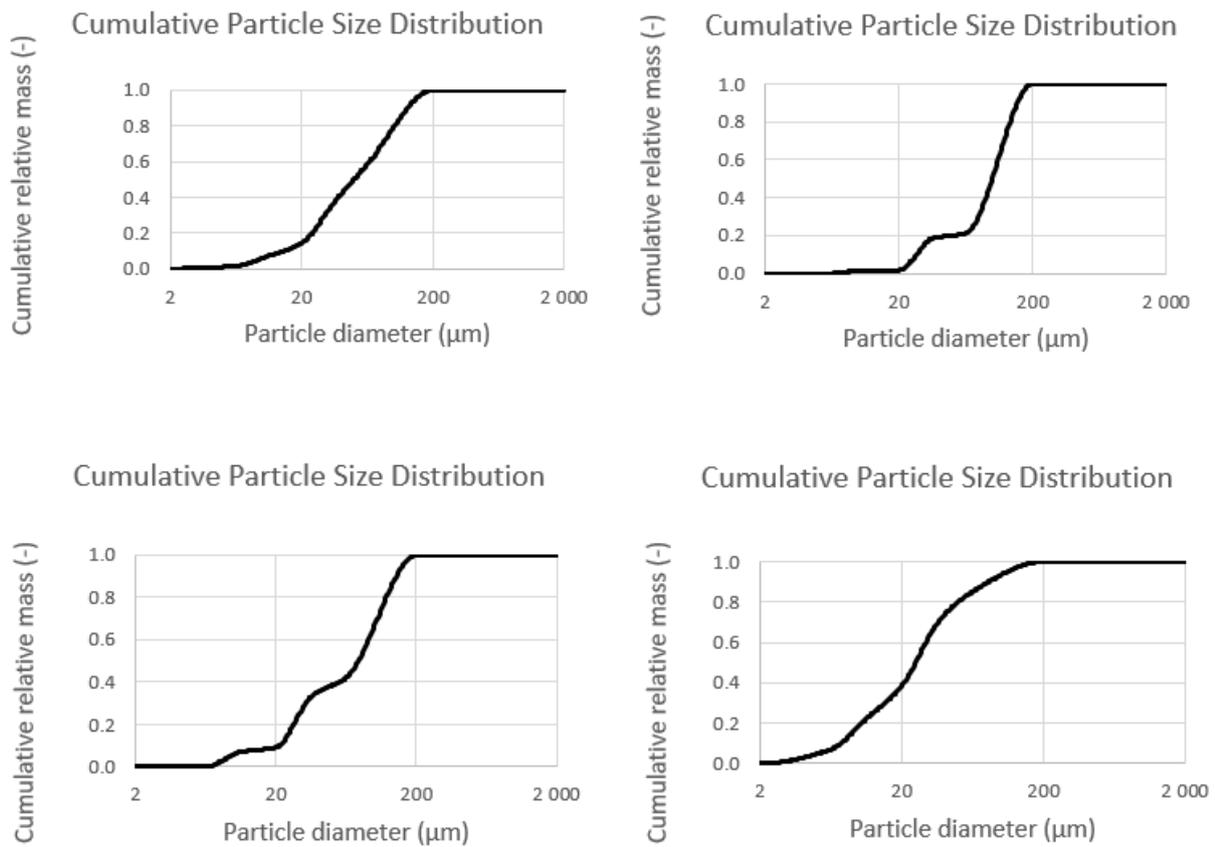


Figura 28 Curve granulometriche per la sezione di Ponte di Piave

Viene inoltre riportata, in Figura 29 , la classificazione del materiale del sedimento derivante dalle quattro campionature, in relazione al sistema di classificazione unificato del suolo (USCS), adottato dagli Stati Uniti (US Soil Taxonomy).

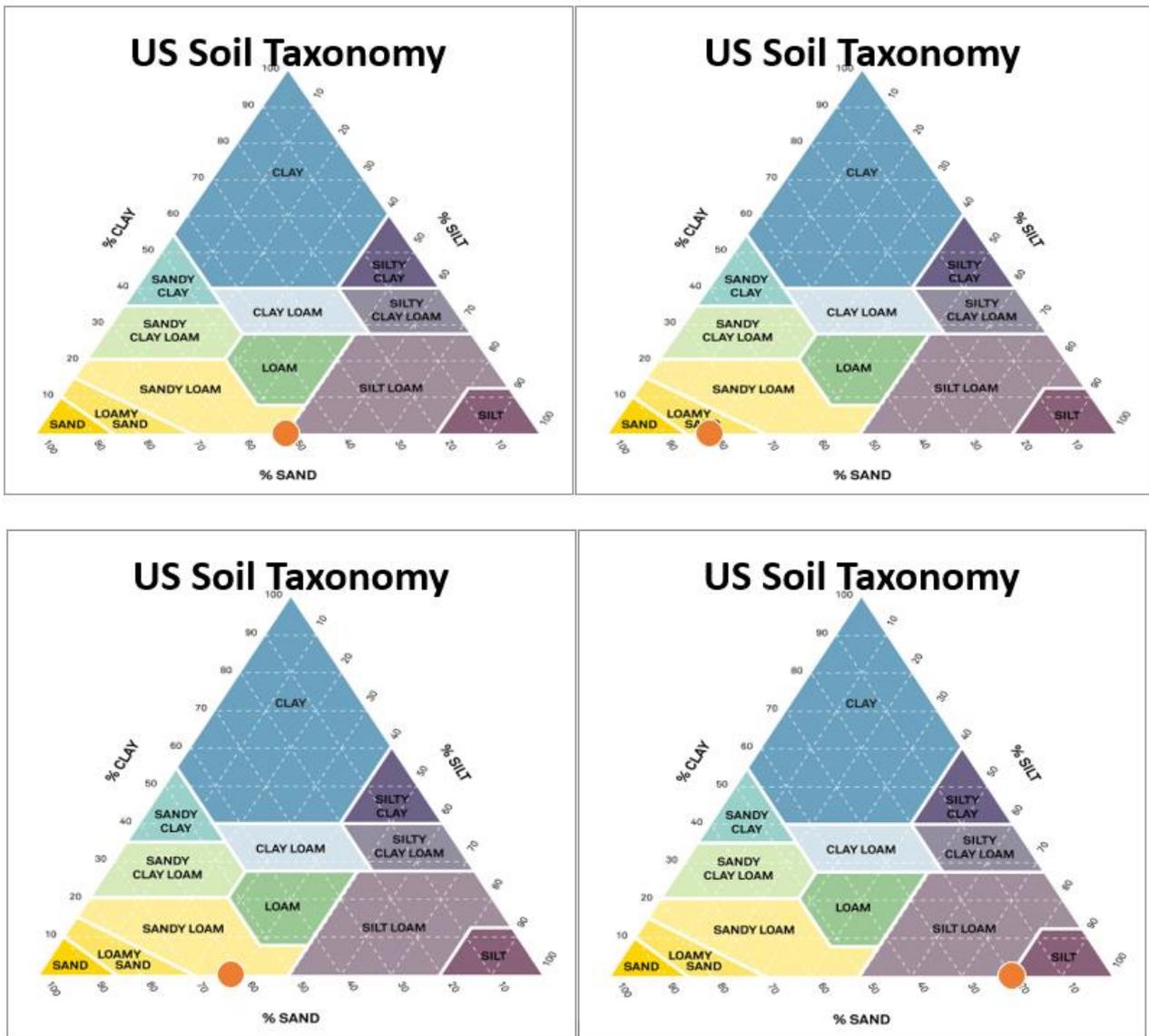


Figura 29 Classificazione del materiale di sedimento per la sezione di Ponte di Piave

In base ai dati a disposizione, si evince come il sedimento di fondo sia in prevalenza composto di sabbia e limo, in percentuali variabili (entrambi oscillano tra il 20% e l'80%). Si attesta inoltre una quasi totale assenza di materiale argilloso. Facendo quindi riferimento alle curve granulometriche a disposizione, per questo elaborato di tesi, il diametro medio dei grani del sedimento di fondo per il tronco fluviale in prossimità di Ponte di Piave è pari a $d_{50} = 0.063$ mm. Per la misura della pendenza media i di alveo del tronco fluviale si è assunto, in maniera semplificativa, che questa sia analoga alla cadente piezometrica J . Si è quindi calcolata la pendenza come rapporto tra la differenza delle altitudini della superficie libera nella sezione individuata lungo

un transetto di misura e quella nella sezione dell'idrometro di Ponte di Piave, e la distanza che intercorre tra le due sezioni:

$$i = \frac{\textit{Altitudine}_{\textit{Sez.1Pdp}} - \textit{Altitudine}_{\textit{Sez.idrometro Pdp}}}{\textit{distanza tra le sezioni}} \quad (55)$$

L'altitudine della superficie libera del transetto è stata individuata sottraendo alla quota ellissoidica (ottenuta elaborando i dati forniti dal GPS) l'ondulazione del geoide EGM96 e 0.4 m, distanza che intercorre tra l'antenna GPS e la superficie del corso d'acqua. Il modello geopotenziale della superficie terrestre del 1996 (EGM96) non è però il geoide a cui fa riferimento il GPS della strumentazione utilizzata, che invece è ITALGEO, ma che, a differenza del primo, non è open source. L'altitudine della superficie libera della sezione di valle (sez. idrometro PdP) è invece ottenuta sommando all'altitudine dello zero idrometrico della sezione il livello idrometrico corrispondente alla data in cui si sono eseguite le misurazioni, facendo riferimento ai dati forniti da ARPA Veneto. I risultati inerenti alla pendenza del tronco fluviale così ottenuti sono stati però incoerenti. Ciò è dovuto alla differenza tra i due geoidi di riferimento, come sopra descritto, oltre che alla poca accuratezza dei dati rilevati da GPS, se paragonata alla poca differenza di altitudini dovuta alla relativa poca distanza (circa 650 m) tra le sezioni; il tronco fluviale in analisi è difatti in territorio estremamente pianeggiante, caratterizzato da pendenze ridotte al minimo. Il valore adottato nell'elaborato di tesi fa dunque riferimento alla pendenza media ricavata invece valutando le differenze di quota tra i livelli idrometrici a monte (Sez. di Nervesa della Battaglia) e a valle (Sez. San Donà di Piave) della sezione di Ponte di Piave, in linea con i risultati ottenuti in precedenza in collaborazione con il Distretto delle Alpi Orientali. Il valore medio di pendenza corrisponde quindi a $i=0.053\%$.

La campagna di misurazione per la stima della portata solida di fondo è stata effettuata in data 01/02/2022 nel tronco fluviale (Figura 30) che va dalla sezione di Ponte di Piave a circa 700 metri a monte di esso.



Figura 30 Immagine satellitare sito di Ponte di Piave

Nello specifico, per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato l'Acoustic Doppler Current Profiler River Surveyor versione M9 montato su uno scafo "HydroBoard" V7. Lo strumento è stato utilizzato in modalità SmartPulseHD™ per cui il software RiverSurveyorLive, che riceve in tempo reale i dati acquisiti e trasmessi da un'antenna collegata all'ADCP, adatta automaticamente i parametri di misura, quali frequenza, la dimensione delle celle e il tipo di processing del segnale, scegliendo autonomamente quelli più indicati per il sito in esame, in base a profondità e velocità della corrente, come descritto dettagliatamente nel capitolo inerente al funzionamento dell'ADCP. La strumentazione è corredata inoltre di un'antenna GPS in grado di fornire i dati sulla posizione.

Prima di eseguire le misurazioni è stata effettuata la calibrazione della strumentazione: la *Compass Calibration* permette difatti di calibrare la bussola interna dell'ADCP. Questa procedura permette di evitare errori derivanti dalle potenziali interferenze magnetiche localizzate in prossimità dello strumento. Questa si esegue attraverso due rotazioni complete, una oraria e l'altra antioraria, dello strumento attorno al suo asse, compiendo manovre che permettano di variare il beccheggio e il rollio. La chiave per svolgere una corretta calibrazione (Instructions on the compass calibration procedure for SonTek's RiverSurveyor S5 and M9 systems) si basa sulla riproduzione di angoli di beccheggio e rollio simili a quelli che ci si aspetta vengano disegnati dall'HydroBoard sulla quale è montato L'ADCP durante la raccolta dei dati. Data la scarsa portata del fiume Piave, la ridotta velocità e la poca turbolenza superficiale che si sono manifestate nel corso della giornata della campagna di misurazione, gli angoli adottati in fase di calibrazione non sono stati molto ampi. Inoltre, la rotazione e i movimenti da effettuare durante la *compass calibration* devono essere eseguiti a velocità

relativamente basse. Difatti, la variazione degli angoli di rollio e beccheggio in maniera troppo veloce, o errata, comporta che gli accelerometri interni del RiverSurveyor riportino valori irrealistici e quindi conseguenti errori di calibrazione.

Il guado del Piave per effettuare i transetti lungo la sezione fluviale è stato possibile grazie all'utilizzo di un piccolo gommone spinto a remi che ha permesso di trascinare l'HydroBoard sulla quale alloggiava L'ADCP.

6 Risultati

Vengono ora riportati i risultati ottenuti dalla campagna di misure di Boretto del 17/03/2022. Si sono eseguite misurazioni di trasporto solido di fondo sia con strumentazione ADCP che con campionario di fondo di Helley-Smith per poter confrontare le due tecniche.

6.1 Misure di portata solida di fondo alla sezione di Boretto - Fiume Po

Nella campagna di misure eseguita a Boretto in data 17 marzo 2022 è stata utilizzata sia la strumentazione ADCP, sia il campionario di fondo di Helley-Smith, anche in contemporanea. La portata liquida transitante si attesta attorno ai 405 m³/s a fronte di un livello idrometrico di -3.41 m; livello che è rimasto pressoché invariato per l'intero corso della giornata. Dati la scarsa portata transitante e il relativo livello idrometrico, frutto della scarsità di precipitazioni che ha afflitto il nord Italia nell'inverno 2021-2022, non si è potuto eseguire misurazioni lungo l'intero alveo principale della sezione fluviale. La porzione di letto fluviale delimitata dai piloni della prima campata, partendo dalla sponda orografica destra, risulta completamente in secca, lasciando affiorare la barra di sedimenti. Al di sotto della seconda campata lo scarso tirante idrico lascia intravedere la barra di sedimenti a non più di un metro di profondità. Per questi motivi si è deciso di concentrare le misure relative al trasporto solido di fondo unicamente al di sotto della seconda campata a partire dalla sinistra orografica (**Figura 31**). Tale campata individua il canale destinato alla navigazione, che viene mantenuto dragato per evitare l'eccessivo accumulo di sedimenti che impedirebbero il transito delle imbarcazioni. Alla data della campagna di misure in questo tratto la profondità massima supera i 6m.



Figura 31 Campata canale navigabile vista da monte – Boretto

Lungo la campata del canale navigabile si attestano velocità medie della corrente del corso d'acqua di 0.94 m/s, e con direzione prevalente verso Est. Le velocità sono state ottenute dall'acquisizione dei dati dell'ADCP con software RiverSurveyor Live (Figura 32, Figura 33).

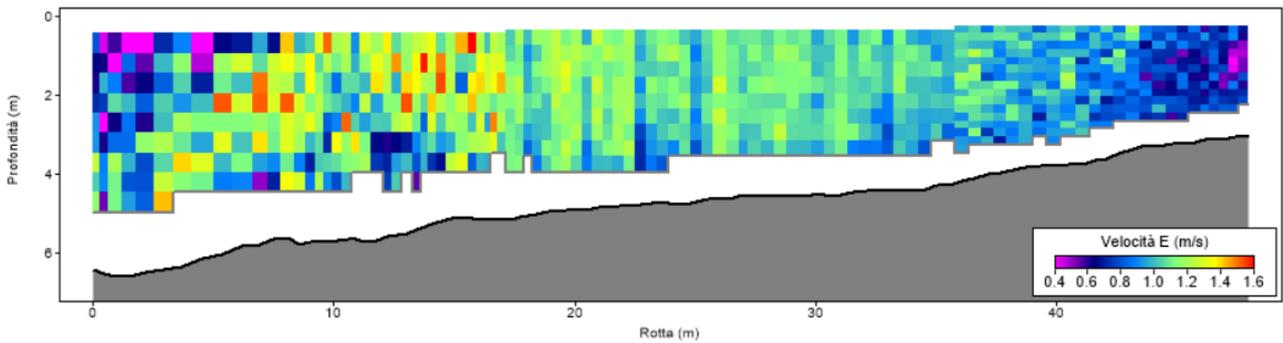


Figura 32 Velocità della corrente (componente Est)

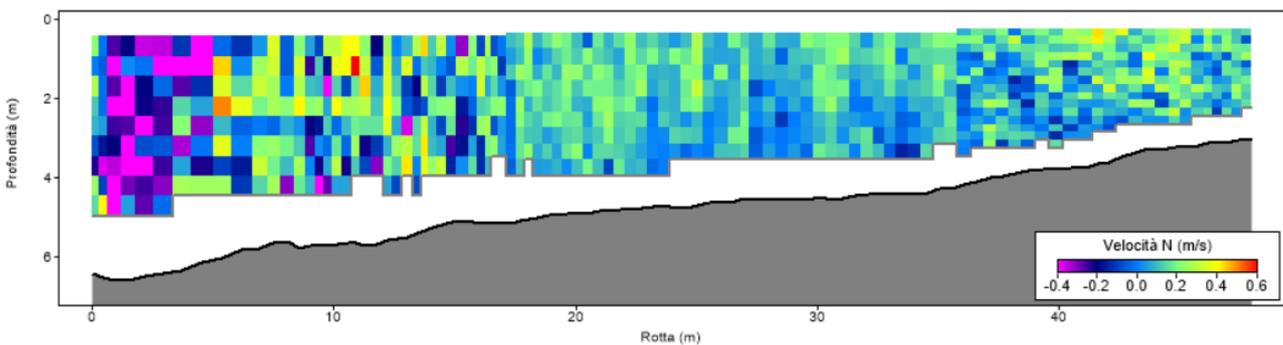


Figura 33 Velocità della corrente (componente Nord)

6.1.1 Risultati metodi diretti in posizione fissa: campionatore di Helley-Smith

Vengono ora mostrati i risultati, in termini di peso secco, ottenuti con il campionatore di fondo di Helley-Smith e le relative portate solide per unità di larghezza ricavate (Tabella 5).

	1	2	3	4
Ora di inizio	14:42:28	14:55:13	15:08:56	15:27:17
Durata [s]	300	311	305	317
Peso secco campionato [Kg]	2.88	2.74	2.83	1.49
Portata solida [m ³ /ms]	$4.8 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$	$4.6 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$

Tabella 5 Risultati campionatore di fondo di Helley - Smith

Come si evince dai risultati ottenuti, con l'ausilio del campionatore di fondo si stimano portate solide di fondo dell'ordine di 10^{-5} m³/ms. Le prime tre campionature restituiscono valori molto simili tra loro, con un peso raccolto attorno ai 2.8 Kg per campionatura e una portata solida media di $4.63 \cdot 10^{-5}$ m³/ms, mentre i valori dell'ultima campionatura scendono a 1.49 Kg per il peso secco e $2.3 \cdot 10^{-5}$ m³/ms per la portata solida.

6.1.2 Risultati metodi diretti: ADCP in posizione fissa

L'ADCP è in grado di fornire le velocità con cui si muove lungo il transetto sia in riferimento al Bottom Track che al sistema GPS. In questa maniera, ottenuta la differenza delle velocità, sarà possibile valutare la velocità con cui si muove il fondo mobile. Tuttavia, le incertezze derivanti dal posizionamento GPS, con l'HydroBoard in movimento, e la variabilità del trasporto solido di fondo lungo il transetto di misura, introducono ulteriori fonti di errori che si vanno a sommare all'accuratezza strumentale e/o ad una non corretta calibrazione della bussola o ancora ad errori accidentali nel suo utilizzo. Per evitare di giungere a conclusioni errate e cercare di ridurre, in questo senso, il numero di errori, si è deciso di condurre le misurazioni in condizioni fisse dell'HydroBoard. D'altra parte, è possibile in questo modo confrontare i risultati con quelli ottenuti dal campionatore di fondo. La velocità del fondo, qualora fosse confermata la presenza di trasporto solido al fondo, è uguale in modulo e contraria in verso alla velocità dell'HydroBoard con riferimento *Bottom Tracking*;

in questo caso, di fatto, l'HydroBoard non risulterà ferma, ma, dai risultati, si evincerà uno spostamento verso monte in direzione contraria al flusso della corrente. Questo apparente spostamento dell'ADCP è però da interpretare, in realtà, come spostamento del fondo alveo verso valle.

Vengono mostrati, in Figura 34, quattro rilevamenti effettuati con ADCP, dove è evidente il tracciato pseudo-lineare dello spostamento apparente dell'imbarcazione verso monte, e, in Tabella 6, i relativi valori di velocità di fondo riscontrati, nonché i relativi dati di orario di inizio delle misurazioni, il tempo di ogni misurazione e lo spostamento evidenziato. Ai fini di una corretta lettura delle immagini, si ricorda inoltre che il flusso principale della corrente è diretto verso est.

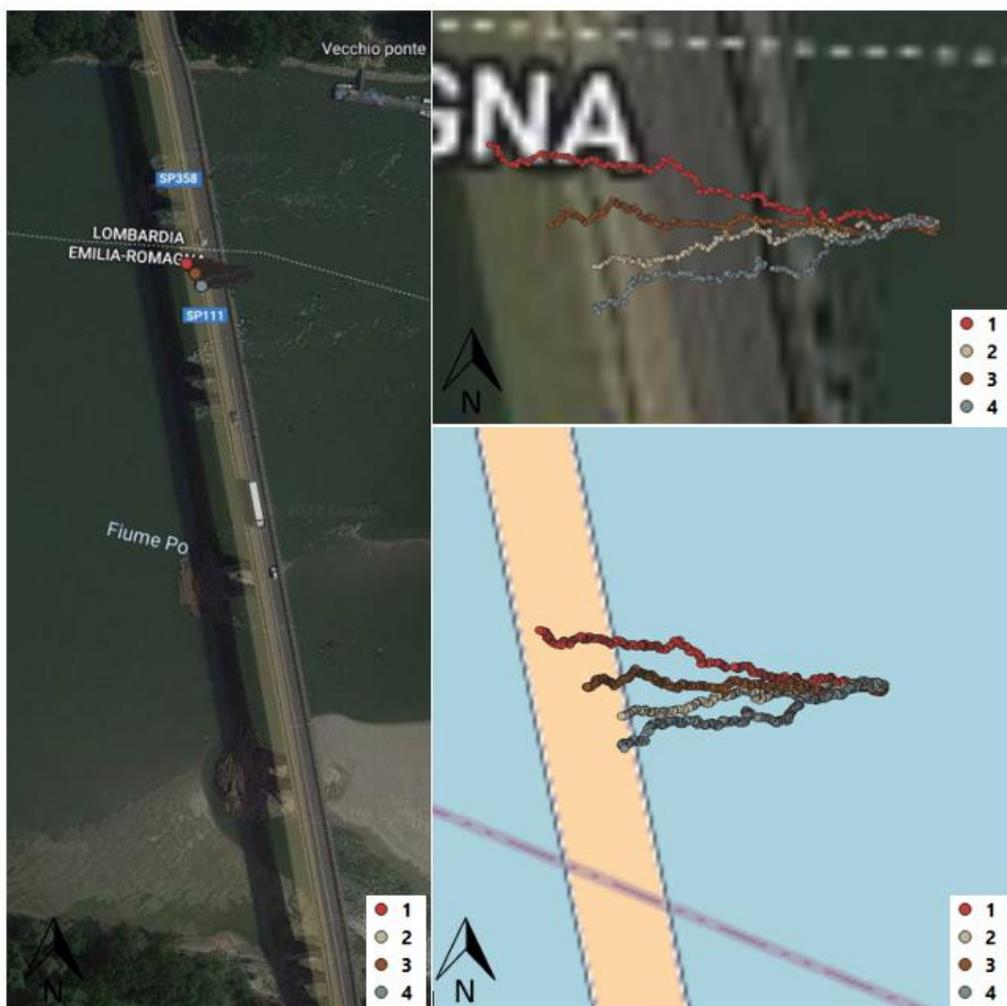


Figura 34 Bottom Tracks di quattro misurazioni - Boretto (zoom, a destra)

	1	2	3	4
Ora di inizio	14:42:28	14:55:13	15:08:56	15:27:17
V media sulla verticale [m/s]	1.11	1.05	1.09	1.03
Durata [s]	300	311	305	317
Spostamento [m]	21.53	16.41	18.34	16.63
V_{BT} [m/s]	0.072	0.053	0.060	0.052

Tabella 6 Risultati Bottom Tracking ADCP - Boretto

I risultati ottenuti appaiono coerenti tra loro. Per ogni misurazione la durata è di 5 minuti, o poco più, con relative velocità di fondo che variano da un minimo di 0.052 m/s, per la numero 4, ad un massimo di 0.072 m/s, per la prima. Queste leggere variazioni nella velocità media dei grani di fondo sono in linea con le variazioni delle velocità medie della corrente nella colonna d'acqua della campionatura che variano da un minimo di 1.03 m/s ad un massimo di 1.11 m/s; velocità della corrente che sono superiori alla media dell'intera campata dal momento che, essendo l'ADCP posizionato al centro della campata stessa, risentono meno dell'influenza dei piloni del ponte. Coerentemente con quanto ci si aspettava, i tracciati, definiti dalla funzione di Bottom Tracking dello strumento, sono orientati verso monte seppur non esattamente lungo la stessa direzione l'uno dall'altro. Ciò è comunque totalmente plausibile e spiegabile dal fatto che trattandosi di un corso d'acqua naturale difficilmente il moto sarà di tipo laminare con traiettorie ordinate, ma piuttosto vigerà un regime turbolento con traiettorie delle particelle del fluido e anche dei grani di sedimento, caotiche, dirette sì in una direzione principale di moto determinata dalle caratteristiche intrinseche dell'alveo fluviale, ma subentrerà inoltre una componente secondaria (e terziaria) delle velocità a determinare un moto di tipo bidimensionale (e tridimensionale), con la tendenza a disperdere le particelle.

Per stimare la portata solida, oltre alla velocità di fondo misurata con ADCP, è necessario stimare la profondità del layer attivo: si fa riferimento ai due modelli di Van Rijn e Du Boys, i cui risultati sono mostrati in **Tabella 7** e **Tabella 8** .

Van Rijn	1	2	3	4
Spessore strato attivo [mm]	1.7	1.5	1.6	1.5
qs [m ³ /ms]	$1.13 \cdot 10^{-5}$	$6.82 \cdot 10^{-6}$	$8.80 \cdot 10^{-6}$	$6.33 \cdot 10^{-6}$

Tabella 7 Spessore layer attivo e portata solida con modello di Van Rijn

Du Boys	1	2	3	4
Spessore strato attivo [mm]	1.1	1.1	1.1	1.1
qs [m ³ /ms]	$4.07 \cdot 10^{-5}$	$2.99 \cdot 10^{-5}$	$3.41 \cdot 10^{-5}$	$2.98 \cdot 10^{-5}$

Tabella 8 Spessore layer attivo e portata solida con modello di Du Boys

Il modello di Du Boys restituisce valori di portata solida al fondo, nell'ordine di grandezza di 10^{-5} m³/ms, in linea con quanto ottenuto dal campionatore di fondo. Il modello di Van Rijn sembra invece sottostimare la portata solida rispetto alle valutazioni precedenti.

6.1.3 Risultati metodi indiretti in posizione fissa

La tecnica ADCP per sua natura misura le velocità della corrente lungo la verticale permettendo di fatto di interpolare questi dati con una legge logaritmica, al fine di calcolare la velocità d'attrito, variabile fondamentale per il calcolo delle formulazioni tradizionali di trasporto solido.

Le velocità lungo la verticale sono calcolate in base alla tecnica doppler fino alla profondità non affetta da interferenza *side-lobe* (cfr 1.2.1).

Si riportano, in Figura 35, due immagini campione con e senza lo screening della cella.

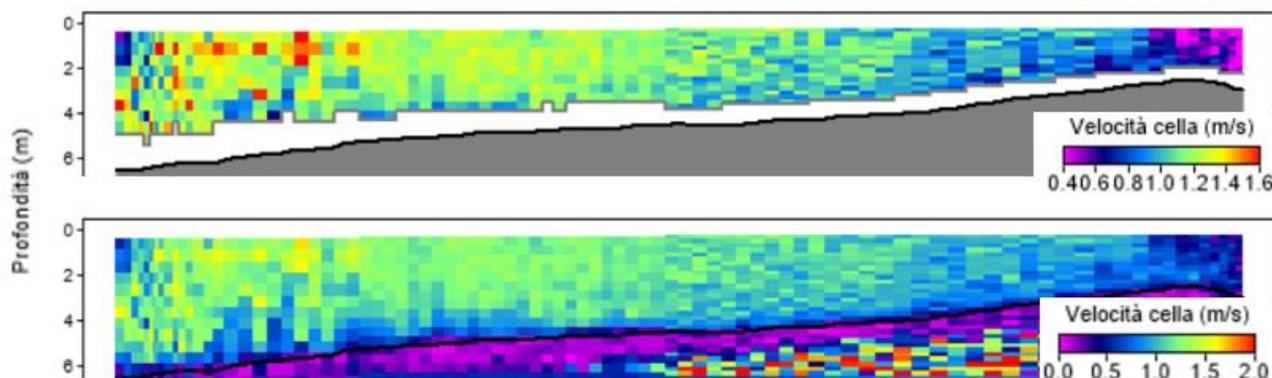


Figura 35 Velocità della corrente con screening cella (sopra) e senza (sotto)

Nel caso specifico proprio per studiare il miglioramento della stima del profilo di velocità e quindi della velocità d'attrito si sono confrontati i profili ricavati a partire dalle sole velocità della corrente al di sopra dell'area di interferenza con quelli ottenuti invece dalle velocità dell'intera colonna d'acqua, senza effettuare quindi lo *screening cella* proposto da RiverSurveyor per eliminare i dati potenzialmente affetti da errore, e ancora con quelli senza *screening cella* e introducendo il dato di velocità di fondo ricavato dal metodo diretto. Dalle interpolazioni logaritmiche, sia con *screening* di cella che senza, eliminando però in quest'ultimo caso le velocità relative alle celle sotto il fondo alveo, frutto di errori dell'impulso acustico dell'ADCP nel penetrare il layer solido, si evince come il discostamento della velocità di attrito senza *screening* (sia con che senza la velocità ricavata da Bottom Tracking) da quelle filtrate interessi unicamente, al più, la terza cifra decimale. La differenza media è di 0.0016 m/s che corrisponde percentualmente, in valori assoluti, al 5.3%. Vengono mostrati un esempio grafico (Figura 36) per una singola misurazione e le relative velocità di attrito in Tabella 9.

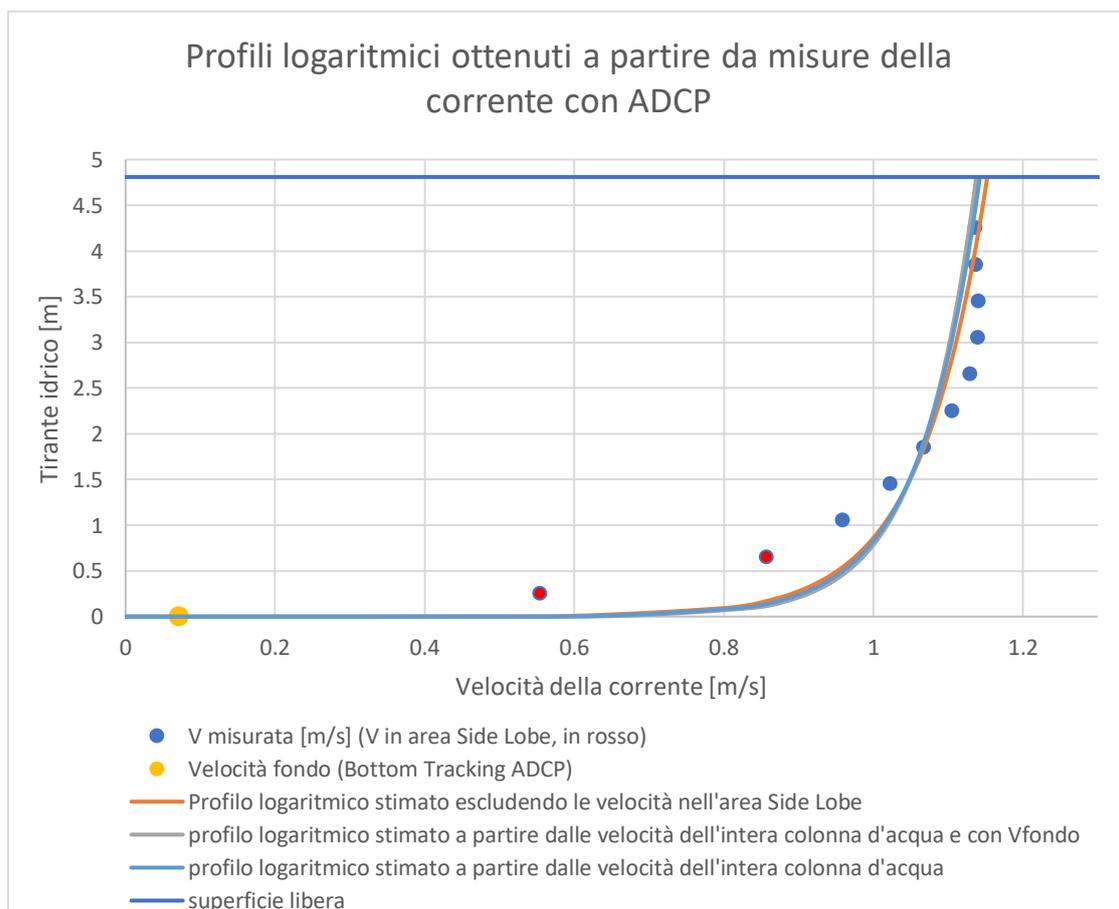


Figura 36 Profili logaritmici: con e senza *screening cella*

u* da profilo con screening cella [m/s]	u* da profilo senza screening cella [m/s]	u* da profilo senza screening cella e velocità da bottom track [m/s]
0.035	0.034	0.034

Tabella 9 Velocità di attrito: con e senza screening cella

Per la determinazione del trasporto solido al fondo, sfruttando l'approccio indiretto, facendo riferimento alla teoria di Shields (approccio modificato da Van Rijn), si è determinata la soglia di incipiente movimento dei grani di fondo. La sezione di riferimento per Boretto, come descritto nel capitolo precedente, fa unicamente riferimento al canale navigabile. Vengono riportati il diametro adimensionale del sedimento D^* , il parametro critico di Shields θ_c e la velocità di attrito critica u_c^* .

$D^*[-]$	$\theta_c[-]$	$u_c^* [m/s]$
10.8628	0.0315	0.015

Tabella 10 diametro adimensionale, parametro critico di Shields e velocità di attrito critica per la sezione di Boretto

Una valutazione della velocità di attrito basata sull'interpolazione logaritmica è stata quindi condotta per le quattro misurazioni effettuate con ADCP in condizione fissa. Le velocità di attrito medie ottenute con metodo indiretto sono state di 0.038 m/s per la prima misurazione e di circa 0.036 m/s per le successive tre; è possibile quindi ottenere un valore medio di 0.036 m/s per le quattro misurazioni effettuate puntualmente, nella medesima posizione

Vengono infine mostrati, in **Figura 37**, i risultati di portata solida per unità di larghezza, stimati a partire dai profili verticali della velocità della corrente misurata con ADCP in posizione fissa.

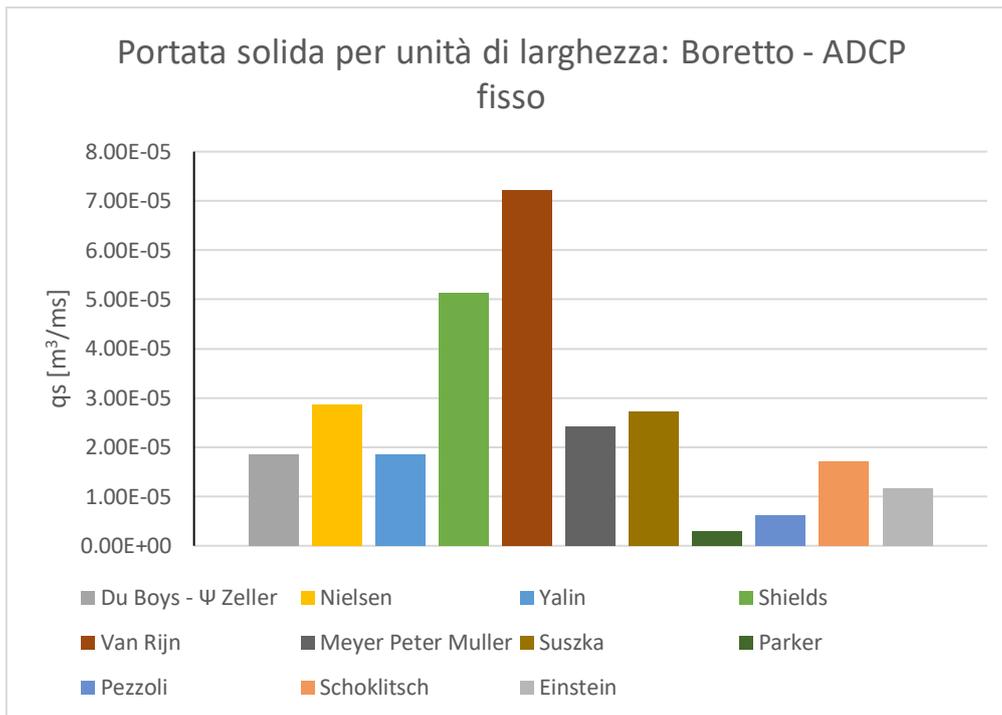


Figura 37 Portata solida di fondo per unità di larghezza: Boretto - ADCP fisso

Si noti come la variabilità della stima della portata solida al fondo utilizzando le formulazioni dei diversi autori, sia notevole. I risultati derivanti dai diversi approcci rientrano però nello stesso ordine di grandezza di 10^{-5} m³/ms ad eccezione di Pezzoli e Parker che sottostimano la portata solida di un ordine di grandezza.

6.1.4 Risultati metodi indiretti per la sezione - canale di navigazione

Si mostrano gli andamenti della velocità di attrito per la sezione del canale navigabile, prima per il transetto di andata, da sud verso nord, e poi per il transetto di ritorno, da nord verso sud (Figura 38). Essi sono stati ottenuti a partire dai profili verticali della corrente misurata dall'ADCP lungo la sezione del canale navigabile. L'andamento della velocità di attrito viene quindi confrontato con il valore di velocità di attrito ottenuto globalmente per l'intera sezione del canale navigabile e il valore di velocità di attrito critica. (Transetto di andata Figura 39 e transetto di ritorno Figura 40).

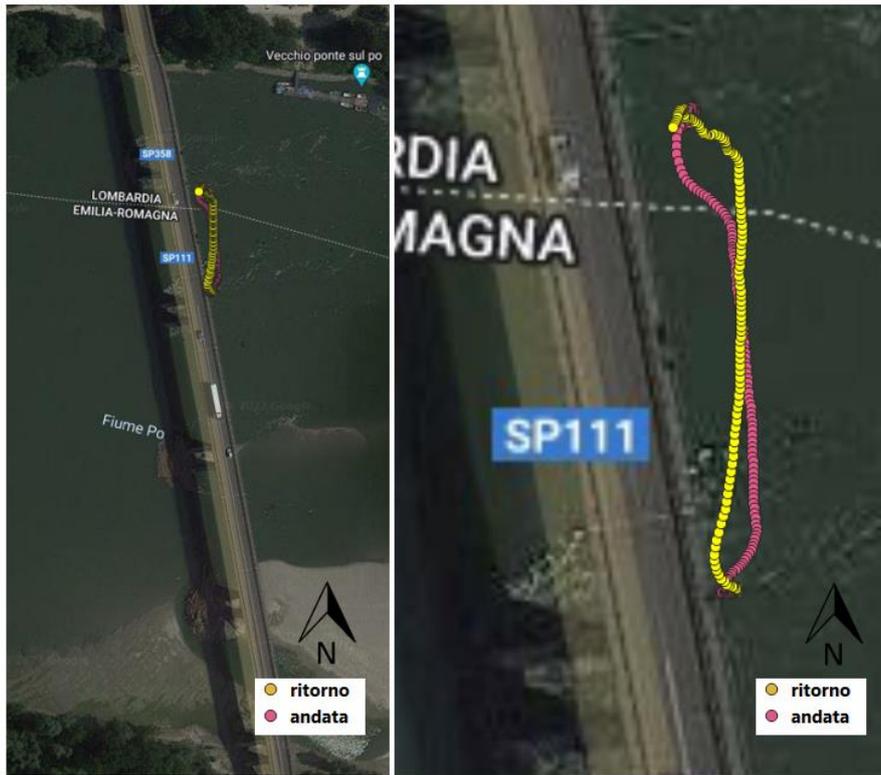


Figura 38 Transetti di andata e ritorno - immagine satellitare (zoom, a destra)

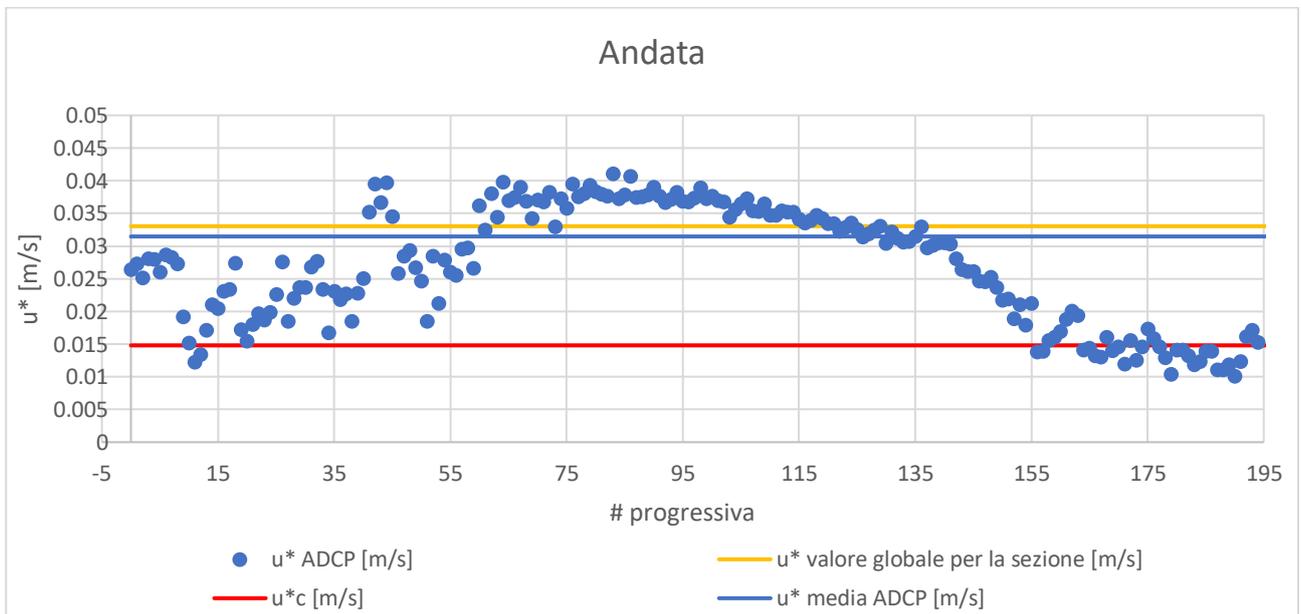


Figura 39 Velocità di attrito per il transetto di andata

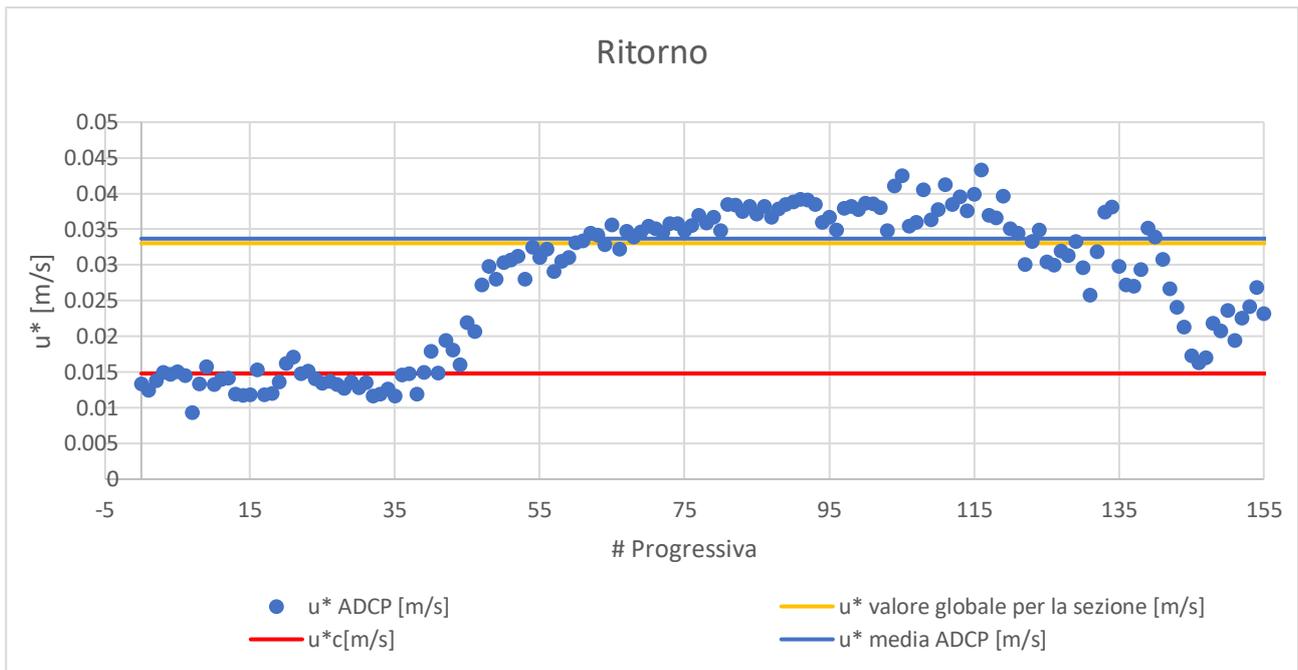


Figura 40 Velocità di attrito per il transetto di ritorno

Come si evince dai grafici mostrati, la velocità di attrito rimane ben al di sopra della soglia critica per la quasi totalità dei transetti, indice della presenza del fenomeno di trasporto solido al fondo. I valori più alti, che superano gli 0.030 m/s, come ci si aspetta, insistono sulla parte centrale della campata per poi decrescere gradualmente all'avvicinarsi ai piloni del ponte. I valori più bassi, al di sotto della soglia critica di movimento dei grani di fondo, posta a circa 0.015 m/s, sono di fatto il frutto del drastico rallentamento delle velocità a valle dell'area occupata dalle pile del ponte che costituiscono chiaramente un ostacolo al deflusso della corrente. Come si può valutare dai grafici mostrati, la velocità di attrito risultante dall'approccio globale, pari a 0.033 m/s, fornisce un valore totalmente coerente con quello restituito dall'utilizzo dell'ADCP, che è di circa 0.031 m/s per il transetto di andata e 0.034 m/s per quello di ritorno. Una precisazione ai fini della comprensione delle immagini satellitari e dei grafici mostrati è però doverosa: dai grafici sembrerebbe che le zone di interferenza dovuta alle pile dei ponti, individuabili dalle velocità di attrito basse, siano di notevole interesse se raffrontate al resto della sezione compresa nella campata. In realtà, questo è dovuto ai maggiori tempi di stazionamento dell'ADCP, all'inizio e alla fine di ogni transetto; tempi necessari però ai fini di una corretta acquisizione dei dati. Anche nelle immagini satellitari è infatti possibile notare come una maggiore concentrazione di punti di campionatura sia proprio presente sia all'inizio che alla fine di entrambi i transetti. Nell'individuare le velocità di attrito medie restituite da ADCP queste eccessive campionature sono però state eliminate per non pesare erroneamente nel calcolo.

Si riportano in **Tabella 11** i valori di velocità di attrito sopra descritti:

<i>Velocità di attrito da metodi indiretti per canale navigabile</i>			
u_c^* [m/s]	u^* globale [m/s]	u^* media transetto di andata [m/s]	u^* media transetto di ritorno [m/s]
0.015	0.033	0.031	0.034

Tabella 11 Velocità di attrito per canale navigabile - Boretto

Per valutare la bontà delle interpolazioni logaritmiche dei profili verticali delle velocità si è ricorso alla valutazione del coefficiente di determinazione, definito come (56):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_{celle}} (u_i - \hat{u}_i)^2}{\sum_{i=1}^{N_{celle}} (u_i - U)^2} \quad (56)$$

Dove:

- u_i è la velocità media misurata nell'i-esima cella della verticale
- \hat{u}_i è la medesima velocità, ma calcolata seguendo il profilo logaritmico
- U è la velocità media della corrente lungo la verticale

Si mostrano i risultati dell' R^2 a confronto con le velocità medie per ogni verticale delle campionature, sia per il transetto di andata (**Figura 41**) che per quello di ritorno (**Figura 42**): anche le velocità medie lungo le verticali, come chiaramente già anticipato dalle velocità di attrito, sono maggiori nella zona centrale della campata e calano all'avvicinarsi ai piloni del ponte. Come viene mostrato dall'andamento dell' R^2 , la bontà dell'interpolazione logaritmica del profilo delle velocità è buona, con valori prossimi all'1, nel tratto con velocità maggiori, per poi mediamente decrescere, mostrando anche valori instabili, nei tratti che risentono dell'influenza delle pile. In questi ultimi tratti, dunque, la distribuzione logaritmica non risulta ottimale per interpretare le distribuzioni delle velocità lungo la verticale, dal momento che le velocità della corrente risentono dell'influenza indotta dall'ostacolo posto nel flusso idrodinamico: la turbolenza che ne deriva agisce, di fatto, nel decadimento delle condizioni di bidimensionalità del moto.

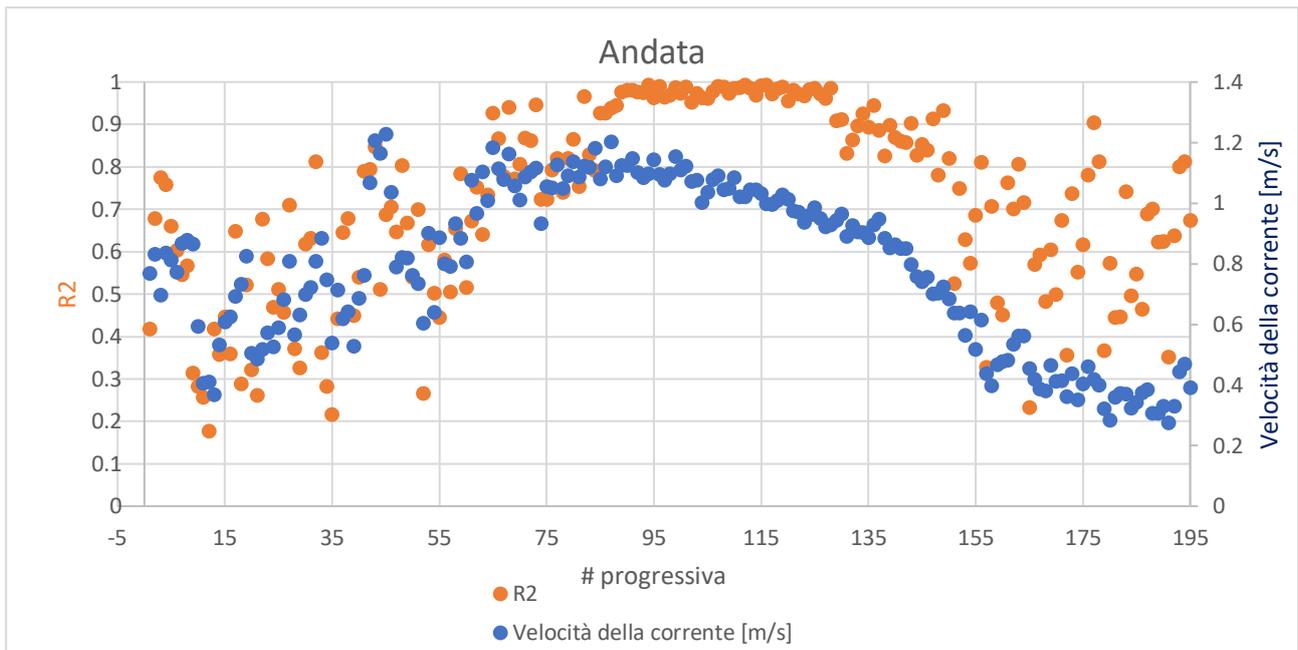


Figura 41 Andamento R2 e Velocità della corrente per il transetto di andata

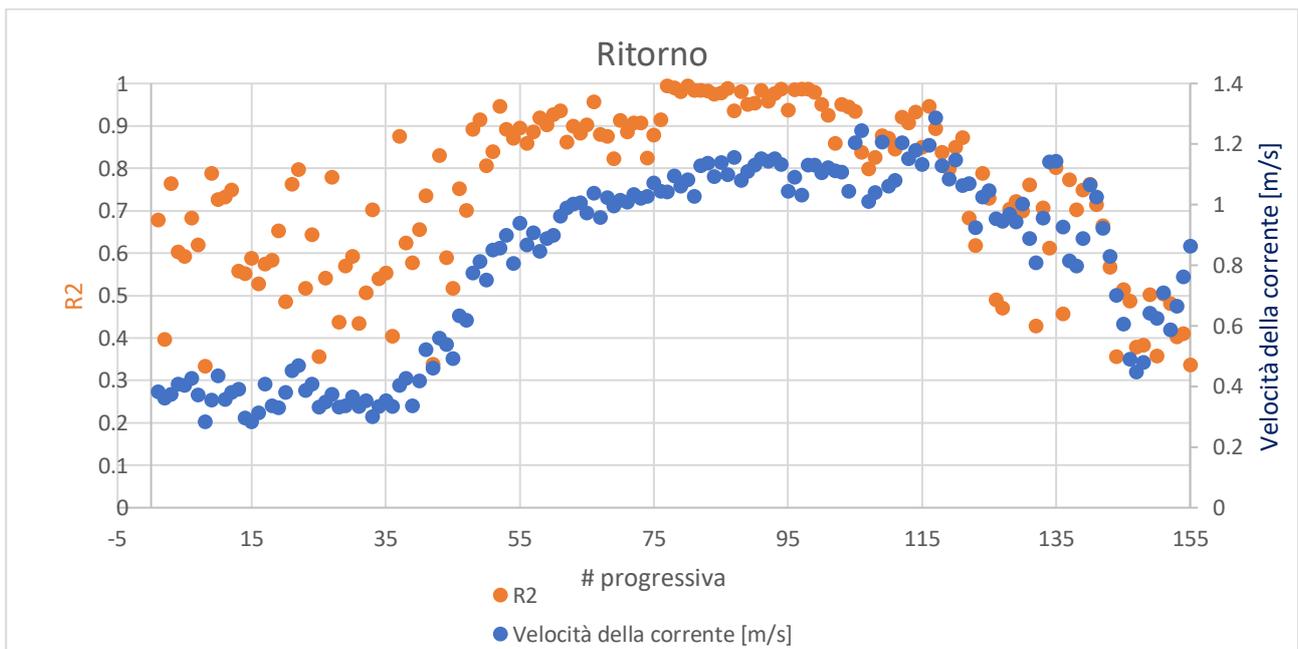


Figura 42 Andamento R2 e Velocità della corrente per il transetto di ritorno

Riassumendo, la velocità di attrito media per il canale navigabile è risultata essere di 0.033 m/s sia con formulazione globale che mediando i risultati ottenuti con ADCP nel transetto di andata e ritorno. Ottenute le velocità di attrito e la velocità di attrito critica si ricavano i rispettivi valori di sforzo tangenziale al fondo, e quindi la porta solida al fondo, per unità di larghezza, utilizzando le formule tradizionali. I risultati, mostrati nei grafici, fanno riferimento al valore medio nel canale navigabile,

che è risultato essere coincidente sia nel caso di approccio globale che con ADCP (Figura 43). Vengono proposte le formulazioni di diversi autori che stimano la portata solida al fondo in base al superamento di una soglia di sforzo tangenziali critico, o di portata critica (Schoklitsch, per il quale non è quindi previsto lo sfruttamento della velocità di attrito), o ancora un approccio di tipo probabilistico (Einstein).

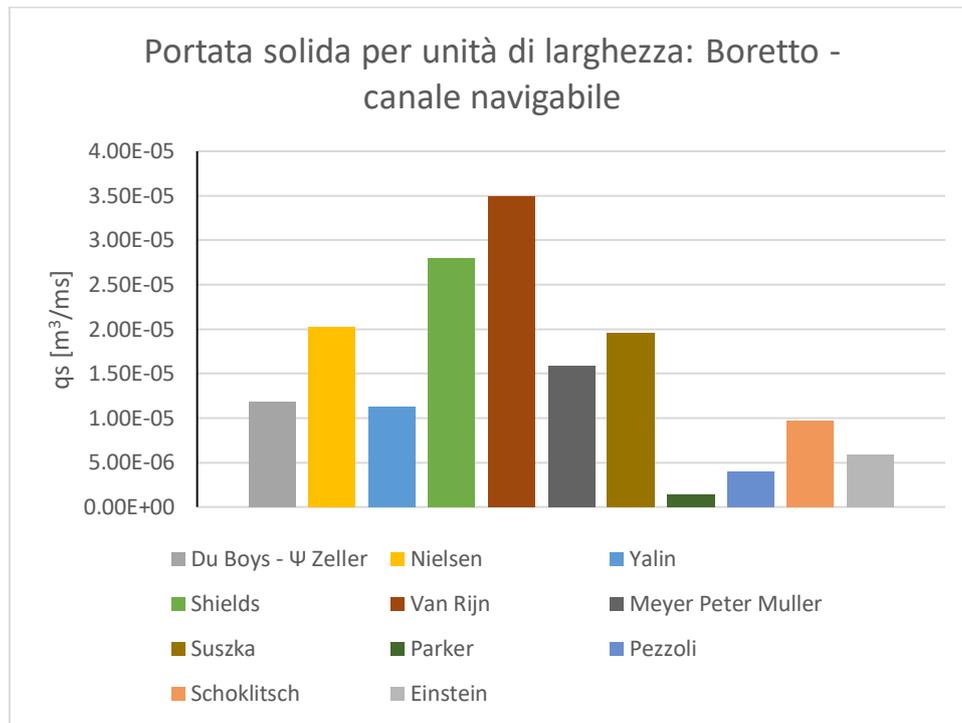


Figura 43 Portata solida di fondo per unità di larghezza: Boretto - canale navigabile

Si noti come anche in questo caso la variabilità della stima della portata solida al fondo utilizzando le formulazioni dei diversi autori sia notevole. I risultati derivanti dai diversi approcci rientrano perlopiù nell'ordine di grandezza di 10^{-5} m³/ms; Pezzoli, Parker Schoklitsch ed Einstein sottostimano la portata solida di un ordine di grandezza.

7 Discussione

Ai fini di una valutazione complessiva volta al confronto tra la tecnica acustica basata sull'effetto Doppler e la tecnica tradizionale con campionatore di fondo di Helley-Smith per la stima della portata solida di fondo con metodi diretti vengono riportati, in **Figura 44** e **Figura 45**, i risultati ottenuti, che vanno ad integrare quelli ottenuti da una campagna di misure eseguita in data 16/04/21 dal Prof. Marco Mancini, Prof. Giovanni Ravazzani, Ing. Daniele Gasparato et al. nel medesimo sito fluviale.

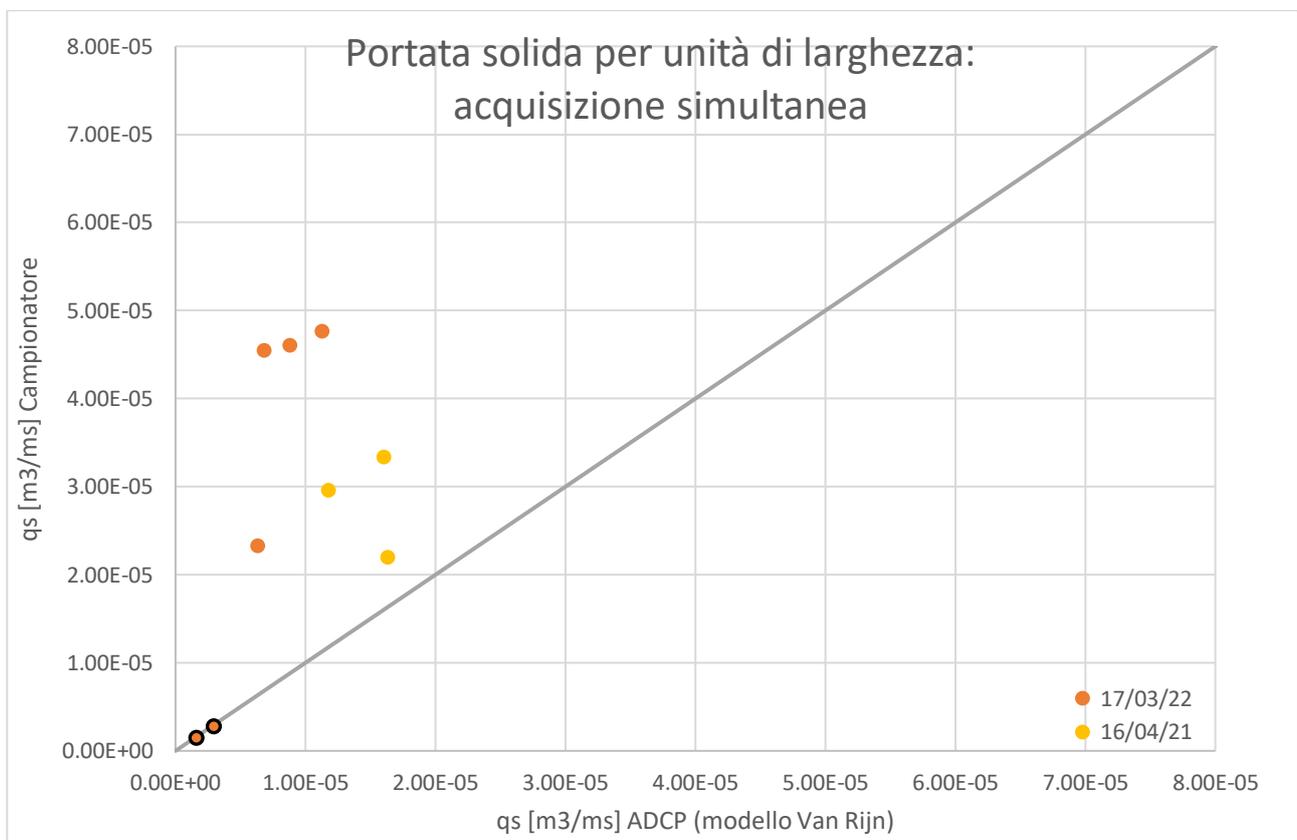


Figura 44 Portata solida per unità di larghezza: ADCP (modello Van Rijn) e campionario a confronto

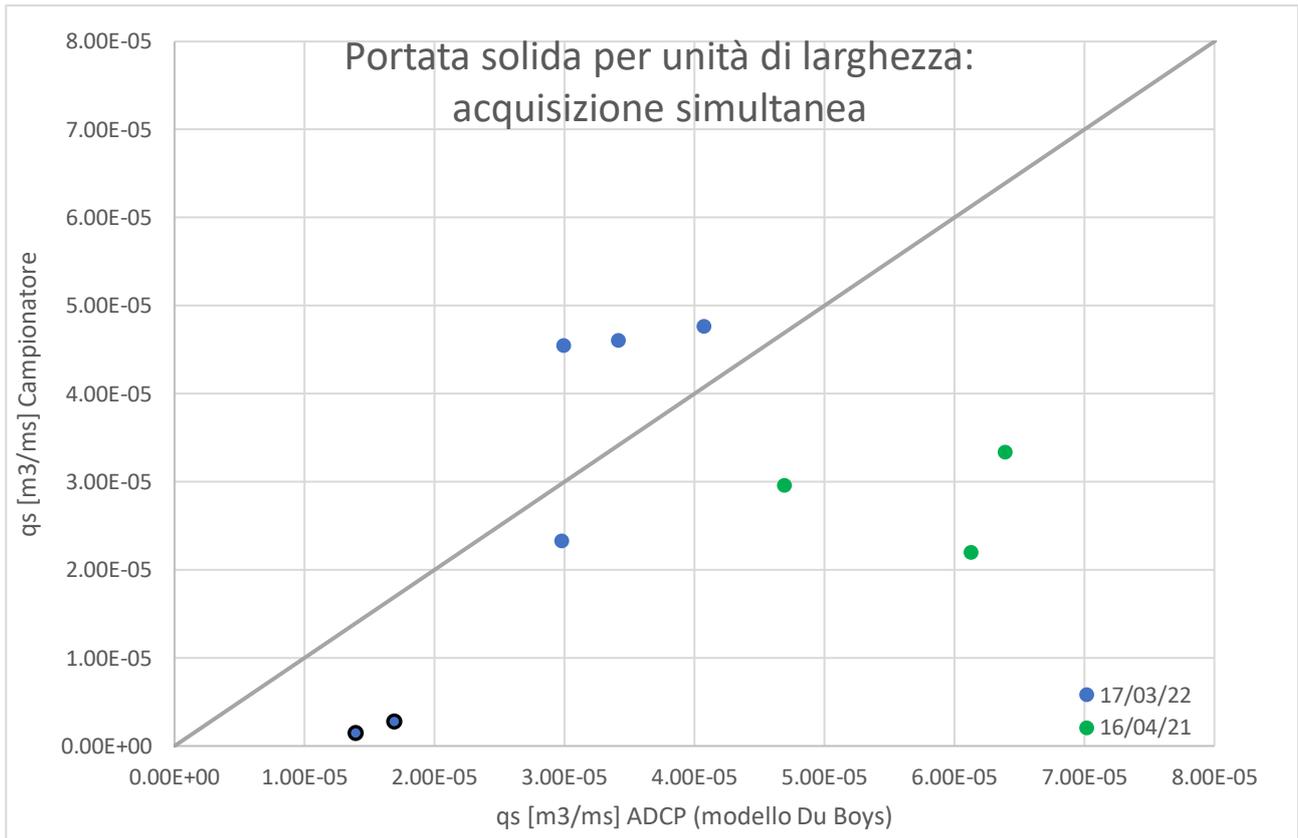


Figura 45 Portata solida per unità di larghezza: ADCP (modello Du Boys) e campionatore a confronto

La portata solida di fondo, ricavata a partire dalle velocità di fondo misurata con ADCP e spessore dello strato attivo stimato seguendo la teoria di Van Rijn, appare essere sottostimata rispetto alla portata solida campionata con l'ausilio del campionatore di fondo di Helley-Smith; ciò è valido per le quattro campionature i cui risultati sono stati presentati anche nel capitolo precedente e per quelle relative alla data 16/04/21. In data 17/03/22 sono state eseguite altre due misurazioni, i cui risultati sono mostrati con contorno nero: il campionatore di fondo e l'ADCP sono stati spostati di circa 20 m verso la sponda orografica destra rispetto alle misure precedenti. In questo caso le portate solide, sebbene in presenza di una velocità della corrente in media lievemente inferiore al caso precedente, risultano inferiori di un ordine di grandezza rispetto ai risultati precedenti, se stimate con campionatore di fondo; mentre la riduzione di trasporto solido stimato con ADCP, seppur presente, non è altrettanto significativa. Pertanto, per le due misurazioni aggiuntive, con portata solida minore, il modello di Van Rijn sembra molto più coerente con la portata solida ricavata dal campionatore.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti con modello di Du Boys, rispetto al campionatore, appaiono sovrastimati per alcune campionature e sottostimati per altre, ma nello stesso ordine di grandezza di

$10^{-5} \text{m}^3/\text{ms}$, ad eccezione delle due misurazioni aggiuntive che evidenziano una portata solida campionata dell'ordine di $10^{-6} \text{m}^3/\text{ms}$.

Una possibile spiegazione per una così drastica riduzione di materiale campionato può essere ricercata nel funzionamento e nella struttura stessa del campionatore di Helley – Smith. La bocca di campionatura ha difatti uno spessore (1.27 mm) che è confrontabile con lo spessore del layer attivo individuato sia dal modello di Van Rijn che quello di Du Boys, e pertanto anche una piccola variazione della dimensione dello strato di fondo mobile può giocare un ruolo rilevante nella quantità di materiale raccolto. Se questa ipotesi dovesse essere confermata, il vantaggio dell'utilizzo dell'ADCP rispetto a campionatori di fondo tradizionali, sarebbe ancor più rilevante: gli strumenti acustici non interferiscono difatti né con il flusso della corrente in prossimità del fondo né tantomeno con il fondo alveo stesso.

La variabilità dei risultati ottenuti con campionatore di fondo è anche evidenziabile attraverso un'incongruenza che è stata riscontrata: non viene di fatto evidenziata una correlazione tra lo sforzo tangenziale al fondo, ricavato in funzione del tirante idrico, e la portata solida al fondo, ricavata invece a partire dal peso del materiale campionato (Figura 46, Tabella 12).

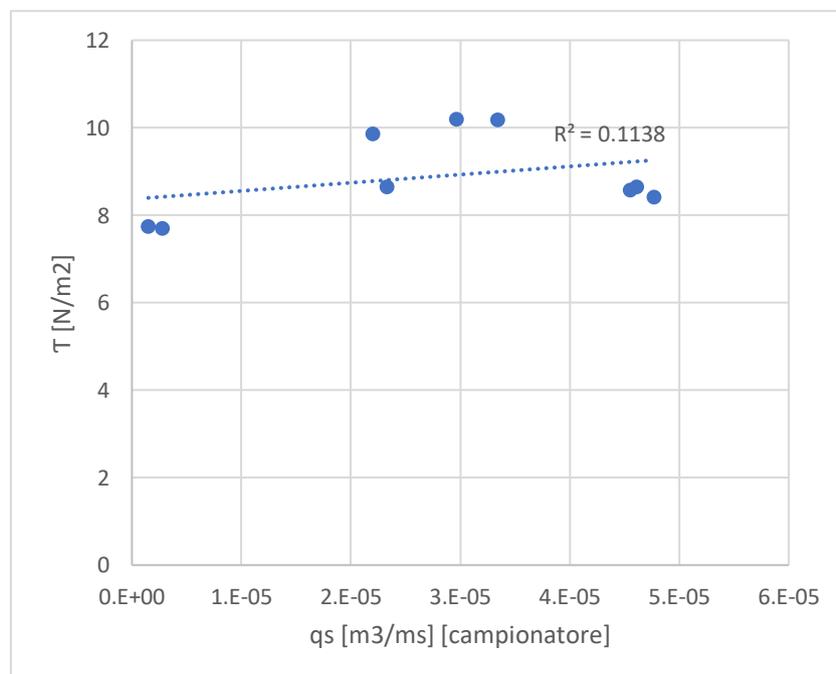


Figura 46 Sforzo tangenziale al fondo - portata solida campionata

data	T [N/m ²]	qs [m ³ /ms]
17/03/2022	7.70	2.79E-06
17/03/2022	7.75	1.50E-06
17/03/2022	8.42	4.77E-05
17/03/2022	8.58	4.55E-05
17/03/2022	8.65	4.61E-05
17/03/2022	8.65	2.33E-05
16/04/2021	9.87	2.20E-05
16/04/2021	10.19	3.34E-05
16/04/2021	10.20	2.96E-05

Tabella 12 valori numerici per sforzo tangenziale al fondo e portata solida campionata

Anche la correlazione tra la velocità dei grani di fondo misurata con ADCP e la portata solida campionata (sia in data 16/04/21 che 17/03/22) non risulta marcata (Figura 47, Tabella 13); si individua un R² di poco superiore allo 0.30.

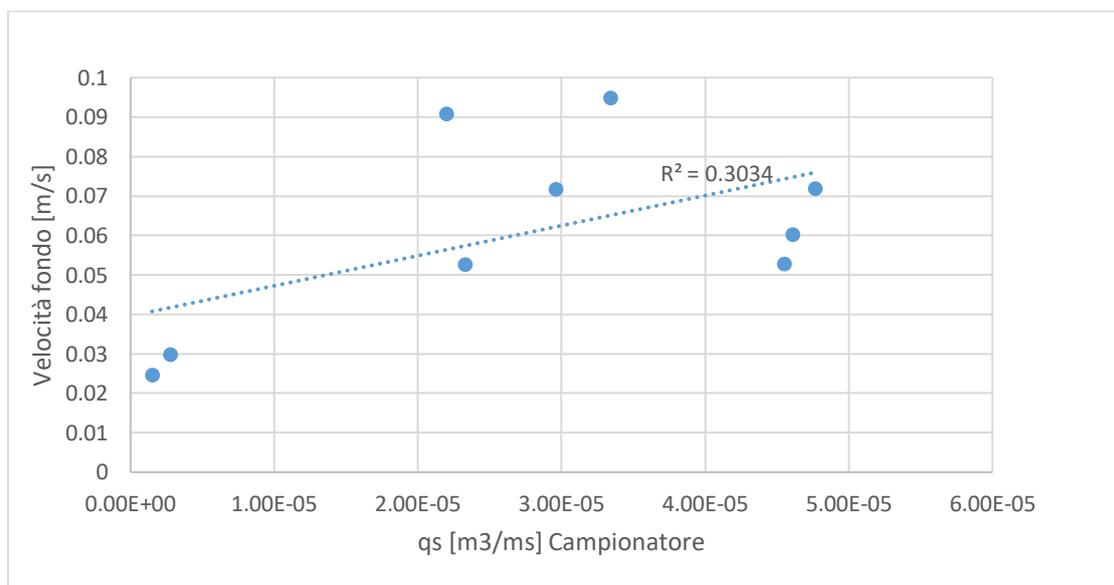


Figura 47 Correlazione tra velocità dei grani di fondo misurata con ADCP e portata solida campionata

data	Velocità fondo [m/s]	qs campionatore[m ³ /ms]
17/03/2022	0.0297	2.79E-06
17/03/2022	0.0245	1.50E-06
17/03/2022	0.0717	4.77E-05
17/03/2022	0.0527	4.55E-05
17/03/2022	0.0601	4.61E-05
17/03/2022	0.0524	2.33E-05
16/04/2021	0.0907	2.20E-05
16/04/2021	0.0947	3.34E-05
16/04/2021	0.0717	2.96E-05

Tabella 13 Valori numerici: Velocità grani di fondo e portata solida campionata

Al contrario, per quanto riguarda la strumentazione ADCP, appare evidente, in Figura 48 (e Tabella 14), una relazione tra altezza del tirante idrico e velocità dei grani di fondo misurata ($R^2 = 0.84$).

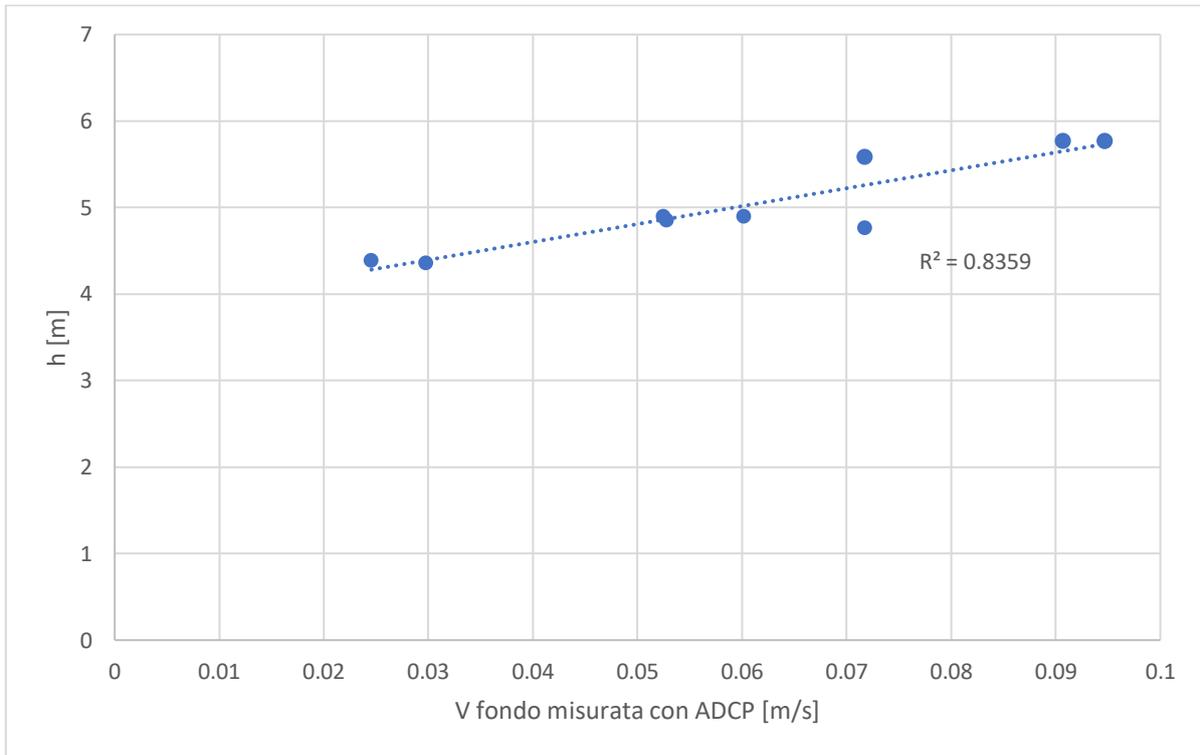


Figura 48 Correlazione tra tirante idrico e velocità dei grani di fondo misurata con ADCP

data	h [m]	Velocità fondo [m/s]
17/03/2022	4.36	0.0297
17/03/2022	4.39	0.0245
17/03/2022	4.77	0.0717
17/03/2022	4.86	0.0527
17/03/2022	4.9	0.0601
17/03/2022	4.9	0.0524
16/04/2021	5.78	0.0907
16/04/2021	5.77	0.0947
16/04/2021	5.59	0.0717

Tabella 14 Valori numerici: tirante idrico e velocità di fondo

7.1 Misure di controllo con ADCP in assenza di portata solida di fondo: Ponte di Piave

Nella campagna di misure eseguita a Ponte di Piave in data 1° febbraio 2022 è stata utilizzata unicamente la strumentazione ADCP. Si è deciso difatti di effettuare delle misure di controllo in assenza di trasporto solido di fondo che permettessero di verificare che la strumentazione acustica non restituisse valori inverosimili.

Dalle misurazioni ottenute, riferite ad un transetto eseguito lungo l'intera sezione fluviale 650m a ponte del Ponte ferroviario, si individua una larghezza del corso d'acqua pari a circa 37 m. In questa sezione la profondità massima raggiunge i 3.3 m.

Si attestano delle velocità della corrente del corso d'acqua decisamente ridotte, mediamente di 0.45 m/s, e con direzione prevalente verso Est-Nord (Figura 49, Figura 50), ottenute dall'acquisizione dei dati dell'ADCP con software RiverSurveyor Live.

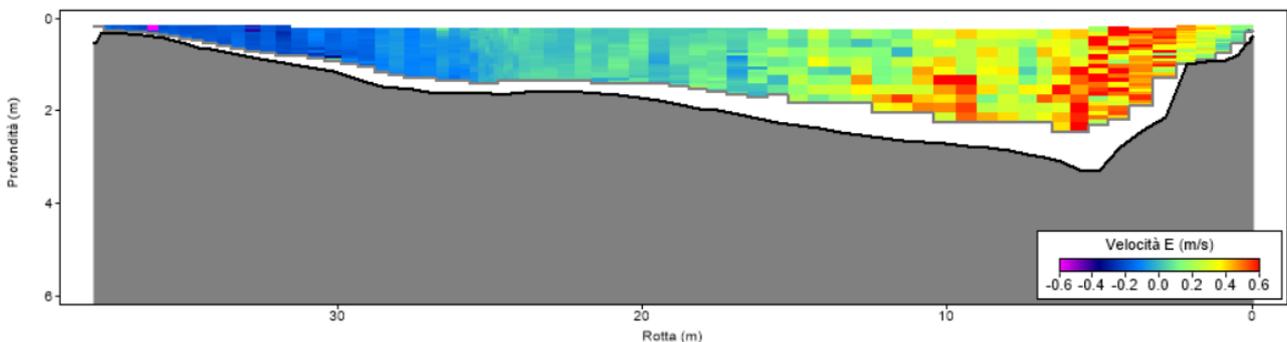


Figura 49 Velocità della corrente (componente Est)

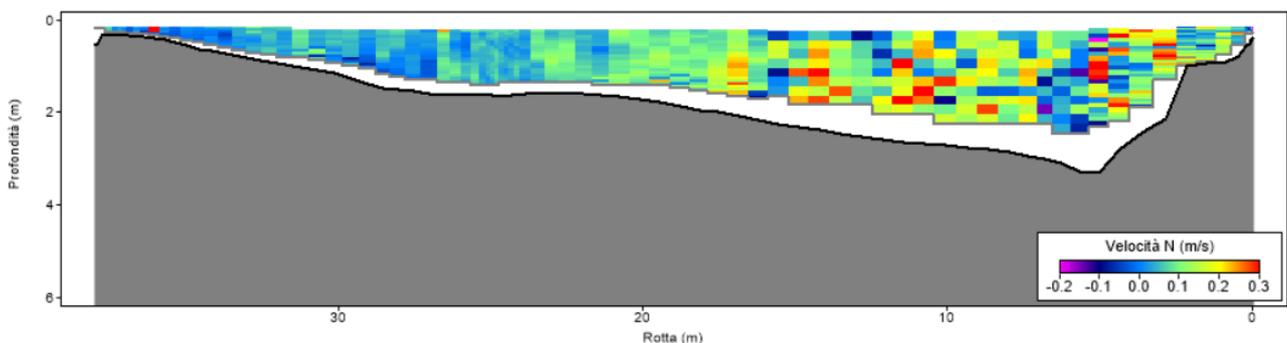


Figura 50 Velocità della corrente (componente Nord)

Dall'elaborazione, avvenuta con software MATLAB, dei dati ottenuti dall'ADCP si è evidenziato come la portata media transitante durante le misurazioni si attesti attorno agli 8.5 m³/s, in linea con quanto

dichiarato dalla scala delle portate della sezione di Ponte di Piave, facendo riferimento ad un livello idrometrico di 0.44 m (ARPA Veneto), che si è mantenuto pressoché costante durante tutto l'arco delle misurazioni e della giornata, con oscillazioni non superiori a ± 1 cm.

La campagna sperimentale svolta a Ponte di Piave è stata eseguita per dimostrare che i risultati di trasporto solido al fondo, qualora esso si stia verificando, ottenuti con strumentazione ADCP, in condizioni di alveo naturale, non siano perlopiù il frutto di errori intrinseci della strumentazione o nel suo utilizzo; e che quindi viceversa, in condizioni come quelle riscontrate in data 01/02/2022, con velocità estremamente ridotte e acque visibilmente molto limpide tipiche di corsi d'acqua in cui il fenomeno del trasporto solido di sedimenti non è in atto, non vengano rilevate velocità di attrito superiori a quelle critiche o che la funzione Bottom-Tracking dell'ADCP non mostri un tracciato che denoti la presenza di un fondo mobile.

Per la verifica di assenza del trasporto solido al fondo, sfruttando l'approccio indiretto, per prima cosa, facendo riferimento alla teoria di Shields, con abaco modificato da Van Rijn, si è determinata la soglia di incipiente movimento dei grani di fondo per la sezione in esame. Vengono riportati il diametro adimensionale del sedimento D^* , il parametro critico di Shields θ_c (modifica di Van Rijn Figura 14) e la velocità di attrito critica u_c^* (Tabella 15).

$D^*[-]$	$\theta_c[-]$	$u_c^* [m/s]$
1.5915	0.1040	0.0103

Tabella 15 Diametro adimensionale, parametro critico di Shields e velocità di attrito critica per la sezione di Ponte di Piave

Si è quindi eseguita un'interpolazione logaritmica delle velocità della corrente, restituite dall'ADCP, lungo la verticale. È stata utilizzata l'equazione Prandtl - Von Karman, come descritto precedentemente; essa descrive la distribuzione della velocità di un flusso di un fluido turbolento nei pressi di un bordo, in questo caso individuato dal fondo alveo. L'operazione è stata ripetuta per tutte le campionature del transetto del tronco fluviale. Ne viene mostrato un esempio per una campionatura del transetto (Figura 51) e i riportati i parametri θ_1 e θ_2 per la determinazione del profilo logaritmico e la relativa velocità di attrito al fondo u^* (Tabella 16).

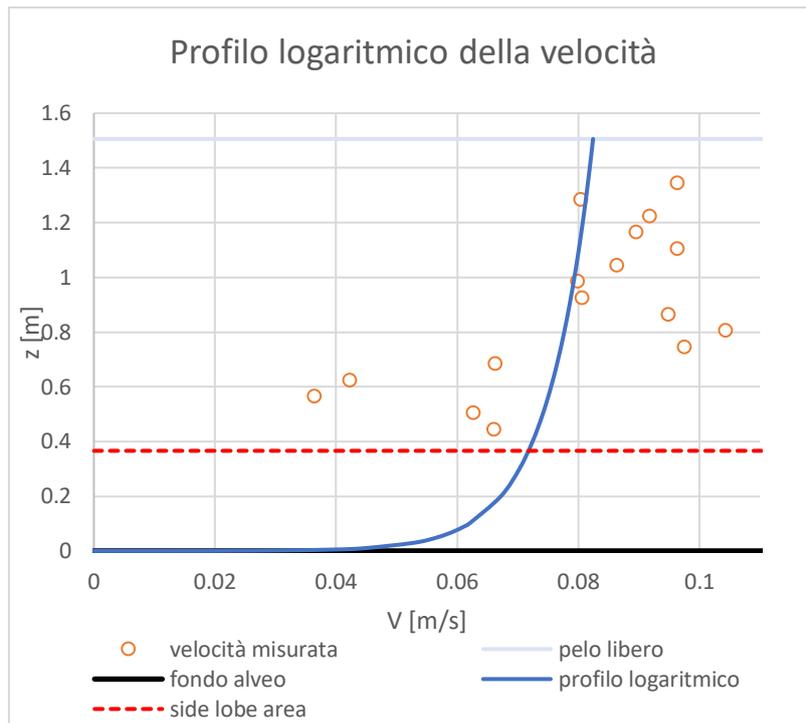


Figura 51 Esempio profilo logaritmico per una verticale della sezione di Ponte di Piave

$\Theta_1 [-]$	$\Theta_2 [-]$	$u^* [m/s]$
0.0075	0.0793	$3.01 \cdot 10^{-3}$

Tabella 16 Parametri del profilo logaritmico interpolato e velocità di attrito di esempio

Reiterando queste operazioni lungo l'intera sezione si evince come la velocità di attrito rimanga sempre al di sotto della soglia critica, ad eccezione di sporadici outliers frutto di errori nel calcolo della velocità della corrente; la velocità media di attrito lungo la sezione risulta essere pari a $7.9 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Pertanto, perseguendo questo metodo, si esclude la possibilità di esistenza di una portata solida al fondo. Ciò viene confermato anche dai risultati ottenuti con approccio globale che attestano una velocità di attrito di $5.5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, valore ancora più lontano, rispetto a quello ottenuto con ADCP, dal superamento della soglia di movimento.

Appurato con i metodi indiretti che non vi siano le condizioni necessarie al trasporto solido di sedimenti di fondo, si vuole ora verificare che la funzione Bottom Tracking dell'ADCP non restituisca un tracciato che denoterebbe invece la presenza di fondo mobile. Per fare ciò, ci si è ancorati con il gommone in modo tale da mantenere la strumentazione ADCP fissa e si è misurata la velocità dell'HydroBoard (*Boat Velocity*) con riferimento al fondo per evidenziarne eventuali spostamenti apparenti verso monte, frutto invece del layer mobile in spostamento verso valle ($V_b = -V_{BT}$). Vengono mostrate, in Figura 52, le 611 campionature effettuate dall'ADCP ad intervalli regolari di 1

secondo per una durata totale della misurazione di 10 minuti e 11 secondi. Come ci si aspettava, non viene individuato un tracciamento pseudo-lineare dello spostamento apparente dell'imbarcazione verso monte, a riprova del corretto utilizzo della strumentazione ADCP e a conferma che la funzione di Bottom Tracking possa essere utilizzata per gli scopi preposti e che essa non individui tracciati solo in apparenza risultato di trasporto solido e frutto invece di errori sistemici. I leggeri movimenti oscillatori mostrati sono invece la conseguenza del brandeggio dell'imbarcazione che è stata vincolata, per mezzo di una corda, ad un'ancora che le permettesse di non essere trascinata verso valle dalla corrente.

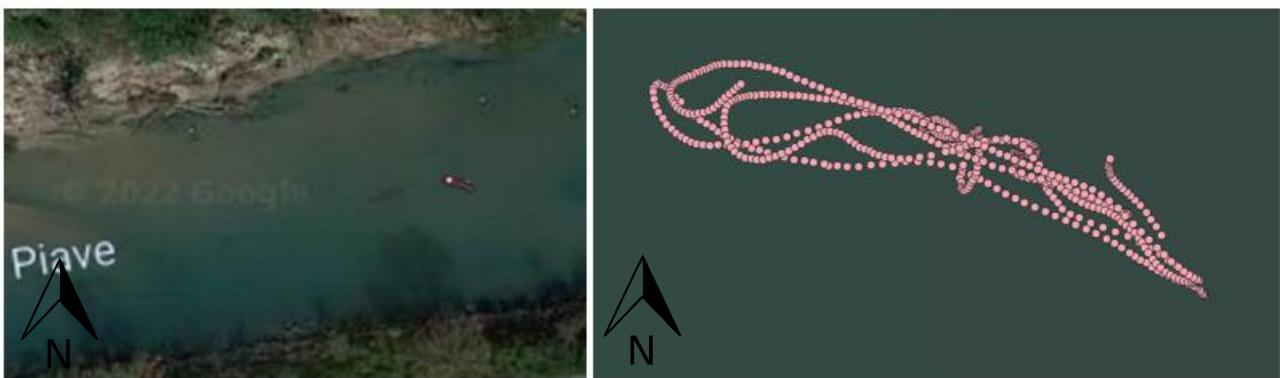


Figura 52 Bottom Track Ponte di Piave – immagine satellitare (zoom, a destra)

In Figura 53 viene mostrato, su una griglia in metri, lo stesso tracciato per meglio comprendere visivamente l'ampiezza delle oscillazioni. Il punto iniziale di campionamento è centrato nell'origine degli assi.

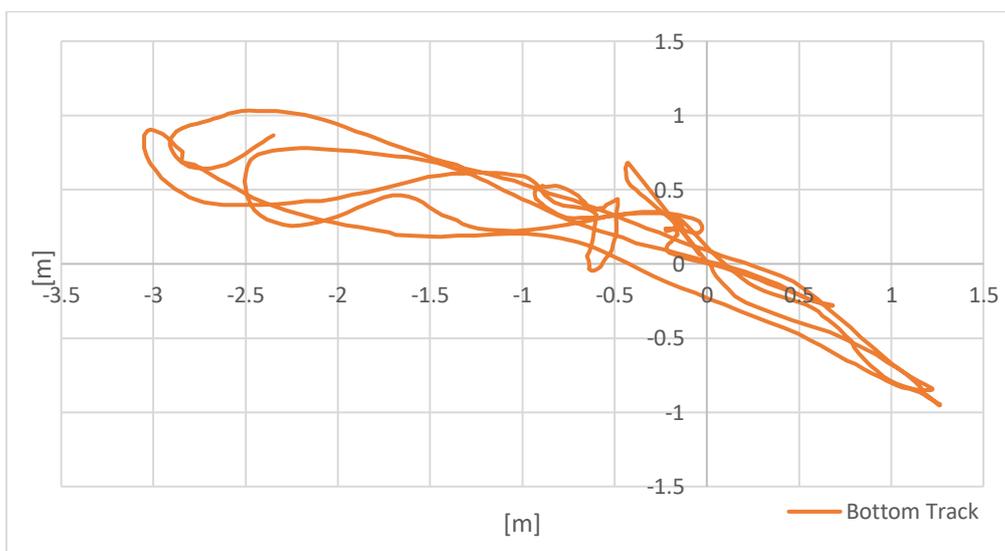


Figura 53 Bottom Track Ponte di Piave

8 Conclusioni

La tesi investiga la potenzialità della tecnica Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) per la misura del trasporto solido di fondo sviluppando una metodologia di calcolo innovativa che unisce la misura della velocità dello strato di fondo tipica della tecnica ADCP con la stima dello spessore attivo del trasporto calcolato con l'equazione dell'equilibrio alla traslazione con uno schema stratiforme alla Du Boys.

Lo studio confronta nella sezione del fiume Po a Boretto stime di trasporto eseguite con ADCP, misure con campionatore di fondo e stime con formulazioni di letteratura.

L'analisi svolta ha permesso di mettere in risalto le potenzialità della tecnica acustica basata sull'impiego dell'ADCP nella misura del trasporto solido di fondo sia per stime indirette, ossia basate sulla stima della velocità di attrito, sia su stime dirette della velocità di fondo e relativa portata solida. Tali potenzialità sembrano promettenti per la stima di questa variabile, di non facile misurazione, anche in relazione alle difficoltà intrinseche e alle relative incertezze di misura riscontrate nell'utilizzo del classico campionatore di fondo di Helley-Smith.

Le misure eseguite con la strumentazione ADCP mantenuta in posizione fissa nella corrente fluviale permettono di misurare la velocità del fondo attivo. Quest'ultimo è quindi calcolato con due approcci: il primo fa riferimento alla teoria di Van Rijn (1984), il secondo si basa sull'equilibrio alla traslazione in riferimento alla teoria di Du Boys.

La portata solida ottenuta con la metodologia di Van Rijn è sottostimata rispetto ai risultati del campionatore, mentre con la metodologia alla Du Boys le differenze si riducono sebbene in entrambi i casi si attestano valori dello stesso ordine di grandezza. Inoltre, l'ADCP, a differenza dei campionatori di fondo tradizionali, non rappresenta né un ostacolo al naturale deflusso della corrente in prossimità del fondo né interagisce in maniera diretta con il fondo alveo stesso. Un'altra considerazione riguarda difatti la variabilità dei risultati ottenuti con le due tecniche: se i risultati ottenuti con ADCP risultano congrui tra loro nelle diverse campionature, quelli relativi al campionatore di fondo risultano più variabili.

Interessante anche il confronto con le equazioni tradizionali che si basano sulla stima della velocità d'attrito e quindi dello sforzo tangenziale al fondo rispetto ad un valore critico di inizio del movimento. Infatti, l'uso dell'ADCP, per la sua caratteristica di profilare la velocità lungo la verticale

evidenzia un'ulteriore potenzialità della misura ADCP proprio nella stima della velocità d'attrito attraverso una interpolazione lungo la verticale delle misure di velocità a diversa profondità.

Se le considerazioni derivanti dai risultati ottenuti dovessero essere verificate, attraverso l'analisi di un campione di dati più robusto, e in diverse condizioni fluviali, sia in termini di portata che di sito-specificità l'uso dell'ADCP per la misura del trasporto solido di fondo potrebbe diventare una metodologia solida in grado di restituire risultati con migliore risoluzione spaziale e temporale rispetto al campionamento tradizionale e renderebbe misure tuttora molto dispendiose in termini di tempo, strumentazione e personale molto più veloci, sicure ed eseguibili anche in caso di eventi di piena.

9 Bibliografia

SonTek, a Division of YSI Incorporated, RiverSurveyor S5/M9 System Manual Firmware Version 2.00.

SonTek, a xylem brand, SonTek 2000, <https://www.sontek.com/riversurveyor-s5-m9>.

SonTek, a xylem brand, Technical Paper, Blanking distance vs Screening Distance, understanding the differences between the two concepts.

SonTek, a xylem brand, Technical Paper, Instructions on the compass calibration procedure for SonTek's RiverSurveyor S5 and M9 systems November 2012.

Rennie, C., Millar, R. G., Church, M. A., (2002). Measurement of bed load velocity using an acoustic Doppler current profile," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 128(5), p. 473–483. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:5(473).

Teledyne RD Instruments, A Teledyne Technologies Company, Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation A practical Primer.

Woods Hole Oceanographic institution, Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/instruments/instruments-sensors-samplers/acoustic-doppler-current-profiler-adcp/>.

USGS, science for a changing world, Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat, 2013. DOI: 10.3133/tm3A22.

William W. Emmett, Geological Survey Professional Paper 1139, A field Calibration of the Sediment-Trapping Characteristics of the Helley-Smith Bedload Sampler.

Federal Interagency sedimentation project, Sampling with the US BL-84 Bed-Load sampler.

Gomez, Basil, Naff, R.L., and Hubbell, D.W., 1989, Temporal variations in bedload transport rates associated with the migration of bed forms: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 14, p. 135-156.

Gomez, Basil; Hubbell, D.W., and Stevens, H.H., November 1990, *Water Resources Research*, Vol. 26 No. 11, At-a-Point Bed Load Sampling in the Presence of Dunes, p. 2717-2731.

Chow V.T., Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company Inc., 1959.

Mueller, D.S., and Wagner, C.R. (2006). Application of the loop method for correcting acoustic Doppler current profiler discharge measurements biased by sediment transport: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006–5079, 18 p.

Conevski, S., Guerrero, M., Winterscheid, A., Rennie, C.D., Ruther, N., (2020). Acoustic sampling effects on bedload quantification using acoustic Doppler current profilers, Journal of Hydraulic Research, DOI: 10.1080/00221686.2019.1703047

Conevski, S., Guerrero, M., Rennie, C.D., Ruther, N., (2020). Towards an evaluation of bedload transport characteristics by using Doppler and backscatter outputs from ADCPs, Journal of Hydraulic Research, DOI: 10.1080/00221686.2020.1818311

Slaven Conevski, Massimo Guerrero, Nils Ruther, Colin David Rennie, Laboratory Investigation of Apparent Bedload Velocity Measured by ADCPs under Different Transport Conditions.

Agenzia Regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia dell'Emilia-Romagna. Annali Idrologici 2020.

Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto, arpaV, www.arpa.veneto.it https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/idrologia/file-e-allegati/rapporti-e-documenti/idrologia-regionale/idrologia-regionale-la-rete-idrometrica/bacino-del-piave/Relazione_0618_Q_2008-2017_PontePiave_rev011.pdf.

Ray Kostaschuk, Jim Best, Paul Villard, Jeff Peakall, Mark Franklin, Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler.

Autorità di bacino distrettuale delle Alpi Orientali, Bacino idrografico del fiume Piave, <http://www.adbve.it/Documenti/piavecom.html>.

EINSTEIN, H.A. (1942). "Formulas for the Transportation of Bed-Load." Transactions, ASCE, Vol. 107, pp. 561-573.

Mueller, D.S., and Wagner, C.R. (2006). Application of the loop method for correcting acoustic Doppler current profiler discharge measurements biased by sediment transport: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006–5079, 18 p.

Van Rijn, L. (1984). Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 1431–1456.

Latosinski, F.G., Szupiany, R.N., Guerrero, M., Amsler, M.L., Vionnet, C., (2017). The ADCP's bottom track capability for bedload prediction: Evidence on method reliability from sandy river applications, *Flow Measurement and Instrumentation*, Volume 54, 2017, Pages 124-135, ISSN 0955-5986, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.01.005>.

Aronne Armanini, *Principles of River Hydraulics*, Springer, Pages 5-6.