

1222 · 2022  
**800**  
ANNI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

**TESAF**

Dipartimento: Territorio e Sistemi Agro-Forestali  
Corso di Laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio  
Curriculum: Tutela e Riassetto del Territorio

Stima della resistenza al moto in corsi d'acqua reali e di  
laboratorio tramite la legge di Katul

Relatore: Prof. Carlo Gregoretti

Studente: Matteo Salvalaggio

Matricola: 1234545

SOMMARIO	
1.INTRODUZIONE .....	4
2.RESISTENZA AL MOTO .....	5
2.1 ANALISI DELLA BOUNDARY RESISTANCE .....	6
2.1.1 FORZE DI TAGLIO .....	7
2.1.2 PRESSIONI .....	8
3. RESISTENZA IN BASSA E MEDIA SOMMERGENZA .....	9
3.1 RESISTENZA DI FORMA .....	11
4. LA LEGGE DI KATUL .....	17
5. I DATI A DISPOSIZIONE .....	19
5.1 RICHARD D. HEY .....	19
5.2 GEORGE A. GRIFFITHS .....	21
5.3 JAMES C. BATHURST .....	25
5.4 IAN REID .....	28
6. ELABORAZIONE DATI .....	30
7. RISULTATI .....	32
7.1 DATI DI LABORATORIO .....	37
7.2 DATI DI CAMPO .....	40
7.3 DATI DI CAMPO E LABORATORIO A CONFRONTO .....	48
8. CONCLUSIONI .....	52
-BIBLIOGRAFIA .....	54

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano i fedelissimi compagni di corso Francesco, Alberto ed Enrico, disponibili per ogni parziale, preappello o appello che fosse, per ogni risata, per ogni partita a carte in giardino, per ogni spritz, per ogni pasto in mensa.

Si ringraziano Michele e Giacomo, i più preparati, i più bravi, ma senza vantarsi o farlo pesare, sempre pronti ad aiutare.

Un ringraziamento al prof. Gregoretti, per i suggerimenti e le preziose indicazioni, per la sua disponibilità, per l'attenzione verso i suoi studenti e soprattutto la passione per il proprio lavoro.

Si ringraziano le immancabili patate prezzemolate della mensa e il caffè macchiato cacao (non per Enri).

Un ringraziamento a C. per aver gestito, per quanto possibile, la mia ansia e per avermi dettato centinaia di cifre da inserire in Matlab.

A mamma che voleva un figlio laureato.

A papà che bilanciava la tensione che mamma generava, prendendo le mie difese.

Infine, il ringraziamento più grande, all'Agripolis, l'oasi verde che ti fa dimenticare il traffico, lo smog, il cemento e l'asfalto, in particolare grazie ai suoi prati che in primavera accolgono noi studenti desiderosi di una pausa e ai suoi campi coltivati che sanno di libertà e sapere.

## 1. INTRODUZIONE

La conoscenza della velocità del flusso d'acqua in un canale può rivelarsi un'importante risorsa qualora si abbia a che fare con ingegneria fluviale, analisi di rischio, sorveglianza e tutela ambientale e calcolo del deflusso. Di conseguenza la conoscenza di come tale velocità venga ostacolata per la resistenza che diversi elementi del corso d'acqua esercitano su di essa risulta fondamentale.

La resistenza al flusso è un parametro base all'interno dell'idraulica che permette di determinare la quantità d'acqua che un canale può trasportare nonostante siano presenti delle forze che ostacolano il normale passaggio dell'acqua, come le forze tangenziali oppure per influenza di altri parametri come velocità della corrente, profondità e pressioni.

Lo studio di come un corso d'acqua eserciti resistenza al moto dell'acqua risulta particolarmente utile in materia di previsione delle piene e per tutti gli studi di carattere geomorfologico, sedimentologico e in generale in merito alla stabilità del corso d'acqua.

In questo elaborato si cercherà di applicare la legge di Katul, in merito alla stima della resistenza al moto in corsi d'acqua reali e di laboratorio, a diversi set di dati raccolti da esperti dagli anni '80 agli anni '90. Sarà posta particolare attenzione allo studio del parametro  $C_u$  che contraddistingue le legge di Katul, andando a studiare come questo si comporta nei vari casi di studio e come si discosta dal valore base stilato da Katul. Vi sarà inoltre uno studio approfondito sulla velocità del flusso e di quanto le velocità calcolate dagli autori delle ricerche direttamente in campo si discostino rispetto alla velocità calcolata con la legge di Katul. Lo studio della legge di Katul verrà eseguito prima di tutto sui dati di laboratorio e successivamente sui dati di campo, così da osservarli indipendentemente l'uno dall'altro, successivamente verranno combinati e se ne osserveranno le differenze.

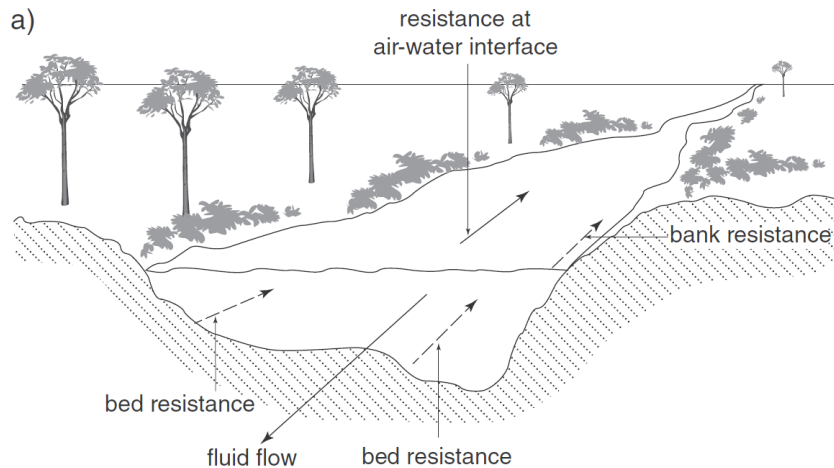


Figura 1: resistenze in un corso d'acqua (Powell, 2014)

## 2. RESISTENZA AL MOTO

La resistenza al moto è il risultato di diverse forze che agiscono sul flusso d'acqua ostacolando, per assurdo all'opposto qualora un flusso d'acqua non fosse soggetto a resistenza continuerebbe in un processo di accelerazione continua per puro effetto della forza di gravità (Leopold,1964).

All'interno di fiumi alluvionali, ovvero corsi d'acqua che scorrono su un letto di detriti trasportato da loro stessi, il concetto di resistenza è fortemente connesso all'attrito che le sponde esercitano al passaggio dell'acqua, si parla quindi di *boundary resistance* ovvero un fenomeno di frizione che si instaura tra sponde, fondo e flusso d'acqua. Essendo quindi una forza esercitata da una superficie viene espressa come forza per unità di spazio quindi *stress*, in particolare essendo una forza tangenziale al flusso d'acqua e non perpendicolare viene denominata *shear stress* ovvero sforzo tangenziale " $\tau$ ". In dettaglio con la *boundary resistance* si intende la misurazione dell'energia potenziale e cinetica che il fiume disperde per attrito con fondo e sponde; il fiume disperde energia sottoforma di calore e rumore e di conseguenza il gradiente energetico man mano che ci si avvicina alla foce sarà sempre minore.

Il concetto di resistenza al moto in un corso d'acqua non vede in gioco solo la *boundary resistance*, ma anche altre tipologie di resistenza, come la resistenza dovuta alla presenza di vegetazione "*vegetation resistance*", resistenza di canale "*channel resistance*", *spill resistance* e la resistenza per attrito coi sedimenti "*sediment transport resistance*".

- *Vegetation resistance*: causata dalla resistenza dovuto alla presenza di flora lungo le sponde e detriti legnosi (Wilcox 2006).
- *Channel resistance*: nota anche come resistenza interna è il risultato di complesse perdite di energia dovute alla conformazione del corso d'acqua che causa intrecciamento dei flussi e alterazioni della pendenza del pelo d'acqua e del fondo. (Millar 1999).
- *Spill resistance*: dovuta all'energia che viene dissipata laddove la corrente incontra grandi ostacoli, come massi, clasti o detriti, che causano turbolenze per continua accelerazione e decelerazione del flusso. Innanzitutto, quantificare la spill resistance non è affatto semplice, in quanto la descrizione e l'analisi quantificata delle geometrie del confine e del flusso d'acqua e la loro riproduzione è altamente articolata. La spill resistance è un fenomeno resistivo tipico della forme di fondo a step pool, Church e Zimmermann nel 2007 hanno provveduto a classificarle come vediamo nella fig.5. il flusso sopra una sequenza di step "scalini" viene classificato come "submerged jet" flusso immerso oppure "free jet" flusso libero a seconda dell'altezza di caduta dell'acqua rispetto al punto di salto. Il flusso sommerso si presenta su pendenze dolci dove l'altezza di caduta è minore rispetto al punto di lato dell'acqua, questo vuol dire che in seguito a uno step l'acqua risalirà di livello per poi ricadere dopo il successivo step "A", man mano che la portata cresce questo salto verrà sempre più colmato dalla corrente e il flusso si trasformerà a regime uniforme "C". Se siamo invece in presenza di pendenze forti allora il punto di caduta dell'acqua sarà situato ad un'altezza maggiore rispetto la successivo punto di caduta, si formeranno flussi liberi (seconda colonna della figura 5), a basse portate il flusso subisce delle vere e proprie cadute a ciascun salto idraulico, man mano che la portata cresce il flusso matura in un flusso di transizione e notiamo come il salto si "allunghi". Qualora la portata aumentasse ulteriormente il flusso forma un ricircolo di corrente in ciascuna pool.

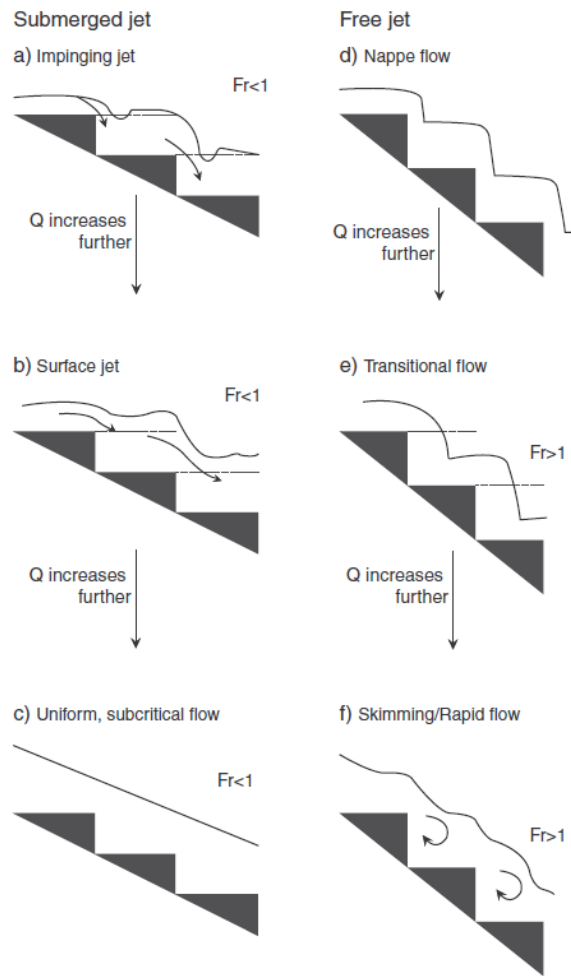


Figura 2: classificazione delle step pool (Church e Zimmermann 2007)

## 2.1 ANALISI DELLA BOUNDARY RESISTANCE

La resistenza al flusso in un canale è un fenomeno che si manifesta in quanto l'acqua è un fluido viscoso, la viscosità è un parametro fisico che permette di classificare i liquidi in base alla loro resistenza al moto, il miele risulta essere un liquido molto viscoso; infatti, è richiesta maggior energia per mescolare tale liquido che l'acqua.

Vi sono due forze che contribuiscono a generare resistenza, ovvero gli sforzi tangenziali (mezze frecce) e le pressioni (frecce intere). Dalla figura 2 è possibile comprendere quali siano i comportamenti di tali forze e di come siano una complementare all'altra.

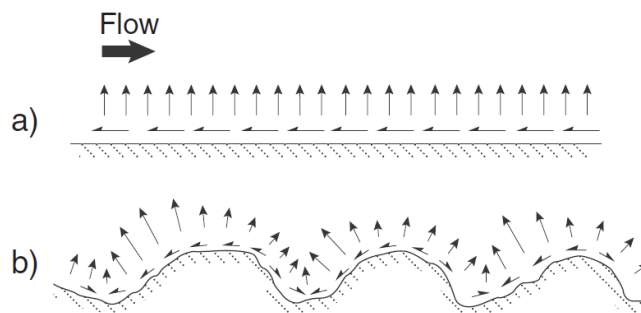


Figura 3: schematizzazione di pressioni e sforzi tangenziali (Powell, 2014)

Nella maggior parte dei fiumi non confinati le rive presentano materiale che va a disporsi non esattamente tangenzialmente alla direzione del flusso, potrebbero disporsi parallelamente, perpendicolarmente o assumere varie angolature e di conseguenza si presentano sia sforzi di taglio che pressioni. Che vengono quantificate in base al rapporto tra i valori quali: profondità media o raggio idraulico e dimensione del materiale che caratterizza il letto, tale parametro  $h/D$  viene denominato sommergenza relativa.

### 2.1.1 FORZE DI TAGLIO

Le forze tangenziali definite in letteratura “shear forces”, sono una diretta conseguenza della viscosità del fluido e agiscono tangenzialmente alla superficie del solido di contatto, viene perciò anche definita “skin friction”.

Le forze tangenziali risultano essere la principale fonte di resistenza se il parametro  $h/D$  è elevato ed il letto risulta piano e composto da sedimenti vari e compatti, ovvero tipicamente i fiumi a fondo ghiaioso.

Dal punto di vista fisico è possibile analizzare le forze tangenziali come il risultato di forze generate dal trasferimento di quantità di moto all'interno di un fluido in movimento, analizzando questo concetto dal punto di vista microscopico possiamo spiegarlo come, a causa di un movimento casuale delle particelle all'interno del fluido che si urtano a vicenda. Dal punto di vista macroscopico la quantità di moto si trasferisce a causa del movimento di grandi masse d'acqua per via della corrente.

È possibile quantificare lo sforzo tangenziale tramite il numero di Reynolds

$$Re = UR/v \quad (2.1)$$

Dove  $U$  è la velocità media del flusso e  $v$  è la viscosità del fluido.

Se  $Re < 500$  il flusso è definito laminare poiché tutte le alterazioni sono assorbite dalla viscosità e il flusso si comporta come se composto da diversi strati che scorrono l'uno sull'altro senza mischiarsi lateralmente

Se  $Re > 2000$  il flusso viene definito turbolento, il movimento dell'acqua è irregolare e le correnti si mischiano tra loro.

Tendenzialmente si è osservato che nei canali non confinati il flusso è difficilmente lineare.

### 2.1.2 PRESSIONI

Le pressioni si manifestano per differenza di pressione tra flusso superficiale e flusso di fondo dovuta alla presenza di elementi, massi e clasti, che si estendono dal confine del letto alterando il normale flusso dell'acqua. La forza si oppone al flusso "form drag" è data dal prodotto di tutte le pressioni per la superficie dell'area interessata.

Per comprendere meglio come agiscono pressione e velocità di fronte a un ostacolo, in questo caso una sfera, analizziamo la figura sottostante.

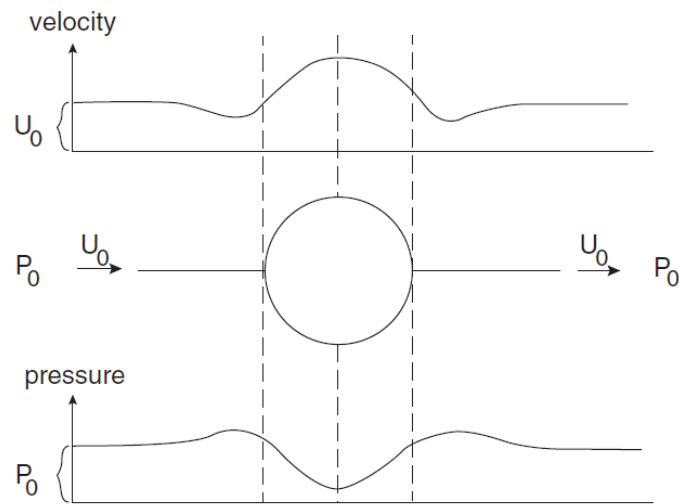


Figura 4: schematizzazione della variazione di pressione e velocità del flusso in presenza di un ostacolo (Powell, 2014)

Una massa di fluido che si muove in direzione del flusso decelera avvicinandosi all'ostacolo per poi accelerare raggiungendo il massimo della velocità al vertice dell'ostacolo, per poi decelerare nuovamente e infine accelera per tornare alla situazione di originario andamento del flusso pre-ostacolo, ovvero la velocità di flusso libero.

Per quanto riguarda lo studio della variazione di pressione torna utile l'equazione di Bernoulli e noteremo un comportamento opposto rispetto alla velocità; la pressione è al suo massimo nel momento precedente all'incontro con l'ostacolo, assume un valore minimo in corrispondenza al vertice dell'ostacolo per poi tornare al suo massimo una volta superato. È proprio la variazione di pressione ad incidere una variazione nella velocità del fluido. A monte dell'ostacolo il gradiente di pressione è negativo e produce una forza concorde con la direzione del flusso, la forza promuove l'accelerazione del fluido, il gradiente è quindi favorevole. A valle della sfera invece abbiamo il comportamento opposto, il gradiente di pressione aumenta col flusso e produce una forza che si oppone ad esso, il gradiente viene quindi definito sfavorevole.



### 3. RESISTENZA IN BASSA E MEDIA SOMMERGENZA

Nel 2007 Nikora delineò, in base ai profili di velocità, quattro condizioni di sommergenza, alta, media, bassa e parziale (con elementi del fondo che si protraggono dalla superficie libera). In alta sommergenza lo stato di scabrezza è seguito da due strati in cui il profilo di velocità segue rispettivamente un andamento logaritmico e di difetto di velocità. In media sommergenza vi è uno strato al di sopra dello strato di scabrezza in cui il profilo di velocità non è logaritmico. In bassa sommergenza lo strato di scabrezza si estende fino alla superficie libera, mentre in sommergenza parziale si ha solo il sottostrato di interfaccia (Gregoretti, 2022).

È possibile quantificare le quattro condizioni precedentemente citate, utilizzando come parametro il rapporto profondità scabrezza  $h/K_s$ , di conseguenza si osserva che:

- Con  $h/K_s > 10$  siamo in condizioni di alta sommergenza
- Con  $h/K_s \leq 4$  siamo invece in bassa sommergenza

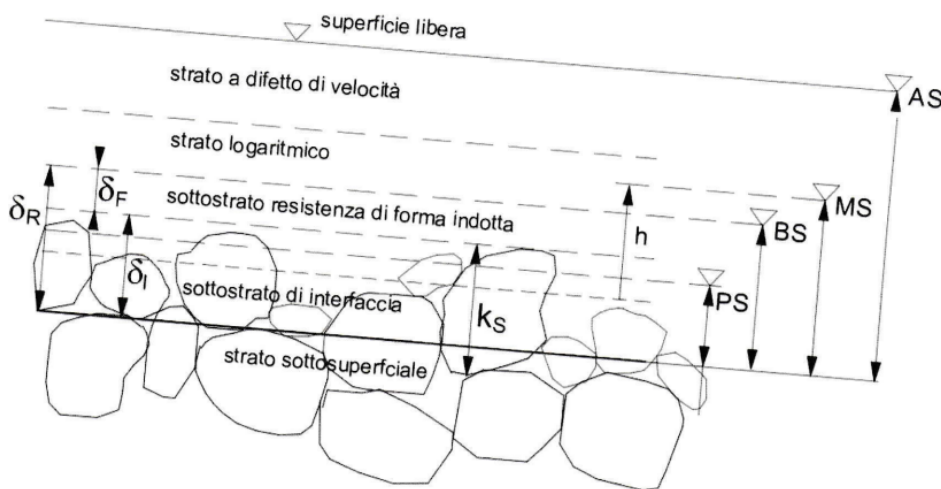


Figura 5. quattro condizioni di sommergenza a confronto (Gregoretti, 2022)

Procederemo ora concentrandoci esclusivamente alle condizioni di media e bassa sommergenza, in questo campo la resistenza di forma è la principale responsabile del rallentamento del flusso d'acqua, questo non si verifica nel caso dell'alta sommergenza poiché il fattore determinante è la resistenza d'attrito (rallentamento dovuto all'interferenza tra gli strati fluidi).

Nella maggior parte delle equazioni che si incontrano in letteratura in merito alla resistenza al moto, vi sono dei fattori che vengono comunemente utilizzati dai ricercatori, procediamo ora nell'analizzarne i più comuni:

Numero di Reynolds:  $Re = V * L/u$ . Dove  $V$  è la velocità media della corrente,  $L$  la profondità del condotto fluviale e  $u$  la viscosità del fluido. Come descritto in precedenza il numero di Reynolds risulta un ottimo indicatore della condizione del flusso d'acqua, che può presentarsi all'opposto in due modi: laminare o turbolento. Il numero di Reynold, utilizzato in tutte le principali equazioni finalizzate alla stima della resistenza al moto, è un valore particolarmente importante in quanto permette di determinare se lo strato d'acqua superficiale sia in condizione laminare o turbolenta. Con laminare intendiamo un flusso in cui le particelle d'acqua si muovono in direzione parallela alla direzione dele trasporto, con turbolento si intende invece un flusso in cui predomina un movimento caotico in tutte le direzioni ma comunque è presente un movimento principale nella direzione del trasporto. Di conseguenza se un flusso si presenta in uno stato turbolento si verificheranno frammentazioni del flusso che comportano l'inizio del fenomeno della resistenza di forma e successivamente l'inasprimento di quest'ultima. Tale numero esprime quindi il rapporto tra le forze inerziali al numeratore e quelle viscosive al denominatore

I flussi d'acqua sono laminari solo alle velocità molto basse o a profondità ridotte, mentre i flussi turbolenti sono più comuni nei processi di trasporto e deposizione di sedimenti in ambiente acqueo. Per esempio, un flusso laminare può essere il movimento di un ghiacciaio in quanto particolarmente lento e con profondità ridotte e viscosità maggiore di quella dell'acqua.

I coefficienti della resistenza di forma sono il più delle volte indipendenti dal numero di Reynolds specialmente quando il flusso è in condizione sia laminare che turbolenta, ma essi decrescono all'aumentare del numero di Reynolds in tutti quei flussi di transizione, ovvero regimi di corrente tra il laminare e il turbolento (Bathurst 1981). La regione transizionale nei casi di media e bassa sommergenza risulta particolarmente ampia e di conseguenza, così come si nota nella maggior parte dei corsi d'acqua montani, fa sì che la resistenza al flusso dovrebbe in realtà manifestare comportamenti opposti a ciò che il numero di Reynolds prevede. Si riconosce però che la forma irregolare dei massi presenti in alveo sia in realtà la principale causa del rallentamento del flusso.

Il più delle volte insieme al Numero di Reynolds si associa anche il Numero di Froude che permette di descrivere gli stati della corrente.

Numero di Froude: è un gruppo adimensionale che mette in relazione la forza d'inerzia e la forza peso:  $Fr = V_0 / (g * L_0)$ , dove  $v$  è la velocità media,  $g$  l'accelerazione di gravità e  $L$  la profondità dell'acqua; oppure sotto un'altra ottica è un parametro che mette in relazione la velocità della corrente con la velocità delle onde nella corrente. Un elemento che sporge in parte o totalmente dalla superficie del pelo libero causa un disturbo in superficie che si tramuta in una perdita di energia, questo fenomeno viene denominato resistenza di pelo libero e viene condizionata dal numero di Froude e dalla sommergenza relativa. Il numero di Froude è riassumibile in due campi,  $>1$  o  $<1$ .

- $Fr < 1$ : regime di flusso inferiore o subcritico. Un'onda può propagarsi sopra la corrente perché viaggia più velocemente della corrente stessa.
- $Fr > 1$ : regime di flusso superiore o supercritico. La corrente è più veloce dell'onda
- $Fr = 1$  la corrente è sufficientemente forte a spianare le forme di fondo

In presenza di regime subcritico un corso d'acqua a fondo mobile potrebbe presentare una varietà di forme di fondo, tra cui ripples e dune; se il regime si presenta invece in condizione supercritica il fondo potrebbe risultare piano o presentare antidune.

Secondo Bathurst (1982) all'aumentare del numero di Froude anche la sommergenza relativa cresce e il numero di elementi che sporge dal pelo libero cala causando una minor resistenza di forma; la resistenza è inversamente proporzionale al numero di Froude.

Dalla ricerca di Vito Ferro del 1996 "The influence of roughness geometry and shields parameter on flow resistance in gravel bed channels" si evince che il numero di Froude può anche non essere inserito nella legge di resistenza al moto in quanto non comporta alcun miglioramento al risultato finale.

Nella stima della resistenza al moto risulta di primaria importanza la conoscenza delle particelle componenti il letto (Ferro 1996) in quanto solamente con questo dato è possibile stimare i coefficienti di resistenza che vedremo in dettaglio al paragrafo 4 quando approfondiremo in dettaglio la legge di resistenza di Katul. Nello studio delle particelle che caratterizzano il letto del corso d'acqua è indispensabile procedere con lo studio dei diametri caratteristici, in questo caso tratteremo i percentili  $d_{50}$  e  $d_{84}$  che vanno a indicare la percentuale di sedimento più piccolo di una data dimensione, es.  $d_{84} = 0.013$  indica che l'84% del sedimento presente in alveo è più piccolo di 0.013 m. Oltre ai diametri caratteristici risulta di primaria importanza conoscere la concentrazione  $N$  degli elementi in quanto se  $N$  cresce aumenta anche la resistenza al moto ma non linearmente in quanto qualora  $N$  diventasse molto alto i nostri sedimenti di studio risultano essere talmente vicini da formare un unico strato di fondo, il flusso tra questi elementi non incrementa né cala per uniformità del fondo e la resistenza totale cala.

### 3.1 RESISTENZA DI FORMA

Con resistenza di forma si intende quella resistenza tipica degli alvei a fondo mobile che viene intensificata qualora lungo il percorso della corrente si manifestassero alterazione del profilo longitudinale, come barre, ripples, pool, step, ecc...

Gli alvei fluviali scavati in depositi di materiali alluvionali non coesivi, sono modellati dalla corrente che in essi scorre e la scabrezza del contorno è determinata in larga misura da questa azione di modellamento. Tra i processi di modellazione fluviale dobbiamo distinguere quelli:

- a larga scala “morfologia fluviale”, che determinano la morfologia del corso d’acqua: assetto planimetrico (fiume rettilineo, multicursale o a treccia, meandriforme), profilo longitudinale di fondo, sezione trasversale. La influenza della morfologia del fiume sulla resistenza al moto, che ancora oggi non è ben quantificabile, può essere valutata in modo semplificato con il criterio illustrato in § 1.5.

- a scala locale “forme di fondo” , ai quali si deve ascrivere la configurazione del fondo. L’effetto che la configurazione (insieme delle forme) del fondo ha sul coefficiente di resistenza al moto della corrente che vi scorre sopra è in molti casi estremamente rilevante. Alla perdita di energia procurata dalla sola scabrezza del fondo, supposto piatto e privo di forme, si deve aggiungere la perdita dovuta al fenomeno di separazione della corrente che si verifica nel brusco allargamento a valle delle dune o delle altre forme di fondo. Si stima che la perdita dovuta alle forme di fondo sia almeno 5 ÷ 10 volte più grande di quella provocata dalla scabrezza del contorno: Znamenskaya (1967) ha valutato che le perdite di energia che si hanno sulla faccia di valle delle forme di fondo sono di un ordine di grandezza maggiori di quelle sulla faccia di monte. Vari studi sperimentali citano casi di diminuzione del fattore di attrito dell’ordine di dieci volte con l’aumento della portata al passaggio di una piena. Questa diminuzione di resistenza non è giustificata dalla diminuzione del valore della scabrezza relativa ma deve ascriversi al fatto che le forme di fondo vengono spianate quando la velocità della corrente aumenta e il profilo di distribuzione di velocità sulla sezione trasversale viene alterato in senso favorevole al moto quando aumenta l’intensità del trasporto solido. In ragione dei diversi stati del fiume, il letto fluviale può assumere configurazioni differenti a causa dei fenomeni locali di erosione e di deposito che scavano o accumulano il materiale di fondo fino a raggiungere una situazione di equilibrio. Il letto costituito da materiale granulare incoerente può atteggiarsi variamente in rapporto alla portata della corrente che vi scorre sopra:

1. INCRESPATURE (ripples), che hanno la forma di piccole dune, a profilo triangolare con faccia di monte dolcemente acclive e superficie leggermente convessa, faccia di valle ripida, lunghezza di non più di 25 ÷ 30 cm e altezza di qualche cm. Le increspature, disposte in ranghi ad occupare la larghezza del letto, si formano in sedimenti più fini di 0.6 mm e si spostano verso valle con una celerità molto più bassa della velocità della corrente, si formano in regime subcritico e possono presentarsi sia come creste dritte (2D) o irregolari (3D);

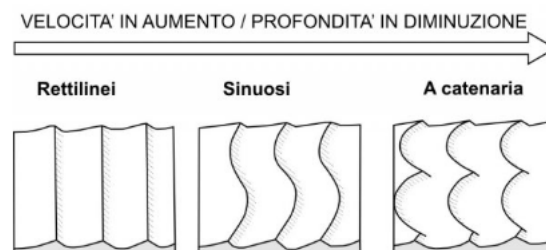


Figura 6: tipologie di ripples in relazione a velocità della corrente e profondità.

3. BARRE: elementi dal profilo simile alle increspature ma lunghezza di cresta paragonabile alla larghezza del letto e altezza simile al tirante d’acqua medio. Possono essere descritte come un corpo sedimentario mobile incluso nell’alveo fluviale attivo, la cui migrazione è connessa al trasporto solido al fondo. Vi sono differenti tipi di barre che sono caratteristici di una determinata morfologia di alveo.

Le sue componenti principali sono: testa (parte sopra-corrente), corpo (parte intermedia), coda (parte sottocorrente). Sono identificabili principalmente sette tipologie di barre: laterali, di meandro, di giunzione, longitudinali, a losanga, diagonali e infine le dune. Si riporta nelle figura sottostante la schematizzazione delle bare numerate così come enunciate in precedenza.

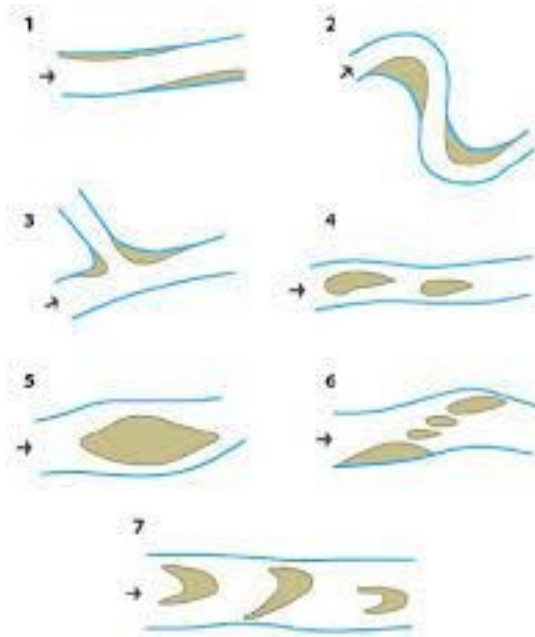


Figura 7: schematizzazione delle barre (Kellerhals et al., 1976)

4. DUNE: forme di fondo di dimensioni intermedie tra le increspature e le barre e si spostano verso valle in maniera simile alle increspature, regime subcritico;

5. FORME DI TRANSIZIONE: ovvero tutte quelle forme che consistono in un insieme non ordinato di increspature, dune e zone a fondo piatto;

6. FONDO PIATTO: conformazione che si presenta quando la corrente lamina la superficie del letto rendendola piatta ed orizzontale, si verifica ove la corrente ha la capacità di spianare il letto. Si necessita un regime supercritico,

7. ANTIDUNE: forme peculiari che hanno un profilo sinusoidale e dimensioni determinate dalla velocità della corrente. Le antidune interagiscono fortemente con le onde alla superficie libera e possono muoversi verso monte, verso valle o rimanere ferme; sono simmetriche in sezione verticale con creste arrotondate. Si muovono in direzione opposta alla corrente e si sviluppano con correnti molto veloci e poco profonde e sono on fase con le onde di superficie. Si conservano molto difficilmente perché appena la velocità della corrente diminuisce tendono a trasformarsi in forme piane (plane bed), si osserva tale trasformazione nella figura sottostante. Si presentano laddove il flusso è in regime supercritico.

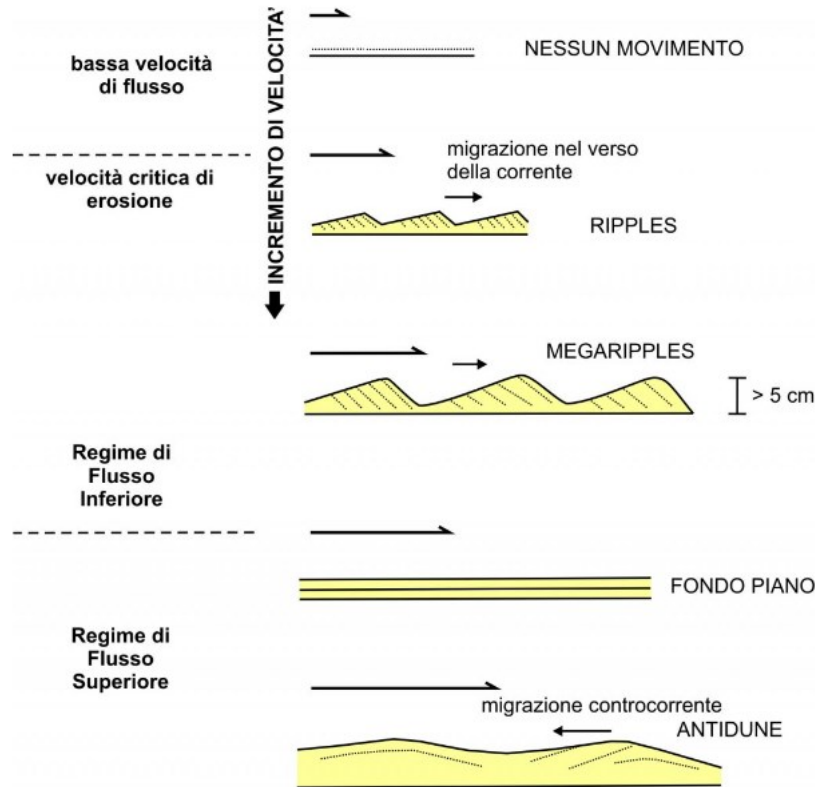


Figura 8: processo di trasformazione da ripples a antidune (Geology is the way, 2022)

8. RIFFLE POOL: una forma di fondo molto particolare in quanto comprende la presenza di una concatenazione di elementi i riffle e le pool, le riffle sono porzioni del letto in cui la profondità d'acqua è molto bassa, nelle pool invece la profondità cresce, si possono intendere come delle pozze. Questa forma di fondo tipica degli alvei in ghiaia si forma in regime supercritico, le riffle sono zone di deposito del sedimento, dove va a depositarsi il sedimento di maggiori dimensioni, nelle pool invece si concentra il materiale più fino in quanto quello grossolano viene scalzato dalla corrente turbolenta che si innesta nel pool data la sua conformazione. È possibile infine distinguere le riffle e le pool in base alla loro altezza dal punto di vista longitudinale; infatti, le riffle rappresentano degli alti topografici, la profondità è minore e la velocità è maggiore, nelle pool invece, più profonde e con corrente più lenta, si definisce un basso topografico.

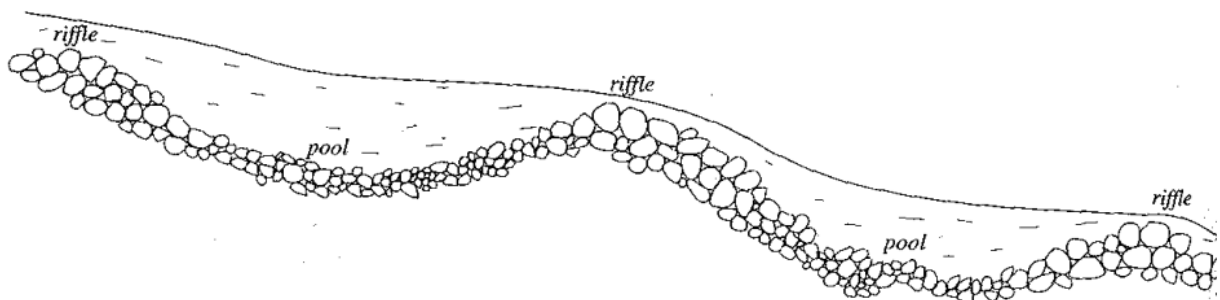


Figura 9: sequenza riffle pool (Geology is the way, 2022)

Le diverse forme di fondo sono raggruppate nelle generali categorie di:

- regime inferiore (lower regime): increspature, dune;
- regime di transizione (transitional regime): forme di transizione, fondo piatto;
- regime superiore (upper regime): antidune.

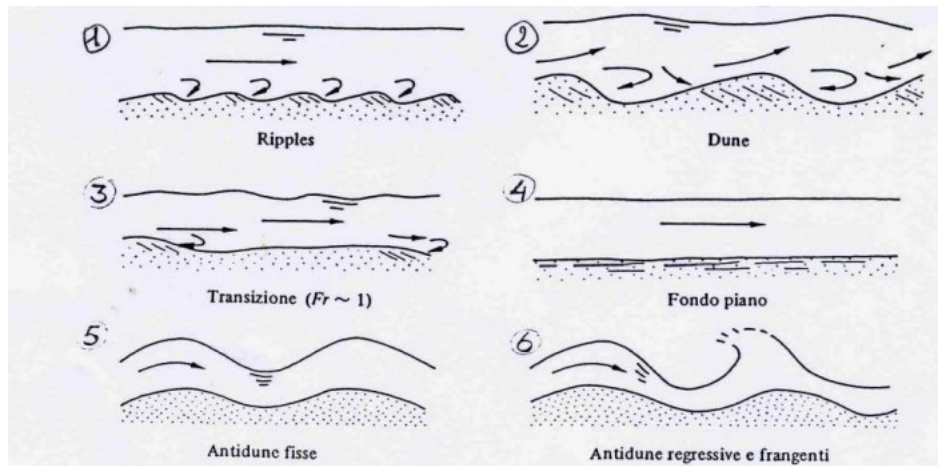


Figura 10: profilo longitudinale delle forme di fondo (Geology is the way, 2022)

È opportuno ricordare che la resistenza dovuta alle forme di fondo interessa solo il letto del fiume, sul quale, appunto, si muove il materiale e si sviluppano le forme di fondo. Invece, non interessa le sponde, troppo pendenti per consentire l'accumulo del materiale mobilitato e, quindi, la formazione di forme di fondo, o le golene, ricoperte da vegetazione. Il fondo fluviale incoerente viene dilavato dal passaggio della corrente, che rimuove e trasporta con sé i granuli più piccoli, lasciando sulla superficie del letto uno strato - corazza - formato dagli elementi di maggiore dimensione: il fenomeno è detto di corazzamento (armouring) del letto. Al passaggio delle portate minori la corrente scorre sulla corazza la cui scabrezza significativa  $K_s$  è maggiore di quella degli strati sottostanti che contengono anche elementi più minuti. Al passaggio di una piena, con l'aumento della portata e della azione di trascinarsi della corrente, la corazza viene distrutta e il sottofondo esce allo scoperto: di conseguenza diminuisce la  $K_s$  del fondo.

Come espresso in precedenza, il parametro di bassa - media sommergenza si aggira in torno al valore di  $h/K_s \leq 4$ , questo valore è tipico dei corsi d'acqua montani che tipicamente manifestano forma di fondo come cascate, step-pool o letto piano. È possibile osservare la morfologia a cascata laddove la pendenza è molto alta e i ciottoli o massi sono disposti senza ordine in maniera casuale e grossolana. La resistenza al flusso in questo caso è dominata dalla presenza di tali forme di fondo e dal fenomeno della spill resistance a causa della combinazione di flussi poco profondi e la presenza di elementi grossolani di disturbo.

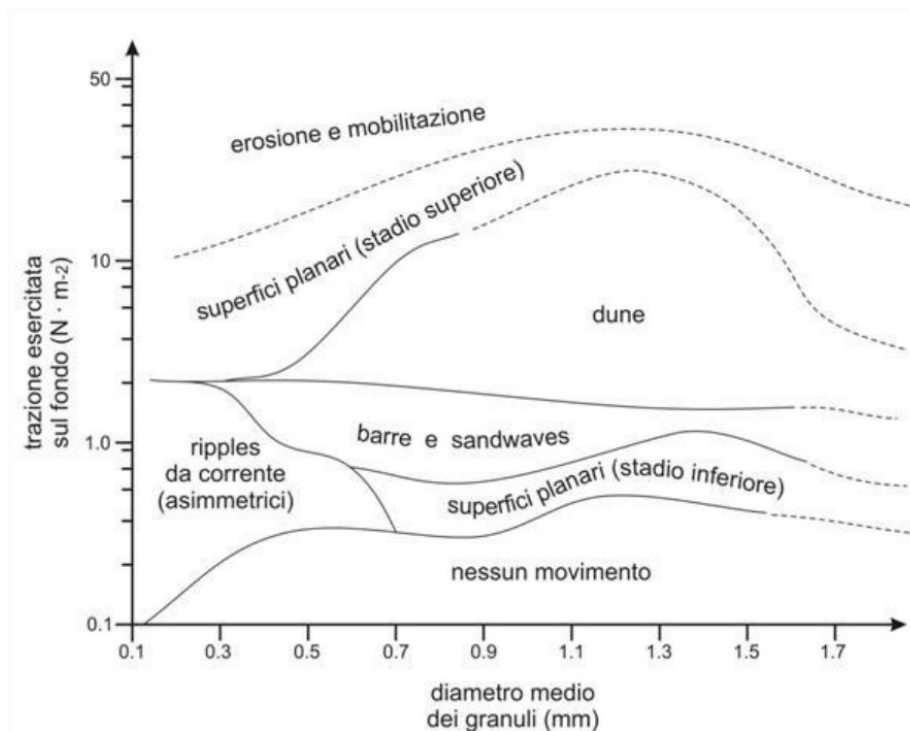


Figura 11:diagramma bidimensionale ( M.R. Leeder, 1982)

Questi elementi, che in termini di resistenza al moto possono essere visti come elementi di disturbo, contribuiscono alla resistenza di forma in maniera diversa soprattutto in base a due fattori: distribuzione e ordinamento. I ricercatori da sempre si sono dedicati allo studio di come il flusso varia in presenza di elementi che ne ostacolano il libero scorrimento, in particolare di come la distribuzione di tali elementi influisca sul rallentamento della corrente. Canovaro nel 2004 si impegnò nel delineare come la densità spaziale degli elementi di disturbo, intesa come il rapporto tra il numero di elementi presenti per unità di superficie e il numero massimo di elementi che possono essere disposti nella medesima area, e la loro disposizione planimetrica sono i principali fattori che determinano la resistenza al moto. In particolare, la resistenza è massimizzata quando la densità spaziale è di circa 0.2-0.4 e il 90% dello sforzo tangenziale si comporta una resistenza di forma.

Le particelle predisposte in maniera trasversale al flusso generano una resistenza nettamente maggiore rispetto a quelle particelle che sono disposte parallelamente al flusso, in condizione intermedia ovvero quando le particelle non sono né ortogonali al flusso né parallele si genera una resistenza intermedia. La disposizione spaziale non influisce il valore di densità spaziale.

Secondo Bathurst si può attribuire un valore di disturbo agli elementi che sporgono dal pelo libero generando resistenza, si può quantificare questo parametro come il rapporto tra l'area bagnata dell'elemento di disturbo (colpita direttamente dal flusso) e l'area del letto occupata da tale elemento. Questo procedimento risulta però particolarmente ostico, perciò raramente viene utilizzato, si preferiscono utilizzare parametri più diretti e semplici da calcolare come la sommergezza relativa, il numero di elementi totali di disturbo (stimata tramite una funzione del rapporto tra larghezza del canale e lunghezza dell'asse degli elementi di disturbo). Gli elementi che sporgono dal pelo libero dell'acqua comportano una riduzione della velocità del flusso in quanto l'acqua incontra un ostacolo, ma l'acqua infiltrandosi tra questi ostacoli acquista in realtà velocità.

Secondo Thorn e Zevenbergen (1985), la maggior parte delle equazioni valide per la stima della resistenza al moto risultano inefficienti in quanto riportano un errore del 30%, andato a sovrastimare la velocità media. Inoltre, Bathurst afferma che tali equazioni sono molto più difficili da applicare che accurate, in quanto è molto



semplice inciampare in errori di misurazione, per esempio, la stima della portata ed è difficile comprendere a pieno il ruolo di tutti gli attori che contribuiscono alla resistenza.

Nella successiva figura viene schematizzato il comportamento del flusso d'acqua qualora incontrasse degli elementi di disturbo disposti in quattro differenti configurazioni:

- A. Un elemento isolato nel corso d'acqua causa una lieve irregolarità nel flusso, gli elementi di disturbo sono talmente distanziati che il flusso dopo aver incontrato il primo ostacolo ha il tempo necessario per tornare al suo stato di quiete prima di incontrarne un altro; Essendo un evento isolato non vi sono complicazioni;
- B. Qualora nel corso d'acqua vi fossero elementi disposti a distanza più ravvicinata il flusso non è in grado di rilassarsi tra i due ostacoli;
- C. Lo spazio tra gli elementi si riduce ulteriormente creando piccole interferenze nel flusso
- D. Gli elementi risultano spazialmente molto vicini tra loro e il flusso non lineare sfiora al cresta degli ostacoli andando a formare piccole correnti tra gli spazi degli elementi.

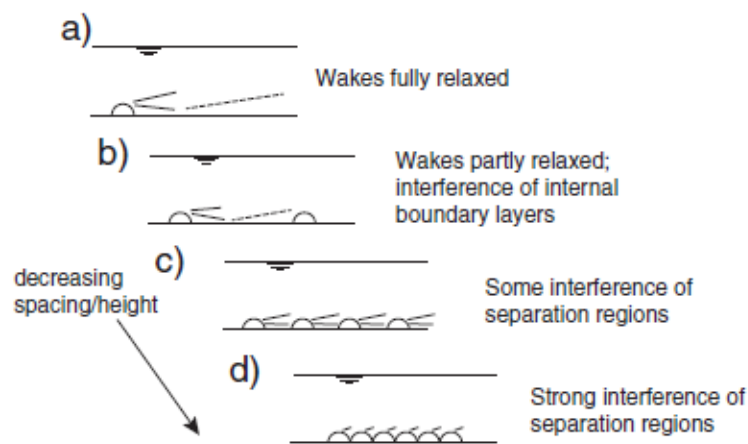


Figura 12: schematizzazione flusso-ostacolo (Powell, 2014)



#### 4. LA LEGGE DI KATUL

La resistenza al moto può essere quantificata tramite l'applicazione di formule che partono dal parametro di velocità media  $V$  e che lo mettono in relazione alla pendenza del fondo o del pelo libero e alla profondità. In termini di velocità vi sono quattro principali equazioni: di Chezy (4.1), di Gauckler-Strickler (4.2), Darcy-Weissbach (4.3) e Manning (4.4); vengono esplicitate di seguito:

$$V = C \sqrt{h i f} \quad 4.1$$

$$V = K_s h^{2/3} \sqrt{i f} \quad 4.2$$

$$V = \sqrt{8 g h i f / f} \quad 4.3$$

$$V = \frac{kn}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad 4.4$$

In particolare, si ricorda che la legge di Manning coincide con quella di Gauckler-Strickler, infatti il parametro di resistenza di Manning "n" è inteso come  $n = 1/K_s$  e  $if = \text{sen}$  (angolo di inclinazione del fondo).

In 4.1 il parametro  $C$  è il coefficiente di resistenza di Chezy, mentre in 4.2 il parametro di resistenza è dato da  $K_s$ , in 4.3 da  $f$  e in 4.4 da  $n$ . Con  $h$  si intende la profondità,  $R$  è il raggio idraulico ovvero il rapporto area perimetro, e con  $S$  e  $if$  si indica la pendenza,  $g$  l'accelerazione di gravità.

È possibile confrontare tra loro i diversi coefficienti di resistenza ottenendo la seguente uguaglianza:

$$\sqrt{\frac{f}{8}} = \frac{n}{R^{1/6} k_n} = \frac{\sqrt{g}}{c} = \frac{\sqrt{gRS}}{v}$$

Partendo dal parametro di velocità è possibile ottenere un profilo di velocità di carattere logaritmico andando a rapportare la velocità  $V$  alla quantità  $u^*$ , ovvero la velocità di attrito:

$$u^* = \sqrt{g h i f} = (g R S)^{1/2} \quad 4.5$$

Dividendo le formula di velocità di Chezy, Gauckler-Strickler e Darcy-Weissbach otteniamo le seguenti relazioni tra i tre coefficienti di resistenza:

$$\frac{V}{u^*} = \frac{c}{\sqrt{g}} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad 4.6$$

$$\frac{V}{u^*} = K_s h^{1/6} \quad 4.7$$

$$\frac{V}{u^*} = K_s h^{1/6} / \sqrt{g} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad 4.8$$

In media e bassa sommergenza Bathurst osserva una dipendenza di  $\sqrt{8/f}$  dall'inclinazione del fondo ed interpolando i dati rilevati da alcuni corsi d'acqua esprime tale valore con due diverse coppe di coefficienti in base all'inclinazione del corso d'acqua, maggiore o minore di 0.08. Dalle due equazioni si evince che a parità di  $h/d_{84}$  all'aumentare dell'inclinazione del fondo i valori di  $V/u^*$  che assume valore pari a  $\sqrt{(8/f)}$  diminuiscono. Le equazioni appena citate sono applicabili in base al valore di sommergenza d'esame:

$$\text{- In bassa e media sommergenza: } \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{V}{u^*} = \alpha \frac{h}{k_s} \quad 4.9$$

$$\text{- In alta sommergenza: } \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{V}{u^*} = \beta (h/Ks)^{1/6} \quad 4.10$$

Dove con  $\alpha$  intendiamo valori tra 7 e 8 e con  $\beta$  tra 1 e 4.

La prima equazione 4.9 è maggiormente influenzata dalla resistenza di forma mentre la 4.10 dalla resistenza di attrito, ovvero dall'effetto di rallentamento progressivo tra gli strati fluidi che è predominante in alta sommergenza.

Per ottenere un legge di resistenza al moto in entrambe le condizioni di sommergenza, Ferguson ha proposto la stima del numero di Darcy  $f$  tramite un'equazione in legge id potenza variabile, che tiene conto di entrambi i contributi di sommergenza:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{V}{u^*} = \frac{h}{k_s} = \frac{a_1 a_2}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 \left(\frac{h}{Ks}\right)^{5/3}}} \quad (4.11)$$

Nella stima della resistenza al moto si procede mettendo a confronto la velocità rilevata tramite misurazione e la velocità calcolata tramite formule, l'errore tra queste due velocità secondo Ferguson, diminuisce quando si utilizzano leggi di resistenza in cui la velocità media risulta funzione della portata invece che dal rapporto  $h/Ks$ . Con  $Ks$  intendiamo la scabrezza del fondo e non il parametro di resistenza di Gauckler-Strickler. In questo modo si risente meno degli errori di misure dei dati di portata, velocità, profondità, e  $d_{84}$ ; principalmente per tre motivi:

- La misura della portata risulta più affidabile di quella della profondità media a causa dell'irregolarità del fondo e della superficie libera.
- Un qualsiasi errore di misura sulla velocità, portata o  $d_{84}$  si ripercuote allo stesso modo sui valori determinati tramite misure e i valori determinati tramite equazioni per cui i punti si muovono quasi paralleli alla bisettrice nel grafico di confronto tra i valori determinati tramite misure e tramite equazioni.
- In media e bassa sommergenza l'utilizzo di un'equazione che è funzione di  $h/Ks$  risulta più sensitiva ai possibili effetti distorsivi sul valore associato a  $Ks$  per l'effetto delle forme id fondo come barre, massi e in generale le macroscabrezze che creano restringimenti e gradini con conseguente dissipazione dell'energia e aumento di resistenza, causando rallentamento della corrente e profondità maggiori.

La legge di Katul stimata nel 2002 permette di determinare la velocità in modo diretto nota la profondità, tramite un'equazione di carattere logaritmico. Per la stima della resistenza al moto Katul propone un'equazione, valida per media e bassa sommergenza, ottenuta dall'integrazione dei profili di velocità:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{V}{u^*} = Cu \left[ 1 + \frac{Ks}{h} \log \left( 0.648 \cosh \left( 1 - \frac{h}{Ks} \right) \right) \right] \quad 4.12$$

Il parametro Cu nell'equazione 4.12 viene assunto da Katul pari a 4.5, valore a metà tra i valori corrispondenti alla turbolenza che sviluppa rispettivamente sopra una densa copertura forestale ed un parete scabra, tale valore risulta pari a 4.5 quando siamo in condizioni di  $h/Ks < 7$ . In dettaglio il valore di Cu per turbolenza sopra una densa copertura vegetale è 3.3, mentre quello in regime di parete scabra risulta 5.8. Il caso di scabrezza in media e bassa sommergenza risulta compreso tra la turbolenza su copertura vegetale densa e turbolenza in regime di parete scabra per cui il valore di Cu risulta compreso tra i due valori di Cu limite e viene assunto quindi pari al valore medio:  $3.3 + (5.8-3.3)/2 = 4.5$  media (Katul,2002).

La legge di Katul viene utilizzata per la valutazione della resistenza al moto in condizioni di media e bassa sommergenza ovvero in cui tale parametro espresso anche come  $h/Ks$  risulta tipicamente  $< 4$ .

## 5. I DATI A DISPOSIZIONE

Per questa ricerca e la successiva elaborazione dati sono stati usati 4 articoli mirati alla stima della resistenza al moto in diverse condizioni di sommergenza, questi articoli si estendono in un arco temporale che va dalla fine degli anni '80 alla metà degli anni '90. Nella seguente tabella vengono riportati gli articoli su cui si è basata la ricerca, mettendo in evidenza l'epoca di studio, il sito e se i dati fanno riferimento a un'analisi in campo o un'analisi di laboratorio

Autore	Anno di Pubblicazione	Luogo di studio	Tipo di ricerca
Hey	1979	Regno Unito	Campo
Griffiths	1981	Nuova Zelanda	Campo
Bathurst	1981	Colorado, USA	Laboratorio
Reid	1994	Israele	Campo

### 5.1 RICHARD D. HEY

Hey, 1979 "Flow Resistance in Gravel Bed Rivers"

In questo articolo pubblicato per il "Journal of Hydraulics Division", Hey si impegna nella ricerca di un metodo che permetta di quantificare la resistenza al moto nei corsi d'acqua a fondo mobile. Secondo Hey vi sono diversi fattori che influenzano la resistenza al moto nei corsi d'acqua, questi fattori agiscono in maniera differente in base allo stato del fondo del corso d'acqua. In particolare, qualora fossimo in presenza di un letto fisso, i principali fattori che contribuiscono alla resistenza al moto sono la distorsione interna, la skin friction (ovvero l'attrito tra flusso d'acqua e sedimenti/sponde) e la spill resistance (ovvero le perdite di energie che il flusso subisce per frequenti variazioni di velocità). Nel caso di corso d'acqua a fondo mobile il fattore che influisce principalmente nella resistenza al moto sono le forme di fondo, ma potrebbe anche ridursi se si presentasse una forma di fondo che riduce la turbolenza del flusso diminuendo la resistenza. La skin friction risulta il principale agente nei corsi d'acqua rettilinei, perché in questo specifico caso la spill resistance è trascurabile e difficilmente si vanno ad individuare forme di fondo e di conseguenza il flusso risulta più lineare e non disturbato. La geometria del canale risulta quindi essere la principale causa di resistenza nei canali rettilinei, insieme alle variazioni di altezza del fondo.

Trattandosi di fiumi rettilinei, con letto e sponde fisse di materiale uniforme, la resistenza al moto viene calcolata tramite l'equazione di Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log \left( \frac{aR}{D} \right) \quad 5.1$$

Dove  $f$  è il coefficiente di frizione,  $R$  il raggio idraulico,  $D$  la dimensione dei sedimenti e  $a$ , che varia in base alla geometria del corso d'acqua, indica l'effetto della forma del canale sulla resistenza al flusso.

Nella ricerca di Hey vengono effettuate 30 misurazioni, mettendo in evidenza “if” ovvero la pendenza del flusso d’acqua, la portata “Q”, l’altezza dal fondo “h”, il coefficiente di resistenza al flusso “f” e il percentile “d<sub>84</sub>”; si riporta in seguito la tabella:

N.	if (%)	Q (m <sup>3</sup> /s)	h (m)	f	d <sub>84</sub>
1	0.003	0.995	0.243	0.751	0.25
2	0.00666	5.73	0.323	0.178	0.078
3	0.003	84.872	1.379	0.075	0.08
4	0.00401	6.965	0.368	0.153	0.065
5	0.00233	15.29	0.613	0.092	0.065
6	0.031	1.192	0.141	0.928	0.2
7	0.0075	13.1	0.447	0.159	0.095
8	0.00753	28.3	0.514	0.114	0.095
9	0.00095	12.5	0.465	0.107	0.046
10	0.0009	23.9	0.666	0.089	0.046
11	0.00631	12.1	0.434	0.125	0.069
12	0.0061	2.66	0.146	0.209	0.05
13	0.0031	17.4	0.46	0.101	0.05
14	0.0035	2.66	0.245	0.261	0.1
15	0.0068	17.4	0.427	0.17	0.1
16	0.0025	189.82	2.225	0.088	0.16
17	0.00281	141.783	1.91	0.079	0.114
18	0.00188	3.69	0.31	0.1	0.096
19	0.001	443.31	3.405	0.066	0.2
20	0.0225	0.847	0.155	0.478	0.14
21	0.00133	5.741	0.422	0.164	0.14
22	0.00072	13.2	0.564	0.032	0.069
23	0.00166	28.5	0.883	0.068	0.069
24	0.00298	13.03	0.5	0.085	0.1
25	0.00227	26.4	0.824	0.075	0.1
26	0.00049	12.5	1.212	0.2	0.067
27	0.00065	24	1.394	0.119	0.067
28	0.00175	16.081	0.511	0.022	0.06
29	0.0009	389.125	2.383	0.028	0.11
30	0.001	407.52	1.989	0.024	0.121

TAB.1 HEY 1979

## 5.2 GEORGE A. GRIFFITHS

George A. Griffiths, 1981, "Flow Resistance in Coarse Gravel Bed Rivers"

In questo articolo pubblicato nel luglio del 1981 per il "Journal of Hydraulics Division", Griffith cerca di dare una risposta in merito alla quantificazione della resistenza al flusso in presenza di moto turbolento. Vengono identificati tre elementi come principali cause per la resistenza al moto, in quanto responsabili della conformazione del fondo e delle sponde del corso d'acqua: skin friction (forze di taglio), distorsione interna e spill resistance.

Inoltre, per offrire un'analisi più completa, vengono studiati due regimi di trasporto solido di fondo:

- Trasporto solido di fondo scarso e conformazione letto fissa;
- Trasporto solido di fondo presente che comporta alterazioni del fondo.

Nel primo caso i principali fattori che determinano una scabrezza significativa del fondo sono la distorsione interna (conformazione particolare del fondo) oppure la resistenza di forma per presenza di forme di fondo generate da passate alluvioni. Nel secondo caso qualsiasi forma di fondo è responsabile della resistenza al moto, sia che queste forme siano totalmente nuove o riattivate in seguito a nuove piene, ricordiamo che a differenza dei fiumi in sabbia che possono presentare svariate forme di fondo, i fiumi in ghiaia possono manifestare tipicamente dune o barre.

Lo scopo dello studio di Griffiths è di fornire delle equazioni che permettano di quantificare la resistenza al moto all'interno di fiumi in ghiaia, in modo da fornire un metodo di previsione di fenomeni idraulici sia dal punto di vista della progettazione fluviale ingegneristica sia per la tutela ambientale dei corsi d'acqua.

Sono stati raccolti set di 136 dati, tramite 72 osservazioni in 46 fiumi neozelandesi con fondo in ghiaia; i dati raccolti dal Ministero del Lavoro e dello Sviluppo e dalle autorità di bacino come parte di un programma basato sulla misurazione del flusso in tali canali; i canali candidabili per tale studio dovevano presentare determinati requisiti quali:

- Tratto rettilineo e larghezza più o meno costante lungo tutto il percorso;
- Poca vegetazione lungo le sponde e nel letto;
- Sponde stabili ;
- Letto privo di vistose irregolarità;
- Canali larghi di sezione trapezoidale;

In tutti i fiumi analizzati il numero di Froude ( $F = \frac{u}{\sqrt{gh}}$ ) risulta sempre  $<1$ , quindi siamo in presenza di regime subcritico, un'onda può propagarsi sopra la corrente perché viaggia più velocemente di essa.

La sommergenza relativa viene calcolata utilizzando il percentile  $d_{50}$ , per adattarlo alle altre ricerche utilizzate per questo elaborato, abbiamo trasformato il  $d_{50}$  in  $d_{84}$  andando a moltiplicare il  $d_{50}$  \*2.2.

Sono stati raccolti 136 set di dati, riportando in particolare: portata, velocità, larghezza alveo, raggio idraulico (area/perimetro), pendenza del pelo libero e percentile  $d_{50}$  (si ricorda che con  $d_{50}$  si intende la dimensione per cui il 50% del sedimento è più fine).

Griffith utilizza il raggio idraulico "R", che si calcola come rapporto tra l'area della sezione liquida e il perimetro della sezione, invece della profondità media "h".

Si riporta in seguito la tabella dati utilizzata per la ricerca:

N.	Q (m <sup>3</sup> /s)	V(m/s)	B (m)	R (m)	if (%)	d <sub>50</sub>
1	4.59	1.08	11	0.38	0.00865	0.051
2	0.34	0.26	5.5	0.23	0.00125	0.051
3	6.99	1.19	11.9	0.48	0.0049	0.102
4	7.9	1.12	15.8	0.44	0.011	0.152
5	6.09	0.79	19.2	0.4	0.0036	0.102
6	1.78	0.23	19.8	0.39	0.00035	0.076
7	0.054	0.16	2.9	0.12	0.00042	0.015
8	80.1	1.17	36	1.86	0.0014	0.102
9	15.9	0.39	32	1.23	0.00016	0.102
10	9.94	0.28	29	1.18	0.0017	0.102
11	64.3	1.01	35.2	1.76	0.00102	0.102
12	24.2	0.56	31.1	1.37	0.00039	0.102
13	34.4	0.74	32.3	1.41	0.0006	0.102
14	8.04	0.96	13.4	0.59	0.0109	0.152
15	18.3	0.44	25.9	1.56	0.000095	0.025
16	145	1.28	64	1.7	0.00088	0.102
17	256	1.09	123	1.89	0.000344	0.025
18	190	0.73	121	1.68	0.000336	0.025
19	10.9	0.65	54.9	0.26	0.0019	0.019
20	5.52	0.27	44.5	0.45	0.00017	0.051
21	5.55	0.53	25.6	0.39	0.00073	0.025
22	10.4	0.69	18.3	0.8	0.00063	0.025
23	2.89	0.23	38.4	0.34	0.00081	0.051
24	34.4	0.98	59.1	0.59	0.00108	0.051
25	315	2.07	61.3	2.33	0.0014	0.051
26	88.3	1.43	60	1	0.00119	0.051
27	392	2.14	65.5	2.72	0.00109	0.051
28	213	1.73	59.7	1.98	0.001	0.051
29	179	1.83	60	1.6	0.0012	0.051
30	80.4	1.28	57	1.06	0.00111	0.051
31	0.433	0.22	11.3	0.17	0.0011	0.015
32	50.1	1.09	38.4	1.15	0.00082	0.025
33	2.29	0.34	35.4	0.2	0.00167	0.051
34	1.93	0.61	12.5	0.26	0.0025	0.051
35	0.76	0.25	20.1	0.15	0.00022	0.013
36	113	1.52	56.1	1.29	0.0014	0.025
37	129	1.53	79.6	1.05	0.00285	0.051
38	693	3.32	76.2	2.7	0.00181	0.051
39	20.4	0.88	29	0.79	0.00071	0.051
40	85.5	1.28	58.5	1.12	0.00215	0.051
41	5.97	0.66	19.2	0.45	0.0016	0.025
42	1.64	0.48	6.7	0.48	0.00092	0.025
43	63.1	0.77	51.2	1.63	0.00037	0.038
44	27	0.43	46.6	1.31	0.00027	0.038

45	3.97	0.77	8.2	0.59	0.00548	0.152
46	1.86	0.5	8.5	0.41	0.00468	0.152
47	0.95	0.35	8.4	0.33	0.004	0.152
48	0.7	0.3	8.8	0.27	0.0038	0.152
49	10.1	0.31	62.5	0.52	0.000458	0.127
50	4.22	0.39	29.3	0.37	0.00135	0.152
51	217	3.16	26.2	2.17	0.002	0.152
52	94.8	1.7	31.7	1.66	0.00121	0.102
53	58.5	1.43	47.2	0.86	0.0053	0.127
54	50.5	1.3	47.9	0.81	0.00314	0.063
55	39.5	0.58	72.8	0.93	0.0004	0.076
56	1.44	0.37	9.8	0.43	0.00062	0.025
57	18.9	0.84	35.7	0.62	0.00175	0.051
58	32.6	0.86	22.3	1.63	0.00043	0.019
59	6.17	0.63	14.6	0.62	0.00057	0.019
60	1.95	0.69	10.4	0.27	0.0017	0.025
61	24.2	0.89	35.1	0.77	0.00134	0.102
62	32.9	2.28	13.4	0.94	0.00682	0.046
63	50.7	0.95	36	1.45	0.000431	0.025
64	0.069	0.091	5.2	0.14	0.00062	0.021
65	85.7	1.25	77.1	0.87	0.00124	0.013
66	73.6	0.98	93.3	0.8	0.00077	0.013
67	2.75	0.5	6.4	0.73	0.00099	0.038
68	1.61	0.38	6.1	0.6	0.00097	0.038
69	8.44	1.08	11.6	0.63	0.00182	0.051
70	84.4	1.31	71	0.91	0.0031	0.1552
71	73.4	0.99	56.1	1.29	0.00166	0.025
72	942	1.89	91.4	5.04	0.000345	0.038
73	387	1.28	93	3.17	0.000399	0.038
74	1471	1.94	101	6.89	0.000338	0.038
75	879	1.71	91.4	5.22	0.000268	0.038
76	1540	2.08	113	6.42	0.000314	0.038
77	18.2	0.41	57.6	0.76	0.00047	0.076
78	15.3	0.39	54.9	0.7	0.00036	0.076
79	24.4	0.49	36.6	1.33	0.00038	0.076
80	46.2	0.43	91.4	1.19	0.000085	0.019
81	80.1	1.14	61.9	1.12	0.0009	0.038
82	3.82	0.44	11.9	0.72	0.00206	0.301
83	6.29	0.43	29.3	0.5	0.0006	0.013
84	4.93	0.62	21.9	0.36	0.0012	0.025
85	246	3.04	43.9	1.8	0.0033	0.038
86	186	2.88	43.7	1.36	0.00467	0.045
87	180	2.8	43.6	1.37	0.00461	0.045
88	152	2.68	43	1.25	0.0049	0.045
89	472	2.98	44.7	2.89	0.002	0.045
90	88.9	2.29	36.8	0.96	0.00517	0.045
91	48.3	1.77	33.2	0.9	0.00502	0.045
92	96.2	2.3	41.6	0.97	0.00449	0.045
93	107	2.27	43	1.03	0.00481	0.045

94	230	3.06	43.5	1.53	0.00489	0.045
95	282	2.69	44.5	2.03	0.00351	0.045
96	436	3.27	40.2	2.86	0.00563	0.051
97	328	2.75	39.6	2.48	0.00612	0.051
98	2409	3.96	153.4	3.82	0.00349	0.019
99	617	2.8	108	1.96	0.00427	0.051
100	625	2.9	108	1.94	0.00388	0.051
101	11.4	0.94	33	0.37	0.00339	0.017
102	14.3	1.11	33.1	0.38	0.00376	0.017
103	12.3	1.08	33.1	0.34	0.0037	0.017
104	18.3	1.2	33.7	0.45	0.0039	0.017
105	94.6	2.14	32	1.34	0.0044	0.017
106	23.8	1.53	30	0.51	0.0042	0.017
107	103	2.38	33.5	1.25	0.005	0.017
108	388	2.67	52	2.72	0.0025	0.012
109	537	3.11	52.2	2.97	0.0025	0.012
110	75.8	1.68	35	1.23	0.0016	0.012
111	501	3.5	52.5	2.51	0.0024	0.012
112	23.7	0.86	29	0.92	0.0012	0.012
113	33	2.28	13.4	0.95	0.00682	0.046
114	575	2.71	73.2	2.85	0.00249	0.025
115	453	2.41	67.4	2.72	0.00218	0.025
116	357	2.26	61.9	2.47	0.00185	0.025
117	300	2.01	60	2.42	0.00124	0.025
118	245	1.99	59.1	2.05	0.00121	0.025
119	396	2.07	68.4	2.7	0.00119	0.025
120	98	1.31	45.1	1.63	0.00083	0.013
121	309	2.65	38.7	2.77	0.00131	0.038
122	518	3.34	42.1	3.24	0.00197	0.038
123	382	3.13	39.3	2.79	0.00202	0.038
124	354	3.22	42.3	2.6	0.00247	0.038
125	328	2.93	40.5	2.51	0.00206	0.038
126	100	2.44	30.8	1.28	0.00651	0.038
127	60	1.96	29.3	1	0.00649	0.038
128	47	1.77	29.3	0.89	0.00651	0.038
129	185	3.25	30.8	1.75	0.00652	0.038
130	327	4.29	31.1	2.29	0.0069	0.038
131	288	4.31	31.1	2.01	0.00714	0.038
132	159	3.14	31.1	1.56	0.00661	0.038
133	95	2.53	29.3	1.2	0.00646	0.038
134	19	1.03	29.3	0.63	0.00653	0.038
135	107	2.6	29.3	1.31	0.00654	0.038
136	182	1.44	39.3	3.05	0.00125	0.038

TAB.2 GRIFFITHS 1981



### 5.3 JAMES C. BATHURST

Bathurst, 1981 “Resistance Equation for Large-Scale Roughness”

In questo articolo pubblicato per il “Journal of Hydraulics Division”, Bathurst cerca di dare una risposta in termini generali e ingegneristici, a quella che è la resistenza al moto nei corsi d’acqua, quali sono i fattori che vanno a modificarla e infine delineare una teoria applicativa stilando un’equazione. In particolare, Bathurst cerca di applicare la sua metodologia ai corsi delle regioni montane americane, in particolare in quei fiumi interessati da un substrato grossolano che fino ad allora non avevano attirato l’attenzione dei ricercatori. Per trovare quindi una soluzione alla quantificazione della resistenza al moto nei corsi d’acqua, Bathurst svolge la ricerca all’interno del Laboratorio di Idraulica della Colorado State University.

Con Large-Scale Roughness Bathurst intende una caratteristica del fondo che presenta elementi grossolani che per le loro dimensioni interessano la superficie libera dell’acqua, quindi in termini di sommergenza, siamo in condizioni medio-basse; si ricorda che in bassa- media sommergenza il rapporto  $h/d_{84} < 4$ .

Bathurst delinea quattro principali processi di resistenza al moto: numero di Reynolds, numero di Froude, geometria degli elementi di disturbo, geometria del canale.

- Numero di Reynolds: la resistenza di forma di un oggetti varia in base alle condizioni in cui si presenta il regime delle acqua nel limite sponda-fondo-acqua, il regime delle acqua potrebbe essere laminare, turbolento o in transizione tra essi. Il numero di Reynolds è dato da  $U d_{50} / \nu$  dove  $U$  è la velocità media del flusso e  $\nu$  la viscosità cinematica. Nello stato laminare o turbolento il coefficiente di resistenza non cambia rispetto al numero di Reynolds, mentre in regime transizionale il coefficiente di resistenza cala e il numero di Reynolds cresce.
- Numero di Froude: è un gruppo adimensionale che mette in relazione la forza d’inerzia e la forza peso:  $Fr = V_o / (g * L_o)$ . Un elemento che sporge in parte o totalmente dalla superficie del pelo libero causa un disturbo in superficie che si tramuta in una perdita di energia, questo fenomeno viene denominato resistenza di pelo libero e viene condizionata dal numero di Froude e dalla sommergenza relativa.
- Geometria degli elementi di disturbo: l’effetto combinato dei elementi sulla resistenza al moto è correlata alla porzione del materiale del fondo che ha una particolare resistenza di forma, ed è determinata dalla disposizione dei sedimenti e dalla loro geometria (forma).
- Geometria del canale: laddove una gran quantità di elementi di disturbo si trovano in posizione tale da ostacolare il flusso, quest’ultimo è costretto a incanalarsi tra di essi, più grande è la porzione occupata dai sedimenti maggiore è la porzione d’acqua che si incanala tra di essi e di conseguenza è maggiore è la velocità media del flusso.

I dati ottenuti da Bathurst sono stati ottenuti nel laboratorio di idraulica dell’Università del Colorado, un laboratorio, sia indoor che outdoor, che dal 1962 permette a professori e studenti di praticare attività di ricerca e di trovare soluzioni di carattere idraulico e ingegneristico prevalentemente in merito al rischio idrogeologico. Il laboratorio indoor, di circa 4200 mq, è alimentato direttamente dal bacino di Horsetooth, che garantisce flussi d’acqua ingenti, è programmabile per raggiungere pendenze fino al 50%, il canale di studio più grande ha una lunghezza pari 60 m e una larghezza di 6 m. Mentre il laboratorio esterno “outdoor” di 30 acri ovvero circa 120000 mq presenta un canale di dimensioni analoghe a quello presente nel laboratorio interno, inoltre è presente una serra che occupa una superficie di circa 1000 mq in cui si sperimenta l’interazione tra corso d’acqua e vegetazione.

I dati raccolti da Bathurst vengono classificati in tabella in base a:

pendenza del canale	Portata (m <sup>3</sup> /s)	Velocità media (m/s)	Profondità media (m)	Coefficiente di Darcy-Weissbach	Sommergenza relativa (h/ d <sub>50</sub> )
---------------------	-----------------------------	----------------------	----------------------	---------------------------------	--

Nella ricerca sono state utilizzate tre pendenze ovvero pari al 2, 5 e 8%; per adattare il parametro d<sub>50</sub> alle altre ricerche che utilizzavano invece il percentile d<sub>84</sub> si è moltiplicato il d<sub>50</sub> \* 2,2.

Sono state eseguite 88 misurazioni; si riporta in seguito al tabella:

N.	if (%)	Q (m <sup>3</sup> /s)	V(m/s)	h (m)	B (m)	f	h/ d <sub>50</sub>
1	0.02	0.00241	0.146	0.0141	1.168	1.044	2.436
2	0.02	0.01274	0.391	0.0279	1.168	0.286	4.806
3	0.02	0.03046	0.584	0.0446	1.168	0.205	7.695
4	0.02	0.05746	0.785	0.0627	1.168	0.16	10.804
5	0.02	0.07197	0.877	0.0702	1.168	0.143	12.111
6	0.05	0.00143	0.161	0.0076	1.168	1.151	1.312
7	0.05	0.00522	0.296	0.0151	1.168	0.679	2.606
8	0.05	0.01737	0.619	0.024	1.168	0.246	4.141
9	0.05	0.03249	0.823	0.0338	1.168	0.196	5.827
10	0.05	0.04896	1.017	0.0412	1.168	0.156	7.103
11	0.08	0.00196	0.201	0.0084	1.168	1.303	1.441
12	0.08	0.0061	0.392	0.0133	1.168	0.545	2.299
13	0.08	0.01355	0.563	0.0206	1.168	0.408	3.552
14	0.08	0.03576	0.965	0.0317	1.168	0.214	5.466
15	0.08	0.06061	1.225	0.0424	1.168	0.177	7.303
16	0.08	0.07065	1.301	0.0465	1.168	0.172	8.013
17	0.02	0.0058	0.222	0.0223	1.168	0.708	2.79
18	0.02	0.01181	0.348	0.029	1.168	0.375	3.626
19	0.02	0.02482	0.484	0.0439	1.168	0.294	5.482
20	0.02	0.04047	0.586	0.0591	1.168	0.27	7.383
21	0.02	0.05348	0.656	0.0698	1.168	0.255	8.728
22	0.05	0.00381	0.23	0.0141	1.168	1.046	1.768
23	0.05	0.00843	0.363	0.0199	1.168	0.591	2.484
24	0.05	0.02037	0.583	0.0299	1.168	0.345	3.736
25	0.05	0.03333	0.782	0.0365	1.168	0.234	4.557
26	0.05	0.04586	0.904	0.0434	1.168	0.209	5.428
27	0.05	0.0546	0.979	0.0477	1.168	0.195	5.965
28	0.08	0.00207	0.186	0.0095	1.168	1.731	1.19
29	0.08	0.00631	0.38	0.0142	1.168	0.617	1.776
30	0.08	0.01007	0.43	0.02	1.168	0.68	2.505
31	0.08	0.02825	0.807	0.0299	1.168	0.289	3.743
32	0.08	0.04518	1.032	0.0375	1.168	0.221	4.682
33	0.08	0.04879	1.064	0.0392	1.168	0.218	4.905
34	0.02	0.0025	0.116	0.0184	1.168	2.135	0.967
35	0.02	0.00868	0.239	0.0311	1.168	0.858	1.638
36	0.02	0.01893	0.375	0.0432	1.168	0.483	2.276
37	0.02	0.04352	0.587	0.0634	1.168	0.288	3.337
38	0.02	0.06763	0.721	0.0803	1.168	0.242	4.225
39	0.02	0.0802	0.764	0.0899	1.168	0.242	4.731

40	0.05	0.00181	0.132	0.0117	1.168	2.65	0.617
41	0.05	0.00636	0.264	0.0206	1.168	1.164	1.087
42	0.05	0.01456	0.419	0.0298	1.168	0.666	1.566
43	0.05	0.03073	0.625	0.042	1.168	0.422	2.213
44	0.05	0.06061	0.896	0.0597	1.168	0.31	3.141
45	0.05	0.07421	0.932	0.0681	1.168	0.308	3.585
46	0.08	0.00389	0.267	0.0124	1.168	1.093	0.655
47	0.08	0.01092	0.457	0.0204	1.168	0.614	1.076
48	0.08	0.021	0.616	0.0292	1.168	0.483	1.536
49	0.08	0.03126	0.721	0.0371	1.168	0.448	1.952
50	0.08	0.05498	0.971	0.0484	1.168	0.322	2.55
51	0.08	0.05574	0.883	0.054	1.168	0.435	2.843
52	0.02	0.00329	0.1	0.0282	1.168	4.463	0.947
53	0.02	0.00837	0.189	0.0378	1.168	1.654	1.269
54	0.02	0.01158	0.227	0.0436	1.168	1.323	1.463
55	0.02	0.02541	0.377	0.0578	1.168	0.639	1.938
56	0.02	0.04047	0.519	0.0668	1.168	0.39	2.241
57	0.02	0.04949	0.601	0.0705	1.168	0.307	2.367
58	0.05	0.00329	0.132	0.0213	1.168	4.796	0.715
59	0.05	0.00713	0.214	0.0285	1.168	2.437	0.956
60	0.05	0.01413	0.337	0.0359	1.168	1.245	1.206
61	0.05	0.02068	0.431	0.0411	1.168	0.87	1.379
62	0.05	0.02941	0.542	0.0465	1.168	0.621	1.559
63	0.05	0.04368	0.643	0.0582	1.168	0.553	1.952
64	0.08	0.00247	0.162	0.013	1.168	3.092	0.436
65	0.08	0.00565	0.205	0.0236	1.168	3.522	0.792
66	0.08	0.01077	0.313	0.0295	1.168	1.892	0.989
67	0.08	0.02187	0.515	0.0363	1.168	0.86	1.219
68	0.08	0.03249	0.637	0.0437	1.168	0.676	1.466
69	0.08	0.03724	0.712	0.0448	1.168	0.554	1.502
70	0.02	0.00409	0.138	0.0254	1.168	2.111	0.644
71	0.02	0.00993	0.223	0.0381	1.168	1.201	0.954
72	0.02	0.01671	0.301	0.0475	1.168	0.824	1.203
73	0.02	0.02799	0.409	0.0586	1.168	0.551	1.485
74	0.02	0.0411	0.5	0.0703	1.168	0.441	1.78
75	0.02	0.04967	0.543	0.0782	1.168	0.416	1.98
76	0.05	0.00369	0.173	0.0183	1.168	2.399	0.463
77	0.05	0.00855	0.283	0.0259	1.168	1.268	0.655
78	0.05	0.01282	0.342	0.0321	1.168	1.08	0.813
79	0.05	0.02176	0.478	0.039	1.168	0.669	0.986
80	0.05	0.03403	0.611	0.0477	1.168	0.501	1.206
81	0.05	0.04896	0.725	0.0578	1.168	0.432	1.464
82	0.08	0.00397	0.21	0.0162	1.168	2.309	0.41
83	0.08	0.00605	0.259	0.02	1.168	1.863	0.506
84	0.08	0.01128	0.374	0.0238	1.168	1.159	0.654
85	0.08	0.01175	0.474	0.0321	1.168	0.896	0.812
86	0.08	0.02737	0.592	0.0396	1.168	0.709	1.002
87	0.08	0.03319	0.669	0.0425	1.168	0.596	1.075
88	0.08	0.04485	0.775	0.0495	1.168	0.518	1.254

TAB.3 BATHURST 1981

#### 5.4 IAN REID

Ian Reid, 1994, "The Nahal Yatir bedload database: sediment dynamics in a gravel bed ephemeral stream".

In questo elaborato pubblicato per la rivista accademica "Earth Surface Processes and Landforms", Reid si impegna in questa attività di ricerca presso il fiume Nahal Yatir in Israele in quanto mai nessuno prima aveva effettuato delle misurazioni in merito al trasporto di fondo su fiumi in ambienti desertici successivamente al passaggio di "flash floods" ovvero inondazioni improvvise. In ambienti desertici è difficile prevedere eventuali precipitazioni ma quando queste si verificano il più delle volte risultano eventi particolarmente pericolosi, in quanto tipicamente si presentano innalzamenti idrografici di 0.25 m al minuto. Questo è dovuto al fatto che il terreno essendo costantemente secco, una volta che viene bagnato dalla pioggia, acquista una consistenza plastica, che lo rende impermeabile e di conseguenza si manifestano sin dai primi minuti di precipitazione fenomeni di deflusso superficiale; in ambienti desertici le misurazioni di carattere idraulico risultano per i precedentemente citati motivi particolarmente ostiche. L'attività di monitoraggio dell'autorità di bacino del fiume Nahal Yatir ha cercato di raccogliere informazioni in merito ai fenomeni di trasporto nel fiume per più di 100 anni, con esito positivo solo in rari casi, lo stesso Reid afferma che una tale ricerca in un ambiente così avverso ha difficilmente esiti positivi soprattutto per la scarsità di eventi piovosi che mettono in movimento il flusso d'acqua e per la poca prevedibilità delle inondazioni improvvise in ambiente desertico. La tabella stilata da Reid, grazie all'attività di monitoraggio, risulta comunque l'elaborato più affidabile per i fiumi dell'area e fornisce un solido aiuto in materia di gestione e progettazione fluviale.

Sono stati raccolti 74 set di dati, suddividendo per ciascun set: la profondità "h", la pendenza del pelo libero "if", la portata "q", la larghezza dell'alveo B pari a 3.5 m costanti lungo tutto il tratto e il percentile  $d_{84}$  pari a 0.013; si riporta in seguito la tabella:

N.	h (m)	if (%)	Q (m <sup>3</sup> /s)	B (m)	$d_{84}$
1	0.46	0.007	3.7	3.5	0.013
2	0.5	0.0071	4.1	3.5	0.013
3	0.58	0.0072	4.8	3.5	0.013
4	0.6	0.0073	5	3.5	0.013
5	0.6	0.0075	5	3.5	0.013
6	0.59	0.0075	4.9	3.5	0.013
7	0.6	0.0074	5	3.5	0.013
8	0.59	0.0076	4.9	3.5	0.013
9	0.59	0.0077	4.9	3.5	0.013
10	0.2	0.0084	1.2	3.5	0.013
11	0.2	0.0085	1.2	3.5	0.013
12	0.15	0.0083	0.7	3.5	0.013
13	0.14	0.0083	0.7	3.5	0.013
14	0.16	0.0084	0.8	3.5	0.013
15	0.17	0.0085	0.9	3.5	0.013
16	0.17	0.0087	1	3.5	0.013
17	0.21	0.0091	1.3	3.5	0.013
18	0.24	0.0093	1.6	3.5	0.013
19	0.27	0.0094	1.8	3.5	0.013
20	0.29	0.0095	2	3.5	0.013
21	0.31	0.0094	2.2	3.5	0.013
22	0.32	0.0095	2.3	3.5	0.013
23	0.33	0.0095	2.4	3.5	0.013
24	0.34	0.0096	2.5	3.5	0.013
25	0.34	0.0096	2.6	3.5	0.013

26	0.36	0.0096	2.7	3.5	0.013
27	0.37	0.0096	2.8	3.5	0.013
28	0.37	0.0097	2.8	3.5	0.013
29	0.13	0.0086	0.6	3.5	0.013
30	0.13	0.0086	0.6	3.5	0.013
31	0.14	0.0087	0.7	3.5	0.013
32	0.15	0.0088	0.7	3.5	0.013
33	0.15	0.0087	0.7	3.5	0.013
34	0.15	0.0088	0.7	3.5	0.013
35	0.14	0.0087	0.7	3.5	0.013
36	0.14	0.0087	0.6	3.5	0.013
37	0.14	0.0087	0.6	3.5	0.013
38	0.13	0.0087	0.6	3.5	0.013
39	0.13	0.0087	0.5	3.5	0.013
40	0.12	0.0087	0.5	3.5	0.013
41	0.12	0.0086	0.4	3.5	0.013
42	0.12	0.0086	0.4	3.5	0.013
43	0.11	0.0085	0.4	3.5	0.013
44	0.11	0.0085	0.3	3.5	0.013
45	0.25	0.0101	1.7	3.5	0.013
46	0.29	0.0098	2.1	3.5	0.013
47	0.29	0.0099	2.1	3.5	0.013
48	0.29	0.0099	2	3.5	0.013
49	0.3	0.0098	2.1	3.5	0.013
50	0.31	0.0099	2.2	3.5	0.013
51	0.32	0.01	2.3	3.5	0.013
52	0.33	0.0099	2.5	3.5	0.013
53	0.34	0.0099	2.6	3.5	0.013
54	0.35	0.0099	2.7	3.5	0.013
55	0.11	0.0087	0.3	3.5	0.013
56	0.11	0.0087	0.4	3.5	0.013
57	0.12	0.0087	0.4	3.5	0.013
58	0.13	0.0088	0.5	3.5	0.013
59	0.13	0.0088	0.6	3.5	0.013
60	0.14	0.0087	0.6	3.5	0.013
61	0.14	0.0088	0.6	3.5	0.013
62	0.14	0.0089	0.7	3.5	0.013
63	0.15	0.0089	0.7	3.5	0.013
64	0.16	0.0089	0.8	3.5	0.013
65	0.17	0.009	0.9	3.5	0.013
66	0.19	0.0091	1.1	3.5	0.013
67	0.2	0.0092	1.2	3.5	0.013
68	0.2	0.0093	1.2	3.5	0.013
69	0.22	0.0094	1.4	3.5	0.013
70	0.23	0.0095	1.5	3.5	0.013
71	0.24	0.0095	1.6	3.5	0.013
72	0.25	0.0095	1.7	3.5	0.013
73	0.26	0.0096	1.8	3.5	0.013
74	0.27	0.0097	1.9	3.5	0.013

TAB.4 REID 1994

Si inserisce ora una tabella in cui vengono riassunti i metodi utilizzati per la stima della velocità e della profondità per ogni ricerca, la maggior parte dei dati è stata presa direttamente dalle tabelle presenti nelle ricerche, vedi raggio idraulico, profondità media e velocità media, qualora certi dati non fossero disponibili si è fatto ricorso a determinate formule, come presentato in tabella:

Autore	$d_{xx}$	Velocità	Profondità
Hey	$d_{84}$	$V = 8gh \frac{if}{f}$	Raggio idraulico
Griffiths	$d_{50}$	Velocità media	Raggio idraulico
Bathurst	$d_{50}$	Velocità media	Profondità media
Reid	$d_{84}$	$V = \frac{Q}{hB}$	Profondità media

Per il calcolo della velocità valida per la ricerca di Hey si è fatto ricorso alla formula:

$$V = 8gh \frac{if}{f} \quad 5.1$$

È stata utilizzata tale formula in quanto l'autore non aveva reso noto il parametro di larghezza del canale B; perciò, non era possibile utilizzare l'equazione di velocità utilizzata per Reid:

$$V = \frac{Q}{hB} \quad 5.2$$

Il percentile  $d_{50}$  di Griffiths ed Hey è stato adattato al percentile  $d_{84}$  delle altre due ricerche per uniformare i valori di studio, è stata utilizzata la seguente formula (Rickenmann e Recking, 2011):

$$d_{84} = d_{50} * 2.2 \quad 5.3$$

## 6. ELABORAZIONE DATI

Una volta che tutti i dati sono stati inseriti in un programma di calcolo, in questo caso Matlab, sono stati creati tre file di calcolo, il primo comprende tutti e quattro le ricerche utilizzate mentre gli altri due sono stati realizzati in modo da suddividere nel primo i dati raccolti in laboratorio e nel secondo quelli raccolti direttamente in campo. Si osserva la seguente tabella riassuntiva:

Autore	Anno di pubblicazione	Luogo	Tipo di ricerca
Hey	1979	Regno Unito	Campo
Griffiths	1981	Nuova Zelanda	Campo
Bathurst	1981	Colorado S.U., USA	Laboratorio
Reid	1994	Israele	Campo

Lo scopo di questa ricerca è lo studio del coefficiente  $C_u$  della legge di Katul, che è stata esposta al capitolo 4, per la stima della resistenza al moto in corsi d'acqua reali e di laboratorio. Si riporta inseguito la legge di Katul:

$$\sqrt{\frac{g}{f}} = \frac{V}{u_*} = C_u \left[ 1 + \frac{K_S}{h} \log \left( 0.648 \cosh \left( 1 - \frac{h}{K_S} \right) \right) \right] \quad 6.1$$

Dove con  $h/K_S$  si intende intendiamo la sommergenza relativa ovvero  $h/d_{84}$ , la formula può quindi essere riscritta anche nel seguente modo:

$$\sqrt{\frac{g}{f}} = \frac{V}{u_*} = C_u \left[ 1 + \frac{d_{84}}{h} \log \left( 0.648 \cosh \left( 1 - \frac{h}{d_{84}} \right) \right) \right] \quad 6.2$$

Il parametro  $C_u$  nell'equazione 6.1 viene assunto da Katul pari a 4.5, valore a metà tra i valori corrispondenti alla turbolenza che sviluppa rispettivamente sopra una densa copertura forestale ed un parete scabra, tale valore risulta pari a 4.5 quando siamo in condizioni di  $h/K_s < 7$ . In dettaglio il valore di  $C_u$  per turbolenza sopra una densa copertura vegetale è 3.3, mentre quello in regime di parete scabra risulta 5.8. Il caso di scabrezza in media e bassa sommergenza risulta compreso tra la turbolenza su copertura vegetale densa e turbolenza in regime di parete scabra per cui il valore di  $C_u$  risulta compreso tra i due valori di  $C_u$  limite e viene assunto quindi pari al valore medio:  $3.3 + (5.8-3.3)/2 = 4.5$  media (Katul, 2002).

Notiamo come nella formula 6.2 il parametro  $K_s$ , ovvero la scabrezza del fondo e non il coefficiente di resistenza di Gauckler-Strickler, venga sostituito dal percentile  $d_{84}$ , che corrisponde al dimensionamento dei sedimenti in alveo; in particolare si ricorda che con  $d_{84}$  si intende quel valore per cui l'84% del sedimento è più fino (Katul, 2002).

Nella seguente elaborazione dati si provvederà alla stima del valore  $C_u$  effettivo per ciascun set di dati per quantificare quanto si discosta dal valore 4.5 assunto da Katul

Il rapporto  $V/u^*$  è una velocità adimensionale, per comodità indicata con  $V_{ad}$ . Il valore di  $V_{ad}$  sperimentale/osservato si ottiene quantificando separatamente  $V$  e  $u^*$ . Il valore di  $V$  se non è misurato/stimato, si ottiene con la formula:

$$V = Q/(h*B) \quad 6.3$$

Dove  $Q$  è la portata espressa in  $m^3/s$ ,  $h$  è la profondità dell'acqua (m) e  $B$  è la larghezza del letto (m).

Si procede con la stima di  $u^*$  ovvero la velocità di attrito, che si genera tra sponde, letto e flusso, con la seguente formula:

$$u^* = \sqrt{g h i f} \quad 6.4$$

dove  $g$  è l'accelerazione di gravità, intesa pari a 9.81 m/s,  $h$  è la profondità dell'acqua e  $i$  è la pendenza del fondo o del pelo libero.

Ora si hanno a disposizione tutti i fattori che permettono di calcolare la velocità adimensionale  $V_{ad}$  che riflette la resistenza al moto. I valori misurati di  $V_{ad}$  e  $h/d_{84}$  vengono utilizzati per determinare il valore di  $C_u$  corrispondente ad ogni misura. Dall'equazione (6.2) si esplicita  $C_u$  ottenendo:

$$C_u = V_{ad} / [ 1 + \frac{d_{84}}{h} \log( 0.648 \cosh(1 - \frac{h}{d_{84}})) ] \quad 6.5$$

Una volta individuato il valore di  $C_u$  per ogni dato osservato si procede con il calcolo del  $C_u$  medio per ogni set di dati. Per interpolazione si intende un procedimento matematico utilizzato per individuare nuovi punti del piano cartesiano a partire da un insieme finito di punti dati, nell'ipotesi che tutti i punti si possano riferire ad una funzione. L'interpolazione è un metodo ampiamente diffuso nelle attività scientifiche e tecnologiche o in generale negli studi quantitativi di qualsiasi fenomeno, poiché in queste attività molto spesso ci si può trovare con un numero limitato di punti, ottenuti con un campionamento o con apparecchiature di misura e si ritiene quindi opportuno individuare una funzione che passi per tutti i punti dati o per lo meno nelle loro vicinanze. Infine, con lo stesso procedimento si andrà a calcolare il  $C_u$  finale interpolato, mettendo in relazione tutti i singoli  $C_u$  e i singoli rapporti di sommergenza relativa di ciascuna ricerca per capire come il  $C_u$  finale interpolato differisce da quello di Katul. Una volta che si è calcolato il  $C_u$  medio è possibile procedere con il calcolo della velocità tramite equazione di Katul utilizzando proprio il  $C_u$  medio interpolato, la velocità calcolata in questo modo verrà utilizzata come oggetto di confronto rispetto alla velocità che viene ricavata tramite misurazione o tramite altre formule.

Per adattare la meglio l'elaborazione dati alla finalità di questa ricerca ovvero la stima della resistenza al moto in bassa e media sommergenza, si analizzeranno indipendentemente i dati di laboratorio da quelli di campo, ed utilizzando solo i dati che corrispondono a condizioni di bassa e media sommergenza per cui  $h/d_{84} < 10$ .

Dopo aver osservato come varia il parametro  $C_u$  sarà necessario concentrarsi su come varia invece la velocità calcolata con la formula 6.2 con il  $C_u$  determinato tramite interpolazione e quella osservata. In particolare, si andranno ad inserire i valori di velocità ricavati all'interno di un piano cartesiano, dove alle ascisse avremo la velocità  $V_{ad}$  ( $V/u^*$ ), ovvero il parametro di velocità osservato ( $V/u^*_{MIS}$ ), mentre nelle ordinate sarà inserito il valore della velocità ricavata dalla equazione di Katul 6.2 definita quindi velocità calcolata ( $V/u^*_C$ ). Si procede analizzando quanto questi dati si discostano dalla bisettrice centrale che rappresenta la linea di perfetta corrispondenza tra la velocità osservata e calcolata. Si riporta la seguente figura semplicemente a titolo esplicativo:

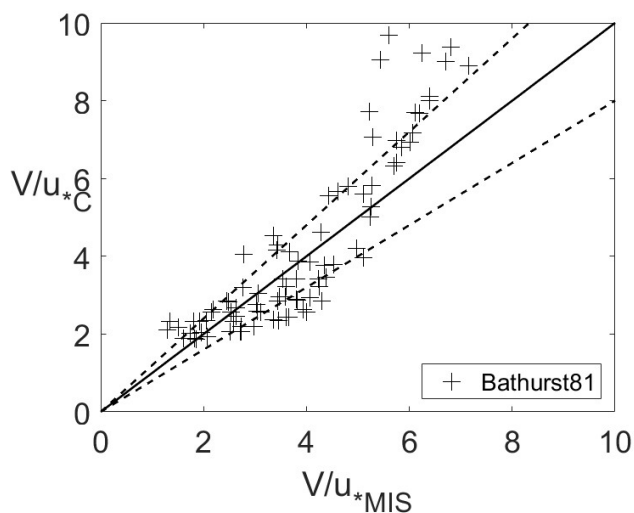


Figura 13: relazione velocità osservata e misurata

Nel successivo capitolo si procederà ad analizzare i grafici ricavati dall'elaborazione dati commentandoli.

## 7. RISULTATI

In questo capitolo andremo ad analizzare i grafici restituiti dal programma di calcolo andando in particolare modo ad analizzare come variano i parametri  $C_u$  all'interno dell'equazione per la resistenza al moto di Katul sia nel caso di dati di laboratorio sia nel caso di dati raccolti direttamente in campo. Una volta analizzato il parametro  $C_u$  e come questo si discosta dal valore scelto e utilizzato da Katul procederemo con l'analisi della velocità finale del flusso, ovvero la velocità effettiva tenendo conto dei parametri di resistenza come precedentemente elencato.



Per ogni file dati, laboratorio e campo, verranno analizzate cinque tipi di figure:

1. In questa figura (figura di tipo 1) verranno inseriti nel grafico tutti i punti di sommergenza relativa “ $h/d_{84}$ ” rinvenuti nella ricerca dell'autore descritto in legenda e verrà plottata la funzione di velocità di Katul, con  $Cu$  pari a 4.5. In questo modo sarà possibile confrontare a prima vista l'andamento della curva di Katul e un possibile andamento della curva dei punti di studio. La sommergenza relativa verrà quantificata nell'asse delle ascisse mentre nell'asse delle ordinate si potrà osservare il parametro di velocità  $V/u_*$ . Si riporta come esempio la figura 14 contenente i dati di tutti e quattro i dataset:

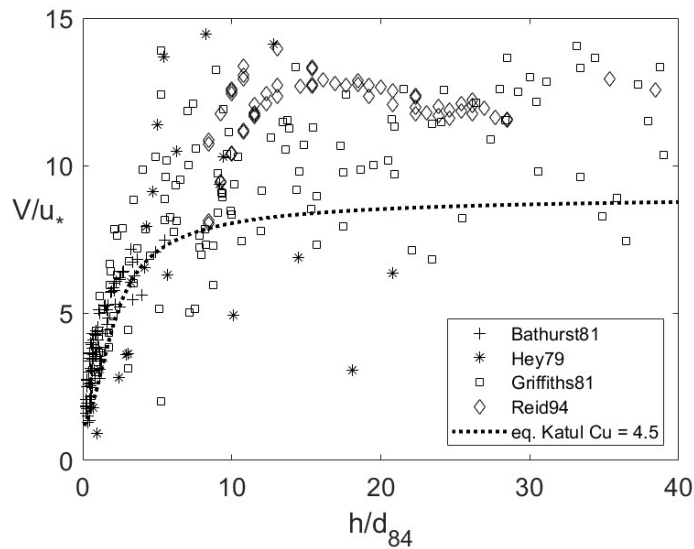


Figura 14: grafico completo dei dati di sommergenza relativa e velocità

2. Nella figura di tipo 2 verranno utilizzati gli stessi dati della prima ma per ogni singolo data set. Si riportano le seguenti quattro figure 15-18, una per ogni data set utilizzato a titolo illustrativo.

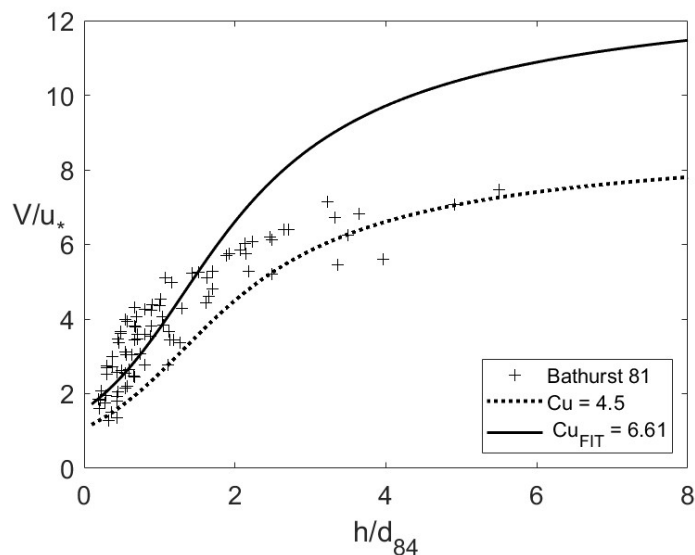


Figura 15: relazione tra sommergenza relativa e velocità, si delineano le due curve di velocità.

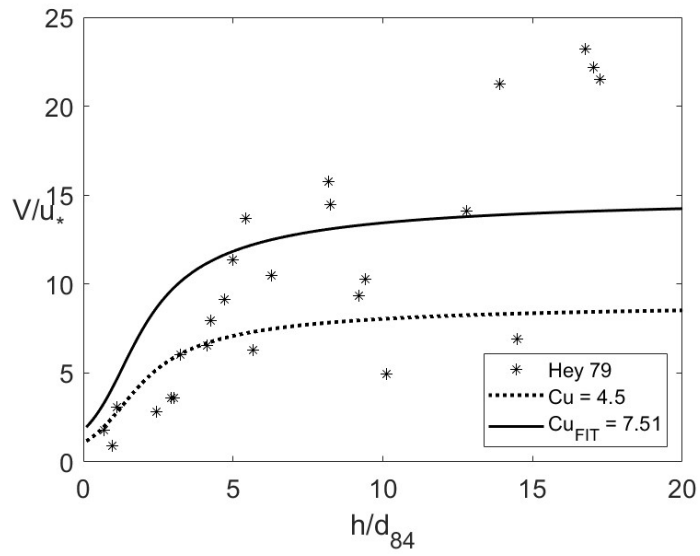


Figura 16: relazione tra sommergenza relativa e velocità, si delineano le due curve di velocità.

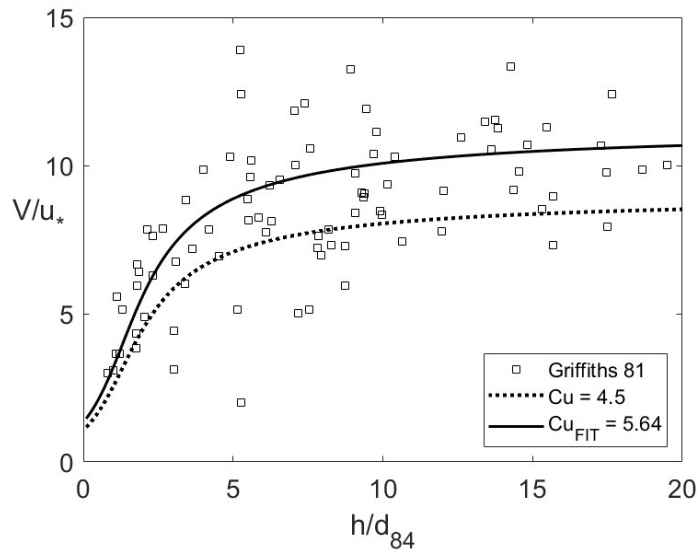


Figura 17: relazione tra sommergenza relativa e velocità, si delineano le due curve di velocità.

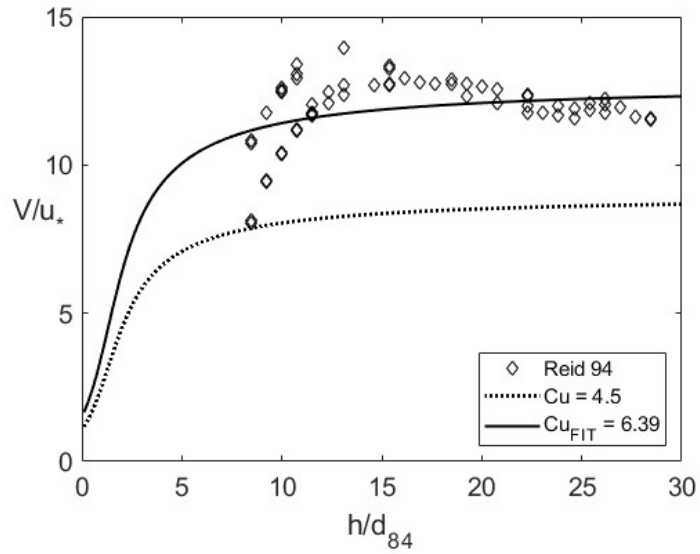


Figura 18: relazione tra sommergenza relativa e velocità, si delineano le due curve di velocità.

3. Nella figura di tipo 3 (figura 19) si illustrano i valori sperimentali di  $C_u$  per tutti i dataset utilizzati in funzione della sommergenza relativa insieme al valore interpolato di  $C_u$  per ogni dataset.

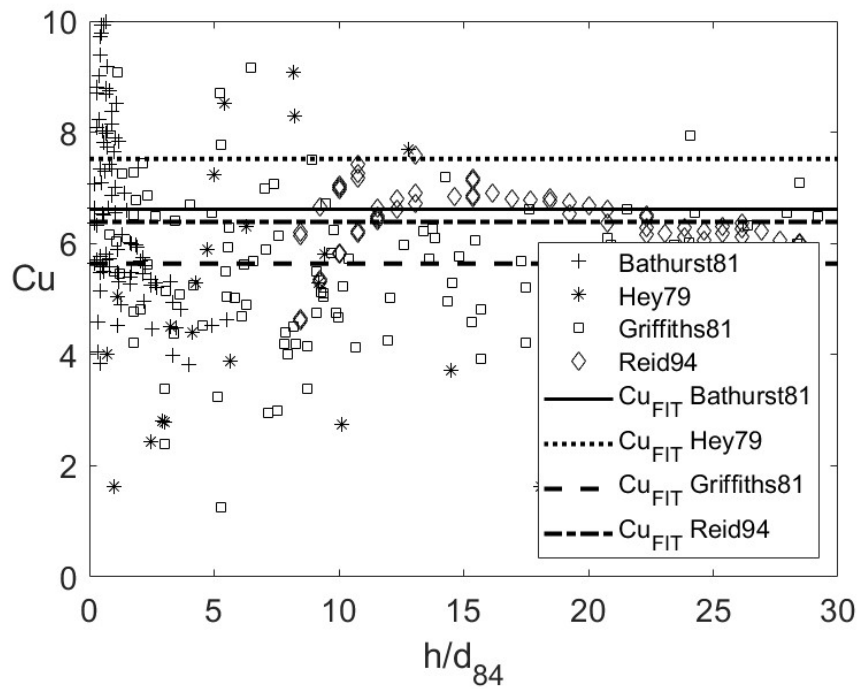


Figura 19: valori di  $C_u$  e relativi in funzione della sommergenza relativa

4. Nella figura di tipo 4 (figura 20) si illustrano i valori di velocità adimensionale in funzione della sommergenza relativa con la curva data dall'equazione (6.2) con il valore di  $C_u$  interpolato rispetto a tutti i punti sperimentali e quello proposto da Katul ( $C_u = 4.5$ ).

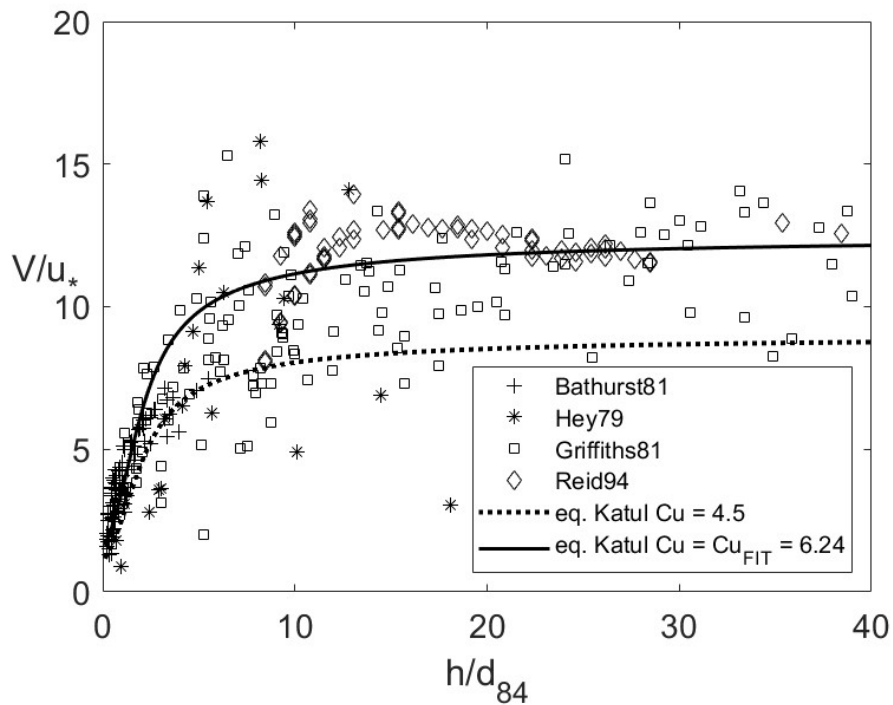


Figura 20: valori di  $V/u_*$  in funzione della sommergenza relativa, con l'eq. di Katul con  $C_u$  pari a 4.5 e con  $C_u$  mediato

5. Nella figura di tipo 5 (figura 21) si confronta il valore di velocità adimensionale determinato tramite le misure con quello calcolato secondo l'equazione 6.2 di Katul utilizzando il  $C_u$  interpolato relativo ad ogni dataset. Le tre linee sono una bisettrice a linea continua che indica il punto in cui valori di studio delle due velocità sono perfettamente concordi tra loro ed altre due linee tratteggiate che rappresentano il margine d'errore del  $\pm 30\%$ .

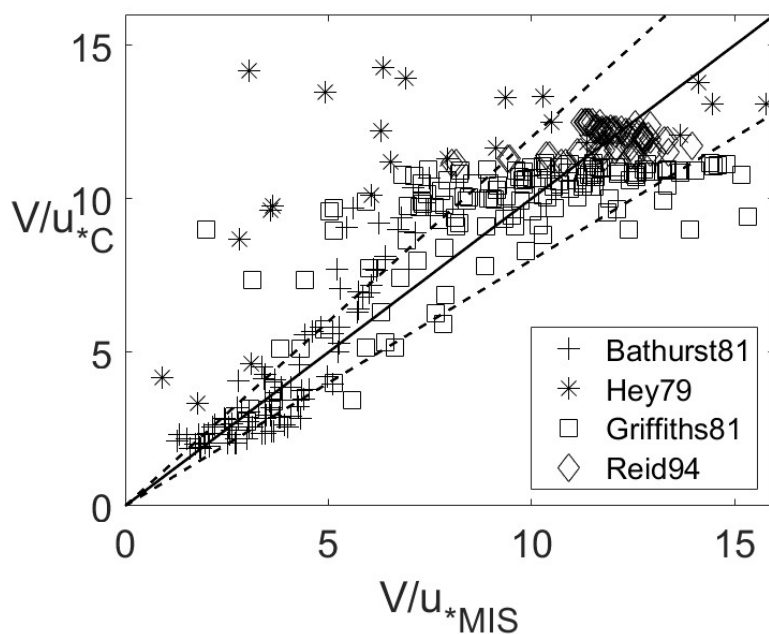


Figura 21: valori di velocità calcolata e misurata a confronto

6. In questa figura di tipo 6 si confronta si illustra il valore di velocità adimensionale determinato tramite le misure con quello calcolato secondo l'equazione 6.2 di Katul utilizzando il valore di  $C_u$  interpolato relativo a tutte le misure.

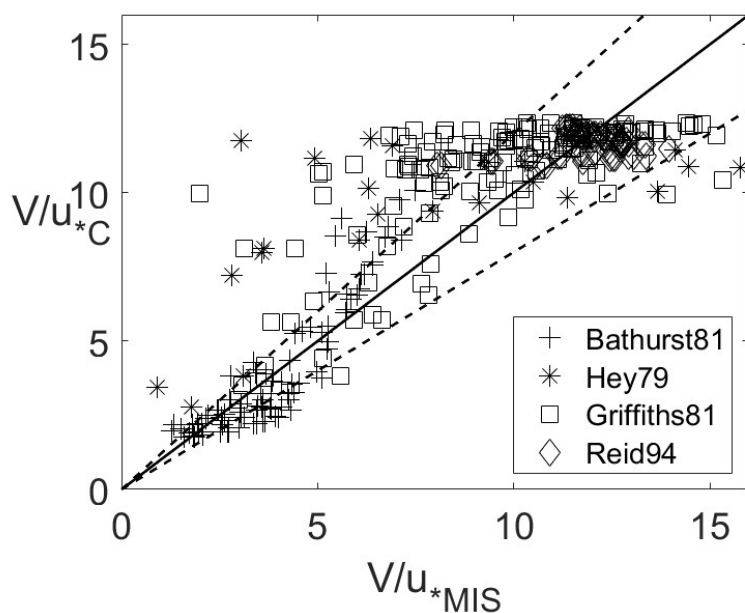


Figura 22: valori di velocità calcolata e misurata a confronto

Verranno prima di tutto esposti i risultati relativi all'elaborazione dei dati di laboratorio, in questo elaborato l'unica ricerca ad aver utilizzato dei canali artificiali di laboratorio è la ricerca di Bathurst del 1981, presso la Colorado State University.

Le altre tre ricerche, Hey, Griffiths e Reid invece sono state effettuate direttamente in campo e perciò verranno analizzate contemporaneamente in seguito.

### 7.1 DATI DI LABORATORIO

In questa analisi sono stati considerati solamente i dati di laboratorio, ovvero:

Autore	Anno	Luogo	Tipo di ricerca	N. misurazioni
Bathurst	1981	Colorado, USA	Laboratorio	88

Nella ricerca di Bathurst è stato necessario adattare il percentile  $d_{50}$  a  $d_{84}$  per renderlo omogeneo con le altre ricerche, si è quindi utilizzata la formula  $d_{84} = d_{50} * 2.2$  (Rickenmann e Recking, 2011).

I dati di sommergenza relativa sono stati poi scremati andando a considerare solamente quei valori per cui la sommergenza relativa fosse minore di 10 ovvero  $h/d_{84} < 10$ , così da andare ad analizzare solamente la condizione di media e bassa sommergenza, ma tutti i dati della ricerca di Bathurst presentavano la condizione di bassa e media sommergenza.

Si procede ora con l'analisi dei grafici (sei diversi tipi) ottenuti con l'elaborazione dati.

1. Nella figura 23 di tipo 1 è possibile osservare come si dispongono nel piano i dati di sommergenza relativa, come vediamo si concentrano fino al valore 4 con degli estremi a 6. La velocità aumenta all'aumentare della sommergenza relativa, in quanto vi è meno attrito col fondo. Si osserva l'equazione di velocità di Katul, ottenuta con  $Cu$  pari a 4.5, come linea tratteggiata.

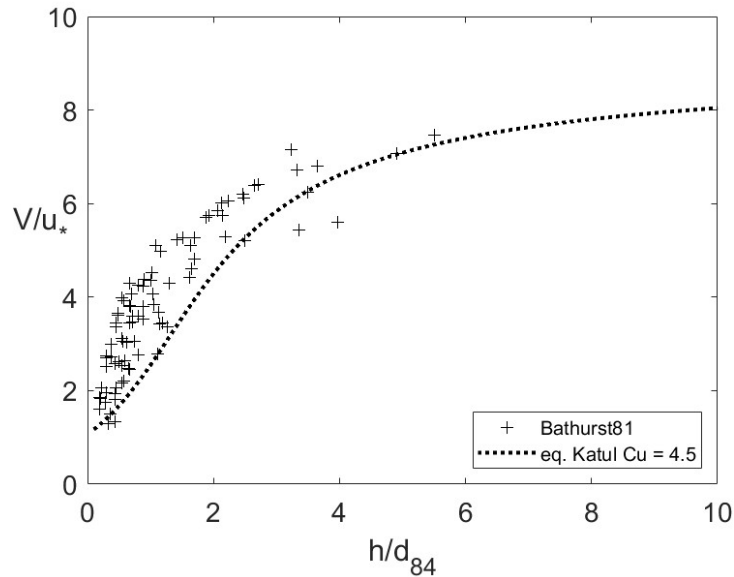


Figura 23: relazione tra sommergenza relativa e velocità.

2. Osserviamo ora una figura di tipo 2 in cui vengono inseriti gli stessi dati della figura precedente ma viene aggiunta la linea interpolata di velocità di Katul, che viene calcolata inserendo come  $Cu$  il  $Cu$  medio di Bathurst 6.61. La curva di velocità di Bathurst risulta più ampia e più alta di quella di Katul, andando quindi a comprendere valori di velocità maggiori.

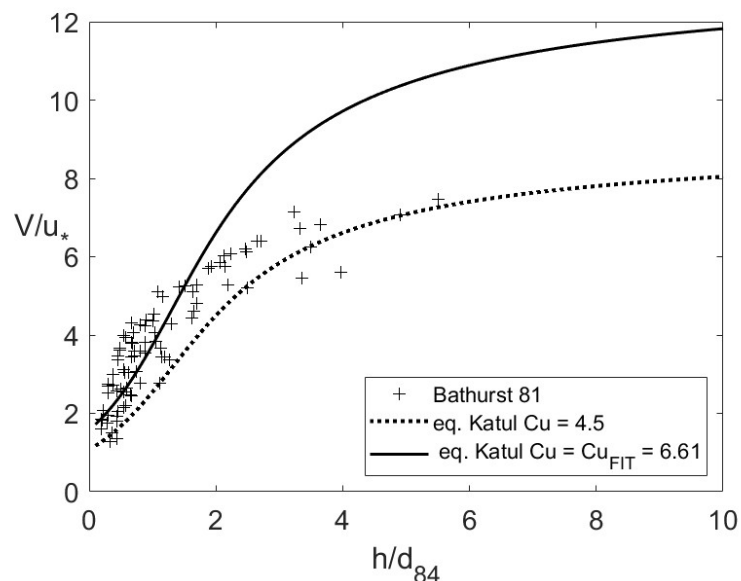


Figura 24: relazione tra sommergenza relativa e velocità, si delineano le due curve di velocità.

3. In questo grafico di tipo 3 invece vengono illustrati i valori sperimentali di  $C_u$  per tutti i set di dati utilizzati in funzione della sommergenza relativa (condizione medio-bassa) insieme al valore interpolato di  $C_u$  per ogni dataset. Ricordiamo che per Bathurst il parametro  $C_u$  è pari a 6.614.

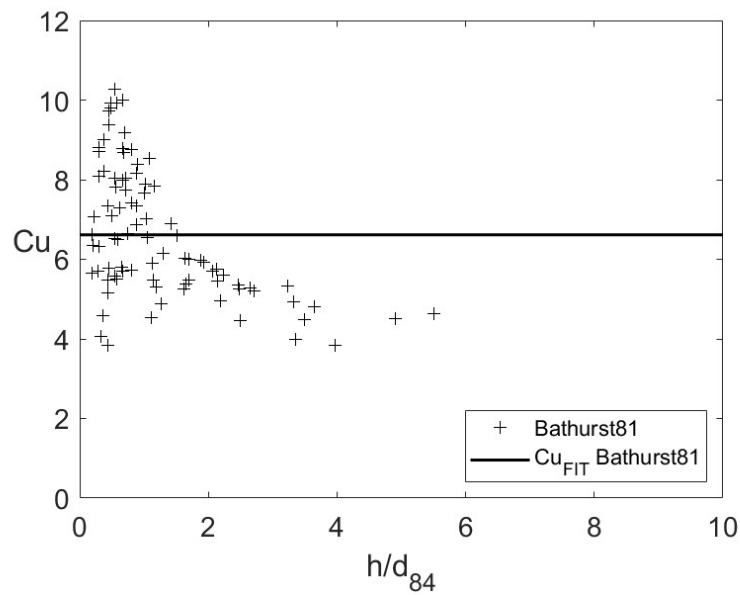


Figura 25: valori di  $C_u$  e sommergenza relativa a confronto e  $C_u$  di Bathurst.

4. In questo studio la figura di tipo 4 non viene riportata, in quanto coincide esattamente con la fig. 24 di tipo 2. Questo è dovuto al fatto che essendo un solo set di dati i valori medi interpolati di velocità adimensionale coincidono con i valori interpolati di velocità di Bathurst, in quanto il  $C_u$  finale interpolato risulta uguale al  $C_u$  della singola ricerca.

5. Nella successiva fig. 26, di tipo 5, andremo invece ad analizzare la relazione tra i dati di velocità osservati tramite misurazione (in ascissa) e i dati di velocità calcolati con l'equazione 6.2 di Katul (in ordinata). Dal grafico osserviamo come i due valori di velocità siano abbastanza concordi fino a valori di circa 6, nonostante siano comunque presenti degli outliers. Si nota soprattutto che per valori maggiori di sei i dati si allontanano dalla bisettrice sempre di più andando oltre al margine d'errore del 30% e risultando quindi non paragonabili tra loro.

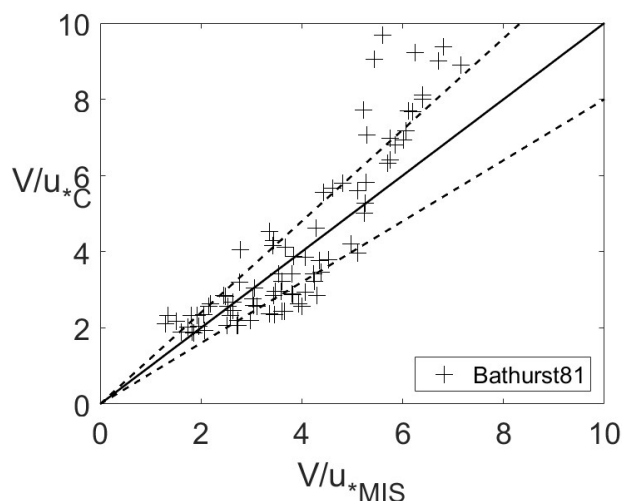


Figura 26: confronto tra valori di velocità rilevati e calcolati.

6. Come per la figura 4 anche la figura 6 non verrà riportata, per lo stesso motivo espresso in precedenza, ovvero che andando a considerare un solo set di dati, il valore delle  $C_u$  finale interpolato risulta uguale al singolo  $C_u$  di studio e di conseguenza i valori di velocità media interpolati non risentono di alcuna variazione rispetto ai valori di velocità interpolati; I dati di velocità rimangono uguali a quelli utilizzati per la fig. 25.

## 7.2 DATI DI CAMPO

In questa analisi sono stati considerati solamente i dati rilevati direttamente in campo ovvero:

Autore	Anno	Luogo	Tipo di ricerca	N. misurazioni
Hey	1979	Regno unito	Campo	30
Griffiths	1981	Nuova Zelanda	Campo	136
Reid	1994	Israele	Campo	74

Nella ricerca di Griffiths è stato necessario adattare il percentile  $d_{50}$  a  $d_{84}$  per renderlo omogeneo con le altre ricerche, si è quindi utilizzata la formula  $d_{84} = d_{50} * 2,2$ . (Rickenmann e Recking, 2011).

I dati di sommergenza relativa sono stati poi scremati andando a considerare solamente quei valori per cui la sommergenza relativa fosse minore di 10 ovvero  $h/d_{84} < 10$ , così da andare ad analizzare solamente la condizione di bassa e media sommergenza. In seguito all'applicazione di questa riduzione i dati di studio sono riassumibili nella seguente tabella:

Autore	N. Misurazioni
Hey	30
Griffiths	64
Reid	14



Si procede ora con l'analisi dei grafici restituiti dal programma di calcolo con annesso commento.

1. Nella prima figura è possibile osservare come si dispongono nel piano i dati di sommergenza relativa e relativa velocità. I dati sono equamente distribuiti nel piano, si nota come all'aumentare del rapporto di sommergenza aumenti la velocità. Possiamo osservare che i dati di Reid sono particolarmente concentrati nella parte destra del grafico al limite della bassa e media sommergenza. Si osserva l'equazione di velocità di Katul, ottenuta con  $C_u$  pari a 4.5, come linea tratteggiata.

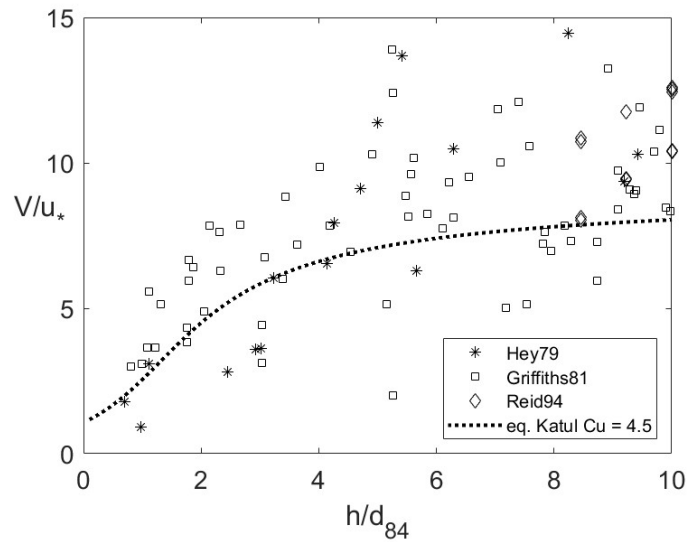


Figura 27: relazione tra sommergenza relativa e velocità.

2. Osserviamo ora nei successivi tre grafici i dati delle ricerche inseriti singolarmente e il confronto tra l'equazione di velocità di Katul con  $C_u$  pari a 4.5 e la curva di velocità del set di dati di studio, ottenuta inserendo il relativo  $C_u$  e i dati di sommergenza relativi.

### 2.1 HEY

Dal grafico in questione osserviamo come i dati di Hey si dispongano uniformemente nel grafico, andando a coprire valori minimi e valori limite di sommergenza. In particolare, osserviamo che il  $C_u$  per questo set di dati assume un valore pari a 5.927 quindi un  $C_u$  maggiore rispetto a quello indicato da Katul. Di fatto osserviamo come la curva di Hey sia più ampia e raggiunga valori di velocità maggiori.

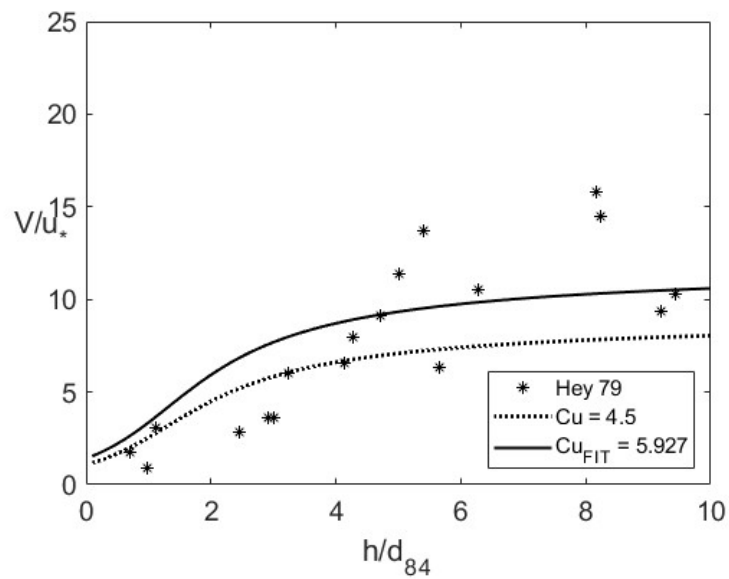


Figura 28: relazione tra sommergenza relativa e velocità, si delineano le due curve di velocità.

## 2.2 GRIFFITHS

Dal seguente grafico osserviamo come i dati di Griffiths si dispongano nel grafico, andando a coprire valori minimi e valori limite di sommergenza. In particolare, osserviamo che il  $C_u$  per questo set di dati assume un valore pari a 5.485 quindi un  $C_u$  maggiore rispetto a quello indicato da Katul. Di fatto osserviamo come la curva di Hey sia più ampia e raggiunga valori di velocità maggiori.

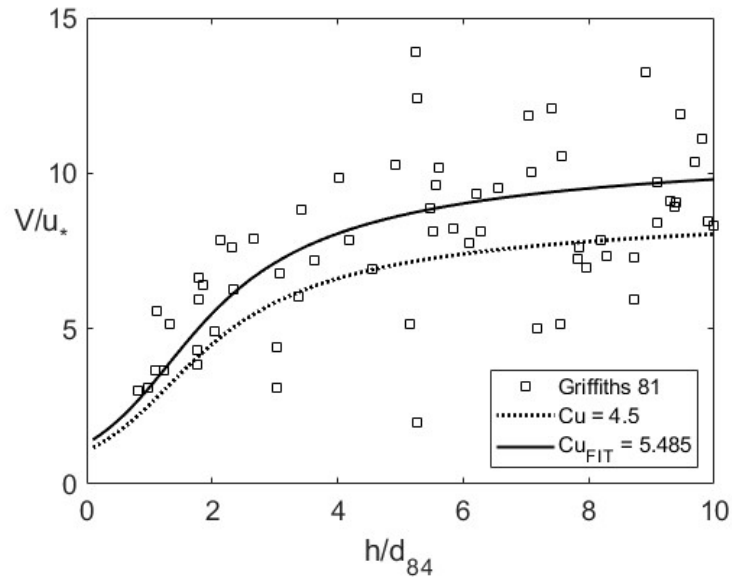


Figura 29: relazione tra sommergenza relativa e velocità, si delineano le due curve di velocità.

## 2.3 REID

Dal grafico in questione osserviamo come i dati di Reid si dispongano nella parte destra del grafico ai limite massimo della condizione di sommergenza medio-bassa. Osserviamo che il  $C_u$  per questo set di dati assume un valore pari a 5.99 quindi un  $C_u$  maggiore rispetto a quello indicato da Katul. Di fatto osserviamo come la curva di Reid sia più ampia e raggiunga valori di velocità maggiori.

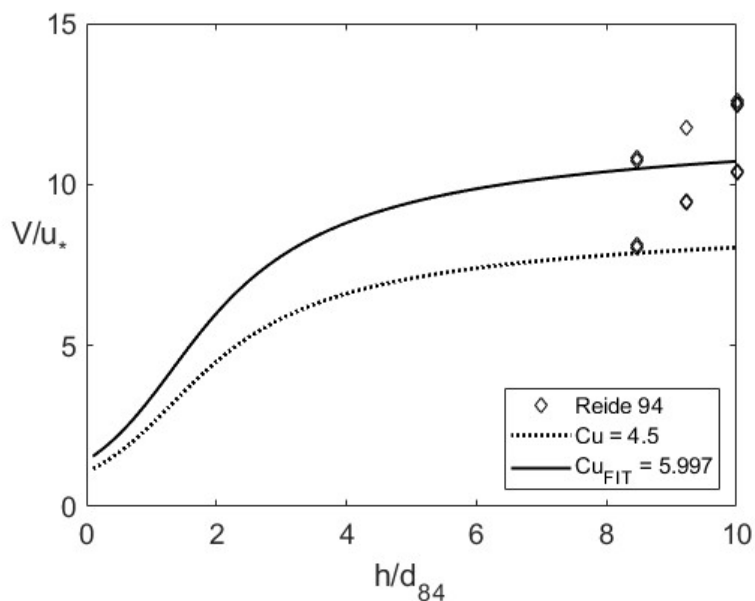


Figura 30: relazione tra sommergenza relativa e velocità, si delineano le due curve di velocità

3. Nella seguente figura di tipo 3 invece andiamo ad osservare come si dispongono i valori sperimentali di  $C_u$  per tutti i dataset utilizzati in funzione della sommergenza relativa insieme al valore interpolato di  $C_u$  per ogni set di dati, sono riportati nella seguente tabella i valori singoli di  $C_u$  e i valori interpolati:

Autore	$C_u$ (intero set di dati)	$C_u$ (media e bassa sommergenza)
Hey	7.519	5.927
Griffiths	5.6364	5.485
Reid	6.386	5.997
Cu medio interpolato	6.103	5.6461

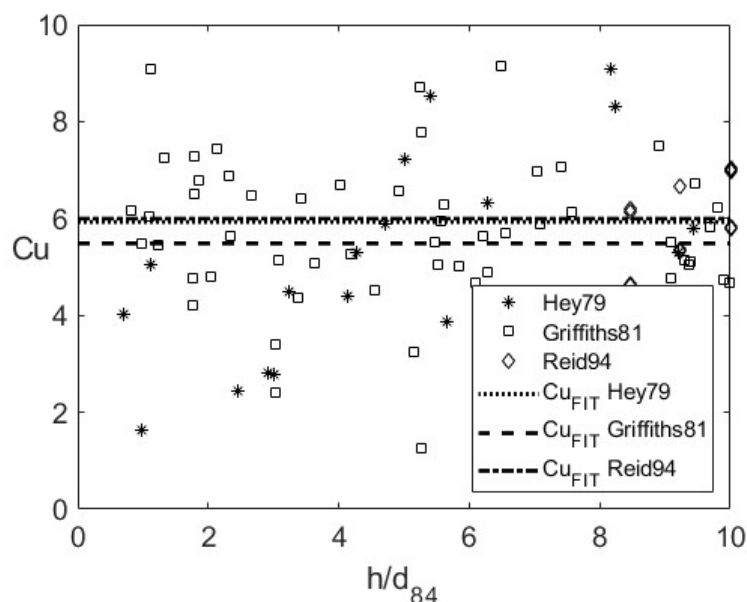


Figura 31: valori di sommergenza relativa e relativa velocità, rispetto al valore di  $C_u$ .

Notiamo come i valori di  $C_u$  siano ben diversi dal valore di 4.5 indicato da Katul. In particolare, per Hey e Reid i valori sono molto simili e pari circa a 6. Ma ricordiamo che per Reid i valori di bassa e media sommergenza erano solamente 6, quindi l'analisi potrebbe risentire del piccolo numero del campione. Griffiths invece fornisce una ricerca molto ricca di dati, che restituisce un valore sicuramente più veritiero, semplicemente per un campione decisamente maggiore; il  $C_u$  di Griffiths pari a 5.485 è comunque maggiore rispetto a quello indicato da Katul.

Il parametro  $C_u$  viene assunto da Katul pari a 4.5, valore a metà tra i valori corrispondenti alla turbolenza che sviluppa rispettivamente sopra una densa copertura forestale ed un parete scabra. In dettaglio il valore di  $C_u$  per turbolenza sopra una densa copertura vegetale è 3.3, mentre quello in regime di parete scabra risulta 5.8. Il caso di scabrezza in media e bassa sommergenza risulta compreso tra la turbolenza su copertura vegetale densa e turbolenza in regime di parete scabra per cui il valore di  $C_u$  risulta compreso tra i due valori di  $C_u$  limite e viene assunto quindi pari al valore medio:  $3.3 + (5.8-3.3)/2 = 4.5$  media (Katul,2002). Possiamo quindi concludere che le nostre ricerche fanno riferimento ad alvei a parete scabra.

4. In questa figura invece oltre ai dati della fig. 27 di tipo 1, si potrà osservare la curva di velocità di Katul (linea continua), delineata con la formula 6.2, plottata in base a tutti i dati di sommergenza di studio ma ottenuta con un  $Cu$  medio interpolato (5.646), ovvero si giunge a descrivere una curva che permetta il confronto con la curva base di Katul che usa invece un  $Cu$  pari a 4.5 (linea tratteggiata). Si inserisce la successiva tabella per riassumere i valori di  $Cu$  rinvenuti nella ricerca:

Autore	$Cu$ (intero set di dati)	$Cu$ (media e bassa sommergenza)
Hey	7.519	5.927
Griffiths	5.6364	5.485
Reid	6.386	5.997
Cu medio interpolato	6.103	5.6461

Possiamo osservare come i valori di  $Cu$  subiscano grandi modificazioni qualora si passa da un'analisi del set completo di dati a un'analisi mirata ai soli dati di media e bassa sommergenza.

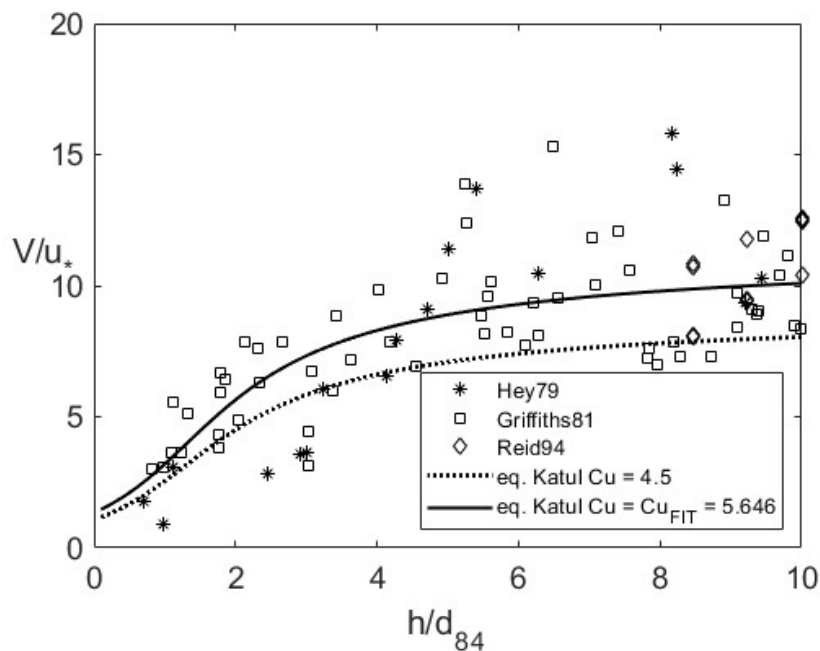


Figura 32: Equazione di Katul calcolata con  $Cu$  medio interpolato confrontata con l'equazione ottenuta con  $Cu$  medio di Katul

Dalla fig. 32 si evince che la curva di velocità delineata con il  $Cu$  medio interpolato sia una curva più ampia e che raggiunge valori di velocità maggiori rispetto alla curva di velocità disegnata con  $Cu$  medio di Katul.

Viene ora affiancata alla figura 32 una figura che contiene le curve di velocità delle tre ricerche ottenute utilizzando il  $Cu$  dell'autore, in questo modo è più semplice osservare come varia il parametro di velocità qualora si andasse a considerare il  $Cu$  singolo di ogni ricerca piuttosto che il  $Cu$  medio interpolato (fig. 32)

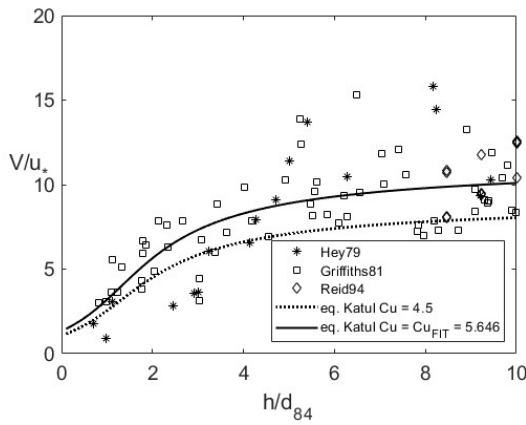


Fig. 32: Equazione di Katul calcolata con  $Cu$  medio interpolato

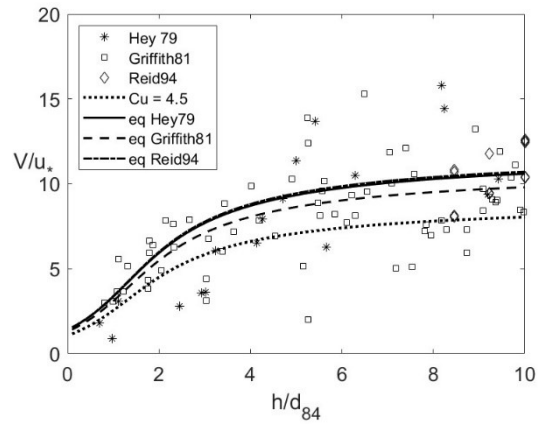


Fig.32a: Equazione di Katul calcolata con  $Cu$  dei singoli dataset

Si inserisce la successiva tabella per riassumere i valori di  $Cu$  rinvenuti nella ricerca:

Autore	$Cu$ (intero set di dati)	$Cu$ (media e bassa sommergenza)
Hey	7.519	5.927
Griffiths	5.6364	5.485
Reid	6.386	5.997
$Cu$ medio interpolato	6.103	5.6461

5. In questa figura andremo invece ad analizzare la relazione tra i dati di velocità osservati tramite misurazione e i dati di velocità calcolati con l'equazione 6.2 di Katul. Si ricorda che in ascissa si osservano i dati di velocità misurati direttamente dall'autore della ricerca, mentre in ordinata si osservano i dati di velocità ottenuti con l'equazione di Katul (utilizzando i  $Cu$  di ogni singola ricerca); Si osservano tre linee diagonali, una linea continua che rappresenta la bisettrice del grafico e altre due linee tratteggiate che rappresentano il margine d'errore accettabile.

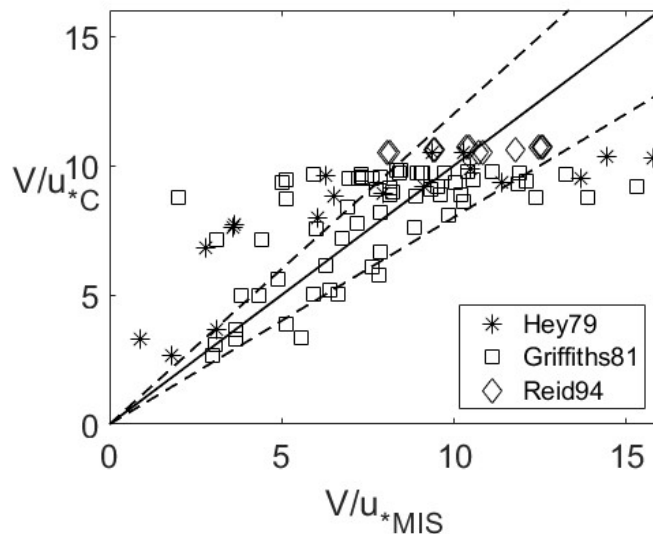


Figura 33: confronto tra valori di velocità adimensionale rilevati e calcolati.

Dalla figura notiamo come i valori di velocità si concentrino nella parte centrale del grafico intorno al valore 10, in particolare si osserva che la maggior parte dei valori esaminati rientrano all'interno del margine d'errore. Per quanto riguarda i dati di Hey, invece, gran parte di questi ricade all'esterno del margine d'errore e non possono essere quindi considerati in termini di confronto tra le due velocità. I dati di Griffiths si distribuiscono maggiormente all'interno del margine d'errore, ma sono comunque presenti diversi outliers. Tutti i dati di Reid invece sono contenuti all'interno delle linee tratteggiate eccetto due. Da questo si evince che questo metodo di confronto risulta particolarmente efficace per la ricerca di Reid e Griffiths e non per la ricerca di Hey. Si ricorda però che la ricerca di Reid considera solo 14 dati di sommergenza relativa, un campione non numeroso che rende l'analisi poco affidabile.

6. In questa figura si usano gli stessi dati e procedimenti della precedente fig. 33, di tipo 5, ma invece di utilizzare la velocità di Katul interpolata si utilizza la velocità di Katul media interpolata, ovvero il parametro di velocità calcolato tramite la formula di Katul ma con un  $C_u$  pari al  $C_u$  medio interpolato che tiene conto di tutti i  $C_u$  di studio e di tutti i rapporti di sommergenza.

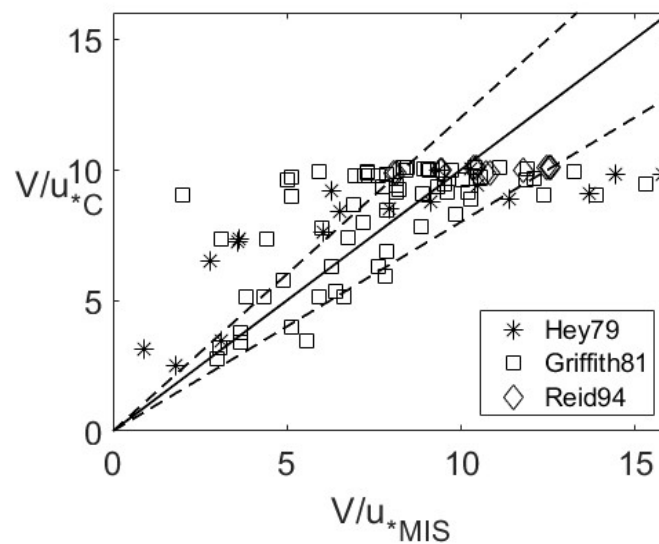


Figura 34: confronto tra valori di velocità adimensionale rilevati e calcolati.

Prima di procedere con l'analisi dei risultati si ricorda che il  $C_u$  medio interpolato, utilizzato per il calcolo della velocità in ascissa della fig.34, è un  $C_u$  pari a 5.646 quindi minore del  $C_u$  di Reid e Hey ma maggiore del  $C_u$  di Griffiths, di conseguenza i dati di velocità di Reid e Hey risultano traslati verso l'origine per mentre i dati di Griffiths che risentono di un  $C_u$  maggiore sono traslati verso l'alto. Rispetto alla figura 29 infatti si osservano delle differenze. In particolare, i dati di Reid che precedentemente presentavano due outliers ora risultano tutti contenuti nel margine d'errore. I dati di Griffiths invece risultano come in fig.29 maggiormente contenuti all'interno del margine d'errore, ma in questo caso più distribuiti verso i margini piuttosto che verso la bisettrice. Lo stesso vale per i dati di Hey che risultano traslati verso gli assi del grafico, risultando come nel caso della fig.33 maggiormente concentrati all'esterno delle linee d'errore.

Vengono ora riportate le figure 33 e 34 affiancate tra loro in modo da rendere più semplice il confronto:

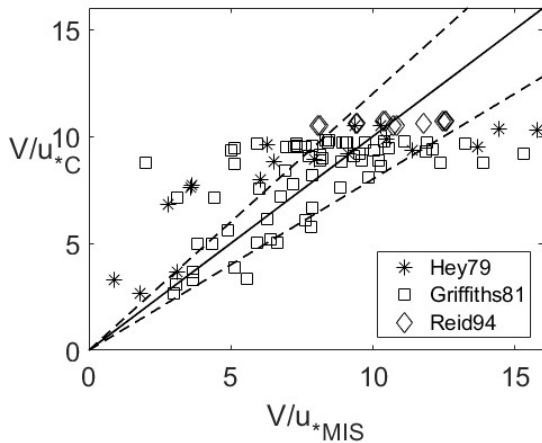


Fig. 33: velocità adimensionale calcolata con  $C_u$  dei singoli dataset

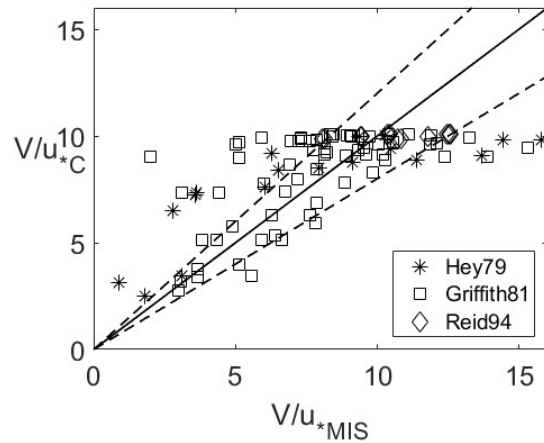


Fig.34: velocità adimensionale calcolata con  $C_u$  medio interpolato

### 7.3 DATI DI CAMPO E LABORATORIO A CONFRONTO

Precedentemente a questo capitolo, abbiamo analizzato separatamente i dati di laboratorio e i dati di campo ora invece verranno riportate una serie di figure contenenti sia i dati di campo sia i dati di laboratorio così da avere un'ultima analisi complessiva. Si ricorda che anche in questa analisi dei dati si è analizzata solamente la condizione di bassa e media sommergenza.

Procediamo ora con il confronto tra i valori di velocità ottenuti tramite misure e i valori di velocità ottenuti tramite l'equazione di Katul; Si riportano ora le figure 35 e 36 di tipo 5 e 6, con gli stessi dati delle fig.33 e 34 ma integrate coi dati di Bathurst così da avere un quadro completo della ricerca:

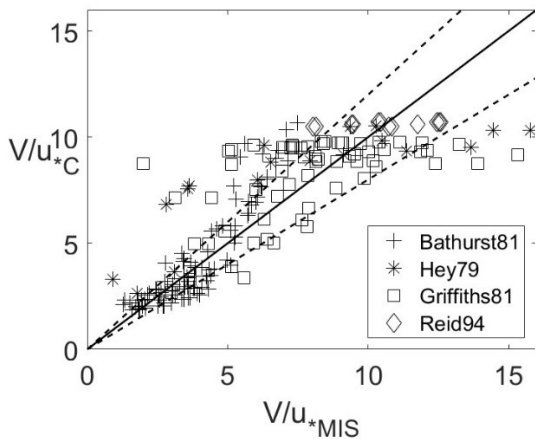


Fig. 35: velocità adimensionale calcolata con  $C_u$  dei singoli dataset

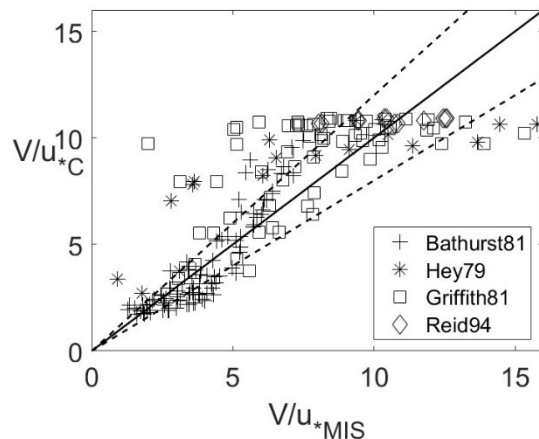


Fig.36: velocità adimensionale calcolata con  $C_u$  medio interpolato

Dalle seguenti due figure di tipo 4, fig. 37 e 38, possiamo osservare come andando ad integrare nell'analisi dei dati di campo anche i dati di laboratorio, il  $C_u$  medio interpolato cambia e di conseguenza cambia la velocità risultante; infatti, il  $C_u$  medio interpolato per isoli dati di campo assumeva un valore pari a 5.64 mentre aggiungendo anche i dati di Bathurst (dati di campo) il  $C_u$  aumenta fino a un valore di 6.1066. Ne consegue che la curva di velocità delineata con l'equazione 6.2 di Katul sia più ampia (vedi confronto 2, fig.32 e 38) rispetto alla curva di velocità dei soli dati di campo. Si ricorda che le figure sono state stilate considerando solamente la condizione di media e bassa sommergenza.



Si riporta per completezza la tabella dei relativi Cu:

1. DATI DI CAMPO

Autore	Cu (intero set di dati)	Cu (media e bassa sommergenza)
Hey	7.519	5.927
Griffiths	5.6364	5.485
Reid	6.386	5.997
Cu medio interpolato	6.103	5.6461

Tab.7.1: sintesi dei valori di Cu per i dati di campo

2. DATI DI CAMPO E LABORATORIO

Autore	Cu (intero set di dati)	Cu (media e bassa sommergenza)
Hey	7.519	5.927
Bathurst	6.61	6.61
Griffiths	5.6364	5.485
Reid	6.386	5.997
Cu medio interpolato	6.24	6.1066

Tab.7.2: sintesi dei valori di Cu per i dati di campo e laboratorio

CONFRONTO 1.

Si osserva nella fig.37 le quattro singole curve di velocità ottenute con l'equazione 6.2 di Katul e relativo Cu della tabella precedente, mentre la linea tratteggiata più in basso corrisponde alla curva di velocità di Katul ottenuta con  $Cu = 45$  (vedi tab.7.2 a pag.47).

Nella fig. 38 invece osserviamo la curva di velocità finale ottenuta inserendo nell'equazione 6.2 di Katul il Cu medio interpolato pari a 6.1066 (vedi tab.7.2 a pag.47).

Si ricorda che vengono analizzati solamente i dati in condizione di media e bassa sommergenza.

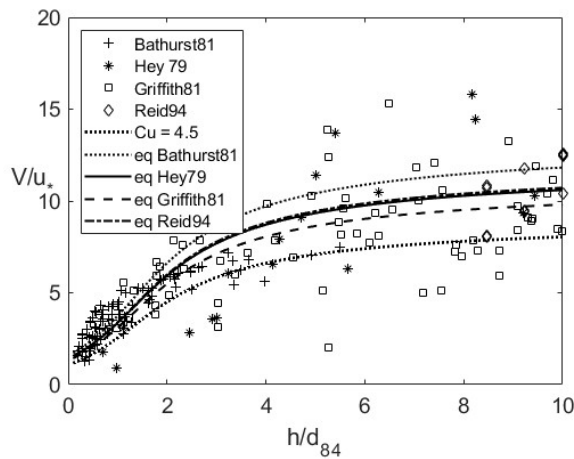


Fig. 37: Equazione di Katul con Cu dei singoli dataset

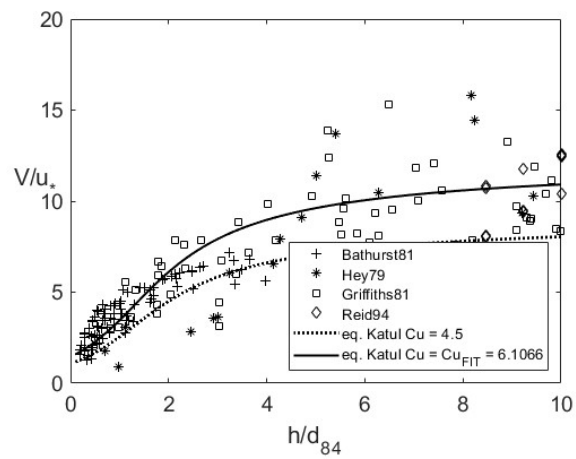


Fig.38: Equazione di Katul calcolata con Cu medio interpolato

## CONFRONTO 2.

In questo confronto possiamo osservare come varia la curva finale di velocità descritta con l'equazione 6.2 di Katul qualora passiamo da un'analisi strettamente dei dati di campo (fig.32) a un'analisi dei dati di campo e dei dati di laboratorio (fig.38). La curva realizzata utilizzando la totalità dei dati di studio risulta più ampia, in quanto ottenuta inserendo un  $Cu$  maggiore,  $6,24 > 6,1066$  (vedi tab.7.2 a pag.47).

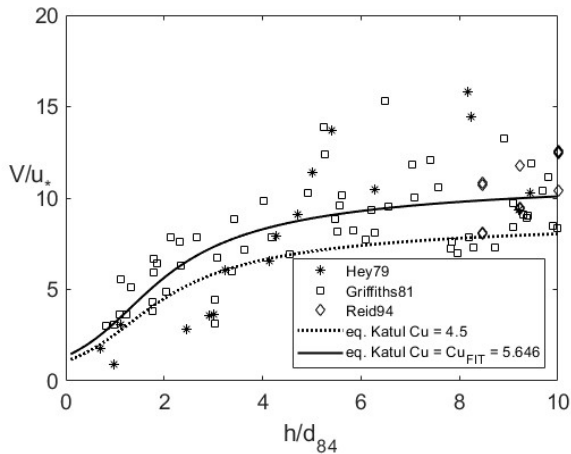


Fig. 32: Equazione di Katul con  $Cu$  medio interpolato per i soli dati di campo

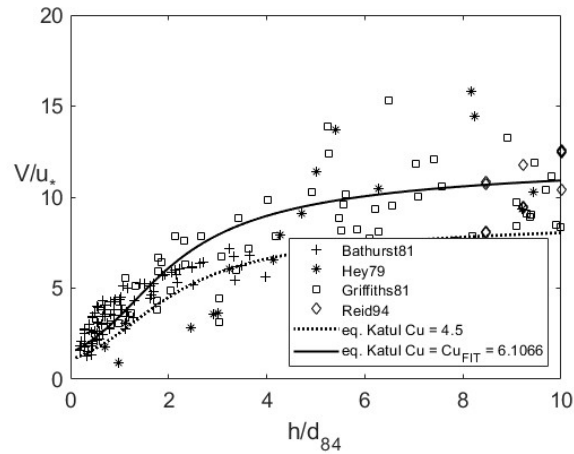


Fig.38: Equazione di Katul con  $Cu$  medio interpolato per i dati di laboratorio e campo

Si procede ora mettendo a confronto i dati utilizzati da Katul nell'articolo "A mixing Layer theory for flow resistance in shallow streams", Water Resources Research, 2002, e i dati utilizzati in questo elaborato, si osserva la tabella:

Ricerca	Autore e anno di pubblicazione	Numerosità del campione	Pendenza del pelo libero o del fondo	Altezza media o Raggio idraulico	$D_{84}$	$h/d_{84}$
Katul	Bathurst (1985)	41	0.004-0.0373	0.14-1.3	0.24-0.50	0.43-7.0
	Bathurst (1981)	33	0.02-0.08	0.008-0.042	0.007-0.09	1.1-7.0
	Colosimo (1988)	43	0.0026-0.019	0.26-0.58	0.046-0.12	2.2-12.0
	Hey (1979)	17	0.0025-0.031	0.29-3.43	0.046-0.25	1.3-26.0
Salvalaggio	Hey (1979)	30	0.00049-0.031	0.141-3.405	0.046-0.25	3-13.62
	Griffiths (1981)	136	0.000085-0.011	0.12-6.89	0.026-0.662	0.80-112
	Bathurst (1981)	88	0.02-0.08	0.0076-0.089	0.0013-0.0879	0.18-5.505
	Reid(1994)	74	0.007-0.0101	0.11-0.6	0.013	8.46-46.153

Si fa presente che alla colonna "Numerosità del campione" viene considerate la numerosità del campione totale della ricerca e non la numerosità del campione in condizione di bassa e media sommergenza, per osservare la numerosità del campione in tale condizione è possibile consultare la tabella a pag. 36 per i dati di laboratorio e a pag. 39 per i dati di campo.

Dalla tabella notiamo che la ricerca di Hey del 1979 e la ricerca di Bathurst del 1981 sono in comune, ma presentano delle differenze, questo perché Katul considera degli intervalli diversi per i valori di sommergezza relativa,  $d_{84}$  ed altezza media, di conseguenza Katul utilizza un campione di dati di numerosità inferiore rispetto ai dati utilizzati in questo elaborato. In dettaglio in questa ricerca viene considerato un range di altezza media maggiore per i dati di Bathurst e di Hey e un range di pendenza Maggiore per i dati di Hey rispetto al range considerato da Katul verso lo stesso autore. Le differenze vengono riassunte nella seguente tabella:

Ricerca	Autore e anno di pubblicazione	Numerosità del campione	Pendenza del pelo libero o del fondo	Altezza media o Raggio idraulico	$D_{84}$	$h/d_{84}$
Katul	Hey (1979)	17	0.0025-0.031	0.29-3.43	0.046-0.25	1.3-26.0
Salvalaggio	Hey (1979)	30	*0.00049-0.031	*0.141-3.405	0.046-0.25	3-13.62
Katul	Bathurst (1981)	33	0.02-0.08	0.008-0.042	0.007-0.09	1.1-7.0
Salvalaggio	Bathurst (1981)	88	0.02-0.08	*0.0076-0.089	0.013-0.0879	*0.18-5.505

\*= intervalli maggiori rispetto alla ricerca di Katul che giustificano una maggiore numerosità.

## 8. CONCLUSIONI

Determinare la resistenza al moto all'interno di un corso d'acqua non è una semplice questione, in particolare quando si analizza la condizione di medio-bassa sommergenza entrano in causa la geometria degli elementi di disturbo, la loro distribuzione e concentrazione. Risulta quindi di primaria importanza la conoscenza del parametro di sommergenza relativa, in particolare il percentile  $d_{84}$ , che può essere considerato un indicatore della resistenza al moto, all'aumentare di questo la resistenza all'interno di un corso d'acqua poco profondo (medio-bassa sommergenza) aumenta significativamente.

Per stimare dal punto di vista fisico-matematico la resistenza al moto ci siamo avvalsi dell'equazione di Katul, appositamente designata per determinare la velocità del flusso in condizioni di medio-bassa sommergenza. Applicando tale legge ai dati di studio siamo giunti alla conclusione che il parametro  $C_u$  di Katul, che ha valore medio 4.5, secondo la seguente relazione: il valore di  $C_u$  per turbolenza sopra una densa copertura vegetale è 3.3, mentre quello in regime di parete scabra risulta 5.8. Il caso di scabrezza in media e bassa sommergenza risulta compreso tra la turbolenza su copertura vegetale densa e turbolenza in regime di parete scabra per cui il valore di  $C_u$  risulta compreso tra i due valori di  $C_u$  limite e viene assunto quindi pari al valore medio:  $3.3 + (5.8-3.3)/2 = 4.5$  media. Dai nostri studi si evince che il  $C_u$  delineato all'interno di ogni singolo dataset risulta maggiore del  $C_u$  medio di Katul; in particolare si osservano valori di  $C_u$  medio interpolato pari addirittura a 6.61 per i dati di laboratorio e 5.64 per i dati di campo, quindi valori molto più vicini a valori associabili a pareti scabre piuttosto che a coperture vegetali. Di conseguenza avendo utilizzato  $C_u$  maggiori i dati di velocità risultano più importanti rispetto a quelli ottenuti con un  $C_u$  di 4.5, come si evince dalle fig. 24, 28, 29, 30 e 32 dove la curva di velocità ottenuta con il  $C_u$  di studio è più ampia della curva ottenuta col  $C_u$  di Katul.

Procedendo invece verso un'analisi più dettagliata della velocità finale che risente delle condizioni di scabrezza del fondo che ne rallentano il moto si è osservato che mettendo a confronto i dati di velocità osservati dai ricercatori tramite misurazione e i dati di velocità ottenuti tramite applicazione della legge di Katul si è giunti a due conclusioni diverse in base al parametro di velocità di Katul che veniva considerato: base o medio.

- Analizzando i dati di velocità tramite confronto dei valori misurati e i valori di velocità di Katul interpolati si osserva che per i dati di laboratorio (fig.26) i valori risultavano concordi soprattutto per i valori di sommergenza ( $h/d_{84}$ ) minori di 6, all'aumentare di questo valore i dati si allontanano sempre più dalla bisettrice e dal margine d'errore; per i dati di campo invece la maggior parte dei dati risulta concorde, si distribuiscono infatti lungo la bisettrice.
- Analizzando invece i dati di velocità ottenuti tramite il confronto dei valori misurati e i valori di velocità di Katul interpolati medi si osservano alcune differenze rispetto all'analisi riportata al punto precedente. Si ricorda che questo tipo di analisi è stata effettuata solamente per i dati di campo in quanto per i dati di laboratorio essendoci una sola ricerca il parametro  $C_u$  interpolato risulta uguale al  $C_u$  di studio e di conseguenza il valore di velocità medio interpolato risulta uguale al parametro interpolato. Per i dati di campo (fig. 33 e 34) si osserva come generalmente tutti i dati risentano dell'applicazione di una velocità media con conseguente riduzione della velocità finale per tutti quei dati per cui  $C_u$  medio interpolato <  $C_u$  di studio, per i dati per cui il  $C_u$  medio interpolato fosse maggiore del  $C_u$  di studio si osserva come questi vengano traslati verso l'alto (vedi dati di Griffiths fig.34). La maggior parte dei dati risulta comunque compresa all'interno del margine d'errore, soprattutto se applicata la velocità media interpolata.

Si ricorda che i dati utilizzati, in seguito alla scrematura per considerare solamente la condizione di medio-bassa sommergenza, risultano pari a 196 di cui solo 88 di campo, al fine di ottenere un ricerca più approfondita sarebbe stato necessario aumentare il campione id dati a disposizione soprattutto per quanto riguarda i dati di laboratorio, in quanto gli 88 dati in esame provengono da una unica ricerca e non è stato possibile infatti effettuare la misurazione della velocità utilizzando il valore di velocità medio interpolato.

Dalle precedenti osservazioni con riferimento alle figure di tipo 5 e 6, in particolare le fig. 26, 33 e 34, è possibile affermare che il metodo di Katul per la stima della resistenza al moto nei corsi d'acqua in condizione di medio-bassa sommergenza risulta efficace sia in condizioni di laboratorio sia di campo, la velocità calcolata tramite l'equazione di Katul risulta un valore attendibile tanto quanto il valore di velocità che viene misurato dagli autori delle ricerche.

- BIBLIOGRAFIA

- Baiamonte G. e Ferro V. "The influence of roughness geometry and shields parameter on flow resistance in gravel-bed channels", *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997
- Barnes, H. H., Jr. "Roughness characteristics of natural channels". U.S. Geological Survey Water-Supply, 1967.
- Bathurst J.C. "At a site variation and minimum flow resistance for mountain rivers", *Journal of Hydrology*, 2002
- Bathurst J.C. "Resistance equation for large-scale roughness", *Journal of Hydrology*, 1981
- Bathurst, J. C. "Flow resistance of large-scale roughness", *Journal of the Hydraulics*, 1978
- Ferro V. "Flow resistance in gravel bed channels with large scale roughness" *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003
- Griffiths G.A. "Flow resistance in coarse gravel bed rivers", *Journal of Hydrology*, 1981
- Hey R.D. "Flow resistance in gravel bed rivers", *Journal of Hydrology*, 1979
- Katul G. "A mixing Layer theory for flow resistance in shallow streams", *Water Resources Research*, 2002
- Powell D.M. "Flow resistance in gravel bed rivers: progress in research", *Earth Science Reviews*, 2014
- Rickenmann, D., and A. Recking "Evaluation of flow resistance in gravel bed rivers through a large field data set" *Water Resour. Res.*, 47, W07538, doi:10.1029/2010WR009793. 2011
- Reid I. "The Nahal Yatir bedload database: sediment dynamics in gravel-bed ephemeral stream", *Earth Surface Processes and Landforms*, 1994
- Snyder B.S. "Flow resistance estimation in mountain streams", Colorado S.U. 2018
- Yen B.C. "Open channel flow Resistance", *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002