

ANNO ACCADEMICO 2008/2009

Relatore  
Ch.mo Prof. Ing.  
MASSIMO GRECO

Candidato  
DARIO SABINI  
Matr. 518/489

**VALUTAZIONE DELLA CONDIZIONE DI INIZIO  
TRASPORTO DI UNA CORRENTE IDRICA DEFLUENTE IN  
UN ALVEO A FONDO MOBILE**

*ABSTRACT*

*Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale*

(Classe delle Lauree N°8 – Ingegneria Civile ed Ambientale)

**INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

Corso di Laurea in

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
FEDERICO II**

Lo studio del trasporto di materiale solido all'interno di una corrente idrica è un problema ricorrente nell'ingegneria idraulica; il caso applicativo più comune è rappresentato dalle correnti defluenti in alvei naturali o artificiali.

Lo stato di un corso d'acqua è determinato dalle caratteristiche di forma, di costituzione geologica, di vegetazione, di regime idrogeologico del bacino versante, e, infine, dalle attività antropiche.

L'insieme di questi fattori condiziona, unitamente alle caratteristiche meteo - climatiche, la quantità e la distribuzione degli apporti liquidi e solidi, ed influenza la capacità stessa della corrente di trasportare lungo il suo corso il materiale detritico, *modificando*, per erosione o deposito, *l'alveo del corso d'acqua*.

E' noto che il letto di un tronco fluviale cambia continuamente forma e composizione granulometrica, sia per l'arrivo irregolare del materiale solido dalla rete idrografica, sia per il succedersi irregolare di portate di piena (capaci di mobilitare tutto il materiale per l'intera larghezza dell'alveo) e di minori portate (che trasportano solo il materiale più sottile, in una stretta fascia attorno al *thalweg*).

Tutto ciò determina di volta in volta una diversa composizione granulometrica ed un grado di addensamento del materiale costituente il fondo; la *modellazione dell'alveo*<sup>1</sup>, pertanto, assume un aspetto importante per l'ingegnere, il cui compito è (anche) valutare l'entità degli effetti provocati dalla corrente solida sulla morfologia fluviale.

In tale elaborato si è valutata la condizione di inizio del trasporto solido di una corrente idrica defluente in un alveo a fondo mobile, al variare delle caratteristiche idrauliche, geometriche e granulometriche. Tale fenomeno rappresenta un aspetto di tutto rilievo per l'ingegnere; difatti è fondamentale conoscere le condizioni di trasporto, per esempio, per la prevenzione e il controllo delle piene fluviali, ovvero per la sistemazione dei bacini idrografici, ovvero per valutare la possibilità di realizzare opere di costruzione a margine del corso stesso.

Definite le condizioni al contorno, l'analisi del problema è iniziata con l'individuazione dei metodi da impiegare per prevedere, innanzitutto, i caratteri delle correnti *a pelo libero*<sup>2</sup>, e dunque esplicitando le principali *formule di resistenza al moto*. Sono state individuate le condizioni di moto

---

<sup>1</sup> Cfr. Capitolo I. Paragrafo 1.1. *Effetti del trasporto solido sull'alveo*.

<sup>2</sup> Cfr. Capitolo II. Paragrafo 2.1. *Analisi delle condizioni del problema*.

*uniforme e turbolento*, e pertanto si è ritenuto di procedere utilizzando la relazione di *Gaukler - Strickler*, che consente di esplicitare, ed in maniera semplice, la dipendenza del coefficiente di scabrezza  $K_{ST}$  dal diametro delle particelle.

Indagando nella letteratura scientifica, lo studio si è soffermato sulle relazioni tra le caratteristiche idrauliche della corrente e quelle di mobilità dell'alveo; dunque si sono identificate le diverse tipologie di trasporto del materiale d'alveo (trasporto per fluitazione o *floating debris*; trasporto in soluzione o *dissolved load*; trasporto in sospensione o *suspended load*; trasporto al fondo o *bedload*).

E' bene sottolineare che, perché il materiale d'alveo di un corso d'acqua si metta in movimento, deve accadere che le forze idrodinamiche prevalgano sulle forze che si oppongono al moto. Le condizioni di flusso in cui la particella si trova al limite del movimento vengono indicate come *critiche*, o di *incipiente movimento*.

Grazie alla *Teoria di Shields*<sup>3</sup> (e alle prove sperimentali di altri autori da Shields usate per validare la sua teoria) si è potuto approfondire lo studio del *trasporto solido al fondo*; è possibile identificare, difatti, una *condizione limite* che consente di appurare, seppur solo schematicamente, l'instaurarsi delle condizioni di inizio del trasporto. Calcolando i due parametri  $Re^*$  (*Numero di Reynolds per i granelli*) e  $\theta$  (*Parametro Critico di Mobilità di Shields*) - espressi in funzione delle caratteristiche idrauliche e meccaniche del fluido, di quelle geometriche dell'alveo, e delle caratteristiche meccaniche e granulometriche dei materiali trasportati - è possibile rappresentare nel piano  $Re^* - \theta$  i punti relativi ad un granello ( $d$ ) in date condizioni ( $Q, \nu, R$ ). In tale piano giace la *curva sperimentale di Shields*, rispetto alla quale i punti ricadono al di sopra (*presenza del trasporto*) o al di sotto (*il granello è fermo*). Impiegando tale teoria, si sono fatte delle assunzioni numeriche per analizzare la dipendenza della condizione dell'inizio del trasporto solido al fondo al variare della *portata idrica Q*, della *pendenza dell'alveo i, e della *dimensione caratteristica del materiale solido d*. Si sono scelte, pertanto, quattro piccole pendenze, quattro portate e sei diametri, con l'obiettivo di effettuare valutazioni in molteplici condizioni<sup>4</sup>.*

Indipendentemente da quali portate e pendenze siano state ipotizzate, le particelle più piccole, e di conseguenza le più leggere (quelle corrispondenti al diametro  $d_1 = 150 \mu$  sino al

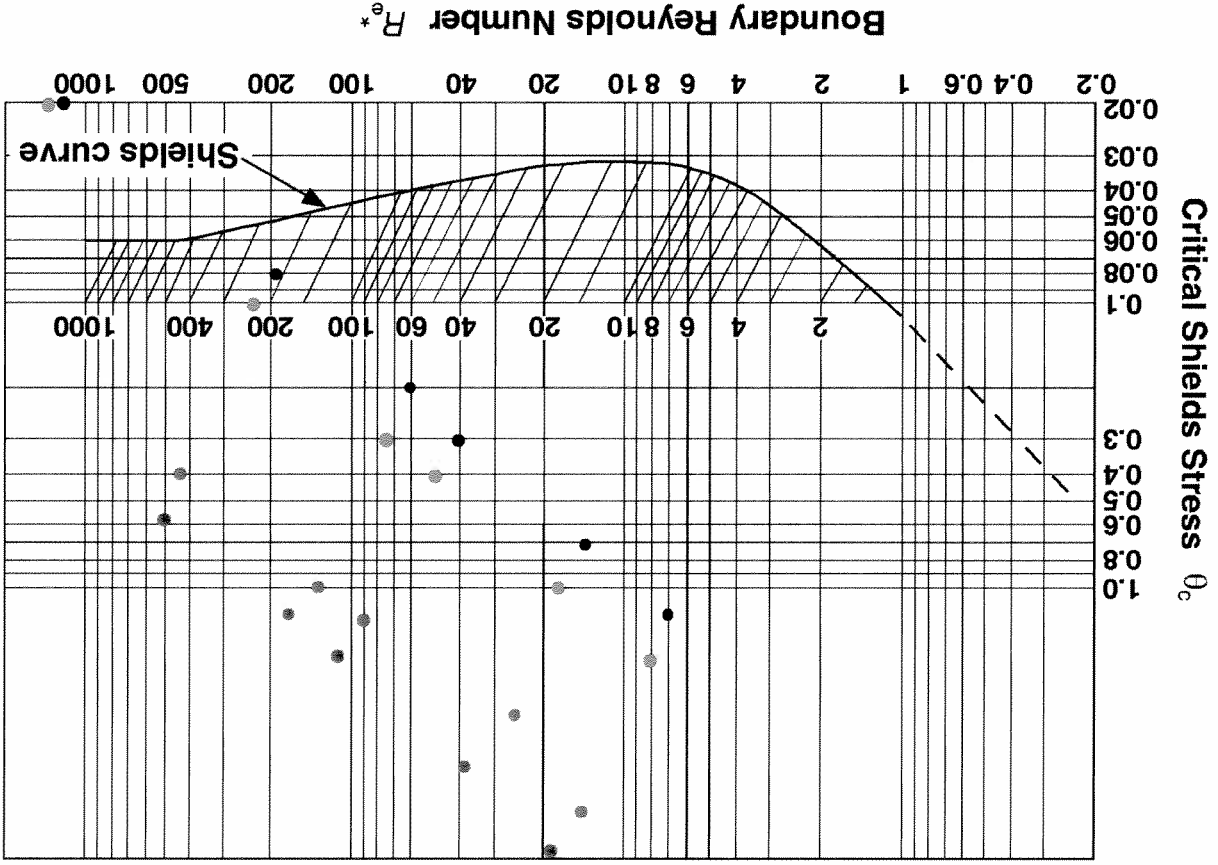
<sup>3</sup> Cfr. Capitolo II, Paragrafo 2.3. *Condizioni di moto incipiente: la teoria di Shields*.

<sup>4</sup> I calcoli con le relative soluzioni e rappresentazioni sono disponibili nel Capitolo III - *Modelli di Calcolo ed Applicazioni* - di tale elaborato.

diametro  $d_4 = 1,2 \text{ mm}$ ), hanno mostrato *sempre* la tendenza a trovarsi in condizioni di trasporto: un risultato che non sorprende, in virtù del fatto che la forze idrodinamiche che agiscono su una particella, perchè questa si muova sul fondo, devono "vincere" le forze che si oppongono al movimento (tra le quali la forza peso).

I diametri  $d_5 = 3,5 \text{ mm}$  e  $d_6 = 20 \text{ mm}$  hanno manifestato, invece, *maggiore dipendenza* dalle condizioni di portata<sup>5</sup> e *pendenza* dell'alveo, trovandosi in condizione di movimento solo nelle situazioni più gravose (tra quelle qui considerate).

Nel grafico che segue si rappresentano quattro serie di punti relativi a tutti i diametri e tutte le *pendenze*, imponendo un valore costante alla variabile portata [ $Q_1 = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ ], al fine di presentare il trend di variazione della condizione di trasporto rispetto alle variabili *diametro* e *pendenza*<sup>6</sup>.



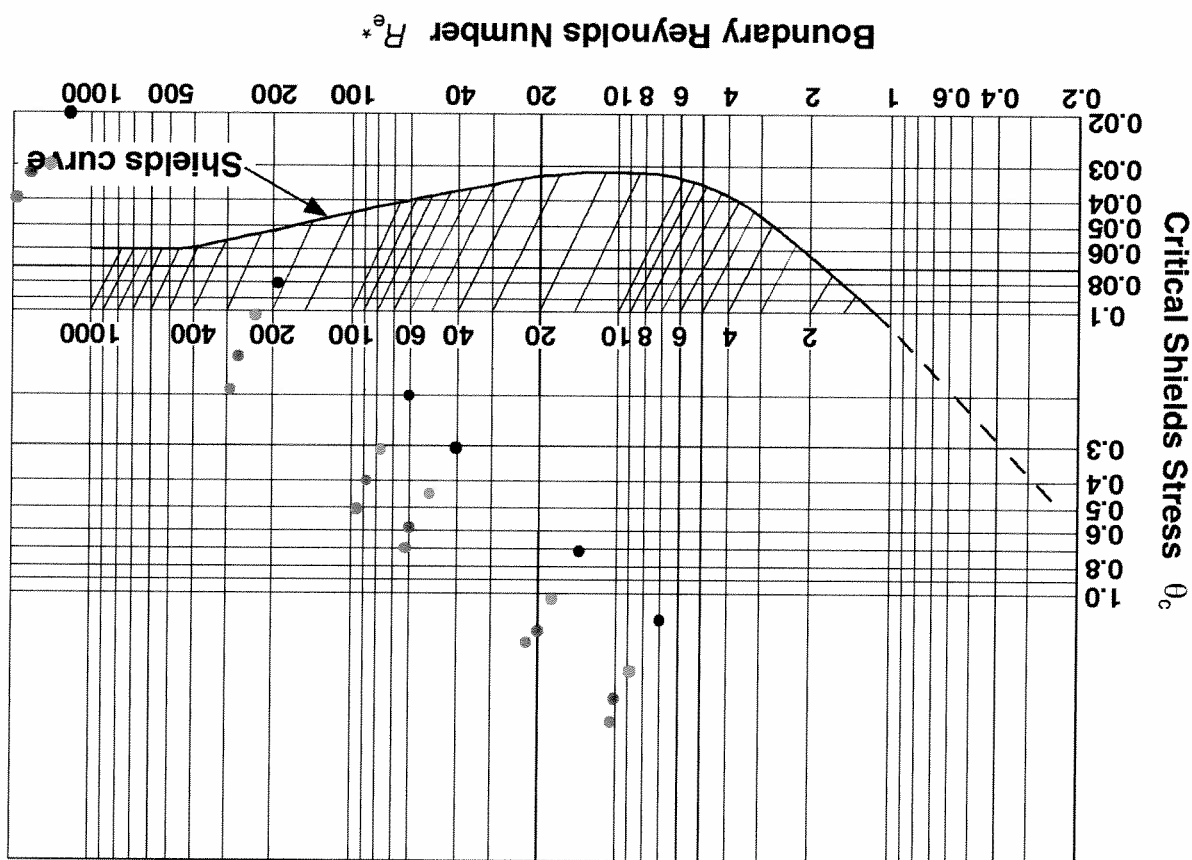
<sup>5</sup> Le portate sono espresse in  $[\text{m}^2/\text{s}]$  perchè considerate come portate per unità di larghezza.

<sup>6</sup> *Legenda:* Da sinistra verso destra (in uno stesso colore) i diametri crescono rispettivamente da  $d_1$  a  $d_6$ . Le pendenze sono rappresentate dai colori, rispettivamente nero, rosso, viola e verde per  $i_1, i_2, i_3, i_4$

Da sinistra verso destra (in uno stesso colore) i diametri crescono rispettivamente da  $d_1$  a  $d_6$ . Le portate sono rappresentate dai colori, rispettivamente nero, rosso, verde e viola per  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$

7 *Legenda:*

Anche in questo caso i diametri relativi ad una stessa portata si dispongono su una retta, che trasla verso l'alto all'aumentare della portata.  
 Compiendo delle osservazioni intorno al grafico che segue, infine, si può spiegare quale sia, tra le tre variabili imposte  $Q$  ed  $f$ , quella che maggiormente influisce sulle condizioni di trasporto.



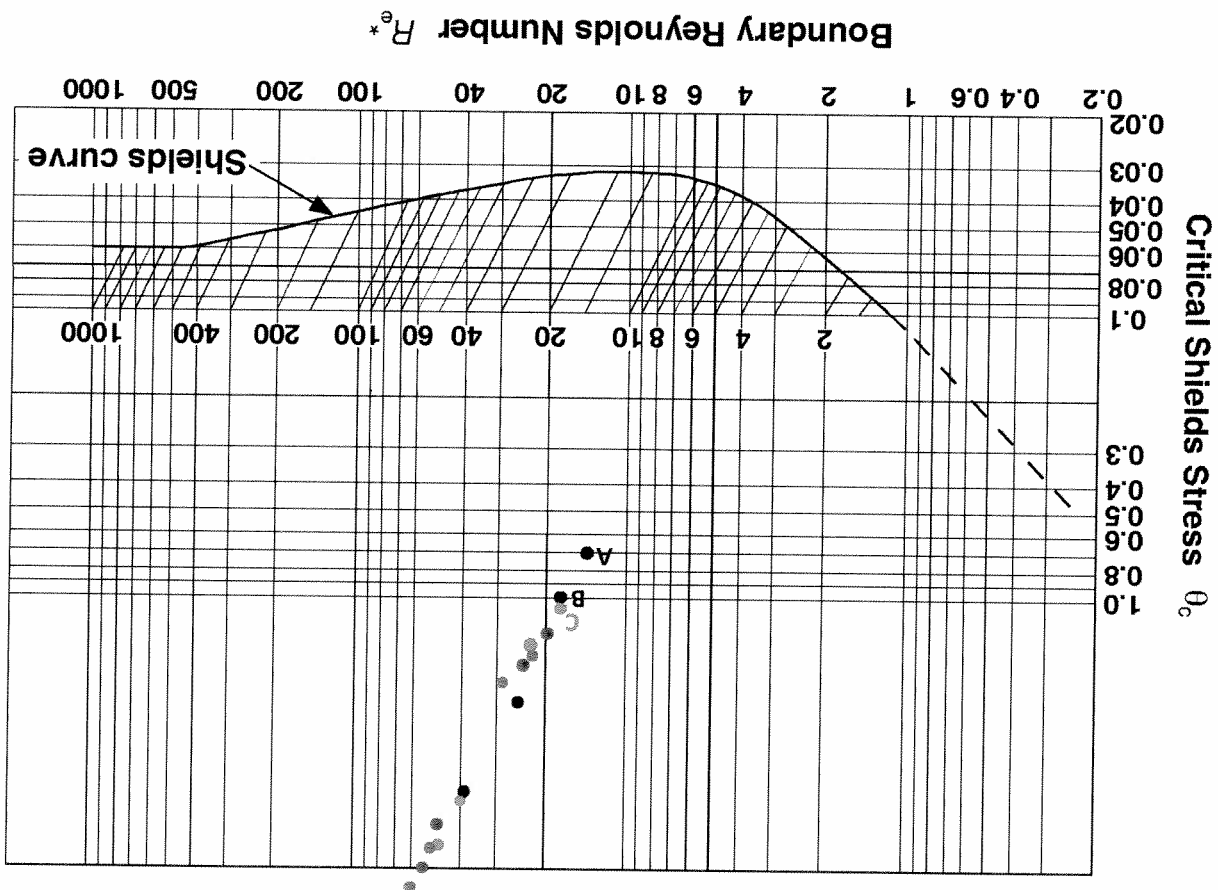
Si può notare come i diametri relativi ad una stessa portata si dispongono per formare una vera e propria retta, e come, all'aumentare della portata, questa retta trasla verso l'alto, rendendo più probabile la condizione di trasporto anche per i diametri più grandi (o, se si preferisce, per le particelle più pesanti). Stesso discorso si può fare imponendo un valore fisso alla variabile pendenza [ $f_1 = 0,0006$ ], per mostrare la tendenza della variazione della condizione di inizio del trasporto solido rispetto alle variabili portata e diametro.

Da sinistra verso destra (in uno stesso colore) le pendenze crescono rispettivamente da  $t_1$  a  $t_4$ . Le portate sono rappresentate dai colori, rispettivamente nero, rosso, verde e viola per  $\bar{Q}_1, \bar{Q}_2, \bar{Q}_3, \bar{Q}_4$

8 *Legenda:*

- Punto B [ $Q_1 = 1 \text{ m}^2/\text{s}; t_2 = 0,001$ ]  $\leftarrow$  [ $Re^* = 18; \theta = 1,04$ ]
- Punto C [ $Q_2 = 2 \text{ m}^2/\text{s}; t_1 = 0,0006$ ]  $\leftarrow$  [ $Re^* = 18; \theta = 1,10$ ]

Esaminando questo grafico si può supporre che portata e pendenza abbiano pressappoco la stessa influenza sulle condizioni di trasporto; ed in linea di massima è così. Bisogna, tuttavia, operare una considerazione: a partire dalla condizione più semplice, ovvero quella del Punto A [ $Q_1 = 1 \text{ m}^2/\text{s}; t_1 = 0,0006$ ], si considerino i seguenti punti:



Stavolta si riportano i punti relativi ad uno stesso diametro [ $d_2 = 0,3 \text{ mm}$ ] per mostrare il trend di variazione delle condizioni di trasporto rispetto alle variabili *portata e pendenza*.

Il punto B corrisponde all'aumento della pendenza (rispetto al punto A), il punto C invece all'aumento della portata. L'errore nel quale si rischia di imbarcarsi, esaminando i valori di  $Re^*$  e  $\theta$ , è credere che la portata influisca più della pendenza. Ad un raddoppio della portata, infatti [dalle condizioni del punto A:  $Q_1 = 1 \text{ m}^2/\text{s}$  a quelle del punto B:  $Q_2 = 2 \text{ m}^2/\text{s}$ ], non corrisponde un raddoppio della pendenza [dalle condizioni del punto A:  $i_1 = 0,0006$  a quelle del punto C:  $i_2 = 0,001$ ]. Pertanto, ripetendo il calcolo e ponendo come pendenza esattamente il doppio della pendenza più piccola [ $i_2^* = 0,0012$ ] si otterrebbero le seguenti coordinate (per un ipotetico punto C\*):

$$\text{Punto C* } [Q_1 = 1 \text{ m}^2/\text{s}; i_2^* = 0,0012] \longleftarrow [Re^* = 19, \theta = 1,18]$$

Inoltre, se per ipotesi si raddoppiasse il diametro, rispetto alle condizioni del punto A [ $Q_1 = 1 \text{ m}^2/\text{s}; i_1 = 0,0006$ ], si otterrebbero le coordinate:

$$[Q_1 = 1 \text{ m}^2/\text{s}; i_1 = 0,0006; d^* = 0,6 \text{ mm}] \longleftarrow [Re^* = 30, \theta = 0,39]$$

Tali circostanze mostrano come la variazione della pendenza influisca maggiormente (seppur di poco) rispetto alla portata  $Q$ : al tempo stesso emerge che la variabile che condiziona più di tutte il trasporto solido al fondo è certamente la dimensione caratteristica dei granelli  $d$ .

A conferma di queste considerazioni basti esaminare i risultati delle applicazioni numeriche, nelle quali che la portata di calcolo sia  $Q_1 = 1 \text{ m}^2/\text{s}$ , o il suo quadruplo [ $Q_4 = 4 \text{ m}^2/\text{s}$ ], solo per le pendenze più alte una particella di  $2 \text{ cm}$  di diametro si trova in condizioni di trasporto.

Al fine di rendere completo il lavoro di approfondimento, sono stati eseguiti calcoli numerici ipotizzando un coefficiente di scabrezza al fondo  $K_{ST}$  costante<sup>9</sup>, (piuttosto che utilizzare la relazione che lega il  $K_{ST}$  con il diametro dei granelli). Tale applicazione, come mostra la figura che segue, fornisce delle coordinate nel piano  $Re^* - \theta$  decisamente più elevate; tali risultati appaiono però conservativi ai fini delle applicazioni ingegneristiche. Si riporta di seguito il raffronto con le due diverse espressioni del  $K_{ST}$ , considerando [ $Q_1 = 1 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $i = 0,0006$ ]<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> Cfr. Capitolo III. Paragrafo 3.7. Applicazioni numeriche per  $\bar{Q} = \bar{Q}_1$  e  $K_{ST} = 25$ .

<sup>10</sup> Legend: Da sinistra verso destra (in uno stesso colore) i diametri crescono rispettivamente da  $d_1$  a  $d_6$ . I punti rossi corrispondono ai calcoli effettuati imponendo  $K_{ST} = 25$ .

In conclusione, si può affermare che le valutazioni effettuate mostrano una *evidente* e *prevista* dipendenza della condizione dell'inizio del trasporto solido, in una corrente defluente in un alveo a fondo mobile, dalle variabili ipotizzate. Rispettivamente, influiscono maggiormente sulle condizioni di trasporto il *diametro  $d$* , la *pendenza  $i$*  e la *portata  $Q$* .

Il problema dell'assortimento granulometrico e della identificazione delle granulometrie è di particolare importanza, per esempio, per i corsi d'acqua con letto in ghiaia, dove sono presenti sedimenti dimensionalmente molto differenziati. I granuli risultano così più o meno esposti all'azione della corrente a seconda delle proprie dimensioni e quelle dei granelli vicini; e proprio in virtù del fatto che il diametro  $d$  è la più influente tra le caratteristiche, sarà opportuno, ai fini delle applicazioni ingegneristiche, conoscere mediante un'analisi granulometrica la quantità di particelle che "appartengono" a ciascun diametro (oltre che i valori di  $Q$  ed  $i$ ), al fine di conoscere il valore della portata solida che si muove sul letto del corso d'acqua.

