

Ulteriori considerazioni circa un confronto tra dati di trasporto solido sperimentali e teorici in due stazioni di misura di corsi d'acqua marchigiani

Ignazio Mantica, Paolo Perucci

Università degli Studi di Ancona, Istituto di Idraulica
Facoltà di Ingegneria, via Breccie Bianche, Ancona

SOMMARIO

Gli AA. confrontano i dati sperimentali ottenuti da Tazioli et alii, relativi a due stazioni di misura delle portate solide al fondo installate sul F. Esino e sul F. Musone nelle Marche (Italia), con i risultati numerici ottenuti applicando le più usuali formule per il calcolo della portata solida al fondo.

Rispetto al precedente lavoro, presentato al XII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche tenutosi a Cosenza dal 4 al 7 ottobre 1990, il confronto è riferito anche alle teorie più recenti (Akers e White, van Rijn)

ABSTRACT

The Authors compare the experimental data obtained by Tazioli et al. with the numerical results obtained by applying the usual formula for the calculation of the solid flow at the bottom. These data regard the measurements of the solid flow at the bottom installed in two different stations on the river Esino and on the river Musone (Marche - Italy).

* Perucci

Completare abstract.

1. INTRODUZIONE

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

dalle attività antropiche.

L'insieme di questi fattori condiziona, unitamente alle caratteristiche meteorologiche, la quantità e la distribuzione degli apporti liquidi, degli apporti solidi ed influenza la capacità stessa della corrente a trasportare lungo il suo corso il materiale detritico ed a modificare, per erosione o deposito, il proprio alveo.

Il letto di un tronco fluviale modifica, infatti, 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) a quelle con 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; per cui a parità di condizioni idrodinamiche della corrente, la quantità di materiale trasportato può variare sensibilmente a seconda dello stato dell'alveo.

Ricerche condotte presso stazioni di misura che permettono la registrazione continua della portata solida hanno evidenziato la natura pulsante del trasporto solido al fondo e ciò in qualsiasi condizione di portata.

Il problema dell'assortimento granulometrico e della identificazione delle granulometrie è di particolare importanza 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 granuli vicini.

Numerose sono le formule nella letteratura tecnica per il calcolo della portata solida al fondo di una corrente idrica a pelo libero.

La complessità fisica del fenomeno rende estremamente difficoltoso individuare a priori la formula che meglio lo interpreta perchè tali formule sono da ritenersi sufficientemente valide limitatamente alle esperienze per cui sono state ricavate e/o verificate.

Ciò comporta una sostanziale differenza tra i valori della capacità di trasporto potenziale e quelli della portata solida effettiva.

L'applicazione delle suddette formule ai corsi d'acqua naturali, per i quali sono disponibili valori sperimentalmente misurati, consente di ricavare utili indicazioni sulla applicabilità delle stesse.

In questo lavoro sono stati confrontati i dati ricavati con 54 misure di campagna, eseguite in due stazioni di misura sui fiumi Esino e Musone, con i risultati numerici derivanti dall'applicazione di 12 formule per la stima della portata solida al fondo.

2. LE FORMULE DEL TRASPORTO SOLIDO SUL FONDO

Le formule del trasporto solido sul fondo stimano la portata solida in funzione di alcune delle seguenti grandezze:

- caratteristiche geometriche dell'alveo
(pendenza media del fondo, larghezza, raggio idraulico)
- caratteristiche idrauliche della corrente liquida
(portata, velocità media, pendenza motrice, altezza della corrente)
- caratteristiche meccaniche del fluido
(densità, peso specifico)
- caratteristiche meccaniche e granulometriche dei materiali trasportati
(densità, peso specifico, dimensione caratteristica, velocità di sedimentazione in acqua, grado di addensamento al fondo).

Le 12 formule utilizzate per il calcolo della portata solida al fondo sono:

Formula di Du Boys - (1879)

$$q_s = \chi \tau_0 (\tau_0 - \tau_{0_{Cr}})$$

dove χ parametro caratteristico dei sedimenti

Formula di Schoklitsch e Shulits - (1934)

$$g_s = 7000 \frac{i^{3/2}}{d^{1/2}} (q - q_{Cr})$$

dove

$$q_{Cr} = \frac{1,944 * (10^{-5} d)}{i^{4/3}}$$

Formula di Meyer - Peter - (1934)

$$\frac{gL^{2/3} i}{d} - 9,57 (\gamma_s - \gamma)^{10/9} = ,462 (\gamma_s - \gamma)^{1/3} \frac{(g' s)^{2/3}}{d}$$

Formula di Shields - (1936)

$$\frac{g_s (\gamma_s - \gamma)}{q \cdot i \gamma} = 10 \frac{(\tau_0 - \tau_{0Cr})}{(\gamma_s - \gamma) d}$$

Formula di Einstein & Brown - (1942)

$$0,456 \varnothing = e^{-,391 \psi}$$

dove:

\varnothing = intensità di trasporto solido

ψ = intensità di flusso

Le \varnothing e ψ sono funzioni adimensionali

Formula di Kalinske - (1947)

$$\frac{q_s}{V d} = f \left(\frac{\tau_0 - \tau_{0Cr}}{\tau} \right)$$

con:

f funzione sperimentale

Formula di Meyer - Peter & Mueller - (1948)

$$\frac{R(K/K')^{3/2} i}{d} - 0,47 (\gamma_s - \gamma) = 0,25 \sqrt[3]{\rho} \frac{g' s^{2/3}}{d}$$

con:

K/K' = coefficiente di correzione compreso nell'intervallo (0.5 - 1)

Formula di Schoklitsch - (1950)

$$g_s = 2500 i^{3/2} (q - q_{Cr})$$

con

$$q_{Cr} = 0,26 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^{5/3} \frac{d^{3/2}}{i^{7/6}}$$

Formula di Einstein - (1950)

$$P = \frac{A^* \varnothing^*}{1 + A^* \varnothing^*}$$

con

$$P = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{+B^* \varnothing^* - 1/\eta_0}^{-B^* \varnothing^* - 1/\eta_0} e^{-t^2} dt$$

dove:

$$\begin{aligned} A^* &= 43,5 \\ B^* &= ,134 \\ \eta_0 &= 0,5 \end{aligned}$$

Formula di Yalin - (1963)

$$P = \frac{P}{g' s d V^*} = \text{Cost S} \left[1 - \frac{1}{S} \log(1+as) \right]$$

Formula di Pica - (1972)

$$\frac{G_s}{\gamma_s Q} = C \frac{Q^{1/4} i^{5/3}}{d^{3/5}}$$

con C valori tabulari

Formula di Pezzoli - (1978)

$$\frac{q_s}{V d} = \frac{2}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau_0} \right)^{1/6} \left(\frac{\tau_0}{\tau_0} - 1 \right)^{5/3}$$

3. I DATI DI CAMPAGNA UTILIZZATI

I dati considerati sono stati raccolti nell'ambito di una ricerca sulle caratteristiche geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche dei bacini dei fiumi Esino e Musone, diretta dal Prof. G.S. Tazioli, del Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra, dell' Università di Ancona.

Per le misure relative al trasporto al fondo, 37 per il F. Esino e 17 per il F. Musone, sono state attrezzate due sezioni, con teleferiche, poste a 4 Km dalla foce

per il F. Musone ed a 18.5 Km dalla foce per il F. Esino, con l'impiego di campionatori tipo Tevere , Helley-Smith modificati, aventi bocche rispettivamente da 16 cm e 12 cm. Le due stazioni sottendono una superficie di 940 Km² per il F. Esino e 460 Km² per il F. Musone.

Per la misura delle portate idriche si è utilizzata una scala delle portate tarata con prove di campagna.

Per ciascuna misura di trasporto solido i dati disponibili riguardano la larghezza della sezione, l'altezza media della corrente, la portata idrica, la durata del campionamento, il peso asciutto del materiale e l'analisi granulometrica.

Per il F. Esino le misure sono state eseguite in condizioni di deflusso che si è potuto ritenere uniforme, tranne i primi tre eventi riferiti a fasi di esaurimento di piene, mentre per il F. Musone le misure di portata solida sono state eseguite durante le piene sia nella fase crescente che nella fase di esaurimento.

Un esame comparato del trasporto solido nei due fiumi mostra che nel F. Musone il trasporto al fondo è un'aliquota molto piccola del trasporto solido totale (≈ 0.05 Kg/s per portata di 50 m³/s) mentre per il F. Esino il trasporto al fondo costituisce una aliquota più cospicua del totale (≈ 15 Kg/s per portate di 50 m³/s). I valori ora indicati rapportati ai Km² di superficie forniscono 0.00011 Kg/s*Km², per il F. Musone e 0.016 Kg/s*Km² per il F. Esino.

Questi valori sono conseguenti sia alle diverse caratteristiche dei bacini sia alla presenza sul F. Musone in località Cingoli ad una distanza di circa 54 Km dalla foce, e quindi a monte della stazione di misura delle portate della diga di Castreccioni con un invaso di circa 40 milioni di m³.

Come noto, la portata solida al fondo è fortemente dipendente dall'assortimento granulometrico del materiale costituente l'alveo e può essere studiato mediante la stima del rapporto tra i parametri D_{90} e D_{10} . Quanto più tale valore è vicino all'unità tanto più dimensionalmente omogeneo è il materiale costituente il letto del corso d'acqua.

Dalle nostre elaborazioni tale rapporto varia da un minimo di 3.2 ad un massimo di 168.7 con valore medio pari a 20.8 per il F. Esino e da un minimo di 5.8 ad un massimo di 244.9, con valore medio pari a 47.5 per il F. Musone.

Il che sta a dimostrare la notevole diversità geologica dei bacini ed probabilmente influenzata anche dalla presenza della diga. Questo comportamento influenza i risultati numerici che esporremo in seguito.

4. CONFRONTO TRA LE FORMULE ED I DATI DI CAMPAGNA

Le 12 formule sono state applicate alle 54 misure di campagna disponibili.

Per le granulometrie sono utilizzati i diametri significativi indicati dai diversi Autori. Nel caso delle formule di Schoklitsch-Shulits ed Einstein, che originariamente

richiedono le valutazioni del trasporto solido per classi granulometriche, si è ugualmente utilizzato un unico valore del diametro ritenuto significativo.

La formula di Pica calcola la portata solida al fondo per l'intera sezione del corso d'acqua, mentre le altre formule la calcolano per unità di larghezza della sezione.

Il confronto tra la portata totale stimata dalla formula di Pica e la portata solida misurata è possibile applicando l'ipotesi di distribuzione triangolare (massima al centro del corso d'acqua e nulla ai lati) del trasporto solido al fondo.

Da tale confronto risulta che la formula sovrastima notevolmente la portata solida al fondo nei tratti d'alveo considerati.

Nelle figg. 1, 2, 3 sono riportati in scala bilogarithmica i $g_{s_{mis}}$ e $g_{s_{cal}}$ in Kg/m*s per le formule considerate.

I $g_{s_{mis}}$ vanno da 0.0001 Kg/m*s a 10 Kg/m*s. La retta a 45° è stata disegnata per conoscere immediatamente se le formule stimano valori in eccesso o in difetto rispetto a quelli misurati.

Quando un valore $g_{s_{cal}}$ relativo ad un valore $g_{s_{mis}}$ è esterno all'intervallo 0.0001 - 10 tale valore non viene riportato.

Si vede dal grafico relativo alla formula di Du Boys e Straub (fig. 1) che circa il 52% dei valori calcolati sono esterni all'intervallo di misura.

Il che conferma che questa formula è tra le meno affidabili ed ha un interesse prevalentemente storico.

Nell'uso delle formule abbiamo tenuto conto dei limiti di variabilità dei parametri significativi delle formule stesse, quando ciò viene indicato dagli Autori.

Dalle figg. 1, 2, 3 emerge che le 11 formule graficate sovrastimano generalmente le portate solide misurate.

Come già rilevato in analoghe ricerche, si nota che per entrambi i fiumi l'intervallo nel quale oscillano le portate solide misurate è sensibilmente più ampio di quello relativo alle portate solide calcolate. Tutto ciò conferma che le espressioni analitiche proposte difficilmente riescono a descrivere compiutamente la complessità del fenomeno.

Inoltre le formule soprastimano il trasporto solido in corrispondenza delle basse portate solide misurate.

Vorremmo chiarire che l'asserita discordanza tra valori teorici e valori misurati non consente di concludere che le formule sono errate. Infatti quando si fanno misure di campagna di tale tipo sono numerosi gli errori da cui la misura stessa è affetta.

Tanto per fare un esempio, se il campionatore viene tolto dal fondo al quinto minuto perchè allora sembra che si sia riempito, nella realtà tale riempimento può

essere avvenuto al quarto minuto.

Questo diverso intervallo di tempo modifica il risultato numerico.

Un'altra considerazione sulle discrepanze tra i valori calcolati e quelli misurati è la seguente.

Dalle figg. 1, 2, 3 si vede che in corrispondenza dell'intervallo 0.05-1 delle portate solide misurate le formule danno valori di portate solide calcolate sostanzialmente equivalenti, il che sta a dimostrare che vi è stata uniformità di impostazione teorica e di sviluppi notevoli da parte degli Autori e che quando l'afflusso dei sedimenti nel corso d'acqua aumenta i risultati numerici si avvicinano a quelli sperimentali perchè probabilmente anche in laboratorio questa era la situazione simulata.

Dal confronto tra le portate solide misurate sul F. Musone e sul F. Esino si desume che le prime sono più piccole delle seconde anche se in questa affermazione va tenuto conto delle diverse condizioni di deflusso in cui sono state effettuate le misure.

I dati presentati nelle figg. 1, 2, 3 si possono elaborare anche in modo diverso costruendo i rapporti $g_{s_{cal}}/g_{s_{mis}}$ indicando con I_b la percentuale dei casi in cui un tale rapporto è compreso tra 0.5 e 2.

Nelle figg. 4, 5 e 6 è riportato in scala bilogarithmica l'andamento del rapporto $g_{s_{cal}}/g_{s_{mis}}$ in funzione del $g_{s_{mis}}$.

Nella tab. I abbiamo riportato le percentuali con cui tale rapporto cade nell'intervallo 0.5 - 2.

Formula	anno	I_b %
Meyer-Peter e Mueller	(1948)	39,2
Einstein	(1950)	27,4
Schoklitsch	(1950)	25,5
Schoklitsch e Shulits	(1934-5)	23,5
Meyer-Peter	(1934)	23,5
Einstein e Brown	(1942-50)	23,5
Kalinske	(1947)	5,9
Pezzoli	(1978-80)	5,9
Du Boys e Straub	(1879-1935)	0
Shields	(1936)	0
Yalin	(1963)	0

6. CONCLUSIONI

L'applicazione delle formule per il calcolo della portata solida sul fondo a corsi d'acqua naturali fornisce stime approssimate dei valori di trasporto solido effettivi. Ciò è confermato dai risultati reperibili in letteratura e dal confronto, oggetto di questa Memoria, tra le portate solide calcolate con 12 formule e quelle derivanti da 54 misure di campagna relative ai fiumi Esino e Musone.

Le ragioni di tali differenze sono molteplici.

Infatti nel laboratorio è solo possibile ipotizzare, e realizzare, un afflusso di sedimenti molto significativo che nella realtà poi non esiste.

Infatti nelle ricerche di laboratorio è giocoforza limitarsi a tenere conto solo dei parametri che l'Autore ritiene i più significativi.

Ne consegue che quando si vanno ad applicare i risultati come sopra ottenuti a fenomeni reali essi non necessariamente sono significativi in quanto può benissimo essere mutato il numero e la significatività di detti parametri.

Discende da ciò, a nostro parere, che le formule sono in generale ugualmente valide purchè esse vadano applicate correttamente al fenomeno che si sta studiando.

La nostra indagine mostra che le formule di Meyer-Peter e Mueller, Einstein e Schoklitsch sono le più attendibili.

Concludiamo asserendo che tutte le formule sono molto sensibili alle variazioni dei parametri di ingresso la cui determinazione nelle ricerche di campagna è affetta da notevoli incertezze.

Ringraziamo, infine, il Prof. Vitale per la cortese attenzione con cui ha seguito questo nostro lavoro.

SIMBOLOGIA

ρ	Densità	$[Kg*s^2 *m^{-4}]$
ρ_s	Densità del materiale trasportato	$[Kg*s^2 *m^{-4}]$
μ	Viscosità	$[Kg*s*m^{-2}]$
γ	Peso specifico del fluido	$[Kg*m^{-3}]$
γ_s	Peso specifico del materiale trasportato	$[Kg*m^{-3}]$
h	Altezza della corrente	$[m]$
b	Larghezza dell'alveo	$[m]$
Ω	Area sezione bagnata	$[m^2]$

B	Contorno bagnato	[m]
$R=\Omega/B$	Raggio idraulico	[m]
i	Pendenza del fondo	[%]
J	Pendenza motrice della corrente	[%]
Q	Portata idrica	[m ³ *s ⁻¹]
q	Portata idrica per unità di larghezza	[m ² *s ⁻¹]
$V=Q/\Omega$	Velocità media del fluido	[m*s ⁻¹]
g	Accelerazione di gravità	[m*s ⁻²]
d	Dimensione caratteristica del sedimento	[m]
τ_0	Tensione tangenziale al fondo [Kg*m ⁻²]	
τ	Errore.]	
$V^*=\text{Errore.}/\rho$	Velocità di attrito	[m*s Errore.]
P	Portata solida adimensionale	
Q Errore.)	Portata solida al fondo in volume per l'intera larghezza dell'alveo	[m ³ *s ⁻¹]
G Errore.)	Portata solida in peso per l'intera larghezza dell'alveo	[Kg*s Errore.]
q Errore.)	Portata solida in volume per unità di larghezza dell'alveo	[m Errore.*mErrore.*sErrore.]
g Errore.)	Portata liquida in peso per unità di larghezza e di tempo	[Kg*m Errore.*sErrore.]
g Errore.)	Portata solida in peso per unità di larghezza dell'alveo	[Kg*m Errore.*sErrore.]
g' Errore.)	Portata solida misurata come peso immerso per unità di larghezza dell'alveo	[Kg*m ⁻¹ *s ⁻¹]
g Errore.)Errore.)		Portata solida in peso per unità di larg
g Errore.)Errore.)		Portata solida in peso per unità di larg

BIBLIOGRAFIA

- [1] BECCHI I. [1983). Le metodologie di indagine sui corsi d'acqua: prospettive ed applicazioni di ricerca per letti di ghiaia. Atti della

Giornata di Studio: Corsi d'acqua con letti di materiale grossolano ed incoerente", Napoli.

- [2] BECCHI I., TAZIOLI G.S., CIANCETTI G., CANTORI P. [1986]. Risultati preliminari sul trasporto solido del fiume Musone. Atti del Seminario su: Modelli dei fenomeni idraulico fluviali, Bologna.
- [3] BECCHI I., TAZIOLI G.S. [1987]. Experimental researches on erosion and sediment transport on the basin of river Musone. Int. SYmD. on iSOtODE hvdrolav in water resources develoDment. IAEA - SM - 229., pagg. 683696. Vienna, 30 March - 3 April.
- [4] BECCHI I., TAZIOLI G.S., CIANCETTI G., RADICIONI F., TEODORI G. [1987]. Valutazione del trasporto solido nei corsi d'acqua marchigiani. Atti del Seminario su: Leggi morfologiche e loro verifica di campo, Cosenza, 25 - 26 giugno.
- [5] BECCHI I., TAZIOLI G.S., PENNACCHIONI E., RADICIONI F., VIVALDA P., TEODORI G., D'AGNOLO G. [1988]. Analisi comparate di trasporto solido in due bacini attrezzati delle Marche: il F. Esino ed il F. Musone. Atti del Convegno Int. su: TrasDorto solido ed evoluzione morfologica nei corsi d'acqua, Università degli Studi di Trento, 9 - 10 giugno.
- [6] COLE C.V., TARAPORE Z.S., KANHERE V.N., DIXIT J.G. [1973]. Sediment discharge formulae - A comparative analysis. Proc. Inter. SvmD. River Me- chanics, pagg. 547-560, Bangkok.
- [7] EINSTEIN H.A. [1942]. Formulas for the transportation of bed load. Tran. Am. Soc. Civil Engrs, vol 107, pagg. 561 - 573.
- [8] FASSO' C. [1972]. Correnti liquide con trasporto solido. Relazione Generale Atti del XIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Milano.
- [9] GRAF W.H. [1971]. Hydraulics of sediment transport. McGraw - Hill Book Co, New York.
- [10] KALINSKE A.A. [1947]. Movement of sediment as bed load in rivers. Trans. Am. Geophys Union. Vol. 28 N° 4, pagg. 615 - 620.
- [11] PEZZOLI G. [1978]. Considerazioni sul trasporto solido al fondo negli alvei a pelo libero. Atti del XVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, pag.9, Torino.

- [12] PEZZOLI G. [1979]. Il trasporto solido al fondo negli alvei a pelo libero. L'Energia Elettrica, N° 12.
- [13] PICA M. [1972]. Su alcuni aspetti del trasporto solido in alvei torrentizi. L'Energia Elettrica, vol. XLIX, pagg. 1 - 12.
- [14] PICA M. [1974]. Trasporto solido di fondo. L'Energia Elettrica, vol. LI N° 8, pagg.1 - 14.
- [15] PICA M. [1978]. Resistenza al moto di correnti in alvei mobili. Idrotecnica, N° 3.
- [16] SIRANGELO B., VERSACE P. [1983]. Sui metodi di stima del trasporto solido di fondo. Idrotecnica, N° 6.
- [17] SIRANGELO B., VERSACE P. [1983]. Le formule del trasporto solido di fondo. Un confronto con dati di campagna. Atti della Giornata di Studio: "Corsi d'acaua con letti di materiale grossolano ed incoerente", Napoli.
- [18] SIRANGELO B., VERSACE P. [1986]. Trasporto solido di fondo. Interpretazione di dati di campagna. Idrotecnica, N- 6.
- [19] TAZIOLI G.S., MARIOTTI C., RADICIONI F., TEODORI G. [1987]. Metodologie sperimentali per la valutazione dell'erosione e del trasporto solido fluviale nelle Marche. A.I.H.. 1° Congr. Int. di Geoidrologia: L'antropizzazione e la degradazione dell'ambiente fisico , pagg. 11, Firenze.
- [20] YALIN M.S. [1963]. An espression for bed load transportation. Proc. Am. Soc. Civil Engrs, Vol. 89, N° HY3, pagg. 221 - 250.