

**RELAZIONE TRASPORTO SOLIDO FLUVIALE**  
**- LITORALE DI CALOPEZZATI -**



**Prof. Ing. Francesco Aristodemo**  
**Ing. Danilo Algieri Ferraro**

## INDICE

<b>1. Introduzione.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Trasporto solido di fondo.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Metodo di Du Boys (1879) .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Metodo di Meyer-Peter, Favre e Einstein (1934) .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3 Metodo di Shields (1936) .....</b>	<b>7</b>
<b>2.4 Metodo di Einstein (1942) .....</b>	<b>8</b>
<b>2.5 Metodo di Kalinske (1947)) .....</b>	<b>8</b>
<b>2.6 Metodo di Meyer-Peter e Müller (1948) .....</b>	<b>10</b>
<b>2.7 Metodo di Schoklitsch (1950) .....</b>	<b>10</b>
<b>2.8 Metodo di Yalin (1963) .....</b>	<b>11</b>
<b>2.9 Metodo di Pica (1972) .....</b>	<b>12</b>
<b>2.10 Metodo di Ackers e White (1973) .....</b>	<b>12</b>
<b>2.11 Metodo di Parker, Klingemann e McLean (1982) .....</b>	<b>14</b>
<b>2.12 Metodo di Smart e Jaeggi (1988) .....</b>	<b>14</b>
<b>2.13 Metodo di Wilcock e Crowe (2003) .....</b>	<b>15</b>
<b>3. Curva di durata.....</b>	<b>15</b>
<b>4. Analisi granulometrica.....</b>	<b>16</b>
<b>5. Calcolo del trasporto solido .....</b>	<b>18</b>

## 1. Introduzione

Il trasporto solido fluviale è un fenomeno naturale di fondamentale importanza per l'evoluzione dei corsi d'acqua e delle aree costiere. La sua conoscenza è essenziale per la comprensione dei processi in atto nel territorio e per la valutazione delle problematiche legate all'interazione tra attività antropiche e dinamica fluviale e costiera.

Il trasporto solido costituisce il punto di unione tra il fenomeno di erosione, che interessa la parte montana del bacino, e il fenomeno di deposito, che si verifica nella zona valliva.

Il materiale d'alveo di un corso d'acqua si mette in movimento quando le forze idrodinamiche (di trascinamento e di portanza) prevalgono sulle forze che si oppongono al movimento: forza peso e interazione con le particelle circostanti (attrito).

Nella meccanica del trasporto solido si distinguono sostanzialmente due modalità di trasporto (Figura 1), trascurando il trasporto solido in soluzione:

- trasporto solido al fondo;
- trasporto solido in sospensione.

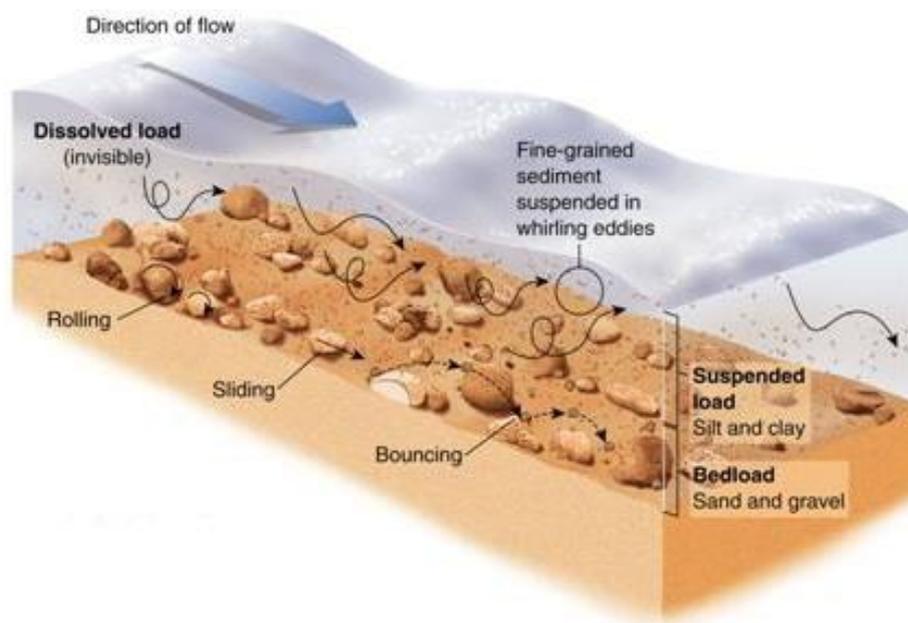


Fig.1. Rappresentazione schematica del trasporto solido

Ai fini del modellamento degli alvei e dell'apporto solido agli arenili, è solo il primo ad avere importanza, ovvero il trasporto solido di fondo.

Da un punto di vista fenomenologico, il moto di fondo delle particelle solide a causa delle forze esercitate dalla corrente può essere inquadrato con diversi schemi concettuali. In ogni caso, si deve valutare la stabilità della particella di fronte alle forze attive di trascinamento della corrente e alle forze resistive dovute al peso alleggerito della particella medesima e,

eventualmente, al conseguente attrito sul fondo. A parità di ogni altro parametro, all'aumentare della velocità le azioni fluidodinamiche riescono a vincere le azioni stabilizzanti, mettendo in movimento la particella. Le condizioni di corrente in cui la particella si trova alla soglia del movimento vengono indicate come “critiche”, o di *moto incipiente*.

Considerando un granello solido, le forze che agiscono sulla particella sono:

- la forza di trascinamento (*drag*),  $D$ ;
- la forza di portanza (*lift*),  $L$ ;
- il peso proprio,  $P$ ;
- la spinta di Archimede,  $G$ ;
- la reazione vincolare normale,  $R$ ;
- la reazione vincolare tangenziale (attrito),  $A$ .

Nella Figura 2, oltre alle forze agenti sulla particella, si mostra il profilo di velocità nello strato limite di spessore  $\delta$ , dove  $u$  è la velocità locale,  $\zeta$  è la quota rispetto al fondo,  $U_{max}$  è la massima velocità locale e  $\theta$  è l'angolo d'inclinazione del fondo rispetto all'orizzontale.

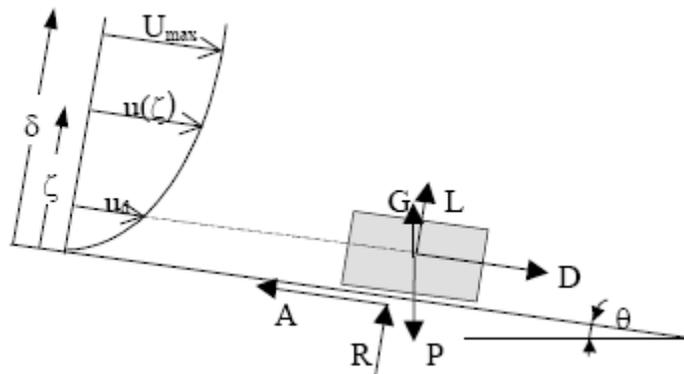


Fig. 2. Forze agenti sulla particella

Il fenomeno del trasporto solido di fondo si può schematizzare secondo diversi approcci. In particolare, si distinguono i casi seguenti.

Moto per strati sovrapposti

Trascinato dagli sforzi tangenziali, uno spessore più o meno profondo di particelle solide viene messo in movimento; all'aumentare della profondità, gli strati di solido sono caratterizzati da velocità progressivamente decrescenti.

Moto superficiale

Solo uno strato superficiale di solido è considerato in movimento; le particelle rotolano/strisciano sulle sottostanti, ferme.

Moto per saltellamento

Il moto delle particelle non è schematizzato come fenomeno continuo, bensì come successione di "salti" finiti delle particelle superficiali, seguiti da tempi di riposo.

A partire dai diversi schemi concettuali, in letteratura sono state proposte varie formule, che legano la quantità di solido trasportata ai parametri della corrente e alla geometria dell'alveo. Rinviando ai testi specialistici per la rassegna delle numerose formulazioni, basti dire che esse forniscono risultati spesso molto diversi fra loro, ragion per cui è decisiva la scelta della formula da adottare per ciascun caso di studio.

**2. Trasporto solido di fondo**

Per il calcolo del trasporto solido in un tronco di alveo fluviale esistono in letteratura decine di formule, basate sulle ipotesi di corrente uniforme, alveo in equilibrio e trascurabile trasporto di materiale in sospensione (wash load). E' bene sottolineare subito che le diverse formule forniscono risultati che possono differire tra loro anche di un ordine di grandezza a partire dagli stessi dati in ingresso e non è quindi facile stabilire quale formula dia il migliore risultato per uno specifico corso d'acqua, visto che nei corsi d'acqua naturali il moto non è mai uniforme e solo raramente permanente e che il wash load può diventare un fattore importante (Cunge et al., 1980).

Il valore del trasporto solido viene stimato in quasi tutte le procedure proposte come portata in peso per unità di larghezza dell'alveo. Questo valore di portata solida per metro lineare,  $g_s$ , [ $N s^{-1} m^{-1}$ ], moltiplicato per la larghezza media della sezione idrica,  $B$ , fornisce la portata solida  $G_s$  che la generica portata liquida  $Q$  riesce a trasportare:

$$G_s = B g_s$$

La portata solida in peso  $G_s$  [N/s] diventa portata solida in volume  $Q_s$  [m<sup>3</sup>/s], dividendo  $G_s$  per il peso specifico del sedimento  $\gamma_s$ .

### 2.1. Metodo di Du Boys (1879)

Lo schema concettuale di Du Boys considera che i sedimenti di fondo alveo si muovano per strati sovrapposti di uguale spessore  $d$ , paragonabile al diametro di un singolo granello, spinti dallo sforzo di trascinamento sul fondo. La velocità degli strati sovrapposti è ipotizzata linearmente decrescente dal primo strato sul fondo dell'alveo fino allo strato in moto incipiente, posto a profondità  $n*d$ , dove  $n$  è il numero di strati.

La portata solida  $G_s$  può essere ricavata dalla seguente relazione:

$$G_s = B\gamma_s \frac{d\Delta u}{2\tau_c^2} \tau(\tau - \tau_c)$$

dove  $\gamma_s$  è il peso specifico dei sedimenti,  $\Delta u$  è l'incremento costante di velocità tra due strati successivi,  $\tau$  è lo sforzo di trascinamento esercitato dalla corrente sul fondo dell'alveo e  $\tau_c$  è lo sforzo di trascinamento critico.

Lo sforzo di trascinamento che la corrente esercita sul fondo d'alveo è fornito dalla seguente relazione:

$$\tau = \gamma Rj$$

dove  $\gamma$  è il peso specifico dell'acqua,  $R$  è il raggio idraulico e  $j$  è la cadente (che si pone uguale alla pendenza del fondo alveo  $i$ ).

Lo sforzo di trascinamento critico viene determinato dalla seguente relazione:

$$\tau_c = \gamma'_s d \tan \varphi$$

dove  $\gamma'_s = \gamma_s - \gamma$  è il peso specifico alleggerito e  $\varphi$  è l'angolo di attrito calcolabile dalla formula:

$$\tan \varphi = \frac{G_x}{G_y}$$

dove  $G_x$  e  $G_y$  sono rispettivamente le componenti agenti lungo  $x$  e lungo  $y$  della forza peso.

### 2.2. Metodo di Meyer-Peter, Favre e Einstein (1934)

La procedura di questo metodo permette la stima di  $G_s$  in modo immediato. Fissato, infatti, un valore di portata  $Q$ , si ottiene la portata specifica dividendo per la larghezza dell'alveo  $B$ . Noto il diametro  $d_{35}$  dalla curva granulometrica e ponendo  $J = i$  (moto uniforme), si ottiene direttamente il valore di  $G_s$  dalla formula fornita dagli autori:

$$G_s = B g_s = 3.953 B \left[ \left( \gamma \frac{Q}{B} \right)^{2/3} J - 17 d_{35} \right]^{3/2}$$

essendo  $\gamma$  (peso specifico dell'acqua) = 9806 N/m<sup>3</sup>.

### 2.3. Metodo di Shields (1936)

Applicando l'analisi dimensionale, Shields ricavò nel 1936 dai suoi esperimenti una relazione tra rapporti adimensionali che può essere scritta nella seguente forma e che permette di calcolare  $G_s$ :

$$G_s = 10B \left( \frac{1}{\Delta} \right)^2 \frac{J}{d_{50}} q(\tau - \tau_c)$$

dove  $\Delta$  risulta pari a  $(\gamma_s - \gamma) / \gamma$ .

Per la stima del trasporto solido con questa formula, fissato un valore di  $Q$  si ottiene la portata specifica  $q = Q/B$ . Dal valore fissato di  $Q$  si ricava il valore del raggio idraulico  $R$  con cui si ottengono  $\tau$  e  $u^*$  (velocità di attrito).

$$u^* = \sqrt{gRi}$$

dove  $g$  indica l'accelerazione gravitazionale pari a 9.806 m/s<sup>2</sup>, mentre  $R$  indica il raggio idraulico e  $i$  la pendenza del fondo alveo.

Noto  $d_{50}$  si ricava il numero di Reynolds d'attrito  $Re^*$  e quindi dal grafico di Shields si legge il valore di  $\tau_c^*$ , essendo  $Re^*$  pari a:

$$Re^* = \frac{u^* d_{50}}{\nu}$$

dove  $\nu$  è la viscosità cinematica.

Quindi, si ottiene il valore  $\tau_c$ :

$$\tau_c = d_{50}(\gamma_s - \gamma)\tau_{c^*}$$

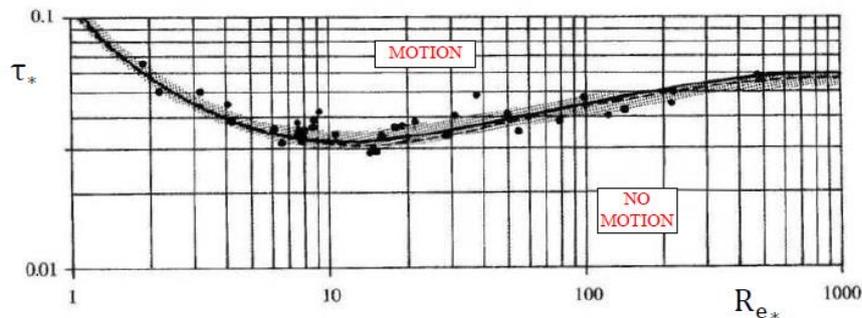


Fig. 3 – Diagramma di Shields (dove in ordinata  $\tau_* = \tau_{c^*}$ )

**2.4. Metodo di Einstein (1942)**

All'inizio degli anni '40 anche Einstein ottenne, con i suoi studi condotti all'ETH di Zurigo, una formula per calcolare la portata solida di trasporto al fondo. Si fissa Q, si ricava R dalla scala di deflusso e quindi l'indice di resistenza  $\Psi$ . La portata solida adimensionale  $\Phi_{42}$  si ottiene dal grafico in Figura 4 in funzione dell'indice di resistenza. Infine, determinato  $F_1$ , si ottiene  $G_s$ . Il diametro da utilizzare nella formula è il  $d_{40}$ . Le varie formule per ottenere  $G_s$  dalla procedura di Einstein sono qui sotto elencate.

$$\Psi = \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \frac{d}{RJ}$$

$$\Phi_{42} = f(\Psi) \text{ per } \Phi_{42} > 0.4$$

$$\Phi_{42} = e^{-0.391\Psi} / 0.465 \text{ per } \Phi_{42} \leq 0.4$$

$$F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gd^3\Delta}} - \sqrt{\frac{36v^2}{gd^3\Delta}}$$

$$G_s = BF_1\Phi_{42}\gamma_s(gd^3\Delta)^{0.5}$$

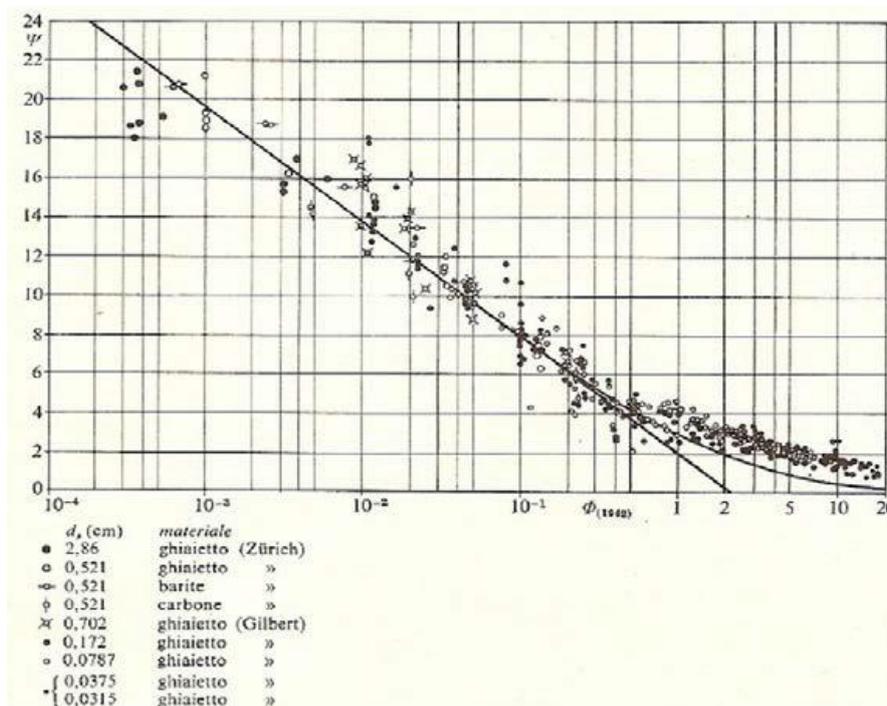


Fig. 4 – Diagramma per il calcolo di  $\Phi_{42}$

**2.5. Metodo di Kalinske (1947)**

Kalinske studiò l'influenza della turbolenza sul trasporto solido di fondo. L'ipotesi di base è che le particelle sul fondo si muovano con una certa velocità  $u_s$ . Se si identifica una striscia sul fondo alveo, di dimensioni  $u_s \cdot 1$ , costituita da particelle la cui area proiettata sulla striscia è pari

a  $k_1 d^2$ , essendo  $k_1$  un coefficiente che tiene conto della non sfericità delle particelle, il numero di particelle nella striscia sarà pari a  $N = (u_s \cdot 1) / (k_1 \cdot d^2)$  (vedi Figura 5).

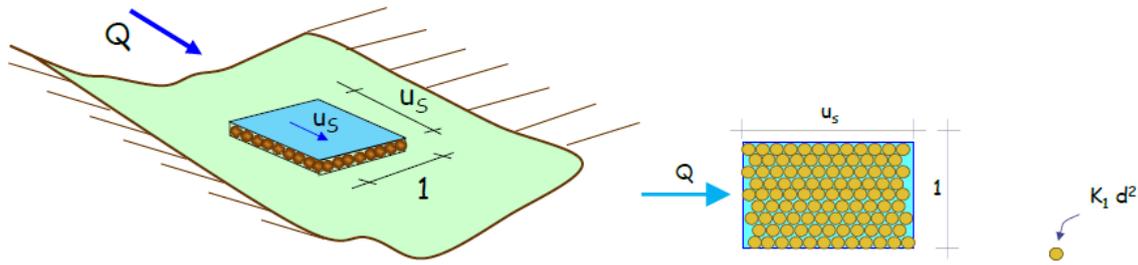


Fig. 5 – Ipotesi delle particelle in moto di Kalinske

La portata solida in volume,  $q_s$ , che attraversa una generica sezione trasversale è pari al volume delle particelle in moto che si trovano contemporaneamente sulla striscia di fondo lunga  $u_s$  e larga 1 m (appena a monte della sezione). Se le particelle in movimento sono  $pN$ , di cui  $p \approx 0.35$  (determinato sperimentalmente), ciascuna di volume  $k_2 d^3$ , essendo  $k_2$  è un coefficiente che tiene conto della non sfericità delle particelle, la portata solida in volume è:

$$q_s = pN \cdot k_2 d^3 = p \cdot u_s / (k_1 \cdot d^2) \cdot k_2 d^3 = p \cdot u_s \cdot d \cdot k_2 / k_1$$

Ponendo  $k_0 = k_2 / k_1$  e considerando al posto della velocità dei sedimenti la velocità della corrente sul fondo rispetto alla velocità critica,  $u_s = u - u_c$ , ed infine dividendo ambo i membri per  $u_* d$ , si ottiene:

$$\frac{q_s}{u_* d} = k_0 p \frac{u - u_*}{u_*}$$

Poiché  $u = f(\sqrt{\tau})$  e  $u_c = f(\sqrt{\tau_c})$ , Kalinske ha diagrammato la seguente relazione funzionale:

$$\frac{q_s}{u_* d} = f\left(\frac{\tau_c}{\tau}\right)$$

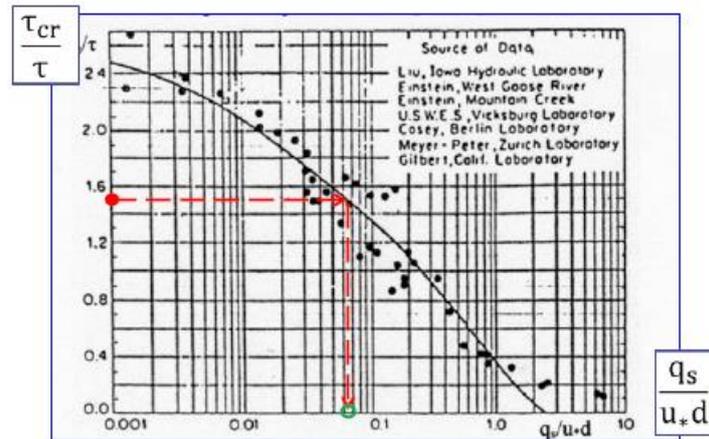


Fig. 6 – Metodo di Kalinske

La procedura prevede che per ogni valore di  $Q$  prefissato si ricavi  $R$  dalla scala di deflusso e quindi  $u_*$ . Ottenuto il corrispondente valore di  $\tau$ , si ricava il valore di  $\tau_c$  dalla relazione:

$$\tau_c = 0.23(\gamma_s - \gamma)d_{50} \cdot \text{tg}(\varphi)$$

Infine, dal grafico sopra riportato in Fig. 6, si legge il valore di  $q_s/(u_* d)$  (dove  $d = d_{50}$ ) e quindi si può stimare la portata solida in volume per unità di larghezza,  $q_s$ , e di conseguenza la portata solida  $G_s = q_s \cdot \gamma_s \cdot B$ .

### 2.6. Metodo di Meyer-Peter e Müller (1948)

E' una delle formule più accreditate per la stima del trasporto solido di fondo in alvei ghiaiosi, ottenuta da Meyer-Peter e Müller con estese indagini di laboratorio svolte presso il Federal Institute of Technology (ETH) di Zurigo, e che per questo viene spesso chiamata "formula svizzera dell'ETH", ancora oggi tra le più utilizzate nei paesi europei.

La sperimentazione ha riguardato i seguenti campi di variazione di parametri:  $1 \text{ cm} \leq h \leq 120 \text{ cm}$ ,  $0.0004 \leq i \leq 0.020$ ,  $0.4 \text{ mm} \leq d \leq 30 \text{ mm}$  e  $1.25 \leq \gamma_s/\gamma \leq 4.22$ . La formula proposta è valida nel caso di trasporto solido in sospensione trascurabile, ovvero risulta pari a:

$$g_s = \frac{8\gamma_s}{\sqrt{\rho}(\gamma_s - \gamma)} (\tau - \tau_c)^{3/2}$$

Per l'applicazione della procedura, ad ogni valore di  $Q$  si associa il corrispondente valore di  $R$  dalla scala di deflusso (in alveo mobile, se l'alveo è in prevalenza sabbioso-ghiaioso). Quindi si ricava il valore di  $A$  e successivamente la velocità media  $V$  come  $V = Q/A$ . Noto  $d_{90}$  si stima un valore del coefficiente di Gauckler-Strickler  $k_s$ . Noto  $V$  e ponendo  $J = i$ , si ricava  $\tau$ . Quindi,

dalla formula di Meyer-Peter e Müller, si ricava  $g_s$ . Al solito, si ottiene infine la portata solida come  $G_s = g_s B$ .

### 2.7. Metodo di Schoklitsch (1950)

L'inizio del movimento del materiale di fondo alveo è identificato dalla condizione  $q > q_c$ , dove  $q$ , pari a  $Q/B$ , è la portata liquida per unità di larghezza dell'alveo e  $q_c$  è il corrispondente valore soglia di portata liquida al di sotto del quale non esiste trasporto solido (portata critica):

$$q_c = 0.26 \Delta^{5/3} \frac{d^{3/2}}{i^{7/6}}$$

Nella formula di  $q_c$ ,  $d$  è il diametro dei sedimenti di fondo alveo per il quale, nel caso di assortimento granulometrico non uniforme, si adotta  $d = d_{40}$  come diametro equivalente. La formula proposta, del tipo  $q_s = f(q, i, d)$ , è basata su esperienze di laboratorio e misure dirette eseguite sul Danubio e risulta inoltre valida per  $d \geq 0.6$  cm e, in genere, per corsi d'acqua ghiaiosi:

$$q_s = 2.5 \frac{\gamma}{\gamma_s} i^{3/2} (q - q_c)$$

Considerando che  $G_s = q_s \gamma_s B$  e che  $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$  nel sistema tecnico, si ha che:

$$G_s = 2500 B i^{3/2} (q - q_c)$$

Takahashi considera la formula affidabile per  $0.05 < i < 0.09$ , con sottostima negli altri casi.

### 2.8. Metodo di Yalin (1963)

Yalin sviluppò la sua formula basandosi sull'ipotesi che il movimento delle particelle avvenga per salti, simili al moto di un proiettile in cui la massima altezza raggiungibile dipende dalla velocità di partenza della particella. Le seguenti espressioni contengono i parametri di Einstein  $\Phi$  e  $\Psi$  (vedi pagina 8):

$$\Phi = 0.635 \frac{\Psi_c}{\sqrt{\Psi}} \left( \frac{1}{\Psi} - \frac{1}{\Psi_c} \right) \left[ 1 - \frac{1}{a_s} \ln(1 + a_s) \right]$$

$$a_s = 1.66 \sqrt{\Psi_c} \left( \frac{1}{\Psi} - \frac{1}{\Psi_c} \right)$$

Per determinare i parametri di resistenza  $\Psi$  e  $\Psi_c$  si utilizzano le seguenti relazioni:

$$\Psi = \frac{d_{50} \Delta}{R_j} \qquad \Psi_c = \frac{1}{\tau_c^*} = \frac{1}{0.05}$$

Per applicare tale metodo, si parte dal valore della portata  $Q$  e si determina il valore del raggio idraulico  $R$ , e successivamente si può trovare  $\Psi$ . Noto  $\Psi_c$  si stima prima il parametro  $a_s$  e infine si determina  $\Phi$ . Successivamente, si può determinare  $g_s$  dalla relazione:

$$g_s = \gamma_s \Phi \sqrt{g d_{50}^3 \Delta}$$

Il valore di  $g_s$ , moltiplicato per la larghezza d'alveo, fornisce il trasporto solido di fondo cercato,  $G_s$ :

$$G_s = B g_s$$

### 2.9. Metodo di Pica (1972)

Le indagini di Pica furono svolte negli alvei alluvionali percorsi da correnti vaganti, cioè non occupanti l'intero letto ghiaioso. Pica ipotizzò che le grandezze caratterizzanti la geometria della sezione siano funzioni della portata  $Q$ , del diametro medio dei sedimenti  $d_m$  e della pendenza  $i$ :

$$G_s = f(Q, i, d_m)$$

Ottenne una formulazione a tre parametri tenendo conto del fenomeno dell'automodellamento del corso d'acqua, secondo il cui il fiume sceglie da solo il percorso da seguire. Si utilizzano le seguenti relazioni:

$$\tau_p = \frac{Q^{\frac{3}{8}} i^{\frac{13}{16}}}{g^{\frac{3}{16}} d_m^{\frac{15}{16}} \Delta} \cong \frac{1}{\Psi}$$

$$g_p = \frac{1}{\gamma_s \Delta^{\frac{1}{2}} g^{\frac{5}{16}}} * \frac{G_s * i^{\frac{3}{16}}}{Q^{\frac{3}{8}} d_m^{\frac{25}{16}}}$$

Il parametro  $\tau_p$  rappresenta l'indice di trasporto adimensionale,  $g_p$  è una portata adimensionalizzata e tra le due grandezze l'autore ricava la seguente relazione, valida però se  $0.5 \leq \tau_p \leq 5$ :

$$g_p = 0.74 \tau_p^{2.3}$$

La formula per il calcolo del trasporto solido diventa:

$$G_s = \frac{0.74 \gamma_s}{\Delta^{1.8} g_p^{0.11875}} * \frac{Q^{1.3375} * i^{1.68125}}{d_m^{0.59375}}$$

Secondo l'autore comunque, per valori di  $\tau_p < 0.1$  non si verifica trasporto solido. Se invece  $0.1 \leq \tau_p \leq 0.5$  le particelle iniziano a muoversi ed in particolare la corrente fa muovere solo il materiale più sottile facendo avvenire il fenomeno del corazzamento, creando una

pavimentazione nel letto dell'alveo. La soglia  $\tau_p = 5$  è dovuta ai limiti delle sperimentazioni eseguite in laboratorio.

### 2.10. Metodo di Ackers e White (1973)

La formula di Ackers e White si basa sull'ipotesi che le particelle più sottili siano trasportate in sospensione mentre le particelle più grosse contribuiscano unicamente al trasporto per trascinamento. Ai sedimenti di dimensioni intermedie competono entrambe le forme di movimento. Gli autori classificano le particelle in base al diametro adimensionale, ottenuto come rapporto tra la forza peso e le forze viscosse  $D_{gr}$ , dove quest'ultime sono pari a:

$$D_{gr} = d \sqrt[3]{\frac{g\Delta}{\nu^2}}$$

dove  $\nu$  è la viscosità cinematica.

La classificazione prevede che:

- per  $D_{gr} > 60$  i sedimenti sono grossolani, si ha trasporto solido di fondo;
- per  $4 < D_{gr} \leq 60$  i sedimenti sono medi e si ha trasporto di fondo e in sospensione (fase intermedia);
- per  $1 < D_{gr} \leq 4$  i sedimenti sono sottili e si ha trasporto solido in sospensione;
- per  $D_{gr} \leq 1$  i sedimenti si dicono coesivi.

Altri due parametri adimensionali definiti da Ackers e White sono la mobilità dei sedimenti,  $F_{gr}$ , e il trasporto solido totale,  $G_{gr}$ , relativo al tirante idrico  $h$ :

$$F_{gr} = \frac{u_*^n}{\sqrt{gd\Delta}} u_*'^{(1-n)}$$

dove  $u_*' = \frac{v}{\sqrt{32} \log\left(\frac{10h_m}{d_{35}}\right)}$  e  $h_m = A/B$ , essendo  $A$  l'area bagnata della sezione e  $B$  la larghezza della sezione.

$$G_{gr} = C_0 \left( \frac{F_{gr}}{A_0} - 1 \right)^m$$

dove  $A_0$  rappresenta il valore soglia del trasporto solido di fondo, i cui valori sono mostrati in Figura 7 assieme al parametro  $m$  in funzione di  $D_{gr}$ .

per $1 \leq D_{gr} \leq 60$	per $D_{gr} > 60$
$n = 1 - 0.56 \lg D_{gr}$	$n = 0$
$A_0 = 0.14 + 0.23 / \sqrt{D_{gr}}$	$A_0 = 0.17$
$m = 1.34 + 9.66 / D_{gr}$	$m = 1.5$
$\lg C_0 = 2.86 \lg D_{gr} - \lg^2 D_{gr} - 3.53$	$C_0 = 0.025$

Fig. 7 – Valori dei parametri n, A<sub>0</sub>, m e C<sub>0</sub>

Si calcola la portata solida per unità di lunghezza come segue:

$$g_s = \gamma_s d_{35} V \left( \frac{V}{u^*} \right)^n G_{gr}$$

Il trasporto solido di fondo totale si ottiene moltiplicando g<sub>s</sub> per la larghezza d'alveo B:

$$G_s = g_s B$$

### 2.11. Metodo di Parker, Klingemann e McLean (1982)

La seguente relazione nasce per la stima del trasporto solido di fondo in alvei ghiaiosi, considerando il fenomeno di pavimentazione. Se le portate solide sono molto elevate la pavimentazione viene asportata, per questo motivo gli autori consigliano di far riferimento allo strato immediatamente sottostante a quello superficiale. Si definisce  $d_{50}^{(s)}$  il diametro medio di questo strato sottostante, e si definiscono uno sforzo di trascinamento adimensionale ed un'intensità di trasporto come segue:

$$\tau_{*50}^{(s)} = \frac{Rj}{d_{50}^{(s)} \Delta}$$

$$\Phi_{50}^{(s)} = \frac{g_s}{\gamma_s d_{50}^{(s)} \sqrt{g d_{50}^{(s)} \Delta}}$$

Si pone  $\tau_{*r50}^{(s)} = 0.0876$  come valore di riferimento, e si calcola il rapporto:

$$r_{*50}^{(s)} = \frac{\tau_{*50}^{(s)}}{\tau_{*r50}^{(s)}}$$

Gli autori forniscono due relazioni di calcolo a seconda dei valori assunti dal parametro  $r_{*50}^{(s)}$ .

In particolare, si ha che:

$$\Phi_{50}^{(s)} = 0.0025 \tau_{*50}^{(s)} e^{\{[r_{*50}^{(s)} - 1][14.2 - 9.28(r_{*50}^{(s)} - 1)]\}} \quad \text{se } 0.95 \leq r_{*50}^{(s)} < 1.65$$

$$\Phi_{50}^{(s)} = 11.2 \tau_{*50}^{(s)} \left( 1 - \frac{0.822}{r_{*50}^{(s)}} \right)^{4.5} \quad \text{se } r_{*50}^{(s)} \geq 1.65$$

Si calcola così il trasporto solido per unità di larghezza come segue:

$$g_s = \gamma_s d_{50}^{(s)} \sqrt{g d_{50}^{(s)} \Delta} \Phi_{50}^{(s)}$$

Moltiplicando questo per la larghezza d'alveo si ottiene il trasporto solido cercato:

$$G_s = B g_s$$

### 2.12. Metodo di Smart e Jaeggi (1988)

La formula di Smart e Jaeggi (1988) è stata derivata da un riesame critico dei dati originariamente utilizzati da Meyer-Peter e Müller, insieme ad un'estesa indagine sperimentale che ha portato all'espressione:

$$g_s = 6600qS^{0,6}(S-S_{cr})$$

dove  $g_s$  è in funzione della portata liquida per unità di larghezza dell'alveo,  $q$ , e dell'eccesso di pendenza,  $S - S_{cr}$ . La pendenza critica,  $S_{cr}$ , viene determinata come:

$$S_{cr} = d_{50}/(12,1h)$$

Pertanto, moltiplicando questo per la larghezza d'alveo si ottiene il trasporto solido cercato:

$$G_s = B g_s$$

### 2.13. Metodo di Wilcock e Crowe (2003)

La formula di Wilcock e Crowe è stata sviluppata per sedimenti misti di sabbia e ghiaia. La portata solida  $G_s = q_s \cdot \gamma_s \cdot B$  viene determinata come segue.

La formula proposta è:

$$q_s = \frac{W^* u_*^3 \rho_s}{(s - 1)g}$$

dove  $s$  è il rapporto tra la densità dei sedimenti e quella dell'acqua, mentre  $W^*$  è il tasso di trasporto solido adimensionalizzato e viene determinato come:

$$W^* = \begin{cases} 14 \left( 1 - \frac{0.846}{\Phi^{0.5}} \right)^{4.5} & \text{se } \Phi = \frac{\tau}{\tau_{ri}} \geq 1.35 \\ 0.002 \Phi^{7.5} & \text{se } \Phi = \frac{\tau}{\tau_{ri}} < 1.35 \end{cases}$$

Il valore di  $\tau_{ri}$  rappresenta lo sforzo tangenziale di riferimento calcolabile tramite la relazione:

$$\frac{\tau_{ri}}{\tau_{rsi}} = \left( \frac{d_i}{d_{sm}} \right)^b$$

essendo il parametro  $b$  pari a:

$$b = \frac{0.67}{1 + \exp\left(1.5 - \frac{d_i}{d_{sm}}\right)}$$

dove  $d_i$  è diametro generico dei grani della frazione  $i$ ,  $d_{sm}$  è il diametro mediano del materiale che costituisce il fondo dell'alveo e  $\tau_{rsi}$  è lo sforzo tangenziale di riferimento che costituisce il fondo pari a:

$$\tau_{rsi} = 0.036(\gamma_s - \gamma)d_i$$

### 3. Curva di durata

La procedura per la stima della curva di durata, per l'anno massimo e per l'anno medio, è riportata nella "Relazione idrologica e idraulica". Di seguito viene riportata in Figura 8 la sola curva di durata per l'anno medio, che verrà utilizzata per la stima del trasporto solido fluviale di fondo medio annuo alla foce del torrente Fiumarella. Per i singoli valori numerici si rimanda alla "Relazione idrologica e idraulica". La portata determinata sarà utilizzata come input per le diverse formule del trasporto solido precedentemente esposte.

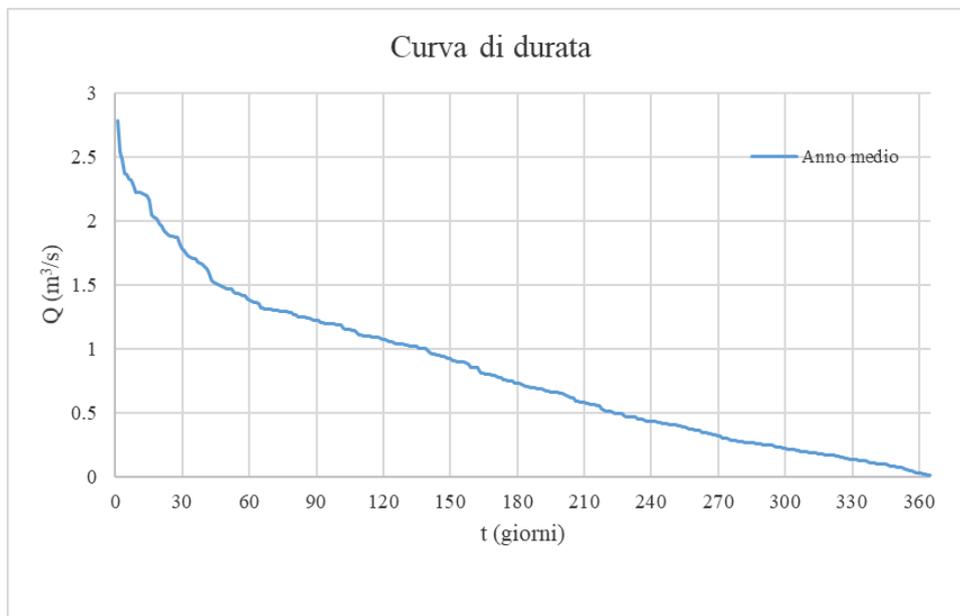


Fig.8. Curve di durata media alla foce per il torrente Fiumarella

### 4. Analisi granulometrica

Le analisi granulometriche sono state condotte dal Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra (DiBEST), i cui 2 punti di prelievo sono mostrati nella Figura 9.

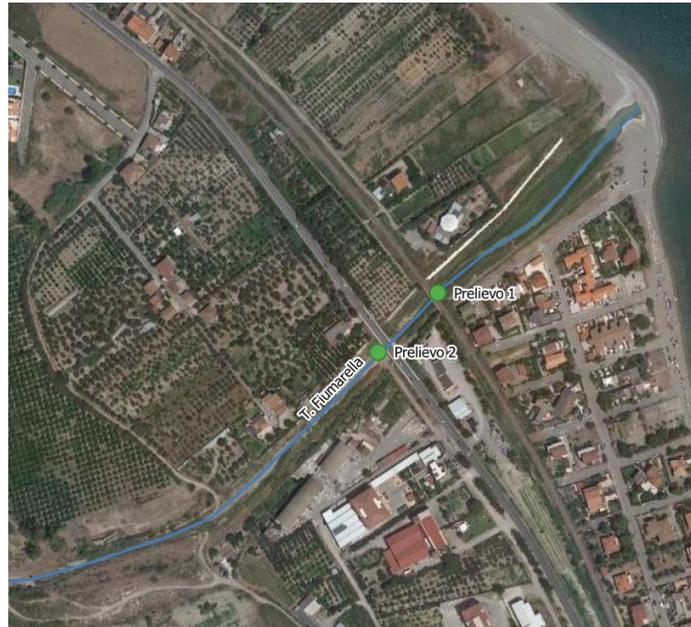


Fig. 9. Punti di prelievo dei campioni analizzati

Le curve granulometriche relative ai 2 campioni prelevati lungo il corso del torrente Fiumarella sono riportate nelle Figure 10 e 11. Dalle 2 curve sono stati calcolati i seguenti diametri caratteristici:  $d_5$ ,  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{35}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{65}$ ,  $d_{70}$  e  $d_{90}$ . Nella Tabella 1 si riportano i valori dei suddetti diametri per i 2 campioni prescelti e la loro media.

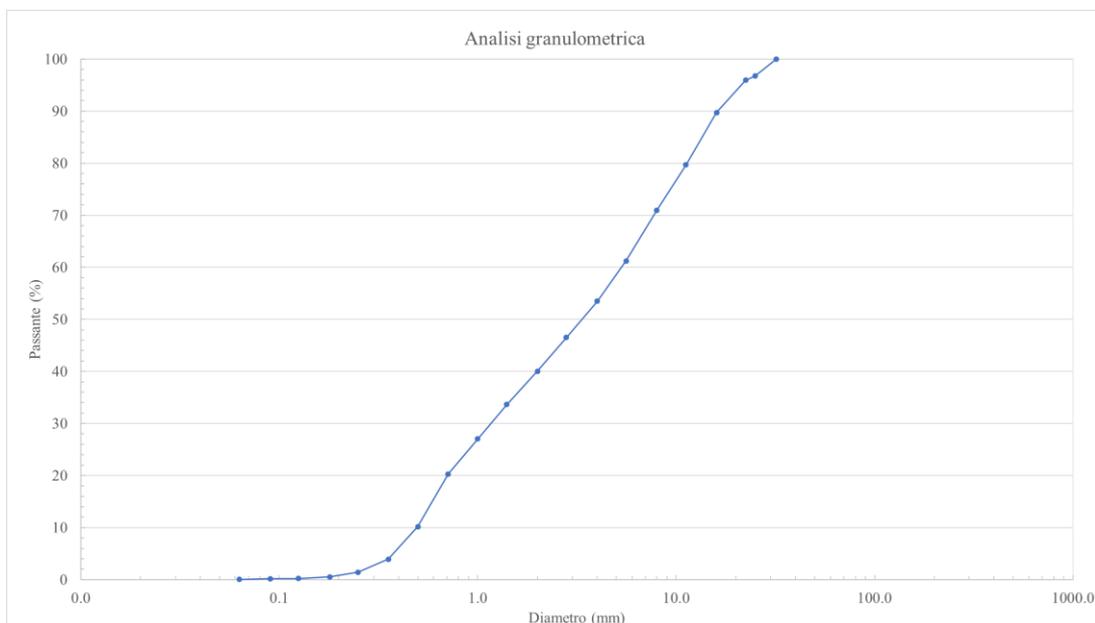


Fig. 10. Curva granulometrica del campione 1

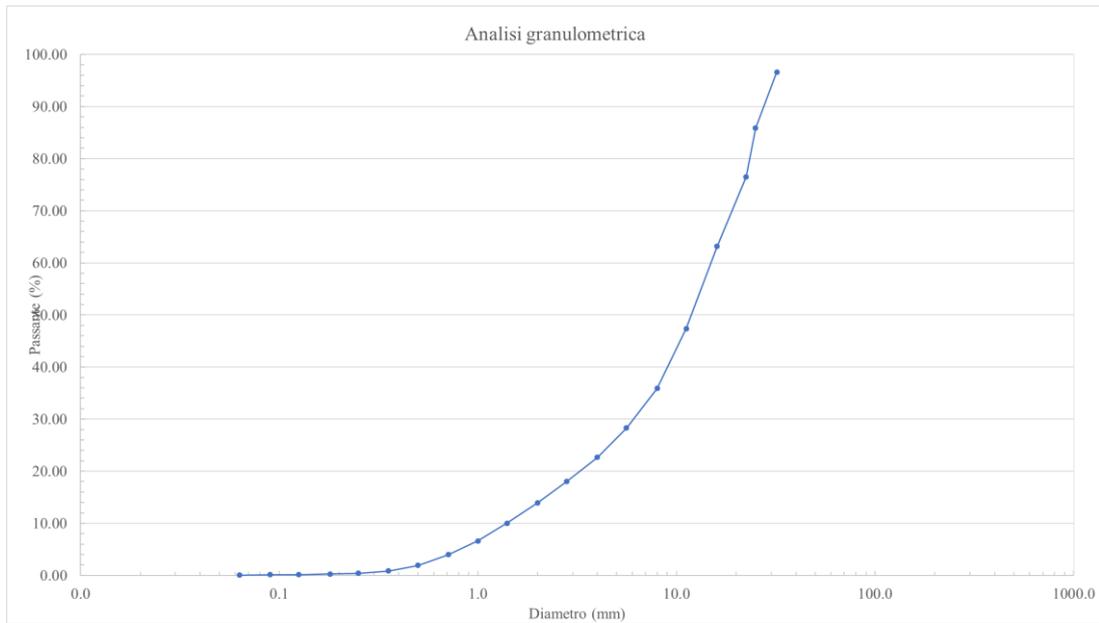


Fig. 11. Curva granulometrica del campione 2

Tab. 1. Diametri caratteristici

Campione n. 1								
d <sub>5</sub> (m)	d <sub>10</sub> (m)	d <sub>30</sub> (m)	d <sub>35</sub> (m)	d <sub>50</sub> (m)	d <sub>60</sub> (m)	d <sub>65</sub> (m)	d <sub>70</sub> (m)	d <sub>90</sub> (m)
0.00038	0.00050	0.00118	0.00153	0.00340	0.00535	0.00653	0.00776	0.01627
Campione n. 2								
d <sub>5</sub> (m)	d <sub>10</sub> (m)	d <sub>30</sub> (m)	d <sub>35</sub> (m)	d <sub>50</sub> (m)	d <sub>60</sub> (m)	d <sub>65</sub> (m)	d <sub>70</sub> (m)	d <sub>90</sub> (m)
0.00082	0.00140	0.00613	0.00771	0.01200	0.01505	0.01689	0.01929	0.02769
Media campioni								
d <sub>5</sub> (m)	d <sub>10</sub> (m)	d <sub>30</sub> (m)	d <sub>35</sub> (m)	d <sub>50</sub> (m)	d <sub>60</sub> (m)	d <sub>65</sub> (m)	d <sub>70</sub> (m)	d <sub>90</sub> (m)
0.00060	0.00095	0.00366	0.00462	0.00770	0.01020	0.01171	0.01352	0.02198

### 5. Calcolo del trasporto solido

I calcoli effettuati per l'anno medio con i metodi esposti in precedenza di calcolo del trasporto solido di fondo sono riportati di seguito in forma tabella (Tabella 2) e in forma grafica (Figura 11).

Come viene illustrato in diversi studi scientifici (vedi, ad esempio, Arshad e Omid, 2003), i risultati derivanti dall'applicazione di tali formule differiscono di uno o più ordini di grandezza. Ciò pone l'accento sulla difficoltà di effettuare corrette previsioni quantitative, specialmente nel caso di corsi d'acqua a carattere impulsivo, come il torrente Fiumarella. Il torrente Fiumarella è caratterizzato lungo tutto il suo corso dalla presenza di briglia che tendono a bloccare il trasporto solido di fondo. Pertanto, le formule che stimano elevati quantitativi di trasporto solido di fondo risultano meno credibili delle formule con valori più bassi. Quindi,

nell'analisi morfodinamica del litorale costiero di Calopezzati si utilizzerà il trasporto solido di fondo calcolato con la formula di Ackers e White (1973).

Tab. 2. Trasporto solido fluviale medio annuo di fondo alla foce del torrente Fiumarella

Metodo	$G_s$ (m <sup>3</sup> /anno)
Du Boys, 1879	7169.2
Meyer-Peter, Favre e Einstein, 1934	32051.6
Shields, 1936	144095.5
Einstein, 1942	66049.4
Kalinske, 1947	21332.1
Meyer-Peter e Müller, 1948	14043.8
Schoklitsch, 1950	20162.3
Einstein e Brown, 1950	74818.5
Yalin, 1963	42503.4
Pica, 1972	67794.2
Ackers e White, 1973	2340.4
Parker, Klingemann e McLean, 1982	37596.5
Smart e Jaeggi, 1988	56335.5
Wilcock e Crowe, 2003	27761.3

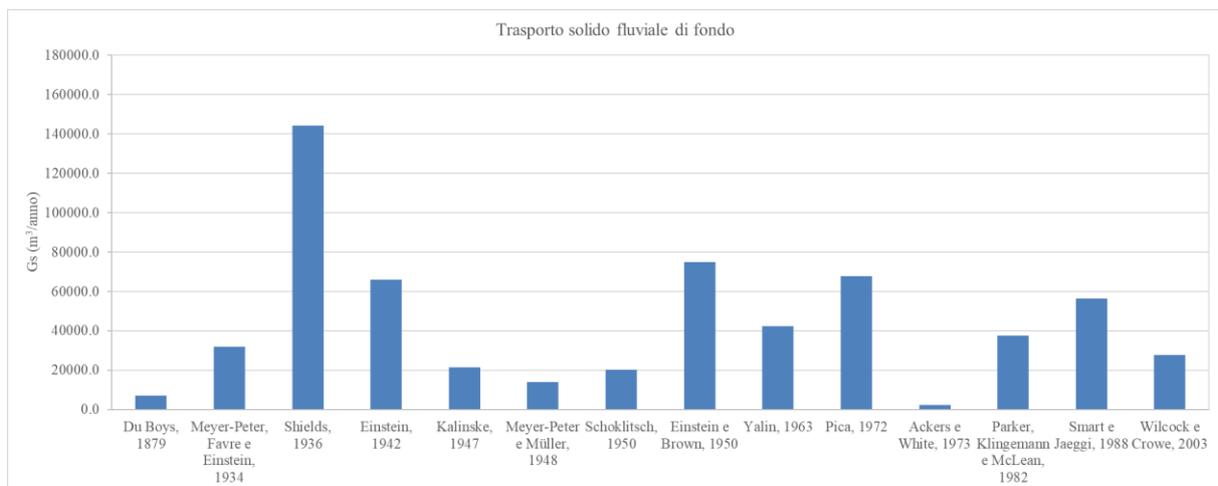


Fig. 12. Trasporto solido fluviale medio annuo di fondo alla foce del torrente Fiumarella, ottenuto con le varie formule di letteratura.