

Correzione dei torrenti

quantificazione trasporto solido

Giancarlo Dalla Fontana
Università di Padova

A.A. 2013/2014

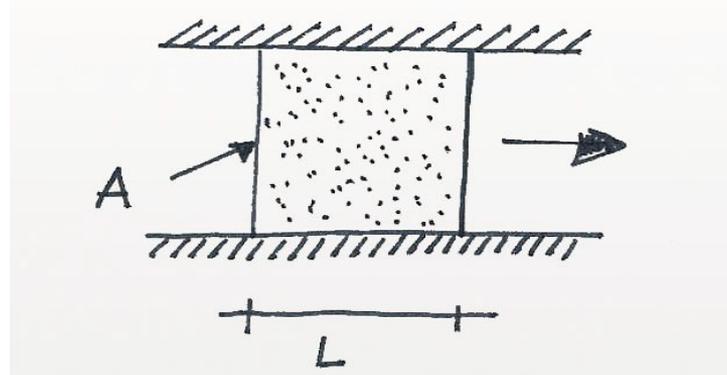
La corrente esercita sul materiale solido un'azione dinamica che tende a rimuovere il materiale e a trasportarlo verso valle, la soglia di innesco del moto per i sedimenti di data granulometria dipende oltre che dalla natura del materiale stesso dalle caratteristiche idrodinamiche della corrente. La forza di trascinamento della corrente è valutabile rispetto a dei valori soglia che possono essere definiti in relazione allo sforzo tangenziale o alla velocità limite di inizio del moto.

L'individuazione della soglia di inizio del trasporto ovvero della condizione di "moto incipiente del materiale" costituisce il presupposto per poter affrontare su basi razionali la stima della capacità di trasporto al fondo.

Il trasporto di fondo ha inizio quando τ oltrepassa lo sforzo resistente limite, τ_c , che dipende in larga misura dalle dimensioni dei grani posti sul contorno

Moto uniforme – sforzo tangenziale sul contorno

Esprime la condizione di equilibrio tra gravità e resistenza al moto



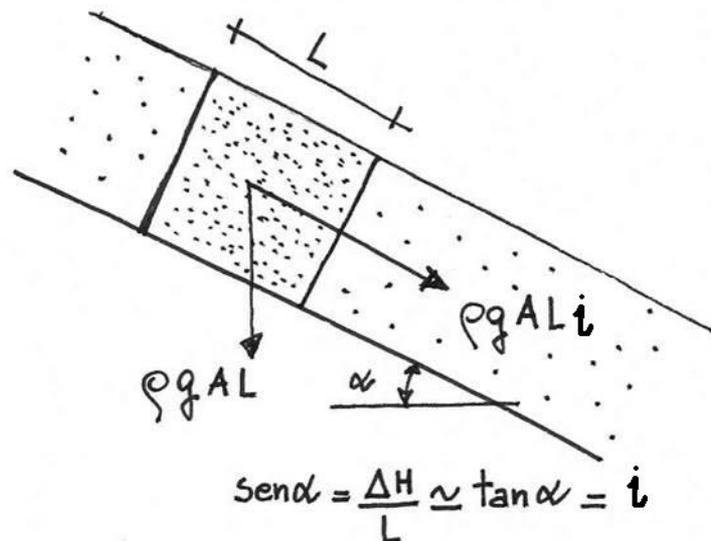
FORZA CHE
PRODUCE IL
MOTO

$$\rho g A L i$$

FORZA CHE
RESISTE AL
MOTO

$$\tau P L$$

τ \longrightarrow Sforzo tangenziale
medio sul contorno



$$\rho g A L i = \tau P L$$

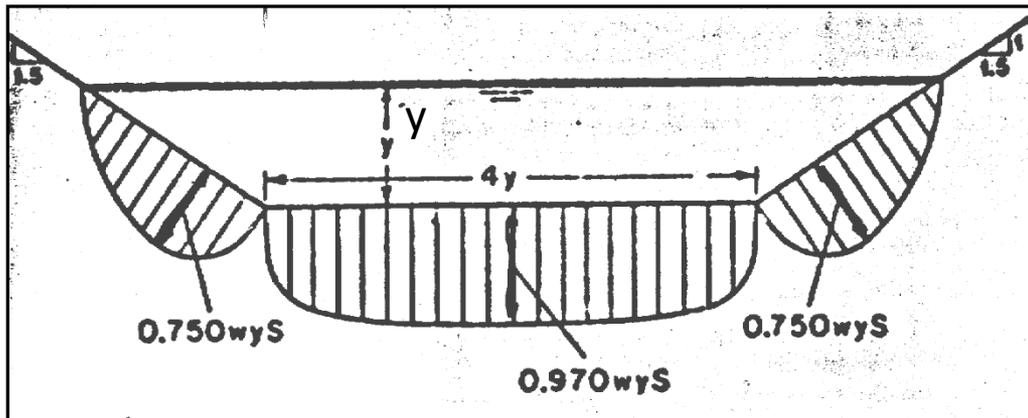
$$\tau = \gamma \cdot \frac{A}{P} \cdot i$$

$$\tau = \gamma \cdot R_H \cdot i$$

Distribuzione dello sforzo tangenziale sul contorno

Si parla di τ medio poiché, in realtà, lo sforzo non è uniforme lungo il contorno. Esso è più ridotto sulle sponde rispetto al fondo.

Se si analizza un canale a sezione trapezoidale, si può notare la seguente distribuzione di sforzi



$$\tau = \gamma R_H i$$

medio

$$\tau_{\max} = \gamma y i$$

Sforzo tangenziale sul contorno in termini cinetici

$$\tau = \frac{\text{forza}}{\text{area}} = \left[N m^{-2} \right] = \left[\frac{kg m s^{-2}}{m^2} \right]$$

Lo sforzo sul contorno in termini cinetici esprime una **velocità di attrito**:

$$u_* = \sqrt{\tau / \rho}$$

Infatti, considerando l'espressione dimensionale si ottiene:

$$u_* = \left[\frac{kg m s^{-2}}{m^2} \times \frac{m^3}{kg} \right]^{1/2} = \left[m s^{-1} \right]$$

$$\gamma = \rho g$$

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{\gamma R_H i}{\rho} = u_*^2 = g R_H i$$

$$u_* = \sqrt{g R_H i}$$

Condizione di inizio del moto

$$\tau \geq \tau_c$$

Il trasporto di fondo ha inizio quando τ oltrepassa lo sforzo tangenziale critico τ_c , che dipende in larga misura dalle dimensioni dei grani posti sul contorno.

$\tau_c = f$ (campo di velocità, D , viscosità fluido, densità sedimenti e fluido)

Sperimentazione di Shields

Shields (1936) attraverso analisi sperimentali (e dimensionali) ha determinato τ_c dalla correlazione di due parametri adimensionali:

- **Fr^*** numero di Froude sedimentologico
(o numero. di mobilità)

$$Fr^* = \frac{u_*^2}{g \Delta D};$$

- **Re^*** : numero di Reynolds sedimentologico

$$Re^* = \frac{u_* D}{\nu}$$

ν = viscosità cinematica in funzione di T (temperatura): circa $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

$$u_* = f(\tau_c)$$

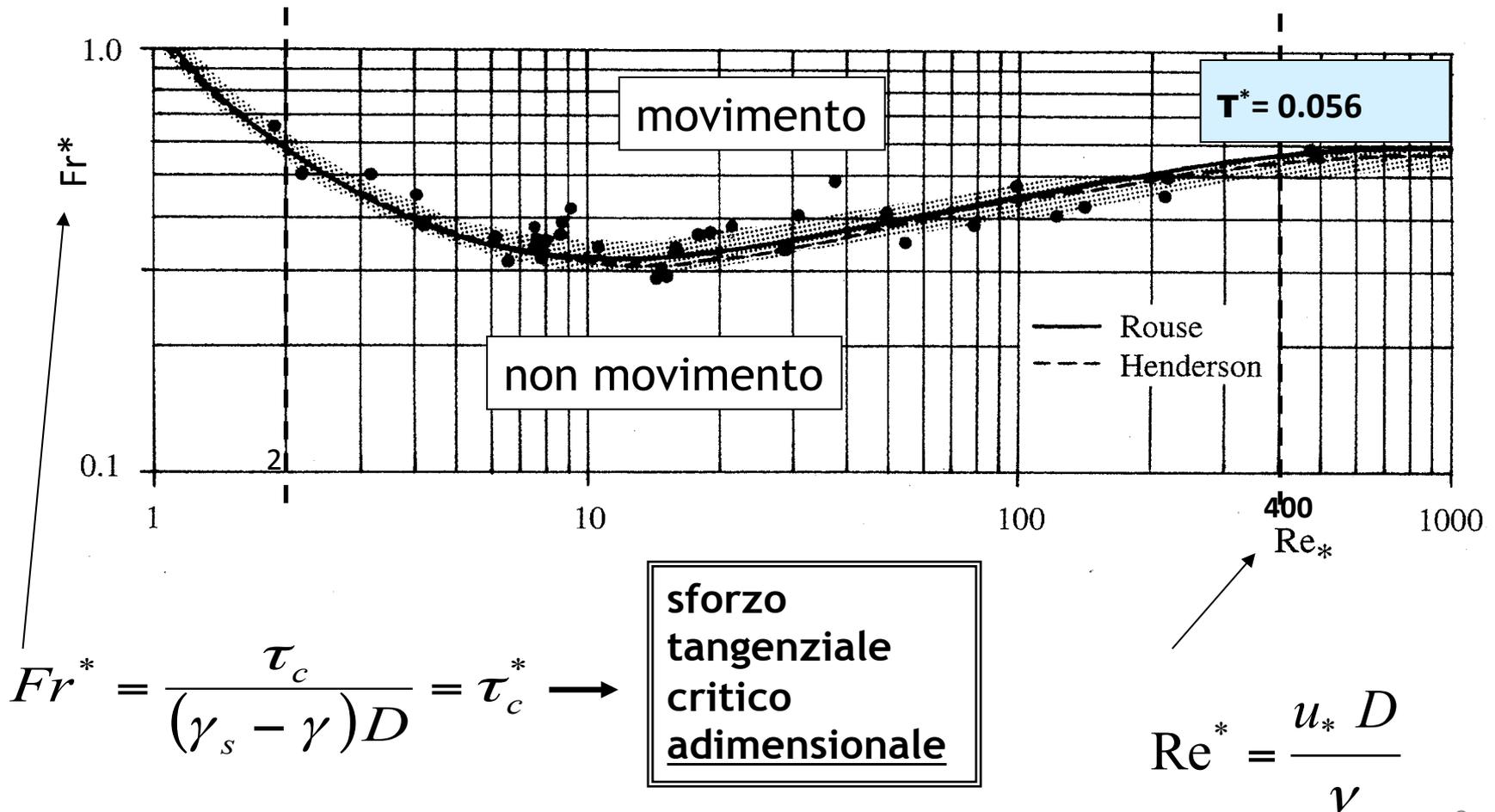
$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$$

Sforzo tangenziale critico adimensionale

$$u_*^2 = \frac{\tau_c}{\rho} \quad Fr^* = \frac{\tau_c}{\rho g} \frac{1}{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} \frac{1}{D} = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) D} = \tau_c^*$$

Sperimentazione di Shields

L'indagine di Shields pur nella specificità nelle quali l'esperimento è stato condotto (granulometria uniforme, fondo orizzontale) costituisce un riferimento fondamentale per la valutazione dell'inizio del moto.



Sperimentazione di Shields

Il diagramma di Shields individua tre zone con comportamento diverso per quanto attiene alla relazione tra parametro di mobilità e numero di Reynolds sedimentologico. Di particolare interesse applicativo la terza zona dove il parametro di mobilità si mostra costante al variare del numero di Re^*

$Re^* > 400$: zona pienamente turbolenta $\tau_c = f(D)$

$$\tau_c = \alpha (\gamma_s - \gamma) D \qquad \alpha = \tau_c^* \cong 0.06$$

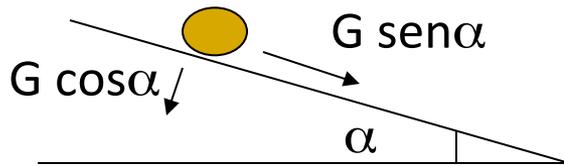
Krey ha proposto per $D > 6$ mm $\alpha = 0.076$

Correzione dello sforzo tangenziale per fondo inclinato (torrenti montani)

$\tau_c' < \tau_c$ entra in gioco la forza peso G nella direzione del moto

ψ : angolo di attrito interno del materiale

α : pendenza del fondo



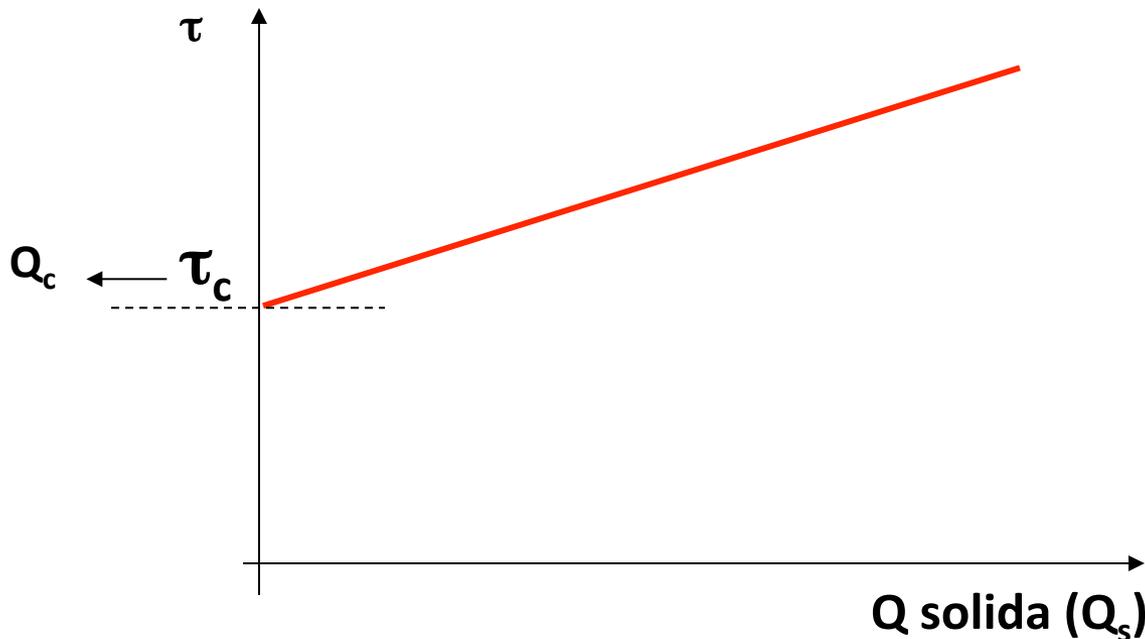
$$\tau_c' = \frac{\sin(\psi - \alpha)}{\sin \psi} \tau_c$$

Es. con $\alpha = 5^\circ$ e $\psi = 30^\circ$: $k' \sim 0.84$

Sforzo tangenziale critico (τ_c) e portata critica (Q_c)

La valutazione di τ_c consente:

- La progettazione corretta di canali (materiale non coesivo): fondo e sponde stabili nei confronti dell'erosione del flusso
- La stima della portata liquida che innesca il trasporto solido di fondo in letti alluvionali



Per $\tau \rightarrow \tau_c$

$$Q = Q_c$$
$$Q_s = 0$$

$$\tau = \tau_c = \gamma R_{h,c} i$$

Calcolo portata critica di inizio del moto del materiale di assegnata granulometria con la formula di moto uniforme

Nel caso semplificato di sezione rettangolare molto larga (B)

$$Q = K_s A R_H^{2/3} i^{1/2} = K_s (B h) h^{2/3} i^{1/2}$$

$$Q = K_s B h^{5/3} i^{1/2}$$

$$\tau_c = \gamma h_c i \cong 0.06 (\gamma_s - \gamma) D \quad h_c \cong \frac{\tau_c}{\gamma i}$$

$$Q_c = K_s B \left(\frac{\tau_c}{\gamma i} \right)^{5/3} i^{1/2}$$

Calcolo della capacità di trasporto solido

La maggior parte delle formule per il calcolo della *capacità di trasporto* contengono, quali parametri essenziali:

$$(\tau - \tau_c)$$

sforzo tangenziale ***effettivo*** o ***eccesso di sforzo di trascinamento***

$$(Q - Q_c)$$

portata liquida ***effettiva*** o ***efficace***

Le formule basate sull'utilizzo della portata critica sono più facili da utilizzare anche in ragione del fatto che la portata critica di inizio del trasporto può essere più agevolmente oggetto di misure dirette in campo

Esempio di valutazione della portata critica Q_c

Torrente montano: $B = 5.5 \text{ m}$; $i_f = 0.05$ ($\alpha = 3^\circ$); $K_s = 15 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$;
 $\gamma_s = 27000 \text{ N/m}^3$; $\psi = 35^\circ$; $D_{\text{medio}} = 0.15 \text{ m}$

$D_{90} = 0.45 \text{ m}$; $D_{84} = 0.35 \text{ m}$; $D_{50} = 0.10 \text{ m}$; $D_{35} = 0.05 \text{ m}$

Ipotizziamo (poi lo verificheremo) $Re^* > 400$

• teniamo conto di $i_f \longrightarrow \tau_c' = K' \tau_c$

• $\tau_c = 0.056(\gamma_s - \gamma) D \cdot K'$

$$= 0.056 \cdot (27000 - 9810) \cdot 0.15 \cdot 0.92 = 132.8 \text{ N/m}^2$$

• $h_c = \frac{\tau_c}{\gamma i} = \frac{132.8}{(9810 \cdot 0.05)} = 0.27 \text{ m}$

$$Q_c = K_s b h_c^{5/3} i^{1/2} = 15 \cdot 5.5 \cdot (0.27)^{5/3} \cdot (0.05)^{1/2} = 2.1 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\begin{aligned} u_* &= \left(\frac{\tau}{\rho} \right)^{1/2} = \left(\frac{132.8}{1000} \right)^{1/2} = 0.36 \text{ m/s} \\ &= \left(g R_H i \right)^{1/2} = (9.81 \cdot 0.27 \cdot 0.05)^{1/2} \cong 0.36 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\text{Re}^* = \frac{u_* D}{\nu} = \frac{0.36 \cdot 0.15}{10^{-6}} \cong 54000 \gg 400$$

Quantificazione del Trasporto Solido

La portata solida si può esprimere per unità di larghezza d'alveo. Si utilizza in termini complessivi o anche dandone la misura per unità.

in volume	q_s	$m^3s^{-1}m^{-1}$ (m^2s^{-1})
in peso	q_{sp}	$N s^{-1}m^{-1}$
in massa	q_{sm}	$kg s^{-1}m^{-1}$

La portata solida totale risulta $Q_s = q_s B$ con B larghezza dell'alveo

La portata solida al fondo di un corso d'acqua può essere valutata in base a numerose formule. Un ampio studio compiuto da Rickenmann (2001) ha confermato la possibilità di applicare allo studio del trasporto solido dei torrenti relazioni del tipo:

$$Q_s = AS^a(Q - Q_c) \quad \text{oppure} \quad q_s = AS^a(q - q_c)$$

Il parametro [A] dipende dalla disomogeneità granulometrica, in particolare dal rapporto d_{90}/d_{30} . [a] viene ottenuto per calibrazione, [S] è la pendenza e $[Q_c]$ è la portata critica, ovvero la portata che innesca il fenomeno del trasporto solido

Quantificazione del Trasporto Solido

La formula proposta da [Shocklitsch](#), per una densità relativa dei sedimenti pari a 2.65, è:

$$q_s = 0.94 S^{1.5} (q - q_c)$$

Se si trascura l'effetto della disuniformità granulometrica (d_{90}/d_{30}), i valori dei coefficienti A ed a per tutti i 252 esperimenti condotti presso l'ETH di Zurigo risultano ($S=0.0004 - 0.20$):

$$q_s = 1.5 S^{1.5} (q - q_c)$$

rendendo invece in esame i soli dati condotti su forte pendenza ($S=0.03-0.20$); Smart e Jaeggy, 1983; Rickenmann, 1991) si ottiene invece la relazione:

$$q_s = 5.8 S^2 (q - q_c)$$

Risulta evidente come, all'aumentare della pendenza, il fattore AS^a tende ad accrescere il suo "peso" rispetto alla portata liquida "efficace" ($q-q_c$) a produrre la portata solida. D'altra parte la relazione di Shocklitsch viene a coincidere con la seconda di Rickenmann per $S=2.6\%$, confermando come il passaggio fra le due equazioni di trasporto (bassa pendenza ed alta pendenza); avviene proprio, come già osservato da più autori intorno al 3%.

Quantificazione del Trasporto Solido

L'equazione di Shocklitsch per la portata solida specifica può essere generalizzata :

$$q_s = \left(\frac{2.5}{\gamma_s / \gamma_w} \right) \cdot S^{1.5} \cdot (q - q_c)$$

la portata specifica critica può essere calcolata come:

$$q_c = 0.26 \cdot \left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \right) \cdot \frac{d_{40}^{3/2}}{S^{7/6}}$$

La grandezza d_{40} (m) offre un'indicazione sulla granulometria dell'alveo

Quantificazione del Trasporto Solido

Come si stima il volume solido trasportato durante un evento?

Occorre innanzitutto definire l'idrogramma dell'evento e discretizzarlo in intervalli di tempo.

Successivamente, una volta definita la portata specifica solida per ciascun intervallo di tempo, con la formula più appropriata al contesto, è possibile passare alla portata solida moltiplicando la portata specifica solida per la larghezza dell'alveo entro il quale avviene il trasporto solido.

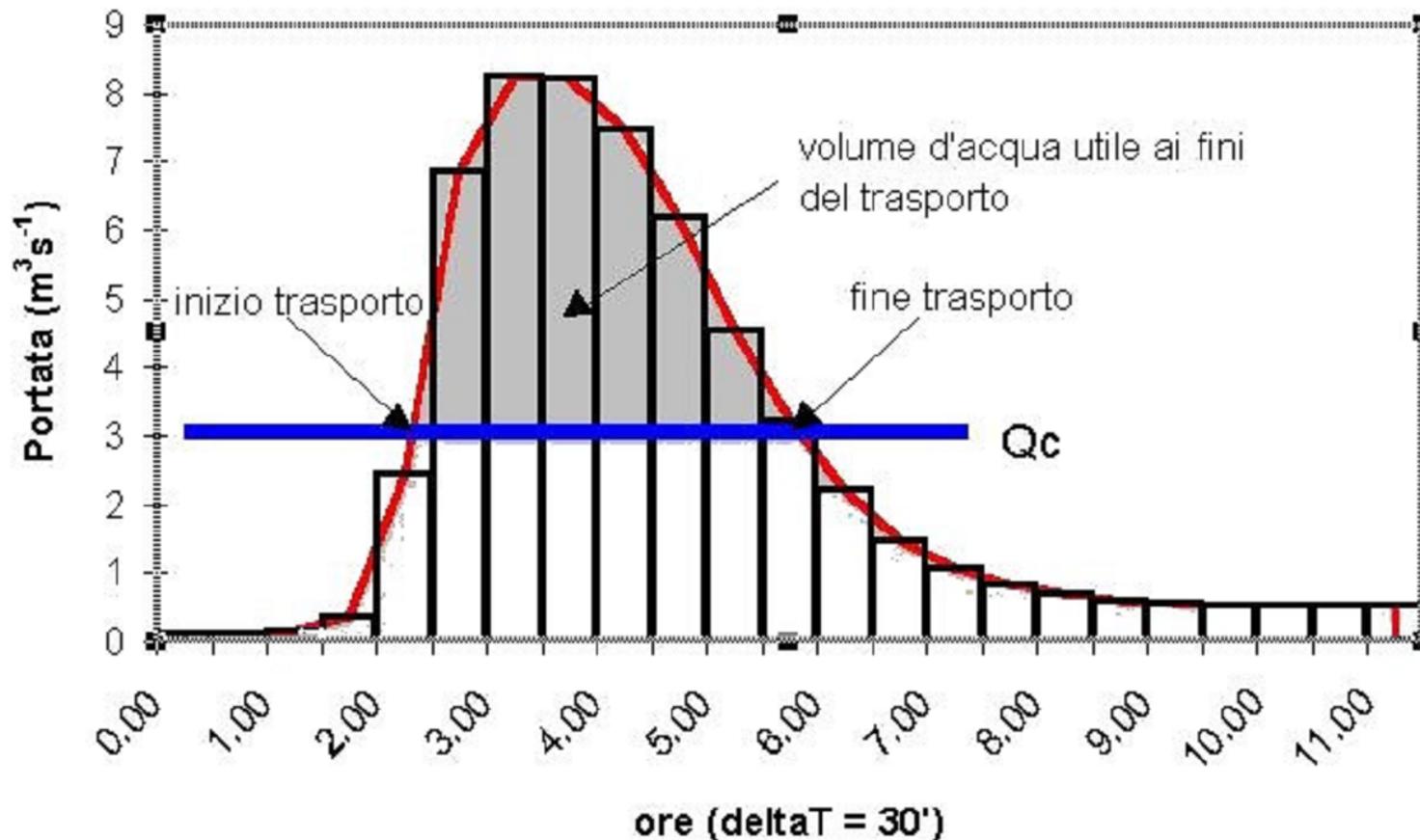
Successivamente si determina il volume solido trasportato in ciascun intervallo di tempo moltiplicando la portata solida per la durata dell'intervallo di tempo.

La somma di tutti i volumi solidi trasportati parziali ottenuti fornisce la stima del *volume solido trasportato durante l'evento*.

Quantificazione del Trasporto Solido – portata efficace

$$V_s = \sum_{i=1}^n q_s B \Delta T$$

Discretizzazione idrogramma di progetto



Quantificazione del Trasporto Solido - sedimentogramma

