

# LA GRANULOMETRIA D'ALVEO

## IL RILIEVO IN CAMPO E L'ELABORAZIONE DEI DATI

(Giancarlo Dalla Fontana & Vincenzo D'Agostino)

### Introduzione

La caratterizzazione del materiale costituente il letto di un torrente richiede la conoscenza della distribuzione granulometrica dei sedimenti. Essa è un supporto indispensabile per determinare:

- la scabrezza idraulica del torrente;
- i parametri idraulici di soglia (portata liquida, velocità media della corrente, sforzo tangenziale) in corrispondenza ai quali ha inizio il trasporto solido di fondo;
- la capacità di trasporto solido di fondo del torrente.

Per la classificazione dei sedimenti si può far riferimento alla progressione proposta dall' American Geophysical Union e riportata in tabella I; nella tabella vengono evidenziate con maggiore dettaglio le classi diametriche che interessano i corsi d'acqua. La classificazione per diametri segue la scala di Wentworth che si basa su una progressione esponenziale dei diametri: la base è 2 e l'esponente è l'indice  $-\phi$  (sarà quindi:  $D = 2^{-\phi}$ , con il diametro  $D$  espresso in mm; od anche  $-\phi = \log_2 D$ ). Generalmente ogni classe è costituita da incrementi dell'indice  $-\phi$  pari a 0.5 o, se si desidera una descrizione più minuziosa del campione, di 0.25. In questo modo con valori di  $-\phi$  compresi fra 12 e -12 si descrive l'intera granulometrica (tabella I). La transizione tra valori positivi e negativi di  $-\phi$  avviene in corrispondenza dei diametri delle sabbie. La tabella è stata predisposta una suddivisione in classi che tiene conto della impossibilità del metodo di rilievo in campo di poter distinguere con precisione le granulometrie più fini (in genere si arriva a distinguere in modo accettabile le sabbie molto grosse dalle sabbie grosse e, con un poco di attenzione, le grosse dalle medio fini). Nella stessa tabella si è invece privilegiata la distinzione in classi per le granulometrie più grossolane, utilizzando incrementi di 0.5 dell'indice  $\phi$ .

Tab. I. *Classi e dimensioni dei sedimenti incoerenti (American Geophysical Union)*

<b>Tipo di sedimento</b>	<b>Indice: - <math>\phi</math> <math>2^{-\phi}</math></b>	<b>Classe diametrica D (mm)</b>
Massi molto grossi	$2^{12} - 2^{11.5}$	4096 – 2896
Massi molto grossi	$2^{11.5} - 2^{11}$	2896 – 2048
Massi grossi	$2^{11} - 2^{10.5}$	2048 – 1448
Massi grossi	$2^{10.5} - 2^{10}$	1448 - 1024
Massi medi	$2^{10} - 2^{9.5}$	1024 – 724
Massi medi	$2^{9.5} - 2^9$	724 – 512
Massi piccoli	$2^9 - 2^{8.5}$	512 – 362
Massi piccoli	$2^{8.5} - 2^8$	362 – 256
Ciottoli grossi	$2^8 - 2^{7.5}$	256 – 181
Ciottoli grossi	$2^{7.5} - 2^7$	181 – 128
Ciottoli piccoli	$2^7 - 2^{6.5}$	128 – 90
Ciottoli piccoli	$2^{6.5} - 2^6$	90 – 64
Ghiaia molto grossa	$2^6 - 2^5$	64 – 32
Ghiaia grossa	$2^5 - 2^4$	32- 16
Ghiaia media	$2^4 - 2^3$	16 – 8
Ghiaia fine	$2^3 - 2^2$	8 – 4
Ghiaia molto fine	$2^2 - 2^1$	4 – 2
Sabbia molto grossa	$2^1 - 2^{0.5}$	2 - 1.4
Sabbia grossa	$2^{0.5} - 2^{-1}$	1.4 - 0.5
Sabbia da media a molto fine	$2^{-1} - 2^{-4}$	0.5 - 0.06
Limo	$2^{-4} - 2^{-8}$	0.06 - 0.004
Argilla	$2^{-8} - 2^{-12}$	0.004 - 0.002

### **Metodo ponderale.**

Il metodo universalmente adottato per la stima analitica della granulometria, prevede il prelievo nell'alveo di una quantità di materiale sufficientemente rappresentativa della gamma granulometrica costituente il letto. Questo campione è quindi sottoposto ad un'analisi che consiste nel vagliare i sedimenti con dei setacci a maglie quadrate aventi dimensioni standard. La curva che sintetizza queste misure è appunto chiamata granulometrica ed esprime l'andamento delle percentuali in peso del campione che sono passate attraverso le maglie dei rispettivi vagli.

Convenzionalmente si indica ad esempio come il  $D_{50}$  del campione vagliato il lato della maglia del setaccio che lascia passare il 50% in peso del campione in esame; analogamente il  $D_{90}$  della curva rappresenta quella maglia del setaccio

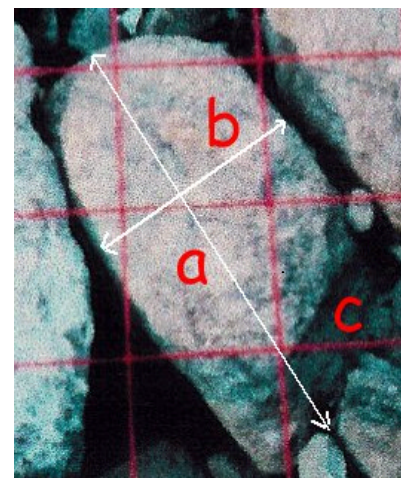
che lascia passare il 90% in peso del campione (quest'ultimo è quindi un parametro descrittivo delle granulometrie più grossolane che costituiscono il campione).

### Metodo numerale

La procedura per pesata si applica senza difficoltà ai corsi d'acqua caratterizzati da letti sabbiosi o sabbioso-ghiaiosi, giacchè è sufficiente sottoporre ad un laboratorio geotecnico un campione prelevato in alveo di volume abbastanza modesto e dell'ordine, al più, di qualche decimetro cubo. Nel caso invece si desideri pervenire alla curva granulometria di un letto con sedimenti grossolani (torrenti montani ad elevata pendenza), aventi taglie granulometriche che vanno dalle sabbie a massi dell'ordine di 0.5-1.0 m (Figura 1) ed oltre, la metodologia anzidetta non è praticabile per tre ordini di motivi: per avere un campione sufficientemente rappresentativo occorrerebbe asportare dall'alveo e vagliare un volume di sedimenti dell'ordine di qualche metro cubo; la vagliatura di granulometrie così grossolane risulterebbe evidentemente onerosa, oltrechè evidentemente di non semplice esecuzione (accesso non agevole al luogo e difficoltà all'utilizzo di vagli di grosse dimensioni); infine, nell'asportazione di una così ingente quantità di materiale, si rischierebbe di non riuscire a differenziare la granulometria del materiale superficiale da quella del sottostrato.



**Figura 1** – Il letto di un torrente montano: le dimensioni dei sedimenti superano non di rado le decine di centimetri. La griglia sovrapposta misura 10 cm di lato (in questo caso è opportuno che il campionamento avvenga prefissando una dimensione della griglia di campionamento pari ad almeno 40 cm). Da notare la grande eterogeneità del materiale; la caratterizzazione granulometrica avviene attraverso la determinazione di diametri caratteristici ottenibili dalla curva granulometrica..



**Figura 2.** Dimensioni del ciottolo. Si indicano convenzionalmente con "a" il diametro massimo, con "b" quello intermedio e con "c" quello minore. Il diametro di riferimento per la classificazione granulometrica è il diametro intermedio "b".

Per risolvere il problema si è andato affermando un metodo che prevede la sostituzione della curva granulometrica costruita con il metodo ponderale precedentemente descritto con una curva granulometrica in cui le percentuali

passanti si riferiscono a frequenze numerali dei diametri del campione anziché a frequenze in peso.

Ogni ciottolo può idealmente assimilarsi ad un ellissoide le cui dimensioni principali sono costituite dai tre diametri misurati in corrispondenza dei suoi assi principali. Si indicano convenzionalmente con "a" il diametro massimo, con "b" quello intermedio e con "c" quello minore (Fig.1). Nella operazione di setacciatura ponderale è la dimensione "b" quella che determina il passaggio o meno attraverso la maglia di un setaccio, quindi è a tale diametro che, anche le curve granulometriche ponderali, fanno riferimento.

Nella determinazione della granulometria numerale si prevede di non rimuovere i sedimenti dal letto ma di misurare sul campo il loro diametro intermedio "b". Nella letteratura scientifica sono state proposte varie modalità di esecuzione del campionamento numerale; quelle più frequentemente adottate e che si sono oramai affermate nella pratica operativa sono: il metodo del reticolo (noto in letteratura anglosassone come "grid-by number") ed il campionamento in linea ("transect-line"); con il primo metodo il campionamento avviene su di un'area, con il secondo lungo una linea avente direzione preferenziale nel senso della corrente. In entrambi i casi si individua preliminarmente il tratto d'alveo da campionare, che deve essere possibilmente asciutto od almeno interessato da un tirante d'acqua modesto (classico ad esempio è l'utilizzo di una barra di sedimenti disposta longitudinalmente o trasversalmente al torrente). Occorre quindi prefissare una unità spaziale di riferimento secondo la quale eseguire il campionamento; questa unità deve essere dell'ordine (meglio se un poco superiore) del diametro dei massi più grossi presenti nel luogo di misura. Nel caso quindi del metodo del reticolo si traccia sul letto (ad esempio con l'uso di cordelle metriche) una griglia avente maglie quadrate delle dimensioni della unità spaziale di riferimento: i punti di campionamento, sui quali si andrà a misurare il diametro "b", saranno rappresentati dagli incroci (nodi) delle maglie di questa griglia (se un masso molto grosso cade sotto due nodi della griglia questo deve essere contato due volte). Più semplicemente, adottando invece il metodo "transect-line", si evidenzieranno lungo la linea gli intervalli spaziali di campionamento.

Sulla base delle ricerche condotte da vari autori si è desunto che, affinché l'analisi conduca a risultati rappresentativi ed indipendenti dalla sensibilità di chi esegue la misura, risulta necessario campionare almeno una ottantina di punti (tanto per il grid-by number che per il transect line). Per questa ragione l'area su cui si estende la griglia di misura non è detto che debba essere necessariamente quadrata (quadrato devono invece rimanere le maglie della griglia). Tracciando aree rettangolari, a forma di L o di T si riesce talora ad utilizzare meglio lo spazio reso disponibile dal sito di misura. Se ad esempio si

è resa conveniente la scelta di una unità spaziale di riferimento di 0.5 m (evenienza tutt'altro che rara in un torrente alpino), risulterà necessaria, per campionare una ottantina di punti, una superficie asciutta o con poca acqua dell'ordine dei venti metri quadrati. Se quindi l'alveo è stretto o con deflussi elevati l'area su cui eseguire il rilievo in modo agevole potrebbe non essere di sufficiente estensione.

Questo motivo parrebbe rendere sempre consigliabile l'utilizzo della misurazione in linea per la sua più agevole modalità esecutiva. In realtà questo metodo è da applicarsi solo quale alternativa all'impossibilità di eseguire un campionamento a reticolo.

Di seguito viene mostrata la modalità di elaborazione di un rilievo condotto in un torrente montano con il metodo del reticolo.

#### *Il campione*

Si sono campionati esattamente 96 diametri, tracciando sul letto una griglia rettangolare costituita da 12 nodi in senso longitudinale ed 8 in senso trasversale alla corrente; per la griglia si sono prescelte maglie quadrate della dimensione di 0.5 m. In tabella II vengono riportati (in mm) i valori dei diametri misurati in corrispondenza agli incroci delle maglie.

Tabella II - Esempio di rilievo granulometrico condotto in un torrente montano con il metodo del reticolo: valore in mm del diametro intermedio "b" di ciascun elemento (dimensione del campione: NC=96).

667	55	72	141	145	300	315	29
128	103	83	110	110	40	95	117
89	77	245	149	380	280	240	120
111	89	104	89	250	30	137	17
180	76	89	44	106	116	230	32
85	83	151	79	180	66	42	132
52	80	200	68	105	175	154	58
140	84	10	49	135	15	97	86
63	82	280	93	41	102	160	280
46	123	89	25	128	78	195	183
71	43	84	55	102	163	107	153
46	47	35	190	160	363	130	90

#### *Ordinamento dei dati e suddivisione in classi granulometriche*

I diametri di tabella II vengono ordinati in senso decrescente (667, 380, 363, 315, 300, 280, 280, 280, 250, 245, 240, 230, 200, 195 mm, ...), si determina quindi il numero dei diametri cumulati che verrebbero tratti dai setacci ideali rappresentati dai limiti di classe di tabella I. Così ad esempio il valore più elevato di 667 mm relativo al campione è l'unico trattenuto dal "setaccio" di

512 mm (*massi medi* secondo la classificazione AGU di tabella I); proseguendo si contano tre diametri fino alla classe con limite inferiore di 362 mm (fino cioè al dato di 363 mm), quindi 8 diametri fino alla classe con limite di 256 mm, e così via fino ad esaurire tutto il campione.

In tabella III vengono sintetizzate le elaborazioni eseguite: nella prima colonna viene indicato il dato del campione che più si avvicina (per valori immediatamente superiori od uguali) al limite inferiore della classe riportata nella seconda colonna, nella terza colonna compare il diametro medio di ciascuna classe, nella quarta colonna viene riportato il numero dei ciottoli "trattenuti", nella quinta colonna il numero dei ciottoli "passanti" (pari alla dimensione totale del campione,  $NC = 96$ , meno il numero dei trattenuti) ed infine nell'ultima colonna viene calcolata la percentuale cumulata dei passanti (numero dei passanti diviso 96 e moltiplicato per 100). I dati della prima e della sesta colonna permettono quindi di tracciare la curva granulometrica del rilievo effettuato in campo (Figura 3).

#### *Curva granulometrica e calcolo dei diametri caratteristici*

Dai dati di tabella III possono dedursi anche i parametri più caratteristici della granulometria. Uno dei più importanti è, come noto, il diametro medio ( $D_m$ ) della distribuzione; questo si calcola come sommatoria dei prodotti delle frequenze relative di ciascuna classe per il diametro medio della classe ( $D_i$ ).

Nell'ultima colonna di tabella III sono riportate le *frequenze cumulate*; per dedurre le *frequenze relative* è sufficiente calcolare la differenza delle frequenze cumulate fra due classi contigue.

Così la frequenza relativa della classe più grossolana ( $D_i = 618$  mm) è pari, per il caso in esame, al 1.04% (100-98.96, Tab IV); quindi per la classe con  $D_i = 437$  mm è pari al 2.08% (98.96-96.88, Tab. IV) e così di seguito per tutte le rimanenti classi. In alternativa è anche possibile seguire il procedimento inverso: calcolare le frequenze relative degli elementi che ricadono in ciascuna classe (distribuzione di frequenza fig.4) e quindi le percentuali passanti cumulate (fig.3).

In tabella IV e figura 4 vengono riportate tutte le frequenze relative ( $f_i$ ) associate a ciascun diametro medio di classe (media geometrica dei diametri che definiscono l'ampiezza della classe); nella stessa tabella si riportano anche i prodotti parziali di ciascuna frequenza per i relativi diametri ( $D_i$ ). Dividendo la sommatoria dei prodotti che compaiono nella terza colonna della tabella per 100 (giacché le frequenze relative sono state espresse in %) si ottiene il diametro medio della distribuzione ( $D_m = 12481/100 \cong 125$  mm). Nella tab. IV è anche possibile osservare che la classe  $D_i = 76.1$  mm (fig.3) è quella più presente nella distribuzione ("moda" della distribuzione) e che le classi  $D_i$  da 152.2 a 76.5 mm rappresentano circa il 60 % dell'intero campione.

Tab. III - Elaborazione dei dati di tabella II per la costruzione della curva granulometrica

NC = Dimensione del campione (NC=96)					
Diametro dell'elemento che risulta maggiore o uguale al limite inferiore di ciascuna classe (mm)	Classe (mm)	Diametro medio della classe $D_i$ (mm)	Numero dei ciottoli trattenuti NT	Numero dei ciottoli passanti NP	Percentuale passante (%) $p_i = 100 \text{ NP/NC}$
(724)	1024-724	861.1	0	96	100
667	724-512	608.9	1	95	98.96
363	512-362	430.5	3	93	96.88
280	362-256	304.4	8	88	91.67
183	256-181	215.3	16	80	83.33
128	181-128	152.2	35	61	63.54
93	128-90.5	107.6	52	44	45.83
66	90.5-64	76.1	74	22	22.92
46	64-45.2	53.8	83	13	13.54
32	45.2-32	38.1	90	6	6.25
25	32-22.6	26.9	93	3	3.13
17	22.6-16	19.0	94	2	2.08
15	16-11.3	13.5	95	1	1.04
10	11.3-8	9.5	96	0	0

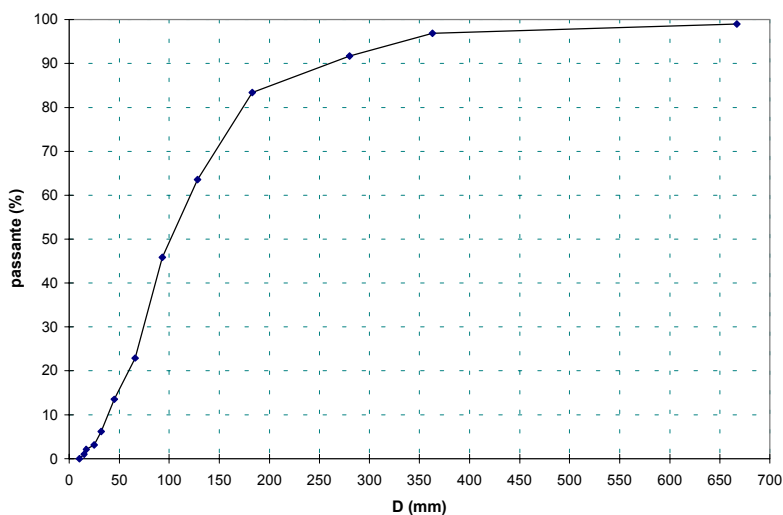


Figura 3 - Curva granulometrica (cumulata): dati del rilievo di tabella II

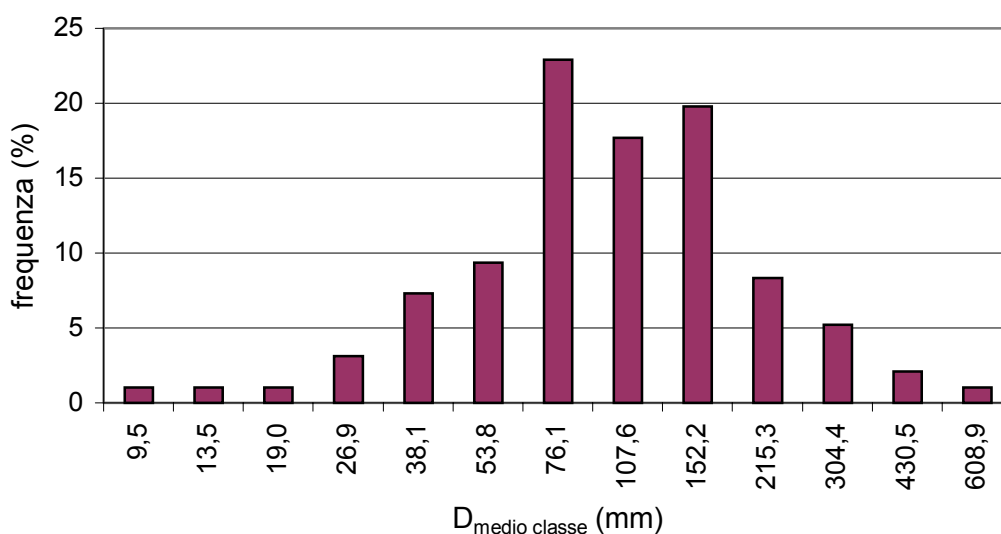


Figura 4 – Distribuzione di frequenza per le diverse classi granulometriche: dati del rilievo di tabella II

Si osserva infine che i diametri relativi ai frattili passanti più rappresentativi risultano:  $D_{90}=261$ ,  $D_{84}=191$ ,  $D_{75}=160$ ,  $D_{60}=121$ ,  $D_{50}=101$ ,  $D_{30}=74$ ,  $D_{16}=51$ ,  $D_{10}=39$  mm. Questi frattili non coincidono direttamente con le percentuali passanti riportate nell'ultima colonna di tabella III (ciò può avvenire talora per casualità solo per alcune di queste) e, pertanto, devono essere calcolati per interpolazione lineare fra i suddetti valori.

#### *Grado di uniformità del materiale*

A completamento della granulometria possono infine calcolarsi due parametri che danno la misura del grado di uniformità ( $U$ ) e della gradazione ( $G$ ) della curva granulometrica.

I parametri risultano rispettivamente:

$$U = D_{60} / D_{10} = 3.10$$

$$G = 0.5 (D_{84} / D_{50} + D_{50} / D_{16}) = 1.93$$

e denotano che la distribuzione è molto ampia e ben graduata in tutte le sue componenti.

È opportuno ricordare che le informazioni granulometriche alle quali si perviene con il metodo numerale, si riferiscono allo strato del materiale superficiale costituente l'alveo. Gli alvei caratterizzati da una distribuzione granulometrica ben assortita sono in genere caratterizzati da una



differenziazione granulometrica fra i sedimenti di superficie e quelli del sottostrato, essendo il primo più grossolano per una sorta di processo di "pavimentazione" del letto. Questo processo può avere luogo sia durante le fasi recessive di piene a carattere straordinario, sia durante le piene ordinarie (durante le quali tendono prevalentemente a mobilizzarsi le componenti più fini dei sedimenti che compongono il letto). Per analizzare anche il materiale del sottostrato, soprattutto in quei casi nei quali si ravveda un effetto di pavimentazione molto accentuato ed il sottostrato risulti povero di componenti grossolane, occorrerà procedere alla rimozione di uno spessore di materiale superficiale e sottoporre anche il sottostrato ad un campionamento granulometrico.

*Tab. IV - Distribuzione granulometrica del campione in termini di frequenze relative*

Diametro medio della classe $D_i$ (mm)	Frequenze relative $f_i$ (%)	Prodotti $D_i * f_i$
608.9	1.04	633.26
430.5	2.08	895.44
304.4	5.21	1585.92
215.3	8.34	1795.60
152.2	19.79	3012.04
107.6	17.71	1905.60
76.1	22.91	1743.45
53.8	9.38	504.64
38.1	7.29	277.75
26.9	3.12	83.93
19.0	1.05	19.95
13.5	1.04	14.04
9.5	1.04	9.88
	<b><math>\Sigma = 100</math></b>	<b><math>\Sigma = 12481</math></b>
		<b><math>D_m = 12481/100 = 125 \text{ mm}</math></b>