CORSO DI LAUREA TRIENNALE RTTP
Curriculum in TUTELA e RIASSETTO DEL TERRITORIO

Corso di Tutela del paesaggio agricolo-forestale e riassetto idraulico del territorio

Titolare: Prof. Mario A. Lenzi

Introduzione all'analisi granulometrica dei sedimenti fluviali

La granulometria è la caratterizzazione in termini statistici di una miscela di particelle di sedimento

Sono necessarie metodologie statistiche visto che l'analisi riguarda soltanto un campione della totalità dei sedimenti presenti

I passi principali dell'analisi granulometrica sono riassumibili come:

- Prelievo ed analisi del campione di sedimento
- Determinazione delle frequenze relative e cumulate
- Calcolo dei diametri caratteristici (diametro medio, percentili)
- Calcolo dei parametri della distribuzione (media, deviazione attorno alla media, simmetria, curtosi)

Finalità dell'analisi granulometrica dei sedimenti fluviali

- Valutazione portata di moto incipiente
- Valutazione della pendenza di correzione
- Stima della portata solida
- Determinazione della scabrezza
- Predizione della dimensione di scavi localizzati
- Studi di morfologia fluviale
- Valutazione degli habitat fluviali
- Analisi degli effetti a scala di bacino derivanti da cambiamenti dell'uso del suolo, vegetazionali, ecc…

Classificazione dei sedimenti

Esiste una grande variabilità di scala tra gli elementi più fini come le argille (ordine del micron, 10^{-3} mm) e i massi di grosse dimensioni (ordine del metro, 10^{3} mm).

Se le classi diametriche fossero assegnate in progressione aritmetica (2-3, 3-4, 4-5 mm), in molti casi la distribuzione di frequenza dei sedimenti fluviali tende ad essere log-normale, quindi con una "coda" molto lunga verso la parte grossolana.

Le distribuzioni di tipo logaritmico sono più difficili da trattare matematicamente di quelle normali (gaussiane o "a campana"), per cui per rendere più facile l'analisi delle curve di frequenza si adotta una progressione geometrica di passo 2 (2-4, 4-8, 8-16 mm), in cui i diametri raddoppiano ad ogni classe superiore (Scala di Wentworth).

Ipotizzando di avere una distribuzione log-normale, per trasformarla in una normale si introduce una scala aritmetica espressa tramite l'indice ϕ (*phi*):

$$\phi = -\log_2 D$$ Con il diametro D espresso in mm

Per denominare i sedimenti, generalmente si usa la classificazione dell' *American Geophysical Union* (AGU), che adotta la Scala di Wentworth:

Boulder = masso
Cobble = ciottolo
Gravel = ghiaia
Sand = sabbia
Silt = limo
Clay = argilla

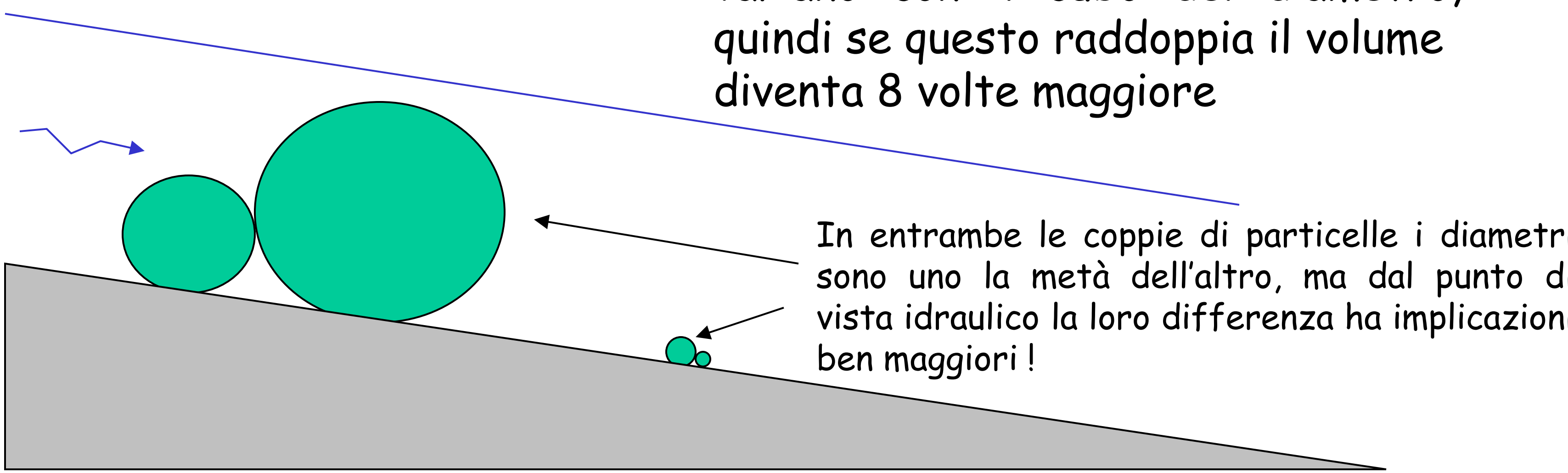
Description of particle size			$\phi = -\log_2$	mm	$\psi = \log_2$
			- 12.0	4096	12.0
	very large		- 11.5	2896	11.5
			- 11.0	2048	11.0
	large		- 10.5	1448	10.5
Boulder			- 10.0	1024	10.0
	Medium		- 9.5	724	9.5
			- 9.0	512	9.0
	small		- 8.5	362	8.5
			- 8.0	**256**	**8.0**
	large		- 7.5	181	7.5
Cobble			- 7.0	128	7.0
	Small		- 6.5	90.5	6.5
			- 6.0	**64**	**6.0**
	very coarse		- 5.5	45.3	5.5
			- 5.0	32	5.0
	coarse		- 4.5	22.6	4.5
		Pebble	- 4.0	16	4.0
Gravel	medium		- 3.5	11.3	3.5
			- 3.0	8	3.0
	fine		- 2.5	5.66	2.5
			- 2.0	4	2.0
	very fine	**Granule**	- 1.5	2.83	1.5
			- 1.0	**2**	**1.0**
	very coarse		- 0.5	1.41	0.5
			0	1	0
	coarse		+ 0.5	0.707	- 0.5
			+ 1.0	0.500	- 1.0
Sand	medium		+ 1.5	0.354	- 1.5
			+ 2.0	0.250	- 2.0
	fine		+ 2.5	0.177	- 1.5
			+ 3.0	0.125	- 3.0
	very fine		+ 3.5	0.088	- 3.5
			+ 4.0	**0.063**	- 4.0
Silt					
			+ 8.0	**0.0039**	**- 8.0**
Clay					
			+ 12.0	**0.00024**	**- 12.0**

Il valore D=2 mm (ϕ = -1) separa convenzionalmente il sedimento fine (sabbia, limo e argilla) da quello grossolano (ghiaia, ciottoli e massi)

Si noti come la variazione in termini aritmetici all'interno di una classe vari a seconda della classe stessa: da –1 a –2 significa da 2 a 4 mm (una differenza poco percettibile), da –10 a –11 vuol dire da 1024 a 2048 mm (cioè da 1 a 2 metri !!!)

Questo rende consigliabile di analizzare un campione che presenti pezzature grossolane usando almeno classi di 0.5 ϕ , allo scopo di non raggruppare in poche classi elementi altrimenti molto diversi diametricamente, con relativa diversa importanza dal punto di vista idraulico ed ambientale

Infatti, il volume e quindi il peso variano con il cubo del diametro, quindi se questo raddoppia il volume diventa 8 volte maggiore



Curve granulometriche

<u>Curva di frequenza relativa (*f*)</u>

Per ogni classe diametrica, esprime la sua percentuale rispetto al totale del campione.

Ha un andamento di solito a campana, ma può presentare più di un valore modale (più picchi), indicativi della presenza contemporanea di diverse frazioni granulometriche tra di loro disgiunte (p.e. massi-ciottoli e sabbia). Da essa si ricava il diametro medio (*vedi seguito*)
In termini analitici, rappresenta la derivata della curva di frequenza cumulata

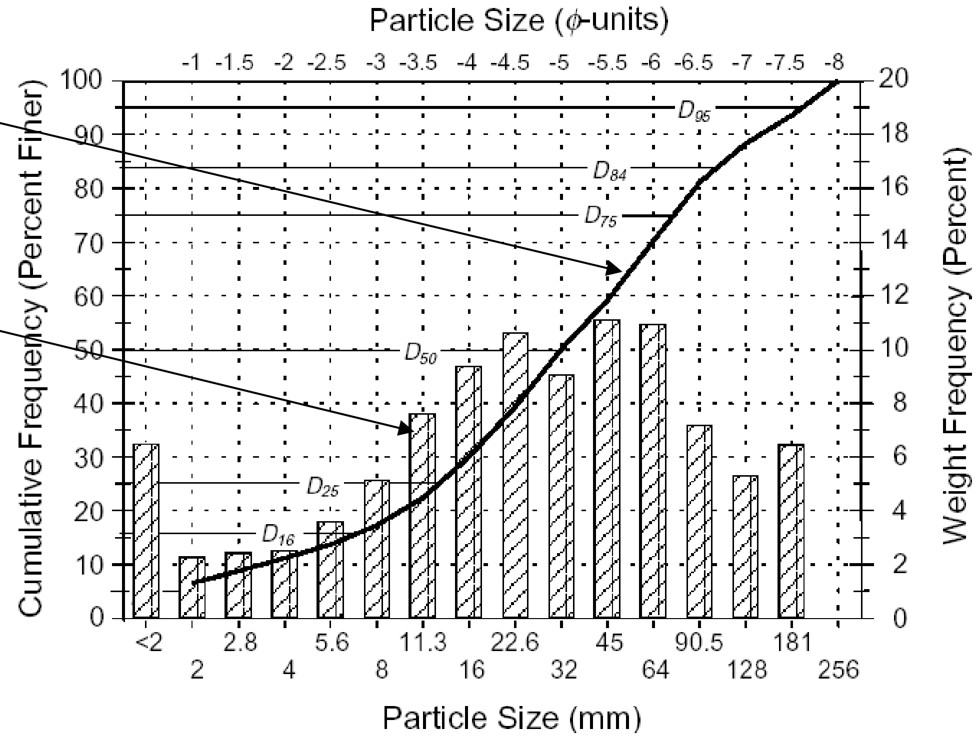
<u>Curva di frequenza cumulata (*F*)</u>

Rappresenta la percentuale – riferito al totale del campione - del sedimento più fine (detto anche passante) relativamente ad ogni classe diametrica.

E' in sostanza l'integrazione della curva di frequenza relativa, in termini discreti. E' una curva crescente, terminante a 100, con punto di flesso in corrispondenza dei valori modali di *f*. Da essa si ricavano i diametri percentili ed il modulo di uniformità di Kramer (*vedi seguito*)

Curva di frequenza cumulata

Curva (istogramma)
di frequenza relativa



Sulla curva di frequenza cumulata, i diametri associati ad una certa percentuale di passante vengono definiti diametri percentili e si indicano come D_{16}, D_{50}, D_{90}, dove il numero indica la percentuale considerata.

I percentili si possono calcolare per via grafica (solo approssimativamente) o più correttamente tramite interpolazione lineare dai dati di frequenza cumulata *F*, usando gli indici ϕ, tramite la seguente equazione:

$$\boxed{\phi_x = \phi_{\text{inf}} + \frac{\phi_{\text{sup}} - \phi_{\text{inf}}}{F_{\text{sup}} - F_{\text{inf}}} \cdot \left(F_x - F_{\text{inf}}\right)}$$

ϕ_x denota l'indice phi relativo al percentile F_x cercato, ϕ_{inf} e ϕ_{sup} quelli immediatamente inferiori e superiori ricavabili direttamente dai dati di F.

Successivamente si converte da phi a D: $D_x = 2^{-\phi_x}$

Parametri delle distribuzioni

Dato che non si riscontrano mai granulometrie perfettamente uniformi, non basta un solo diametro a caratterizzarle. Si fa uso quindi di parametri relativi a:

- tendenza centrale (moda, media, mediana)
- Ampiezza della distribuzione (deviazione standard, vari indici di gradazione, modulo di uniformità)
- Simmetria rispetto alla moda
- Appiattimento della curva (curtosi, poco usati)

In generale, si possono calcolare tramite due approcci, uno basato sui percentili, l'altro fondato sui momenti di vario ordine della distribuzione. Verranno qui presentati i più comuni parametri calcolati tramite il metodo dei percentili

Moda, media e mediana

La **moda** (o valore modale) è dato dalla classe che presenta la frequenza relativa maggiore. Rappresenta il picco della distribuzione. Come detto in precedenza, si possono riscontrare distribuzioni unimodali, bimodali o plurimodali, ma per poterle effettivamente definire in questo modo bisogna effettuare dei test di verifica

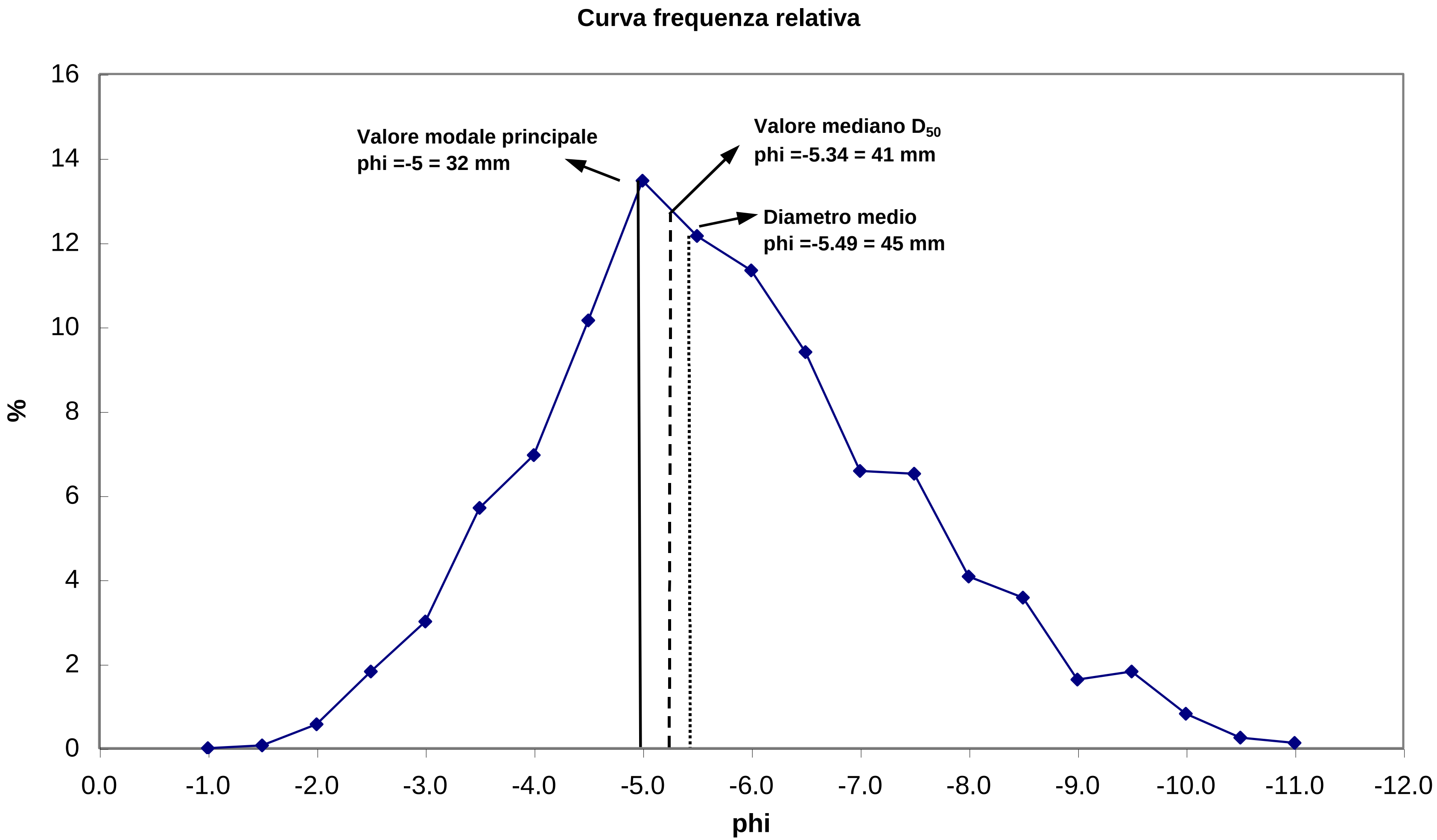
Il **diametro medio** è il baricentro della curva di frequenza relativa, e quindi può venir calcolato come una media ponderata; in termini dell'indice *phi* si ha quindi (con f_i freq. rel. e ϕ_{ci} valore centrale della classe i-esima):

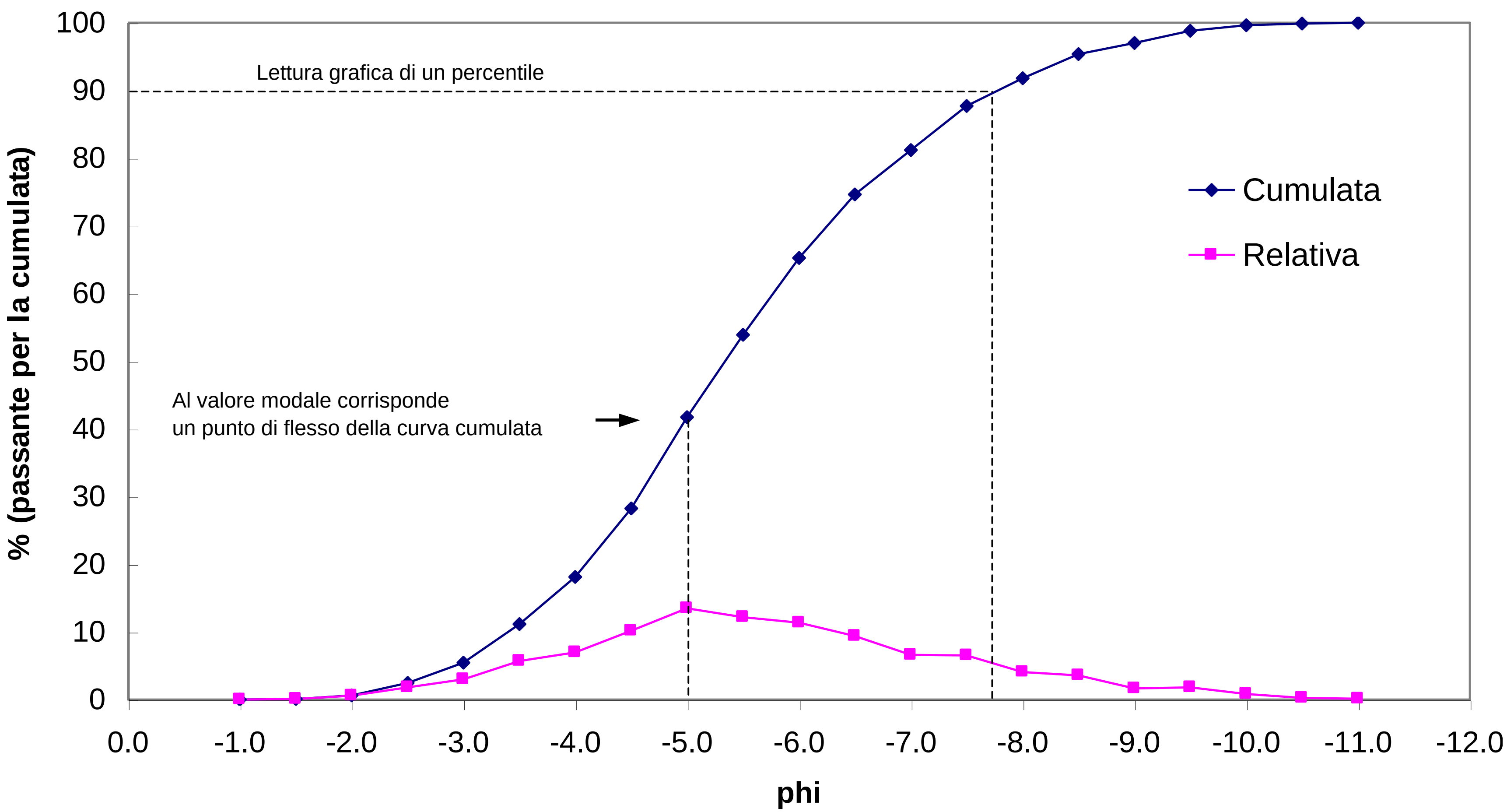
$$\boxed{\phi_m = \frac{\sum f_i \cdot \phi_{ci}}{100}}$$

Da cui poi il diametro in millimetri: $\boxed{D_m = 2^{-\phi_m}}$

La **mediana** è invece il centro della distribuzione cumulata, ed è data dal diametro che la divide in due parti arealmente equivalenti, ovvero il diametro percentile relativo al 50%, il cosidetto $\mathbf{D_{50}}$. **E' il parametro più usato.**

Moda, media e mediana di una distribuzione sono uguali soltanto nel caso di perfetta simmetria (curva normale). Nei corsi d'acqua montani, il diametro medio tende ad essere maggiore del D_{50}, data la generale asimmetria (coda) verso la granulometria grossolana



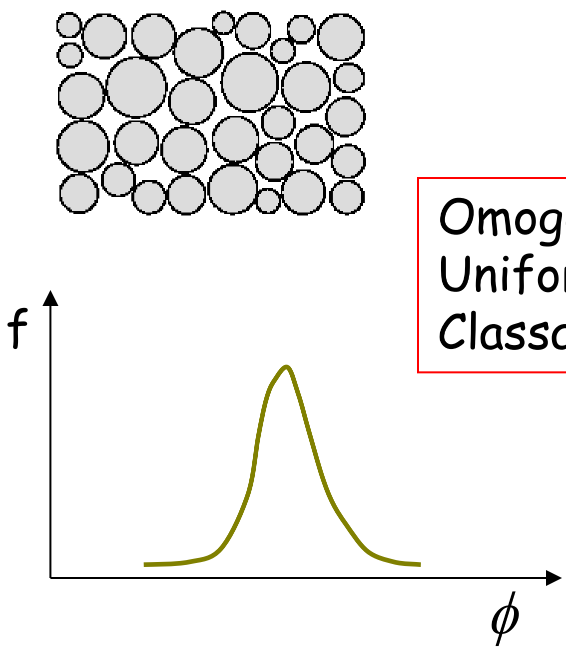


Lettura grafica di un percentile
Al valore modale corrisponde
un punto di flesso della curva cumulata
Cumulata
Relativa
% (passante per la cumulata)
phi
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0.0
-1.0
-2.0
-3.0
-4.0
-5.0
-6.0
-7.0
-8.0
-9.0
-10.0
-11.0
-12.0

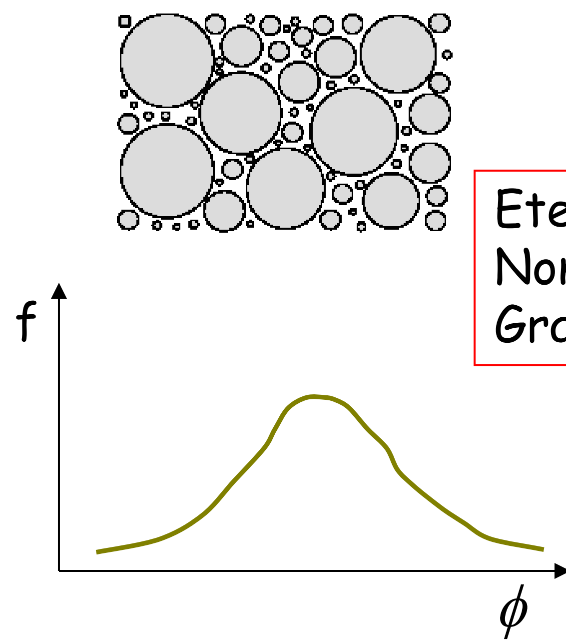
Ampiezza della curva (uniformità-eterogeneità)

Quanto più una miscela si presenta formata da particelle di dimensioni diverse, tanto più essa può essere descritta come avente le seguenti caratteristiche:

- > eterogeneità
- < grado di uniformità
- > livello di gradazione
- < grado di classazione

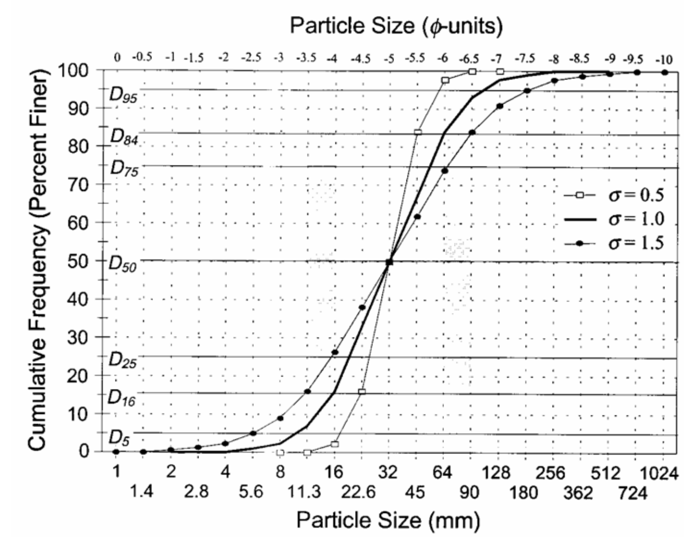


Omogenea
Uniforme
Classata



Eterogenea
Non uniforme
Gradata

Deviazione standard: $$\sigma = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}}$$



Coeff. di uniformità: $$U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

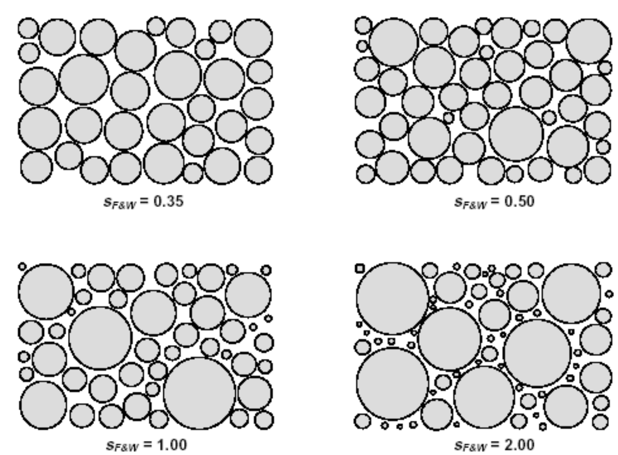
Indice di gradazione
(uguale alla deviazione standard per curve simmetriche)

$$G = \frac{\frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}}}{2}$$

Coeff. di classazione (Folk and Ward, 1957):
Più preciso perché "sensibile" alle code della distribuzione (D_5, D_{95})

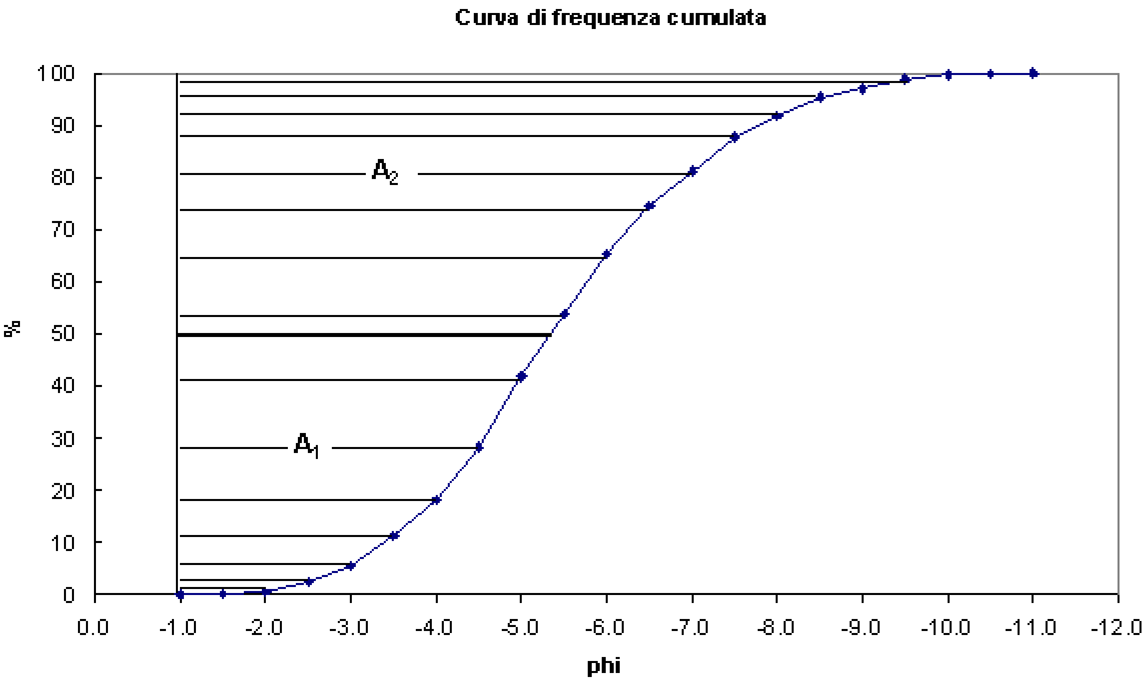
$$s = \left|\frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4}\right| + \left|\frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}\right|$$

Coefficiente di classazione *s* (Folk and Ward, 1957)	**Grado di classazione**
>4	estremamente basso
2-4	molto basso
1-2	basso
0.71-1	moderato
0.50-0.71	moderatamente elevato
0.35-0.50	elevato
<0.35	molto elevato



Modulo di uniformità di Kramer: $\boxed{M = A_1 / A_2}$

Questo parametro è il rapporto fra le 2 aree (inferiore e superiore) individuate dal D_{50}; valutando integralmente la curva della distribuzione di frequenza cumulata è quello più preciso perché virtualmente "sensibile" a tutti i percentili



Simmetria della curva (*skewness*)

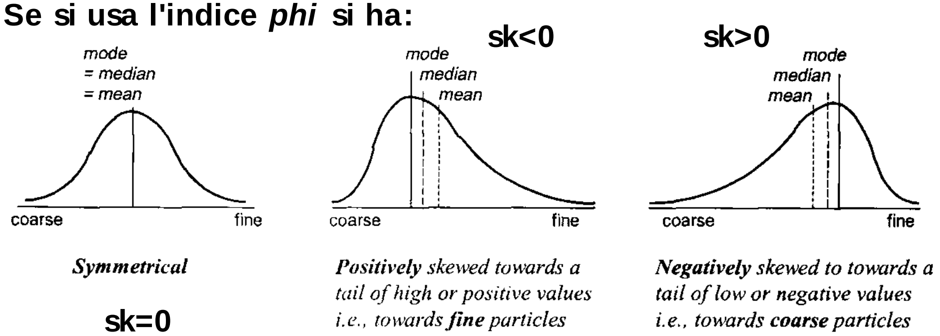
Come si è detto, le curve dei sedimenti fluviali tendono ad essere log-normali, cioè presentano una forte asimmetria con la coda verso la parte grossolana. Dopo la trasformazione logaritmica operata tramite il passaggio all'indice *phi*, è del resto comune che le curve presentino ancora un certo grado di asimmetria.

Coefficiente di asimmetria (Folk and Ward, 1957):

$$sk = \frac{\phi_{84} - \phi_{50}}{\phi_{84} - \phi_{16}} - \frac{\phi_{50} - \phi_{5}}{\phi_{95} - \phi_{5}}$$

Coefficiente di asimmetria (Folk and Ward, 1957)	**Descrizione**
-0.3 a -1	Molto asimmetrica verso il fine
-0.1 a -0.3	Asimmetrica verso il fine
-0.1 a 0.1	Quasi simmetrica
0.1 a 0.3	Asimmetrica verso il grossolano
0.3 a 1	Molto asimmetrica verso il grossolano

Se si usa l'indice *phi* si ha:



Come si determina la relazione diametro-frequenza ?

<u>Metodo ponderale</u>

Setacciatura

Per ogni vaglio, si *pesa* il sedimento da esso trattenuto

*Per campioni **volumetrici**, adatti per granulometrie dalla ghiaia grossa alla sabbia finissima*

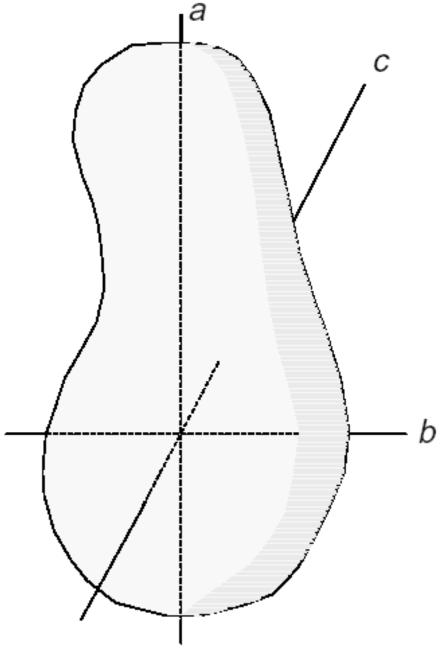
<u>Metodo numerale</u>

Conteggio

Si *contano* il numero di particelle appartenenti ad una certa classe diametrica

*Per campioni **superficiali**, necessari quando la granulometria è grossolana (corsi d'acqua montani)*

Che diametro ha una particella ?



Si individuano 3 diametri relativi ad altrettanti assi (*a, b, c*) perpendicolari tra loro; questi sono rispettivamente l'asse maggiore, l'intermedio ed il minore. In realtà questo vale soltanto per ellissoidi perfetti.

In un setaccio, è l'asse intermedio che determina se una particella passa o meno attraverso i fori

Di conseguenza, quando si misurano manualmente i diametri, per analogia si utilizza tale diametro della asse *b*. Se interessa anche la forma dei clasti (in alcuni casi rilevante per il trasporto solido), allora si dovranno misurare tutti e tre gli assi.

$$\frac{c}{\sqrt{a \cdot b}}$$

Coeff. di forma (Corey)

Per la misura manuale del diametro, comunemente si individua l'asse maggiore *a* per primo, e successivamente si trova l'asse *b* intermedio tramite perpendicolarità. Gli elementi romboidali presentano gli errori maggiori di determinazione

Si definisce poi "diametro nominale" D_n, quello relativo alla sfera di ugual volume: $D_n = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}$

Strumenti di misura

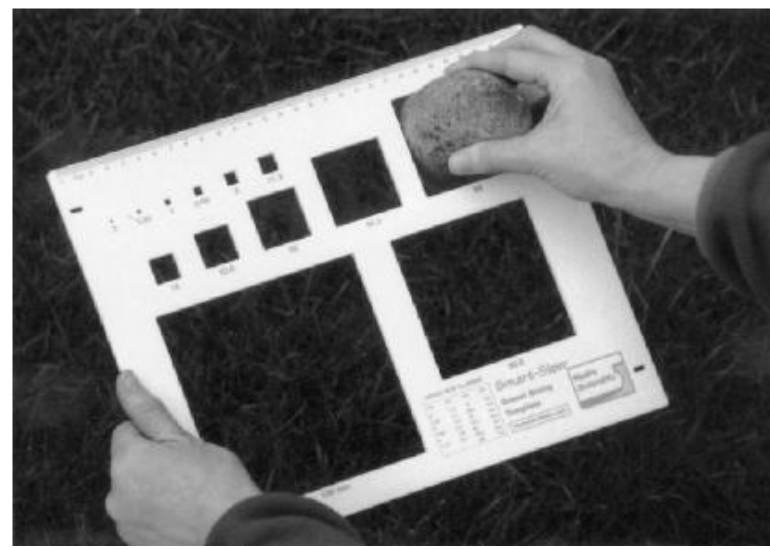
Per il metodo ponderale:

Setacci con fori di grandezza standard, equivalenti ad intervalli di 0.25 *phi*, fino a 0.053 mm (sabbia finissima). Usualmente hanno maglie quadrate, ma esistono anche circolari.

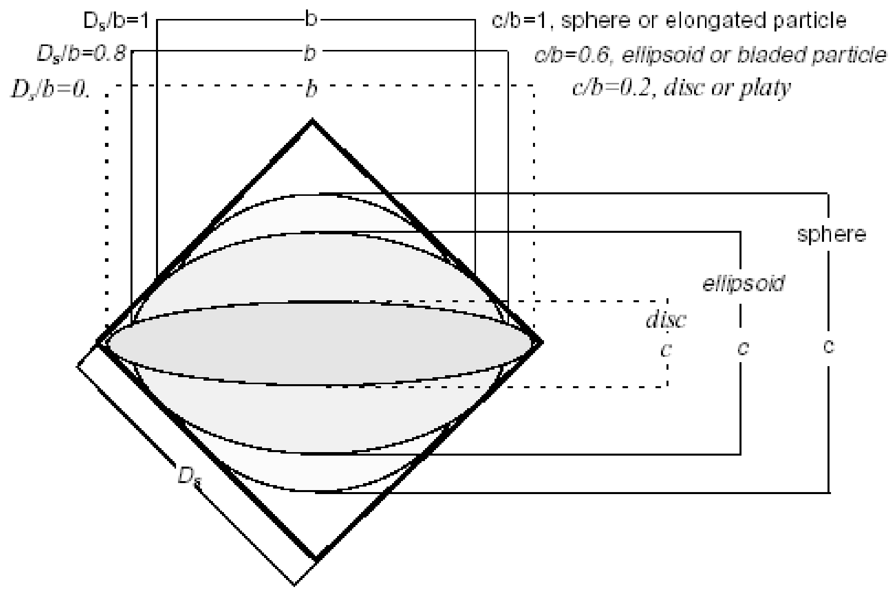
Per il metodo numerale:

- Calibri

- Piastre forate con fori ad intervalli di 0.5 o 0.25 *phi* (da 2 mm a 180 mm)



E’ importante sapere che si ottengono distribuzioni granulometriche diverse a seconda dello strumento che si utilizza, visto che le particelle non sono mai perfettamente sferiche. Tali differenze crescono al crescere dell’appiattimento dei clasti

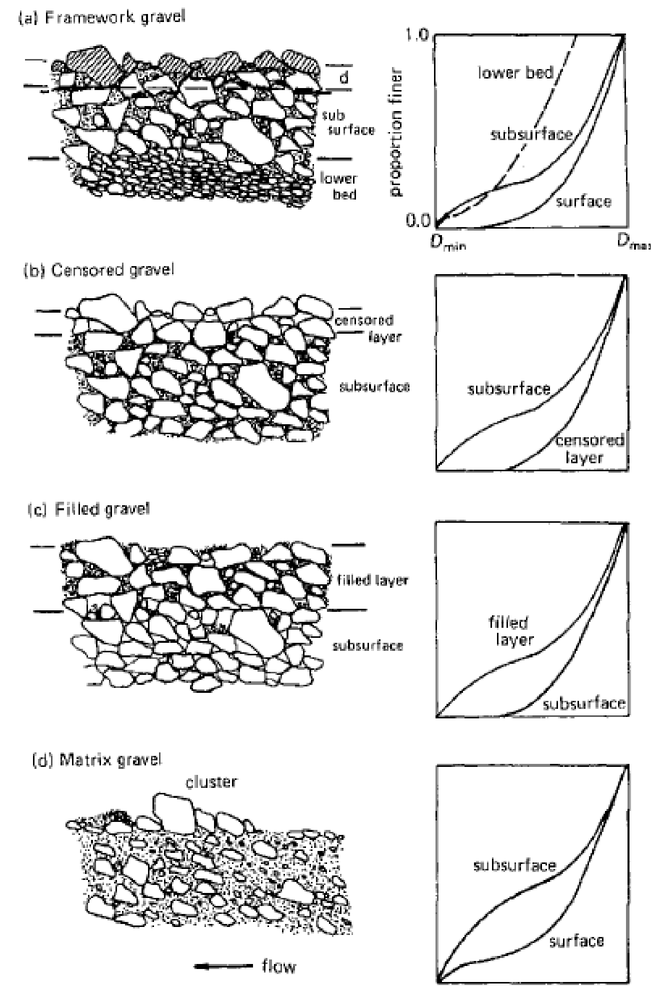


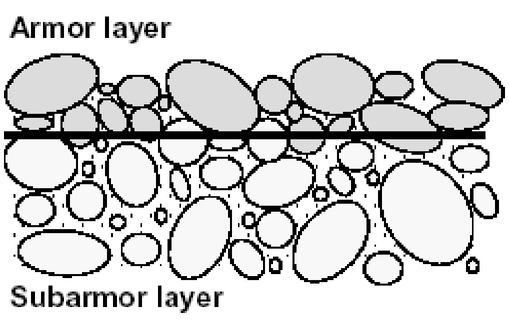
Il calibro da risultati analoghi alle maglie rotonde, mentre le piastre forate permettono un confronto diretto con i setacci a maglie quadrate (i più diffusi). Esistono comunque dei fattori di conversione per confrontare ottenute diversamente.

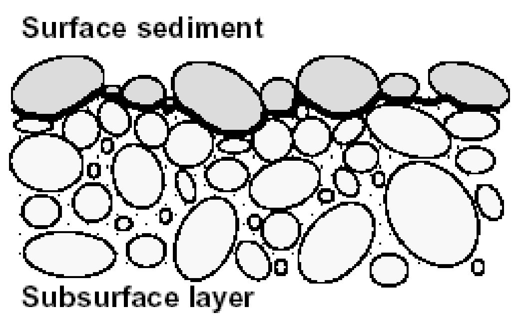
Metodo ponderale

Si applica per campionamenti di **tipo volumetrico**, prelevabili a profondità diverse e includenti quindi differenti strati del corpo sedimentario da analizzare. Dipende dallo scopo del progetto quale strato analizzare.

In corsi d'acqua sabbiosi la distinzione tra strato superficiale, corazzato e sottostrati perde di significato, mentre al contrario è fondamentale nei fiumi *gravel-bed* e nei torrenti montani. In questi casi, il campionamento volumetrico riguarda di solito i sottostrati a granulometria più fine, mentre lo strato grossolano di superficie si analizza tramite un campionamento superficiale (metodo numerale).







Dimensioni e massa del campione da prelevare

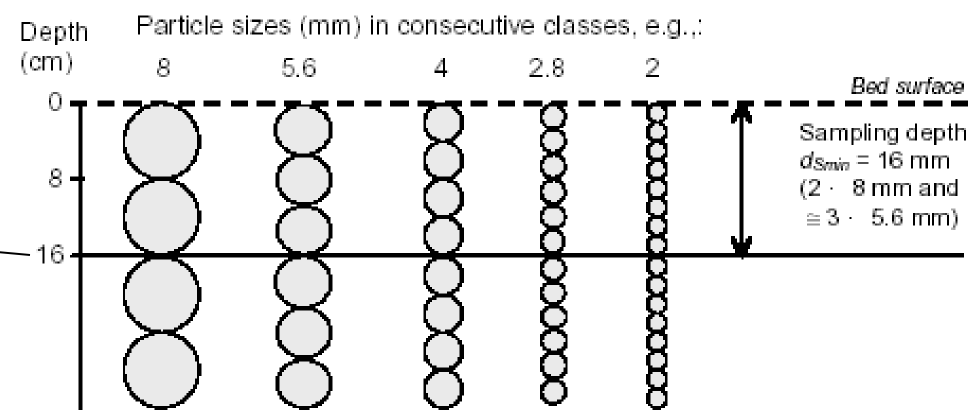
Regola base è che tanto maggiore è la granulometria, tanto maggiore è il volume necessario per ottenere una rappresentanza statistica di tutte le classi diametriche.

Una volta rimosso lo strato superficiale o corazzato, rimane da determinare fino a quale profondità eseguire il prelievo, visto che il sottostrato non presenta confini inferiori. Diplas & Fripp (1992) suggeriscono una profondità minima

$\mathbf{z_{min} = 2\ D_{max}}$ (con D_{max} pari al diametro massimo dei sedimenti, in mm)

Questo dovrebbe assicurare che i clasti con $D=D_{max}$ siano compresi in un tale campione.

Profondità di prelievo minima per D=8 mm

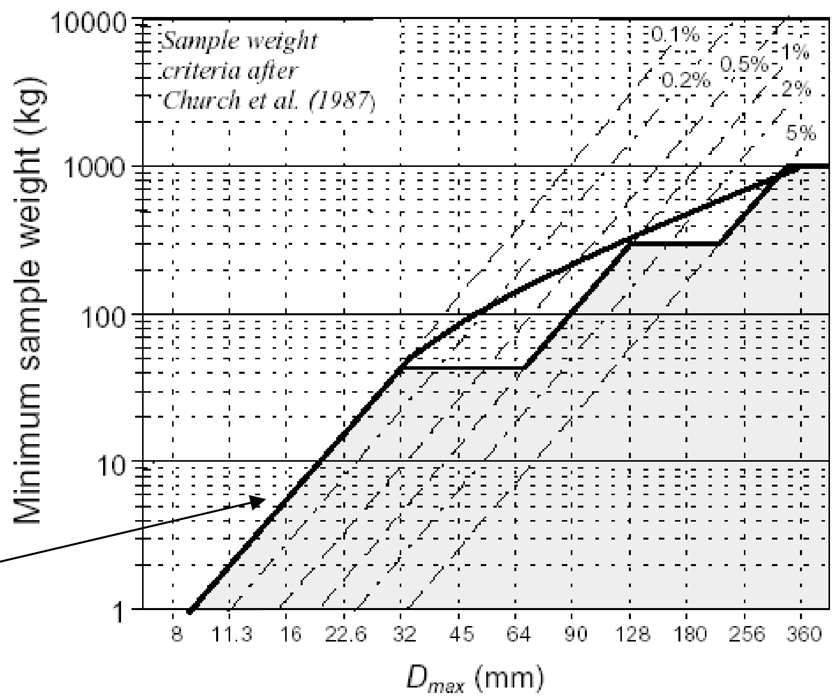


Per quanto riguarda la massa M (in kg) da prelevare, anch'essa è funzione del D_{max}, con una legge di potenza al cubo, $M \propto D_{max}^3$. Tale relazione deriva dall'imporre che la classe del D_{max} occupi solo una frazione molto bassa (0.1 – 1%) del volume complessivo del campione

Data una tale dipendenza fortemente non lineare, si capisce come la quantità da prelevare diventi enorme e logisticamente difficile da attuare per corsi d'acqua con granulometria maggiori della ghiaia grossa (>32 mm).

Di conseguenza, Church et al (1987) hanno proposto una relazione che prevede errori maggiori per granulometrie crescenti, in modo da rendere più agevole un campionamento volumetrico in corsi d'acqua montani.

L'equazione lineare da loro proposta è la seguente:
$\mathbf{M = 2.87\, D_{max} - 44.8}$



Metodo numerale (campionamento superficiale)

parziali

totale

Pebble counts
(in linea)

manuale

Grid counts
(a reticolo)

Manuale
o
fotografico

Non adatti per caratterizzare la componente sabbiosa (< 2 mm)

Areal samples

Manuale
o
fotografico

Non adatto per alvei grossolani (presenza di ciottoli e massi)

Selezione dei clasti da misurare in campo nel campionamento in linea ed a reticolo

Si stabilisce innanzitutto:

- **quanti elementi sono da misurare**
- **a che interdistanza campionare**

Successivamente:

Selezione **casuale** camminando lungo linee immaginarie (Wolman 1954)

Selezione **sistematica** lungo linee ad intervalli regolari

Preferibile per i minori errori dell'operatore

Distanza di campionamento

Nel metodo casuale:

Deriva da quanti clasti voglio campionare;
di solito 1-2 passi, senza tener conto della granulometria

Nel metodo sistematico:
1-2 D_{max}

In modo da evitare il doppio conteggio degli elementi grossolani, fonte di ulteriore errore

Errori

Statistico | Operatore | Spaziale

- Statistico: deriva dall'estrarre un campione da una popolazione. Viene ridotto aumentando la numerosità campionaria.

- Operatore: deriva dalla "predilezione" di misurare clasti di dimensioni intermedie. Viene ridotto adottando alcune metodologie di campo. Cresce con il numero di operatori ed in misura relativa con la numerosità campionaria

- Spaziale: deriva dalla eterogeneità spaziale del sedimento in un tratto, che può rendere non rappresentativo del tratto un campione. Può essere evitato adottando schemi di campionamento segregati

Errore statistico
Numerosità del campione

Assumendo una distribuzione **normale** si ha:

$$n = \left(\frac{t \cdot \sigma}{e} \right)^2$$

n = numerosità campionaria

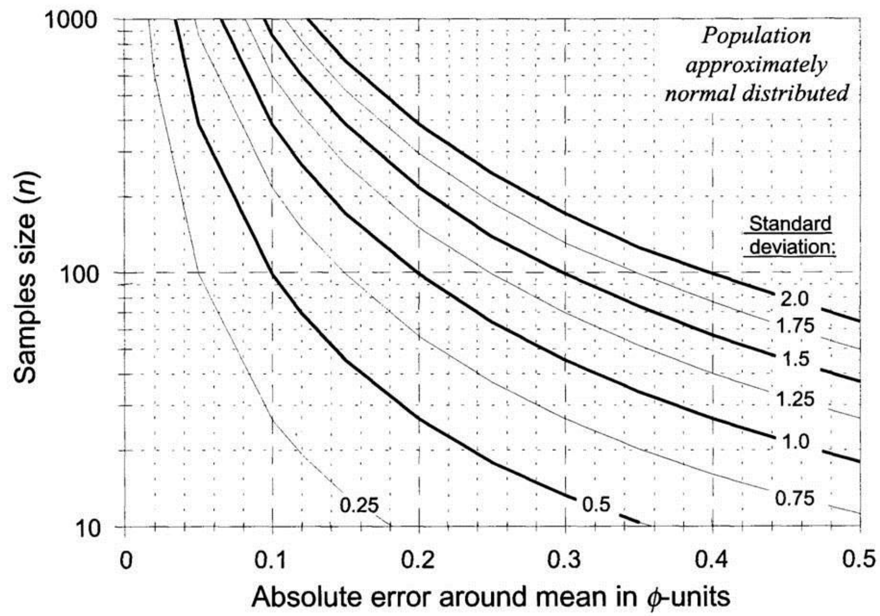
t = valore *t* di student associato ad un certo livello di confidenza (tipicamente α=0.05). Non dipende dalla numerosità se *n*>200.

σ = deviazione standard della popolazione (da s la deviazione standard campionaria s_1, e.g. tramite un precampionamento)

$$s_1 = \frac{\left| \phi_{84} - \phi_{16} \right|}{2}$$

e = errore assoluto accettato sulla media (in unità ϕ). Di solito $\pm 0.2\ \phi_m$.

Curve numerosità campionaria-errore assoluto
per diversi gradi di non-uniformità granulometrica
per valori di confidenza α=0.05



Dato un certo errore accettabile:
Se con s_1 = 0.5 (alveo a canali intrecciati di pianura) risulta n = 25
$\longrightarrow$ con s_1 = 2.5 (torrente a forte pendenza) $\longrightarrow$ **n = 400**

Lo stesso avviene considerando una variazione dell'errore a parità di s_1