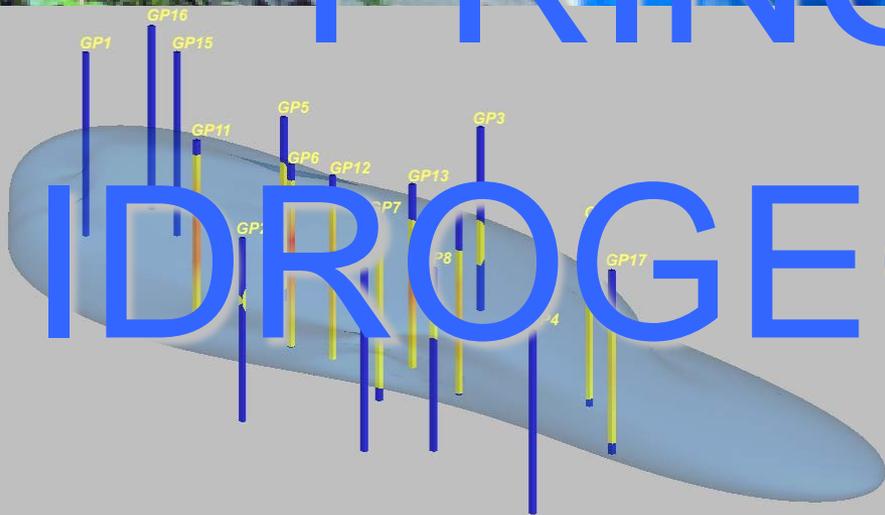


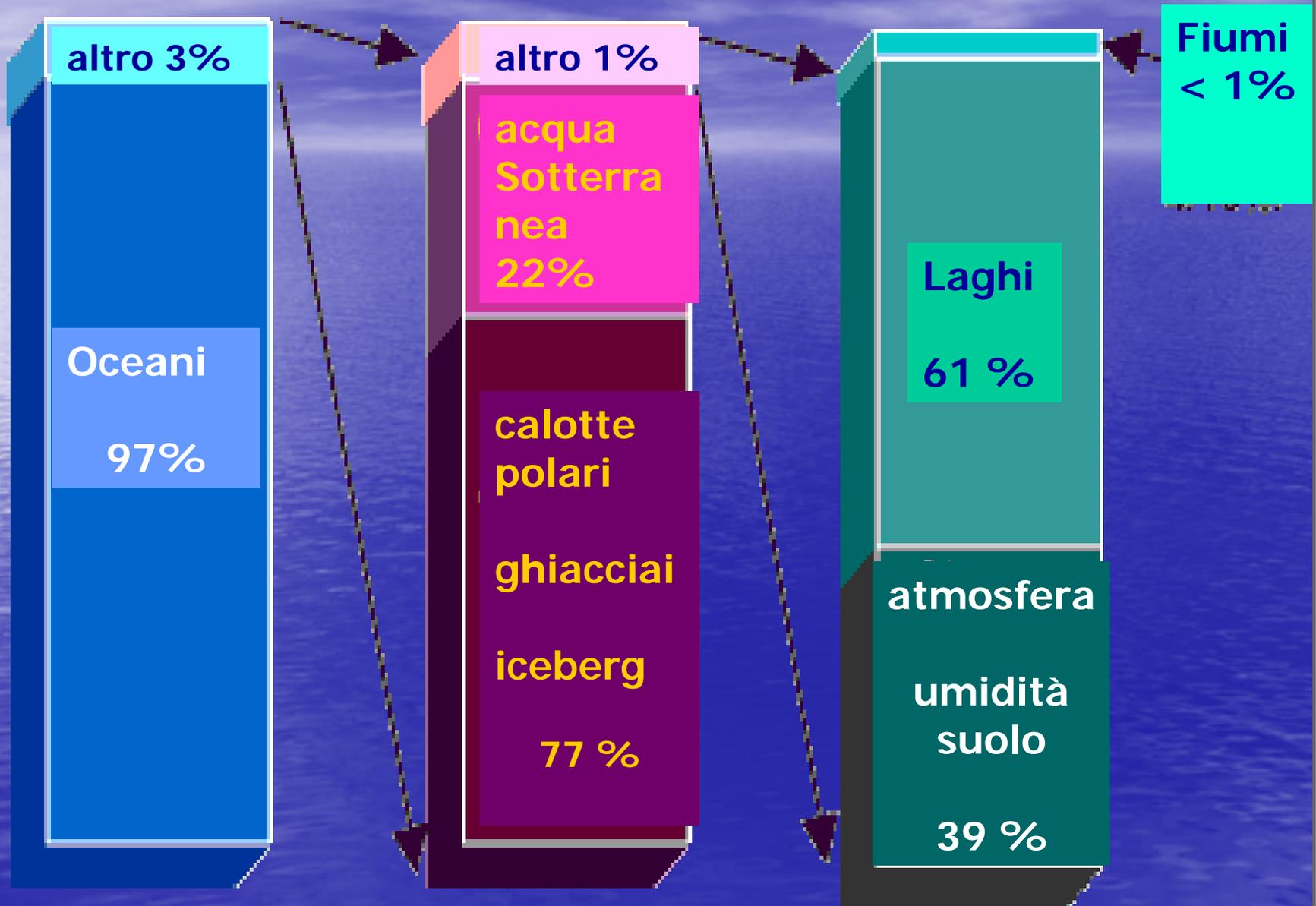
PRINCIPI DI



IDROGEOLOGIA



Importanza acqua sotterranea



Inventario delle forme di acqua sulla crosta terrestre

Magazzino	Volume (x 10⁶ km³)	% rispetto al totale
Oceani e mari	1370	97.25
Calotte artiche e ghiacciai	29	2.05
Acqua di falda profonda (750-4000 m)	5.3	0.38
<i>Acqua di falda superficiale (< 750 m)</i>	4.2	0.30
Laghi	0.125	0.01
Umidità nel terreno (insaturo)	0.065	0.005
Atmosfera (vapore acqueo)	0.013	0.001
Fiumi	0.0017	0.0001
Biosfera	0.0006	0.00004
Totale	1408.7	100

Dell'acqua presente nel ciclo globale, l'acqua salata rappresenta il 97%.

3/4 dell'acqua presente sulle terre è intrappolata nelle calotte polari e nei ghiacciai.

L'importanza delle acqua sotterranee risulta evidente quando si considera che, del restante 1/4, il 98% è immagazzinato sotto terra.

Tempo di residenza

Considerando il volume (costante) di acqua presente in un dato serbatoio naturale e dividendolo per il tasso di ricarica (o perdita) di acqua verso (da) esso, consente di calcolare il tempo di residenza medio.

Per gli oceani, il volume di acqua presente ($1370 \cdot 10^6 \text{ km}^3$) diviso la portata dei fiumi che vi sfociano ($0.037 \cdot 10^6 \text{ km}^3 \text{a}^{-1}$) fornisce un tempo medio di 37000 anni che una molecola d'acqua trascorre mediamente negli oceani.

A causa della varietà nei volumi e nei tassi di precipitazione, evaporazione, ecc... un tempo medio di residenza rappresentativo di laghi, fiumi, ghiacciai e acquiferi superficiali non è mediamente stimabile. A titolo indicativo, il tempo di residenza varia tra 2 settimane e 10000 anni per i serbatoi di acque sotterranee (acquiferi) mentre è mediamente di circa 20 giorni per i fiumi.

Tra l'altro, queste stime servono a mettere in evidenza la potenziale longevità degli inquinanti all'interno degli acquiferi rispetto al più rapido ricambio delle acque superficiali.

Come agente di trasporto solido agli oceani di prodotti di alterazione e disfacimento delle terre emerse, le acque sotterranee rappresentano solamente una piccola porzione del trasporto totale. Il materiale trasportato consiste essenzialmente di minerali dissolti che possono aumentare la loro concentrazione in ragione del lungo tempo di residenza.

Consumi idrici

Consumo d'acqua di un essere umano cacciatore-raccoglitore: 3 Litri

Consumo d'acqua per uso del w.c.: 15 Litri

Consumo d'acqua di un cittadino di Bologna: 250 Litri /giorno

Consumo d'acqua di un cittadino di New York: 1000 Litri /giorno

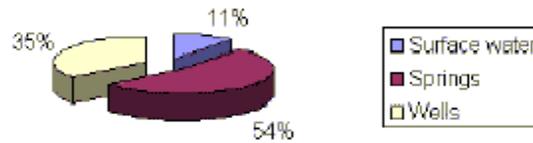


Source of drinking water in Northern Italy



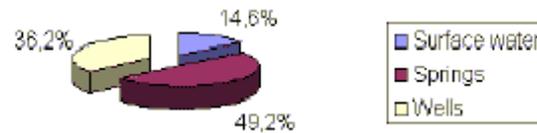
Source: Ministry of Environment

Source of drinking water in Central Italy

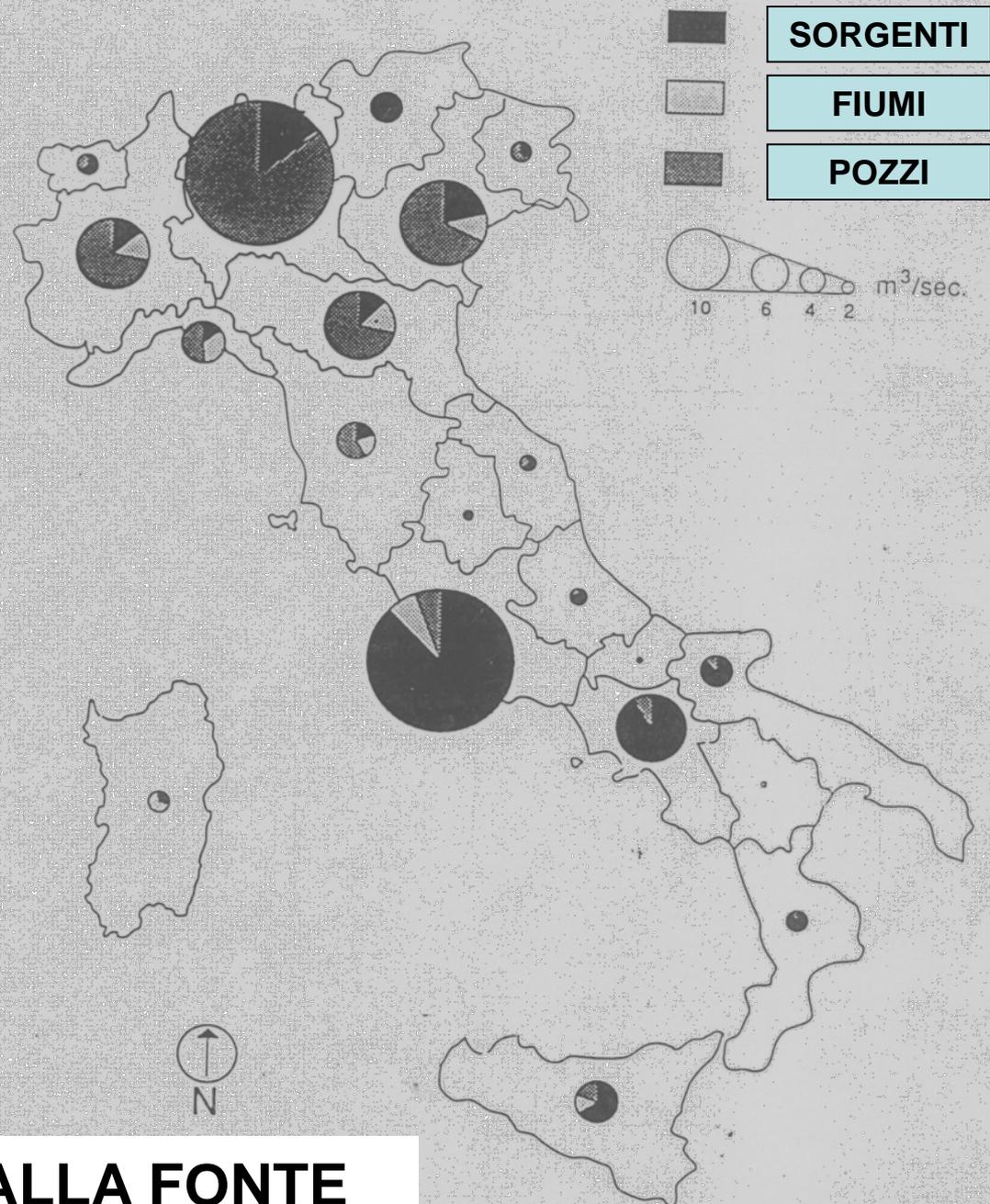


Source: Ministry of Environment

Source of drinking water in Southern Italy



Source: Ministry of Environment



**CONSUMO DI ACQUA
AD USO IDROPOTABILE
IN ITALIA IN RELAZIONE ALLA FONTE**

ACQUA SOTTERRANEA

VANTAGGI USO ACQUA SOTTERRANEA

- 1) FILTRATA NATURALMENTE
- 2) PROTETTA DA INQUINAMENTO
- 3) PRESENTE ANCHE SE MANCA IN SUPERFICIE
- 4) GRANDE QUANTITÀ

SVANTAGGI USO ACQUA SOTTERRANEA

- 1) NON PRESENTE DAPPERTUTTO
- 2) SOVENTE MOLTO MINERALIZZATA
- 3) SE INQUINATA DIFFICILE RIPULIRLA
- 4) EFFETTI DEL SOVRASFRUTTAMENTO

Cosa è l'Idrogeologia?

“L'idrogeologia è lo studio delle leggi che governano il moto (flusso) dell'acqua sotterranea, delle interazioni meccaniche, chimiche e termiche di questa acqua con il mezzo poroso e delle leggi che governano il trasporto di energia, composti chimici e particolato”

Domenico & Schwartz, 1990



Porosità

- La porosità è una semplice proprietà legata alla frazione di vuoti presenti nella roccia.
- Questa proprietà **NON** È legata alla facilità con cui l'acqua si muove nella roccia o può essere estratta dalla roccia.



Tipi di porosità

- Primaria –pori fra grani. fessure da raffreddamento
- Secondaria -fratture, vuoti da dissoluzione (es., carsismo).
- Porosità efficace: volume totale di pori interconnessi sul volume totale del mezzo poroso (pori efficaci o conduttivi).

Porosità

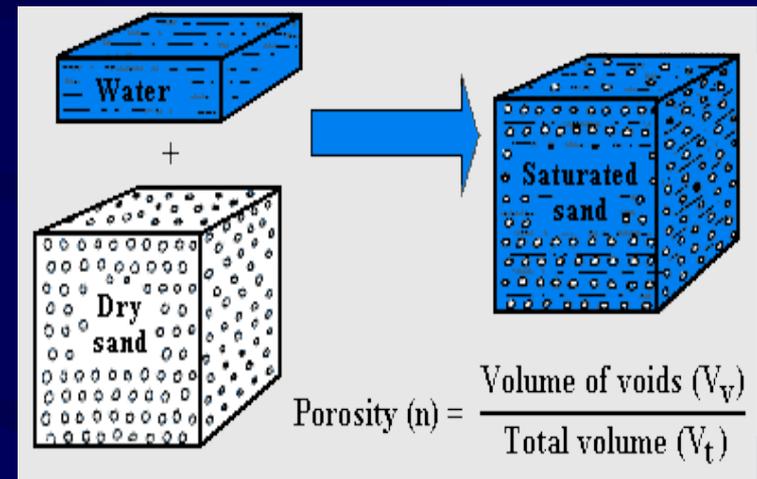
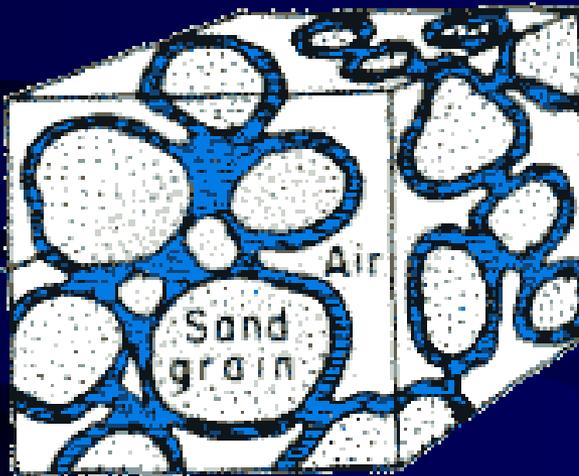
$$n = \frac{V_v}{V_T} = \frac{V_w}{V_w + V_s} \quad \text{satura}$$
$$= \frac{V_w + V_g}{V_w + V_g + V_s} \quad \text{non satura}$$

IN UN MEZZO SATURO

$S = \text{grado di saturazione} = 1 \text{ (100\%)}$

$n = \text{porosità} = \text{contenuto volumetrico d'acqua } \theta$

Acqua



$$n = V_v / V_{\text{tot}}$$

$$S = V_w / V_v$$

$$\theta = V_w / V_{\text{tot}}$$

La porosità non va confusa con l'indice dei vuoti (e).

$$n = \frac{e}{1+e}$$

$$e = \frac{n}{1-n}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

In idrologia ed idrogeologia, la quantità d'acqua presente in un mezzo poroso viene generalmente espressa in termini di contenuto volumetrico d'acqua (θ) che è un rapporto tra volumi (V), al contrario del contenuto d'acqua (w) che è un rapporto tra pesi (W) e viene più comunemente utilizzato in geotecnica.

$$\theta = \frac{V_w}{V_{tot}}$$

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

$$e = w \cdot G_s$$

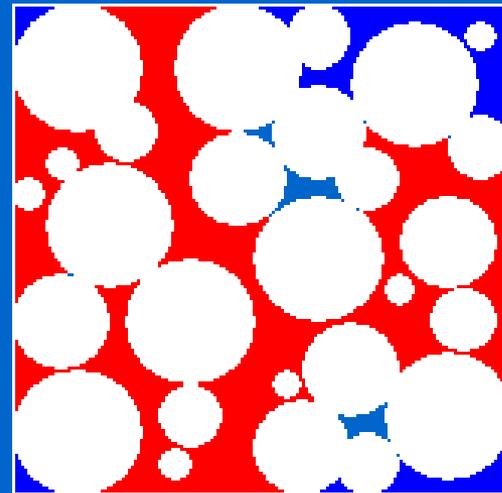
$$n = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}$$

dove G_s = peso specifico dei granuli

ρ_b = densità dello scheletro; ρ_s = densità dei granuli solidi [$M L^{-3}$]

Porosità efficace n_e

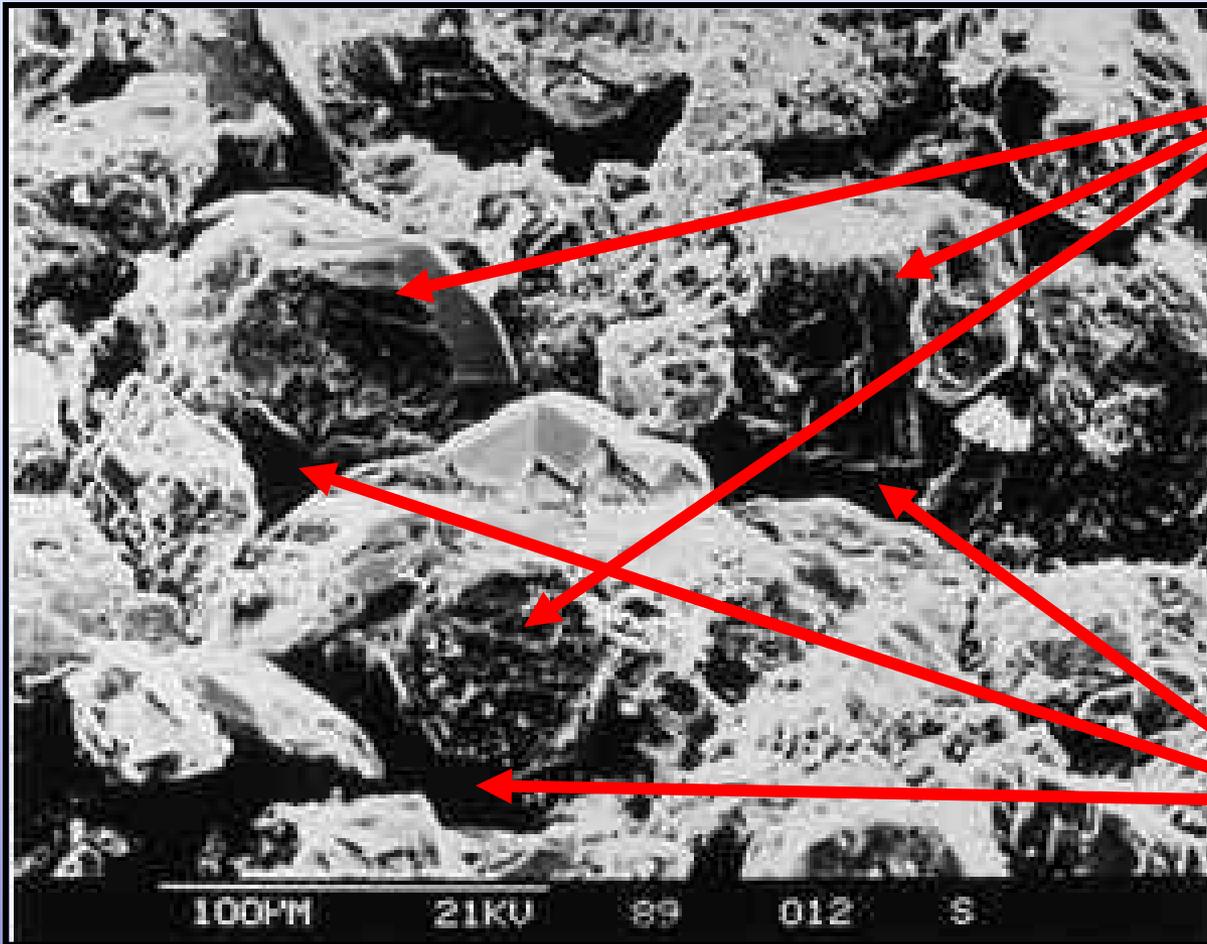
- Volume totale di pori interconnessi sul volume totale del mezzo poroso
- Include:
 - Pori efficaci o conduttivi (macropori o fessure)



Genesi geologica dei pori efficaci

SCALA	TIPI DI VUOTI		TIPI DI MEZZO	
Microscopica > 0,1 mm	Pori	<i>Intercristallici</i> Intergranulari (interstizi)	Poroso	Continuo
	Microfessure	Diaclasi Giunti di strato Scistosità	Fessurato	
Macroscopica > 1 mm	Macrofessure	Macrofessure		Discontinuo
		Canali Cavit� carsiche		

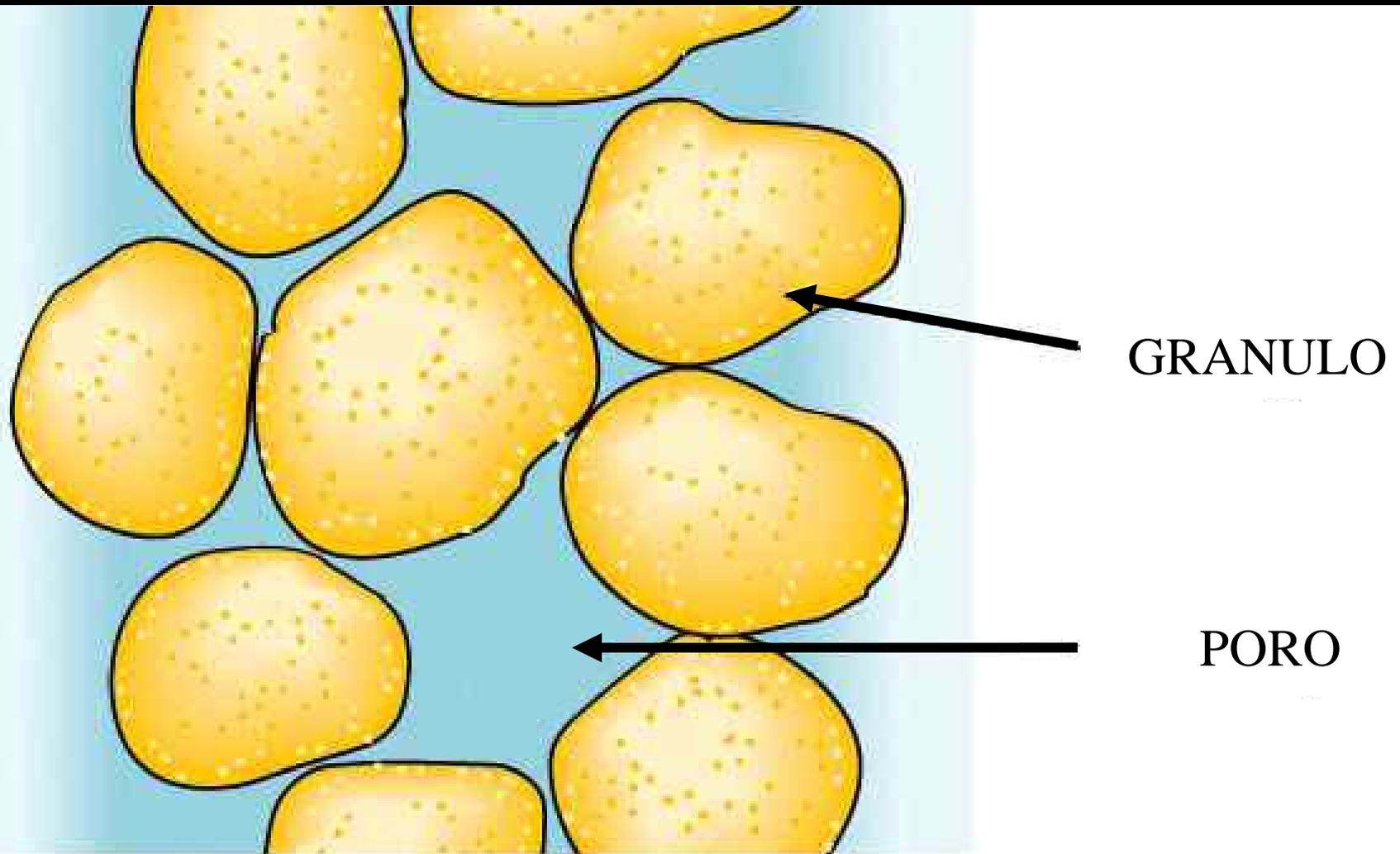
Porosità per interstizi



Granuli di
sabbia

Porosità
primaria
per interstizi

Porosità per interstizi



SABBIA

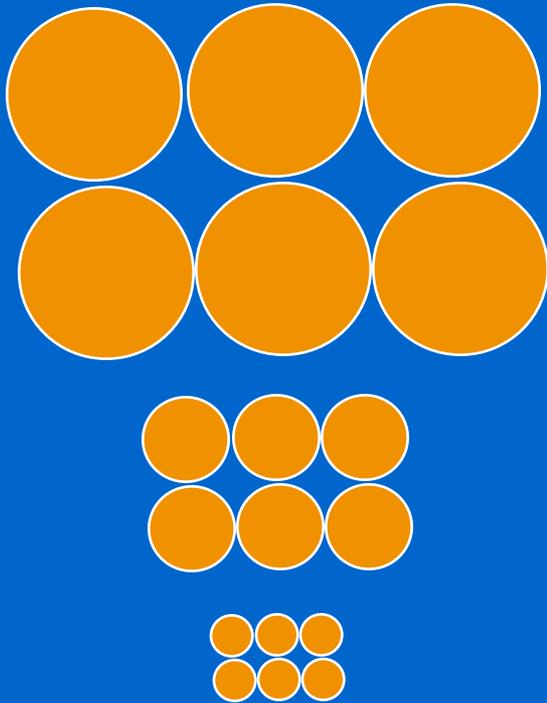
GRANULO

PORO

Porosità per interstizi: i fattori

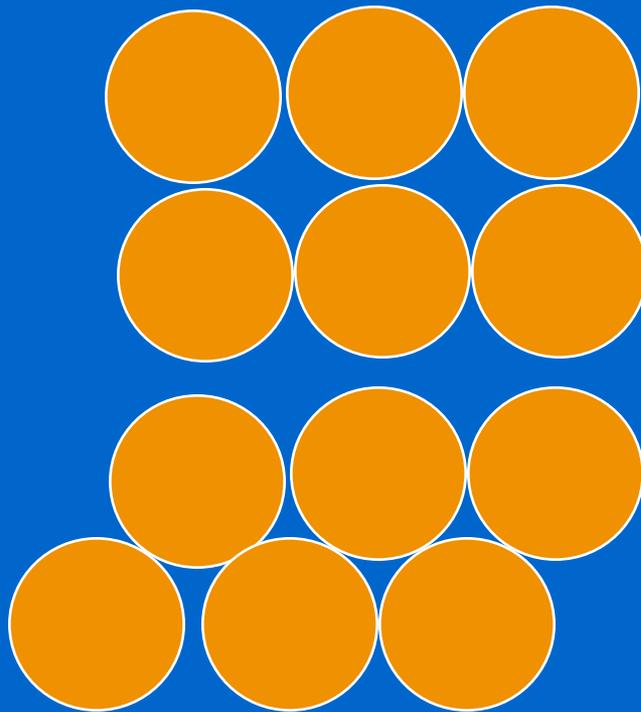
- Distribuzione delle dimensioni
- Forma, sfericità/arrotondamento.
- Cementazione.
- Impaccamento

Effetto delle dimensioni



Dove si ha la massima porosità?

Porosità di sfere

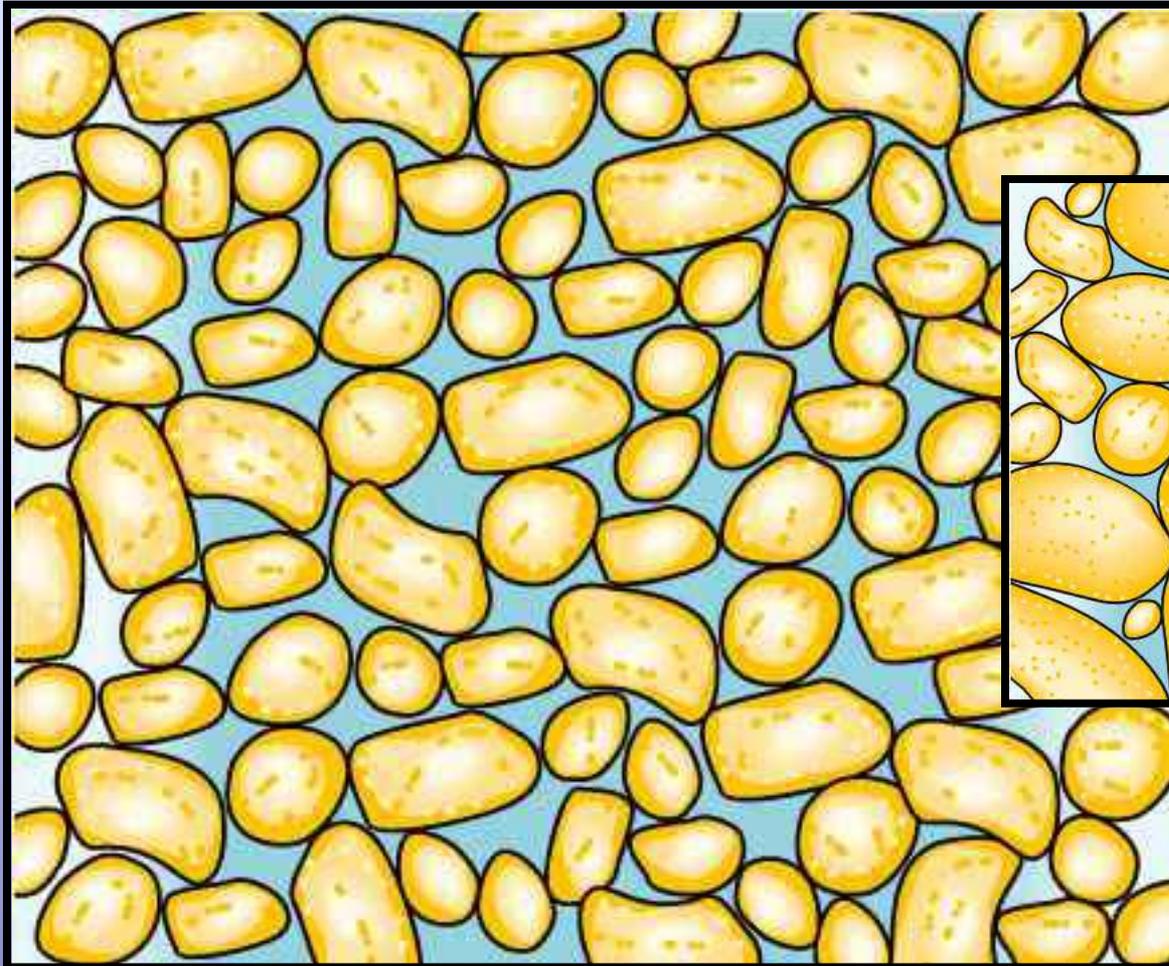


Cubico
 $n = 0.48$

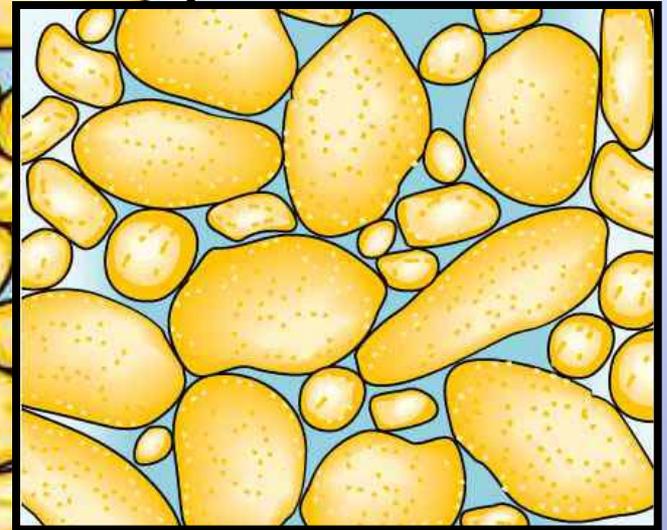
Romboedrico
 $n = 0.26$

Effetto della cernita

Sabbia monogranulare (ben cernita)

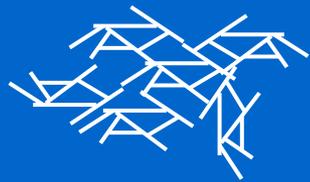


Sabbia eterogenea

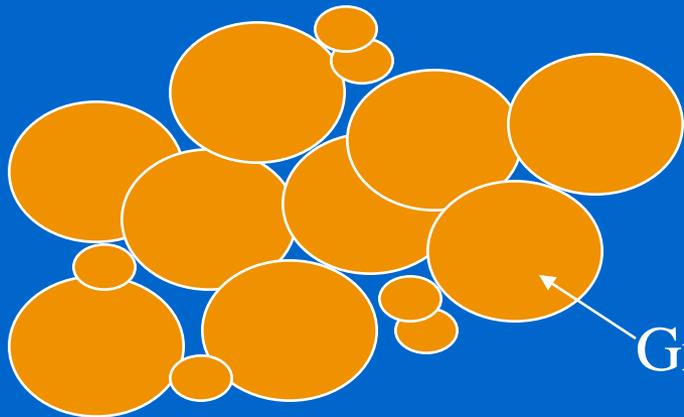


Quale ha la porosità maggiore?

Effetto della forma dei grani



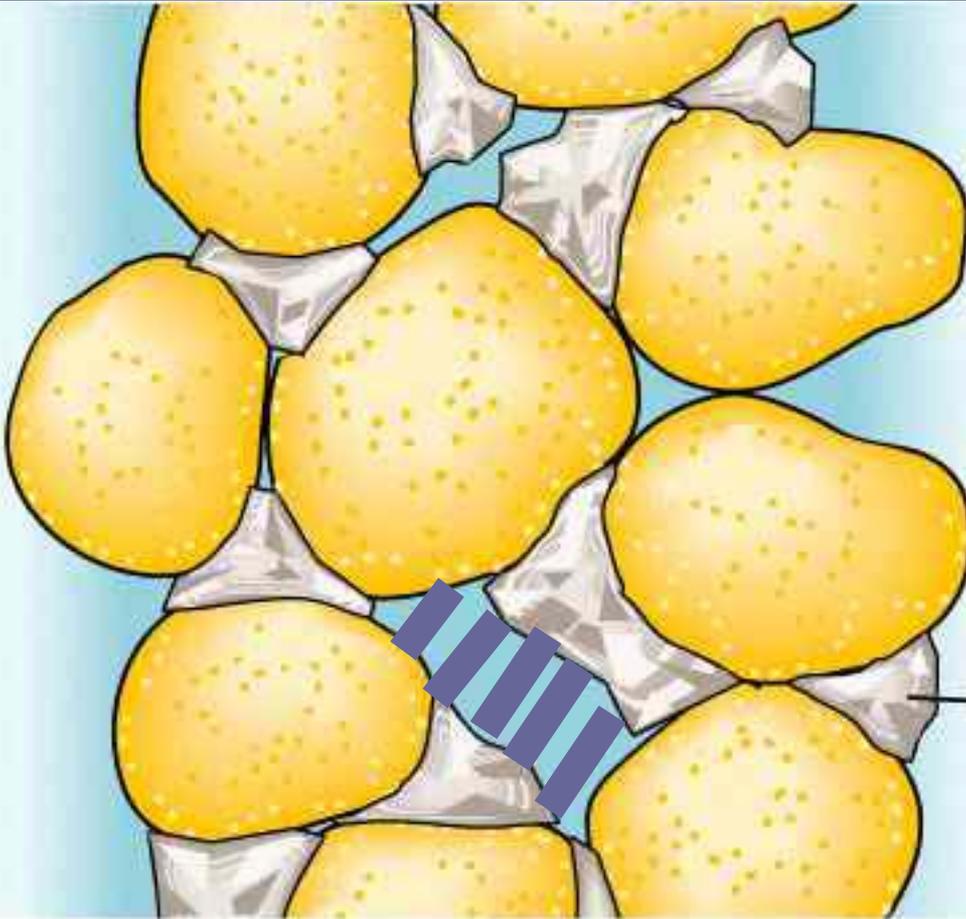
Argille



Sabbie

Grano di sabbia

Cementazione

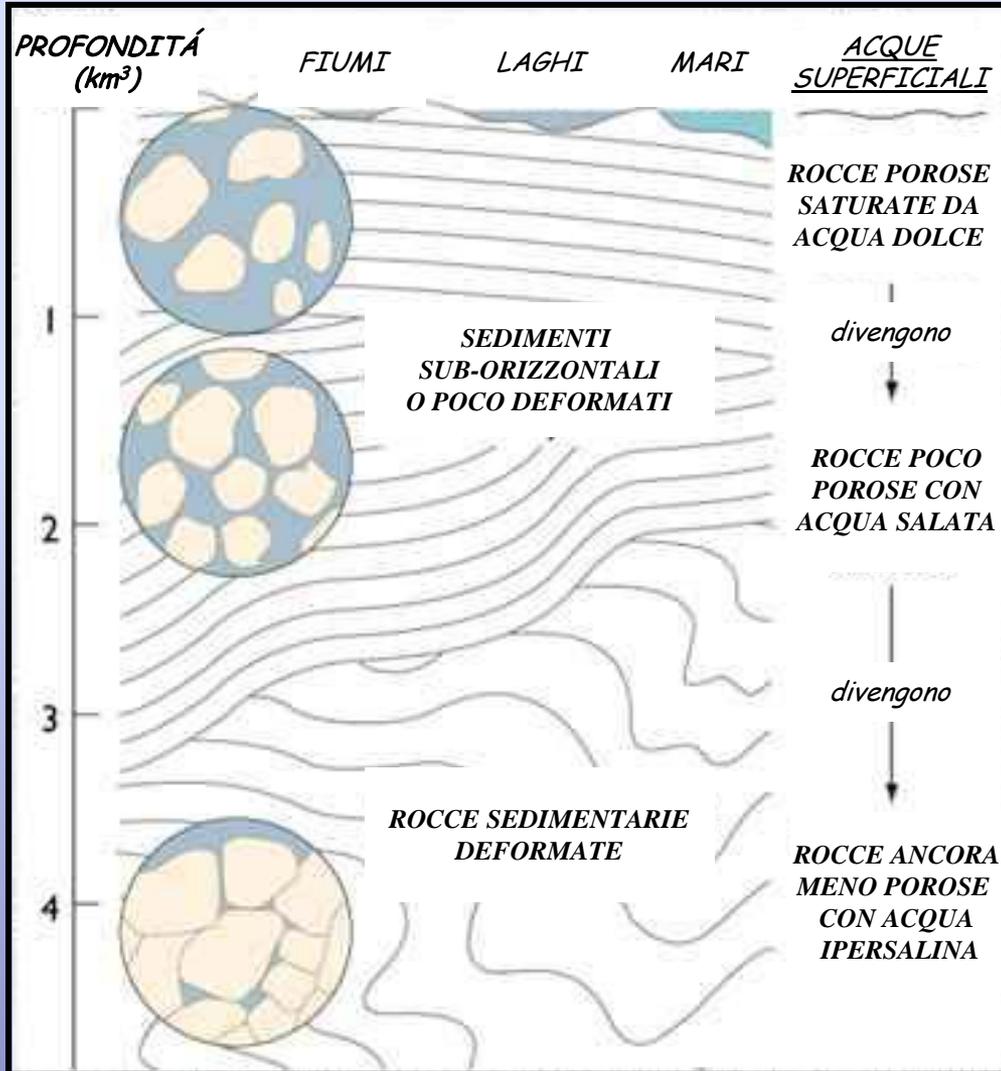


La cementazione
(quarzo, calcite)
può anche
obliterare del tutto
la porosità

CEMENTO

ARENARIA

Porosità e profondità



- Sedimenti sciolti, non litificati
- Sedimenti assestati, parzialmente cementati
- Rocce sedimentarie litificate e compatte

rocce sciolte		rocce compatte	
tipo di roccia	porosità totale (%)	tipo di roccia	porosità totale (%)
Ghiaie	25 ÷ 40	calcari	3 ÷ 20
sabbie e ghiaie	25 ÷ 30	calcari oolitici	5 ÷ 20
sabbie	25,95 ÷ 47,64	<i>craie</i>	15 ÷ 45
depositi alluvionali recenti	5 ÷ 15	basalti	0,1 ÷ 3
argille	45 ÷ 50	arenarie	5 ÷ 25
marne	45 ÷ 50	dolomie	2 ÷ 10
fanghi freschi	80 ÷ 90	graniti	0,02 ÷ 1,5
limi	35 ÷ 50	gessi	2 ÷ 8

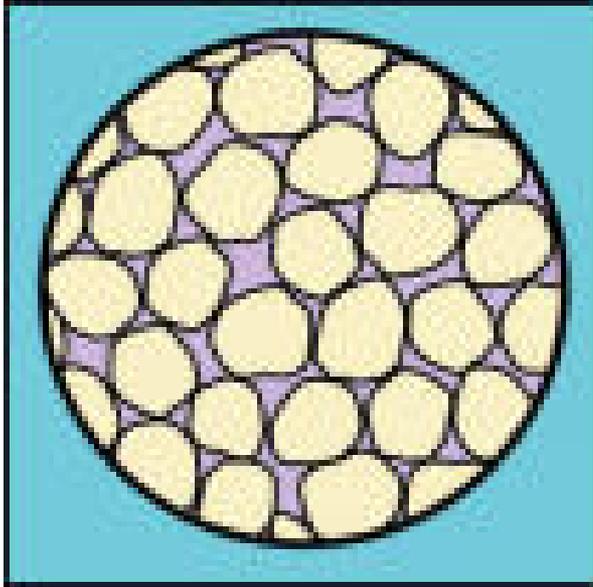
VALORI DI
POROSITÀ
TOTALE
ED
EFFICACE
(da Celico)

tipo di roccia	porosità efficace (%)	tipo di roccia	porosità efficace (%)
ghiaie	20 ÷ 30	dolomie	2 ÷ 5
sabbie e ghiaie	15 ÷ 25	calcari	2 ÷ 10
sabbie	5 ÷ 20	<i>craie</i>	2 ÷ 5
limi	1 ÷ 5	rocce intrusive e metamorfiche	0,1 ÷ 2
depositi alluvionali recenti	8 ÷ 10	lave	8 ÷ 10
sabbie argillose	5 ÷ 10	calcari marnosi	1 ÷ 3

La porosità è importante ma...

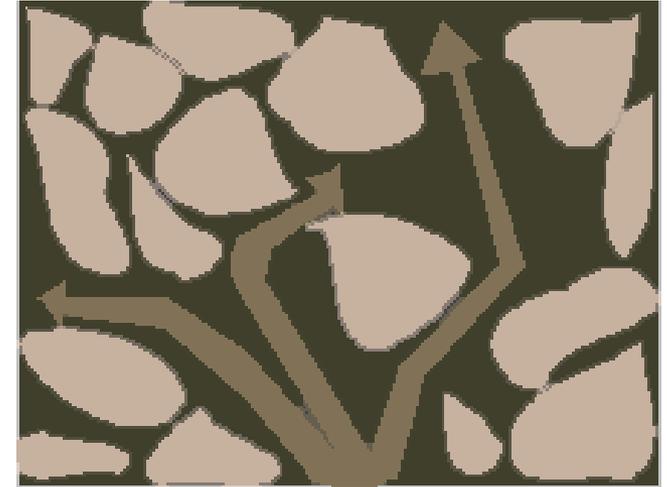
...non è tutto!!!

Porosità



Attitudine a contenere

Permeabilità



Attitudine a trasmettere

ACQUA

Taglia, Forma, Connessione

Porosità ~~X~~ Permeabilità

Alcune rocce hanno alta porosità, ma bassa permeabilità!!

Pomice

Interconnessione

Porosa

ma Non Permeabile

Alta Porosità, ma Bassa Permeabilità

Argilla

Pori piccoli

Porosa

Ma Non Permeabile



Sabbia

Porosa e Permeabile

Legge di Darcy

- Fornisce una descrizione accurata del flusso di acqua sotterranea in quasi tutti i contesti geologici

Henry Darcy



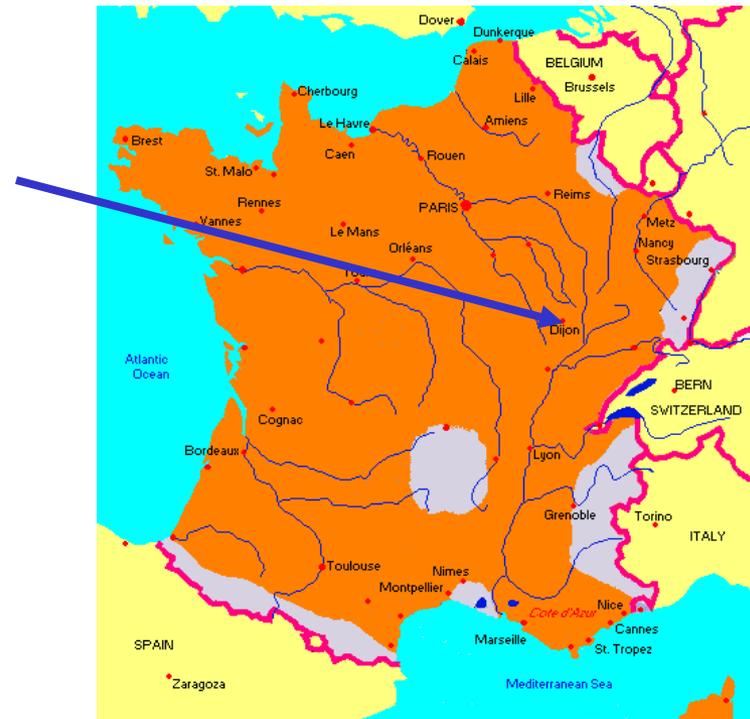
francese di Digione

Ingegnere idraulico

“Fontaniere reale”

“Le fontane pubbliche
della città di Digione”
(1856)

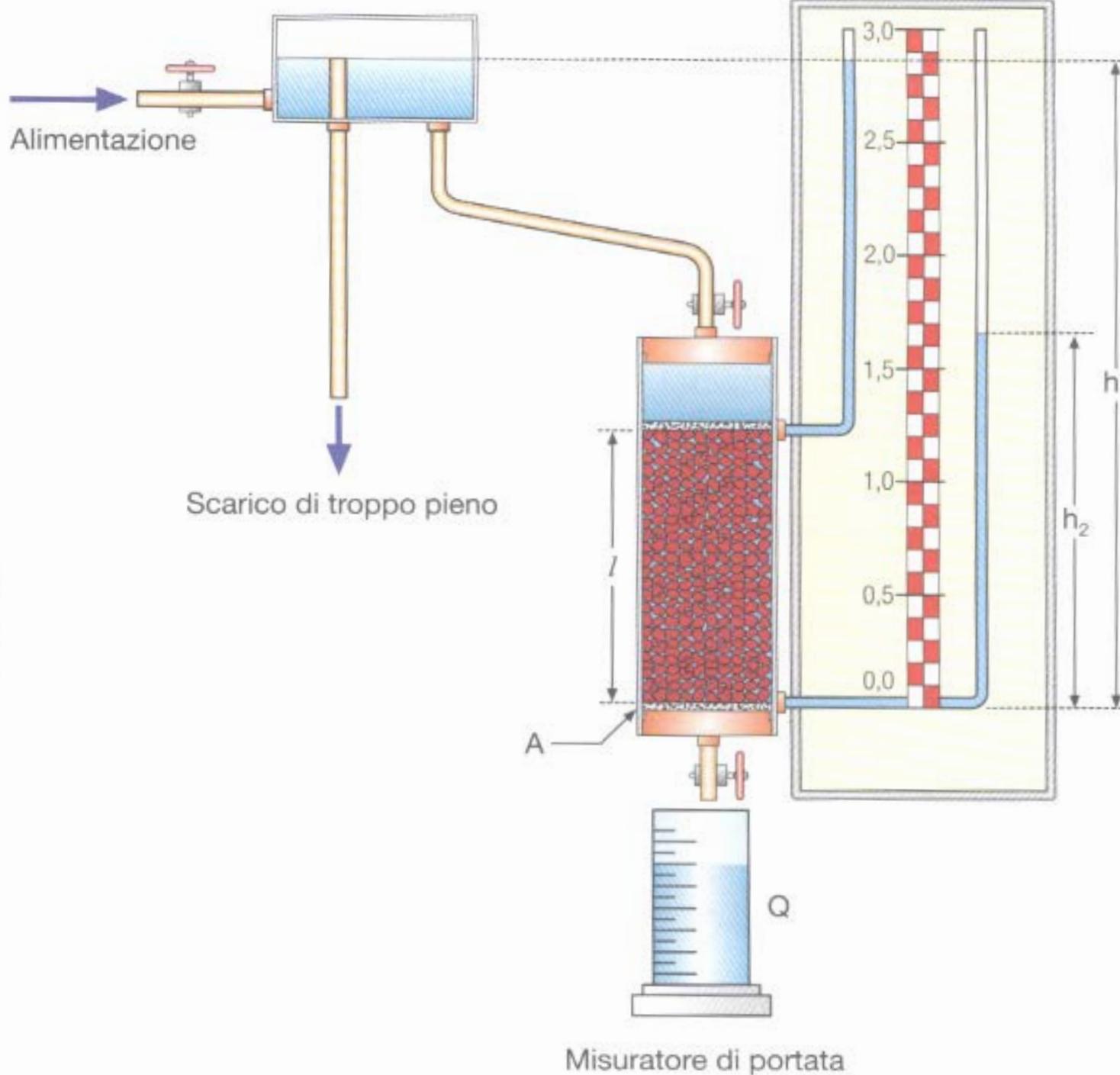
**Primo studio sistematico
del flusso dell'acqua
attraverso il mezzo poroso**



**The Public
Fountains
of the
City of Dijon**

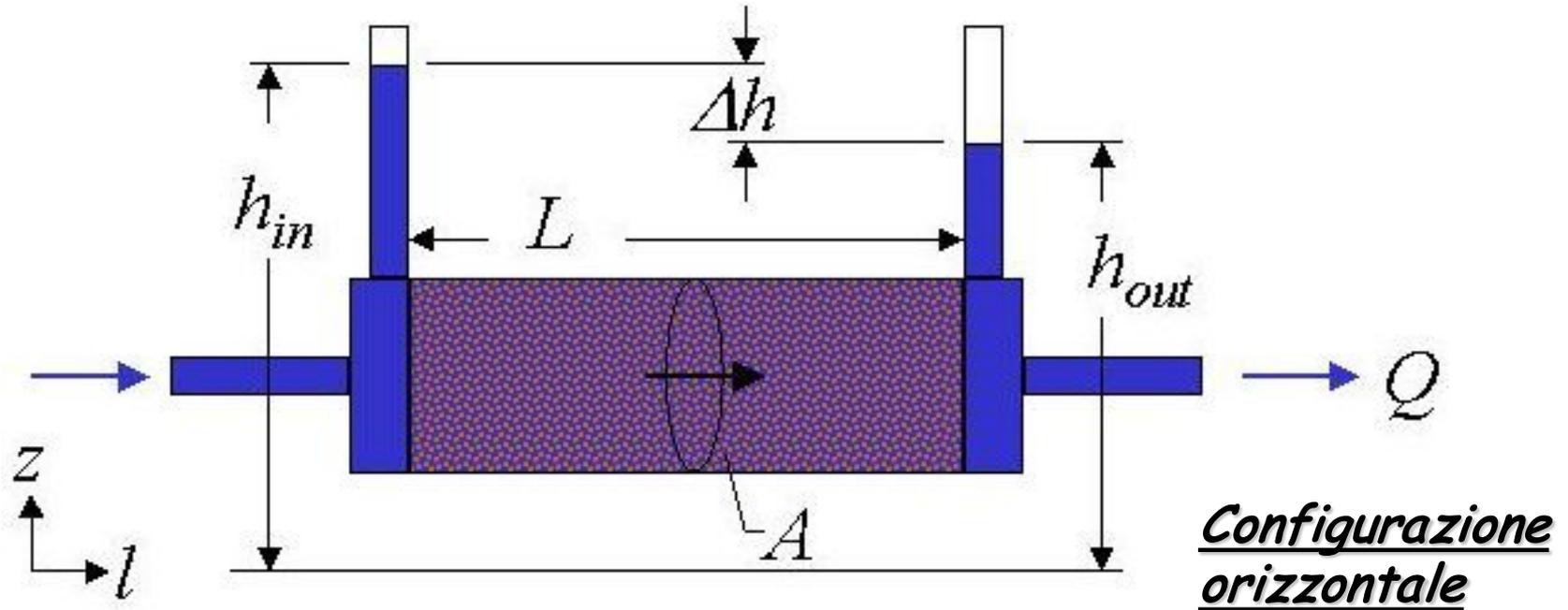
Henry Darcy, 1856

English Translation by Patricia Bobeck



Esperimento di Darcy

Configurazione originale verticale



Sezione trasversale (A)

- Più grande la sezione, maggiore la portata (Q)

Lunghezza della colonna (L)

- Aumenta la lunghezza, Q diminuisce.

Differenza di carico ($h_{in} - h_{out}$)

- Portata proporzionale a differenza di carico

Cosa è K?

K = Conducibilità idraulica = coefficiente di permeabilità

Quale è la unità di misura di K?

$$Q = -KA (\Delta h / L) \quad \text{si ottiene} \quad K = QL / A (-\Delta h)$$

$$\frac{L}{T} = \frac{L^3 \times L}{T \times L^2 \times L}$$

Maggiore K, maggiore Q

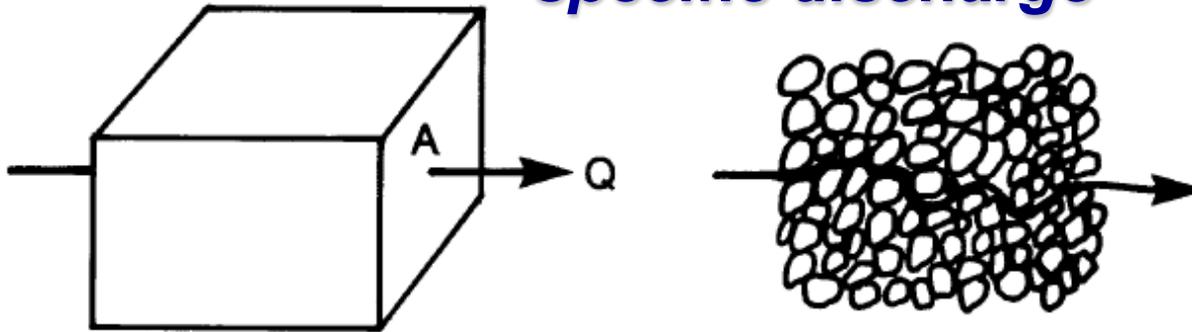
$$Q = -KA (\Delta h / L)$$

si ottiene

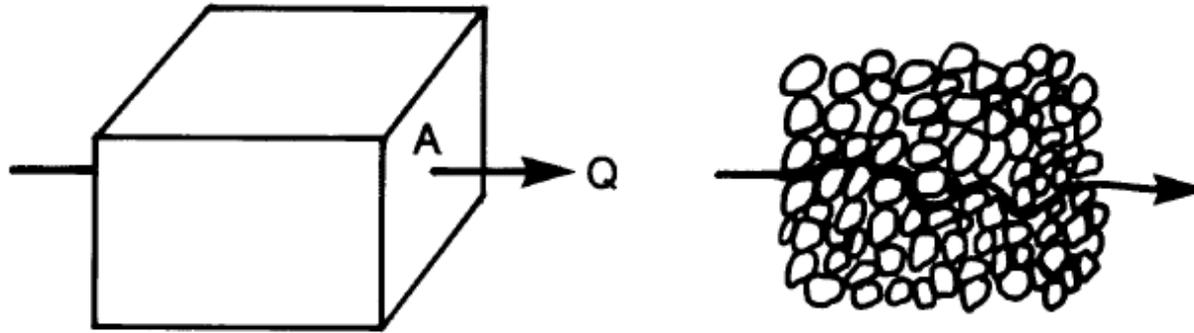
$$q = \frac{Q}{A} = -K (\Delta h / L)$$

q = portata specifica (velocità Darciana)

specific discharge



“velocità apparente” –velocità se non ci fossero granuli nel condotto



$$q = \frac{Q}{A} = -K (\Delta h / L)$$

Velocità reale – Velocità lineare media?

Considera solo lo spazio disponibile per il flusso

Acqua fluisce solo attraverso i pori

Area di flusso = porosità x area

$$\text{Velocità lineare media} = v = \frac{Q}{n_e A} = \frac{K_x i}{n_e}$$

Velocità Darcy & Velocità reale di filtrazione

- La velocità Darcy è una velocità fittizia dato che assume che il flusso avvenga sfruttando tutta la luce della sezione di mezzo poroso trasversale al flusso. Il flusso in realtà ha luogo attraverso pori interconnessi.



Argilla



Limo

I sedimenti hanno un ampio range di K (m/s)

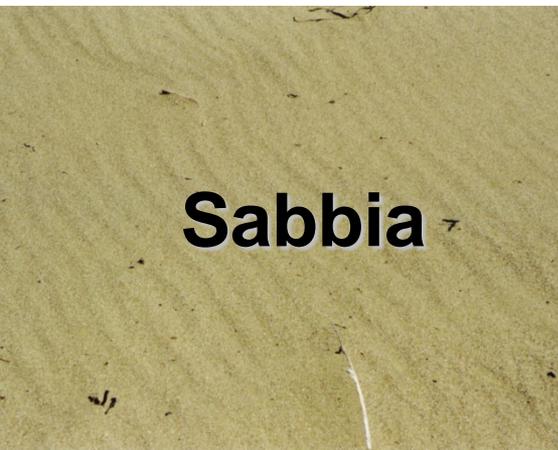
Argilla $10^{-10} - 10^{-7}$

Limo $10^{-7} - 10^{-6}$

Sabbia limosa $10^{-6} - 10^{-5}$

Sabbia $10^{-5} - 10^{-3}$

Ghiaia $10^{-4} - 10^{-2}$



Sabbia



Ghiaia

Range di K –

Permeabilità per porosità

Permeabilità per frattura

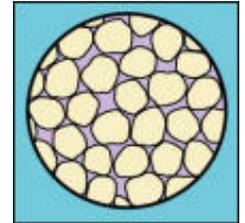
- Ghiaia ben cernita $10^{-4} - 10^{-2}$ m/s.
- Sabbia ben cernita $10^{-4} - 10^{-3}$ m/s.
- Limo $10^{-7} - 10^{-6}$ m/s.
- Argilla $10^{-10} - 10^{-7}$ m/s.
- Roccia integra $10^{-13} - 10^{-10}$ m/s.
- Roccia fratturata $10^{-8} - 10^{-2}$ m/s.
o alterata

K è funzione di ambedue:

$$K = k_i (\rho g / \mu)$$

Mezzo poroso

Mezzo poroso



Fluido



**Permeabilità intrinseca (k_i)
(funzione dimensione pori)**

Fluido

**Densità (ρ)
Viscosità (μ)** } **funzione della temperatura**

k e K

- Permeabilità intrinseca (*Permeability*) (k), con dimensioni di un'area $[L^2]$
- Unità di misura per k
1 Darcy = $9.87 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$
- Conducibilità idraulica (*Hydraulic Conductivity*) (K), con dimensioni di una velocità $[LT^{-1}]$ dipende dalle proprietà sia del mezzo poroso che del fluido:

$$K = k \times \gamma_w / \mu_w$$

dove μ_w è la viscosità dell'acqua $[FL^{-2}T]$ e γ_w è il peso specifico $[FL^{-3}]$

Esempio di fessura



Permeabilità nelle rocce fratturate

- ◆ **Dipende da apertura, frequenza, interconnessione, orientazione, persistenza, rugosità e riempimento delle fratture**

Domande

- Definizione di porosità totale
- Definizione di porosità efficace
- Fattori della porosità primaria interstiziale
- Valori di porosità per una sabbia
- Valori di porosità per una argilla
- Valori di porosità efficace per una sabbia ed un calcare

Domande

- Conducibilità idraulica – Unità di misura
- Permeabilità intrinseca – Unità di misura
- K per una sabbia e per una argilla
- Proprietà del fluido che agiscono su K

Domande

- Che tipo di legge è la legge di Darcy?
- Unità di misura di q , K , i
- Velocità apparente e velocità effettiva