

# Clase 12

CI44-A

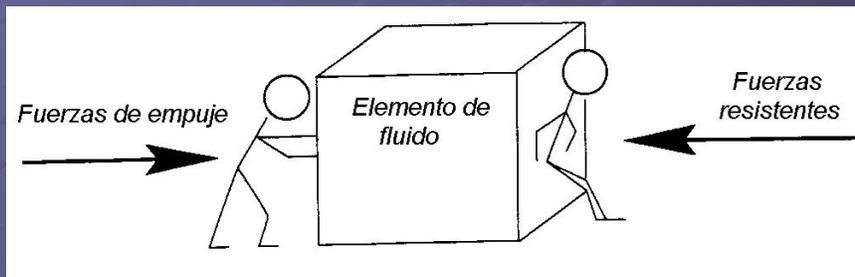
## Fundamentos sobre flujo de aguas en suelos

- **Objetivos principales en obras de Ingeniería Civil**
  - Estimación de infiltraciones
  - Análisis de estabilidad
  - Estimación de fronteras de flujo (ej. Ubicación napa de agua)

## Efecto del agua en suelos

- Límites de Atterberg: El suelo varía en comportamiento entre sólido a fluido viscoso dependiendo del contenido de agua
- Cambio en tensiones efectivas: Ubicación de la napa de agua, consolidación
- Empujes de agua sobre estructuras
- Congelamiento en suelos
- Fuerzas de infiltración sobre estructuras de suelo.

¿Que produce flujo de agua en suelos?



¿Como caracterizar las fuerzas que producen el flujo de agua?

## Potencial de fluido?

- Calor
- Aire
- Electricidad
  
- Cual es el potencial para el flujo de agua?

Intuición: El agua se mueve hacia abajo, el agua fluye de un sector con mayor presión a uno de menor presión.

## Determinación del potencial de un fluido

- Trabajo requerido para mover una masa de fluido desde una elevación  $z=0$  a una elevación  $z$

$$W_1 = mgz$$

- Trabajo requerido para acelerar un fluido desde una velocidad  $v=0$  a una velocidad  $v$

$$W_2 = \frac{mv^2}{2}$$

- Trabajo requerido para elevar la presión de un fluido desde  $p=p_0$  a  $p$

$$W_3 = \int_{p_0}^p V dp = m \int \frac{1}{\rho} V dp = m \int \frac{1}{\rho(p)} dp$$

● El agua es prácticamente incompresible

⇒  $\rho$  es constante

$$\int_{p_0}^p \frac{1}{\rho(p)} dp = \frac{1}{\rho} \int_{p_0}^p dp = \frac{p - p_0}{\rho}$$

Por lo tanto el potencial de flujo ( $m = 1$ ) queda definido por el trabajo hecho como:

$$\psi = gz + \frac{p - p_0}{\rho}$$

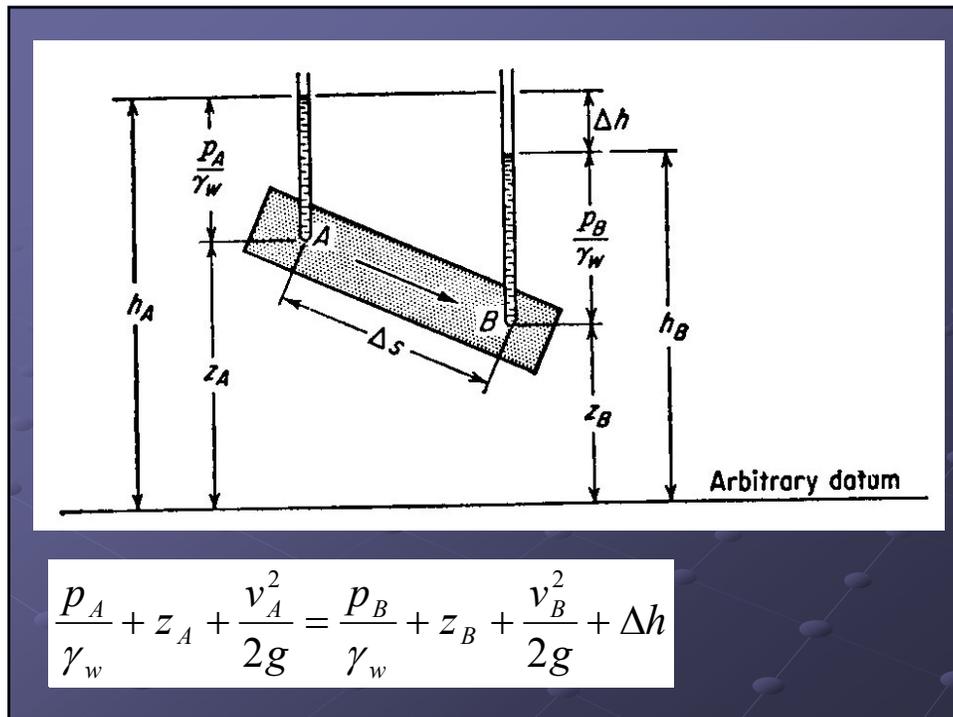
Donde el término de velocidad ha sido despreciado en comparación con los otros dos términos.

¿Que produce flujo de agua en suelos?

● Ecuación de Bernoulli

$$\frac{p}{\gamma_w} + z + \frac{v^2}{2g} = \text{constante} = h$$

Ecuación de mecánica de fluidos para flujo no viscoso e incompresible



- Generalmente en problemas de flujo de agua en suelos se puede despreciar la componente de energía cinética. Por lo tanto, la ecuación anterior se puede escribir como:

$$\frac{p_A}{\gamma_w} + z_A = \frac{p_B}{\gamma_w} + z_B + \Delta h$$

- Por lo tanto la carga o “altura” total queda expresada como:

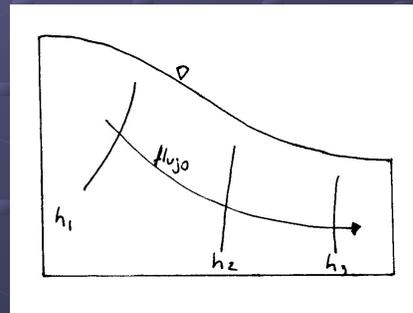
$$h = \frac{p}{\gamma_w} + z$$

Donde:

h: carga total [L]

p: presión [F/L<sup>2</sup>]

z: posición [L]



## Permeabilidad

- En mecánica de suelos se utilizan dos conceptos distintos:
  - Permeabilidad “k”
  - Conductividad hidráulica “K”

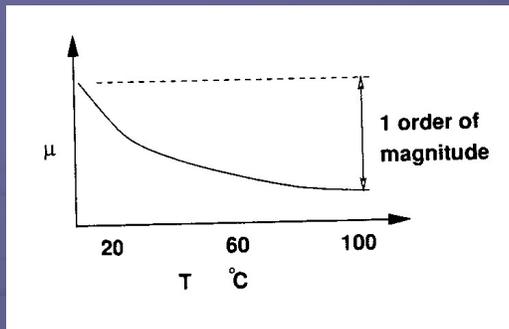
La *permeabilidad* se puede describir en términos cualitativos como la facilidad con que un fluido se mueve a través de un medio poroso (suelo o roca). Esta propiedad depende exclusivamente del medio poroso

- **Conductividad hidráulica:** Es una propiedad que depende no sólo de las propiedades del medio poroso pero también del fluido que circula por este medio.

Relación entre k y K:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}$$

Donde  $\nu$  es la viscosidad del fluido y  $\rho$  es la densidad

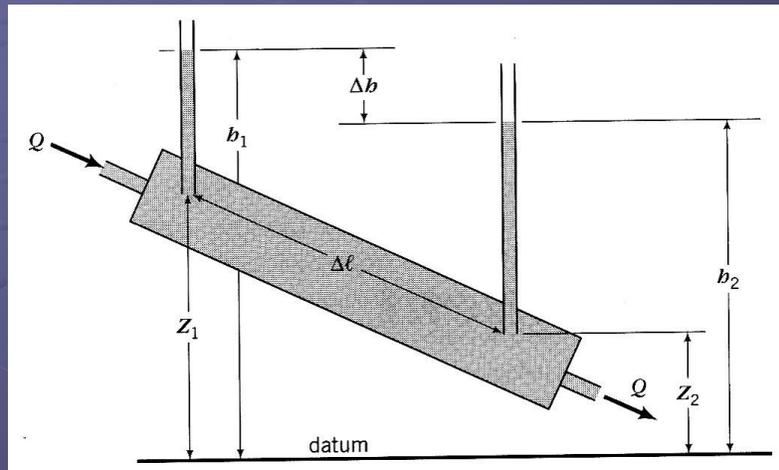


Temperatura °C	$\nu$ (N s / m <sup>2</sup> )
20	0,001002
40	0,000653
60	0,000467
80	0,000355
100	0,000282

Fluido	Temperatura				
	0°C	10°C	20°C	40°C	70°C
Agua	1,787	1,31	1,002	0,653	0,407
Benceno	0,902	0,759	0,649	0,492	0,351
Cloroformo	0,7	0,626	0,564	0,465	--
Alcohol Etilico	0,177	0,145	0,119	0,827	0,504
Eter	0,286	0,258	0,234	0,197	--

Viscosidad (en 1000 N s / m<sup>2</sup>)

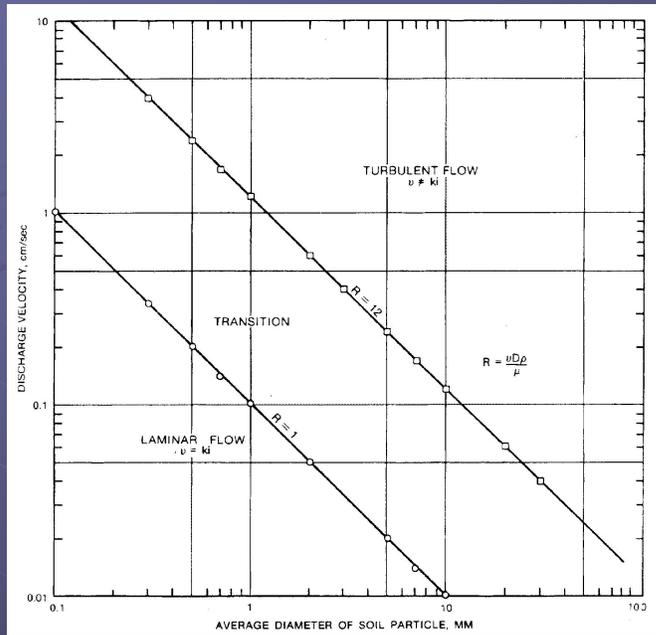
## Ley de Darcy



$$v = -K \frac{dh}{dl} = Ki$$

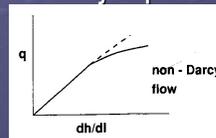
- Donde “K” es la conductividad hidráulica, “i” es el gradiente hidráulico y v es el flujo por unidad de área
- K tiene
- Darcy demuestra una dependencia lineal entre gradiente hidráulico y la velocidad de descarga
- En mecánica de suelo muchas veces el factor K es llamado coeficiente de permeabilidad

## Rango de validez de la ley de Darcy



- Reynolds observó que a bajas velocidades el flujo se observa ordenado o laminar. En cambio para mayores velocidades el flujo se convierte en turbulento.
- En régimen turbulento se ha encontrado que la relación entre gradiente hidráulico y velocidad de flujo queda dada por:

$$i = a \cdot v + b \cdot v^n$$

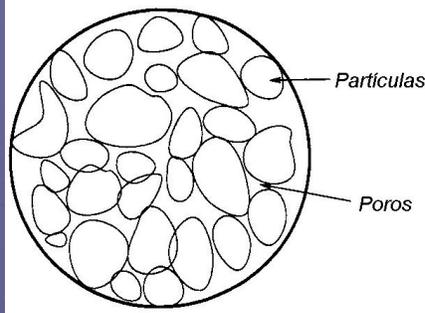
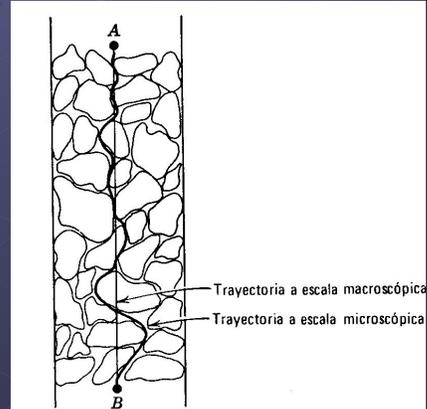
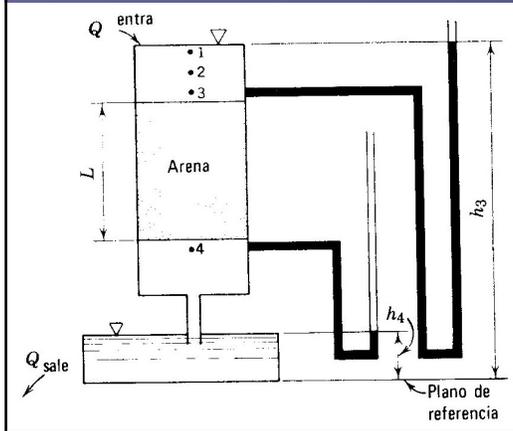


- donde a y b son constantes y n es un número entre 1 y 2.
- El número de Reynolds es utilizado para establecer en que punto el flujo en suelos cambia de laminar a turbulento. Usualmente se considera que el flujo es laminar si se cumple que:

$$R = \frac{vD\rho}{\mu} \leq 1$$

Donde D es el diámetro medio de las partículas de suelo (cm),  $\rho$  es la densidad del fluido (g/cm<sup>3</sup>),  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad (g-sec/cm<sup>2</sup>)

## Velocidad de descarga y velocidad de filtración



$$v_s = \frac{v}{n}$$

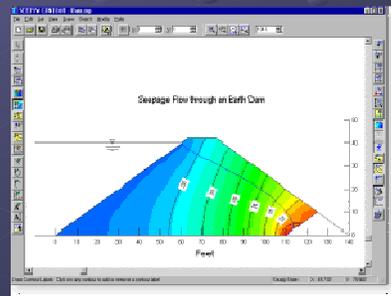
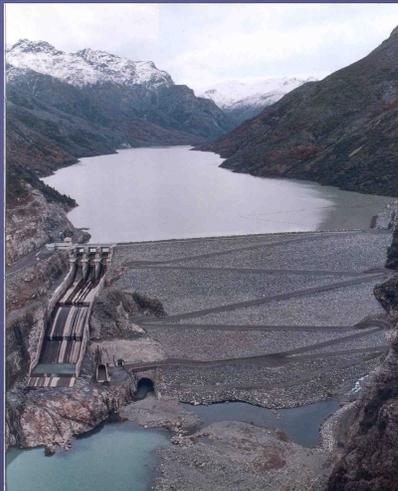
- $v_s$ : velocidad de filtración
- $n$ : porosidad del suelo

## ¿Como caracterizar la conductividad hidráulica del sistema?

- Flujo perpendicular a un sistema multicapas
- Flujo paralelo a un sistema multicapas
- Caso General

## ¿Por qué necesitamos medir permeabilidad ?

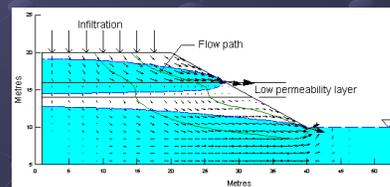
- Filtraciones a través de presas de tierra



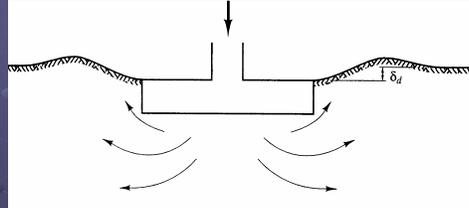
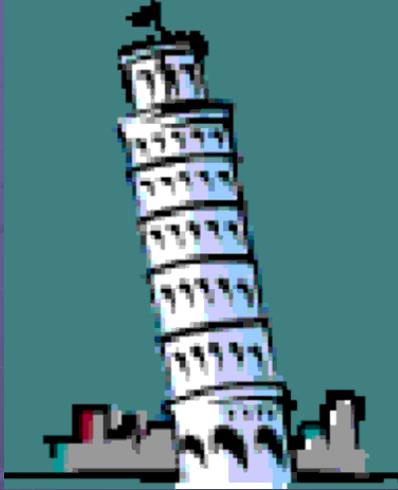
## ● Agotamiento de napas de agua



## ● Evaluación de fuerzas de filtración sobre taludes



## ● Asentamiento (Consolidación)



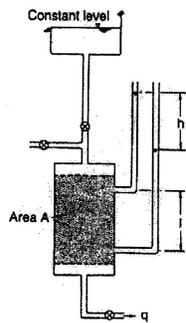
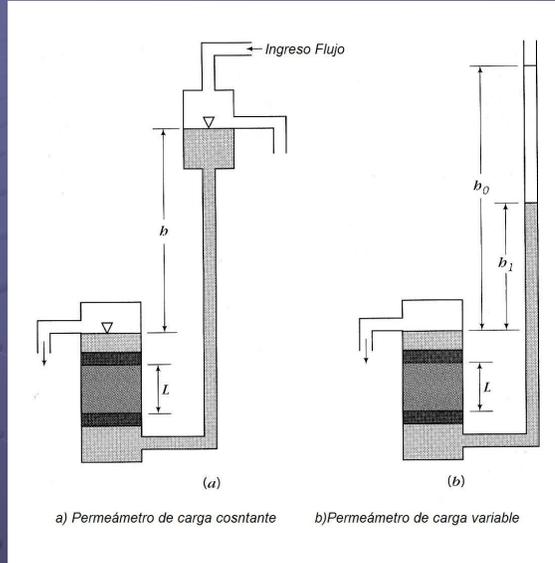
## Fórmulas Teórico-Empíricas

Table 2.2-1. Comparison of formulae proposed for the calculation of permeability coefficient

Author	Form of the formula	Temperature considered in the formula or assumed in the comparison [°C]	The given or assumed validity zone of the coefficient of uniformity	The multiplying factor valid in the case of the use of effective diameter	The recalculated shape coefficient assuming $n = 0.38$ as porosity	The investigated range of diameter [cm]
Kröber	$K_D = 41 D_{50}^3$	10	$\sim 1.2$	43	7.15	0.054-0.210
		20			8.15	
Seelheim	$K_D = 37 D_{50}^3$	12	$\sim 1.5$	40	7.68	0.016-0.068
Hagen	$K_D = 36 D_{50}^3$	10	$\sim 1.5$	39	7.53	0.028
Hazen	$K_D = 116(0.7 + 0.03n)D_{50}^3$	10	1.5-2.5	46	6.92	
		20		60	6.92	
Jáky	$K_D = 100 D_{50}^3$	10	$\sim 2.0$	39	7.53	
Karádi	$K_D = 100 D^2$ (lead balls) $K_D = (90 \sim 140) D_{50}^3$ (heterodisperse gravel)	10	1.0	100	6.10*	0.25-1.60
		20	$\sim 2.0$	40-62	6.31-7.85	
Terzaghi	$K_D = 200 e^3 D_{50}^3$	10	$\sim 1.5$	45	7.00	
		20			8.00	
Lindquist	$K_D = \frac{2}{2500} \frac{g}{v} D^2$ (lead balls)	10	1.0	61	6.00	
Chardas-bellas	$K_D = 255 e^3 D^2$ (lead balls) $K_D = 140 e^3 D^2$ $K_D = 185 e^3 D^2$ $K_D = 215 e^3 D^2$ $K_D = 230 e^3 D^2$	10		59	6.10	
		10		32	8.35	0.015-0.025
		10		43	7.15	0.025-0.050
		10		50	6.65	0.050-0.100
		10		53	6.50	$\sim 0.123$
	direct measurements				6.90-10.8	0.022-0.081
Zauberei	$K_D = \frac{330 \sim 350n^3}{(1-n)^2} D^2$	18		47-50	7.37-7.62	
Veronese	$K_D = \frac{1}{2300} \frac{g}{v} D^2$	10		34	7.95	
Romer	$K_D = 6.54 \times 10^{-4} \frac{g}{v} D^2$	10	$\sim 1.0$	49	6.24	0.01-0.55
Bear	$K_D = 6.17 \times 10^{-4} \frac{g}{v} D^2$	10	$\sim 1.0$	46	6.80	0.008-0.11

Note:  $n = 0.43$

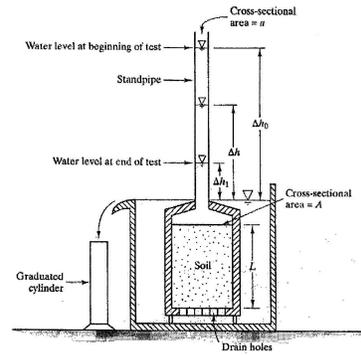
# Ensayos de Permeabilidad



$$Q = A \cdot v \cdot t$$

$$v = k \cdot i = k \cdot \frac{h}{L}$$

$$k = \frac{Q \cdot L}{h \cdot A \cdot t}$$



$$Q = k \cdot i \cdot A = k \frac{\Delta h}{L} A = -a \frac{d(\Delta h)}{dt}$$

$$\frac{k \cdot A}{L} \int_0^t dt = -a \int_{\Delta h_0}^{\Delta h_1} \frac{d(\Delta h)}{h}$$

$$\frac{k \cdot A \cdot t}{L} = -a \cdot \ln \left( \frac{\Delta h_1}{\Delta h_0} \right)$$

$$k = \frac{aL}{At} \ln \left( \frac{\Delta h_1}{\Delta h_0} \right)$$

## Carga constante



## Carga Variable

