

GEOLOGIA Y GEOTECNIA

2014

(2da edición)

PERMEABILIDAD DE SUELOS

Ing. Silvia Angelone

Ing. Pablo Torres

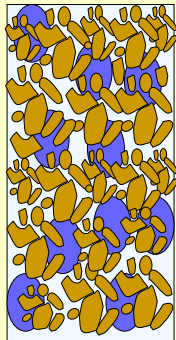
BIBLIOGRAFÍA

- **Terzaghi y Peck: arts 11 y 23**
- **Braja Das: Cap. 4**
- **Apunte “Permeabilidad de suelos”**

PROPIEDADES DE LOS SUELOS

- Propiedades Índice
- Clasificación e Identificación
- **Permeabilidad**
- Compresibilidad
- Resistencia a la Rotura
- Fluencia
- Relación tenso-deformación

SUELO



Los suelos son sistemas compuestos por tres fases:

- Sólida (partículas)
- Gaseosa (aire)
- Líquida (agua)

Los poros están comunicados entre sí



**El agua fluye libremente
dentro de la masa de suelo**

FLUJO LAMINAR O TURBULENTO

Flujo laminar: movimiento suave, uniforme, las líneas de flujo no se juntan. Las pérdidas de energía son proporcionales a la velocidad.

Suelos finos y algunas arenas

Flujo turbulento: movimiento caótico, irregular, las líneas de flujo se cruzan. Las pérdidas de energía son proporcionales a la v^2

Suelos gruesos, gravas

LEY DE DARCY

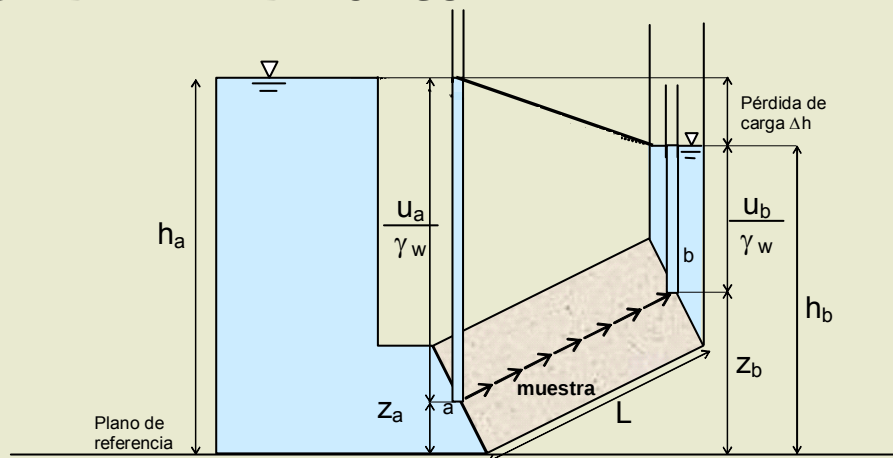
El flujo de agua a través de medios porosos saturado está gobernado por la ley de Darcy (1856), quien encontró que para velocidades suficientemente pequeñas el gasto o caudal Q es:

$$Q = \frac{\partial V}{\partial t} = k \cdot i \cdot A \qquad Q = v \cdot A$$

$$v = k \cdot i$$

Si $i < 5$, el flujo es laminar

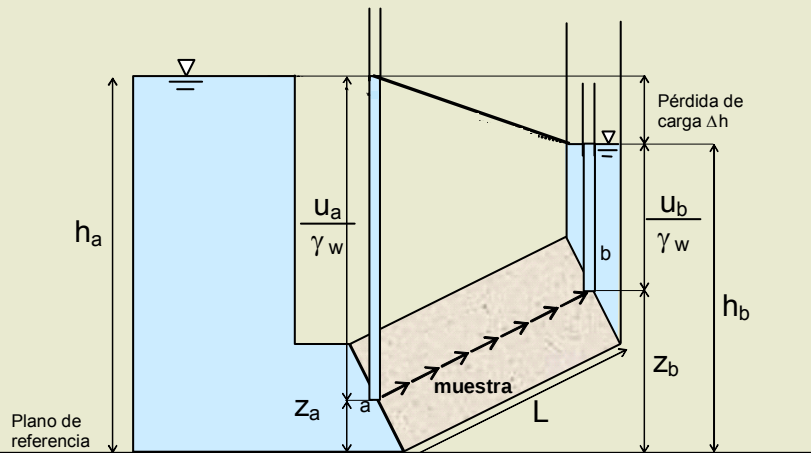
GRADIENTE HIDRAÚLICO



$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

$$i_p = \gamma_w \cdot i = \gamma_w \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

CARGA HIDRAÚLICA



$$h_b = z_b + \frac{u_b}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g}$$

Carga hidráulica total en b

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

$$k = \gamma_w \cdot \frac{K}{\eta}$$

k : es el coeficiente de permeabilidad (cm/seg)

K : constante de permeabilidad del material

η : viscosidad del fluido circulante

γ_w : peso específico del fluido circulante.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

$$k = \gamma_w \cdot \frac{K}{\eta}$$

$$v = k \cdot i$$

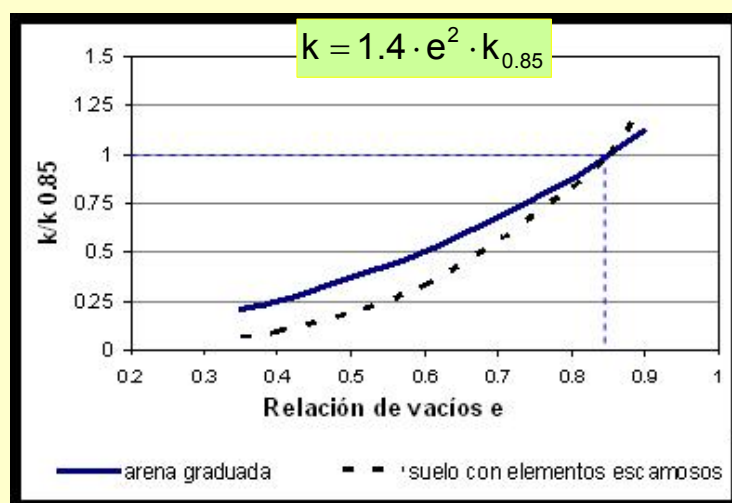
Permeabilidad: la capacidad del suelo para permitir que la atraviese el agua

k : es la velocidad del flujo producido por un gradiente hidráulico unitario. [cm/s]

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL VALOR DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DEL SUELO

- Relación de vacíos
- Viscosidad (Temperatura) del agua
- Estructura y estratificación
- Agujeros y fisuras
- Tamaño de partículas
- Aire ocluído (S_r) y materiales extraños en los vacíos (sales)

VARIACIÓN DE k CON LA RELACIÓN DE VACÍOS



Relación de vacíos alta
no significa vacíos de
tamaño grande

VALORES DE k (cm/seg)													
	100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	
Drenaje	Bueno						Pobre		Prácticamente impermeable				
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava				Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada				Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición			
						Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición.							
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.												
	Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.												
Determinación indirecta de k		Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.				Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.				
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.						Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia						

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD

Laboratorio:

- Permeámetro de carga constante
- Permeámetro de carga variable

In situ:

- Ensayo de Permeabilidad Lefranc
- Bombeo de acuífero libre
- Bombeo de acuífero confinado

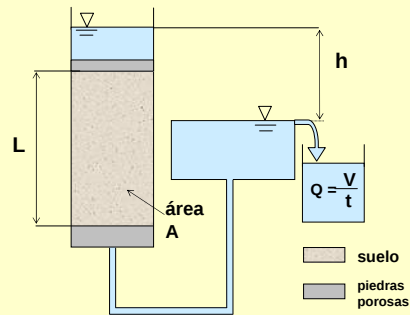
Empíricos:

- Allen Hazen
- Consolidación

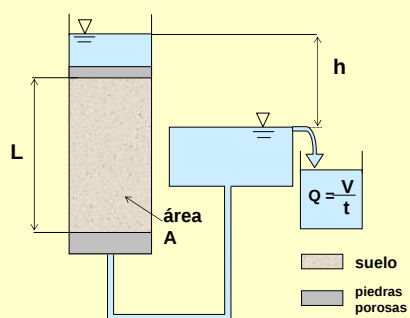
$$k = C \cdot D_{10}^2 \quad [\text{cm/seg}]$$

Ensayo de Permeabilidad en Laboratorio

PERMEÁMETRO DE CARGA CONSTANTE



PERMEÁMETRO DE CARGA CONSTANTE

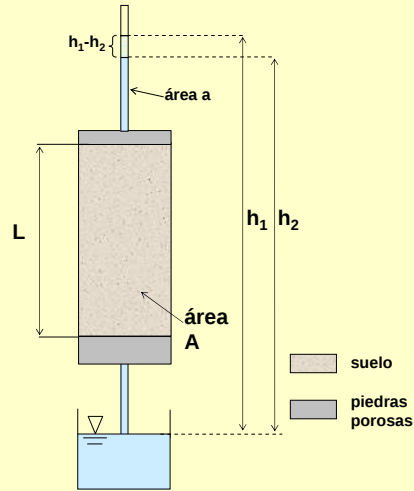


$$Q = \frac{V}{t} \quad Q = k \cdot i \cdot A = \frac{V}{t}$$

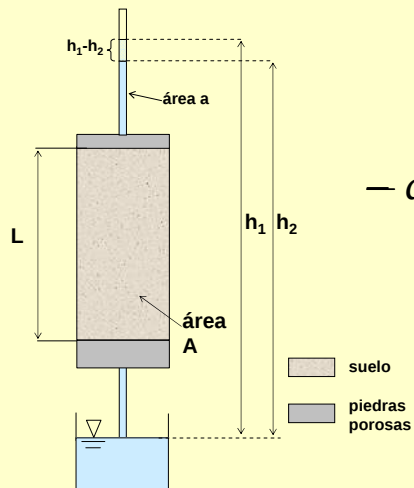
$$i = \frac{h}{L} \quad A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$k = \frac{V}{t \cdot i \cdot A} = \frac{V \cdot L \cdot 4}{t \cdot h \cdot \pi \cdot D^2}$$

PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE



PERMEÁMETRO DE CARGA VARIABLE



$$\partial Q = \frac{\partial V}{\partial t} = -a \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$-a \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = k \cdot i \cdot A = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A$$

$$-a \cdot \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{h} \partial h = \frac{k}{L} \cdot A \cdot \int_{t_1}^{t_2} \partial t$$

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Ensayo de Permeabilidad In situ

Ensayo de Permeabilidad Lefranc

Ensayo de Permeabilidad Lefranc

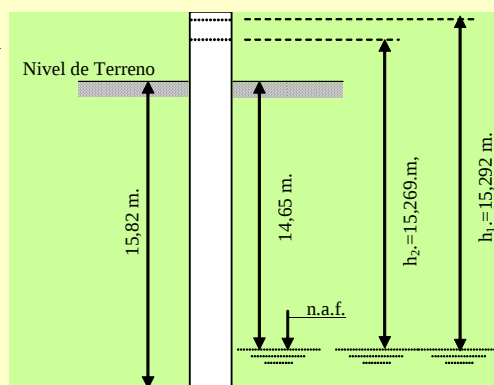
Ejecución de una perforación hasta **14,50 m** de profundidad, introduciendo una camisa de acero de **4 pulgadas (10 cm)**, que se hince entre: **14,50 m y 15,82 m**



Ensayo de Permeabilidad Lefranc

Ensayo puntual a carga variable

- Se limpia el interior de la camisa hasta de la profundidad hincada
- Se llena de agua limpia la camisa hasta una altura h_1 medida desde el nivel de la napa
- Se mide el intervalo de tiempo que tarda en bajar el nivel de agua en la camisa desde la altura h_1 hasta otra altura h_2 , que también se mide hasta el nivel de la napa.

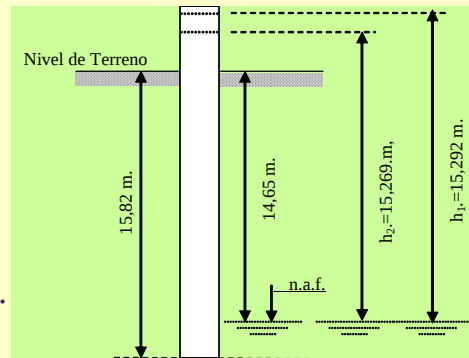


Ensayo de Permeabilidad Lefranc

Cálculo del coeficiente de permeabilidad

$$k = \frac{2 \pi R}{11(t_2 - t_1)} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

$$k = \frac{2 \pi \times 5,08 \text{ cm.}}{11 \times 1800 \text{ seg.}} \ln \left(\frac{15,292}{15,269} \right).$$



Coeficiente de permeabilidad : $k = 2,4 \times 10^{-6} \frac{\text{cm}}{\text{seg}}$

R = radio de la camisa = 5,08 cm.

El agua descendió desde $h_1 = 15,292 \text{ m.}$ hasta $h_2 = 15,269 \text{ m.}$ en un intervalo $\Delta t = t_1 - t_2 = 30 \text{ minutos.}$

Ensayo de Permeabilidad Lefranc

Ensayo con bulbo a nivel constante

- Se extrae el material del interior de la camisa
- Se perfora formando una cavidad cilíndrica de 40 cm de profundidad (aprox.), bajo el fondo de la camisa.
- Se limpia circulando agua limpia por el interior de la camisa.
- Se introduce una canasta metálica cilíndrica de diámetro ligeramente inferior al del caño camisa llena con material granular suficientemente fino para cumplir la función de filtro y suficientemente grueso para que su permeabilidad sea elevada con respecto de la del suelo a ensayar.



Ensayo de Permeabilidad Lefranc

Ensayo con bulbo a nivel constante

• Se agrega agua manteniendo el nivel constante en el borde superior de la camisa, hasta verificar que se llega al estado de régimen, con caudal constante.



Ensayo de Permeabilidad Lefranc

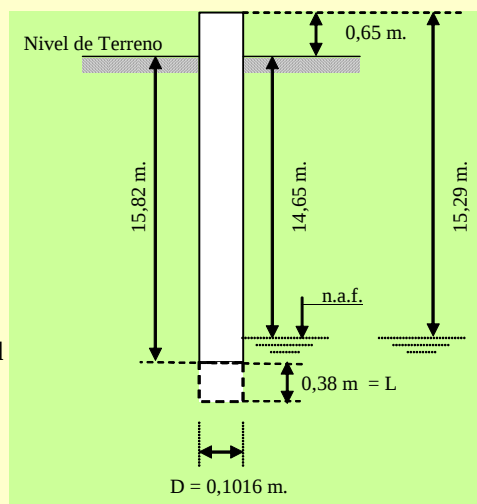
Ensayo con bulbo a nivel constante

Cálculo del coeficiente de permeabilidad

$$k = \frac{Q}{C \times H}$$

$$C = \frac{2\pi L}{\ln \frac{2L}{D}}$$

- k = coeficiente de permeabilidad
- C = coeficiente de forma de la cavidad
- Q = caudal medido, $\text{cm}^3/\text{seg.}$
- n.a.f. = nivel napa agua freática
- L = profundidad de la cavidad, m.
- D = diámetro de la camisa, m
- H = altura entre el borde de la camisa y el n.a.f, m.



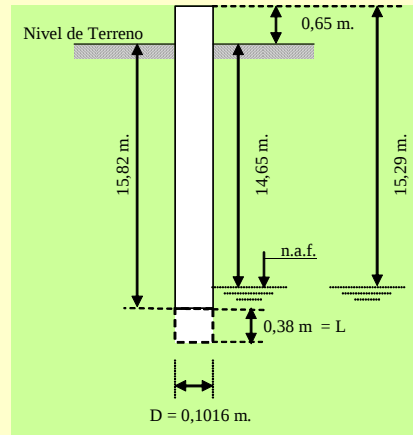
Ensayo de Permeabilidad Lefranc

Ensayo con bulbo a nivel constante

Cálculo del coeficiente de permeabilidad

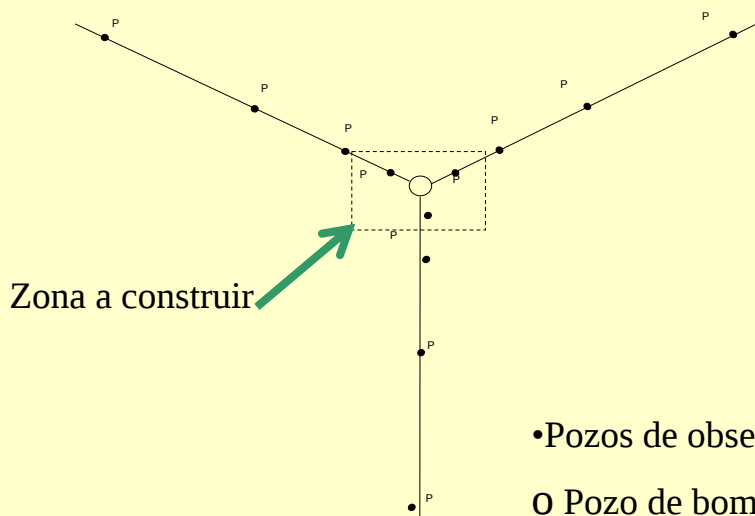
$$C = \frac{2\pi L}{\ln \frac{2L}{D}} = \frac{2\pi \times 38 \text{ cm.}}{\ln \frac{2 \times 38}{10,16}} = 118,65 \text{ cm.}$$

$$k = \frac{11,8 \text{ cm}^3 / \text{seg.}}{118,65 \text{ cm.} \times 1529 \text{ cm.}} = 6,5 \times 10^{-5} \frac{\text{cm}}{\text{seg}}$$



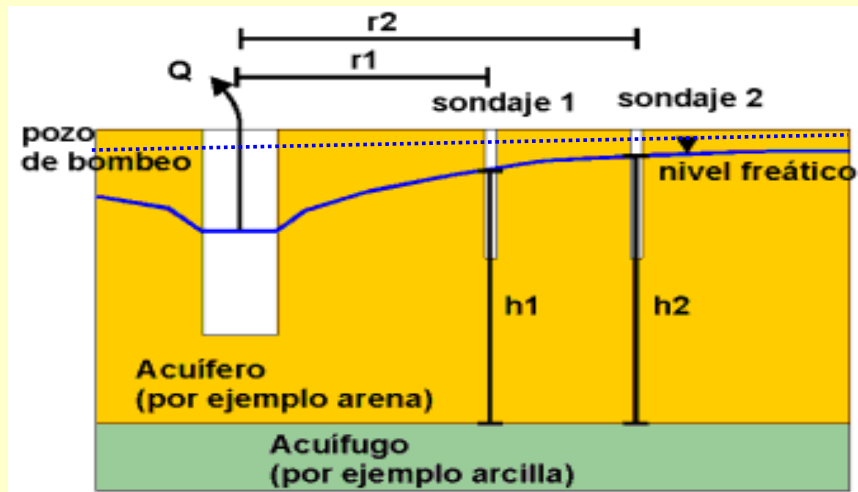
Coeficiente de permeabilidad : $k = 6,5 \times 10^{-5} \frac{\text{cm}}{\text{seg}}$

POZOS DE BOMBEO

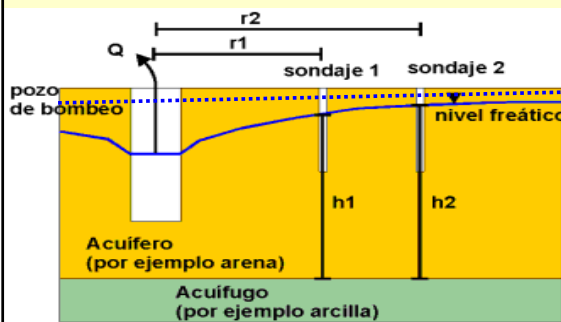


- Pozos de observación
- O Pozo de bombeo

POZOS DE BOMBEO. ACUÍFERO LIBRE



POZOS DE BOMBEO. ACUÍFERO LIBRE



$Q \rightarrow$ bomba

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{\partial h}{r_2 - r_1} = \frac{\partial h}{\partial r}$$

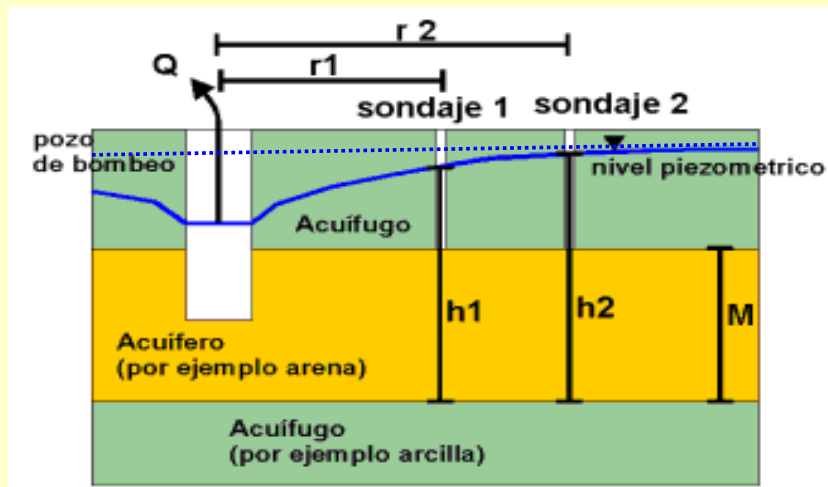
$A = 2\pi \cdot r \cdot h$, con h variable

$$Q = k \cdot \frac{\partial h}{\partial r} \cdot 2\pi \cdot r \cdot h$$

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{Q}{r} \partial r = \int_{h_1}^{h_2} k \cdot 2\pi \cdot h \cdot \partial h$$

$$k = \frac{Q}{\pi \cdot (h_2^2 - h_1^2)} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}$$

POZOS DE BOMBEO. ACUÍFERO CONFINADO



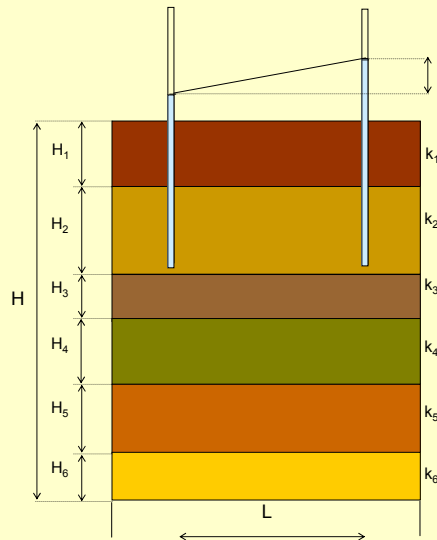
$$k = \frac{Q}{2\pi \cdot (h_2 - h_1) \cdot M} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}$$

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD EN MASAS ESTRATIFICADAS

→ k_I horizontal

→ k_{II} vertical

k_I HORIZONTAL



$$i = \frac{h}{L} = \text{cte}$$

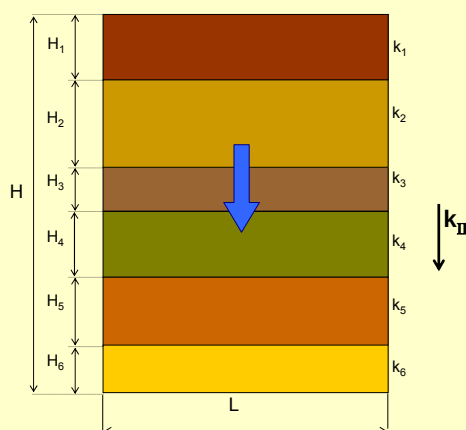
$$q_i = k_i \cdot i \cdot A_i = k_i \cdot \frac{h}{L} \cdot H_i \cdot 1m$$

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = k_I \cdot i \cdot A$$

$$Q = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \frac{h}{L} \cdot H_i = k_I \cdot \frac{h}{L} \cdot H$$

$$k_I = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \cdot H_i}{H}$$

k_{II} VERTICAL

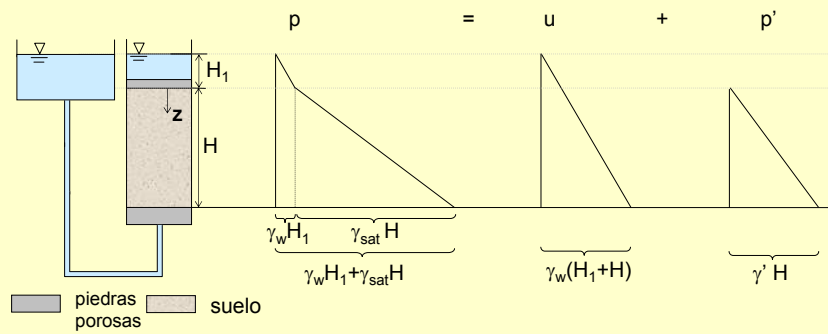


velocidad = cte

$$k_{II} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{k_i}}$$

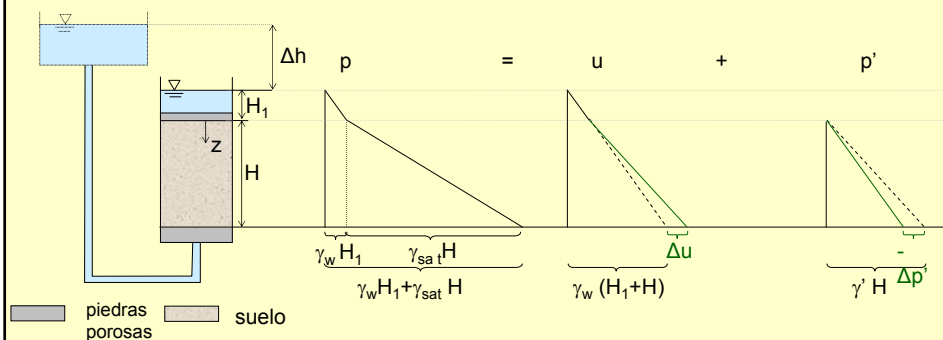
GRADIENTE HIDRAULICO CRITICO

IGUAL NIVEL



GRADIENTE HIDRAULICO CRITICO

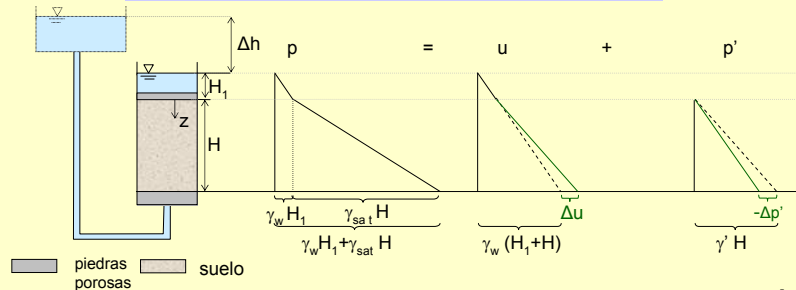
CIRCULACIÓN HACIA ARRIBA



$$\Delta u = \gamma_w \cdot h = \gamma_w \cdot i \cdot H = \gamma_w \cdot i \cdot z$$

GRADIENTE HIDRAULICO CRITICO

CIRCULACIÓN HACIA ARRIBA



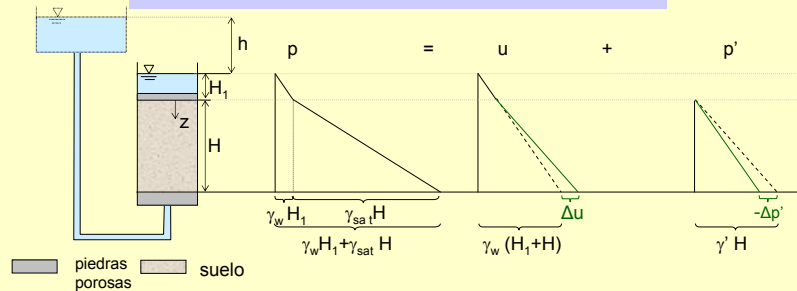
$$\Delta u = \gamma_w \cdot h = \gamma_w \cdot i \cdot H = \gamma_w \cdot i \cdot z \quad i = \frac{h}{L}$$

$$L = H = z \quad h = i \cdot L = i \cdot H = i \cdot z$$

$$\Delta u = -\Delta p' \quad p' = \gamma' \cdot z - \Delta p' = \gamma' \cdot z - \gamma_w \cdot i \cdot z$$

GRADIENTE HIDRAULICO CRITICO

CIRCULACIÓN HACIA ARRIBA



$$p' = \gamma' \cdot z - \gamma_w \cdot i \cdot z = 0$$

$$\gamma' \cdot z = \gamma_w \cdot i \cdot z$$

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

GRADIENTE HIDRAULICO CRITICO

CIRCULACIÓN HACIA ABAJO

