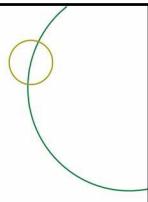




Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

CURSO DE GEOTECNIA I

(Código: 236161)

M. Sc. Carlos Medina
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Sucre






Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA




PROPIEDADES HIDRAULICAS DE LOS SUELOS

FORMAS DE AGUA EN EL SUELO

El agua afecta muy fuertemente el comportamiento de muchos suelos, especialmente los de grano fino.

El agua es un factor importante en muchos problemas de Ingeniería Geotécnica.

El agua en el suelo puede ser considerada: Estática o dinámica.

- Agua del Nivel freático (estática)
- Agua adsorbida (generalmente estática)
- Agua por Capilaridad (usualmente estática)






Universidad de Sucre
 INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

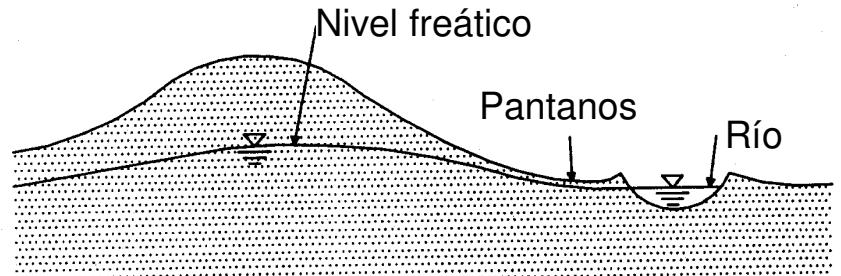

 ACADEMIA DE CIENCIAS
 DE LAS AMÉRICAS



FORMAS DE AGUA EN EL SUELO

Agua subterránea (Agua freática): Agua en los poros del suelo

Nivel freático: Superficie del Agua subterránea

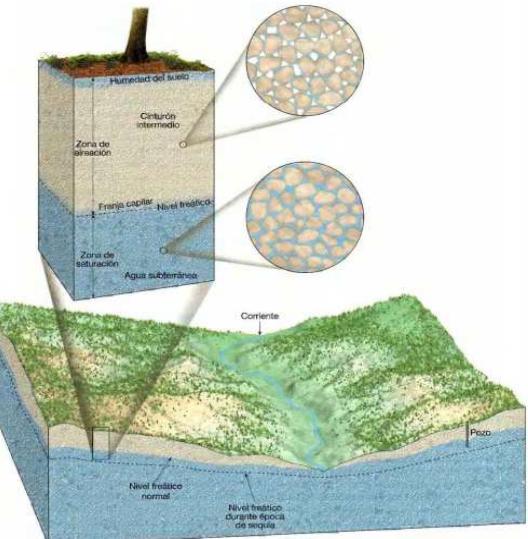





Universidad de Sucre
 INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA


 ACADEMIA DE CIENCIAS
 DE LAS AMÉRICAS





Nivel Freático

El nivel freático, el límite superior de la zona de saturación, es un elemento muy significativo del sistema de aguas subterráneas.

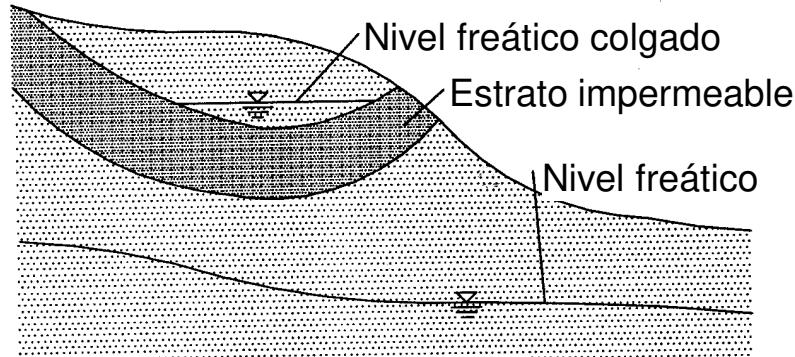
El nivel freático es importante para predecir la productividad de los pozos y explicar los cambios de flujo de las corrientes y los manantiales, justificando las fluctuaciones del nivel de los lagos.





FORMAS DE AGUA EN EL SUELO

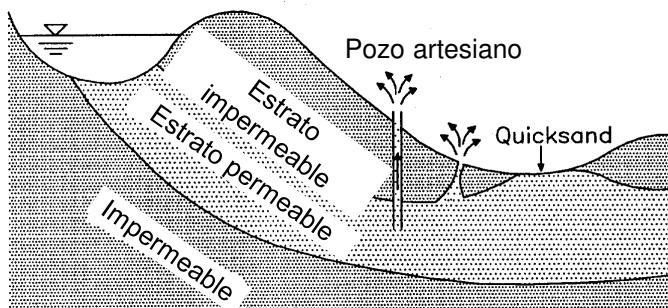
Niveles freáticos colgados: Existencia de depósitos de agua subterránea con fondos impermeables



FORMAS DE AGUA EN EL SUELO

Acuíferos: Estratos de suelos en los cuales el agua subterránea se puede mover lentamente.

Acuíferos confinados: Acuífero cargado por un estrato impermeable => Agua subterránea a presión



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

FORMAS DE AGUA EN EL SUELO

Agua adsorbida: La que se encuentra en una masa de suelo o roca, íntimamente ligada a las partículas sólidas por efecto de fuerzas electro-químicas

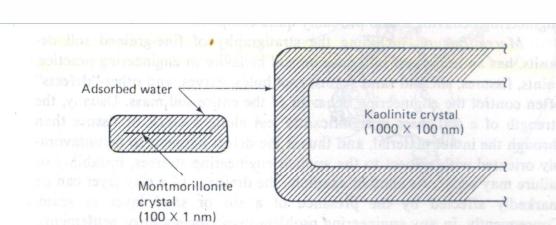


Fig. 4.17 Relative sizes of adsorbed water layers on sodium montmorillonite and sodium kaolinite (after Lambe, 1958a).

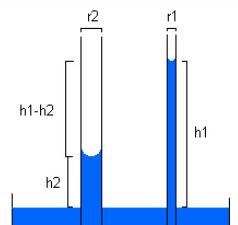


 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

FORMAS DE AGUA EN EL SUELO

Agua por Capilaridad: es la característica de muchos suelos de permitir el ascenso del nivel freático a través de sus poros

En muchos suelos esta puede alcanzar grandes alturas, modificando con ello las características de los suelos a los que afecta.



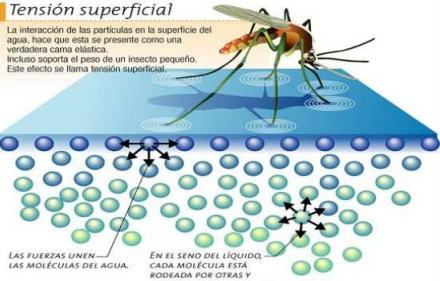


 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

TENSION SUPERFICIAL

La tensión superficial es una de las principales características del agua. La cual se da principalmente en la interfase formada cuando está en contacto con otros materiales.

Tensión superficial, condición existente en la superficie libre de un líquido, semejante a las propiedades de una membrana elástica bajo tensión.



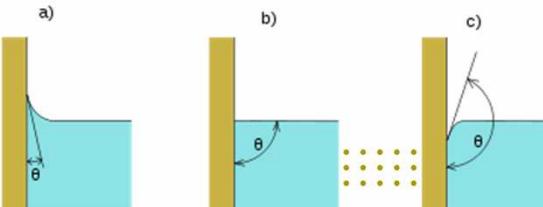


 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

ASCENCION CAPILAR

La Capilaridad, es la elevación de la superficie de un líquido en la zona de contacto con un sólido, por ejemplo, en las paredes de un tubo.

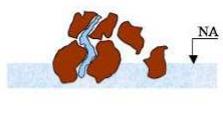
Este fenómeno es una excepción a la ley hidrostática de los vasos comunicantes, según la cual una masa de líquido tiene el mismo nivel en todos los puntos.





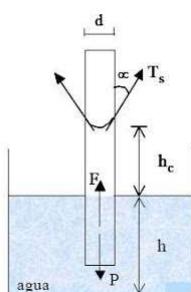
 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

ASCENCION CAPILAR



$$F = P$$

$$T_s \cdot \cos \alpha \cdot d \cdot \pi = \gamma_a \cdot h_c \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$h_c = \frac{4 \cdot T_s}{d \cdot \gamma_a} \cdot \cos \alpha \rightarrow \text{Ley de Jurin}$$


La altura de ascension capilar es inversamente proporcional al diámetro del tubo

$$h_c = \frac{4T}{\rho_w gd}$$

$$T = 0.073 \text{ N/m}$$

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$h_c = \frac{0.03m}{d(mm)}$$

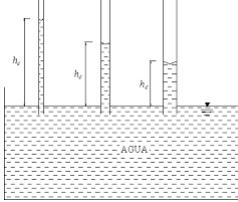


 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

ASCENCION CAPILAR

	Sueltas	Densas
Arenas gruesas	0.03 – 0.12 m	0.04 – 0.15 m
Arenas medias	0.12 – 0.50 m	0.35 – 1.10 m
Arenas finas	0.30 – 2.0 m	0.40 – 3.5 m
Limos	1.5 – 10 m	2.5 – 12 m
Arcillas	$\geq 10 \text{ m}$	

Las alturas capilares son bastante significativas, en especial para los suelos de grano finos







ASCENCION CAPILAR

A una mayor tensión capilar, existe una mayor tensión de contacto entre partículas y por lo tanto una mayor resistencia friccional entre los granos.

En arenas, esta capa de agua que rodea a las partículas resulta en una “cohesión aparente”

Los granos son mantenidos juntos y la estructura resultante (aunque sea un suelo de baja densidad), es bastante estable tanto como se encuentren presentes los meniscos capilares.

Esto permite excavaciones en lugares en los cuales en condiciones normales sería imposible.



FLUJO DE AGUA FREATICA

De qué se trata?: Movimiento del agua subterránea y de las fuerzas resultantes de este proceso

Despreciando los cambios de densidad a los niveles de esfuerzo, el flujo de agua en los suelos se considera *incompresible*

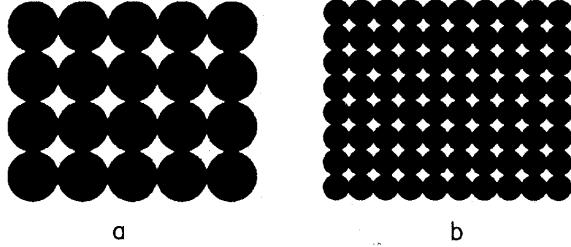
- Transitorio: varía en función del tiempo
- Estacionario: es independiente del tiempo
- Laminar: paralelo y por capas sin mezclarse (Bajas velocidades)

• Turbulento: Desordenado (Altas velocidades)



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Coeficiente de permeabilidad



$$v = ki$$

Es la propiedad de los suelos que establece con que facilidad un fluido puede pasar a través de sus poros sin alterar su estructura interna.

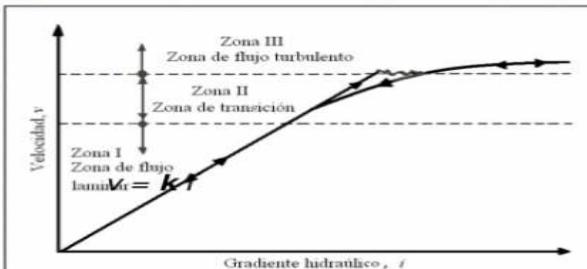


 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

FLUJO DE AGUA

Ley de Darcy

El flujo de agua a través de los suelos es gobernado por la ley de Darcy, que establece que la velocidad media de flujo es proporcional al gradiente hidráulico.

$$v \propto i$$


Naturaleza de la variación de v con el gradiente hidráulico i .

En piedras, grava y arenas gruesas el flujo puede ser turbulento. En ese caso la relación no es lineal.

La velocidad del flujo varía con el incremento del gradiente hidráulico (i)





FLUJO DE AGUA

El gradiente hidráulico (i): es la perdida de energía o de cabeza h por unidad de longitud l

$$i = \frac{h}{l}$$

Para muchos suelos, la velocidad del flujo es tan pequeña que ésta es considerada como *laminar*.



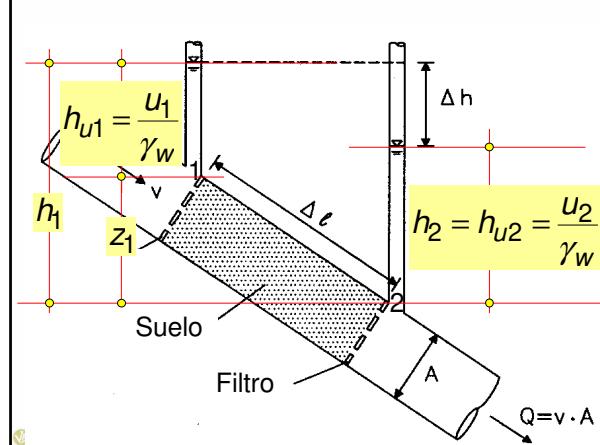
La velocidad del flujo v es proporcional a i

$$v = ki$$



LEY DE DARCY (1856)

v es proporcional a la altura de energía Δh que es reducida en la longitud Δl



$$v = k \frac{\Delta h}{\Delta l} = ki$$

k : Permeabilidad o conductividad hidráulica

i : gradiente hidráulico o caída hidráulica

$$\Delta h = h_1 - h_2$$



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA |  LEY DE DARCY

Combinando la ecuación de Darcy con la ley de conservación de masa

Para flujos incompresibles tenemos:

$$v = ki \quad q = kiA = k \frac{\Delta h}{L} A$$

Donde k es el coeficiente de Darcy de permeabilidad

La permeabilidad es la propiedad del suelo que describe como el agua fluye a través de los suelos.



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Coeficiente de permeabilidad

A partir de la ecuación de Darcy: $v = ki$

k es llamado coeficiente de permeabilidad de Darcy o simplemente permeabilidad

Expresa o describe como fluye el agua a través de los suelos.

Parámetro necesario para diseño de trabajos que involucren la filtración de agua a través de los suelos



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Coeficiente de permeabilidad

k tiene unidades de velocidad (m/s), ya que i es adimensional.

- Validez de la ley de Darcy:

La ley de Darcy es válida con las siguientes restricciones:

- El suelo debe ser isotrópico
- El flujo debe ser laminar
- Para suelos que no sean altamente arcillosos



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Validez de la ley de Darcy:

- Cuidadosos experimentos muestran que es válida para un amplio rango de tipos de suelos con gradientes hidráulicos.
- En gravas muy limpias y rocas de relleno con gradaciones abiertas, debido a que el flujo puede ser turbulento, es posible que la ley de Darcy no sea válida.
- En arcillas a muy bajos gradientes hidráulicos la relación de v con i no es lineal.



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Validez de la ley de Darcy:

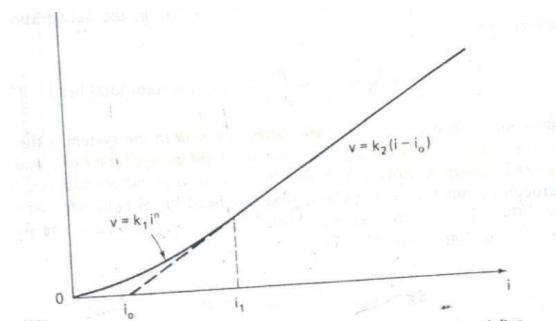


Fig. 7.4 Deviation from Darcy's law observed in Swedish clays (after Hansbo, 1960).

En la medida en la que disminuye el gradiente hidráulico en cierto tipo de arcillas, se observa que la ley de Darcy no es del todo válida.

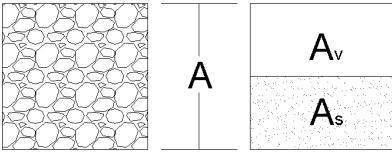


 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Velocidad de descarga e infiltración

En la Ec. De Darcy se hizo la suposición de tomar toda el área de la sección transversal para el flujo. Calculando la velocidad real para un ancho unitario de muestra con base en el área de los vacíos, tenemos:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{A_v}{A_s} \quad n = \frac{V_v}{V} \quad q = vA \quad q = v_s A_v$$

$$A = A_v + A_s \quad q = v(A_v + A_s) = A_v v_s$$


$$V_v = \frac{q}{A} \quad V_s = \frac{q}{A_v}$$

$$v_s = \frac{v(A_v + A_s)}{A_v} \quad v_s = \frac{v(e+1)}{e}$$

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



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Velocidad de descarga e infiltración

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

Dado que $0\% < n < 100\%$

La velocidad de infiltración es siempre mayor que la velocidad superficial o de descarga



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Métodos para medir la permeabilidad

Se puede estimar experimentalmente en el laboratorio (permeámetro y consolidación) y en el campo (bombeo).

Por lo general:

- Laboratorio para suelos arcillosos
- Campo para suelos granulares de drenaje libre

Debido principalmente a la dificultad de obtener muestra inalteradas de arenas y gravas.





Métodos para medir la permeabilidad

Métodos de laboratorio: se usa principalmente el permeametro, los hay de dos tipos:

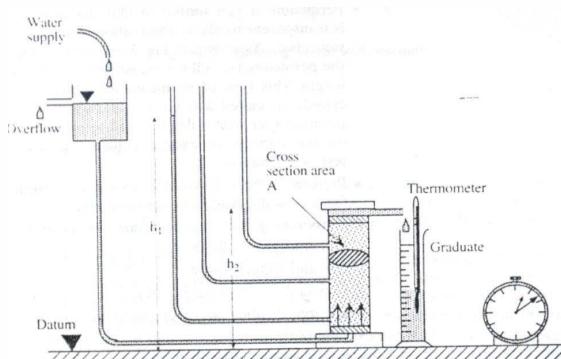
- De cabeza constante
- De cabeza variable

Permeametro de cabeza constante:

Se usa principalmente para suelos de grano grueso



Permeametro de cabeza constante:



Se permite pasar agua a través de la muestra de suelo bajo una condición de cabeza hidráulica estable, mientras se registra el tiempo requerido para el paso de cierta cantidad de agua





Permeametro de cabeza constante:

El volumen de agua recogido Q a un tiempo t está dado por: $Q = Avt$

Pero: $v = ki$ $i = \frac{h}{L}$ Donde:
 k =Coeficiente de permeabilidad
 Q = Volumen de agua que pasa por la muestra
 L = Longitud de la muestra
 A = Área de la muestra
 h = Carga Hidráulica
 t = Tiempo del ensayo

$$\text{Entonces: } Q = Ak \frac{h}{L} t$$

$$k = \frac{QL}{Aht}$$



Ejemplo 1:

Para una prueba de permeabilidad de carga constante en laboratorio sobre una arena fina, se dan los siguientes valores:

- Longitud de la muestra 300 mm
- Diámetro de la muestra 150 mm
- Diferencia de carga 500 mm
- Agua recolectada en 5 min 350 cm³

$$k = \frac{QL}{Aht}$$

Determine:

- a. La conductividad hidráulica, k , del suelo (cm/s)
- b. La velocidad de descarga (cm/s)
- c. La velocidad de filtración (cm/s)

$$v = ki$$

La relación de vacíos de la muestra de suelo es 0.46. $i = \frac{h}{L}$

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



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Ejemplo 1:

Para una prueba de permeabilidad de carga constante en laboratorio sobre una arena fina, se dan los siguientes valores:

- $L = 300 \text{ mm} = 30\text{cm}$
- $\phi = 150 \text{ mm} = 15\text{cm}$
- $h = 500 \text{ mm} = 50\text{cm}$
- $t = 5\text{min} = 300 \text{ seg}$
- $Q = 350 \text{ cm}^3$

$$k = \frac{QL}{Aht}$$

$$A = \frac{\pi(15\text{cm})^2}{4} = 176.714\text{cm}^2$$

Determine:

- a. La conductividad hidráulica, k , del suelo (cm/s)

$$k = \frac{350\text{cm}^3 * 30\text{cm}}{176,714\text{cm}^2 * 50\text{cm} * 300\text{seg}} \quad k = 3.96 \times 10^{-3}\text{cm/s}$$



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Ejemplo 1:

Para una prueba de permeabilidad de carga constante en laboratorio sobre una arena fina, se dan los siguientes valores:

- $L = 300 \text{ mm} = 30\text{cm}$
- $\phi = 150 \text{ mm} = 15\text{cm}$
- $h = 500 \text{ mm} = 50\text{cm}$
- $T = 5\text{min} = 300 \text{ seg}$
- $Q = 350 \text{ cm}^3$

$$v = ki$$

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

Determine:

- b. La velocidad de descarga (cm/s)

$$v = ki \quad v = 3.96 \times 10^{-3} \text{ cm / s} * \left(\frac{50 \text{ cm}}{30 \text{ cm}} \right)$$

$$v = 6.6 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Ejemplo 1:

Para una prueba de permeabilidad de carga constante en laboratorio sobre una arena fina, se dan los siguientes valores:

- $L = 300 \text{ mm} = 30\text{cm}$
- $\phi = 150 \text{ mm} = 15\text{cm}$
- $h = 500 \text{ mm} = 50\text{cm}$
- $T = 5\text{min} = 300 \text{ seg}$
- $Q = 350 \text{ cm}^3$

Determine:

- c. La velocidad de filtración (cm/s) $e = 0.46$

$$v_s = \frac{v}{n} \quad v_s = 6,6 \times 10^{-3} \text{ cm/s} \left(\frac{1+0.46}{0.46} \right)$$

$$v = 20.95 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$


 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Ejemplo 2:

En una prueba de permeabilidad a cabeza constante, se midieron 60 cm^3 de agua que se filtraron a través de una muestra de 10 cm de diámetro y 15 cm de altura durante un tiempo de $1,5 \text{ minutos}$

Calcular el coeficiente de permeabilidad hidráulica de la muestra, si la perdida de carga es de 300 cm

$L = 15\text{cm}$	$k = \frac{QL}{Aht}$
$\phi = 10 \text{ cm}$	
$h = 300 \text{ cm}$	
$t = 1,5\text{min} = 90 \text{ seg}$	$A = \frac{\pi(10\text{cm})^2}{4} = 78.539\text{cm}^2$
$Q = 60 \text{ cm}^3$	

$$k = \frac{(60\text{cm}^3)(15\text{cm})}{(78.539\text{cm}^2)(90\text{s})(30\text{cm})}$$

$$K = 4,244 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$$


Ejemplo 2:

En una prueba de permeabilidad a cabeza constante, se midieron 60 cm^3 de agua que se filtraron a través de una muestra de 10 cm de diámetro y 15 cm de altura durante un tiempo de $1,5 \text{ minutos}$

$L = 15\text{cm}$ $K = 4,244 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$

$\phi = 10 \text{ cm}$

$h = ?$

$t = 1,5 \text{ min} = 90 \text{ seg}$

$Q = 200 \text{ cm}^3$

$k = \frac{QL}{Aht}$

Calcular la carga hidráulica necesaria para que el volumen filtrado sea de 200cm^3

$A = \frac{\pi(10\text{cm})^2}{4} = 78.539\text{cm}^2$

$h = 1000 \text{ cm}$

 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Ejemplo 2:

En una prueba de permeabilidad a cabeza constante, se midieron 60 cm^3 de agua que se filtraron a través de una muestra de 10 cm de diámetro y 15 cm de altura durante un tiempo de $1,5 \text{ minutos}$

$L = 15\text{cm}$ $K = 4,244 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$
 $\phi = 10 \text{ cm}$ $k = \frac{QL}{Aht}$
 $h = 300 \text{ cm}$
 $t = ?$
 $Q = 300 \text{ cm}^3$

Calcular el tiempo necesario para que el volumen filtrado sea de 300cm^3

$$A = \frac{\pi(10\text{cm})^2}{4} = 78.539\text{cm}^2$$
$$t = 450 \text{ seg}$$






Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

Ejemplo 3:

$$k = \frac{QL}{Aht}$$

Se construye un canal paralelo a un río, como señala la figura. Si la arena que muestra la figura indicada presenta una conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad $K = 0.0065 \text{ cm/seg}$, calcular cuál es la pérdida de agua que tendrá el canal por infiltración en $\text{cm}^3/\text{seg}/\text{Km}$.

Q= ?
L=100m=10000cm
t=1 seg
h=20m=2000cm
A=150cm*100.000cm=15.000.000cm²

$Q=19500 \text{ cm}^3/\text{seg} / \text{Km}$

[f](#) [g](#) [t](#)

Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

Permeametro de cabeza variable: para suelos de grano fino

$$q = vA$$

Procedimiento similar al ensayo de cabeza cte. La muestra se satura con agua y luego se permite pasar agua a través de la muestra de suelo bajo una condición de cabeza hidráulica variable, mientras se registran: el tiempo requerido para el paso de cierta cantidad de agua

[f](#) [g](#) [t](#)

 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Permeametro de cabeza variable: $q = vA$

La velocidad de caída del agua en el recipiente es: $v = -\frac{dh}{dt}$

El flujo que entra a la muestra es: $q_{entra} = -a \frac{dh}{dt}$

Y el flujo que sale de la muestra es: $q_{sale} = k(\frac{h}{L})A$

Por la ecuación de continuidad: $-a \frac{dh}{dt} = k(\frac{h}{L})A$

Separando variables e integrando $-a \int_{h_2}^{h_1} \frac{dh}{h} = k \frac{A}{L} \int_{t_1}^{t_2} dt$
obtenemos: $a \ln \frac{h_1}{h_2} = k \frac{A}{L} \Delta t$

Por lo tanto: $k = \frac{aL}{A \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$; $k = \frac{2.302 aL}{A \Delta t} \log \frac{h_1}{h_2}$



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Permeametro de cabeza variable:

Donde: $k = \frac{2.302 aL}{A \Delta t} \log \frac{h_1}{h_2}$

a = área del tubo vertical (Bureta)

A, L = Área y longitud de la muestra de suelo

Δt = tiempo para que la cabeza disminuya de h_1 a h_2



Ejemplo 3:

En una prueba de permeabilidad de cabeza variable se ensayó una muestra cilíndrica de diámetro 5 cm y su altura el doble de su diámetro. El diámetro interior del tubo capilar del permeámetro mide 1,25 cm y al empezar la prueba tenía agua hasta una altura de 150 cm. Después de 445 segundos, el nivel del agua en el tubo piezómetro se encontraba a una altura de 140 cm. Calcular el coeficiente de permeabilidad

$\phi_m = 5\text{cm}$
 $L = 10\text{cm}$
 $\phi_b = 1,25\text{cm}$
 $h_1 = 150\text{cm}$
 $h_2 = 140\text{cm}$
 $t = 445\text{ seg}$

$$k = \frac{2.302 aL}{A \Delta t} \log \frac{h_1}{h_2}$$

 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Ejemplo 4:

En una prueba de permeabilidad de cabeza variable se ensayó una muestra cilíndrica de diámetro 5 cm y su altura el doble de su diámetro. El diámetro interior del tubo capilar del permeámetro mide 1,25 cm y al empezar la prueba tenía agua hasta una altura de 150 cm. Después de 445 segundos, el nivel del agua en el tubo piezómetro se encontraba a una altura de 140 cm.

$\phi_m = 5\text{cm}$	$k = 9.686 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$
$L = 10\text{cm}$	$A = 19.635\text{cm}^2$
$\phi_b = 1,25\text{cm}$	$k = \frac{2.302 aL}{A \Delta t} \log \frac{h_1}{h_2}$
$h_1 = 150\text{cm}$	$a = 1.2271\text{cm}^2$
$h_2 = ??$	
$t = 600 \text{ seg}$	

¿Cuál será la carga de agua para un tiempo de 10 minutos? $t = 600 \text{ seg}$

 $h_2 = 136,676\text{cm}$ 



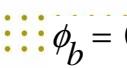
 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Ejemplo 4:

En una prueba de permeabilidad de cabeza variable se ensayó una muestra cilíndrica de diámetro 5 cm y su altura el doble de su diámetro. El diámetro interior del tubo capilar del permeámetro mide 1,25 cm y al empezar la prueba tenía agua hasta una altura de 150 cm. Después de 445 segundos, el nivel del agua en el tubo piezómetro se encontraba a una altura de 140 cm.

$\phi_m = 5\text{cm}$	$k = 9.686 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$
$L = 10\text{cm}$	$A = 19.635\text{cm}^2$
$\phi_b = 1,25\text{cm}$	$k = \frac{2.302 aL}{A \Delta t} \log \frac{h_1}{h_2}$
$h_1 = 150\text{cm}$	
$h_2 = 130 \text{ cm}$	
$t = 480 \text{ seg}$	

¿Cuál debería ser el diámetro del tubo vertical (bureta) para que la carga caiga de 150cm a 130cm en 8 minutos?

 $a = 0,638\text{cm}^2$  $\phi_b = 0,901\text{cm}$ 

 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Ejemplo 4:

En una prueba de permeabilidad de cabeza variable se ensayó una muestra cilíndrica de diámetro 5 cm y su altura el doble de su diámetro. El diámetro interior del tubo capilar del permeámetro mide 1,25 cm y al empezar la prueba tenía agua hasta una altura de 150 cm. Después de 445 segundos, el nivel del agua en el tubo piezómetro se encontraba a una altura de 140 cm.

$\phi_m = 5\text{cm}$ $k = 9.686 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$
 $L = 10\text{cm}$
 $\phi_b = ??$ $A = 19.635 \text{cm}^2$ $k = \frac{2.302}{A \Delta t} aL \log \frac{h_1}{h_2}$
 $h_1 = 150\text{cm}$
 $h_2 = 140\text{cm}$
 $t = 445 \text{ seg}$

¿Cuál debería ser el diámetro del tubo vertical (bureta) para que la carga caiga de 150cm a 130cm en 8 minutos? $t=480\text{seg}$

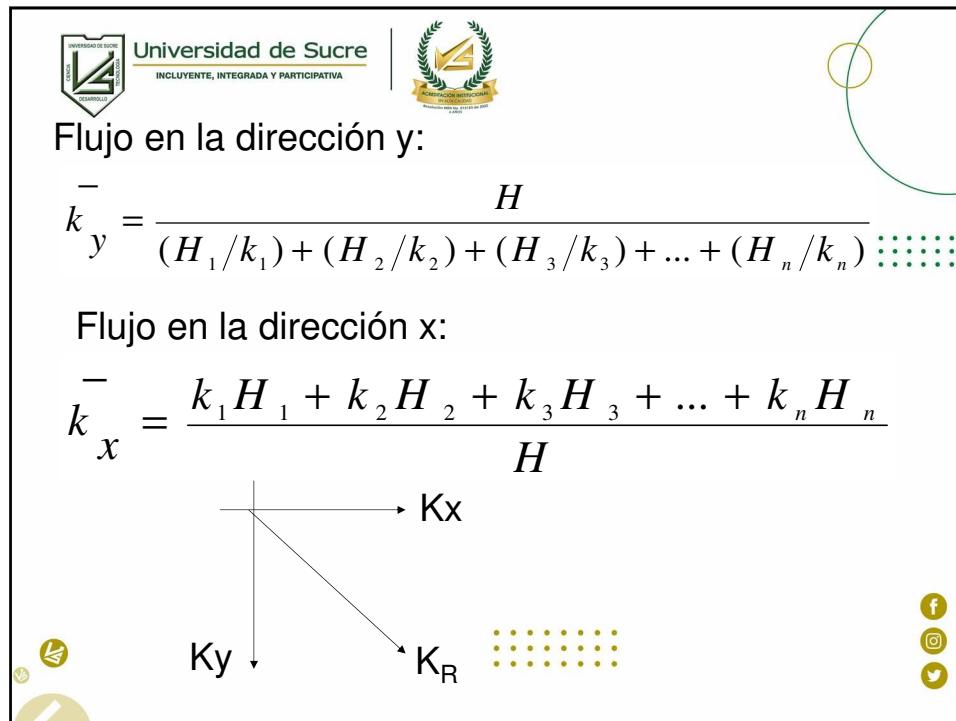
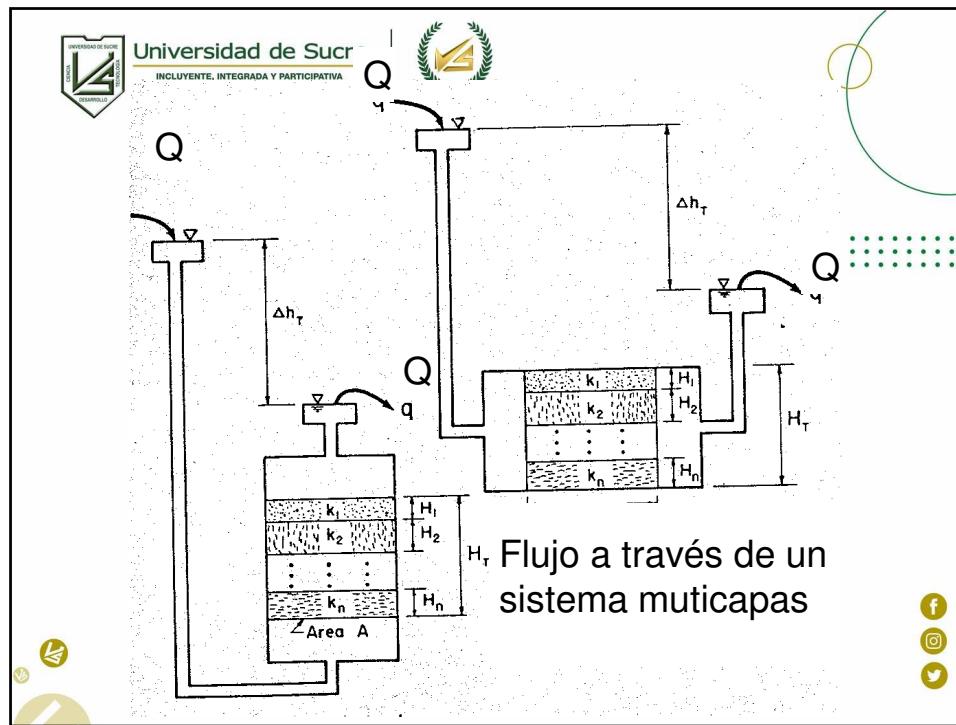


 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

PERMEABILIDAD ANISOTROPICA

- No se ha considerado el efecto de la variación del coeficiente de permeabilidad de un punto a otro y de una dirección a otra.
- Caso a tratar: Flujo laminar normal y paralelo a las capas de un sistema multicapa paralelo
- Como el flujo puede ocurrir tanto horizontal como verticalmente, los dos casos deben ser considerados por separado.





Ejemplo 4:

Un suelo no homogéneo, consistente de tres capas de suelos con diferentes permeabilidades, como se muestra en la figura

The diagram shows a soil profile with three layers. The top layer has a thickness of $H_1 = 2 \text{ m}$, a vertical permeability coefficient of $K_{1V} = 0.000972 \text{ cm/seg}$, and a horizontal permeability coefficient of $K_{1H} = 0.00162 \text{ cm/seg}$. The middle layer has a thickness of $H_2 = 3 \text{ m}$, a vertical permeability coefficient of $K_{2V} = 0.0000159 \text{ cm/seg}$, and a horizontal permeability coefficient of $K_{2H} = 0.0000242 \text{ cm/seg}$. The bottom layer has a thickness of $H_3 = 2.5 \text{ m}$, a vertical permeability coefficient of $K_{3V} = 0.0000253 \text{ cm/seg}$, and a horizontal permeability coefficient of $K_{3H} = 0.0000326 \text{ cm/seg}$.

- Calcular la relación entre los coeficientes promedios horizontal y vertical K_x/K_y
- Calcular el coeficiente de permeabilidad resultante del conjunto K_R

De la ecuación:

$$\bar{k}_x = \frac{k_1 H_1 + k_2 H_2 + k_3 H_3 + \dots + k_n H_n}{H}$$

Reemplazando valores, tenemos:

$$\bar{k}_x = \frac{(1.62 \times 10^{-3} \text{ cm/s})(200\text{cm}) + (2.42 \times 10^{-4} \text{ cm/s})(300\text{cm}) + (3.26 \times 10^{-5} \text{ cm/s})(250\text{cm})}{200\text{cm} + 300\text{cm} + 250\text{cm}}$$

$$\bar{k}_x = 4.525 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$$

De la ecuación:

$$\bar{k}_y = \frac{H}{(H_1/k_1) + (H_2/k_2) + (H_3/k_3) + \dots + (H_n/k_n)}$$

Reemplazando valores, tenemos:

$$\bar{k}_y = \frac{200\text{cm} + 300\text{cm} + 250\text{cm}}{\frac{200\text{cm}}{9.72 \times 10^{-3} \text{ cm/s}} + \frac{300\text{cm}}{1.59 \times 10^{-5} \text{ cm/s}} + \frac{250\text{cm}}{2.53 \times 10^{-5} \text{ cm/s}}}$$

$$\bar{k}_y = 2.59 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

- Calcular la relación entre los coeficientes promedios horizontal y vertical

$$\frac{\bar{k}_x}{\bar{k}_y} = \frac{4.525 \times 10^{-4} \text{ cm/s}}{2.59 \times 10^{-5} \text{ cm/s}} = 17.47$$

- Calcular el coeficiente de permeabilidad promedio del conjunto

$$k = \sqrt{(4.525 \times 10^{-4} \text{ cm/s})^2 + (2.59 \times 10^{-5} \text{ cm/s})^2}$$

$$k = 4.54 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$$

• • • • •



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Ejemplo 6:

Para el suelo estratificado mostrado se sabe que la relación entre las permeabilidades media horizontal y la vertical es 3. Determine la permeabilidad media del suelo en el sentido horizontal.

5.60m.	$K_1 = 2.5 \times 10^{-7} \text{ cm/seg (CH)}$	$\frac{K_x}{K_y} = 3$
7.00m.	$K_2 = 2.8 \times 10^{-5} \text{ cm/seg (CL)}$	
6.40m.	$K_3 = 1.9 \times 10^{-3} \text{ cm/seg (SM)}$	$K_x = 3 K_y$

$$\bar{k}_y = \frac{H}{(H_1/k_1) + (H_2/k_2) + (H_3/k_3) + \dots + (H_n/k_n)}$$

$$\bar{k}_y = \frac{1900 \text{ cm}}{(560 \text{ cm})/(2.5 \times 10^{-7} \text{ cm/s}) + (700 \text{ cm})/(2.8 \times 10^{-5} \text{ cm/s}) + (640 \text{ cm})/(1.9 \times 10^{-3} \text{ cm/s})}$$

$$\bar{k}_y = 8.39 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$$

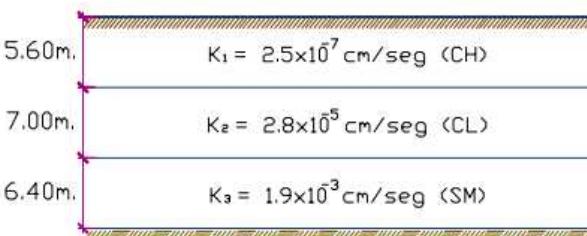
• • • • •



 Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA | 

Ejemplo 6:

Para el suelo estratificado mostrado se sabe que la relación entre las permeabilidades media horizontal y la vertical es 3. Determine la permeabilidad media del suelo en el sentido horizontal.



$$K_x = 3 K_y \quad \bar{k}_y = 8.39 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$$

$$K_x = 3(8.39 \times 10^{-7} \text{ cm/s}) \quad K_x = 2.516 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$



 Universidad de Sucre | 

PROBLEMA N° 7.- Un estrato de arena consta de 3 capas horizontales de igual espesor. El valor de K para la capa superior e inferior es de 1×10^{-4} cm. /seg. y el de la capa intermedia 1×10^{-2} cm./seg. ¿Cuál es la relación entre el coeficiente de permeabilidad medio del estrato en sentido horizontal y en sentido vertical?

