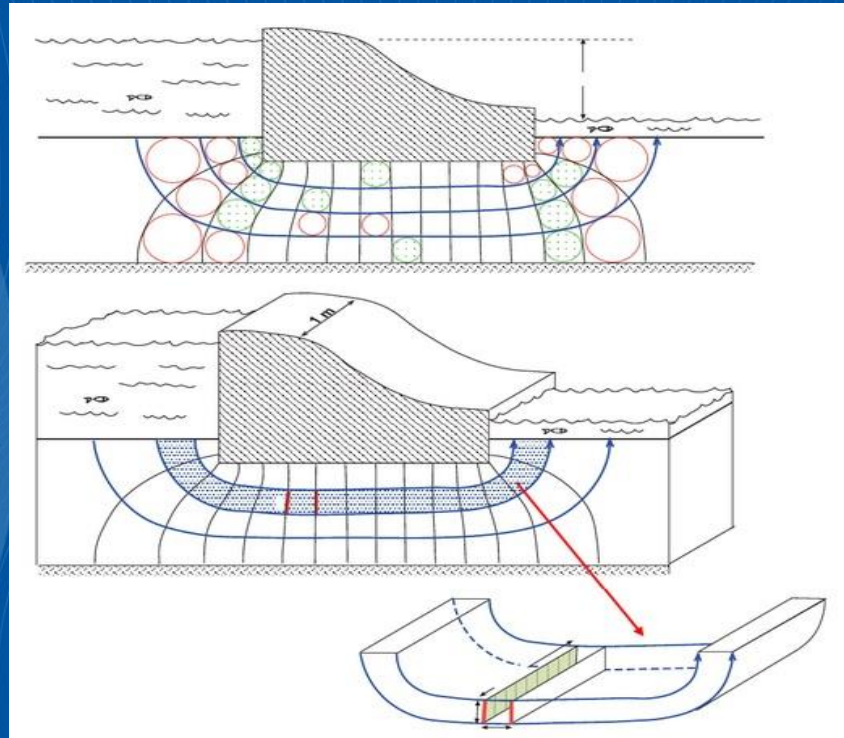


# Mecánica Avanzada de Suelos

## MCieTAT (UPCT)



## Tema 5

# Filtraciones (en medios porosos)

Prof. Gonzalo García Ros



# ÍNDICE

## Redes de flujo

Nociones básicas

Cómo se construyen las redes de flujo

Volumen de agua que pasa bajo la estructura

Presión intersticial y efectiva en cualquier punto

Empuje total sobre la base de la estructura

Centro de empujes sobre la base de la estructura

Ejercicio resuelto

En el laboratorio. Determinación de la permeabilidad con el permeámetro de carga constante

Flujo entre zanjas

Bombeo hacia un pozo. Solución gráfica

Bombeo hacia un pozo en acuífero confinado. Solución analítica de Thiem

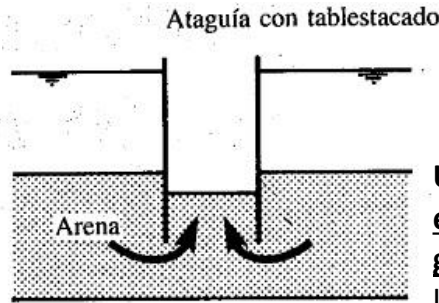
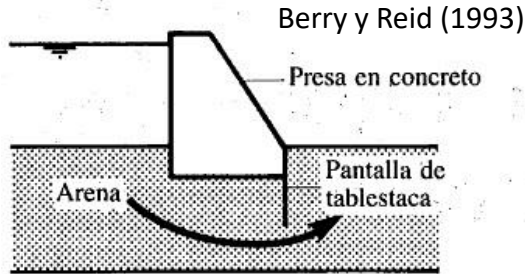
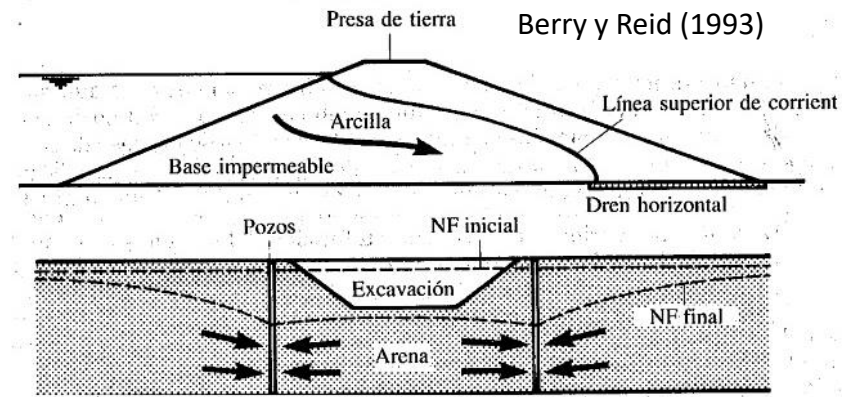
Bombeo hacia un pozo en acuífero libre. Solución analítica de Dupuit

Ideas finales

Referencias



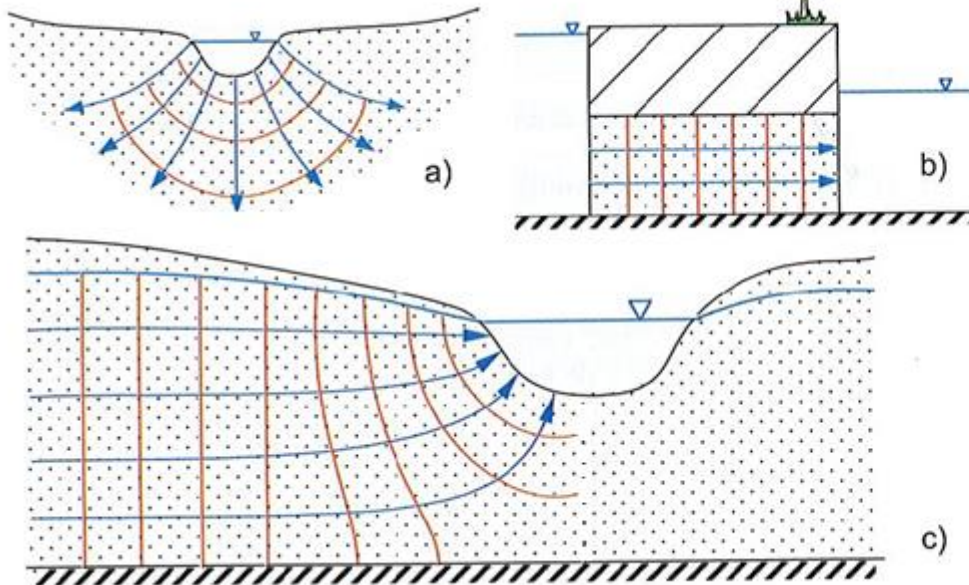
Para abordar problemas en los que se pretende **calcular el volumen de agua subterránea** que circula **bajo una estructuras hidráulica (filtraciones)**, **así como los empujes** sobre la misma, se recurre a un **método gráfico (no analítico)** conocido como **red de flujo**



Una **red de flujo** es una combinación bidimensional de **líneas equipotenciales y líneas de flujo** que **resuelven de forma gráfica** la ecuación de Laplace (ecuación de conservación de la masa) y **permiten describir el movimiento del agua a través del medio poroso.**

### Cómo se construyen las redes de flujo

#### 1. Algunos ejemplos para visualizar una red de flujo



$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad \text{Ecuación de Laplace}$$

- > Líneas de flujo = líneas de corriente
- Líneas equipotenciales

Ejemplos de diversas superficies piezométricas.

Trazado de las isopiezas.

a) Acuífero aluvial en el que el río recarga el acuífero.

b) Acuífero cautivo que conecta dos lagos.

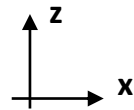
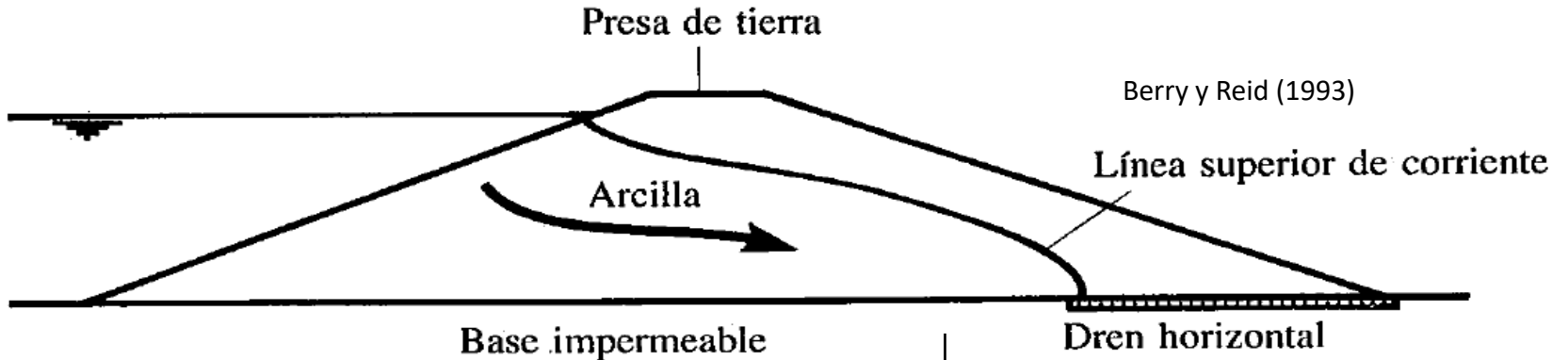
c) Acuífero aluvial en el que el río es recargado por el acuífero.

(modificado de Custodio y Llamas, 1983).

FCIHS (2009)

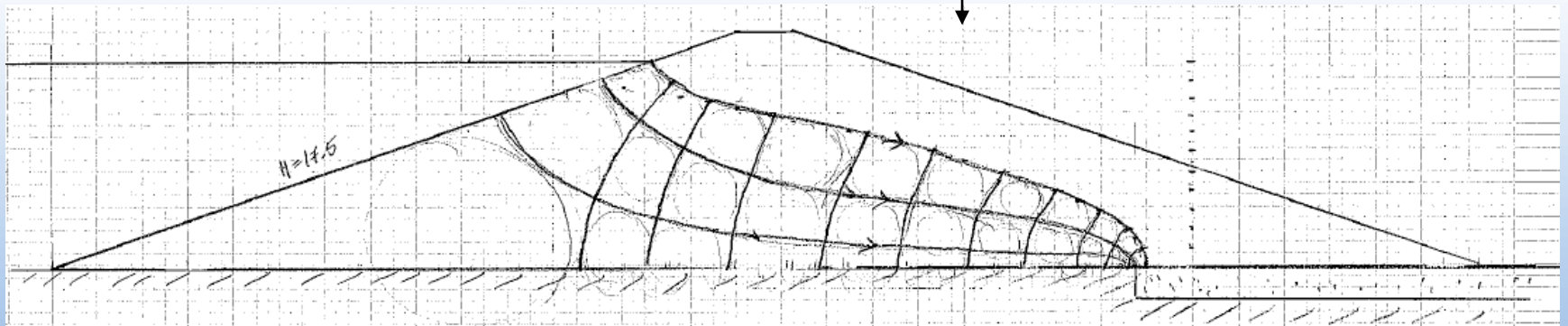


1. Algunos ejemplos para visualizar una red de flujo



$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Ecuación de Laplace

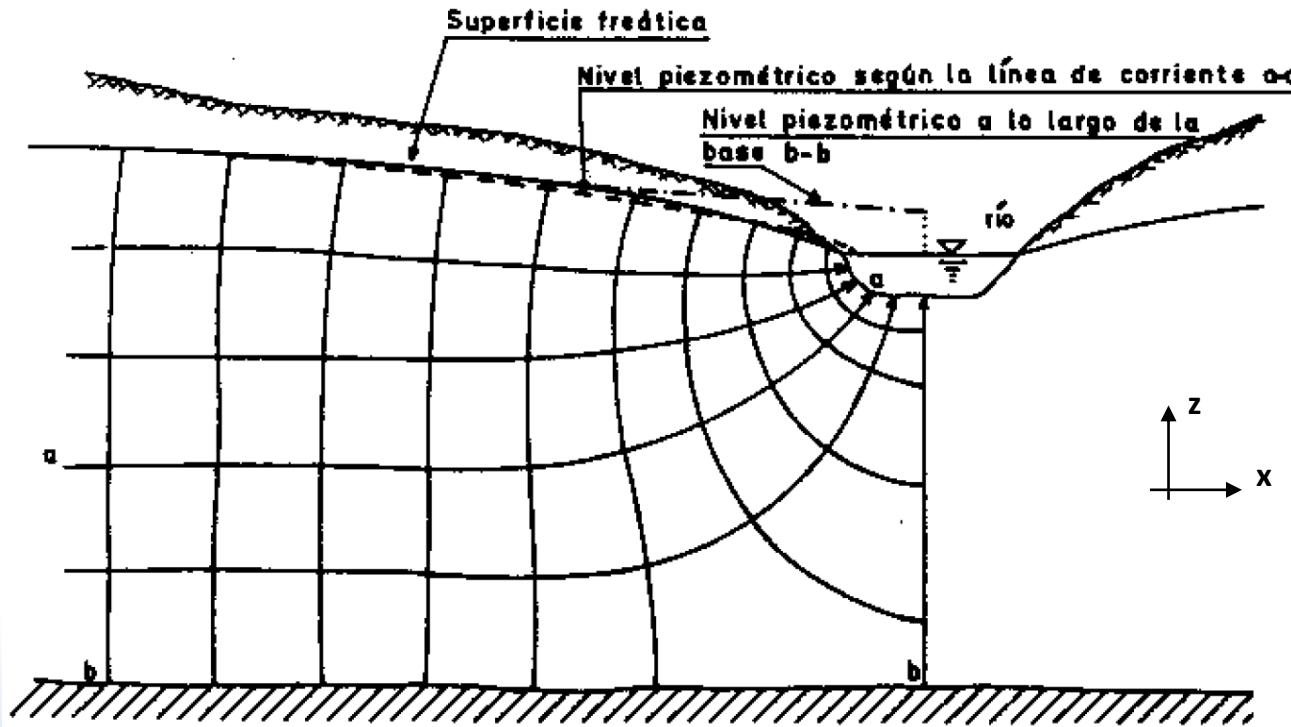




**Redes de flujo**

Cómo se construyen las redes de flujo

1. Algunos ejemplos para visualizar una red de flujo



$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Ecuación de Laplace

Custodio y Llamas (1976)

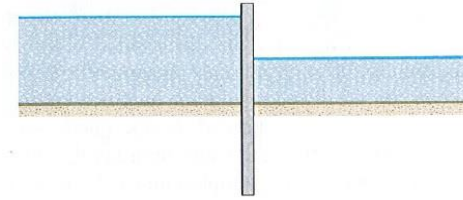
*Red de flujo aproximada en un acuífero libre drenado por un río poco penetrante. En las proximidades del río se crea un flujo con componentes verticales de velocidad. La superficie piezométrica es única lejos del río pero varía con la profundidad cerca del mismo, y puede llegar a quedar por encima del terreno.*



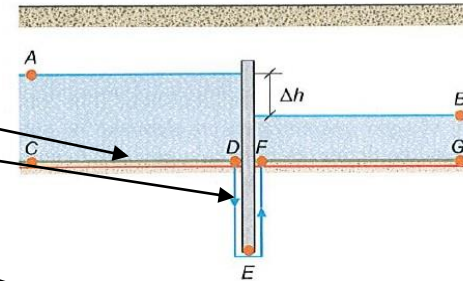
## Redes de flujo

Cómo se construyen las redes de flujo

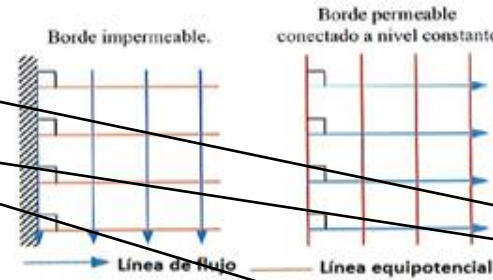
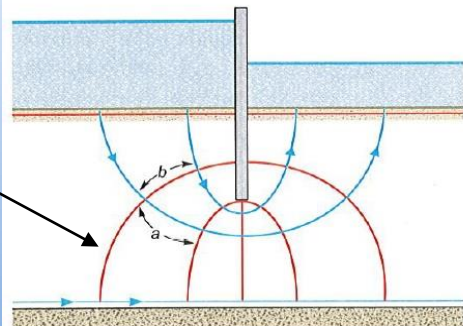
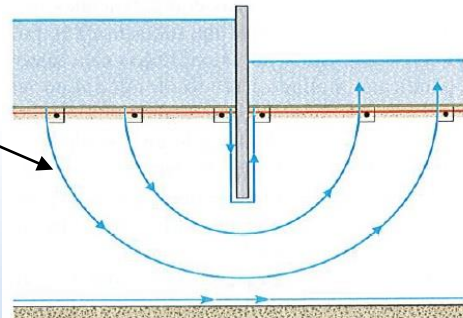
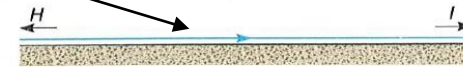
MCieTAT: Filtraciones (en medios porosos)



González de Vallejo et al. (2002)



FCIHS (2009)



- Entender la ecuación de Laplace para flujo en medios porosos: se define la función de corriente y de potencial.
- Problema tipo (lo dibujamos a escala a partir de los datos del enunciado)
- Establecemos las condiciones de contorno conocidas**
  - Potenciales** en la superficie del terreno
  - líneas de flujo** en el contacto con bordes impermeables o estructuras (paralelas al contorno de las mismas)
  - estado estacionario**
- Comenzamos dibujando las líneas de corriente, teniendo en cuenta que**
  - salgan perpendiculares a las equipotenciales de frontera
  - dos líneas de corriente nunca se cruzan entre sí
  - el nº de tubos de flujo ( $N_f$ ) no suele ser superior a  $4/5$ , y puede no ser un número exacto.
  - el agua recorre el mínimo camino posible
  - las líneas de flujo se estrechan donde aumenta la velocidad de flujo
- Empezamos a colocar líneas equipotenciales teniendo en cuenta que**
  - el salto de potencial entre dos líneas seguidas ( $\Delta h$ ) o caída de potencial ha de ser constante entre las condiciones de frontera, normalmente la superficie del terreno. Su valor será  $\Delta h = \Delta H / N_d$ , donde  $N_d$  es el número de caídas o saltos de potencial
  - las equipotenciales y las líneas de flujo han de ser siempre ortogonales
  - dentro de cada uno de los cuadrados curvilíneos que queden delimitados por dos equipotenciales y dos líneas de flujo contiguas, se debe poder inscribir una circunferencia tangente a sus lados, de forma que  $a \approx b \rightarrow$  cuadrado curvilíneo
- Si tras dibujar la red no se consigue un resultado satisfactorio, debemos rehacer el diseño hasta que se satisfagan todos los requisitos citados en los puntos 5 y 6. Cada problema tiene como solución distintas redes de flujo, aunque el cociente  $N_f / N_d$  debe ser constante en las distintas soluciones planteadas. A este cociente se le conoce con el nombre de Factor geométrico del problema

G. García. UPCT

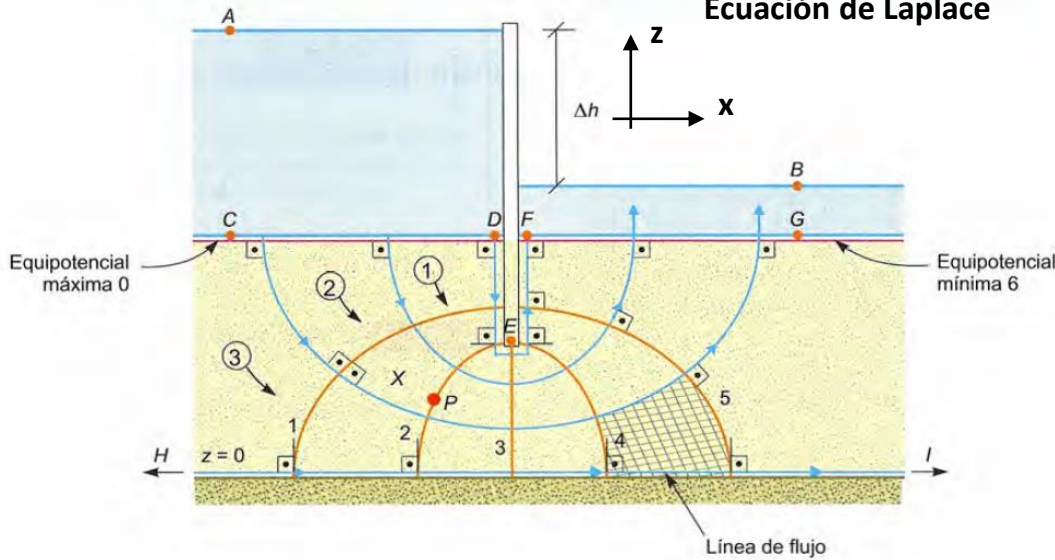


# Redes de flujo

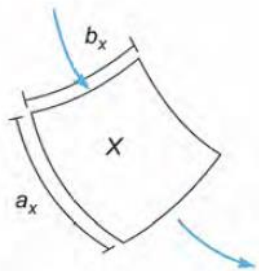
Cómo se construyen las redes de flujo

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Ecuación de Laplace



González de Vallejo et al. (2002)



$$q_x = k \frac{N_d}{a_x} b_x$$

- ①, ②, ③: Canales de flujo
- 0, 1, 2, ... 6: Equipotenciales
- 0-1: 1.º "salto"
- 1-2: 2.º "salto"
- .....
- 5-6: 6.º "salto"

## MCieTAT: Filtraciones (en medios porosos)

Se asume que el movimiento del agua se produce principalmente en el plano XZ, por lo que los cálculos se pueden considerar por unidad de longitud, en la dirección "y" (perpendicular al papel), como representativos del patrón de flujo bajo la estructura (por ejemplo, m<sup>3</sup>/dia·m)

### Fallos típicos:

**Dibujar equipotenciales fuera del terreno** (recuerda que no consideramos las pérdidas de energía fuera del medio poroso).

**Equivocarse con el valor de h en la superficie del terreno.**

**Confundir número de equipotenciales (n) con el número de saltos (n<sub>e</sub> = n - 1).**

**Confundir, en los cálculos, ΔH (total) con Δh (ΔH/n<sub>e</sub>).**

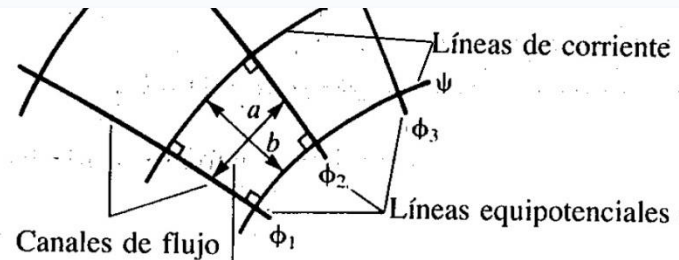


Figura curvilínea cuadrada; todos los ángulos son rectos y a = b

Berry y Reid (1993)

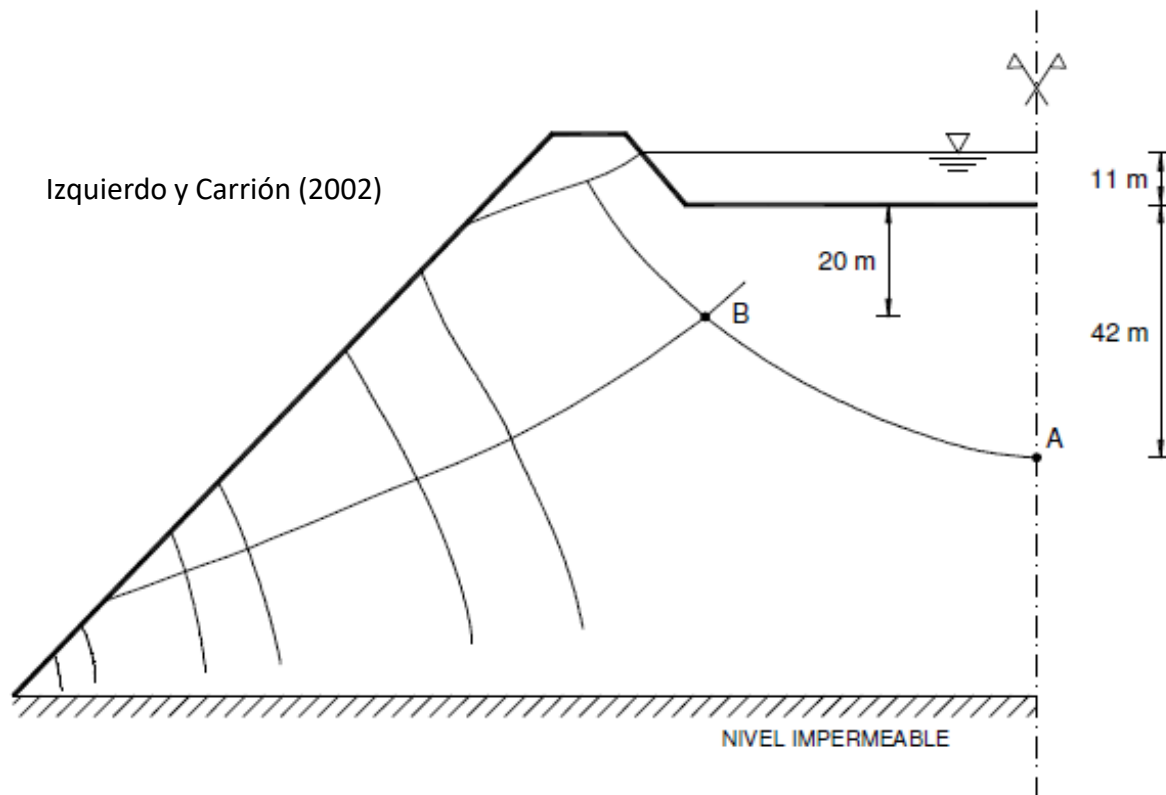


**Redes de flujo**

Cómo se construyen las redes de flujo

En la balsa indicada se pide:

Completar la red de flujo, indicándose las equipotenciales y las líneas de corriente de contorno.





El fondo de la balsa es una superficie equipotencial. El contacto con el nivel impermeable y el eje de simetría son líneas de corriente.

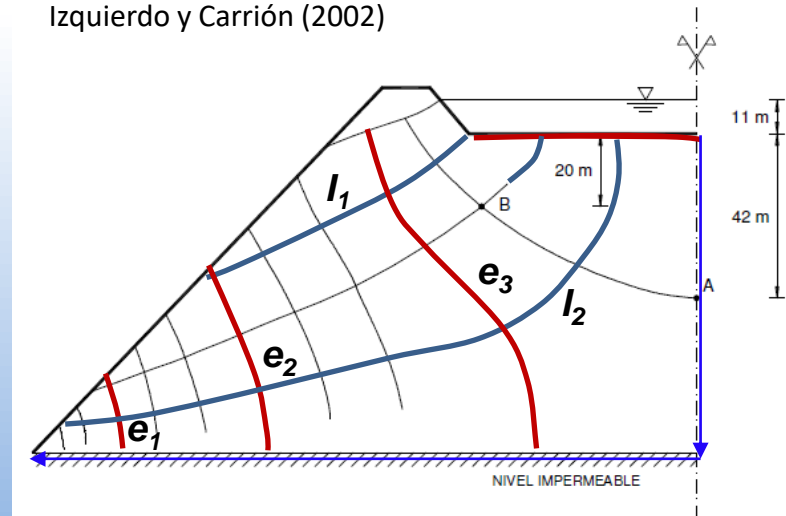
Para completar la red de flujo (figura 2.19), se debe comenzar prolongando la línea de corriente que pasa por el punto **B** hasta el fondo de la balsa, cuya intersección debe ser ortogonal ya que se trata de una superficie equipotencial.

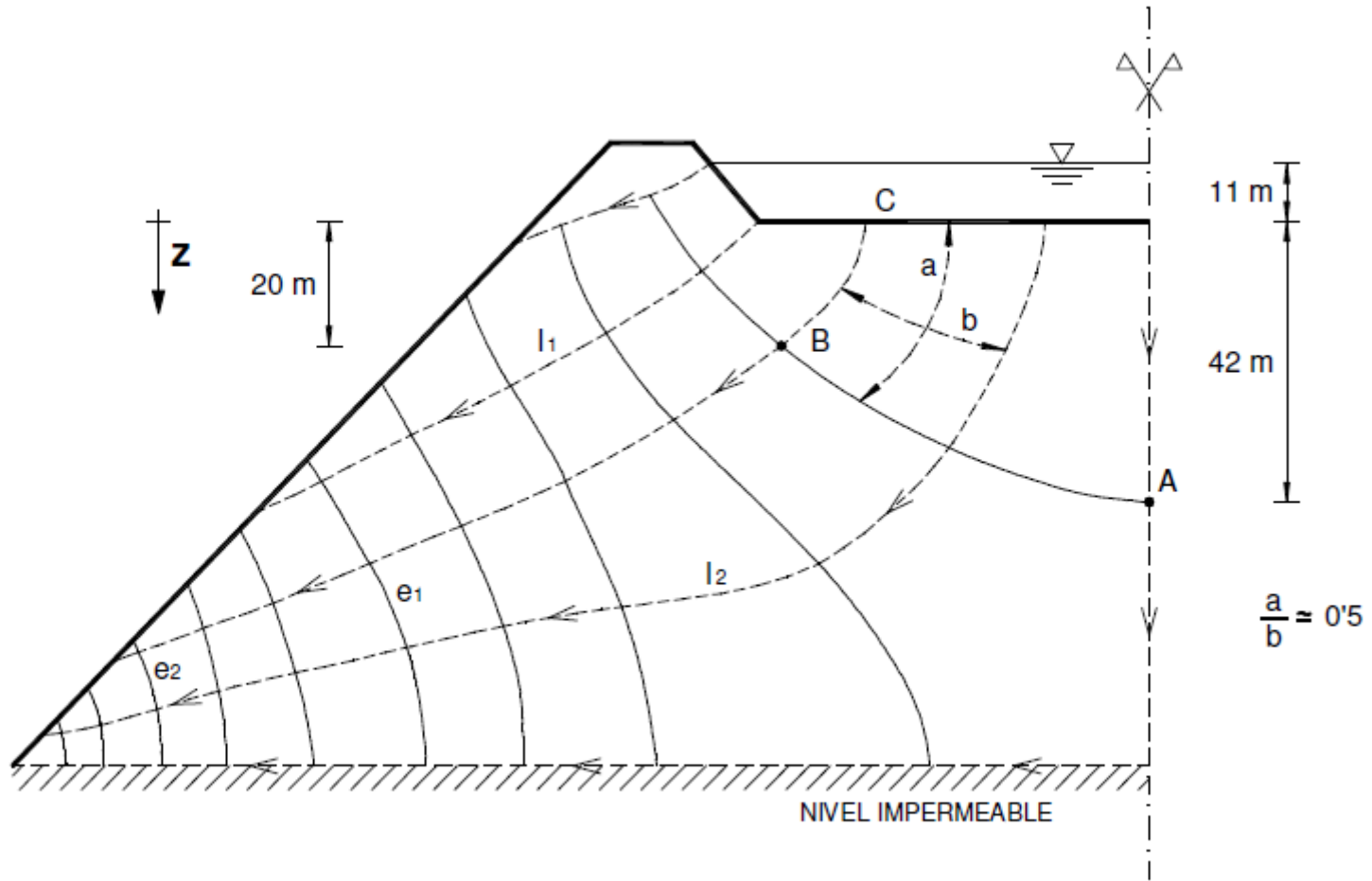
Se hace necesario a continuación trazar la línea de corriente  $I_1$  para formar los primeros cuadrados curvilíneos. La inserción de las equipotenciales  $e_1$  y  $e_2$  completan la formación de los cuadrados curvilíneos en estos dos tubos de corriente formados. Finalmente, es preciso trazar la línea de corriente  $I_2$  que delimita el tercer tubo de corriente y un cuarto y último tubo de corriente incompleto y en el que la relación  $b/a \approx 0'5$ .

En total, resultan 3'5 tubos de corriente.

La condición de perpendicularidad entre líneas de corriente y equipotenciales es muy restrictiva limitando mucho el trazado.

Izquierdo y Carrión (2002)





Izquierdo y Carrión (2002)



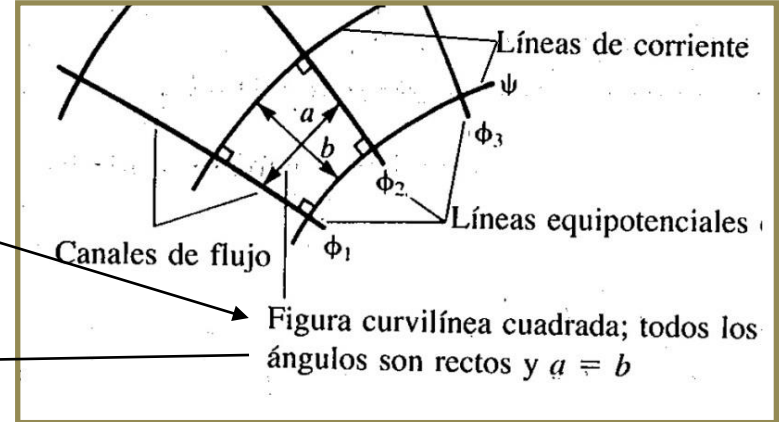
**Caudal en un tubo de corriente**

$$Q = -s k \frac{\Delta h}{L} = -b c k \frac{\Delta h}{a}$$

$c =$  ancho del tubo de corriente

En la redes de flujo (caso plano), se obtiene el Q por unidad de  $c$

$$q = -s k \frac{\Delta h}{L} = -b 1 k \frac{\Delta h}{a} = -k \Delta h = -k \frac{\Delta H}{n_e}$$



Berry y Reid (1993)

$$q_{xz} = -k \frac{\Delta H}{n_e}$$

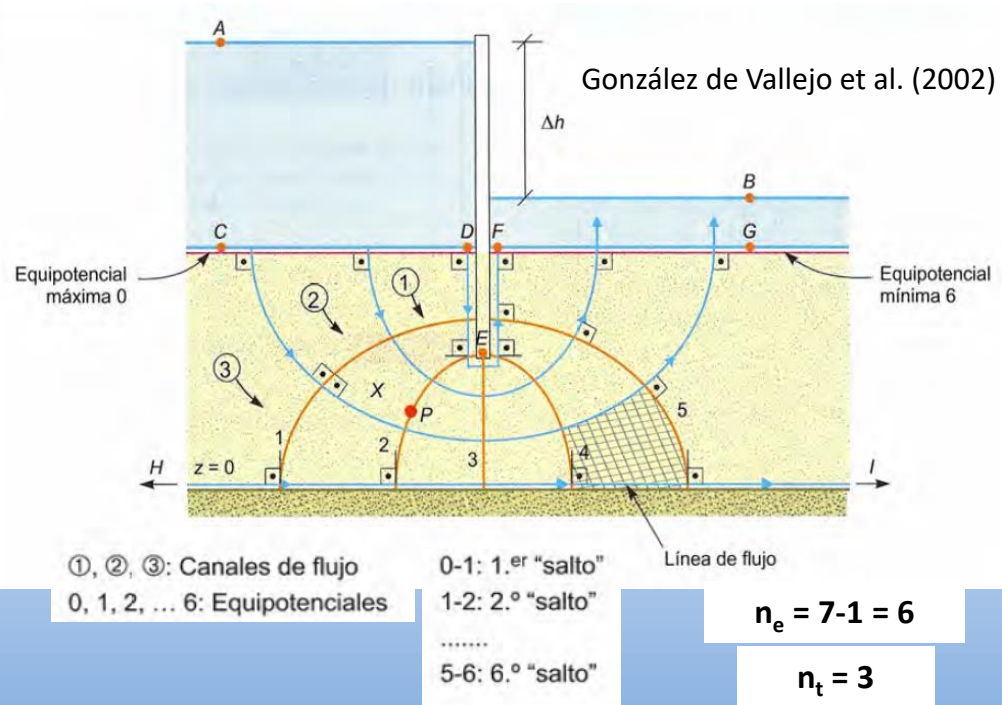
Se espera del alumno que sepa realizar conversiones entre distintas unidades volumétricas y de tiempo

$n_e =$  número de saltos

**Caudal en toda la red de flujo**

$$Q \left( \frac{m^3}{seg \cdot m} \right) = -k \frac{n_t}{n_e} \Delta H$$

$n_t =$  número de canales de flujo (o tubos de corriente)



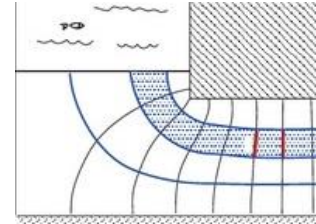
**Redes de flujo**

Presión intersticial y efectiva en cualquier punto

Si en un punto conocemos  $h$  (escogemos una línea equipotencial de nuestra red), conocemos  $z$  (la altura en un sistema de referencia) y conocemos el peso específico del agua, despejamos el valor de presión intersticial en ese punto

$$u = (h-z) \rho_w g$$

$$\sigma' = \sigma_{\text{tot}} - u$$




Empuje total sobre la base de la estructura

El empuje es una fuerza (Newton) y se puede obtener a partir de la presión (esfuerzo, tensión) y la superficie sobre la que esta actúa. Conocidos los valores de “ $u$ ” en puntos determinados de la estructura y asumiendo que varía linealmente entre estos puntos, podríamos representar la función “ $u$ ” respecto a la posición “ $x$ ” a partir de los valores puntuales de  $u$ .

El empuje (por unidad de longitud perpendicular al papel) se puede calcular como

*presión área*

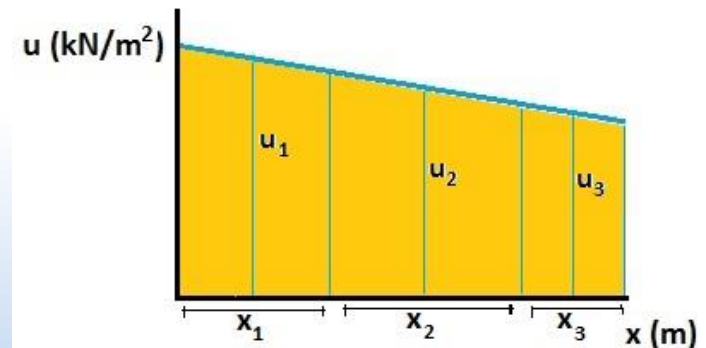


$$E \left( \frac{kN}{m} \right) = \int u_x \cdot dx \cdot 1 = \text{área bajo la recta}$$

o bien

$$E \left( \frac{kN}{m} \right) = \sum u_i \cdot x_i = \sum f_i$$

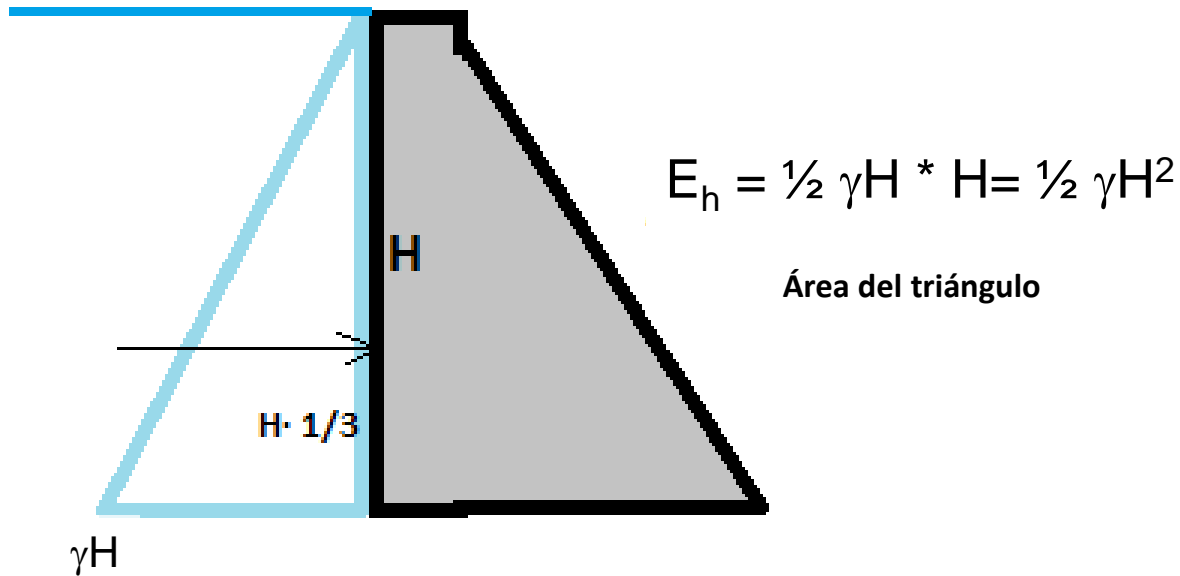
Fuerza que actúa sobre cada uno de los elementos de base  $x_i \cdot 1$





Recordatorio sobre leyes triangulares:

Empuje horizontal sobre el paramento de una presa debido a la ley hidrostática de presiones ( $\gamma H$ )



Este empuje se sitúa a  $1/3$  de la base ( $H/3$ ), por ser una ley triangular

¿Cuál es el punto de aplicación de la fuerza?

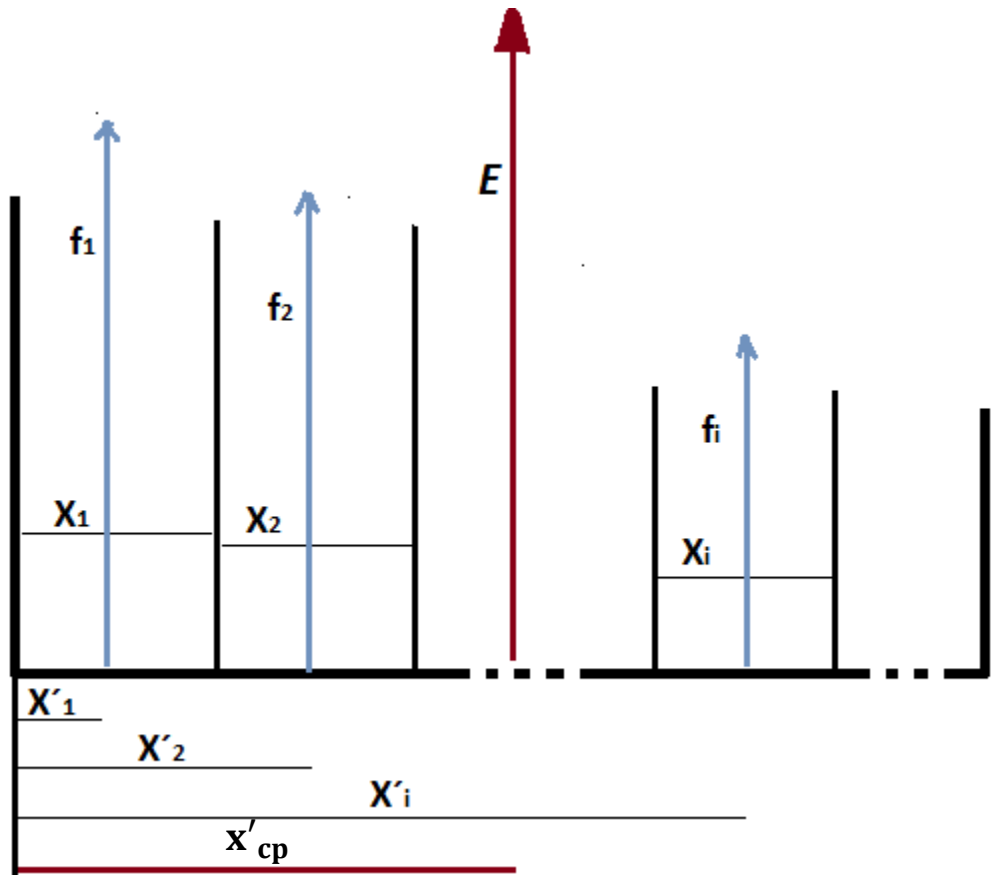
Centro de empujes

**Redes de flujo**

Centro de empujes sobre la base de la estructura

Para el estudio del equilibrio de una estructura que apoya sobre un medio poroso, resulta interesante **calcular el centro de empujes** (punto físico de la estructura en el que se aplica el esfuerzo resultante ( $E$ ) calculado en la cuestión anterior) y **comparar su posición respecto a el centro de gravedad o de masas de la estructura**.

De esta forma **podemos determinar si existen momentos** provocados por las fuerzas de presión. El terreno es el encargado de asumir estos momentos, cuando se desarrollan, deformándose.



$$\sum_i f_i X'_i = E X'_{cp}$$

$X'_{cp}$  determina la posición del centro de empujes o de presiones medido respecto al origen\* aplicado a la base de la presa

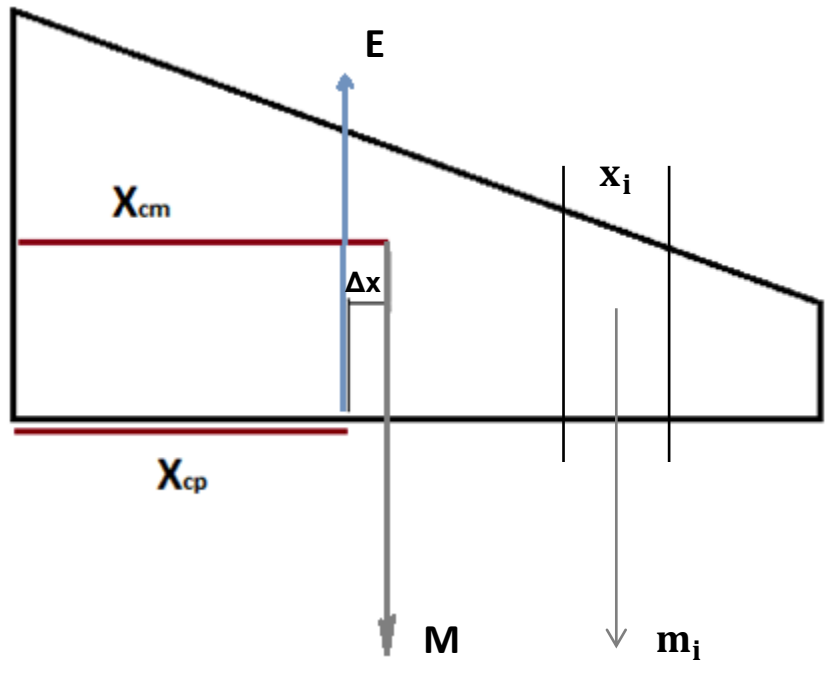
\* Respecto a otro punto cambiaría su valor numérico, pero su posición sería la misma

**Redes de flujo**

Centro de empujes sobre la base de la estructura

Se ha de **comparar** si coincide el **centro de empujes** con la posición del **centro de masas de la estructura**.

Si no se encuentran en la misma vertical, se genera un momento de fuerzas que ha de ser asumido por el terreno y que, normalmente, se traduce en una deformación del mismo.



$X_{cm}$  = centro de masas

$X_{cp}$  = centro de presiones o empujes

Recuerda que la expresión para el cálculo del centro de masas es:

$$M \cdot X_{cm} = \sum m_i \cdot x_i ; \text{ con } M = \sum m_i$$

$M$  = masa total de la presa

$m_i$  = masa del tramo de la presa de longitud  $x_i$

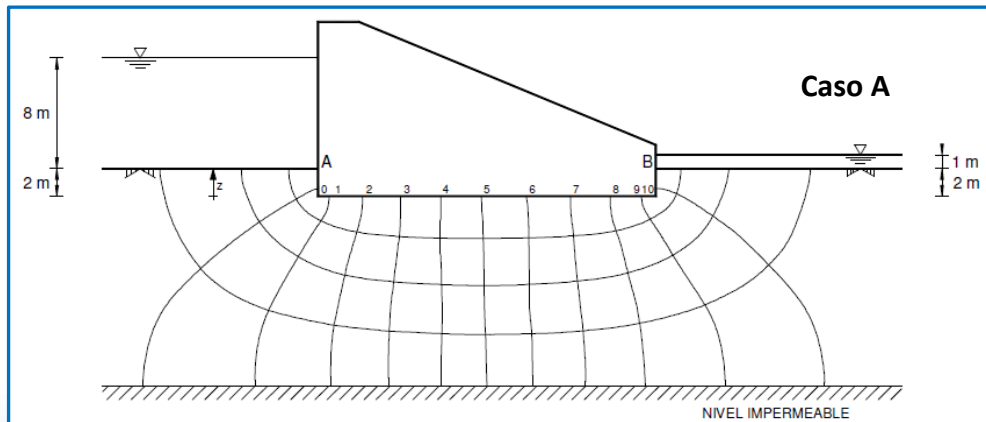


**Redes de flujo**

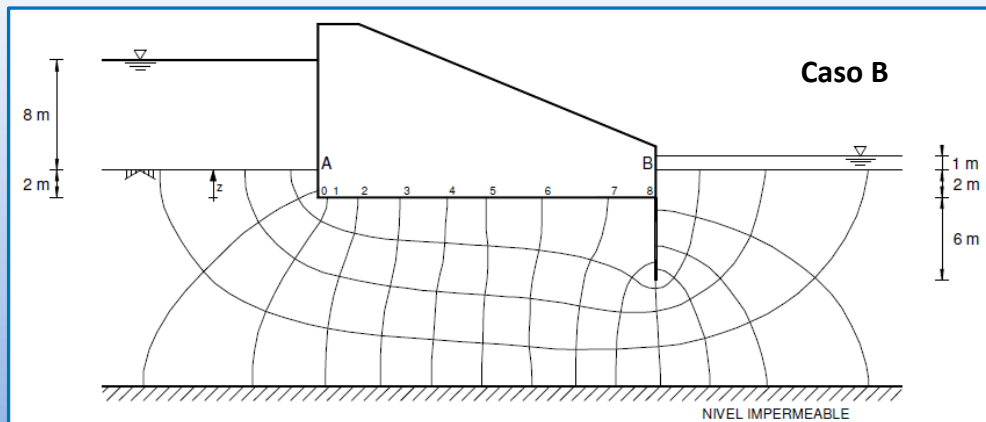
Ejercicio resuelto

En la figura se muestra la sección de una presa de hormigón cimentada sobre un terreno aluvial arenoso que posee una permeabilidad  $k = 8 \cdot 10^{-5}$  m/s y un peso específico saturado de  $20.5$  kN/m<sup>3</sup>, y en la que se pretende analizar los efectos de una pantalla de impermeabilización aguas abajo de la misma (caso B). Para ello, se pide:

- a) Calcular el caudal infiltrado
- b) Obtener la distribución de subpresiones en la cimentación de la presa
- c) Calcular el gradiente máximo de salida y el coeficiente de seguridad frente al sifonamiento



Izquierdo y Carrión (2002)





## a) Caudal infiltrado

En el problema se proporcionan las redes de flujo para ambos casos. **Dibujada la red de flujo**, el caudal infiltrado a través de un medio permeable saturado y una vez establecido el régimen estacionario, se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$Q = k \cdot \frac{n_t}{n_e} \cdot \Delta H$$

k: Permeabilidad del terreno.

$n_t$ : Número total de tubos de corriente de la red de flujo ( $N_f$ )

$n_e$ : Número total de intervalos o “saltos” existentes entre equipotenciales, desde la equipotencial inicial hasta la equipotencial última del problema ( $N_d$ )

$\Delta H$ : Pérdida de carga total o diferencia de potencial entre la primera y la última equipotencial del problema.

En ambas situaciones, la **primera equipotencial** es la superficie sumergida del terreno aguas arriba; la **última equipotencial** es la superficie sumergida del terreno aguas abajo.

Tomando el plano de referencia arbitrario para las alturas geométricas en la base de la cimentación, el **potencial hidráulico** en un punto cualquiera **Z**, viene dado por:

$$h_z = \frac{u_z}{\gamma_w} + Z$$

siendo **z** la altura geométrica de dicho punto y  **$u_z$**  la presión intersticial existente en dicho punto

En los dos casos del problema, el **potencial en el punto A**, que pertenece a la equipotencial inicial del problema, es conocido ya que la presión intersticial es la correspondiente a una columna de agua de 8 metros de altura:

$$h_A = \frac{u_A}{\gamma_w} + Z_A = 8 \text{ m} + 2 \text{ m} = 10 \text{ m}$$

Del mismo modo, en ambos casos, cualquier punto de la **equipotencial última del problema**, como **B**, posee un potencial hidráulico

$$h_B = \frac{u_B}{\gamma_w} + Z_B = 1 \text{ m} + 2 \text{ m} = 3 \text{ m}$$

En consecuencia, **en ambos casos, la pérdida de carga total ( $\Delta H$ )** es:

$$\Delta H = h_A - h_B = 10 \text{ m} - 3 \text{ m} = 7 \text{ m}$$



## a) Caudal infiltrado

Para cada uno de los casos, los datos existentes y el caudal obtenido con la expresión anterior son los siguientes:

Caso	k (m/s)	$n_t$	$n_e$	$\Delta H$ (m)	Q (m <sup>3</sup> /s/m)
A	$8 \cdot 10^{-5}$	4	12	7	$1'86 \cdot 10^{-4}$
B	$8 \cdot 10^{-5}$	4	14	7	$1'6 \cdot 10^{-4}$

## b) Distribución de subpresiones

En un **punto del cimiento de la presa**, se denomina “**subpresión**” a la **presión intersticial** (del agua) existente en dicho punto.

En el problema se pide una “distribución” o ley que proporcione la presión intersticial en cualquier punto del cimiento, pudiendo obtenerse matemáticamente, pero ello se sale del alcance que se pretende en esta asignatura.

En su lugar, **se obtendrán los valores de las presiones intersticiales en algunos puntos del cimiento y se supondrá que la variación de presiones intersticiales entre dos puntos consecutivos es lineal.**

**Puesto que** las redes de flujo han sido dibujadas de manera que **las figuras conformadas entre equipotenciales y líneas de corriente son aproximadamente “cuadrados curvilíneos”**, la **pérdida de carga entre dos equipotenciales sucesivas es siempre la misma e igual a:**

$$\Delta h = \frac{\Delta H}{n_e}$$

Así pues, se tendrá:

Caso	$n_e$	$\Delta H$ (m)	$\Delta h$ (m)
A	12	7	0'583
B	14	7	0'5

**Redes de flujo**

## Ejercicio resuelto

**b) Distribución de subpresiones**

Caso	$n_e$	$\Delta H$ (m)	$\Delta h$ (m)
<b>A</b>	12	7	0'583
<b>B</b>	14	7	0'5

Conocido el potencial del **punto A**, el potencial en un **punto cualquiera Z** es igual al potencial del punto A menos la pérdida de carga existente entre ambos puntos.

Si el punto Z se sitúa en la cimentación de la presa ( $z = 0$ ) y pertenece a una equipotencial dibujada en el problema, se debe verificar que:

$$h_z = \frac{u_z}{\gamma_w} + z = \frac{u_z}{\gamma_w} = h_A - n \cdot \Delta h = 10 - n \cdot \Delta h$$

donde **n** es el número de saltos existentes entre la equipotencial del **punto A** y la equipotencial del **punto Z**. Esta expresión permite obtener la presión intersticial en el punto **Z**:

$$u_z = (10 - n \cdot \Delta h) \cdot \gamma_w = 100 - 10 \cdot n \cdot \Delta h \text{ kN/m}^2$$

En los puntos de intersección de las equipotenciales con el cimiento, **la expresión anterior proporciona los siguientes valores** de la subpresión:

Punto		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	n	1'5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10'5
	$u_z$	91'25	88'34	82'51	76'68	70'85	65'02	59'19	53'36	47'53	41'7	38'78
B	n	1'5	2	3	4	5	6	7	8	8'3		
	$u_z$	92'5	90	85	80	75	70	65	60	58'5		

Puesto que también se conoce el potencial de la última equipotencial, el problema podría haberse resuelto diciendo que el potencial en el punto **Z** es el potencial del punto **B** más la pérdida de carga existente entre ambos puntos:

$$h_z = \frac{u_z}{\gamma_w} + z = h_B + n \cdot \Delta h = 3 + n \cdot \Delta h$$



## c) Gradiente máximo y coeficiente de seguridad frente al sifonamiento

Cuando se viaja a lo largo de una línea de corriente, pasando de un punto situado en una equipotencial a otro punto situado en la siguiente equipotencial, el gradiente medio existente entre dichos puntos es:

$$i_e = \frac{\Delta h}{l}$$

donde  $\Delta h$  es la pérdida de carga existente entre ambas equipotenciales y  $l$  es la distancia recorrida a lo largo de la línea de corriente.

Si se observan las redes de flujo, las distancias recorridas desde la penúltima equipotencial hasta la última (situada en la superficie del terreno sumergida de aguas abajo) varían según la línea de corriente seguida. Puesto que el problema pide el gradiente máximo y siendo  $Dh$  constante e independiente de la línea de corriente seguida, según la expresión anterior se deberá tomar la distancia mínima existente entre la penúltima y la última equipotencial y ello se produce en la línea de corriente que sigue el contorno del paramento de la presa.

Por otro lado, también se puede observar que, **aguas abajo, las líneas de corriente intersectan verticalmente a la superficie del terreno sumergida (última equipotencial) y, en consecuencia, siendo el terreno arenoso, puede producirse la inestabilidad conocida como "sifonamiento"** y cuyo coeficiente de seguridad se define como:

$$F = \frac{i_c}{i_e}$$

Siendo 
$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{10'5}{10} = 1'05$$

el denominado "**gradiente crítico**"

**Midiendo con un escalímetro en las líneas de corriente** las distancias mínimas y a partir de las expresiones anteriores, se obtienen los siguientes valores:

Caso	$\Delta h$ (m)	L (m)	$i_e$	$i_c$	F
A	0'583	1'2	0'485	1'05	2'16
B	0'5	3	0'166	1'05	6'32

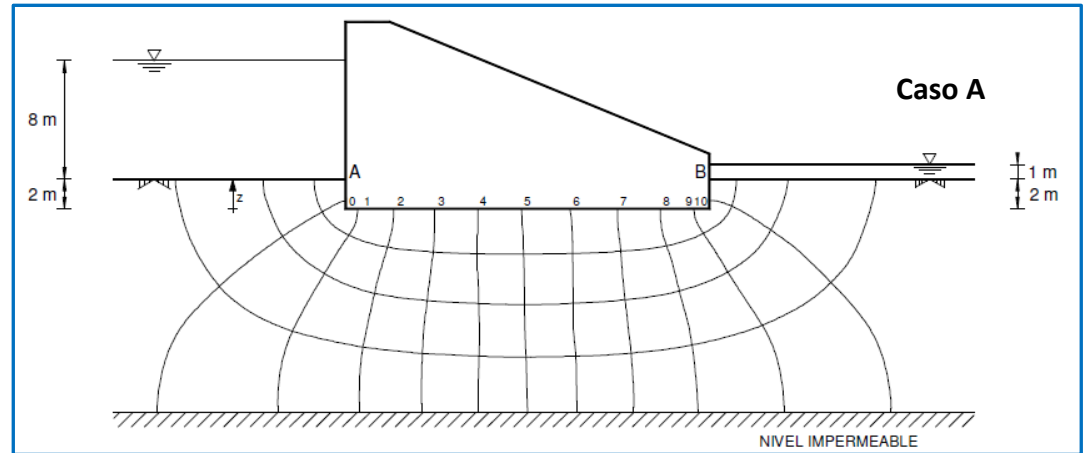
Como se observa, **el coeficiente de seguridad es mínimo** para el gradiente máximo de salida, en el caso A (sin pantalla)



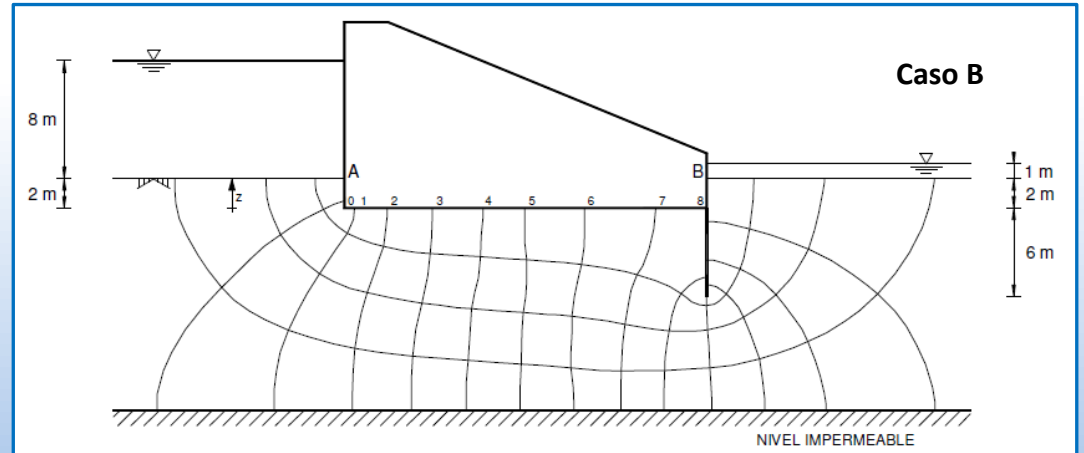
**Conclusiones**

Como conclusión del problema, la colocación de la pantalla produce los siguientes efectos:

1. Disminuye el caudal infiltrado.
2. El gradiente de salida es menor y consecuentemente la seguridad frente al sifonamiento es mayor.
3. Las subpresiones en la cimentación de la presa resultan ser ligeramente mayores.



Izquierdo y Carrión (2002)





**En el laboratorio**

**Determinación de la permeabilidad de una muestra de suelo con carga constante. UNE-103403**

- Se **determina el caudal medio** de salida para distintos **intervalos de tiempo**, a partir del **volumen recogido**.

- Se calcula el **gradiente hidráulico** ( $\Delta h/L$ )  $\rightarrow h/z$ .

-Se obtiene el coeficiente de permeabilidad (m/s) a partir de la expresión .

$$k = \frac{q R_t}{i A}$$

donde

q es el caudal medio en ml/s;

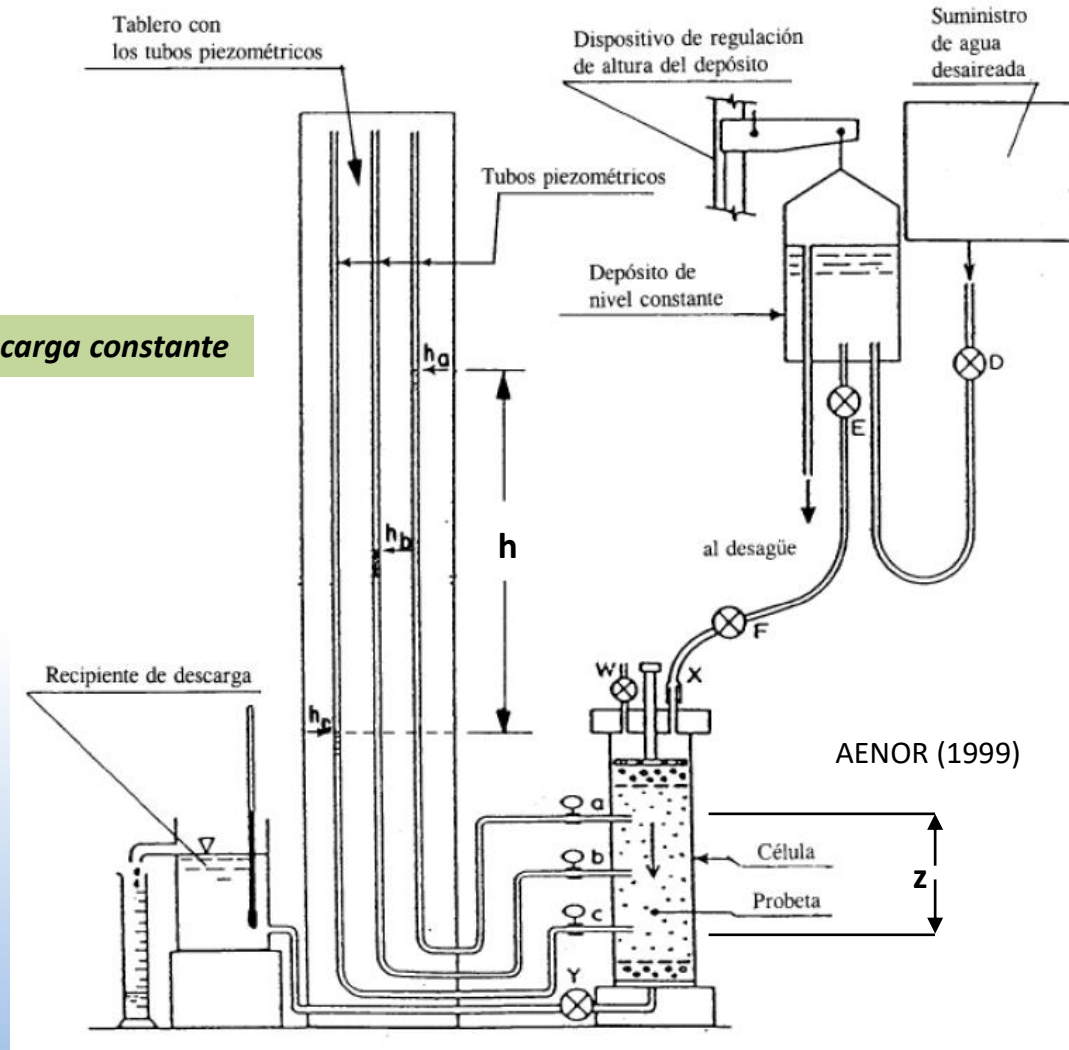
$R_t$  es el factor de corrección de la viscosidad del agua por la temperatura;

i es el gradiente hidráulico;

A es el área media de la muestra, en  $\text{mm}^2$ , calculada con el diámetro medio D.

**Permeámetro de carga constante**

- Además se puede obtener cálculos de densidades y humedad para distintas probetas preparadas, de manera que se pueda establecer una relación entre distintos coeficientes de permeabilidad e índices de poros.



**Flujo entre zanjas****G. García. UPCT**

El caudal  $Q$  que pasa por un punto  $x$  genérico para 1 m de longitud de zanja es:

$$Q = -kA \frac{dh}{dx}$$

$A = \text{área de paso} = h \cdot 1$

$k = \text{coeficiente de permeabilidad}$

**Método analítico**

$$\frac{Q}{L} dx = -h dh$$

Cuando  $x$  varía entre 0 y  $L$ ,  $h$  varía entre  $h_A$  y  $h_B$ :

$$\frac{Q}{k} \int_0^L dx = - \int_{h_A}^{h_B} h dh$$

$$\frac{Q}{k} [x]_0^L = \left[ \frac{h^2}{2} \right]_{h_A}^{h_B}$$

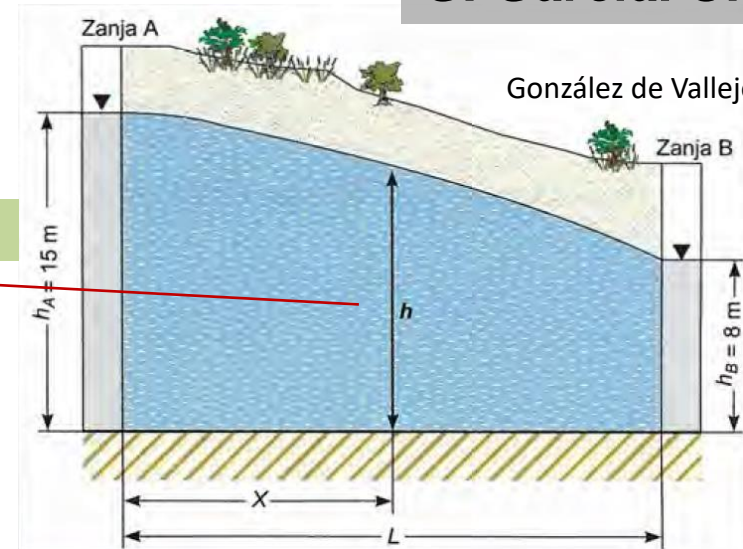
$$\frac{QL}{k} = \frac{1}{2} (h_A^2 - h_B^2)$$

y el caudal de transferencia por metro de zanja vendrá dado por:

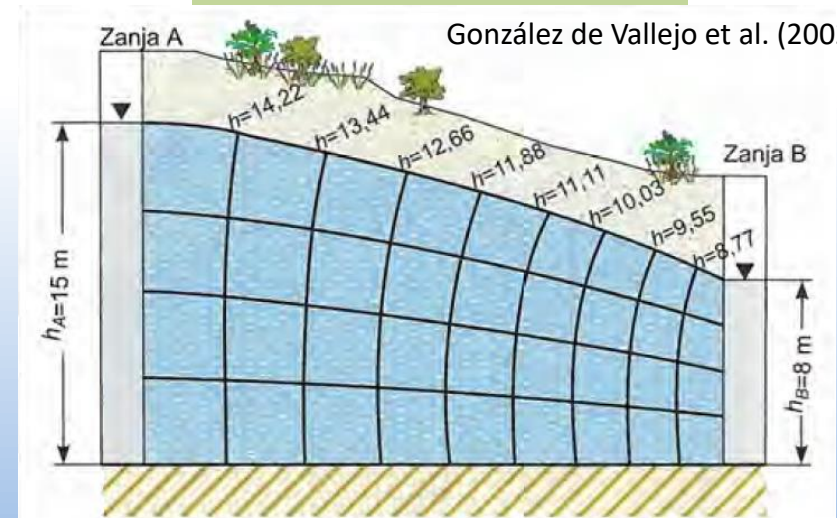
$$Q = \frac{k}{2L} (h_A^2 - h_B^2)$$

que para el caso propuesto, con  $k = 2 \text{ m/día}$ ,  $h_A = 15 \text{ m}$ ,  $h_B = 8 \text{ m}$  y  $L = 26 \text{ m}$ , resulta:

$$Q = 6,19 \text{ m}^3/\text{día}$$

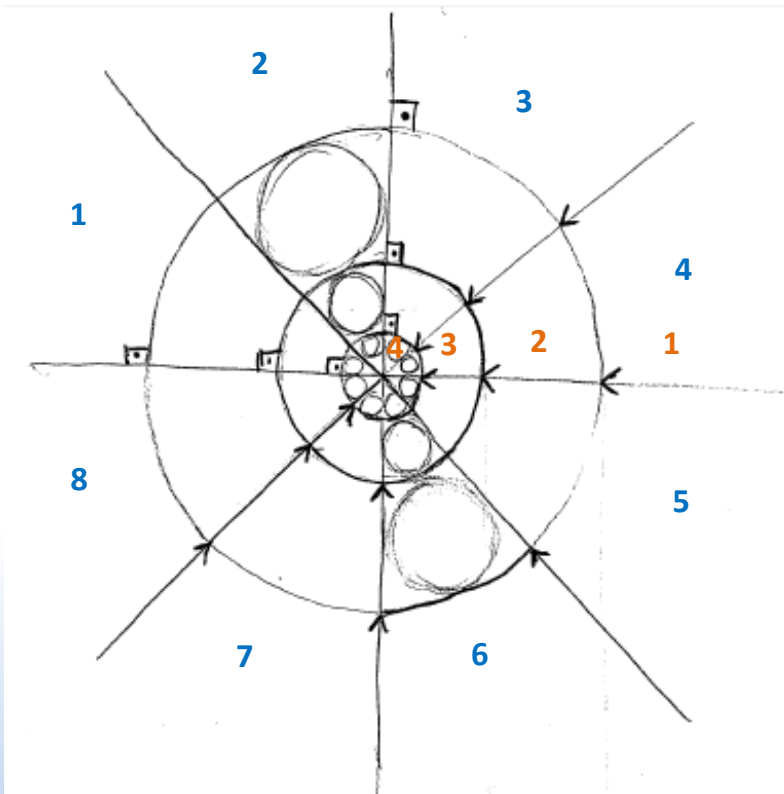


González de Vallejo et al. (2002)

**Método gráfico (redes de flujo)**

González de Vallejo et al. (2002)

$$Q = k \frac{n_t}{n_e} (-\Delta H) = 2 \frac{4}{9} (15 - 8) = 6,22 \text{ m}^3/\text{día}$$

**Bombeo hacia un pozo. Solución gráfica****G. García. UPCT****Solución gráfica a partir de la red de flujo (vista en planta)**

$$Q\left(\frac{\text{m}^3}{\text{seg} \cdot \text{mesp}_{\text{acuíf}}}\right) = -k \frac{n_t}{n_e} \Delta H$$

$n_t$  = número de canales de flujo (o tubos de corriente) = 8

$n_e$  = número de saltos = 4



# Bombeo hacia un pozo en acuífero confinado. Solución analítica de Thiem

G. García. UPCT

A partir de la ecuación de flujo y conocidas las condiciones de contorno, podremos calcular:

- caudal que fluye hacia un pozo
- radios de influencia
- descenso en un piezómetro
- valores de transmisividad ( $T = k \cdot b$ , con  $b$  = espesor del acuífero))

## Solución de Thiem (1906). Acuífero confinado, régimen permanente, sin fuentes ni sumideros.

González de Vallejo et al. (2002)

A partir de la ecuación general de flujo (Laplace), realizando un cambio a coordenadas polares con el eje situado en la vertical del pozo

$$x = r \cos \alpha$$

$$y = r \sin \alpha$$

quedaría la expresión

$$Q = 2\pi r b k \frac{dh}{dr}$$

$$A = 2\pi r b$$

$$b k = T \text{ (transmisividad)}$$

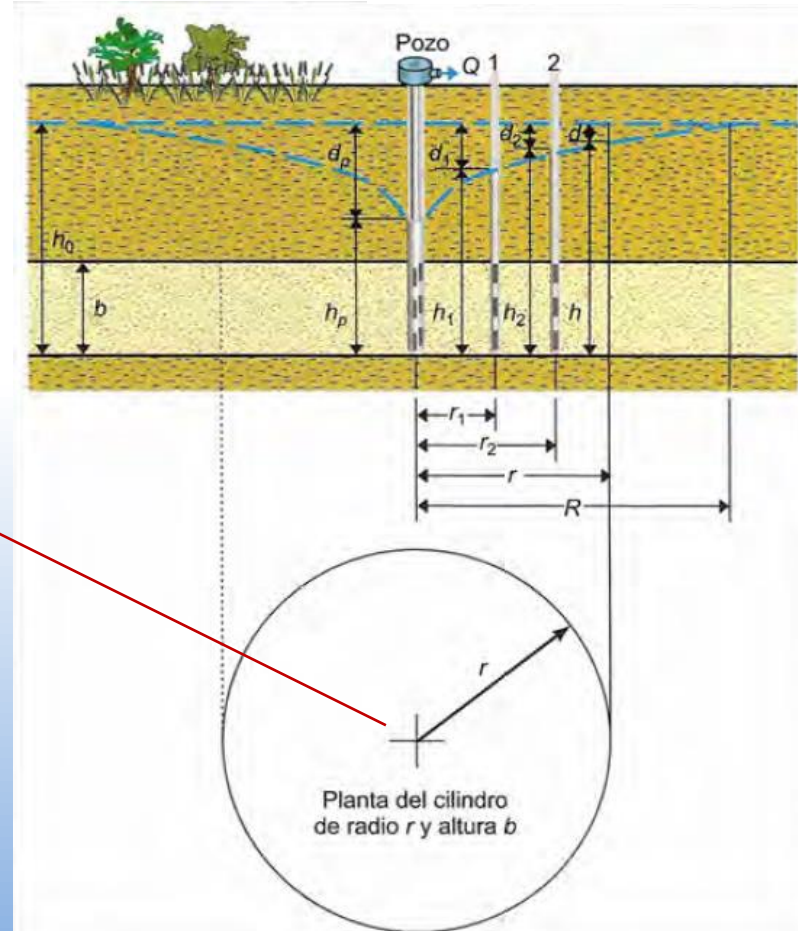
El caudal que sale por el pozo es igual al que atraviesa la superficie cilíndrica de altura  $b$  y radio genérico  $r$ . Finalmente, integrando llegaríamos a la expresión

$$h_0 - h = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r}$$

donde

- $h_0$  = nivel piezométrico inicial
- $h$  = nivel piezométrico a la distancia  $r$  donde el potencial vale  $h$  (genérico)
- $Q$  = caudal de bombeo
- $T$  = transmisividad
- $R$  = radio de influencia donde el potencial vale  $h_0$
- $r$  = distancia al eje del pozo.

Ojo "b" es constante



**Bombeo hacia un pozo en acuífero libre.  
Solución analítica de Dupuit**

**Solución de Dupuit (1863). Acuífero libre, régimen permanente, sin fuentes ni sumideros.**

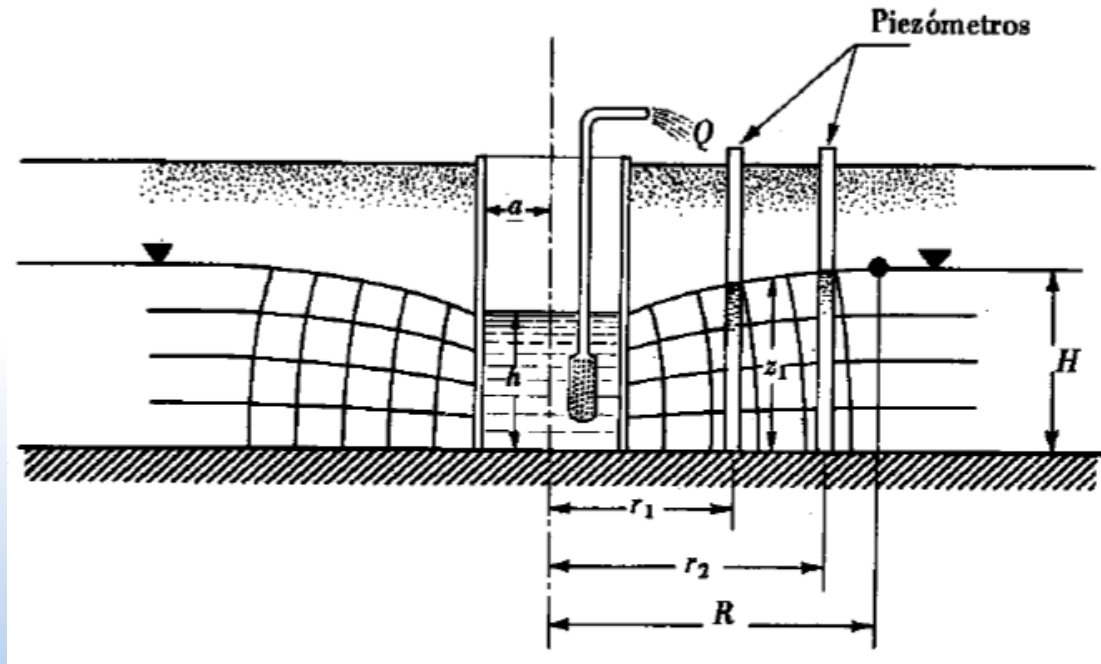
Procediendo de la misma manera con la que se obtuvo la expresión anterior

$$Q = 2\pi r h k \frac{dh}{dr}$$

Ojo "h" es variable

$$h_0^2 - h^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r}$$

Pozo completo en acuífero no confinado



Jiménez-Salas y de Justo (1975)



**CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS TIPICAS DE SUELOS Y ROCAS**

		TIPOLOGIA	% POROSIDAD	% POROSIDAD EFICAZ	PERMEABILIDAD (DARCY) k (cm/seg)	CAPACIDAD DE DRENAJE	CALIFICACION HIDROGEOLOGICA
<b>SUELOS</b> (sedimentos sin consolidar)		Grava	20 - 30	15 - 25	> 1	Muy alta	Acuífero (excelente)
		Grava Arenosa	30 - 40	25 - 35	$1 - 10^{-1}$	Alta	Acuífero (bueno)
		Arena	40 - 45 (sobreconsolidada) 30 - 40	35 - 20	$10^{-1} - 10^{-3}$	Moderada	Acuífero (regular)
		Arena Limosa	45 - 50	20 - 15	$10^{-3} - 10^{-5}$	Baja	Acuífero (pobre)
		Limo	50 - 55	15 - 5	$10^{-5} - 10^{-7}$	Muy baja	Acuitardo
		Arcilla	>55 (sobreconsolidada 15 - 55)	<5	$<10^{-7}$	Prácticamente impermeable	Acuicludo
<b>ROCAS</b> (Valores estimativos del conjunto de un macizo rocoso)		Sedimentaria (p. e. Grauvaca)	<10	Permeabilidad vinculada a litoclasas o a procesos de alteración, que pueden ser muy significativos en rocas sedimentarias solubles. Algunos depósitos sedimentarios pueden tener estructura alveolar.		Impermeable a muy baja	Acuífugo o acuitardo
		Sedimentaria Soluble (p. e. Caliza)	<10 - 50			Impermeable a muy alta	Acuífugo, acuitardo o acuífero
		Metamórfica (p. e. Gneis)	<5			Impermeable	Acuífugo
		Intrusiva (p. e. Granito)	<1			Impermeable	Acuífugo
		Volcánica (p. e. Basalto)	>1 (excepto en tobas y coladas fisuradas)			Impermeable (excepto en tobas y coladas fisuradas)	Acuífugo (acuífero en tobas y coladas muy fisuradas)



## Ideas finales

# Clasificación de formaciones geológico-geotécnicas en relación a la capacidad para almacenar y transmitir agua subterránea

## **Acuífero:**

unidad geológica permeable y saturada que **puede transmitir cantidades significativas de agua** bajo **gradientes hidráulicos normales**.

(ej. arenas, gravas; areniscas; rocas carstificadas o con gran número de discontinuidades → porosidad de fracturas).

## **Acuicludo:**

unidad geológica porosa, con sus poros intercomunicados y saturada, pero **incapaz** de transmitir **cantidades significativas de agua** bajo **gradientes hidráulicos normales** (ej. arcillas masivas de baja permeabilidad).

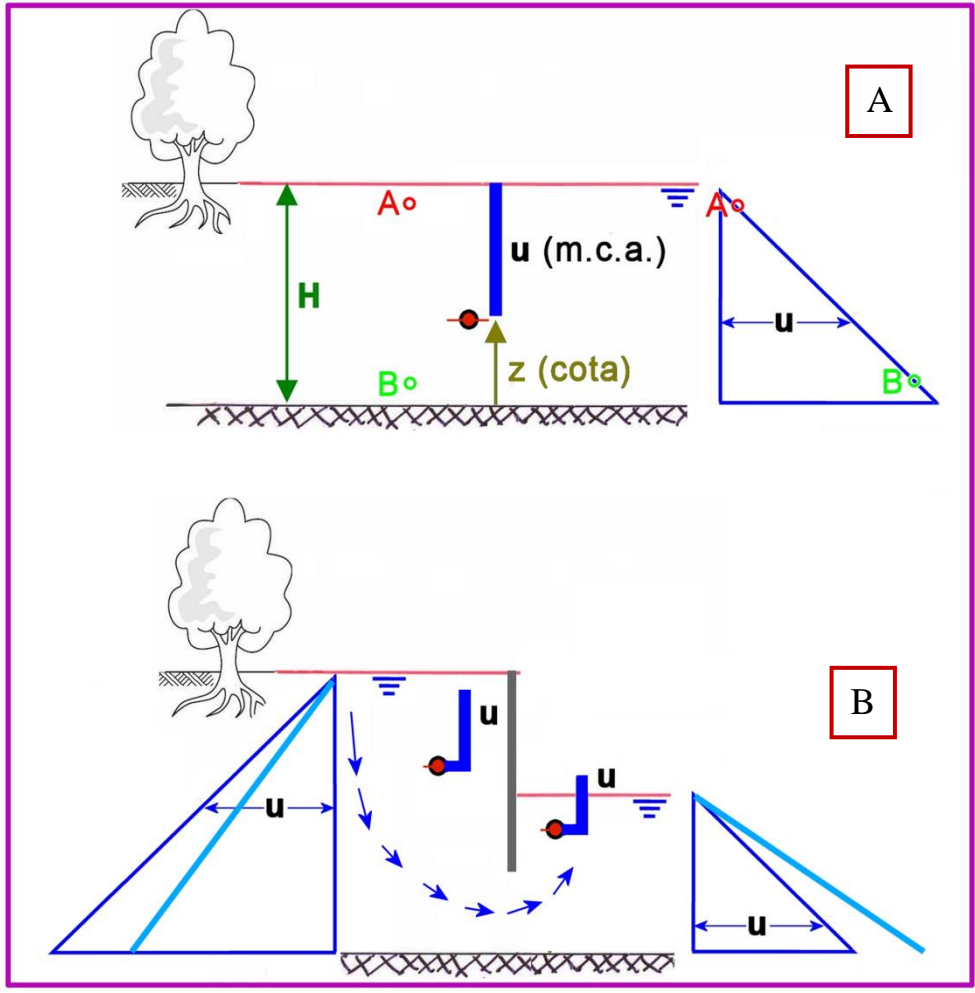
## **Acuitardo:**

unidad poco permeable que permite transmitir cantidades de agua significativas para el estudio del flujo regional, pero **insuficientes para su aprovechamiento** mediante pozos (ej. arcillas limosas).

## **Acuífugo:**

formaciones **impermeables** que o **no contienen agua** o la contienen en poros no intercomunicados (ej. rocas sanas).





- **Caso A:** distribución hidrostática lineal de la presión intersticial. **No hay flujo**

- **Caso B:** **Red de flujo.**

La presión intersticial no es la hidrostática.

Tampoco se distribuye linealmente (La distribución no es lineal, aunque en la figura se hay representado una recta).



Berry, P. L., & Reid, D. (1993). *Mecánica de suelos*. McGraw-Hill.

FCIHS. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. (2009)

Custodio, E. & Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea* (Vol. 2). Barcelona: Omega.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.

Izquierdo, F., & Carrión, M. (2002). *Problemas de geotecnia y cimentos*. Universidad Politécnica de Valencia.

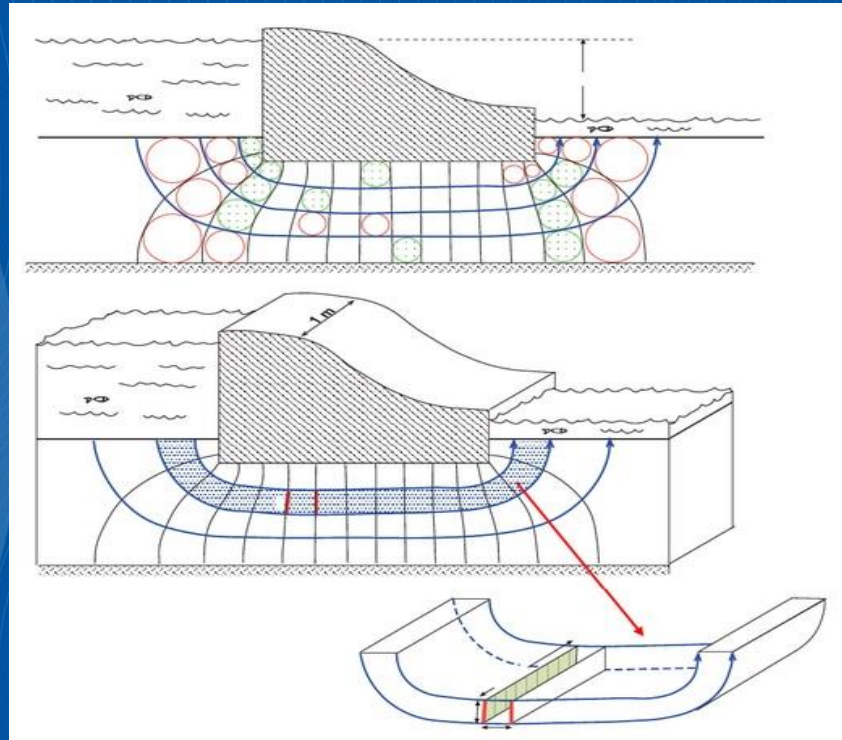
AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. *Determinación de la permeabilidad de una muestra de suelo con carga constante, UNE 103 403*. Madrid, España, 1999

Jiménez-Salas, J. A. , & de Justo Alpañes, J. L. (1975). *Geotecnia y cimentos: Propiedades de los suelos y de las rocas*. Rueda.

<https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/acuitardo/>

# Mecánica Avanzada de Suelos

## MCieTAT (UPCT)



*Gracias por su atención*

## Tema 5

### Filtraciones (en medios porosos)