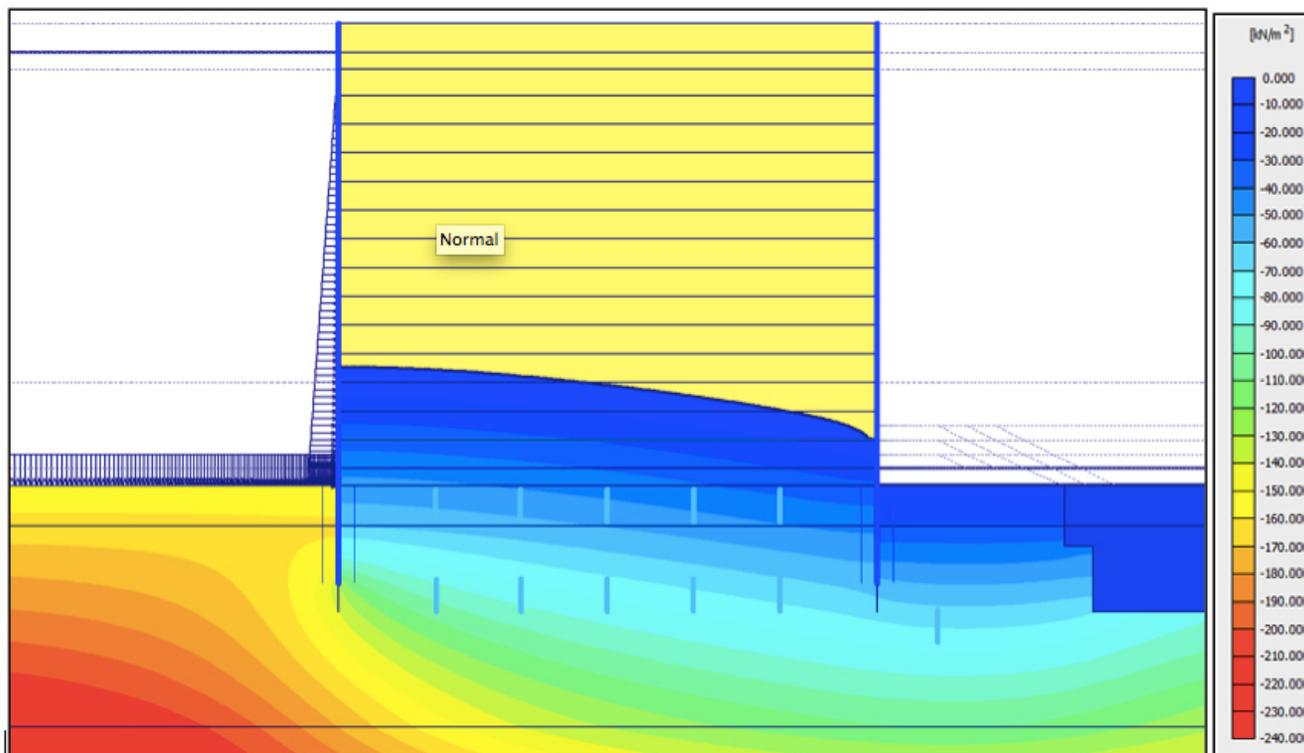


Hidráulica de suelos



Mecánica de Suelos y Geología

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

Para esto sirve esta clase..



Índice



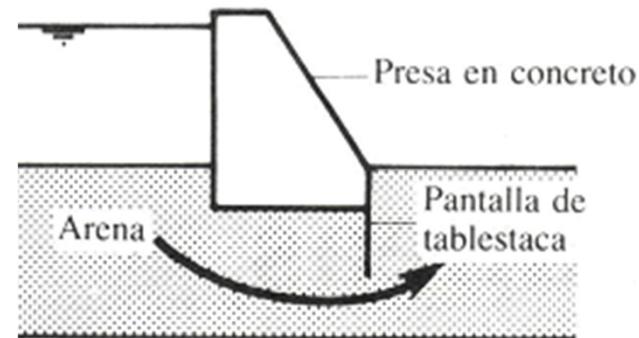
- **Introducción**
- Ecuación de Laplace
- Redes de filtración
- Sifonaje
- Flujo no confinado
- Abatimiento de napas
- Flujo no saturado, Métodos numéricos

Introducción

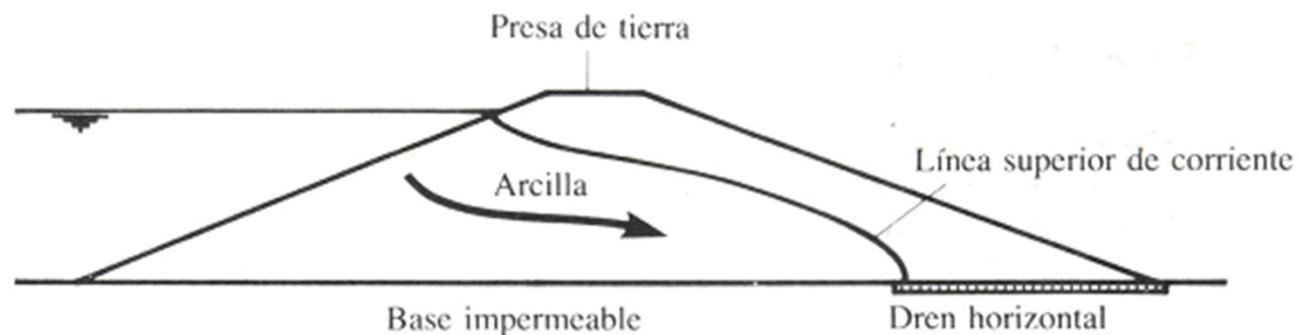


Flujo de agua en el suelo, asumiendo que éste no se deforma

- Condiciones de borde hidráulicas fijas: flujo confinado



- Superficie superior del flujo indeterminada: flujo no confinado



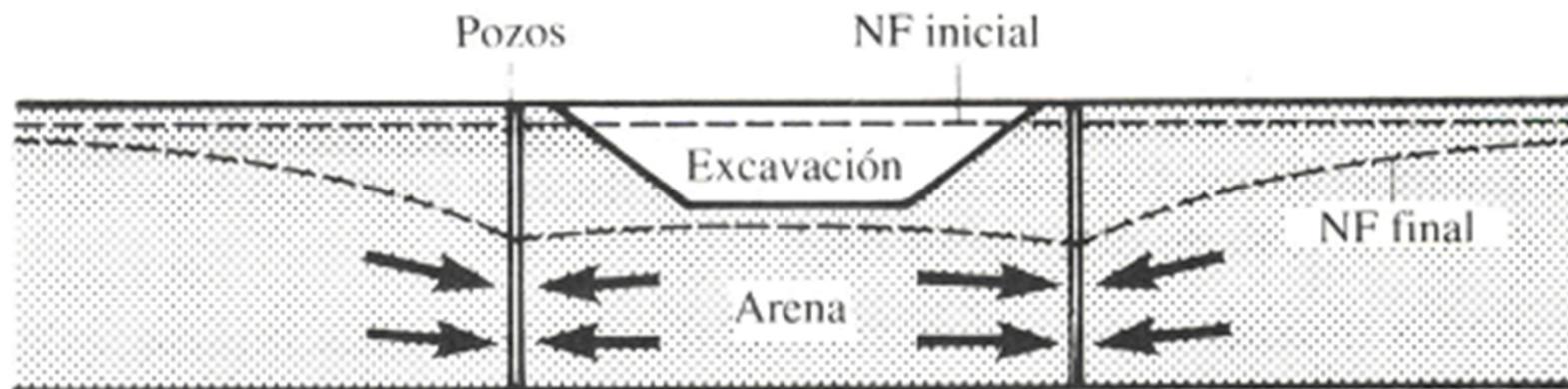
Introducción



El problema tiene una componente transitoria y una componente estacionaria

Por ejemplo, un sistema de bombeo que se diseña para abatir la napa freática debe poder

- Extraer el alto caudal inicial
- Mantener un bombeo estable a largo plazo



Índice



- Introducción
- **Ecuación de Laplace**
- Redes de filtración
- Sifonaje
- Flujo no confinado
- Abatimiento de napas
- Flujo no saturado
- Métodos numéricos

Ecuación de Laplace



Hipótesis

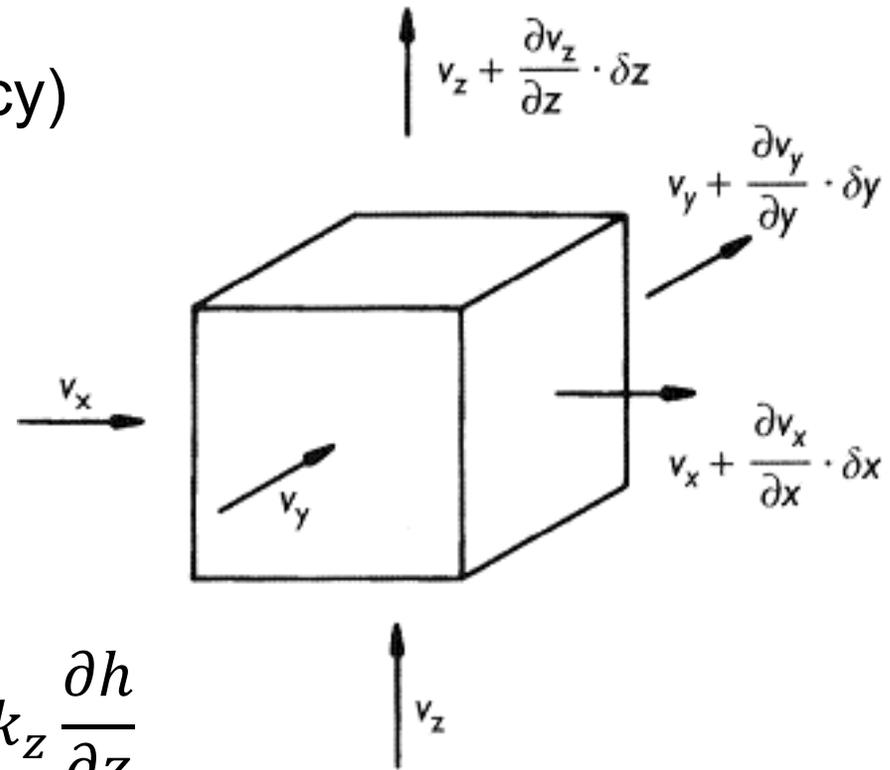
- Medio continuo saturado y fijo
- Flujo laminar lento (ley de Darcy)

Ecuación de continuidad

$$\sum q = 0 \rightarrow \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Ley de Darcy en cada dirección

$$v_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad v_y = k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad v_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

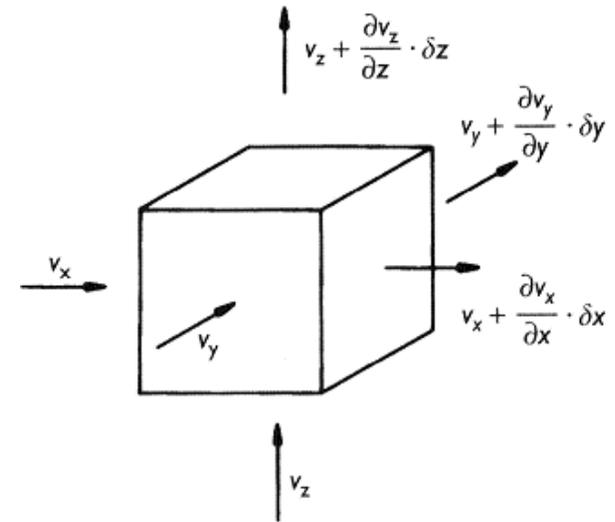


Ecuación de Laplace



Aplicando Darcy a la ec. continuidad

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] = 0$$



Si las conductividades hidráulicas no cambian punto a punto

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

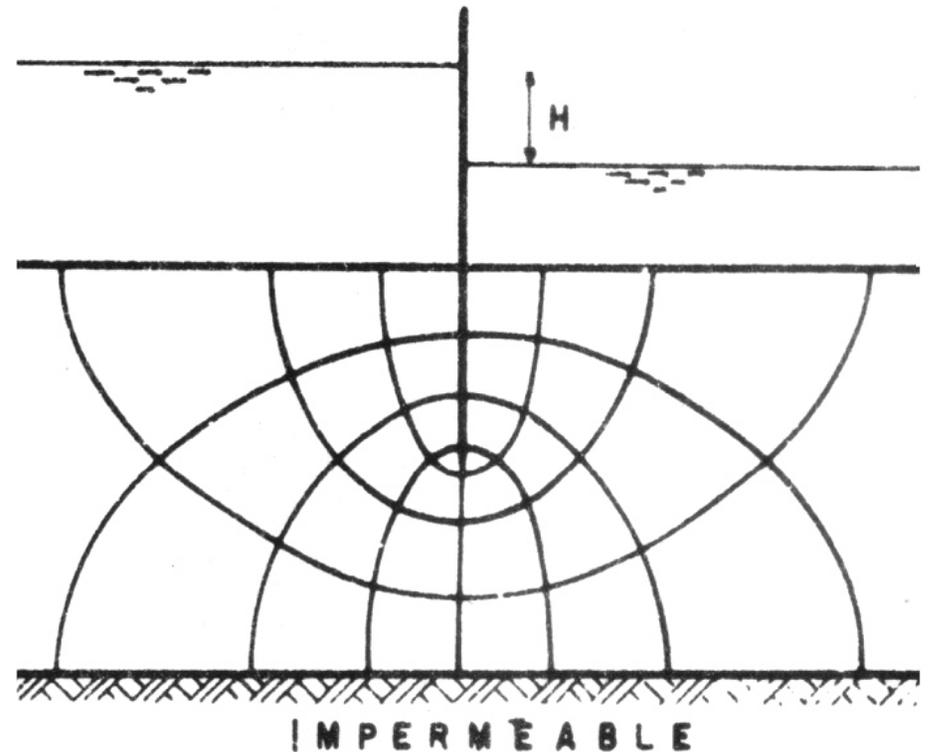
Si son las tres iguales entre sí (medio isótropo)

$$k \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = 0 \rightarrow \nabla^2 h = 0$$

Resolución de la ecuación de Laplace



- Método gráfico (redes de filtración)
 - Curvas equipotenciales
 - Líneas de corriente
 - Condiciones de borde
 - Relación de lados
- Soluciones analíticas
- Soluciones numéricas
 - Elementos finitos
 - Diferencias finitas
- Analogías físicas



Índice



- Introducción
- Ecuación de Laplace
- **Redes de filtración**
- Sifonaje
- Flujo no confinado
- Abatimiento de napas
- Flujo no saturado
- Métodos numéricos

Redes de filtración

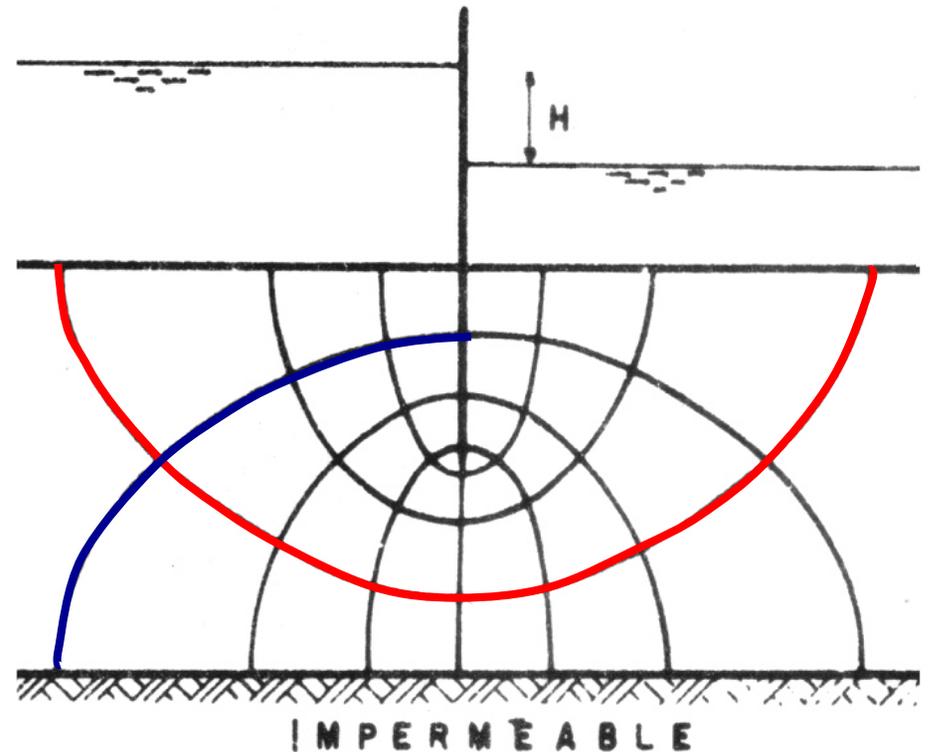


Son una solución gráfica al problema de Laplace
Están conformadas por dos elementos

- Líneas de corriente (LC - tangentes al vector velocidad en cada punto)
- Líneas equipotenciales (EQ - líneas de igual h)

Ambas son normales entre si

Los bordes son casos particulares de LC o EQ



Cálculo de caudal



El caudal de un tubo es

$$\Delta q = k \cdot a \cdot i = k \cdot a \cdot \frac{\Delta h}{b}$$

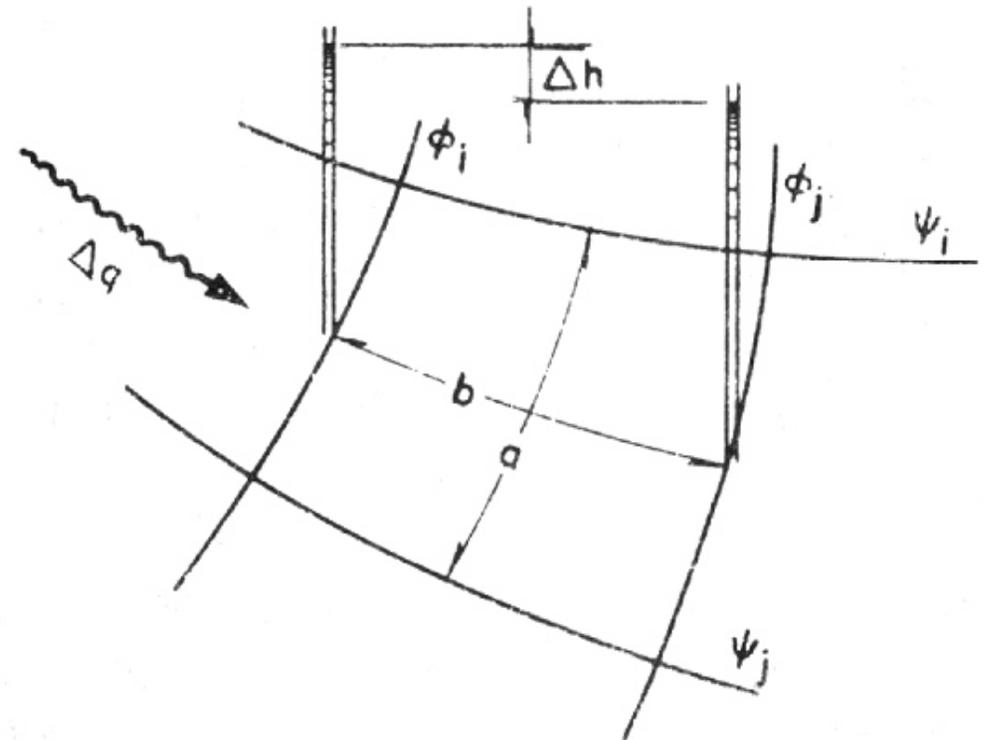
$$\Delta h = \frac{H}{N_{caidas}}$$

La caída entre dos EQ es

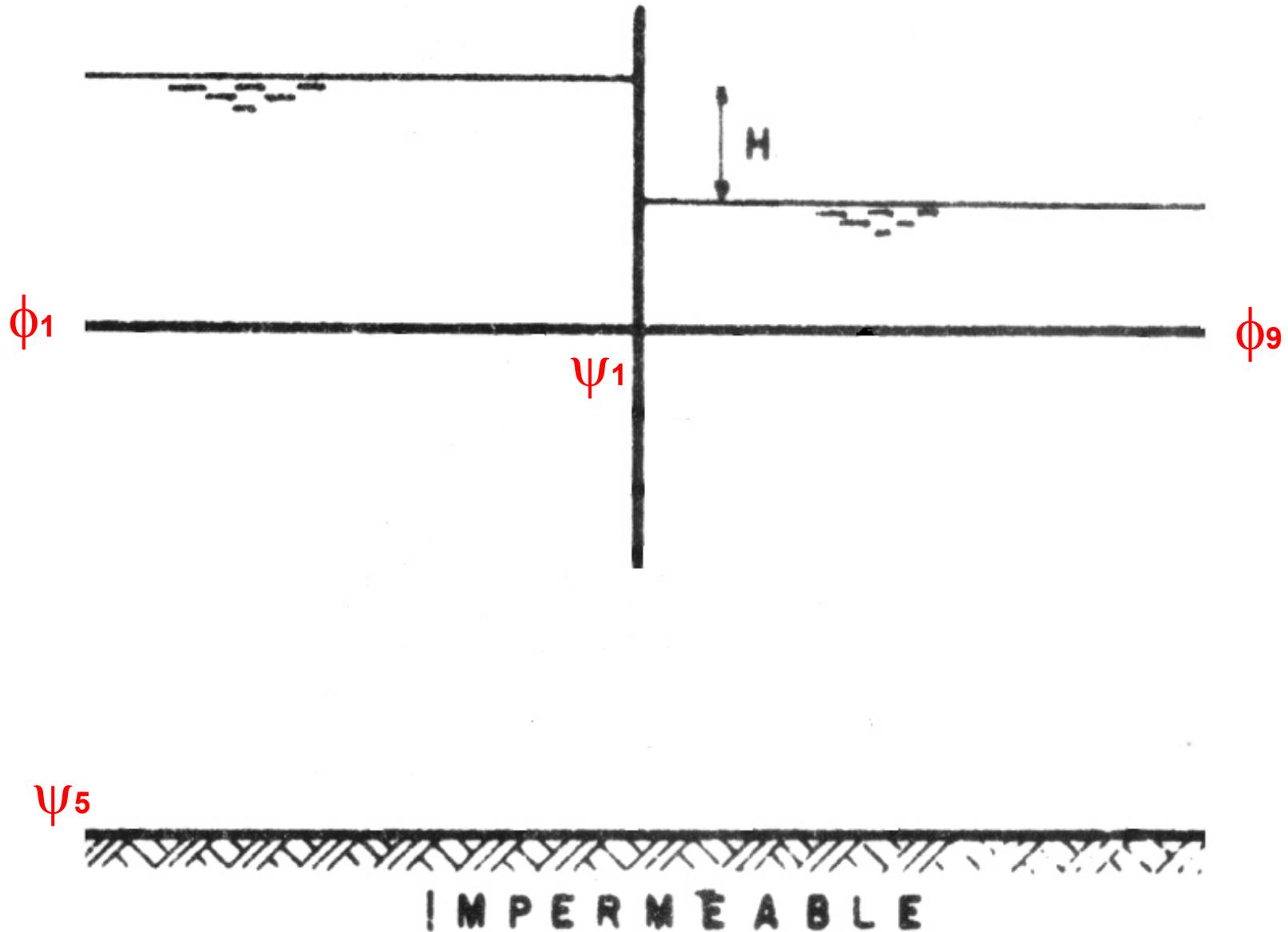
$$Q = k \frac{N_{tubos}}{N_{caidas}} H$$

Para N tubos queda:

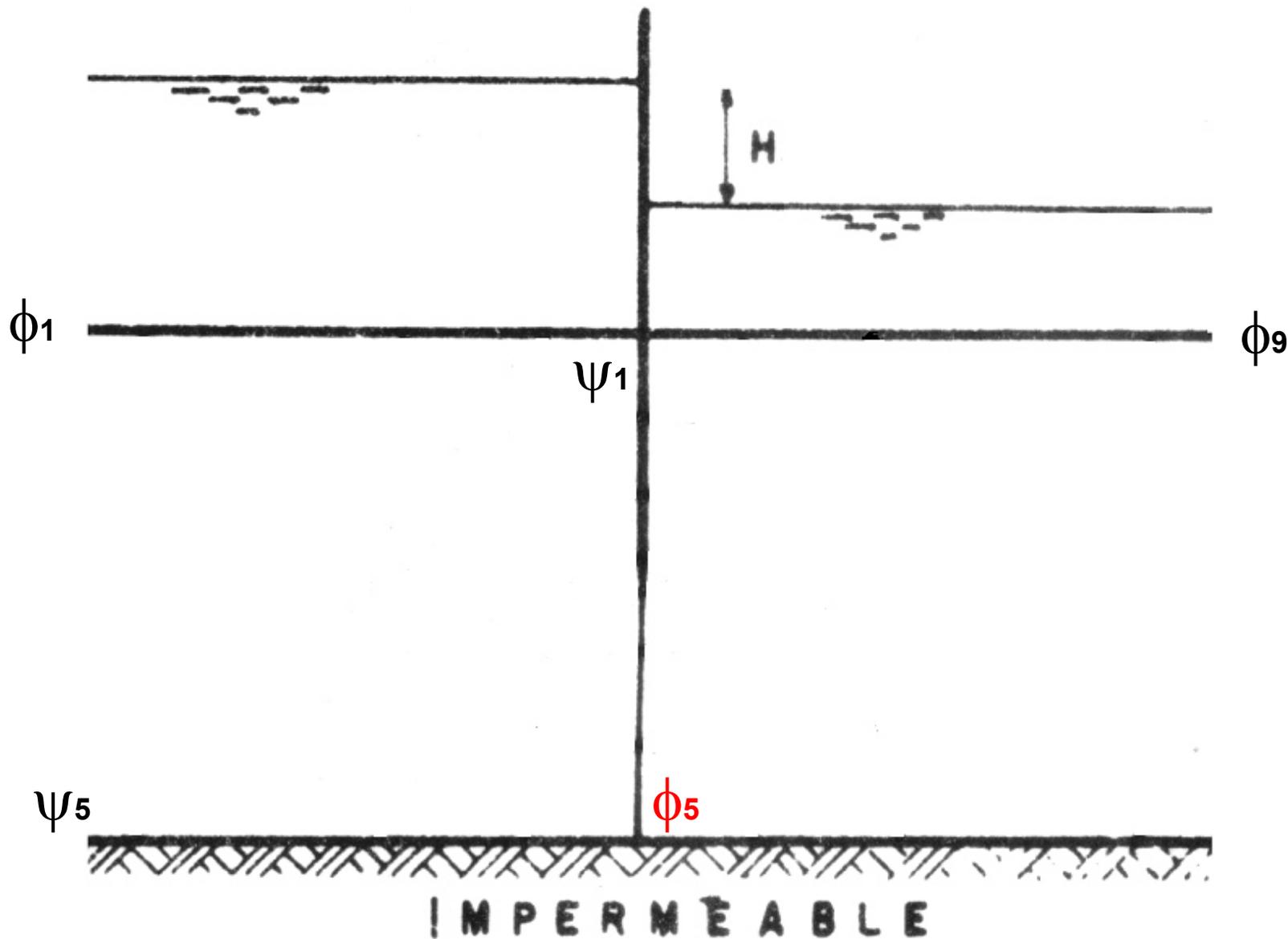
$$Q = \Delta q \cdot N_{tubos} = k \frac{a}{b} \frac{N_{tubos}}{N_{caidas}} H$$



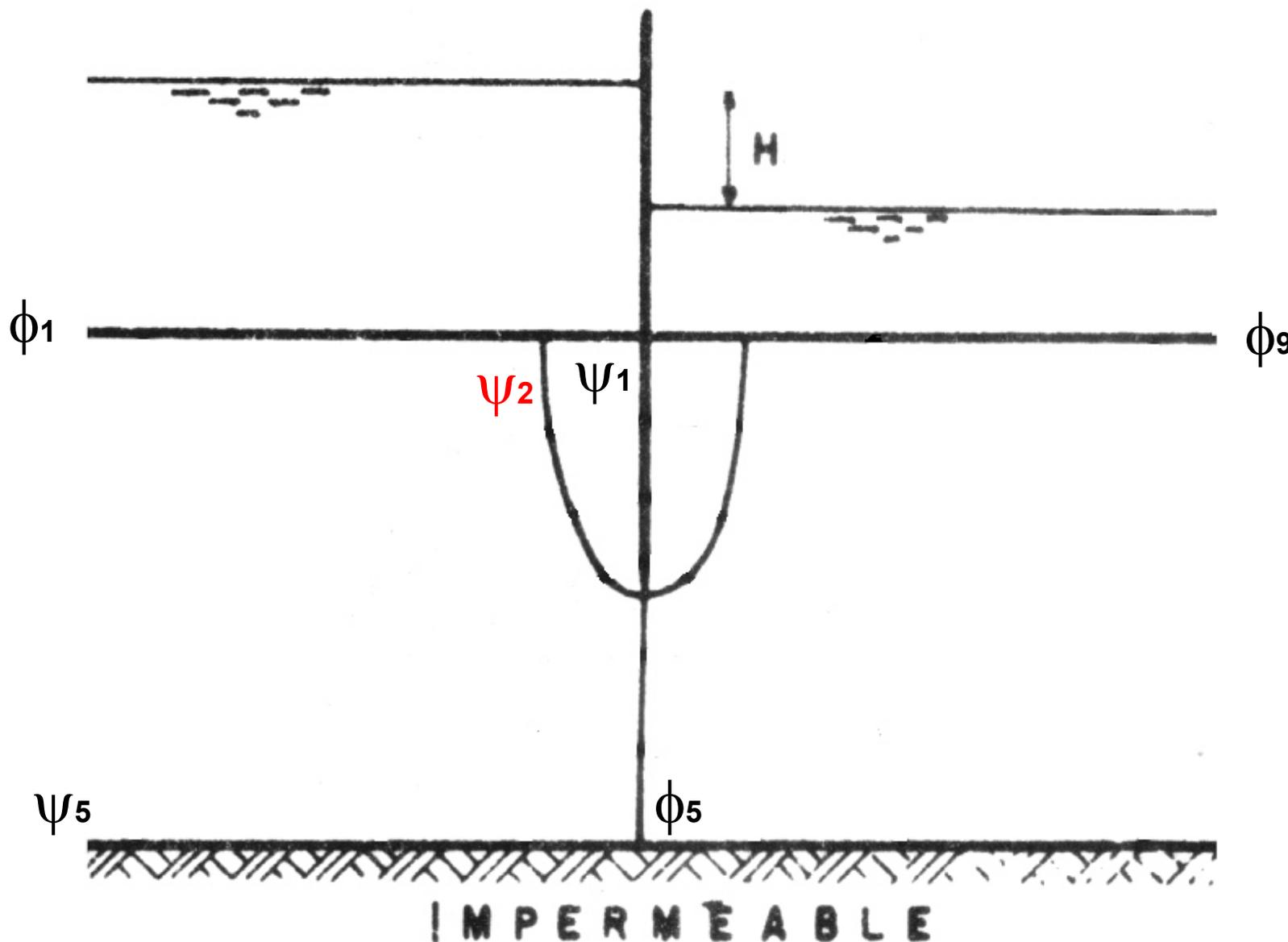
Ejercicio - Red de filtración



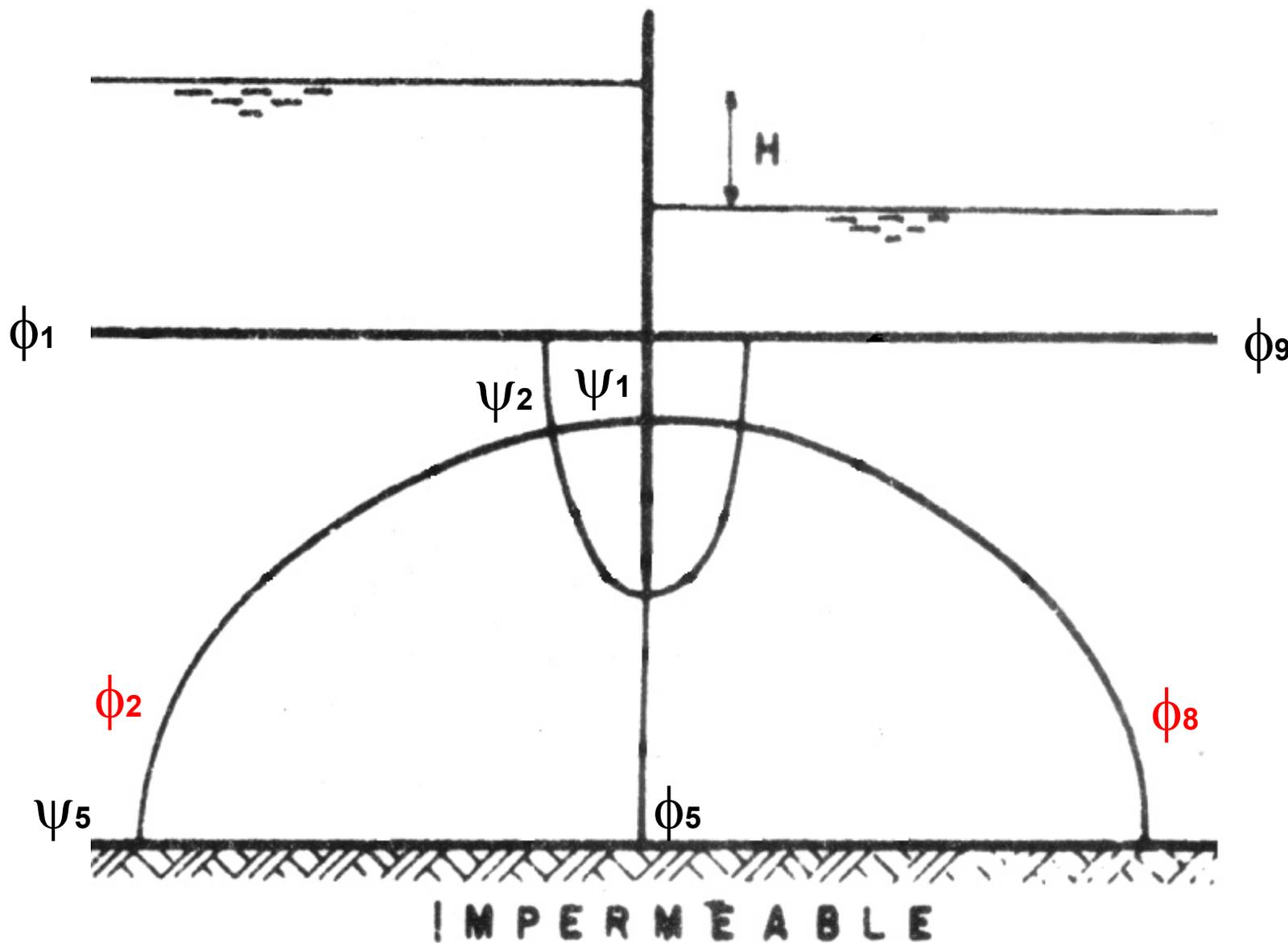
Ejercicio - Red de filtración



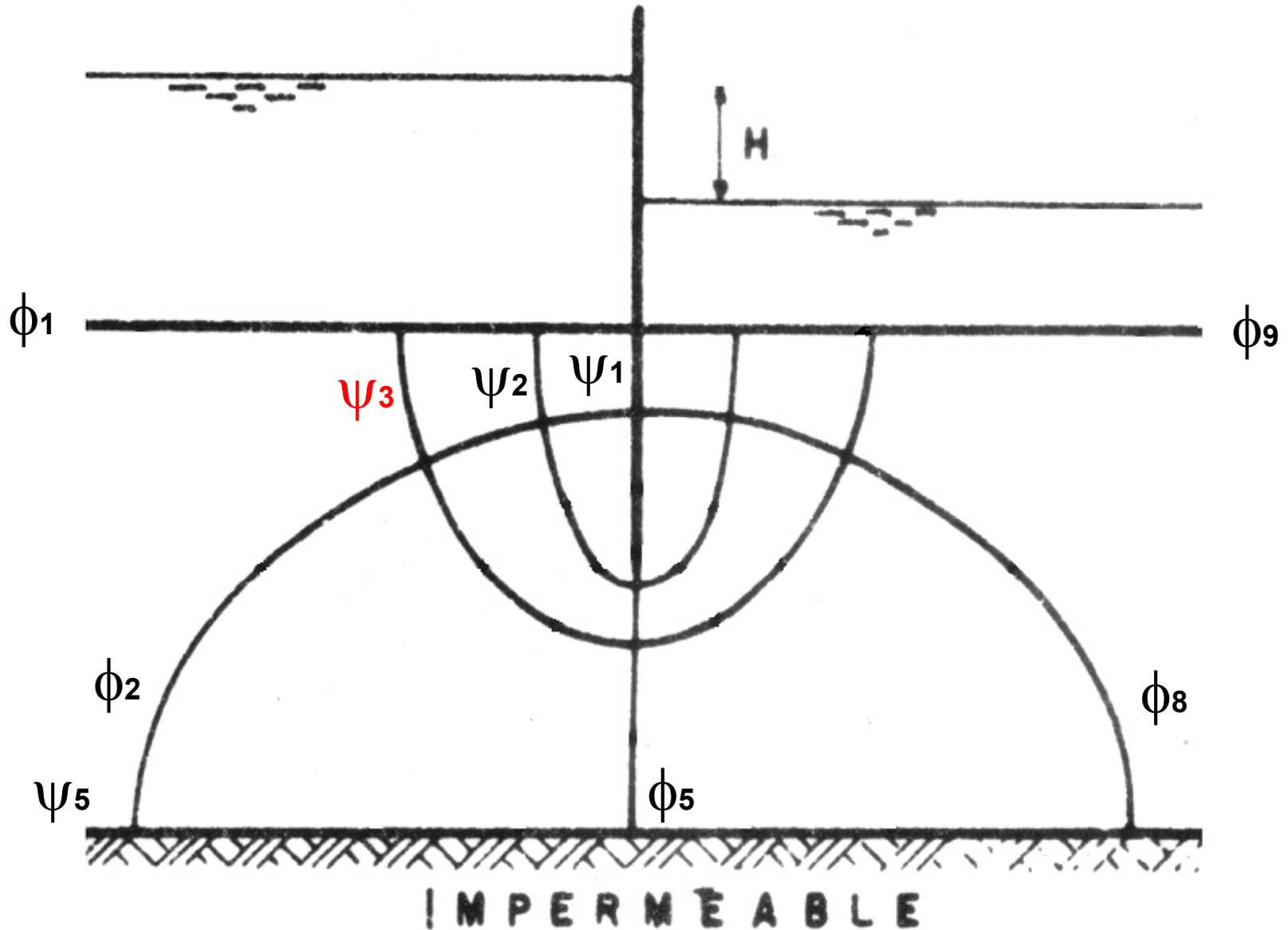
Ejercicio - Red de filtración



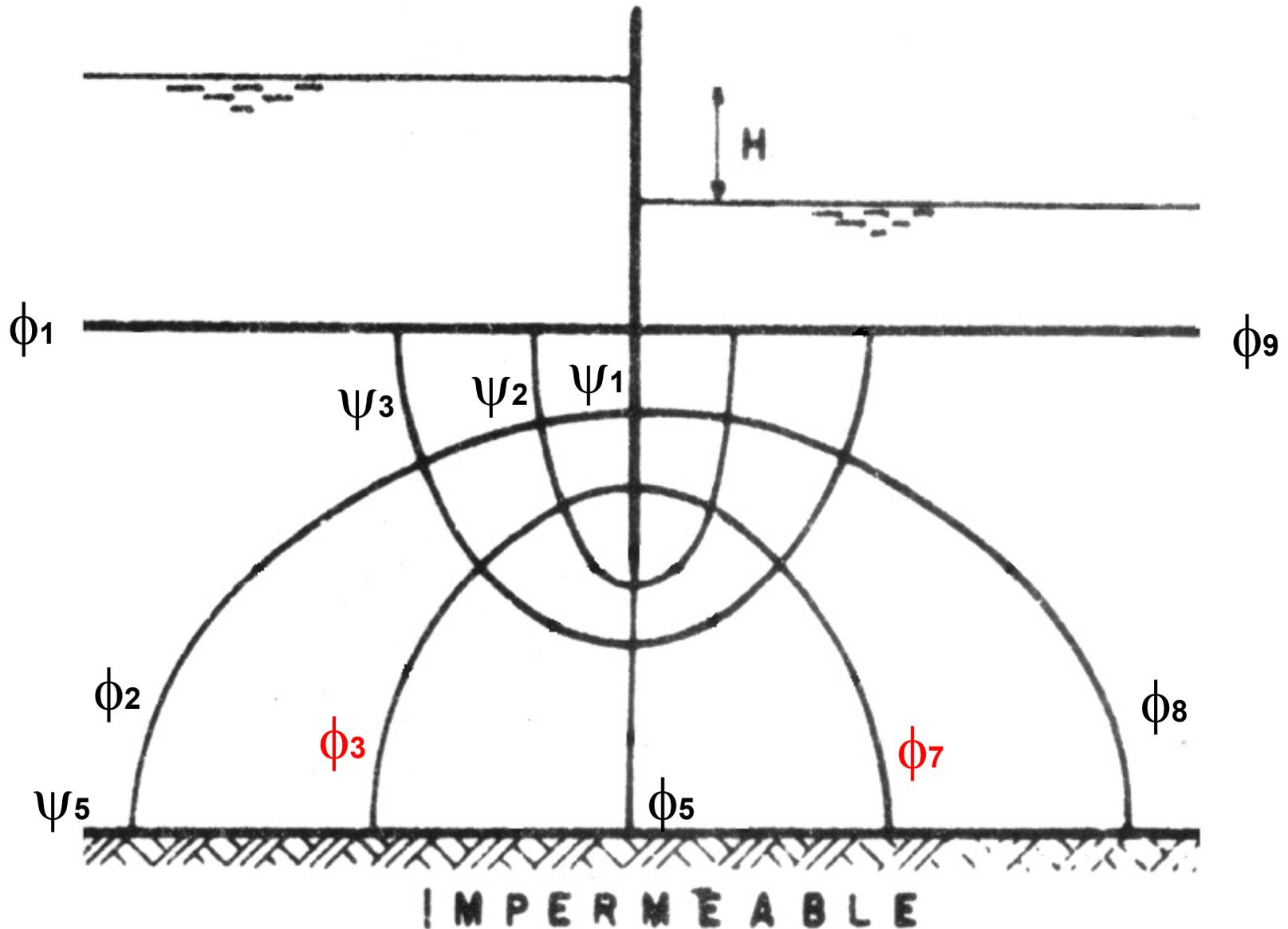
Ejercicio - Red de filtración



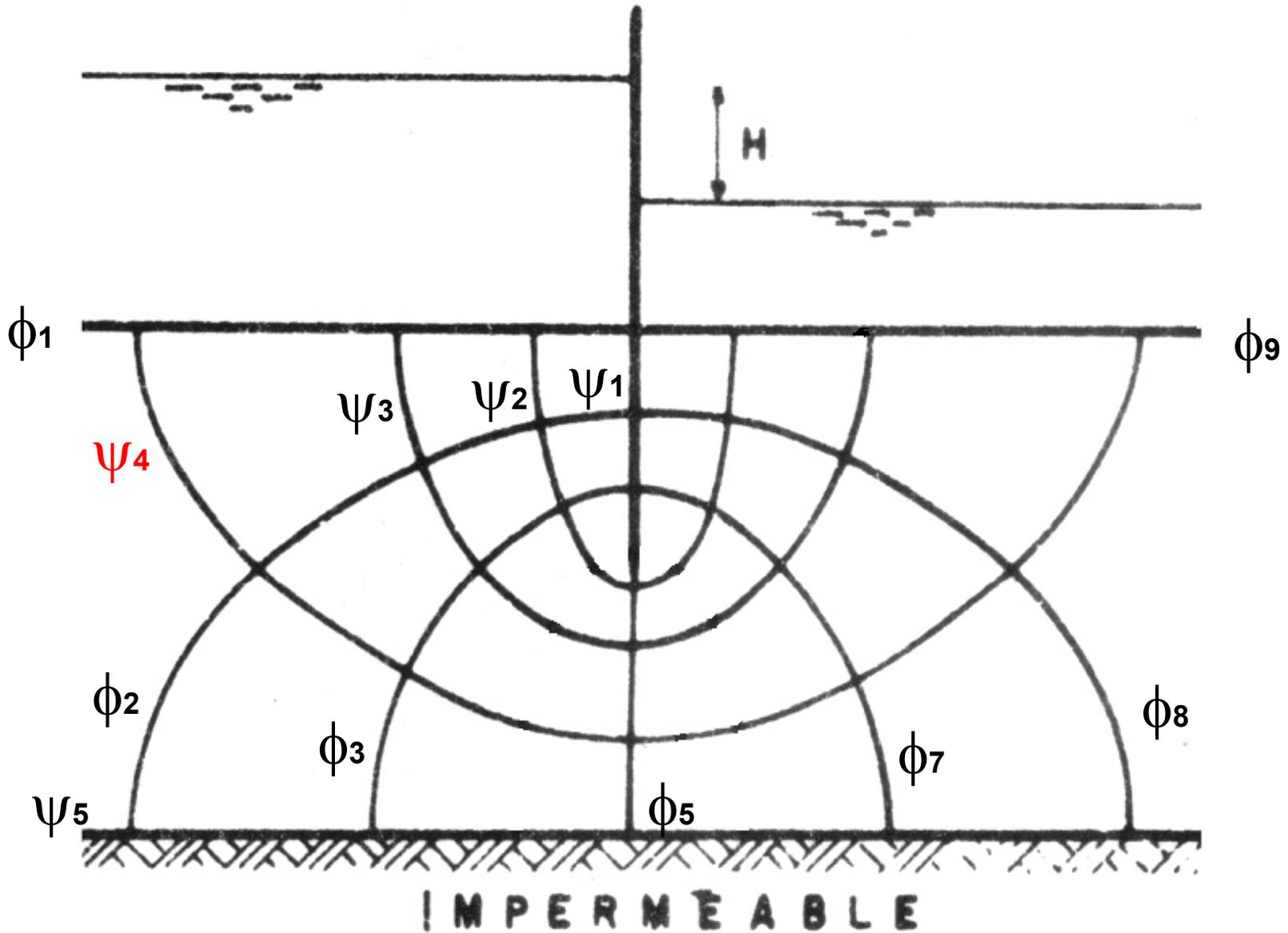
Ejercicio - Red de filtración



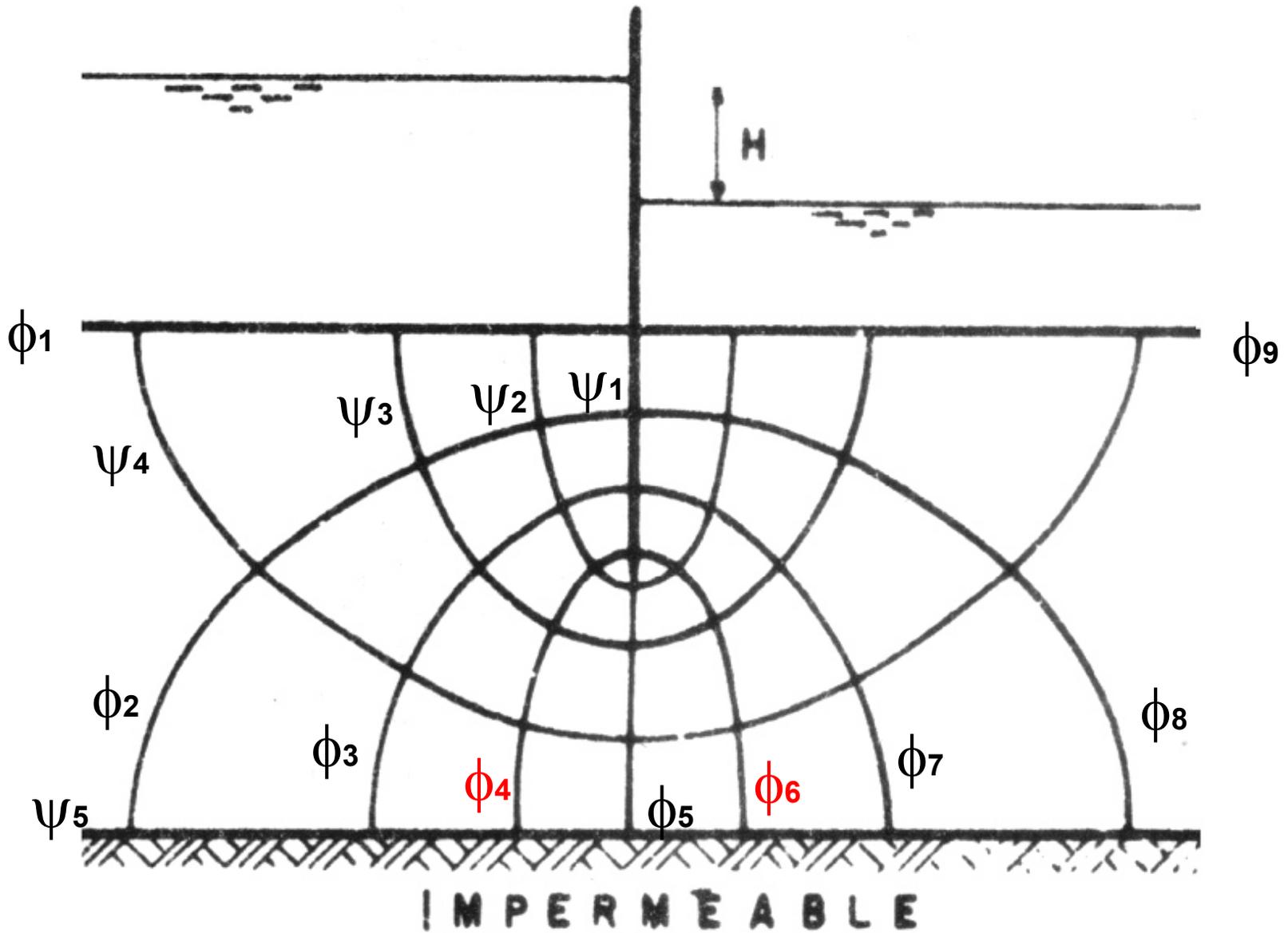
Ejercicio - Red de filtración



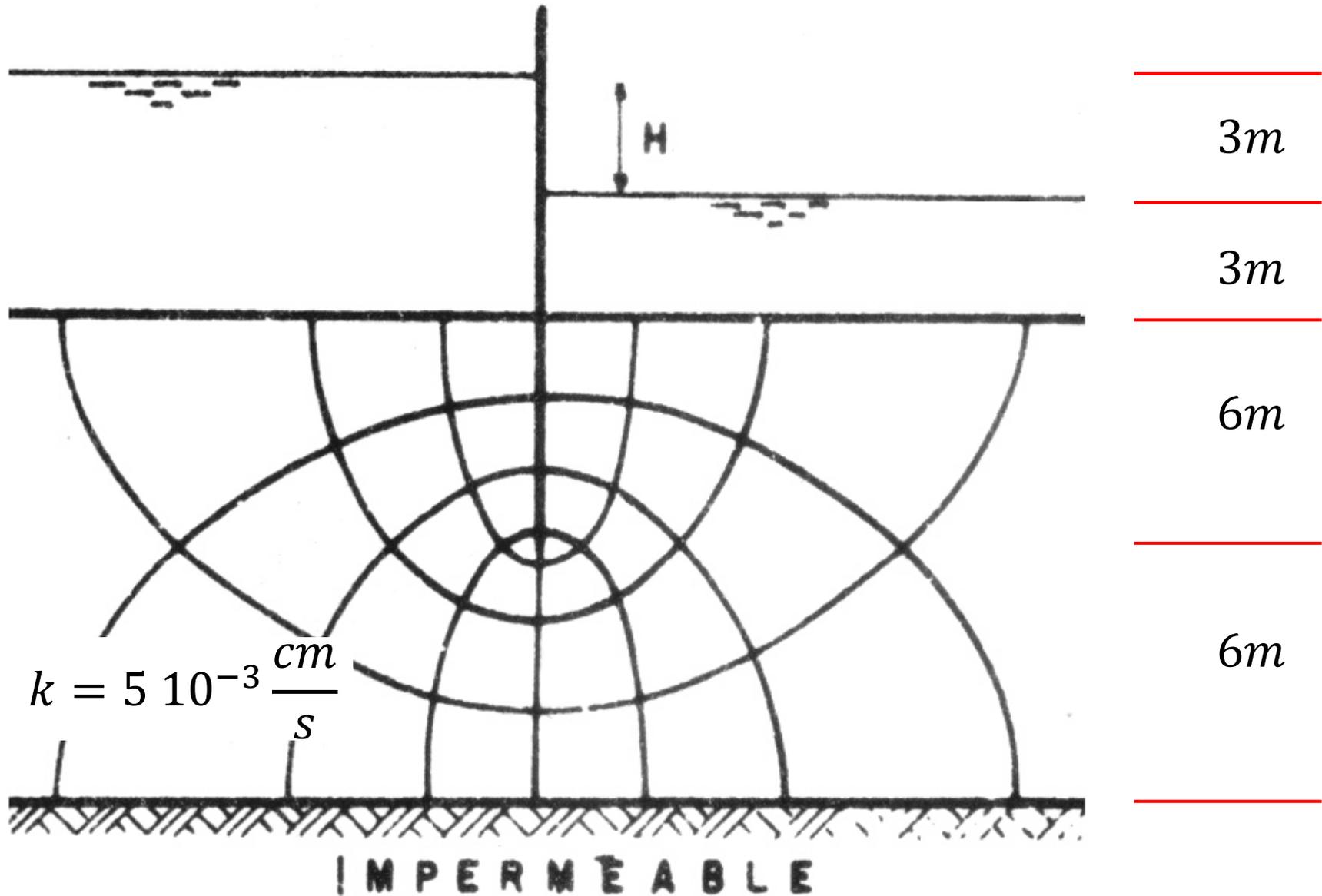
Ejercicio - Red de filtración



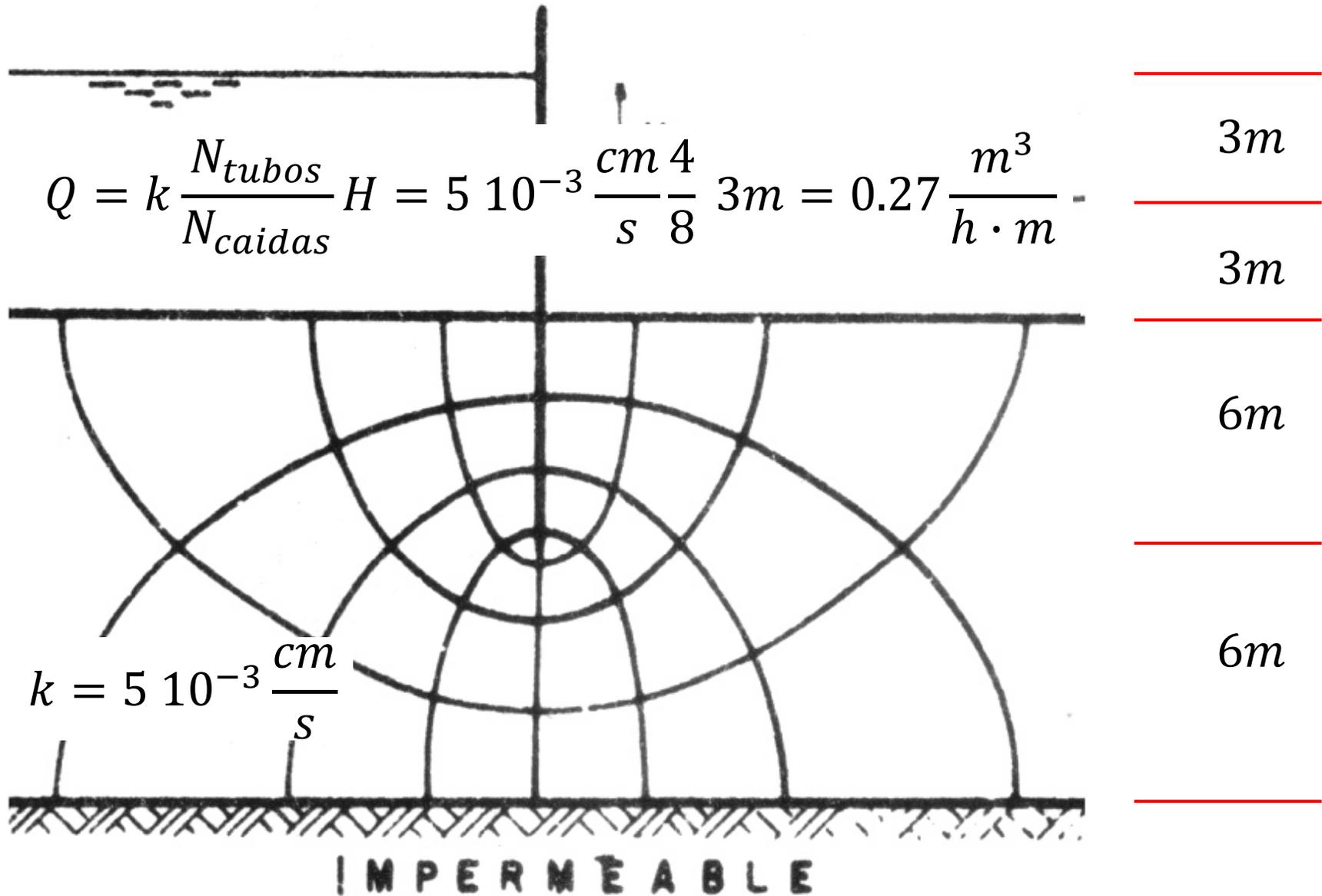
Ejercicio - Red de filtración



Ejercicio - Cálculo de caudal



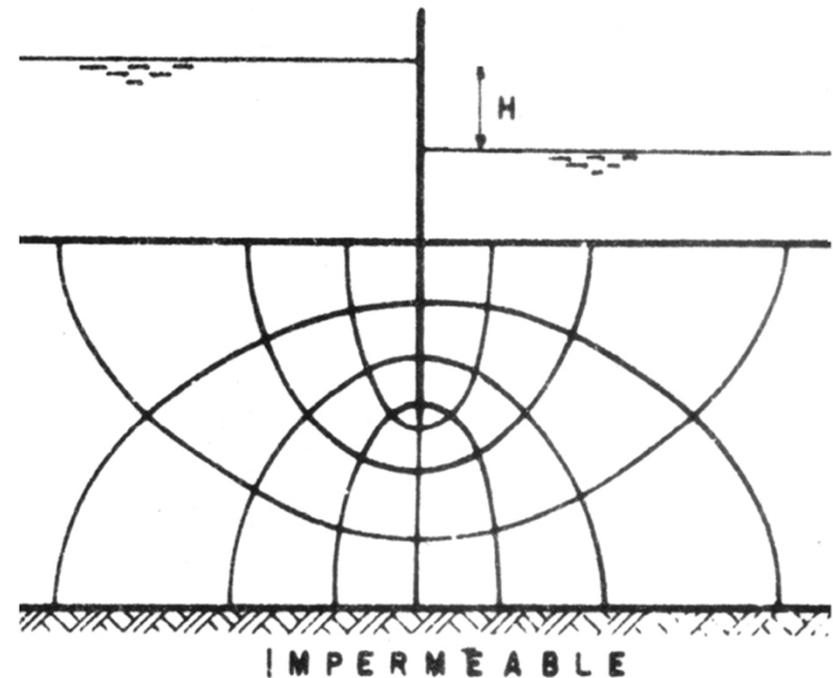
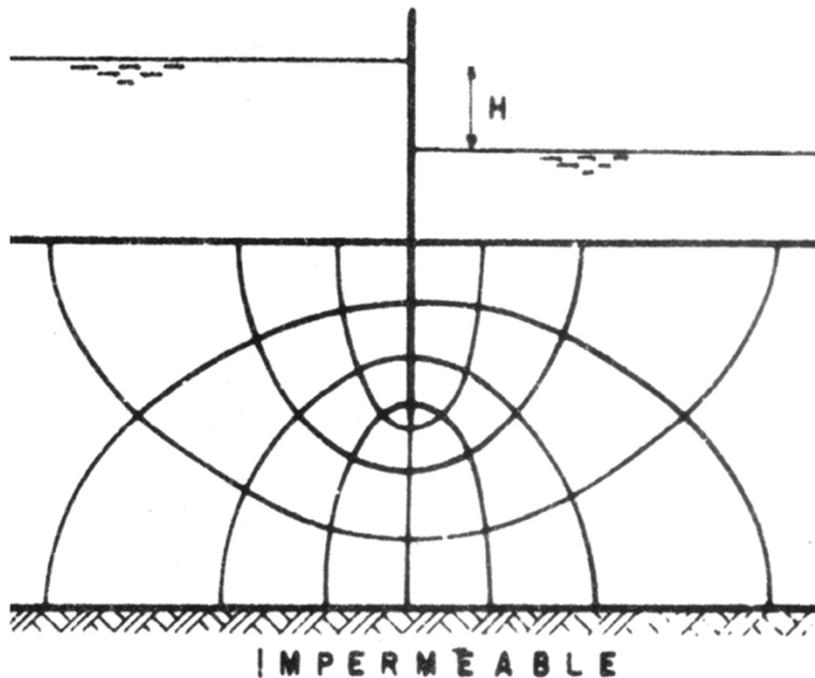
Ejercicio - Cálculo de caudal



Ejercicio – Presiones de poros



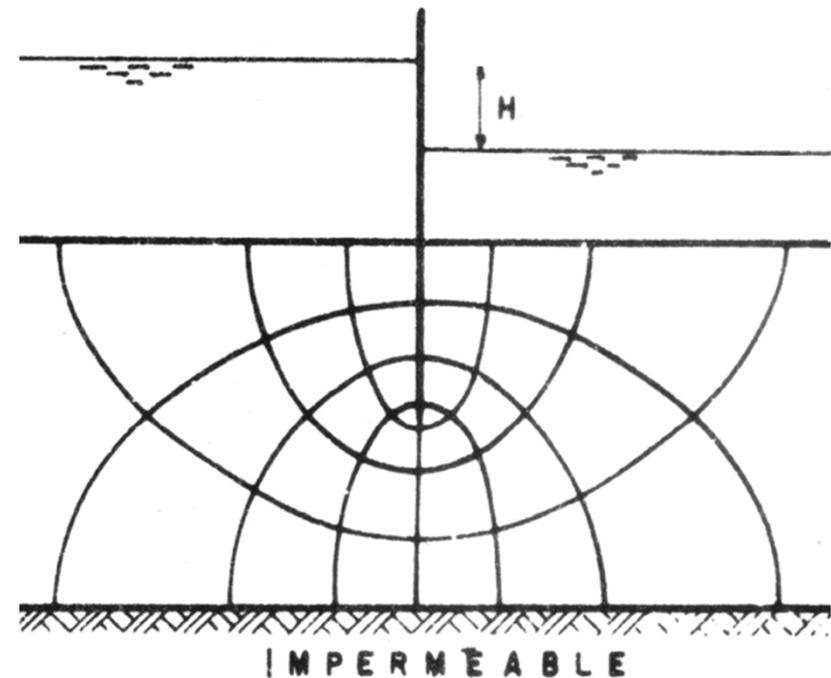
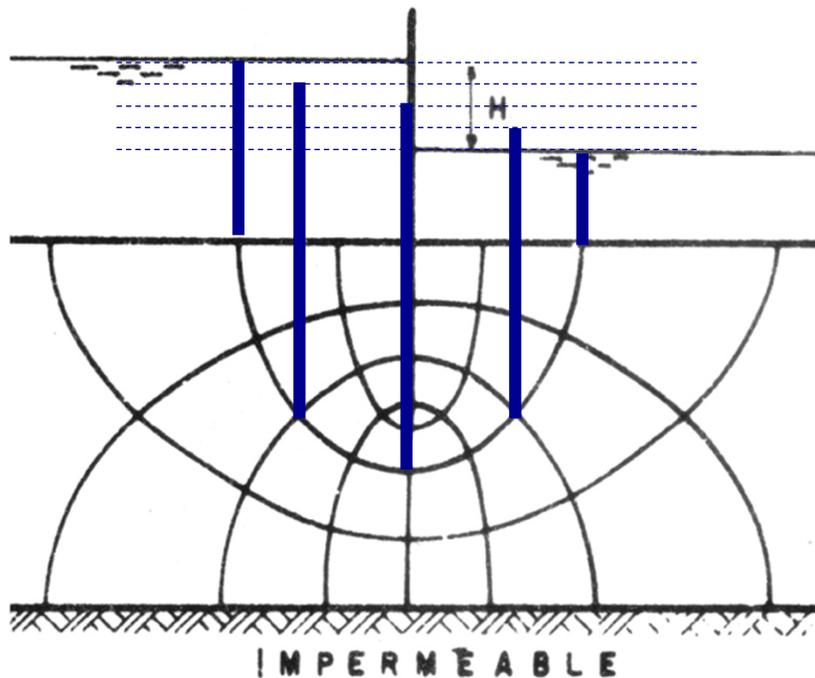
- Dibuje las presiones de poros a lo largo de una línea de corriente y de una equipotencial
- Dibuje las presiones de poros a lo largo del plano horizontal que pasa por el pie de las tablestacas



Ejercicio – Presiones de poros



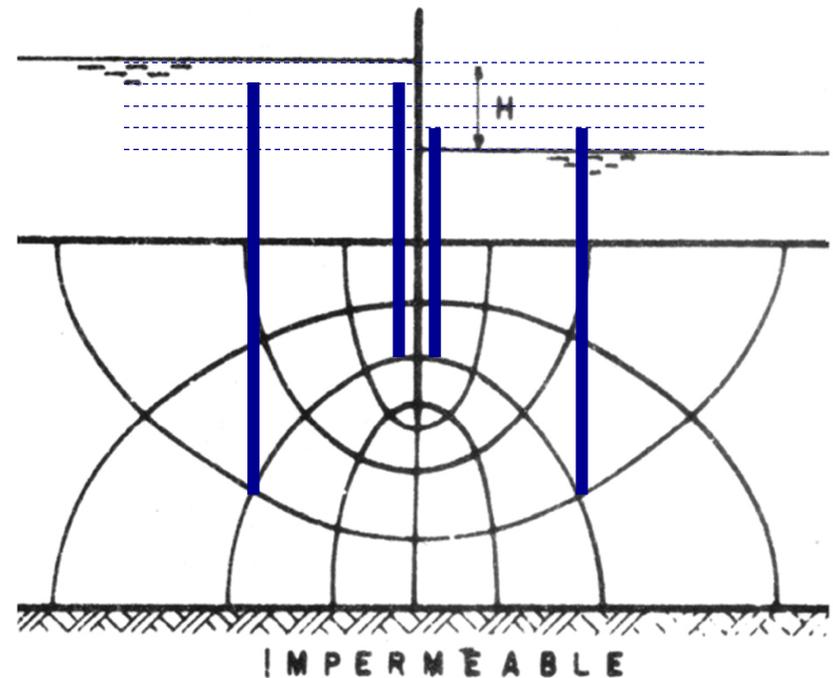
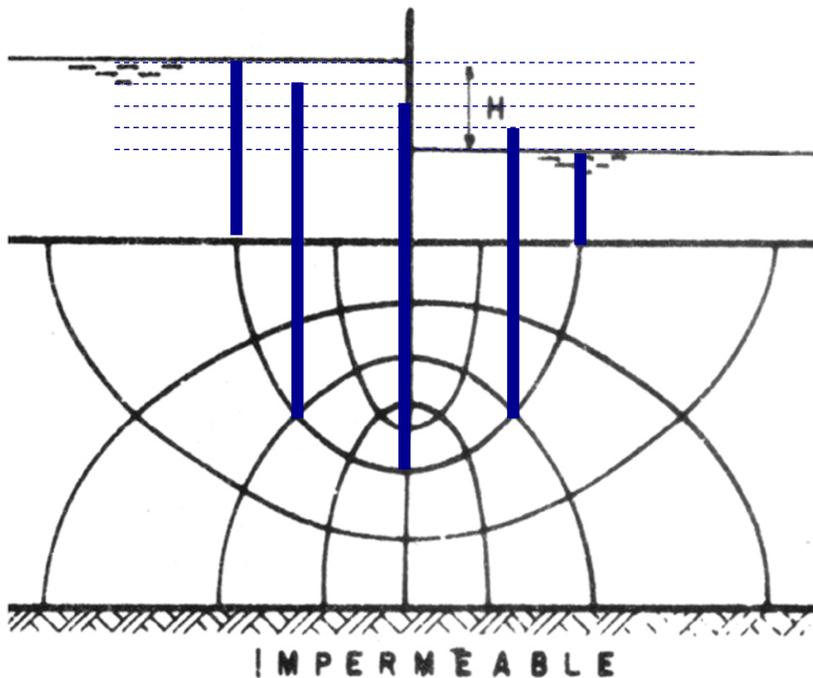
- Dibuje las presiones de poros a lo largo de una línea de corriente y de una equipotencial
- Dibuje las presiones de poros a lo largo del plano horizontal que pasa por el pie de las tablestacas



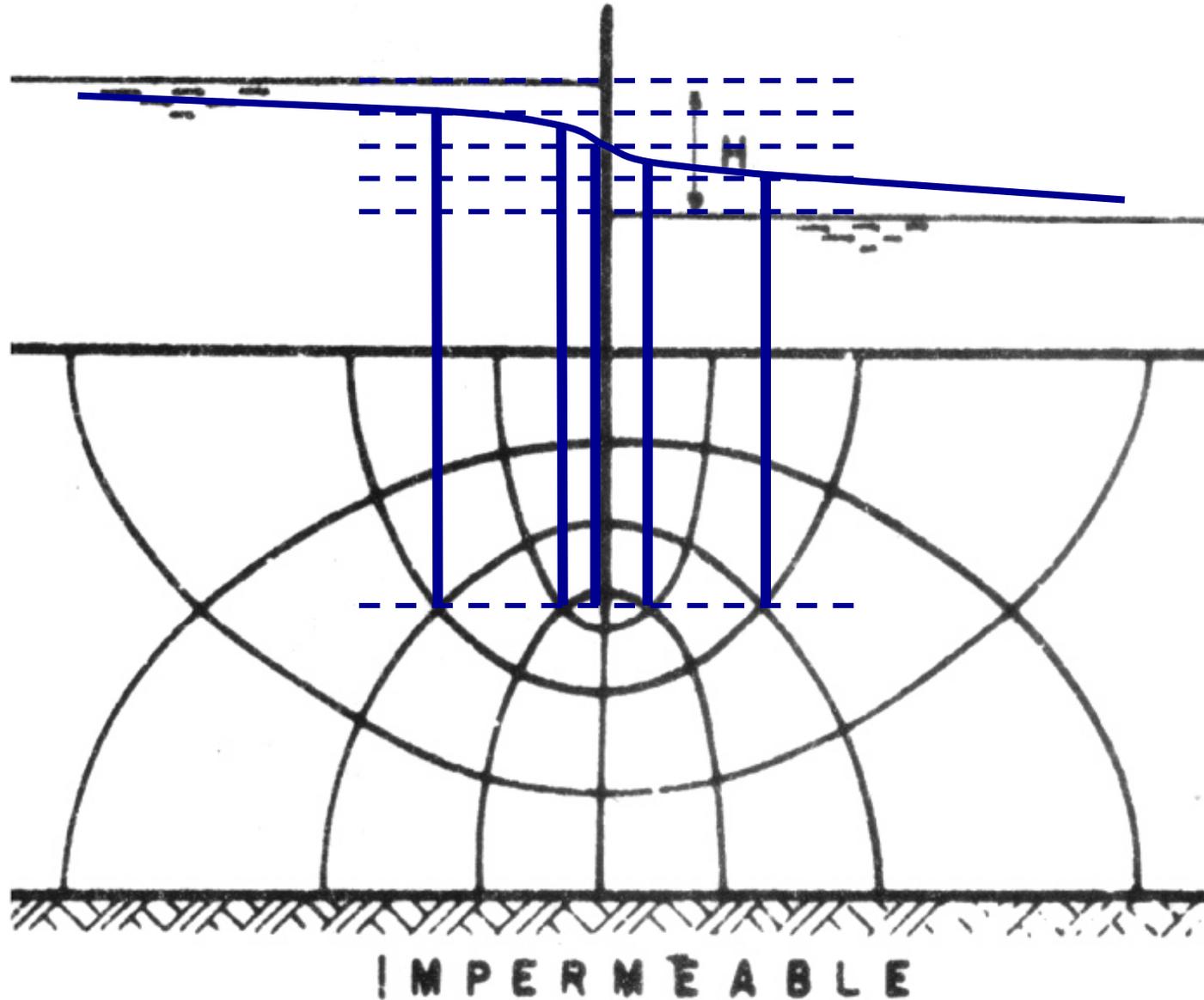
Ejercicio – Presiones de poros



- Dibuje las presiones de poros a lo largo de una línea de corriente y de una equipotencial
- Dibuje las presiones de poros a lo largo del plano horizontal que pasa por el pie de las tablestacas



Presiones de poros en línea de pie de tablestacas



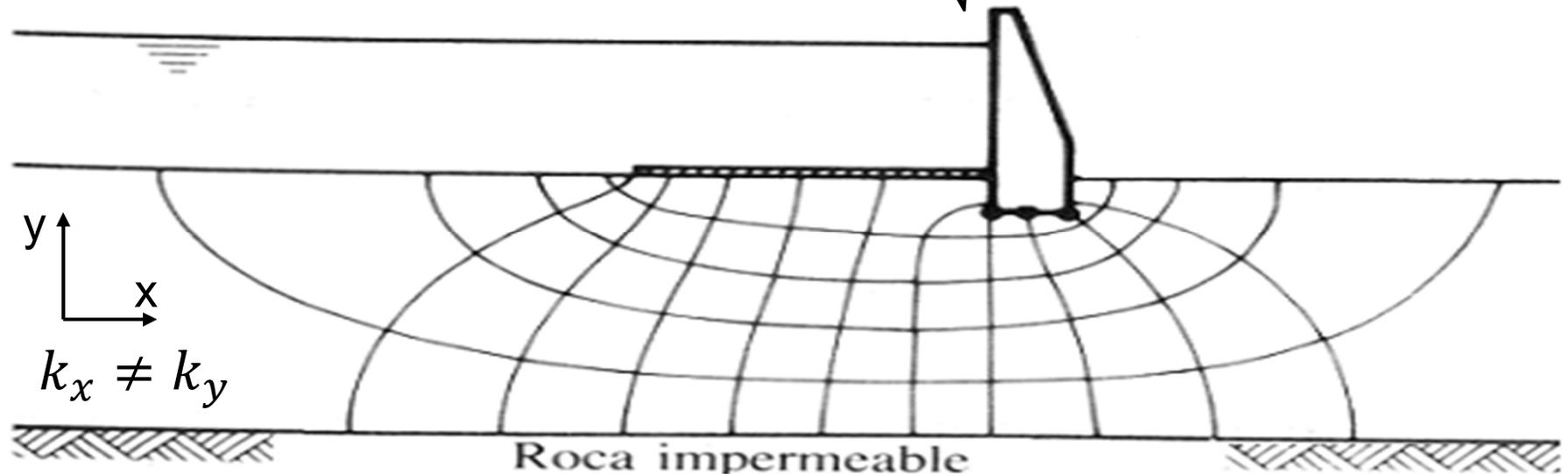
Suelos anisótropos



Si $k_x \neq k_y$ la ED queda $k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$

Para volver a la solución simple $\nabla^2 h = 0$ se hace la transformación

$$\bar{x} = x \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad k_{eq} = \sqrt{k_y k_x}$$



Suelos anisótropos



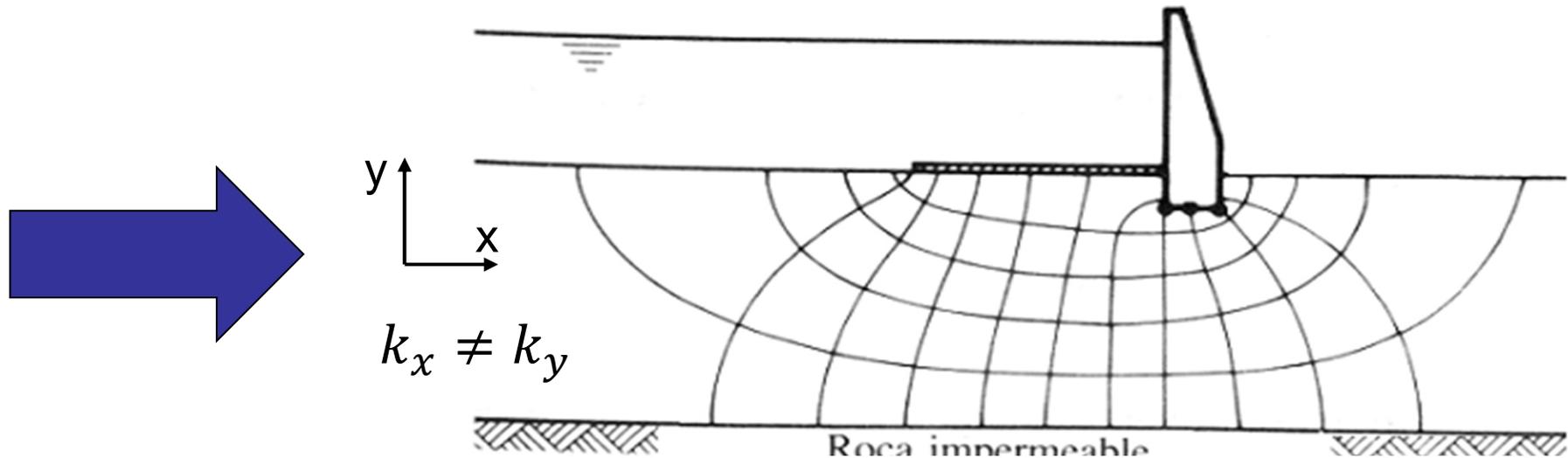
Pasos

- Se transforma el dominio con
- Se calcula la perm. equiv. k_{eq}
- Se calcula el caudal

Para conocer la red real se debe des-transformar

$$\bar{x} = x \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \quad k_{eq} = \sqrt{k_y k_x}$$

$$Q = k_{eq} \frac{N_{tubos}}{N_{caidas}} H$$



Índice



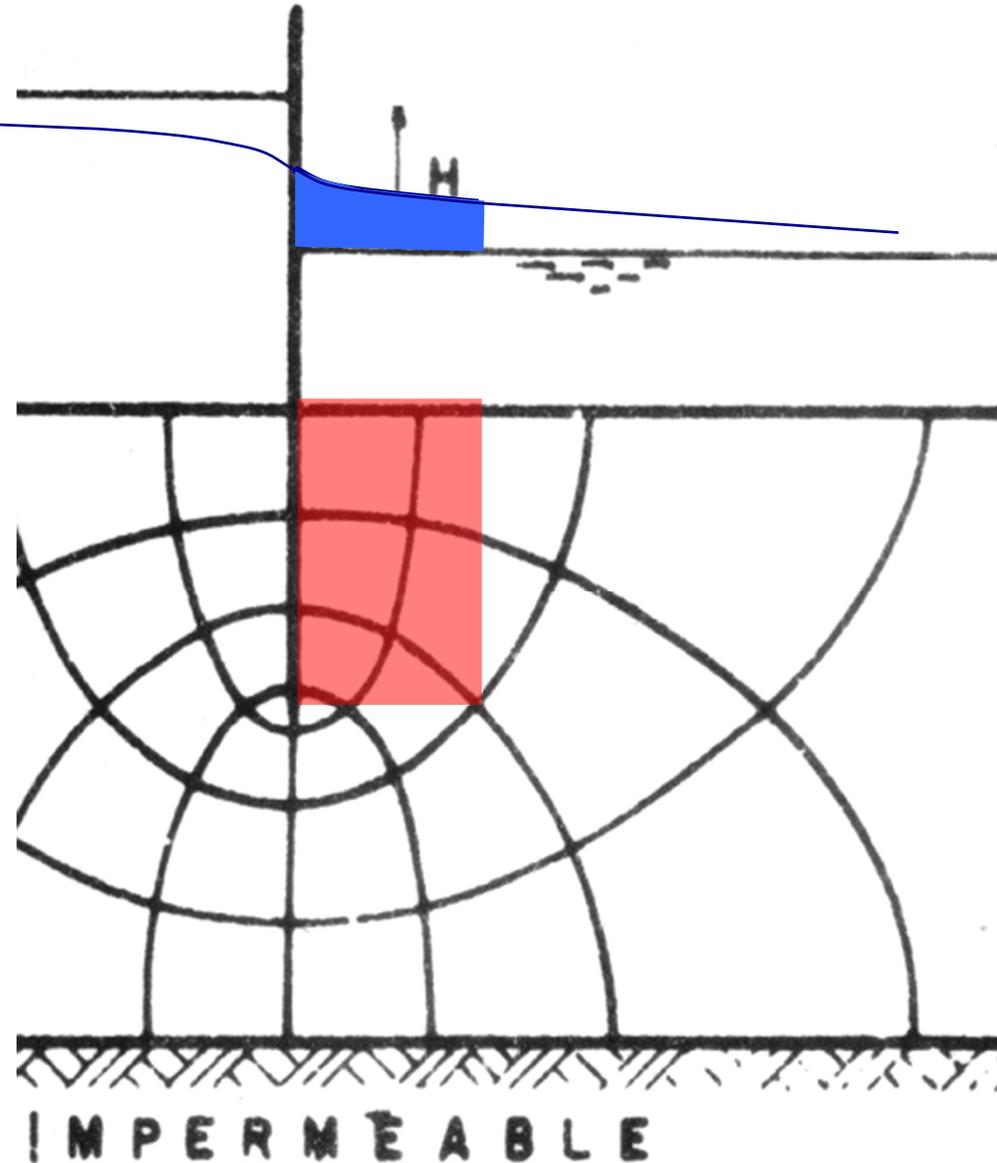
- Introducción
- Ecuación de Laplace
- Solución gráfica
- **Sifonaje**
- Flujo no confinado
- Abatimiento de napas
- Flujo no saturado
- Métodos numéricos

Sifonaje



El flujo de agua de abajo hacia arriba produce reducción de la presión efectiva

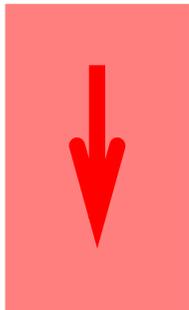
Si la presión efectiva se anula, el suelo puede ser arrastrado por el agua → Sifonaje



Cálculo de estabilidad al sifonaje

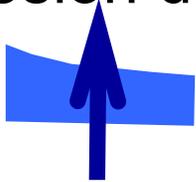


Estabilizante: Peso sumergido



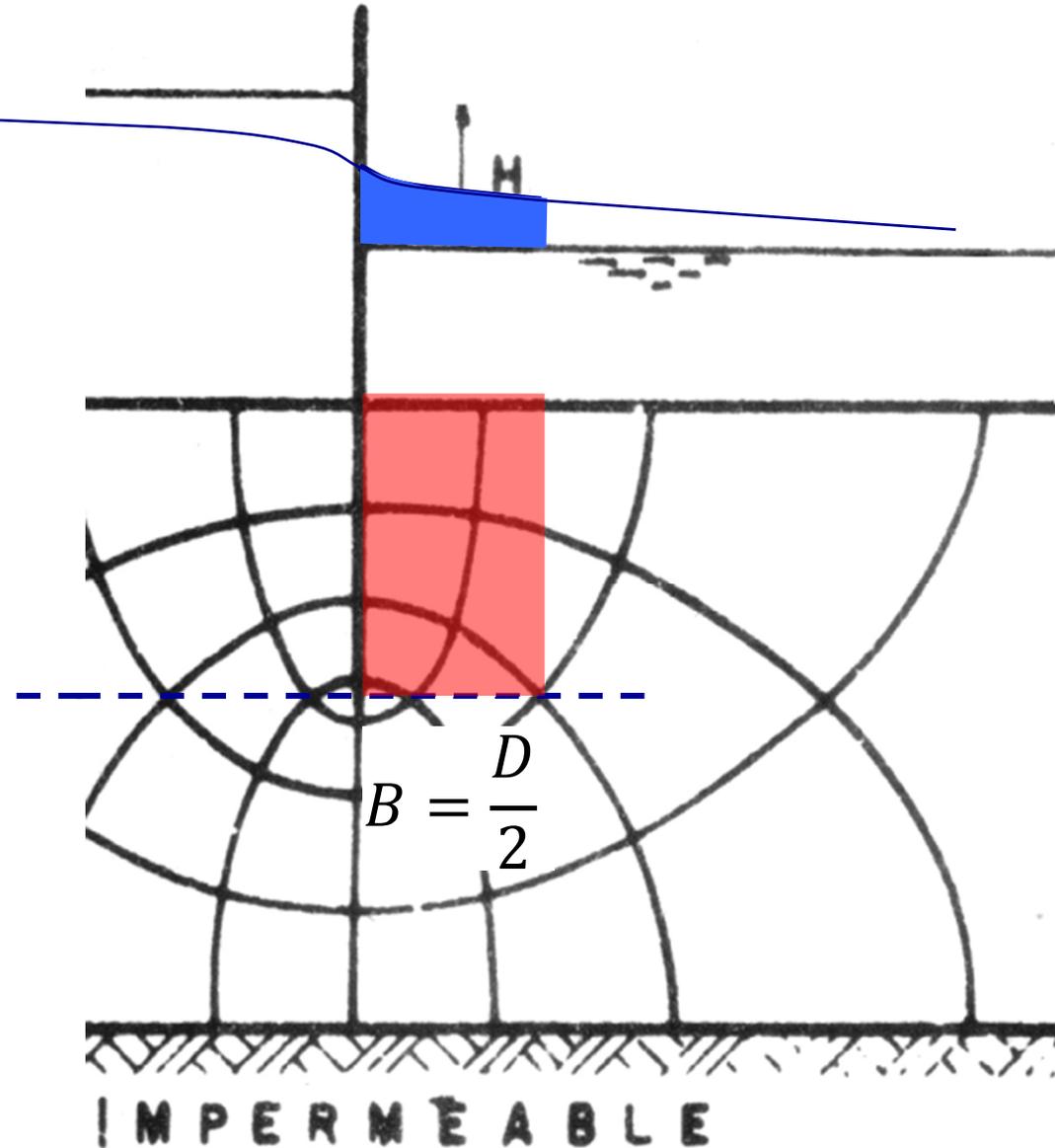
$$W = \frac{\gamma' D^2}{2}$$

Desestabilizante:
Presión de filtración



$$U = \frac{\gamma_w \bar{h} D}{2}$$

$$F = \frac{W}{U} = \frac{\gamma' D}{\gamma_w \bar{h}} > 1.20$$



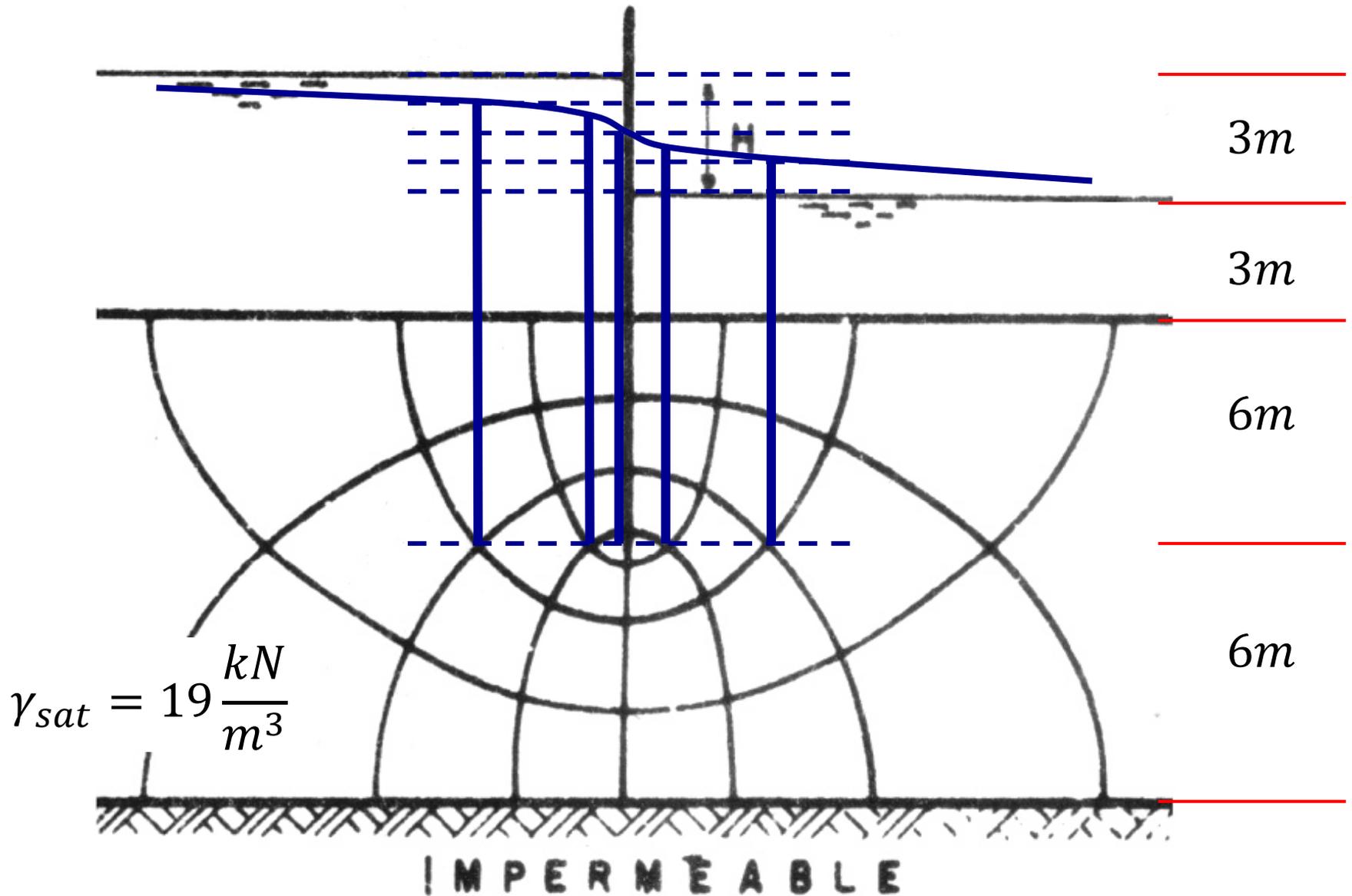
Sifonaje



Rotura de fondo de excavación apuntalada ($W < U$)



Ejercicio – Calcular estabilidad al sifonaje



Índice



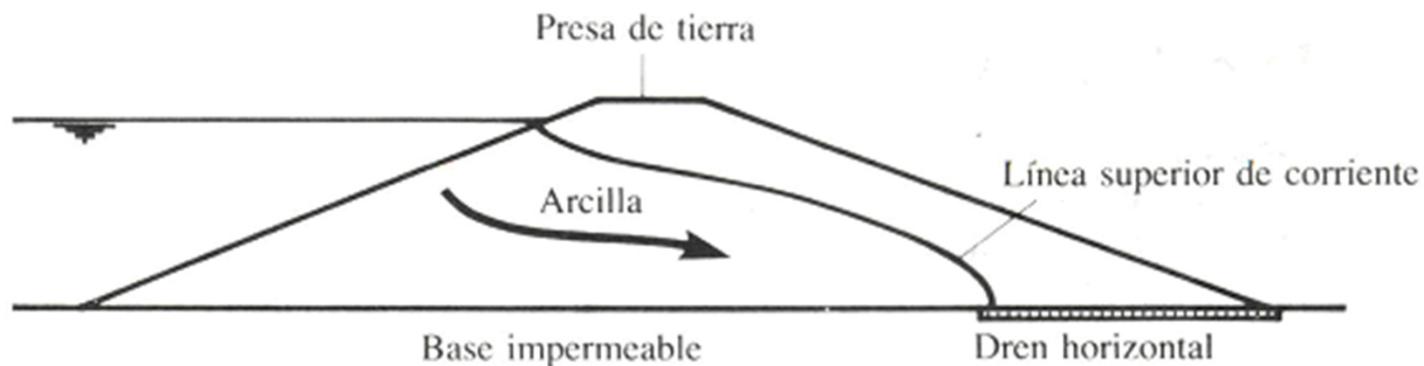
- Introducción
- Ecuación de Laplace
- Solución gráfica
- Sifonaje
- **Flujo no confinado**
- Abatimiento de napas
- Flujo no saturado
- Métodos numéricos

Flujo no confinado



Cuando el flujo no es confinado, la línea de corriente superior es parte del problema

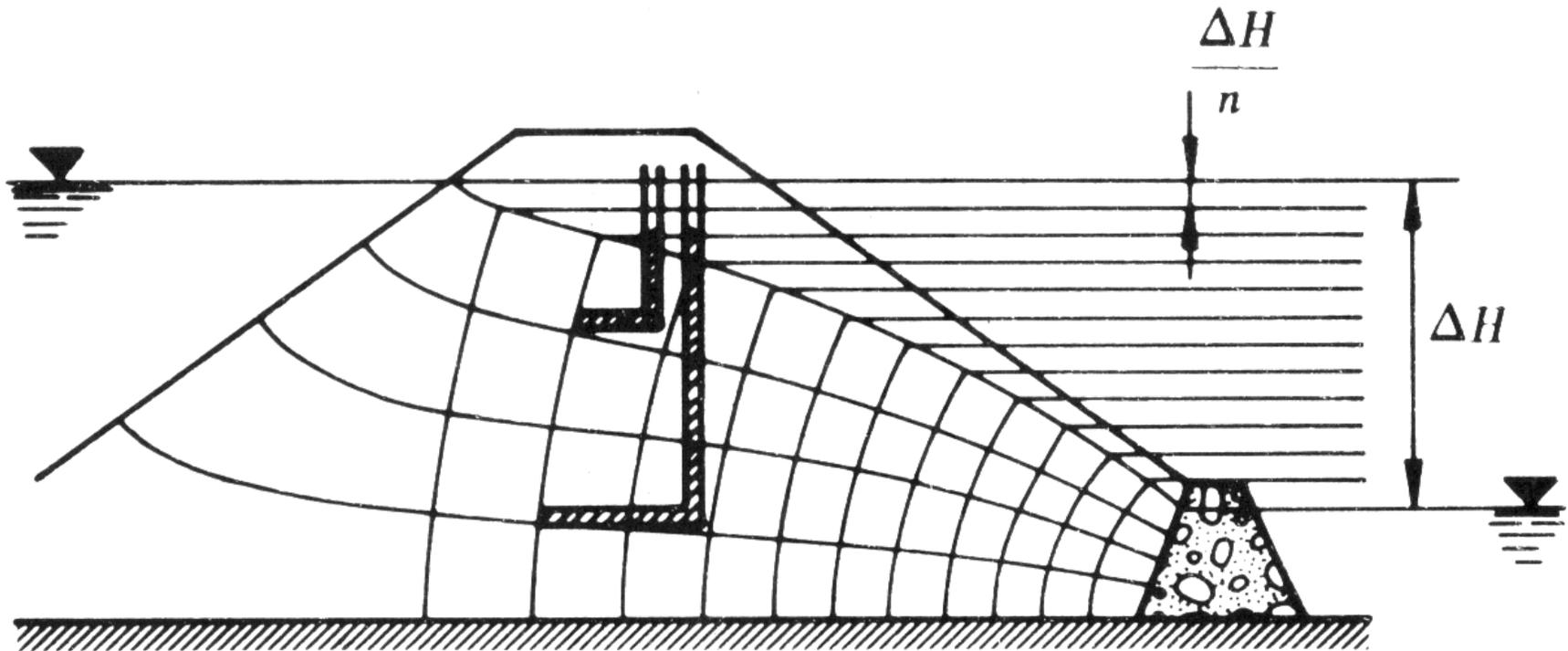
- El problema no tiene solución analítica exacta
- En la línea de corriente superior la presión es constante e igual a la atmosférica
- Por lo tanto, las líneas equipotenciales cortan todas a distancias iguales



Flujo no confinado



La superficie de escurrimiento superior tiene presión constante (no es una equipotencial): las equipotenciales están equiespaciadas en vertical



Flujo no confinado en presas

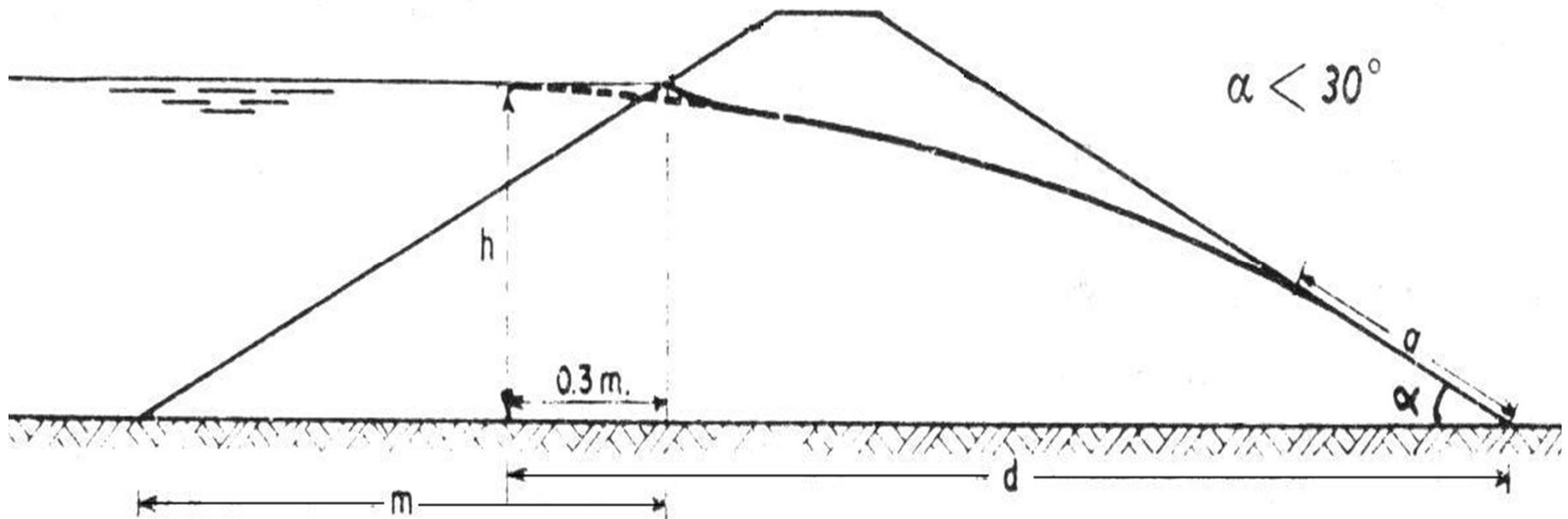


Longitud que aflora

$$a = \frac{d}{\cos[\alpha]} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2[\alpha]} - \frac{h^2}{\sin^2[\alpha]}}$$

Caudal

$$q = k \cdot a \cdot \sin[\alpha] \cdot \tan[\alpha]$$



(Schaffernak & Van Itterson 1917)

Experiencia de laboratorio



- Modelo físico de red de escurrimiento
- Mostración de gradiente hidráulico crítico



Sifonaje



Índice



- Introducción
- Ecuación de Laplace
- Solución gráfica
- Sifonaje
- Flujo no confinado
- **Abatimiento de napas**
- Flujo no saturado
- Métodos numéricos

Pozo en acuífero confinado



Hipótesis: Flujo radial,
laminar, horizontal

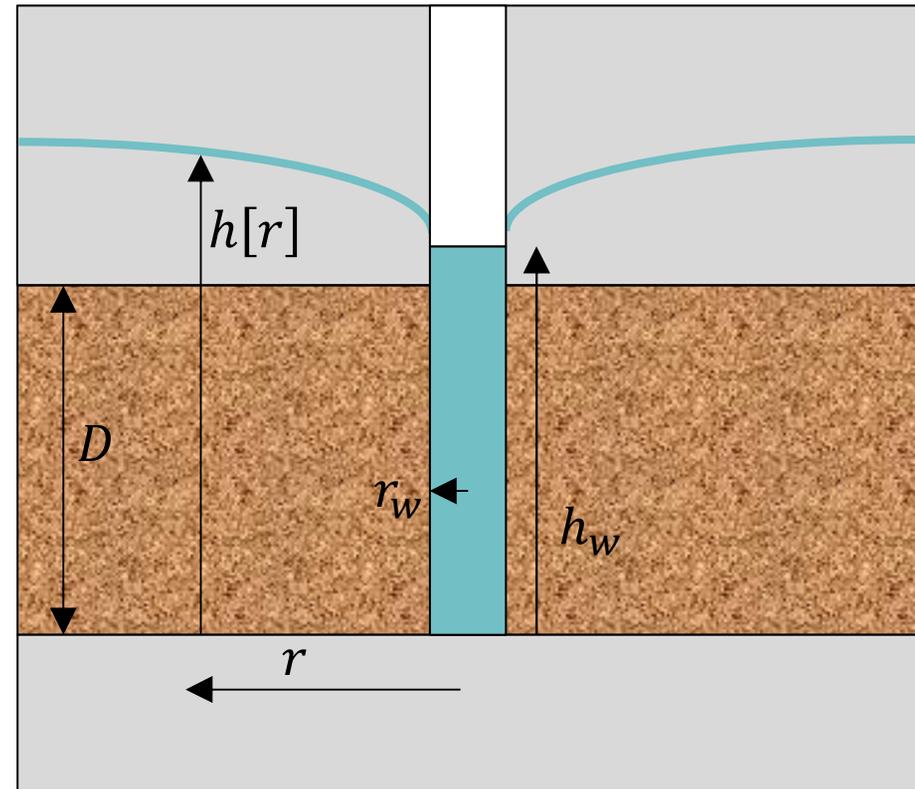
- Continuidad
 $Q = 2\pi r D \cdot v[r] = cte$
- Darcy
 $v = k \cdot i = k \frac{dh}{dr}$

Reemplazando

$$\frac{Q}{2\pi k D} \frac{dr}{r} = dh \rightarrow h[r] = \frac{Q}{2\pi k D} \ln \left[\frac{r}{r_w} \right] + h_w < H$$

Caudal

$$Q = \frac{2\pi k D}{\ln[R/r_w]} (H - h_w) \text{ con } R \cong 3000(H - h_w) \sqrt{k[m/s]}$$



Pozo en acuífero libre



Hipótesis: Flujo radial,
laminar, horizontal

- Continuidad

$$Q = 2\pi r h[r] \cdot v[r] = cte$$

- Darcy

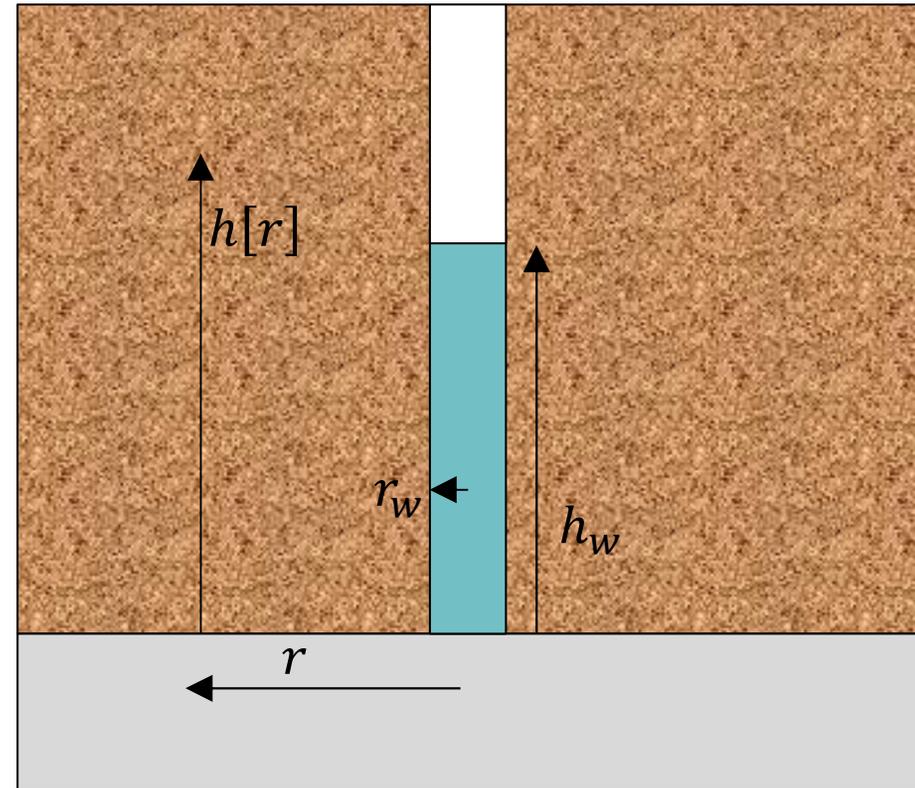
$$v = k \cdot i = k \frac{dh}{dr}$$

Reemplazando

$$\frac{Q}{2\pi k} \frac{dr}{r} = h \cdot dh \rightarrow h[r] = \sqrt{\frac{Q}{\pi k} \ln \left[\frac{r}{r_w} \right] + h_w^2} < H$$

Caudal

$$Q = \frac{\pi k}{\ln[R/r_w]} (H^2 - h_w^2) \text{ con } R \cong 3000(H - h_w)\sqrt{k[m/s]}$$



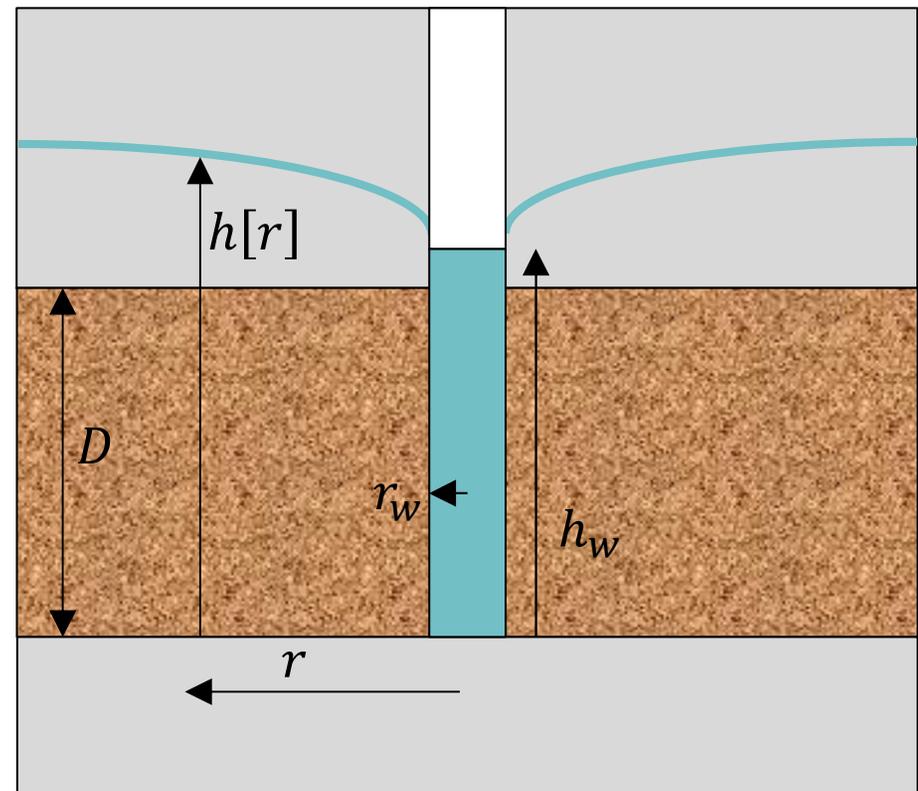
Ejercicio: Flujo confinado



Determine el caudal por bomba y la separación longitudinal s entre bombas para lograr un abatimiento de 2.5 m en una trinchera de longitud infinita

- $H = 12.0m$
- $k = 10^{-4} cm/s$
- $D = 4.0m$
- $R \sim 50m$
- $r_w = 0.10m$

$$h[r] = \frac{Q}{2\pi kD} \ln \left[\frac{r}{r_w} \right] + h_w < H$$



Ejercicio: Flujo confinado - Solución



Máximo caudal: $h_w = D$ (altura de agua dentro del pozo igual al espesor del acuífero)

- $H - h_w = 12m - 4m = \frac{Q}{2\pi kD} \ln \left[\frac{R}{r_w} \right] = \frac{Q}{2\pi 10^{-4} \frac{cm}{s} 4m} \ln \left[\frac{50m}{0.1m} \right]$
- $\rightarrow Q = 115 \frac{l}{h}$

Abatimiento que debe aportar cada bomba: $a = 1.25m$

Distancia entre bombas

- $(H - a) - h_w = \frac{Q}{2\pi kD} \ln \left[\frac{s/2}{r_w} \right]$
- $12m - 1.25m - 4m = \frac{115 l/h}{2\pi 10^{-4} \frac{cm}{s} 4m} \ln \left[\frac{s/2}{0.1m} \right] \rightarrow s = 40m$

Selección del método de abatimiento

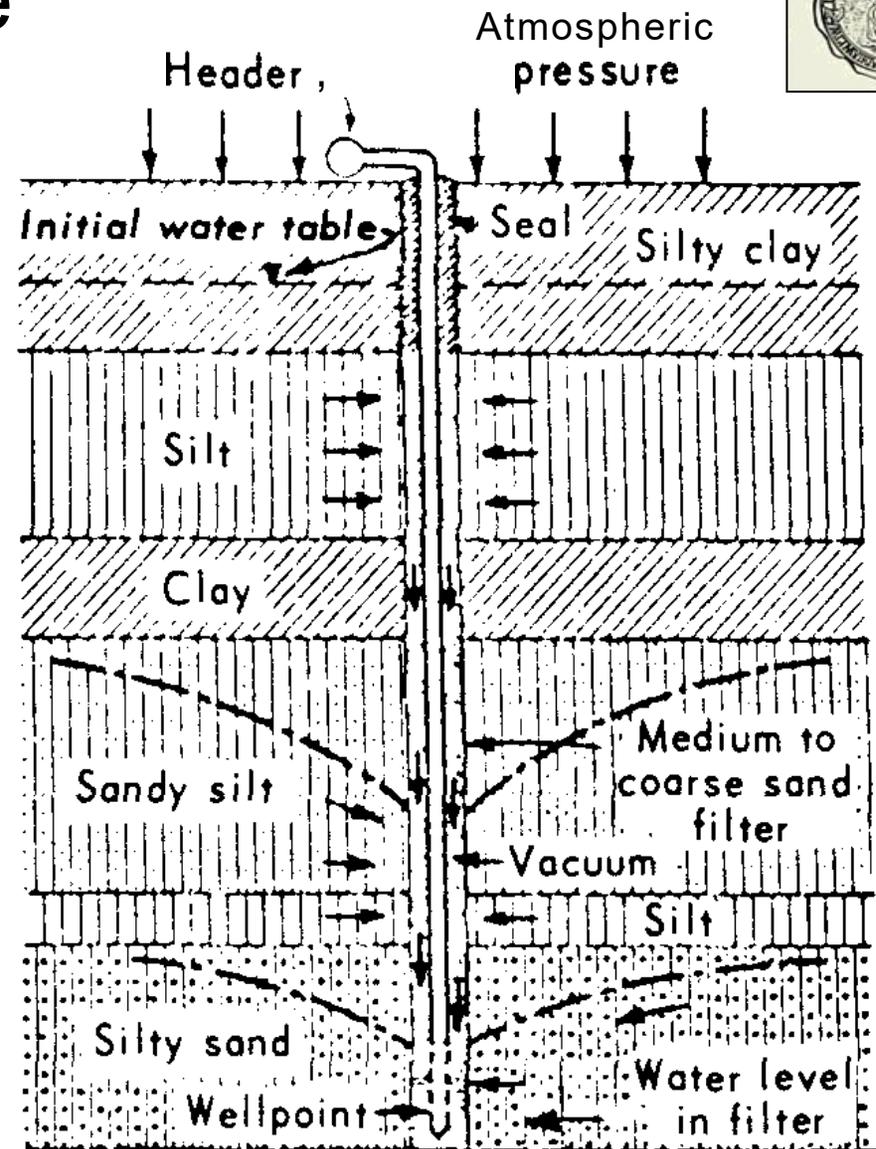


Materiales gruesos:

- El gradiente hidráulico natural permite el drenaje
- Los caudales son altos

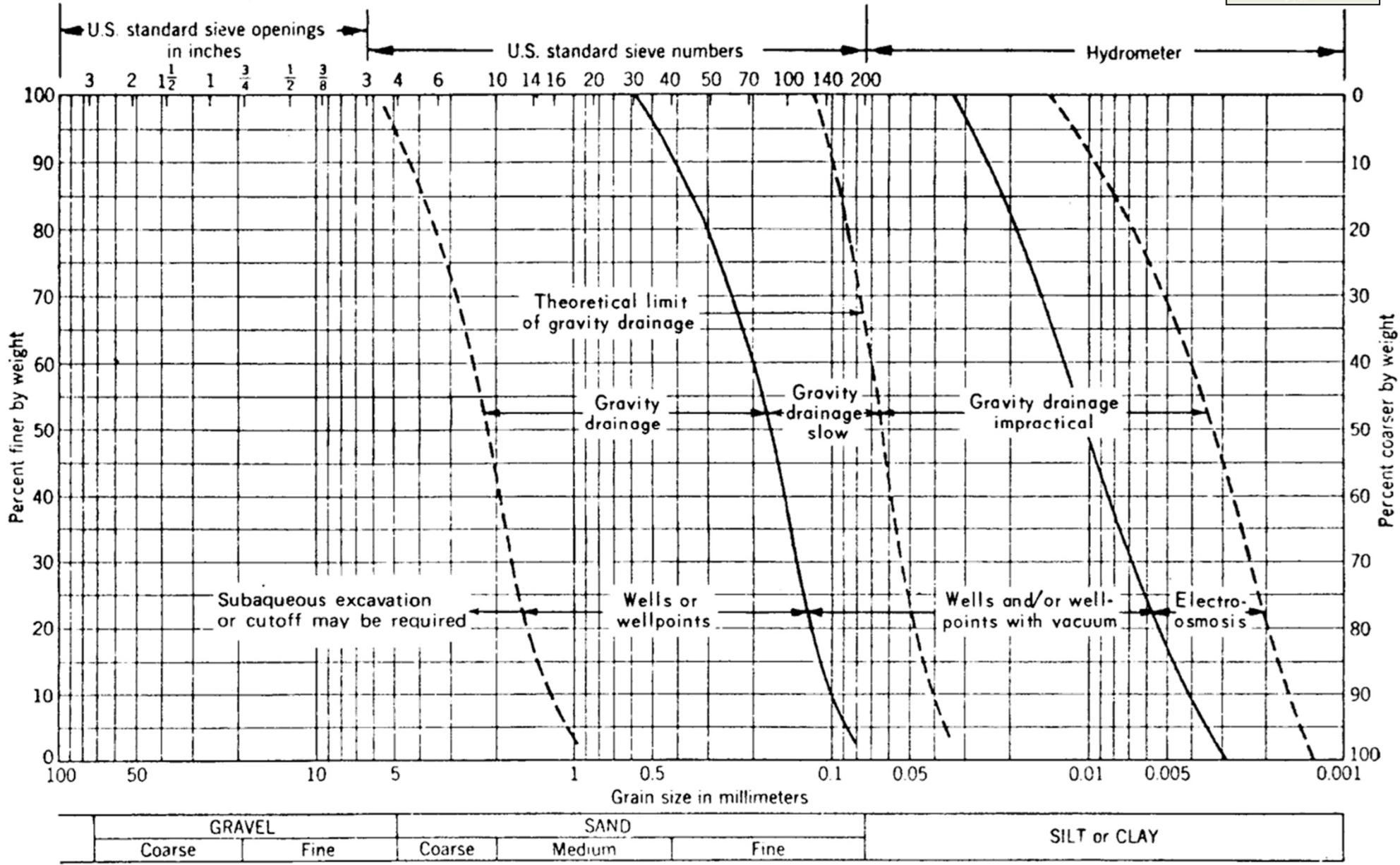
Materiales finos:

- Se requiere aumentar el gradiente hidráulico
- Los caudales son bajos

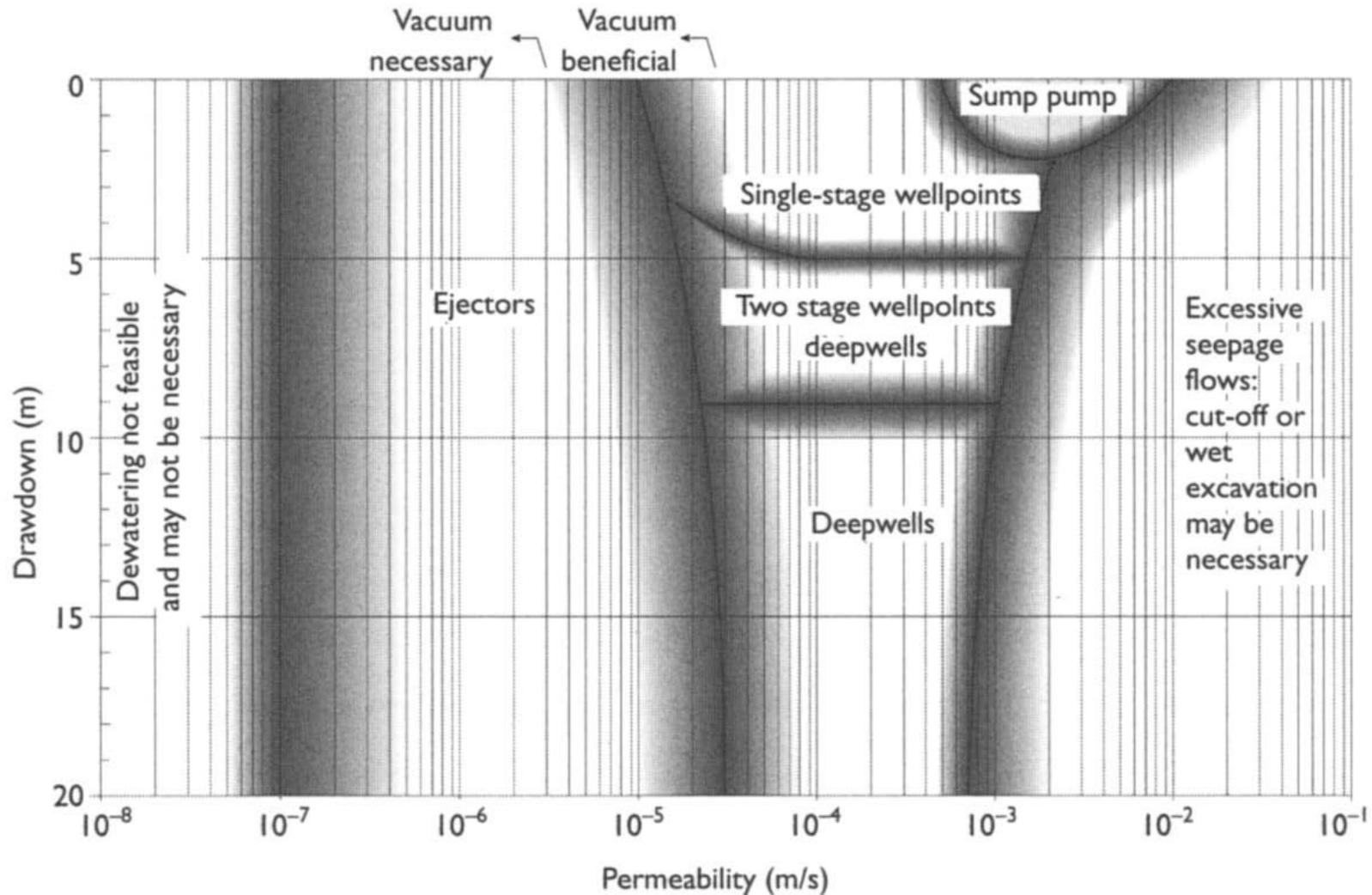


Note: Vacuum in header = 25 ft; vacuum in filter and soil in vicinity of well point = approximately 10 ft.

Selección del sistema de abatimiento

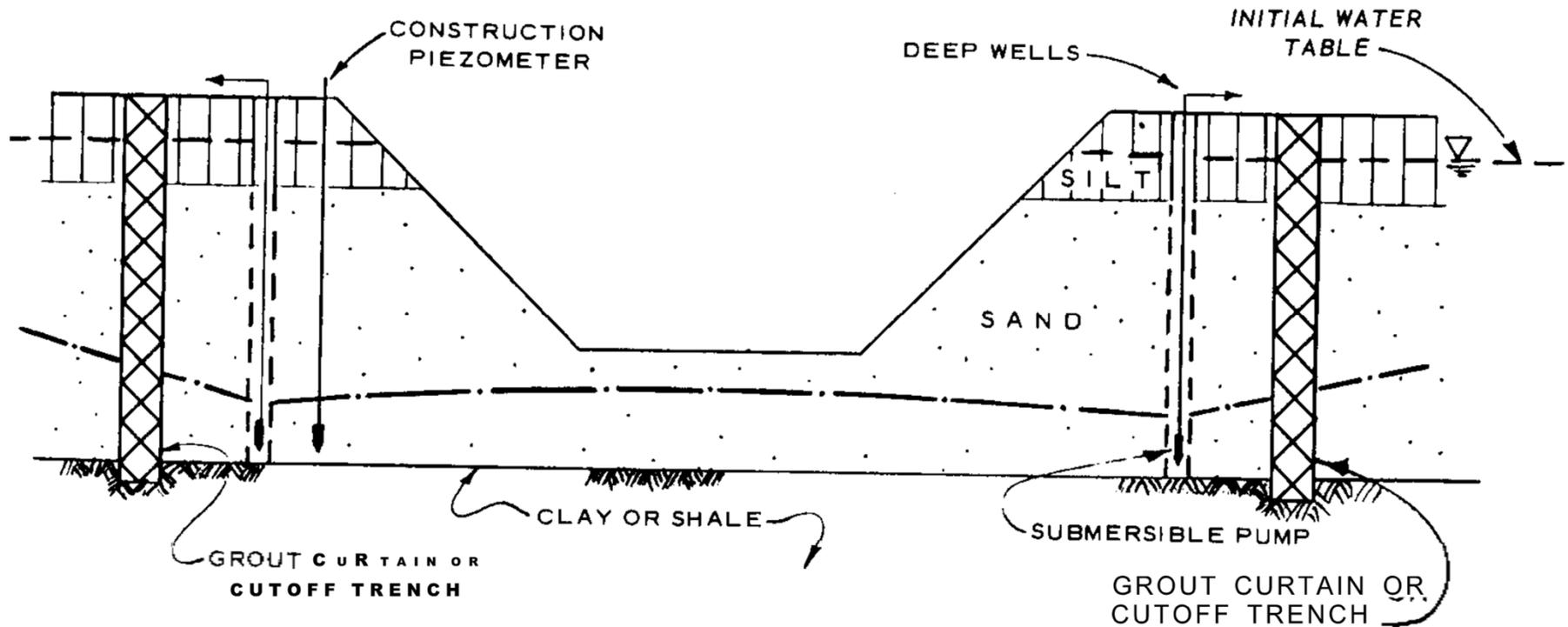


Selección del sistema de abatimiento

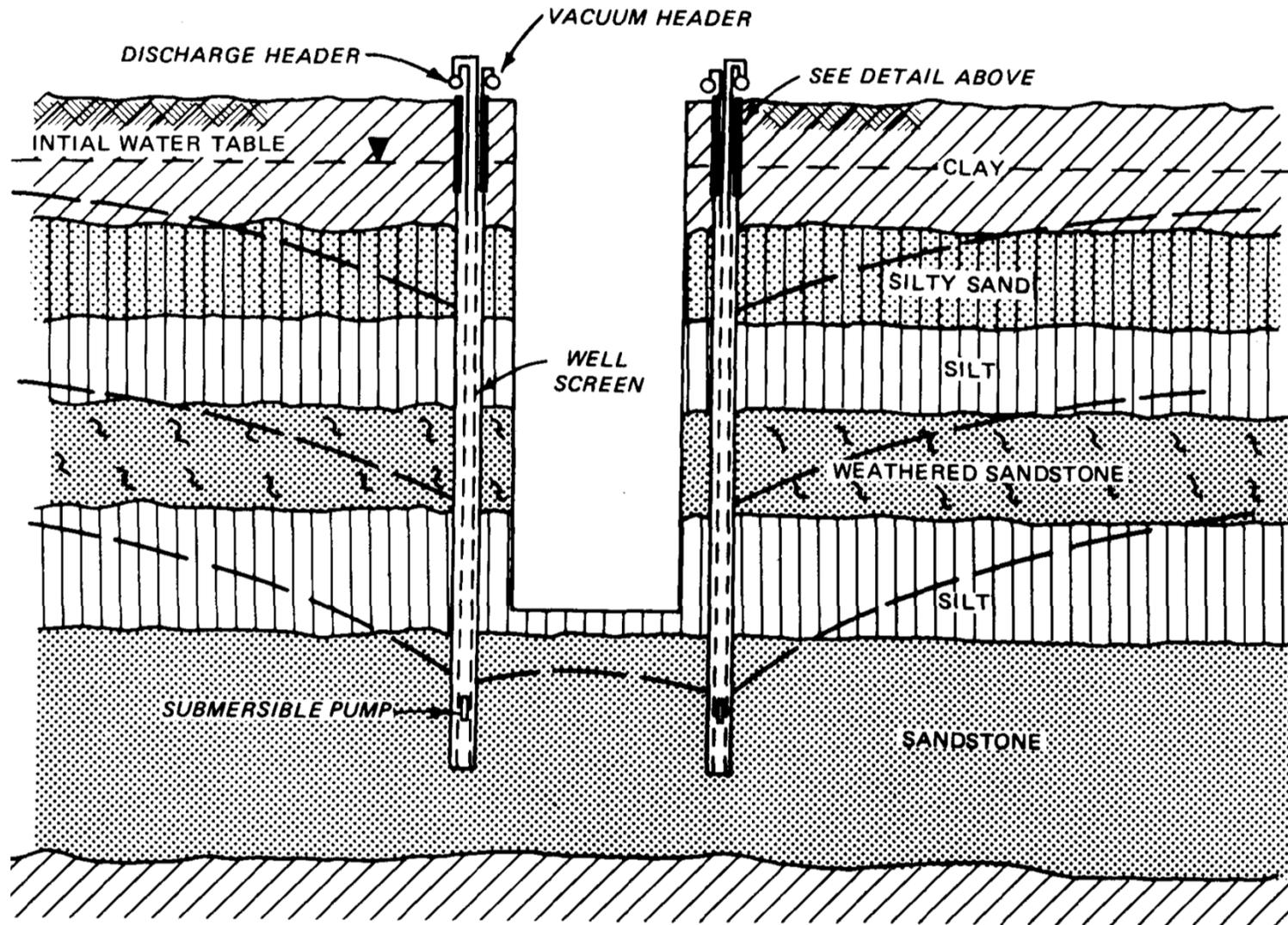


(Preene et al 2000)

Pozos profundos (suelos permeables)



Wellpoint (suelos poco permeables)



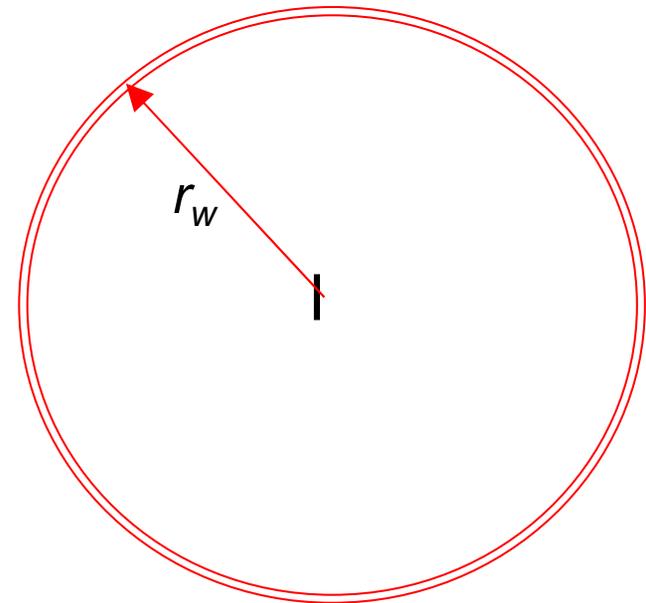
Estimación del caudal total a bombear



Pasos

- Se define el área a deprimir y un círculo de área equivalente
- Se aplica la ecuación de un pozo único con r_w = radio del pozo equivalente

$$Q = \frac{\pi k}{\ln \left[\frac{R}{r_w} \right]} (H^2 - h_w^2)$$



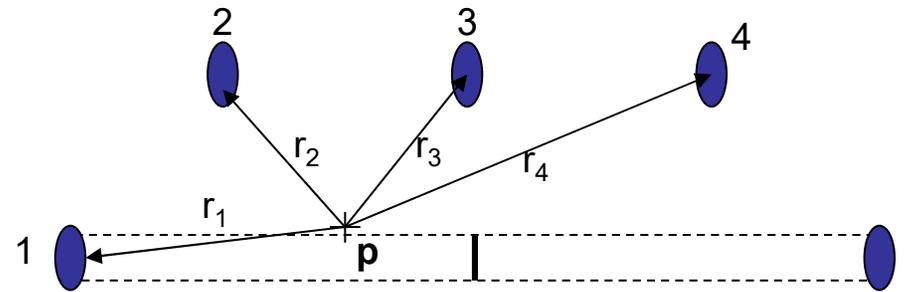
Diseño de la distribución de pozos



Pasos

- Se asume que cada pozo produce su cono de abatimiento sin interferir con los demás
- Se calcula la superficie 3D abatida con

$$h_w^2 = H^2 - \frac{Q}{\pi k} \sum \ln \left[\frac{r_i}{r_w} \right]$$



- Se ajustan las posiciones de las bombas hasta que todas extraen caudales similares y la superficie queda uniforme

Ejemplo de cálculo



Conjunto de pozos completos en acuífero libre

$$B := \begin{pmatrix} 10 & 2.5 & 15 \\ 25 & 2.5 & 15 \\ 40 & 2.5 & 15 \\ 49.1 & -1.4 & 15 \\ 49.1 & 12.9 & 15 \\ 45.9 & 45 & 15 \end{pmatrix} \cdot \text{m}$$

$B(x, y, \text{abatimiento})$

$$r_w := 10 \cdot \text{cm} \quad k := 10 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$H_f := -20\text{m} \quad H_0 := 3.5 \cdot \text{m}$$

$$H_w := H_0 - B^{(3)} \quad n_p := \text{length}(B^{(1)})$$

$$i := 1 .. n_p$$

$$R_0 := 3000 \cdot (H_0 - H_w) \cdot \sqrt{\frac{k}{1 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

$$Q := \begin{pmatrix} 4 \\ 3.5 \\ 3 \\ 3.5 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

$$r(x, y, i) := \min \left[\max \left[r_w, \sqrt{(x - B_{i,1})^2 + (y - B_{i,2})^2} \right], R_{0_i} \right]$$

$$h(x, y) := \sqrt{(H_0 - H_f)^2 - \sum_{i=1}^{n_p} \left(\frac{Q_i}{\pi \cdot k} \cdot \ln \left(\frac{R_{0_i}}{r(x, y, i)} \right) \right)} + H_f$$

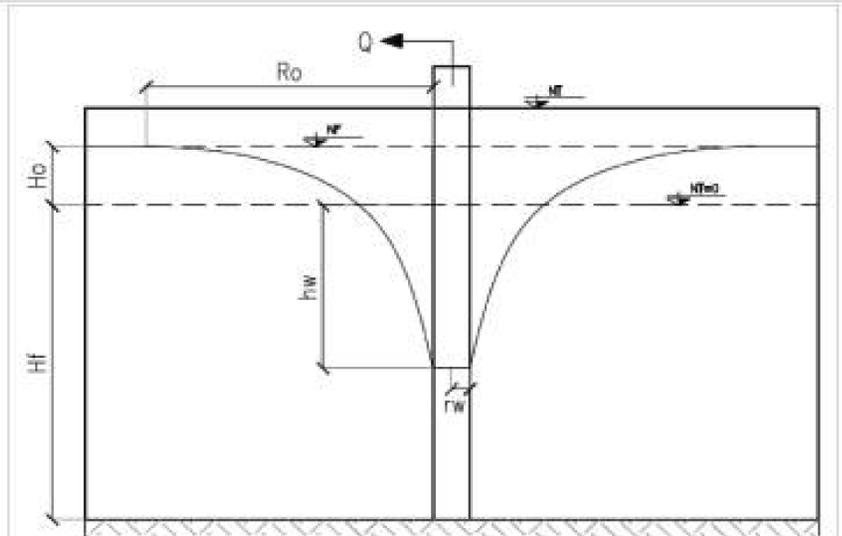
$$H_{B_i} := h(B_{i,1}, B_{i,2})$$

$$\text{Abat}_{B_i} := H_0 - H_{B_i}$$

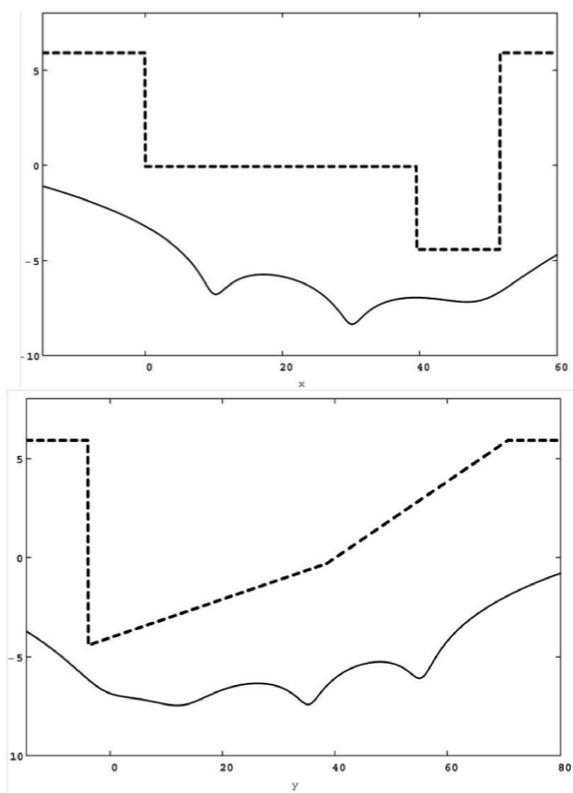
$$\text{Abat}(x, y) := H_0 - h(x, y)$$

Cota deseada: $H_w^T = (-11.5 \quad -11.5 \quad -11.5 \quad -11.5 \quad -11.5 \quad -11.5) \text{m}$

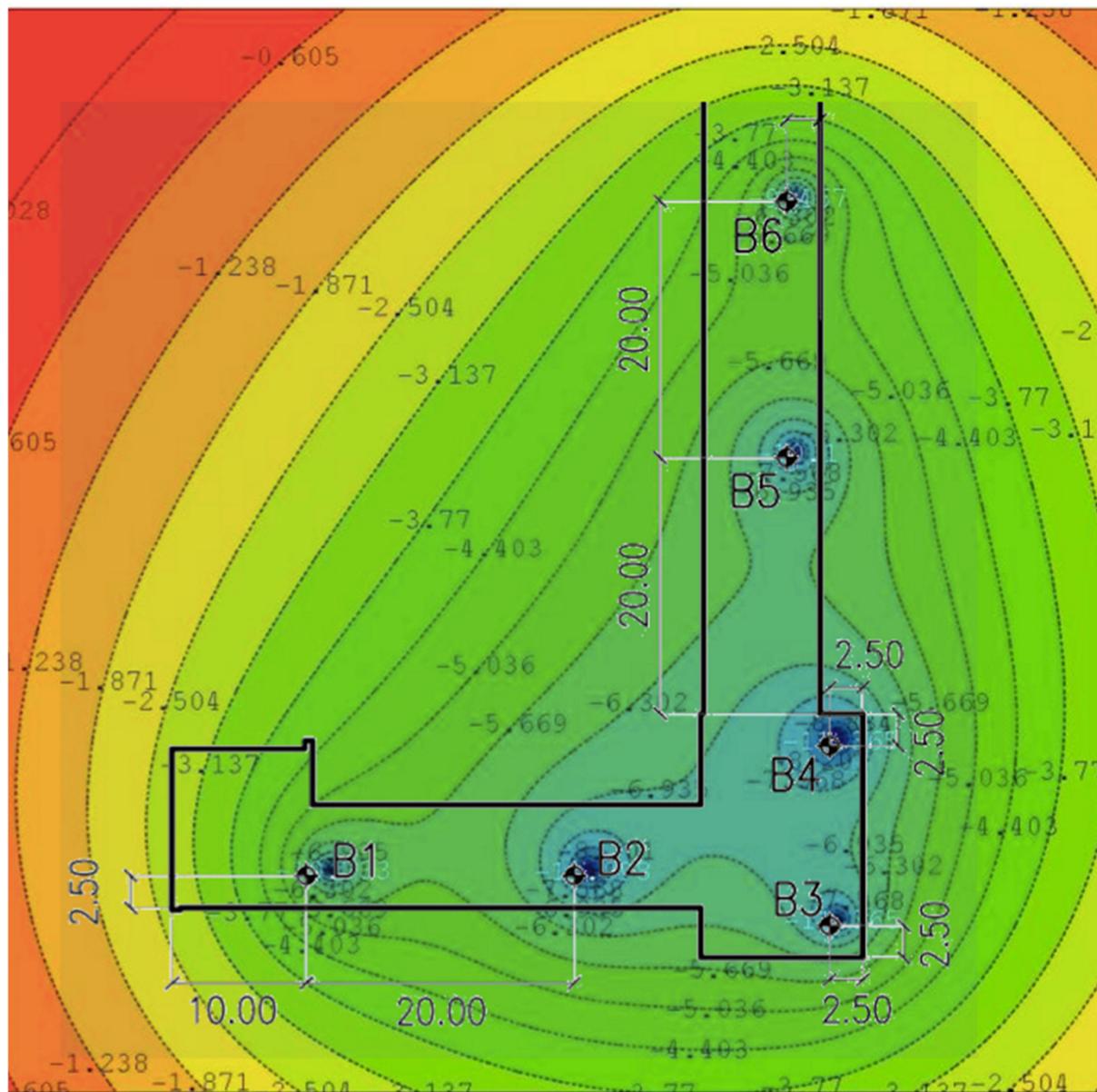
Cota obtenida: $H_B^T = (-11.643 \quad -13.654 \quad -13.866 \quad -13.188 \quad -11.982 \quad -12.37) \text{m}$



Ejemplo de cálculo



Cortes con napa abatida



La erosión interna



El flujo de agua produce tensiones efectivas que actúan sobre las partículas de suelo

Si el material está mal graduado (por ejemplo grava gruesa + arcilla) las partículas más finas pasan por los poros de las partículas gruesas: erosión interna

Filtro: retiene los sólidos y deja pasar el agua

Diseño de filtros granulares



Criterios

- Una granulometría no muy extendida (erosión interna)
- Poros no muy chicos (o se tapa):
- Poros no muy grandes (o se lavan los finos):

$$C_u^{filtro} < 20$$

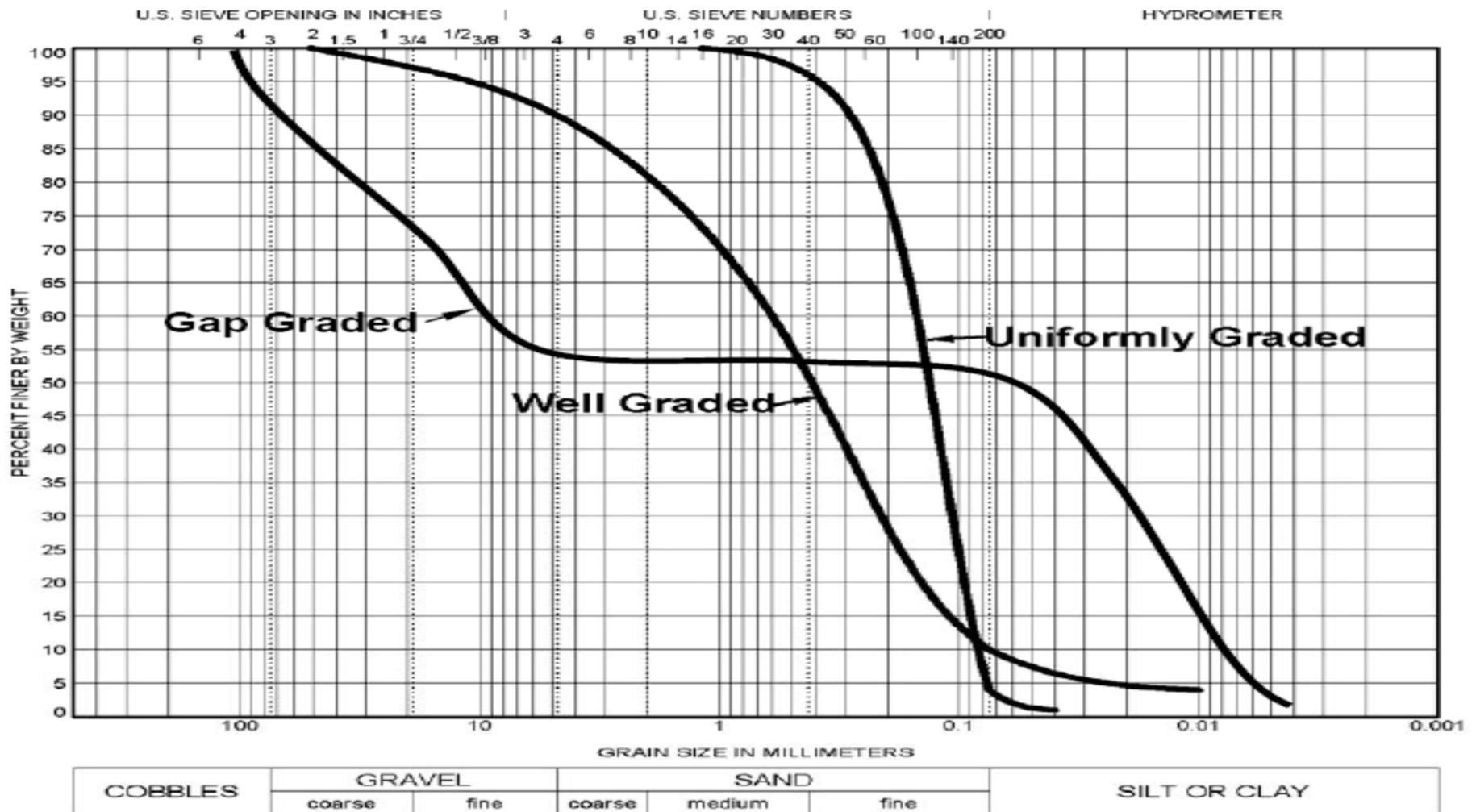
$$4 < d_{15}^{filtro} / d_{15}^{suelo} < 40$$

$$d_{15}^{filtro} / d_{85}^{suelo} < 4$$

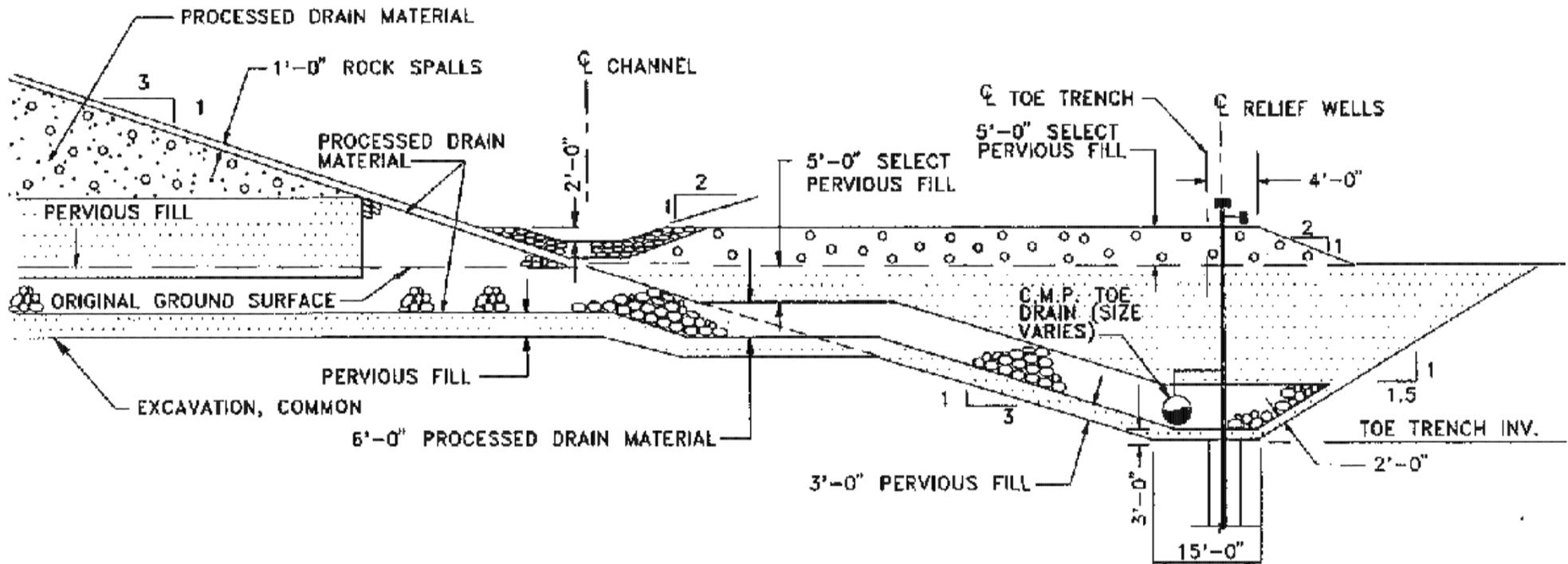
Nota: Repasar clase de granulometría

C_u es coeficiente de uniformidad, d_{15} es la abertura del tamiz por el que pasa el 15% (en peso) del suelo

Ejercicio: Diseñar filtros para cada uno de estos materiales



Ejercicio: Identificar dónde hay que colocar filtros



Índice



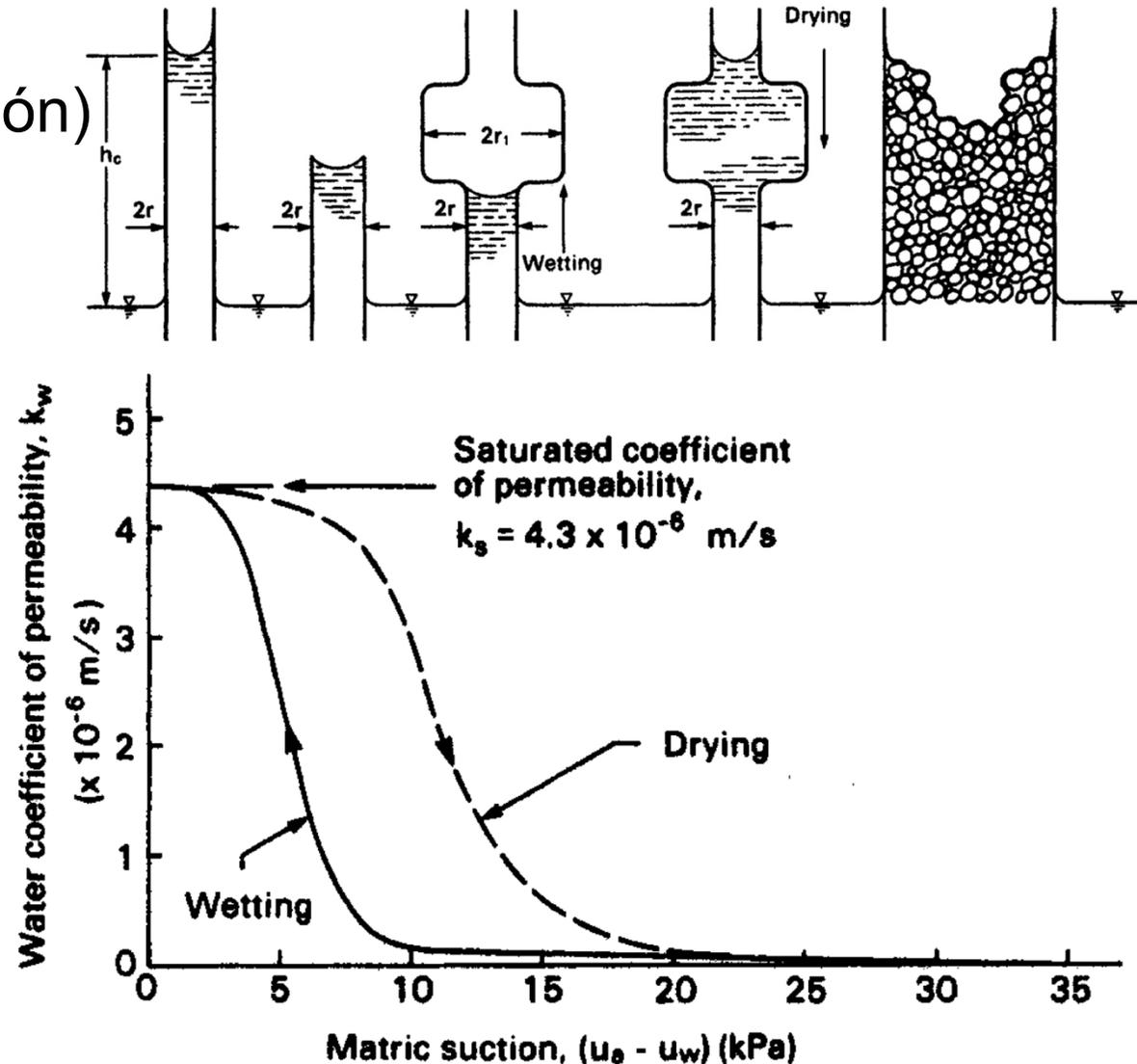
- Introducción
- Ecuación de Laplace
- Solución gráfica
- Suelos anisótropos
- Sifonaje
- Flujo no confinado
- Abatimiento de napas
- **Flujo no saturado**
- Métodos numéricos

Procesos de imbibición y drenaje



El suelo se satura (imbibición) y desatura (drenaje)

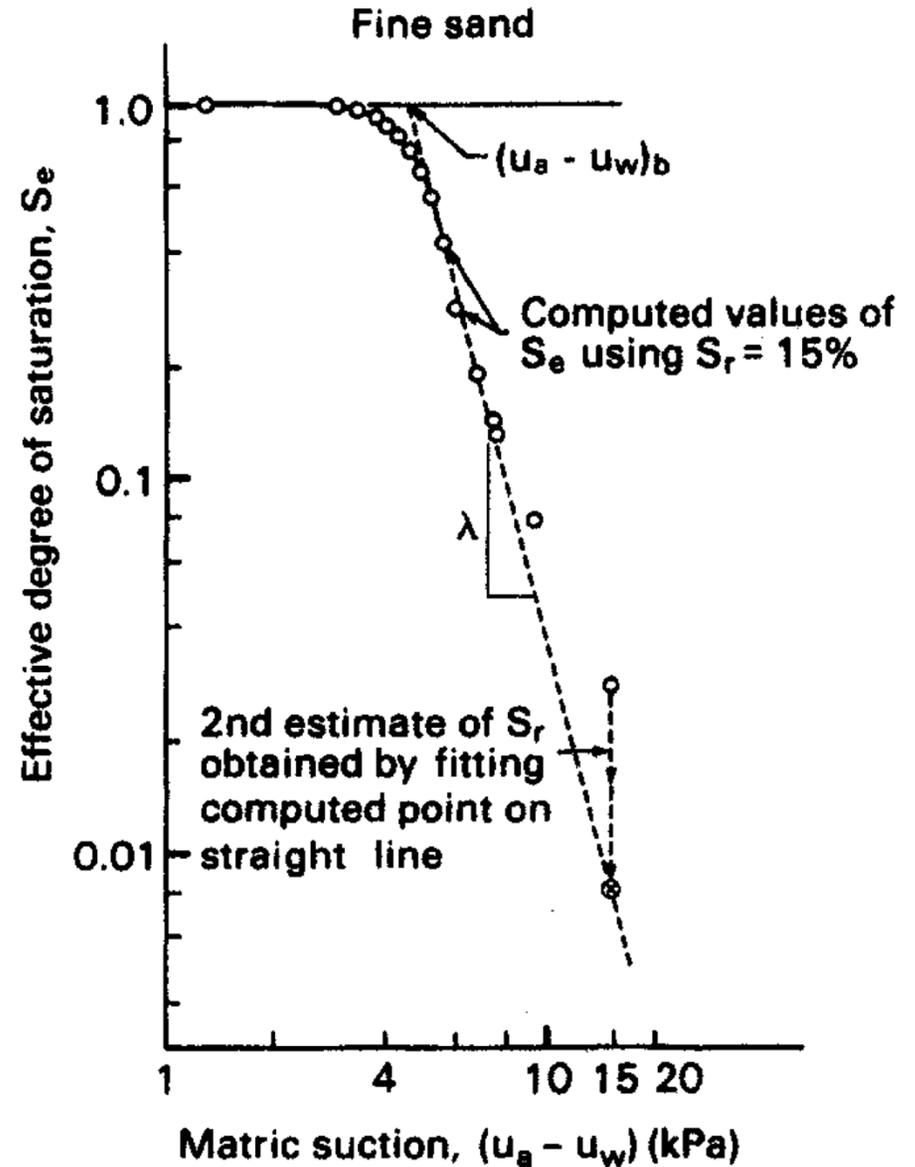
- La no uniformidad de los poros provoca que quede algo de aire y agua
- La curva de imbibición no satura al 100%
- La curva de drenaje no desatura al 0%
- Ciclo de histéresis



Curva característica



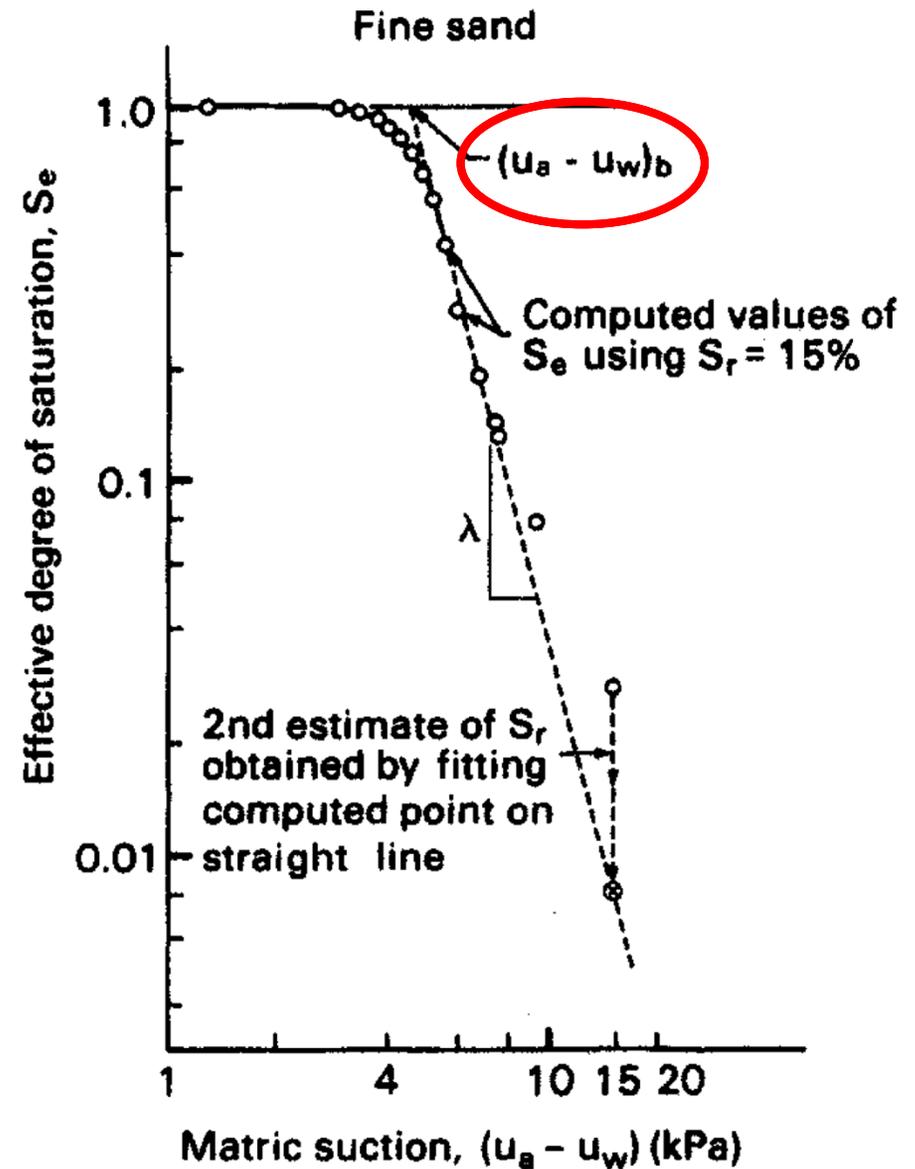
- Durante el proceso de secado aumenta la succión



Curva característica



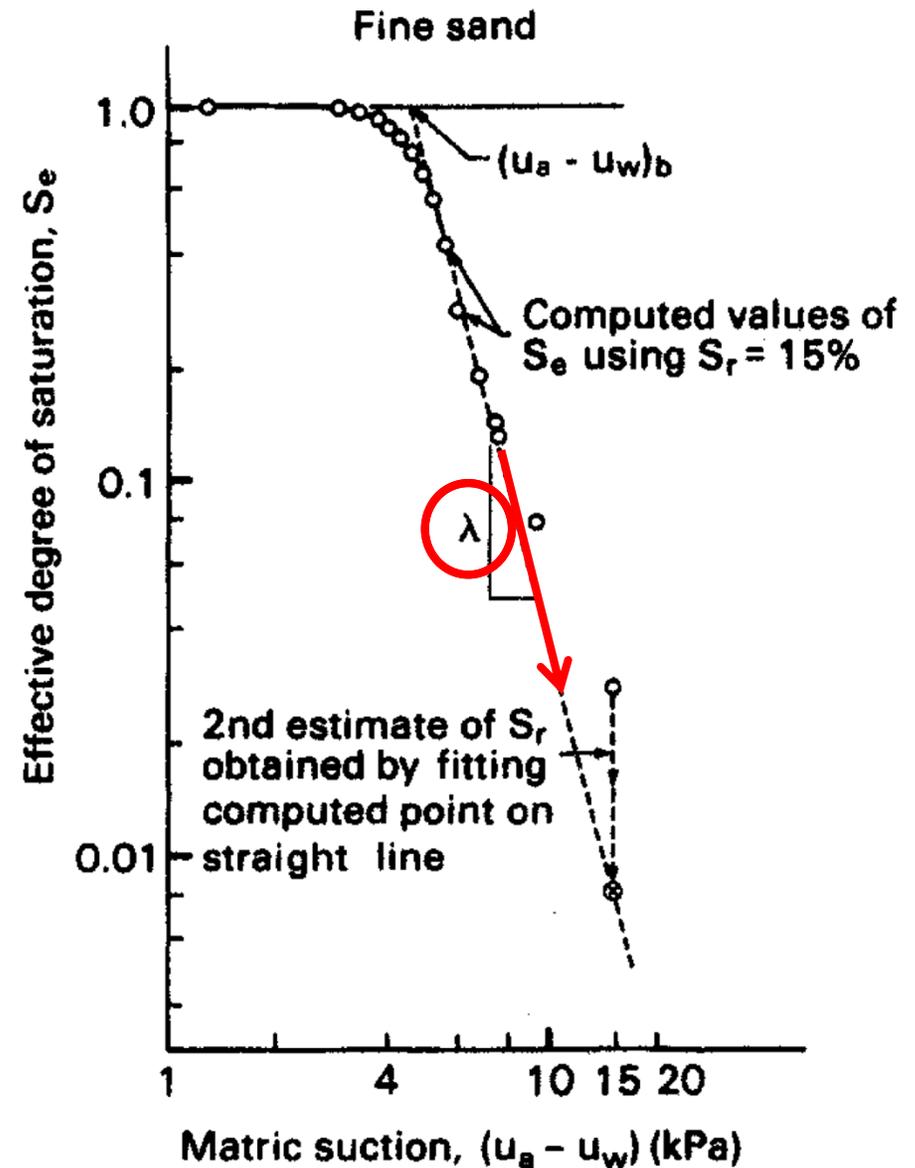
- Durante el proceso de secado aumenta la succión
- Se mide una succión que inicia la desaturación (*AEV*)



Curva característica



- Durante el proceso de secado aumenta la succión
- Se mide una succión que inicia la desaturación (AEV)
- Aumenta la succión y se reduce S_r (pendiente λ) hasta un valor residual S_{res}

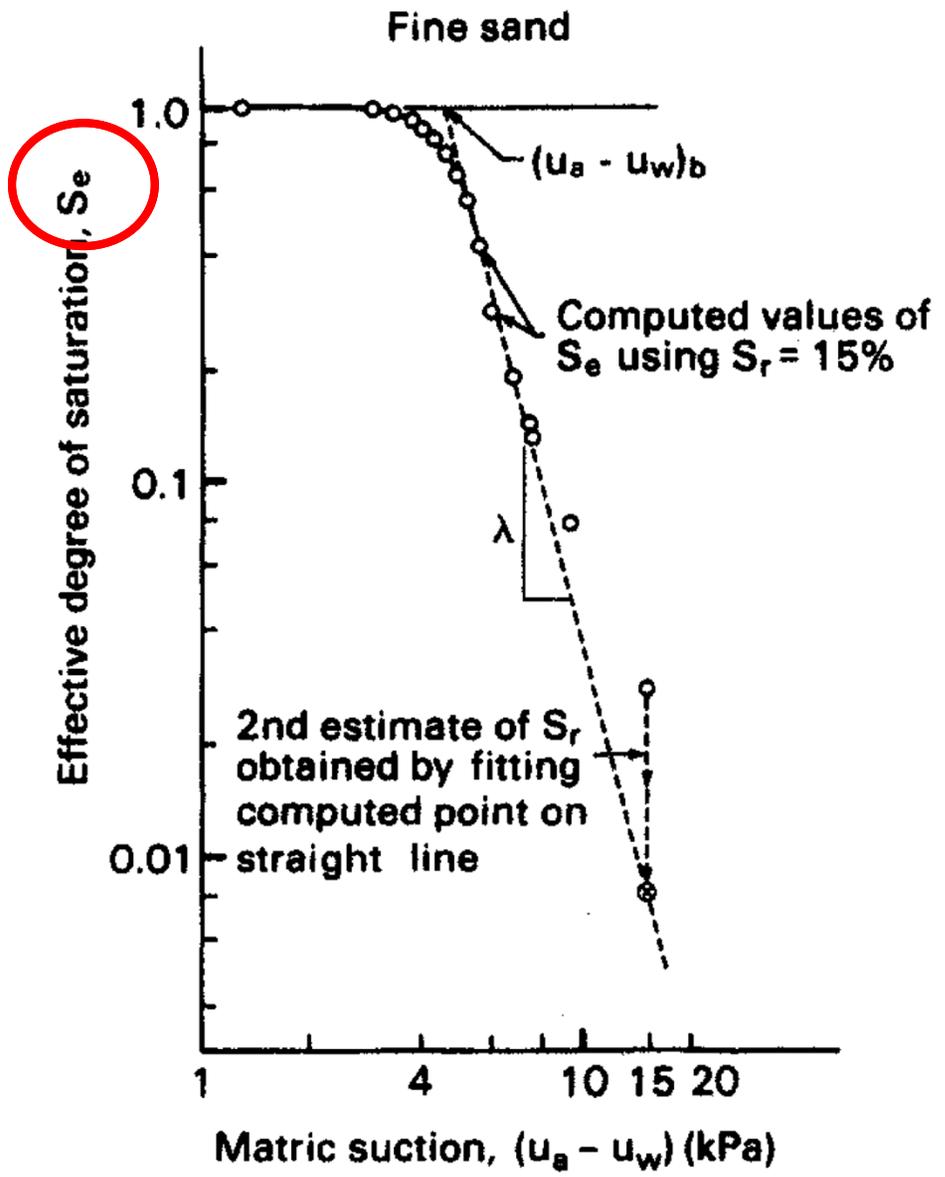




Curva característica

- Durante el proceso de secado aumenta la succión
- Se mide una succión que inicia la desaturación (*AEV*)
- Aumenta la succión y se reduce S_r (pendiente λ) hasta un valor residual S_{res}
- El grado de saturación efectivo tiene en cuenta S_{res}

$$S_e = \frac{S_r - S_{res}}{1 - S_{res}}$$

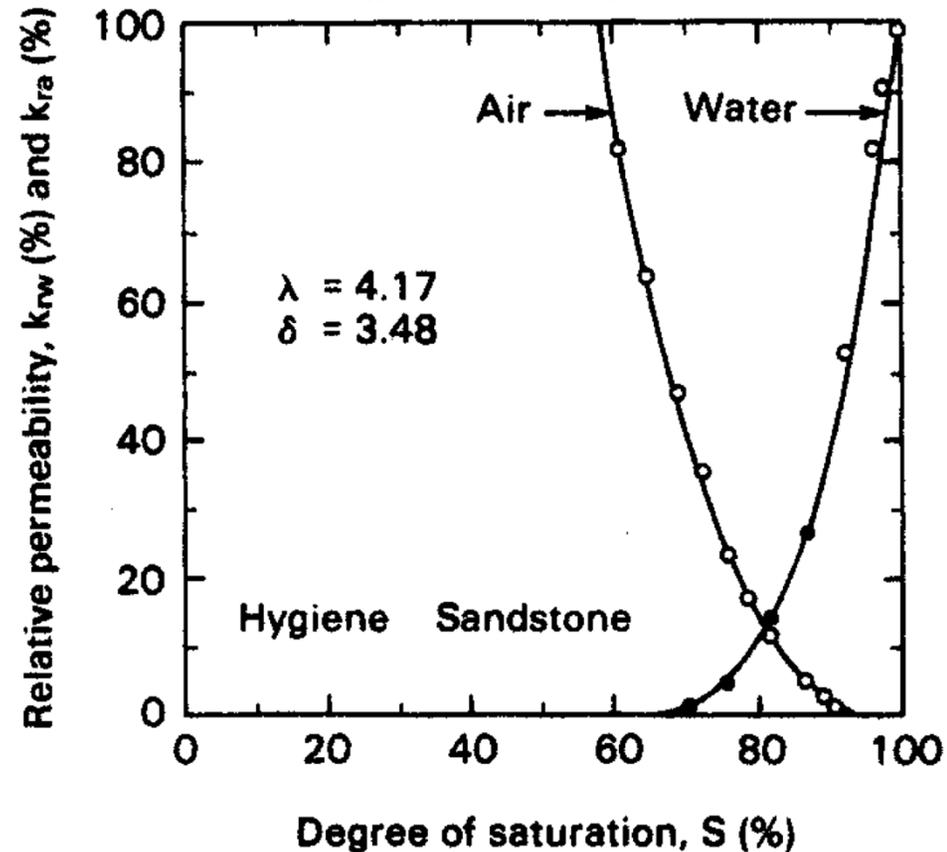
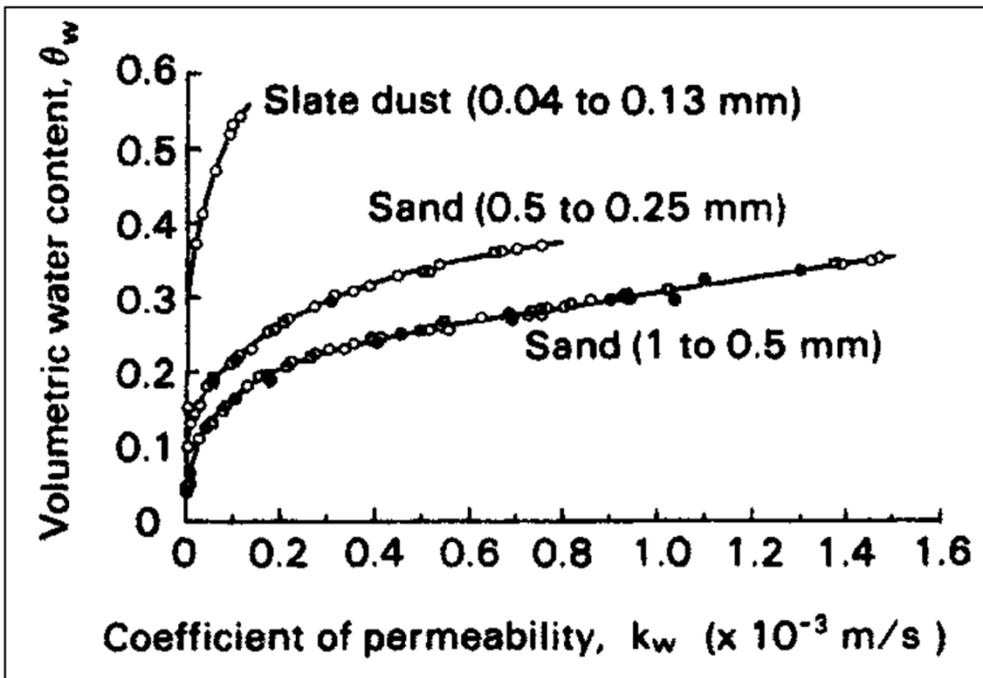




Flujo de agua fase líquida (y de aire disuelto)

- El agua fluye líquida cuando hay canales continuos
- El agua en fase líquida arrastra aire disuelto (y satura)

$$k_e = k_{sat} S_e^\delta \text{ con } \delta = (2 + 3\lambda)/\lambda$$



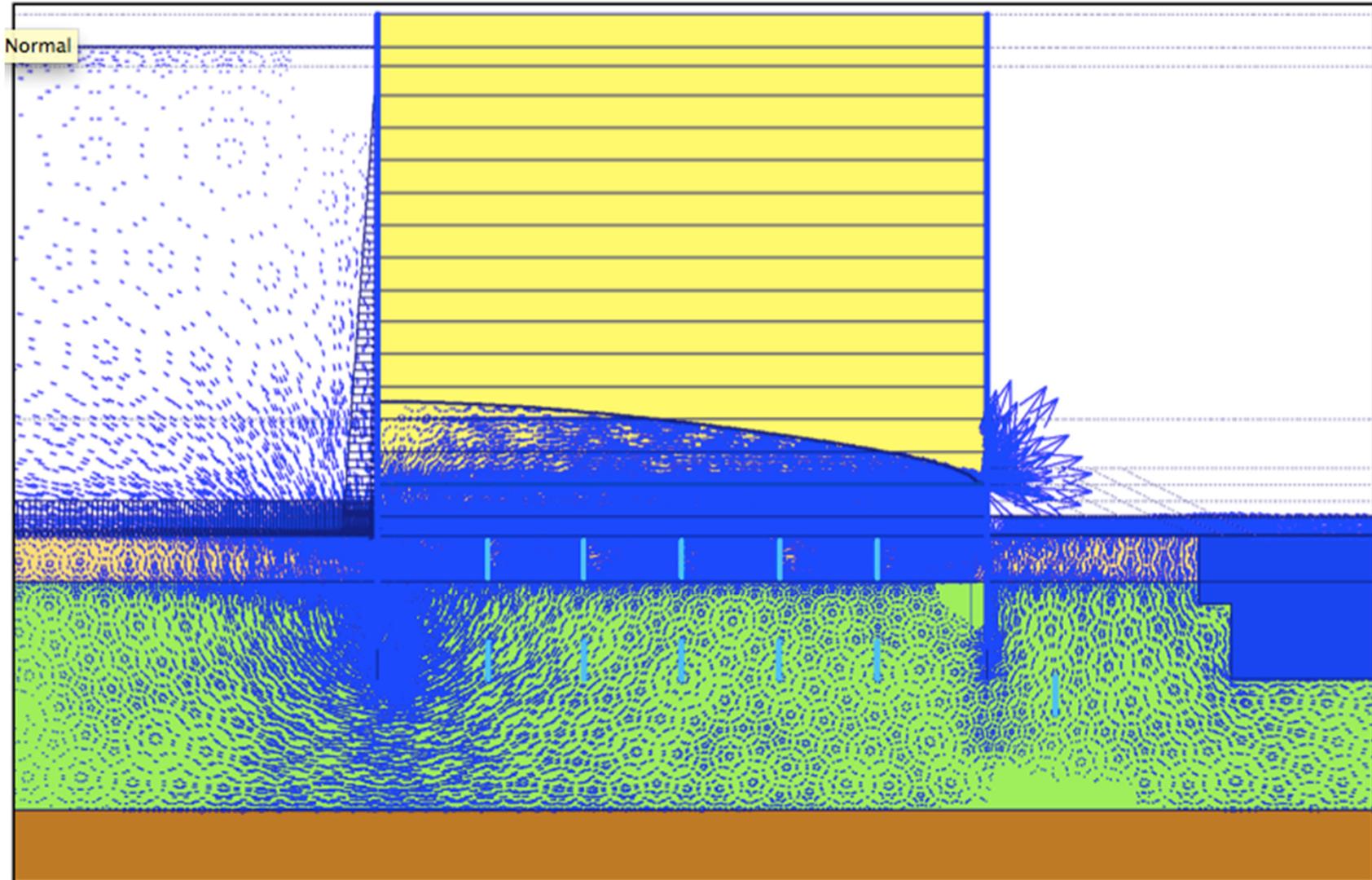
Índice



- Introducción
- Ecuación de Laplace
- Solución gráfica
- Suelos anisótropos
- Sifonaje
- Flujo no confinado
- Abatimiento de napas
- Flujo no saturado
- **Métodos numéricos**

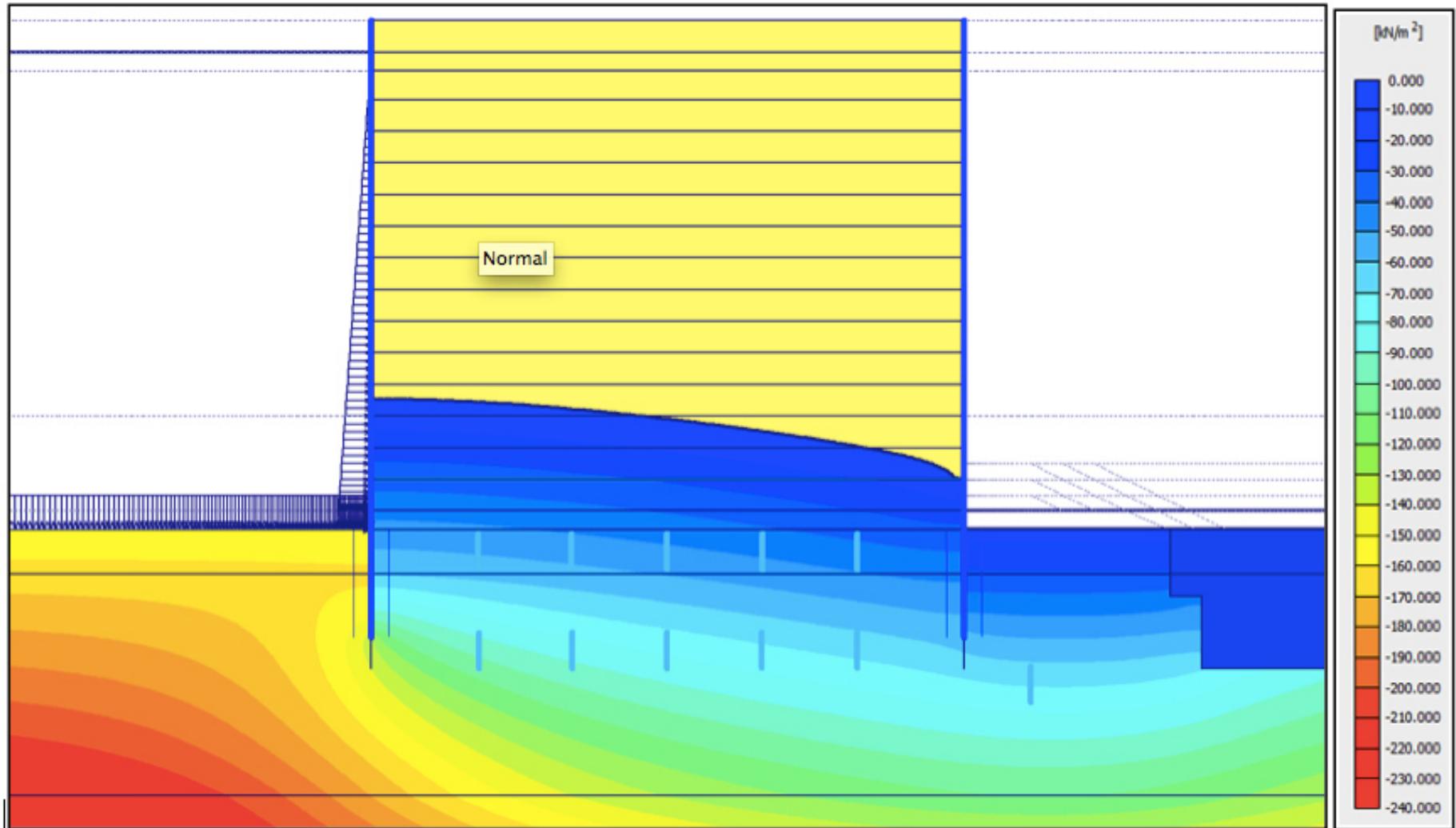
Aplicación de métodos numéricos

Ataguías celulares



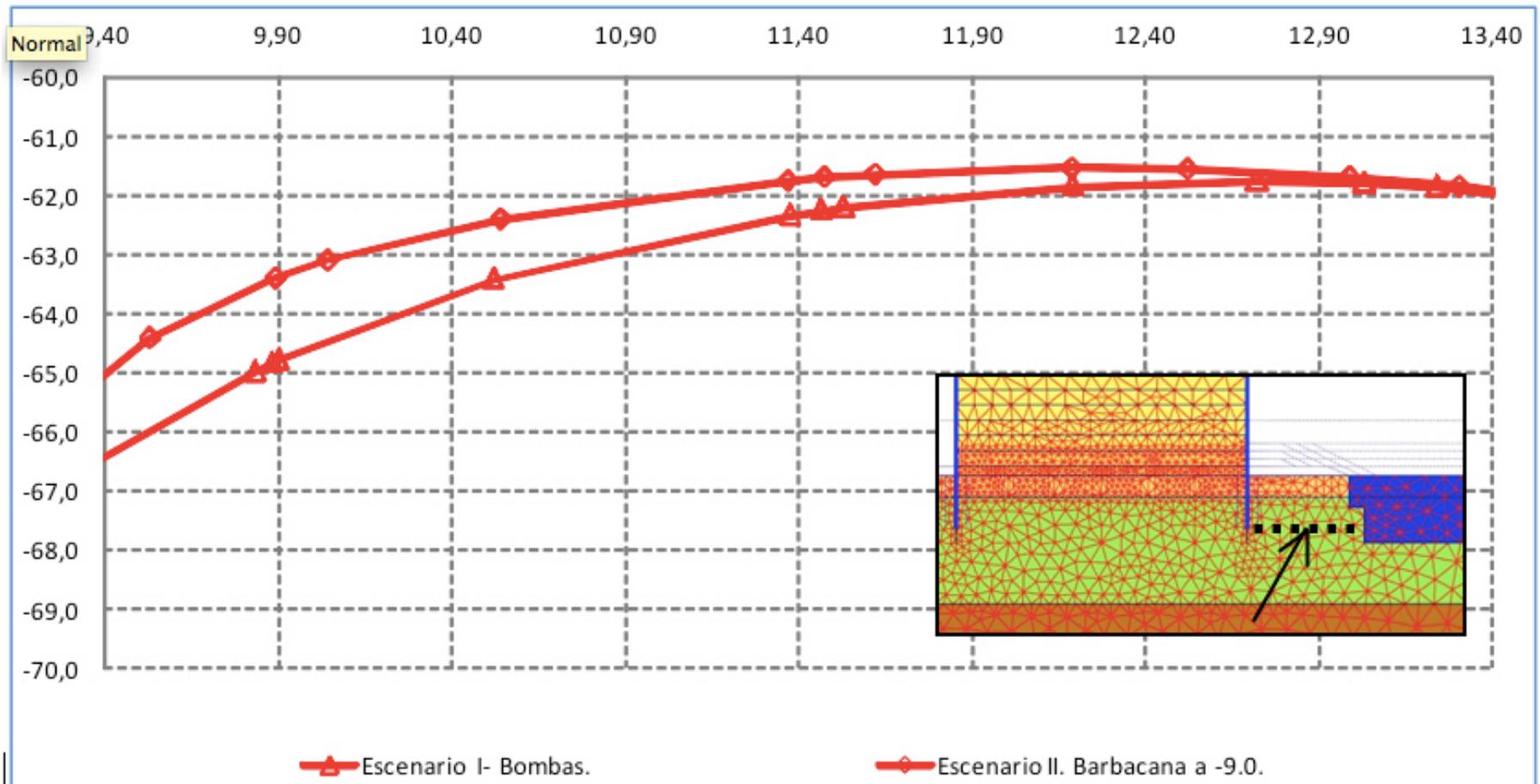
Aplicación de métodos numéricos

Ataguías celulares



Aplicación de métodos numéricos

Ataguías celulares



Bibliografía



Básica

- Jiménez Salas y otros. Geotecnia y Cimientos. Ed. Rueda
- Olivella, S. Problemas resueltos. Geotecnia. Mecánica de Suelos. UPC, 2003.

Complementaria

- Fredlund y otros. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley