



Hidráulica de Suelos

Taller Práctico — Mecánica de Suelos y Geología

Redes de Filtración

Sifonaje

Flujo no Confinado

Abatimiento de Napas

Craig 8va Ed.

Facultad de Ingeniería · Universidad de Buenos Aires · Primer Curso

¿Qué hacemos hoy?

#	Bloque	Contenido
0	Repaso	Ley de Darcy · gradiente hidráulico · Laplace
1	Redes de Filtración	Construcción de red · cálculo de caudal · presiones de poros
2	Sifonaje	Gradiente crítico · verificación de estabilidad ($FS \geq 1.2$)
3	Flujo no Confinado	Presa de tierra · Schaffernak & Van Iterson
4	Abatimiento de Napas	Acuífero confinado y libre · diseño de bombeo · gráfico interactivo
5	Cierre	Errores frecuentes · puntos de control



Repaso — Clase Anterior

Presiones efectivas · Ley de Darcy · Gradiente
hidráulico

Conceptos base para el taller de hoy (Craig Cap. 2)

Ley de Darcy

$$v = k \cdot i \quad q = k \cdot i \cdot A$$

$$i = \Delta h / L \quad (\text{gradiente hidráulico})$$

Carga hidráulica total

$$h = z + u/\gamma_w \quad (\text{carga de posición} + \text{presión})$$

Gradiente crítico

$$i_c = \gamma' / \gamma_w = (G_s - 1) / (1 + e)$$

Típico: $i_c \approx 0.9 - 1.0$ para arena

Presión de poros (flujo vertical)

$$u = \gamma_w \cdot (h_w \pm \Delta h_{\text{flujo}})$$

REGLA PRÁCTICA

Flujo ascendente → reduce σ' (peligroso)

Flujo descendente → aumenta σ' (estabilizador)

Ecuación de Laplace (isótropo)

$$\partial^2 h / \partial x^2 + \partial^2 h / \partial y^2 = 0$$

Hipótesis: medio saturado fijo, flujo laminar (Darcy válido)

1

Redes de Filtración

Solución gráfica de la ecuación de Laplace — flujo
bajo tablestacas

Dos familias de curvas ortogonales entre sí

Líneas de corriente (LC)

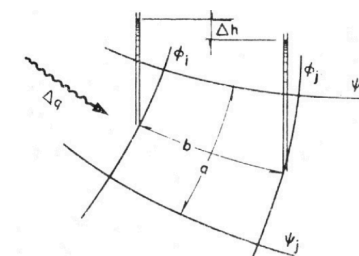
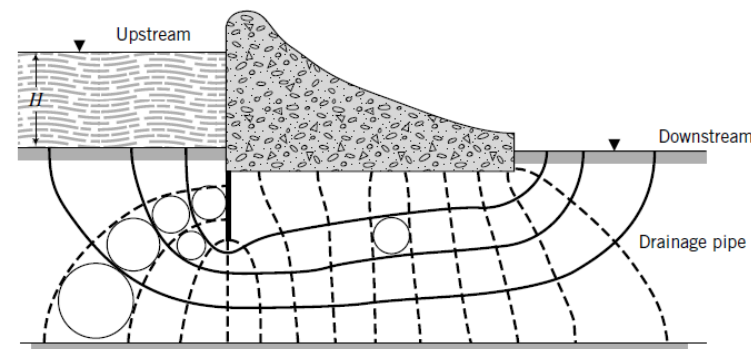
- Tangentes al vector velocidad en cada punto
- El agua *fluye* a lo largo de ellas
- Los bordes impermeables son LC

Líneas equipotenciales (EQ)

- Lugares de igual carga hidráulica $h = \text{cte}$
- Las superficies libres de agua (h conocida) son EQ
- $LC \perp EQ$ en todo punto

CONDICIONES DE BORDE

- Superficie impermeable $\rightarrow$ LC
- Superficie de agua libre $\rightarrow$ EQ
- Línea de corriente libre $\rightarrow$ presión = 0



Fórmula general — tubos de flujo

Cada “tubo” entre dos LC conduce el mismo caudal:

$$\Delta q = k \cdot (a/b) \cdot \Delta h$$

Con $a/b = 1$ (cuadrados) y $\Delta h = \Delta H/N_d$:

$$q = k \cdot (N_f / N_d) \cdot \Delta H$$

$[m^2/s]$ *por metro lineal*

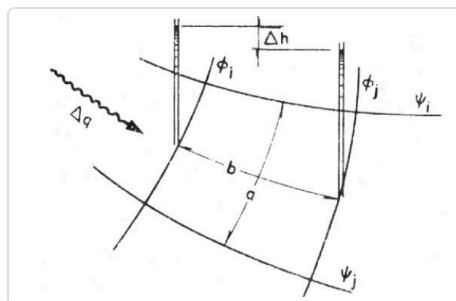
PARÁMETROS DE LA RED

N_f = número de tubos de flujo (entre LC)

N_d = número de caídas de potencial (entre EQ)

ΔH = diferencia total de carga hidráulica

Suelos anisótropos: $k_{eq} = \sqrt{(k_x \cdot k_z)}$ • $x' = x \cdot \sqrt{(k_z/k_x)}$
(dominio transformado)



Presión de poros en cualquier punto

Caída de carga desde el upstream hasta el punto P :

$$h_p = H_1 - n_d \cdot (\Delta H / N_d)$$

Donde n_d = número de caídas equipotenciales hasta P .

$$u_p = \gamma_w \cdot (h_p - z_p)$$

z_p = cota del punto (referencia al datum)

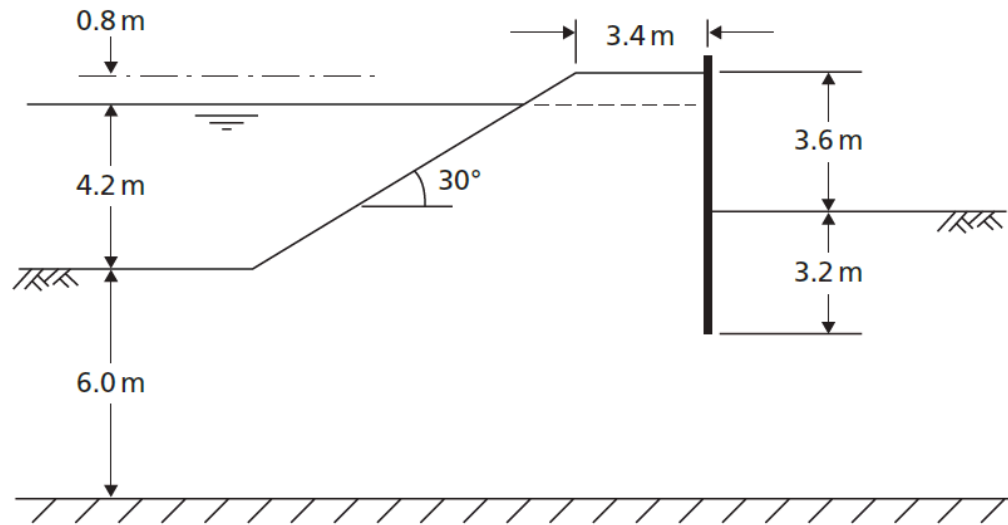
💡 ELECCIÓN DEL DATUM

Conviene colocar el datum en el **nivel de restitución** (pelo de agua aguas abajo). Así $h_{\text{downstream}} = 0$ y las cotas z se miden directamente desde ese nivel — los puntos por debajo del pelo de agua aguas abajo

✎ ENUNCIADO

Se tiene una excavación contigua a un canal, cuya geometría se muestra a continuación. El talud del canal tiene una inclinación de 30° . La conductividad hidráulica del suelo es $k = 4.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

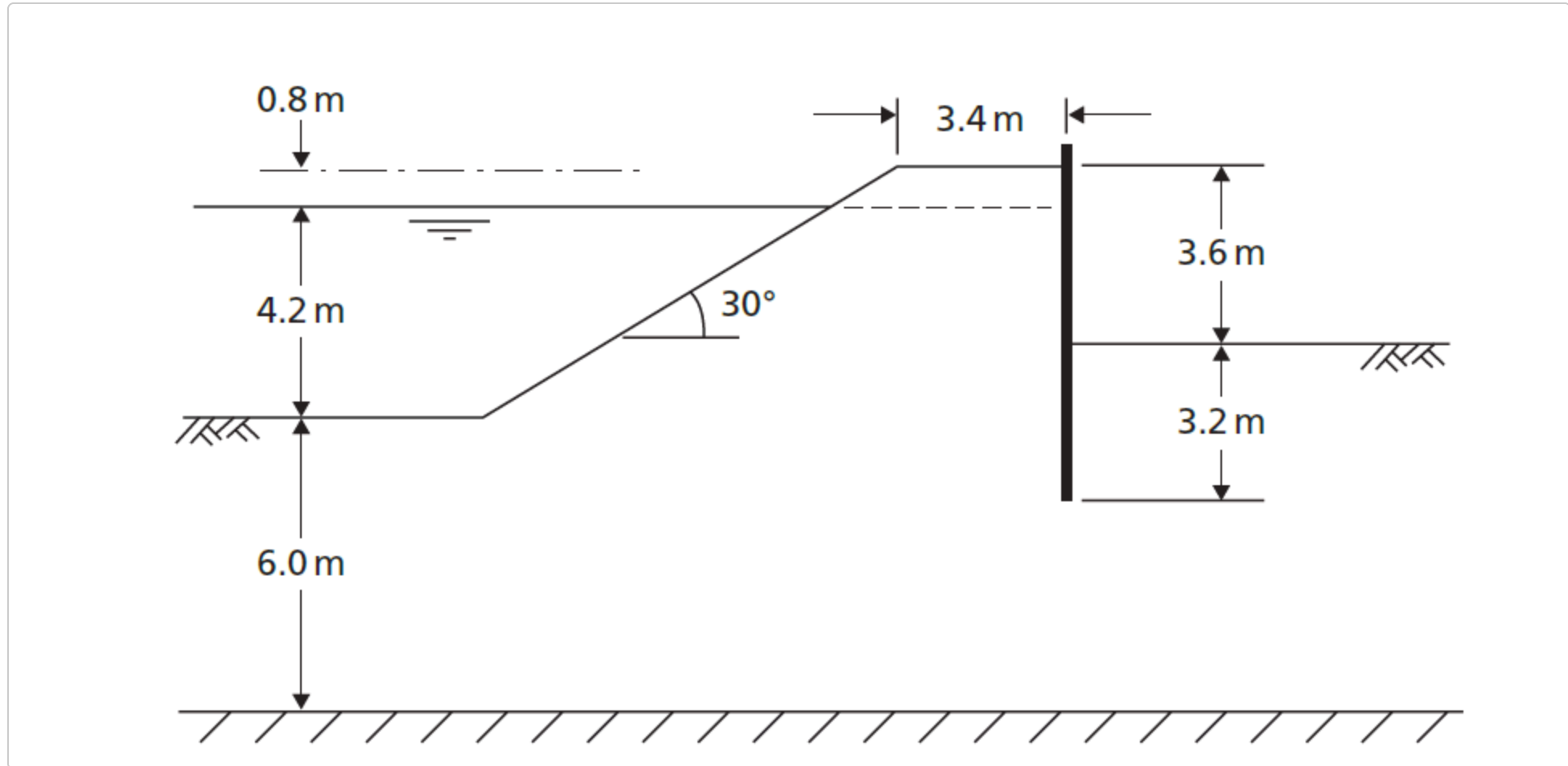
Determinar el caudal de filtración hacia la excavación por metro lineal.

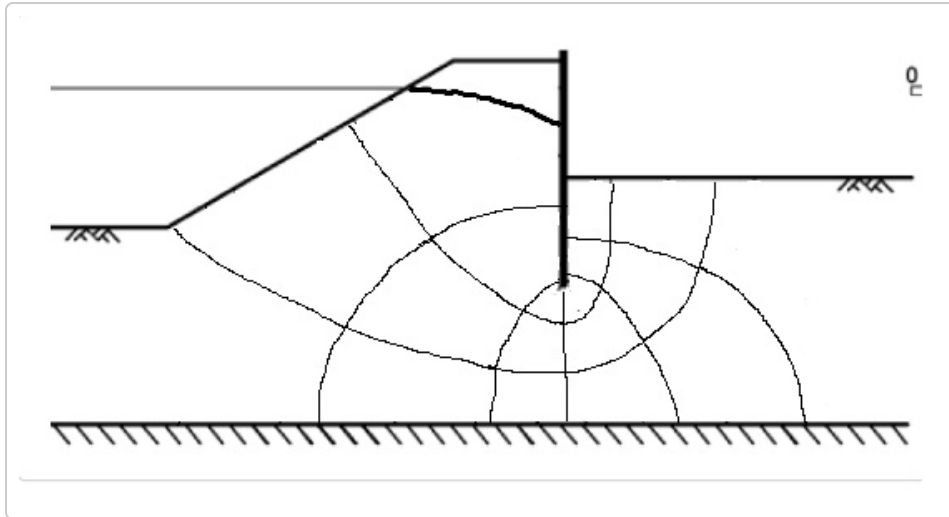


❓ ANTES DE DIBUJAR — PENSEMOS JUNTOS

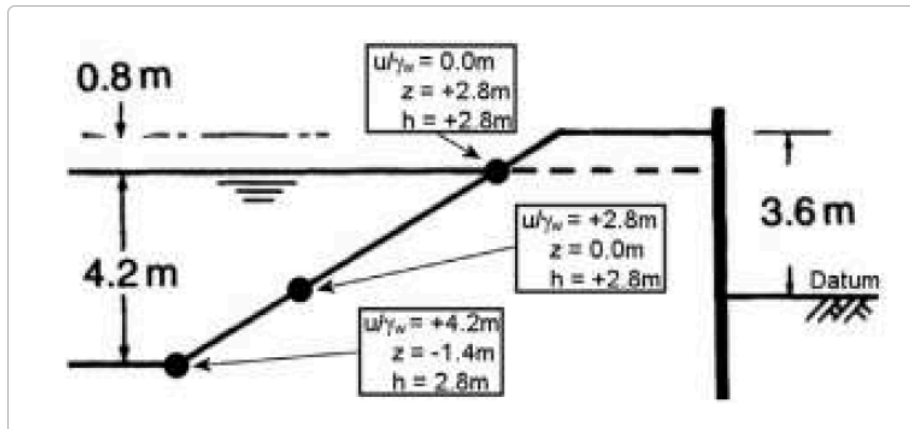
1. ¿Cuáles son las **líneas de corriente** que impone la geometría?
2. El talud a 30° — ¿es línea de corriente o **equipotencial**?
3. ¿Cuál es la **primera equipotencial** del sistema?
4. ¿Hay **superficie libre**? ¿De qué lado?

Dibujen la **red de filtración** — identifiquen primero las condiciones de borde.





$$N_f = 3 \cdot N_d = 6$$



DATUM Y DIFERENCIA DE CARGA

Datum: nivel de agua en la excavación
 $\rightarrow h_2 = 0 \text{ m}$

Talud 30° = equipotencial $\rightarrow h_1 = +2.80 \text{ m}$

$$\Delta H = h_1 - h_2 = 2.80 - 0 \text{ m} = 2.80 \text{ m}$$

CAUDAL DE FILTRACIÓN

$$q = k \cdot N_f / N_d \cdot \Delta H$$

$$q = 4.5 \times 10^{-5} \times 3/6 \times 2.80$$

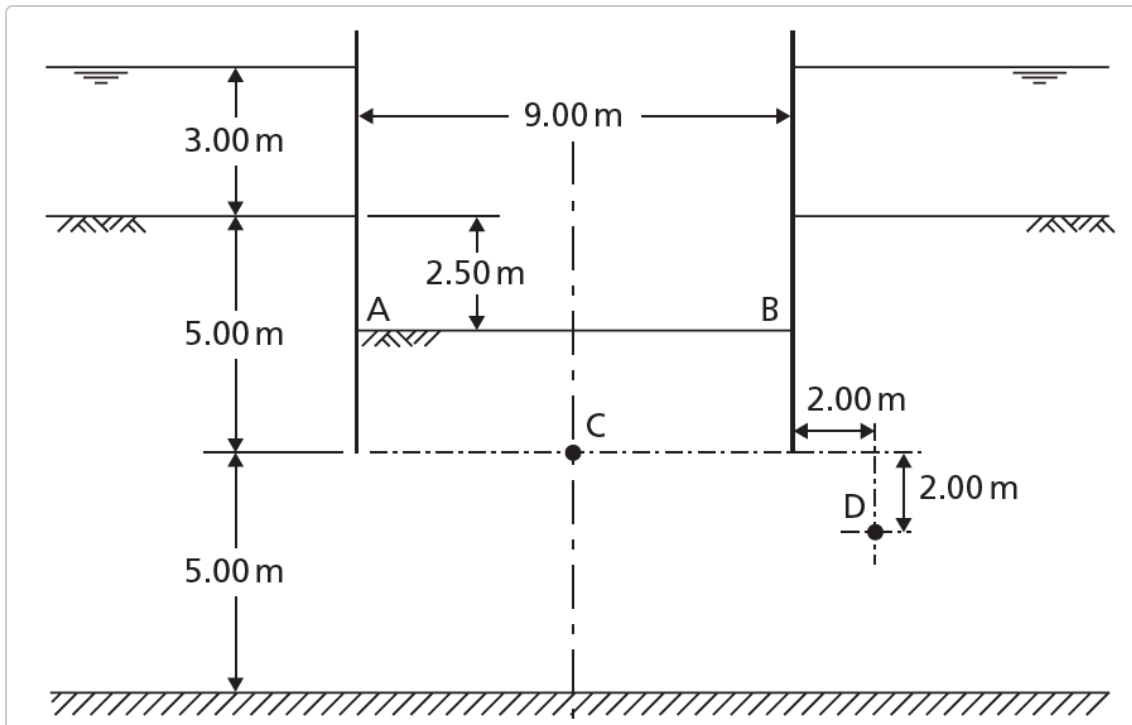
$$q = 4.5 \times 10^{-5} \times 0.500$$

$$q = 6.30 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s por metro}$$

✎ ENUNCIADO

La sección de una ataguía larga se muestra en la figura. El mismo nivel de agua se mantiene a **ambos lados** del recinto. La conductividad hidráulica del suelo es $k = 4.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$.

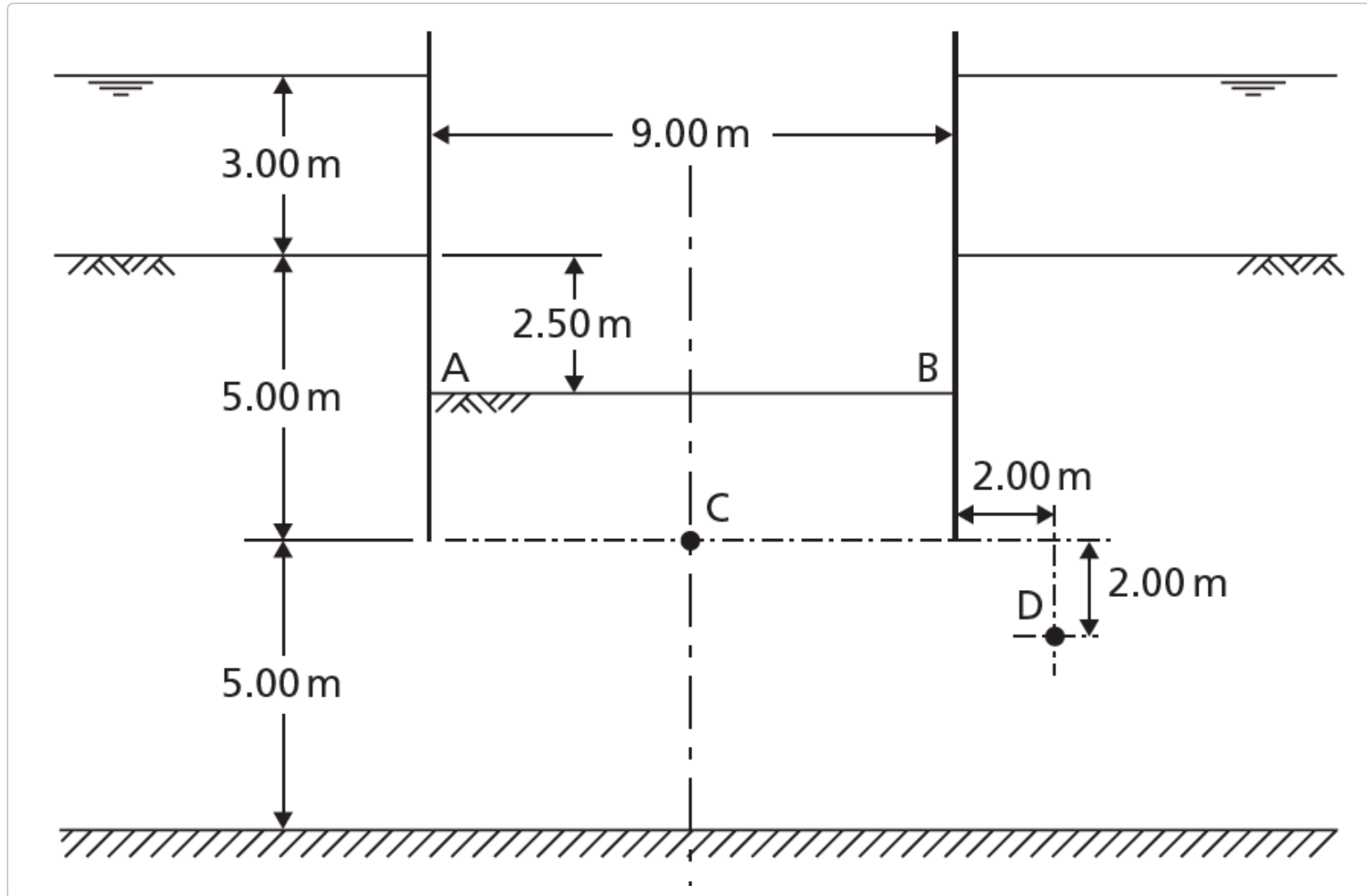
1. Dibujar la **red de filtración** y determinar el **caudal que infiltra** hacia el interior.
2. Verificar la **seguridad al sifonaje** ($FS \geq 1.2$) del bloque de suelo aguas abajo de la tablestaca. Dato: $\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$.

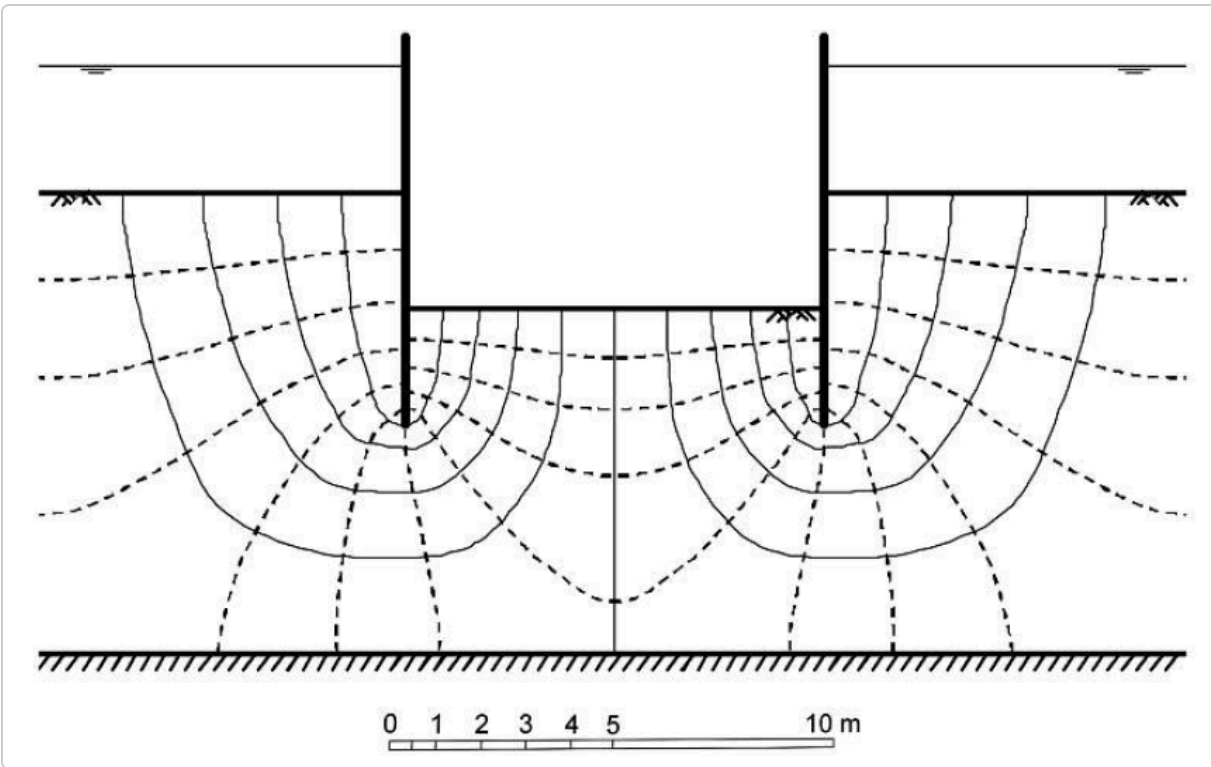


❓ ANTES DE DIBUJAR — PENSEMOS JUNTOS

1. ¿Cuáles son las **líneas de corriente** que impone la geometría?
2. ¿Cuáles son las **equipotenciales** de borde?
3. El problema es **simétrico** — ¿cómo aprovechamos eso?
4. ¿Dónde conviene ubicar el **datum**?

Dibujen la **red de filtración** — aprovechen la simetría del problema.





$$N_f = 10 \text{ (5 por semisistema)} \cdot N_d = 11$$

Simetría: el eje central es *línea de corriente* → cada mitad tiene $N_{f,1/2} = 5$ tubos independientes. El caudal total = $2 \times q_{1/2}$.

DATUM Y DIFERENCIA DE CARGA

Datum: cota A-B (interior ataguía) → $h_2 = 0$

$$h_1 = 3.00 \text{ m} + 2.50 \text{ m} = 5.50 \text{ m}$$

$$\Delta H = 5.50 \text{ m}$$

SIMETRÍA → N_F TOTAL

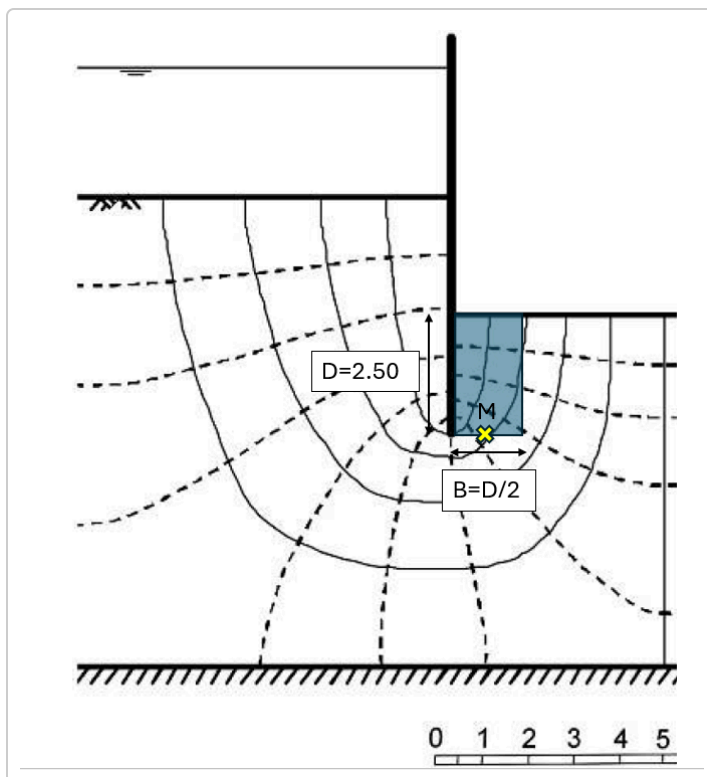
$$N_{f,\text{total}} = 2 \times 5 = 10 \quad \bullet \quad N_d = 11$$

CAUDAL DE FILTRACIÓN

$$q = k \cdot \frac{N_f}{N_d} \cdot \Delta H$$

$$q = 4.0 \times 10^{-7} \times \frac{10}{11} \times 5.50$$

$$q = 2.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad / \text{m}$$



Bloque $D \times B$ ($B = D/2$) aguas abajo de la tablestaca. Carga hidráulica evaluada en el centroide M de la red.

FACTOR DE SEGURIDAD

$$FS = W' / U = 30.28 / 21.46 = 1.41$$

BLOQUE Y CARGA EN EL CENTROIDE M

$$D = 2.50 \text{ m} \quad \bullet \quad B = D/2 = 1.25 \text{ m}$$

$$\Delta h = \Delta H / N_d = 5.50 / 11 = 0.50 \text{ m/caída}$$

$$n_{d,M} = 7.5 \quad (\text{leído de la red})$$

$$h_M = 5.50 - 0.50 \times 7.5 = 1.75 \text{ m}$$

PESO SUMERGIDO W'

$$W' = (\gamma - \gamma_w) \times D \times B = 9.69 \times 2.50 \times 1.25$$

$$W' = 30.28 \text{ kN/m}$$

FUERZA ASCENDENTE U

$$U = \gamma_w \times h_M \times B = 9.81 \times 1.75 \times 1.25$$

$$U = 21.46 \text{ kN/m}$$

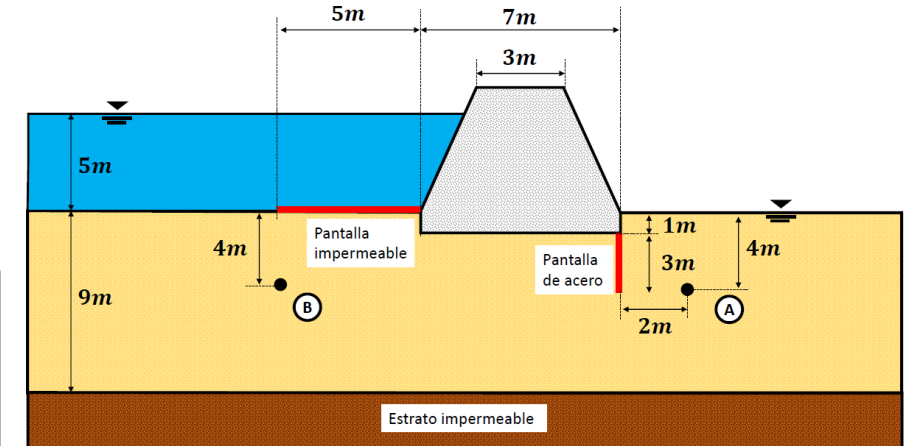
Red de escurrimiento — caudal — presiones — empuje sobre fundación

DATOS

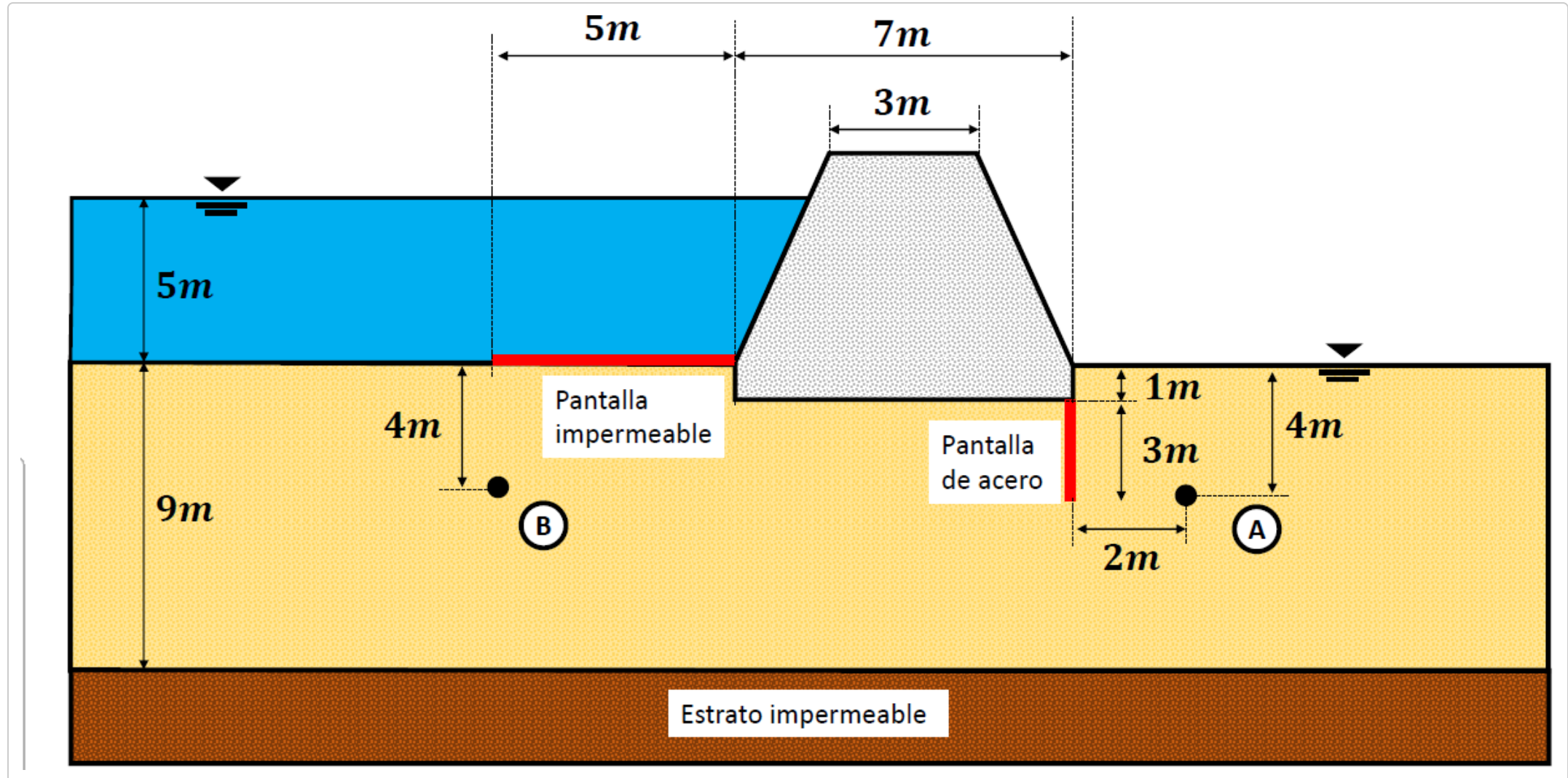
$$k = 10^{-4} \text{ m/s} \quad | \quad \gamma_{\text{sat}} = 21 \text{ kN/m}^3 \quad | \quad \gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$$

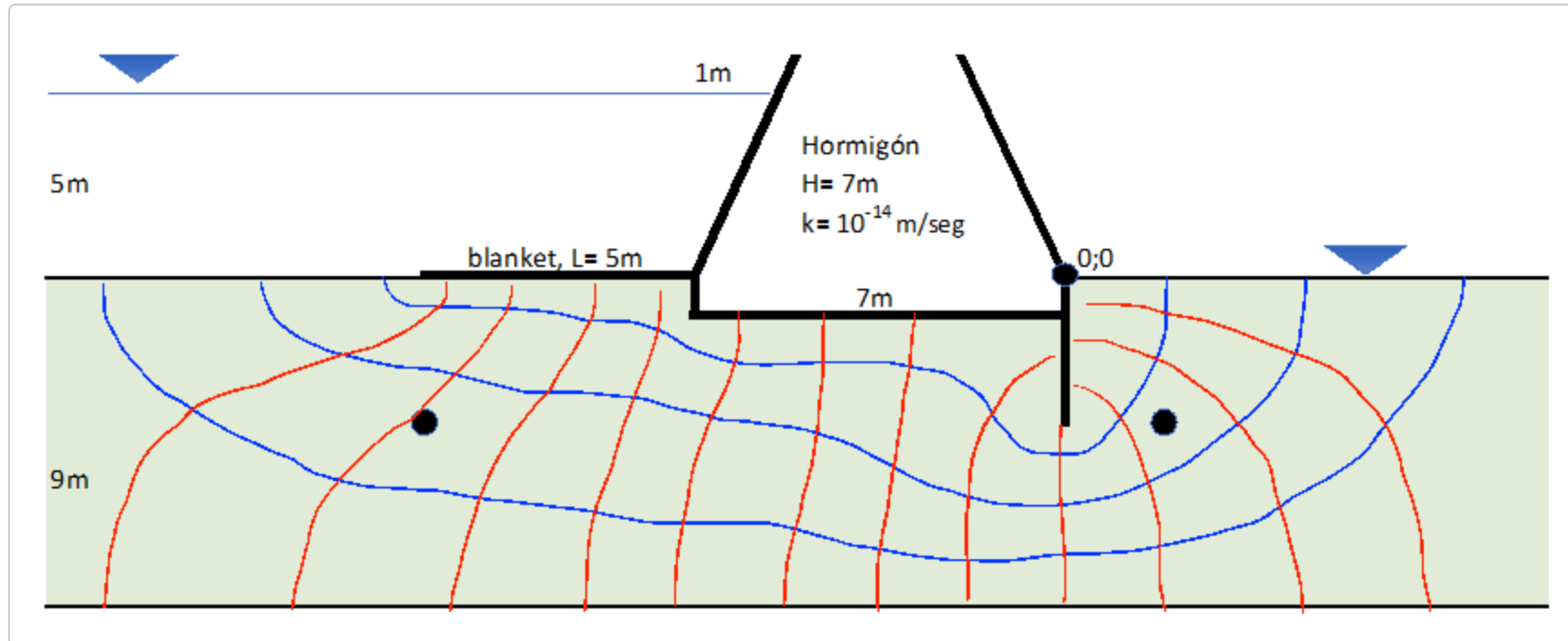
CONSIGNAS

1. Trazar la red de escurrimiento con un mínimo de 4 tubos de corriente, considerando que las pantallas esquematizadas son impermeables.
2. Estimar el volumen de agua diario que circula.
3. Determinar el diagrama de presión de poros en el plano de fundación de la presa y estimar el correspondiente empuje asociado.
4. Calcular las presiones total, efectiva y neutra en las posiciones **A** y **B**.

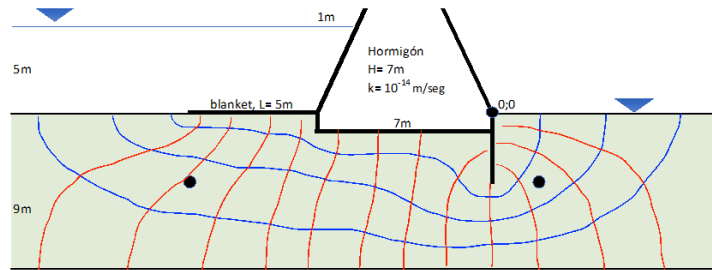


Dibujen la **red de filtración** — identifiquen primero las condiciones de borde.





Red de filtración (mínimo 4 tubos de corriente) → estimación de Q



DE LA RED DIBUJADA (PRIMER INTENTO A MANO)

$N_f = 4$ tubos de corriente

$N_d = 13$ caídas equipotenciales

$\Delta H = 5 \text{ m}$ (upstream – downstream)

$$\text{Caudal: } Q = k \cdot (N_f / N_d) \cdot \Delta H$$

$$Q = 10^{-14} \text{ m/s} \times (4/13) \times 5 \text{ m} = 1.54 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q \approx 13.3 \text{ m}^3 / (\text{m} \cdot \text{día})$$

✓ CAÍDA UNITARIA ENTRE EQUIPOTENCIALES

$$\delta h = \Delta H / N_d = 5 / 13 = 0.385 \text{ m}$$

Este valor se usa para calcular la carga en cualquier punto de la red:

$$h_p = \Delta H - n_d \cdot \delta h$$

donde n_d = número de caídas desde aguas arriba hasta el punto P.

$$u_p = \gamma_w \cdot (h_p - z_p)$$

Datum = nivel freático aguas abajo ($z = 0$ en el pelo de agua downstream)

Presión de poros en el plano de fundación y empuje resultante E

Datum: pelo de agua downstream ($z = 0$). Fundación a $z_1 = z_2 = -1$ m.

$$\delta h = \Delta H / N_d = 5 / 13 = 0.385 \text{ m (caída unitaria)}$$

Vértice 1 — upstream ($n_d \approx 4.3$)

$$h_1 = \Delta H - n_d \cdot \delta h = 5 \text{ m} - 4.3 \text{ caídas} \times 0.385 \text{ m/caída} = 3.34 \text{ m}$$

$$u_1 = \gamma_w \cdot (h_1 - z_1) = 9.81 \text{ kN/m}^3 \times (3.34 \text{ m} - (-1 \text{ m}))$$

$$u_1 = 9.81 \text{ kN/m}^3 \times 4.34 \text{ m} = 42.6 \text{ kPa}$$

Vértice 2 — downstream ($n_d \approx 7.6$)

$$h_2 = \Delta H - n_d \cdot \delta h = 5 \text{ m} - 7.6 \text{ caídas} \times 0.385 \text{ m/caída} = 2.08 \text{ m}$$

$$u_2 = \gamma_w \cdot (h_2 - z_2) = 9.81 \text{ kN/m}^3 \times (2.08 \text{ m} - (-1 \text{ m}))$$

$$u_2 = 9.81 \text{ kN/m}^3 \times 3.08 \text{ m} = 30.2 \text{ kPa}$$

EMPUJE TOTAL SOBRE LA FUNDACIÓN

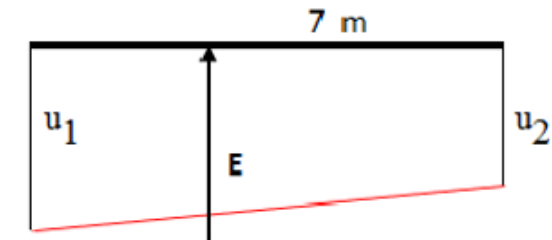
$$E = \frac{1}{2} (u_1 + u_2) \cdot L$$

$$E = \frac{1}{2} (42.6 + 30.2) \text{ kPa} \times 7 \text{ m} = 254.6 \text{ kN/m}$$

PUNTO DE APLICACIÓN (DESDE UPSTREAM)

$$\bar{x} = \frac{L}{3} \cdot (2u_1 + u_2) / (u_1 + u_2)$$

$$\bar{x} = \frac{7}{3} \cdot (2 \times 42.6 + 30.2) / 72.8 = 3.70 \text{ m desde upstream}$$



Punto A — aguas arriba ($z = -4$ m, $n_d \approx 2$)

PRESIÓN TOTAL

$$\sigma_A = \gamma_w \cdot 5 \text{ m} + \gamma_{\text{sat}} \cdot 4 \text{ m} = 9.81 \text{ kN/m}^3 \times 5 \text{ m} + 21 \text{ kN/m}^3 \times 4 \text{ m}$$

$$\sigma_A = 49.1 \text{ kPa} + 84.0 \text{ kPa} = 133.1 \text{ kPa}$$

PRESIÓN NEUTRA

$$h_A = 5 \text{ m} - 2 \text{ caídas} \times 0.385 \text{ m/caída} = 4.23 \text{ m}$$

$$u_A = \gamma_w \cdot (h_A - z_A) = 9.81 \text{ kN/m}^3 \times (4.23 - (-4)) \text{ m}$$

$$u_A = 9.81 \text{ kN/m}^3 \times 8.23 \text{ m} = 80.7 \text{ kPa}$$

PRESIÓN EFECTIVA

$$\sigma'_A = 133.1 - 80.7 = 52.4 \text{ kPa}$$

Punto B — aguas abajo ($z = -4$ m, $n_d \approx 10$)

PRESIÓN TOTAL

$$\sigma_B = \gamma_{\text{sat}} \cdot 4 \text{ m} = 21 \text{ kN/m}^3 \times 4 \text{ m} = 84.0 \text{ kPa}$$

(napa freática al nivel del terreno downstream, sin agua sobre la superficie)

PRESIÓN NEUTRA

$$h_B = 5 \text{ m} - 10 \text{ caídas} \times 0.385 \text{ m/caída} = 1.15 \text{ m}$$

$$u_B = 9.81 \text{ kN/m}^3 \times (1.15 - (-4)) \text{ m} = 9.81 \text{ kN/m}^3 \times 5.15 \text{ m}$$

$$u_B = 50.5 \text{ kPa}$$

PRESIÓN EFECTIVA

$$\sigma'_B = 84.0 - 50.5 = 33.5 \text{ kPa}$$

Los más comunes en parciales y en la práctica profesional

Confundir carga hidráulica h con presión de poros u

La presión de poros es $u = \gamma_w(h - z)$, no $\gamma_w \cdot h$. Hay que restar la cota z del punto.

Usar N_f/N_d al revés

El caudal es proporcional a N_f (tubos de flujo) e inversamente proporcional a N_d (caídas de potencial).

No verificar las condiciones de borde

Una red mal trazada no respeta $LC \perp EQ$ ni los bordes impermeables/libres $\rightarrow$ resultados incorrectos.

Calcular i_c con γ_{sat} en lugar de γ'

El gradiente crítico usa el peso sumergido: $i_c = \gamma'/\gamma_w$.

Usar γ_{sat} es incorrecto.

Ignorar la anisotropía

En suelos estratificados $k_x \gg k_z$. Usar k sin transformar el dominio sobreestima el caudal vertical.

✓ Verificar siempre unidades

k en m/s, ΔH en m, q en m^2/s (por metro de ancho).

✓ Chequeo de sentido físico

$FS < 1.2$ indica riesgo de sifonaje — revisá gradiente y cotas antes de concluir.

¿Comprendiste el taller de hoy?

Redes de filtración

Sé identificar las condiciones de borde (LC y EQ) en la geometría del problema

Calculo $q = k \cdot (N_f/N_d) \cdot \Delta H$ y sé cómo la simetría divide el caudal

Determino la presión de poros en cualquier punto usando h y la cota z del punto

Calculo el empuje de subpresión en la fundación de una presa y su punto de aplicación

Adapto la solución para suelos anisótropos con la transformación de dominio $x' = x \cdot \sqrt{(k_z/k_x)}$

Sifonaje

Calculo el gradiente de salida i_s usando las cargas de la red downstream

Verifico $FS = i_c/i_s \geq 1.2$ para el bloque de suelo en la zona de salida

Próximos temas

CONEXIÓN CON PRÓXIMOS TALLERES

- Consolidación — flujo transitorio en arcillas
- Estabilidad de taludes — influencia del flujo en la resistencia
- Filtros granulares — criterios de diseño para retener finos

