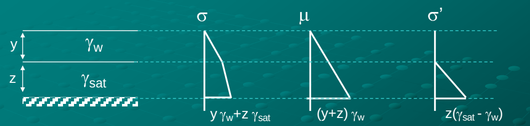
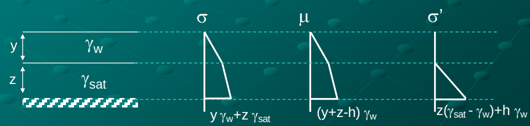
GRADIENTE HIDRAULICO CRÍTICO:

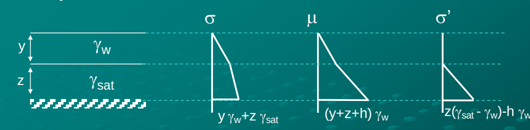
Para la condición hidrostática:



Para flujo vertical descendente:



Para flujo vertical ascendente:



En el flujo vertical ascendente, es cuando se presenta la condición crítica σ'=0, se dice que el suelo se encuentra en estado de licuefacción.

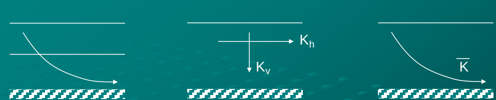
$$\sigma' = z\,(\gamma_{sat} - \gamma_w) - h\,\gamma_w = 0$$

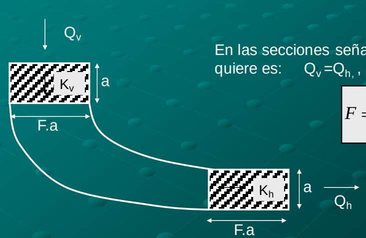
$$\frac{h}{z} = \frac{(\gamma_{sat} - \gamma_w)}{\gamma_w} = i_C$$

i_C = Gradiente crítico

$$i_C = \frac{Gs-1}{1+e} \quad\Rightarrow\quad FS = \frac{i_C}{i} > 3$$

FLUJO A TRAVÉS DE SUELOS ANISOTRÓPICOS:



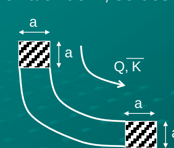


En las secciones señaladas lo que se quiere es: $Q_v = Q_h$, , aplicando Darcy:

$$F = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$$

F = Factor de mayoración.

Para trabajar con un solo valor de $\overline{K}$, se desea una sección:



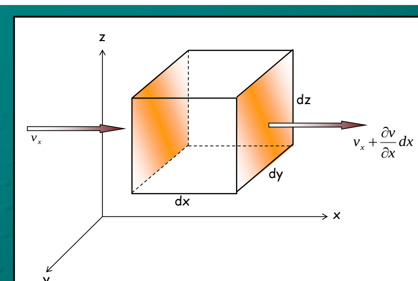
Planteando la Ley de Darcy:

$$Q = \overline{K} \cdot \frac{h}{a} \cdot a$$

Luego igualando Q con Q_h o Q_v, queda:

$$\overline{K} = \sqrt{K_h \cdot K_v}$$

ECUACIONES QUE RIGEN EL FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DE LA MASA DE SUELO.



VELOCIDADES "ENTRADA" : $v_x,\ v_y,\ v_z$

VELOCIDADES
"SALIENTES"

$$\begin{cases} v_x + \dfrac{\partial v_x}{\partial x}dx & : \quad x \\ v_y + \dfrac{\partial v_y}{\partial y}dy & : \quad y \\ v_z + \dfrac{\partial v_z}{\partial z}dz & : \quad z \end{cases}$$

Q entra = Q sale $\quad\therefore\quad$ Por continuidad

DARCY $\quad Q = K \cdot i \cdot A \quad$ = velocidad * Área.

$$v_x dzdy + v_y dxdz + v_z dydx =$$
$$\left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x}dx\right)dydz + \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y}dy\right)dxdz + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z}dz\right)dxdy$$

Sabiendo que: Volumen del elemento diferencial = dxdydz.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x}dxdydz + \frac{\partial v_y}{\partial y}dydxdz + \frac{\partial v_z}{\partial z}dzdxdy = 0$$

Simplificando:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad A$$

Velocidad = $K \cdot i = K \cdot \dfrac{\partial h}{\partial l}$

$$v_x = K_x \frac{\partial h}{\partial x}; \quad v_y = K_y \frac{\partial h}{\partial y}; \quad v_z = K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Derivando las 3 componentes de la velocidad para introducirlas en la ecuación (A) tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) = K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{\partial v_x}{\partial x}$$
$$\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) = K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{\partial v_y}{\partial y}$$
$$\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) = K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{\partial v_z}{\partial z}$$

Introduciendo en (A)

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Si tuviésemos un suelo isotrópico donde:

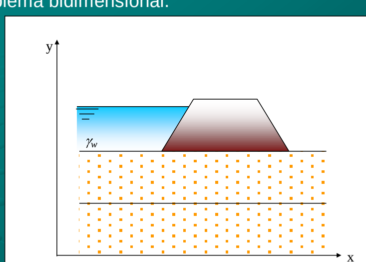
$$K_x = K_y = K_z \quad \Rightarrow \quad \overline{K}$$

La ecuación se simplifica a:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad \nabla^2 h \longrightarrow$$

"Ecuación de Laplace", describe el flujo de agua a través de la masa de suelo.

En la mayoría de los casos se puede considerar el flujo como un problema bidimensional.



Ecuación diferencial:

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

Ecuación de Laplace:

1.- Solución matemática.
2.- Solución gráfica.

(2) Dos familias de curvas perpendiculares entre si.

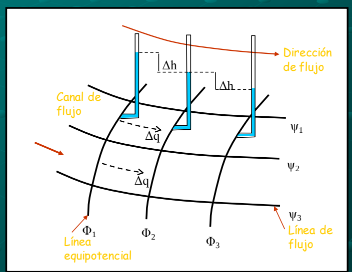
En la región de flujo se dibujan 2 familias de curvas perpendiculares entre si.

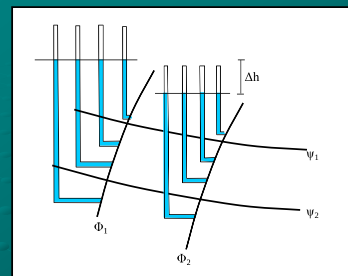
Primera familia: Líneas de flujo o líneas de corriente. ψ
Segunda familia de curvas: Líneas equipotenciales. ϕ

Para que esto represente la solución única de la ecuación de Laplace debe cumplirse que:

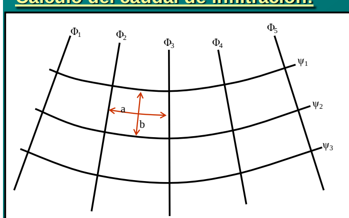
•Entre los canales que se generen por dos líneas de flujo debe circular el mismo caudal.
•Entre las líneas equipotenciales se pierde el mismo potencial hidráulico "h".

Δh = Pérdida de carga.
Δq = Caudal del infiltración.

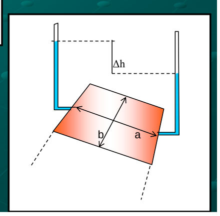




Cálculo del caudal de infiltración:



Qf = Caudal que se infiltra en la región considerada.



$$\Delta q = \Delta q_1 = \Delta q_2$$

$$\left.\begin{array}{l} \Delta q = \overline{K}\, i\, A \\ i = \dfrac{\Delta h}{L} \end{array}\right\} \quad \Delta q = \overline{K}\,\frac{\Delta h}{L}\,A \quad \Rightarrow \quad \therefore h_T \quad \sum \Delta h$$

h_T = Carga hidráulica total que genera el flujo en toda la región.
h_T se va perdiendo a medida que el agua circule.

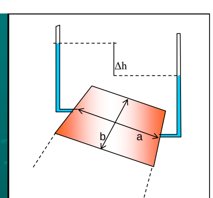
Definimos: n_e: # de canales equipotenciales.
n_f: # de canales de flujo.

$$\left.\begin{array}{l} Q_f = n_f \cdot \Delta q \\ h_T = n_e \cdot \Delta h \end{array}\right\}$$ n_f, n_e se conocen una vez dibujada la red de flujo.

$$\Delta q = \overline{K} \cdot i \cdot A = \overline{K} \cdot \frac{\Delta h}{a} \cdot b \cdot 1$$

$$\Delta q = \overline{K} \cdot \frac{\Delta h}{a} \cdot b = \overline{K} \cdot \frac{h_T}{n_e} \cdot \frac{b}{a} = \frac{Q_f}{n_f}$$

$$\therefore \quad Q_f = \overline{K} \cdot h_T \cdot \frac{n_f}{n_e} \cdot \frac{b}{a}$$



Para simplificar hacemos b/a igual a 1 que implica dibujar en la sección cuadrados curvilíneos, no rectángulos.

$$\boxed{\therefore \quad Q_f = \overline{K} \cdot h_T \cdot \frac{n_f}{n_e}}$$

Condiciones para aplicar el método gráfico (solución ecuación de Laplace).

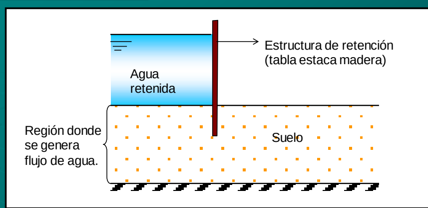
• Dibujar líneas de corriente (*Ψ*) perpendiculares a las líneas equipotenciales (*Φ*).

• Entre una línea de corriente y la siguiente se genera un canal de flujo, por donde pasa un caudal "Δq" , y es el mismo que circula entre cualquier línea de corriente y la que le sigue.

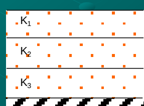
• Entre cualquier equipotencial y la siguiente, se pierde una carga hidráulica Δh, que es la misma carga hidráulica que se pierde en cualquier canal equipotencial dibujado.

• La región de flujo debe proporcionar un solo valor de permeabilidad; lo que implica trabajar con una sección transformada, donde exista un coeficiente de permeabilidad equivalente .

Ejemplo de Aplicación:



Verificar que en la región donde se genere el flujo tengamos un solo valor de permeabilidad, si esto no ocurre determinar .



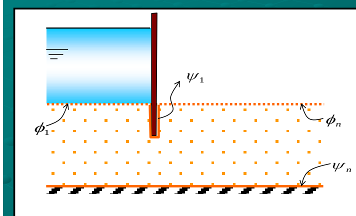
K_h, K_v

$\overline{K} = \sqrt{K_h * K_v}$

Sección Transformada

---

1. Dibujar la región de flujo a escala.
2. Dibujar las líneas de corriente y equipotenciales frontera (primera y última).



Frontera entre superficie permeable y superficie impermeable.

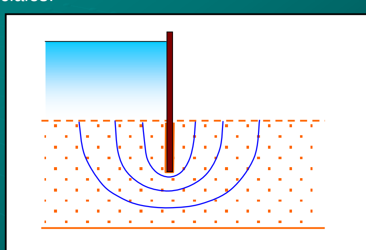
Frontera entre agua y suelo permeable.

Líneas de corriente o de flujo (dirección del flujo).

Líneas equipotenciales (perpendiculares al flujo).

---

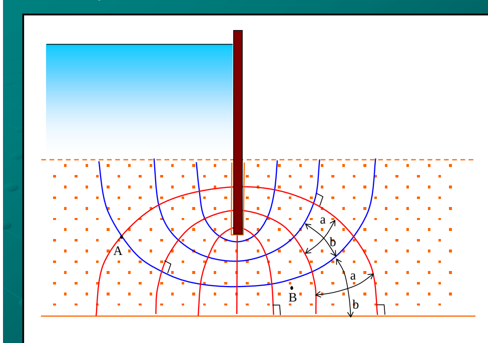
3. Dibujar las líneas de corriente "Son Paralelas entre sí" llevan la dirección del flujo y son perpendiculares a las equipotenciales.



Nota: Se recomienda trabajar con tres a cuatro canales de flujo.

---

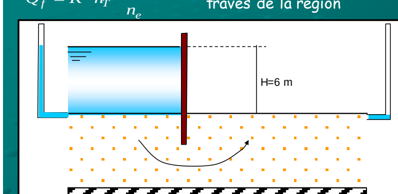
4. Trazar las líneas equipotenciales perpendiculares a las de corriente y formando cuadrados curvilíneos.



Cálculos a realizar:

1. Caudal de filtración.

$Q_f = \overline{K} \cdot h_T \cdot \frac{n_f}{n_e}$: Caudal de agua que se infiltra a través de la región



$n_f = 4$

$n_e = 8$

$h_T = H = 6m$

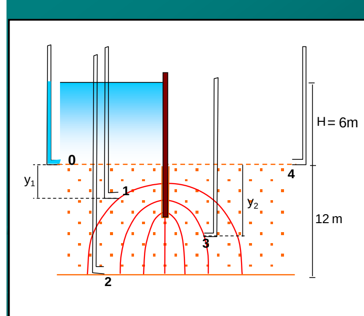
$K = 2*10^{-3} \frac{cm}{seg}$

$Q_f = 2 \cdot 10^{-3} \, cm/_{seg} \cdot 6m \cdot 4/8 \cdot 1m \cdot 10^{-2} \frac{m}{cm}$

$\boxed{Q_f = 6 \cdot 10^{-5} \, m^3/_{seg}}$

---

2. Alturas piezométricas en cualquier posición.



$h_{p(o)} = H = 6m$

$h_{p(4)} = 0m$

$h_{p(1)} = H + y_1 - \Delta h$

$h_{P(2)} = H + 12 - \Delta h - \frac{\Delta h}{2}$

$h_{P(3)} = H + y_3 - \underbrace{6}_{ne} \cdot \Delta h$

Carga hidráulica (ecuación de Bernoulli)

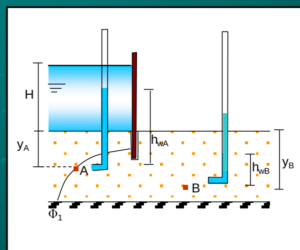
3. Esfuerzo efectivo en A y en B.

Esfuerzo efectivo en A.

$$\sigma'_A = \sigma_A - \mu_A$$
$$\sigma_A = H \cdot \gamma_w + y_A \cdot \gamma_{sat}$$
$$\mu_A = \ H + y_A - \Delta h \ \cdot \gamma_w$$

Δh : Pérdida de carga hidráulica entre ϕ_1 y ϕ_2.

H , y_A, se miden a escala.



Esfuerzo efectivo en B.

$$\sigma'_B = \sigma_B - \mu_B$$
$$\sigma_B = y_B \cdot \gamma_{sat} \quad ; \quad \mu_B = h_{wB} \cdot \gamma_w$$
$$\mu_A = \ H + y_B - \sum n_e \cdot \Delta h \ \cdot \gamma_w$$

$\sum n_e$: Todas las pérdidas de carga generadas hasta “B”.

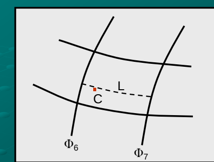
$$\sum n_e = 5.5 \Delta h$$

H , y_B, se miden a escala.

4. Gradiente hidráulico en cualquier punto.

En (C) $\quad i = \frac{h}{L}$

$$i_c = \frac{\Delta h}{L} \quad \Rightarrow \quad \Delta h = \frac{h_T}{n_e} = \frac{6}{8} = 0{,}75\ m$$



Medir L, sobre una línea de flujo trazada sobre “C”
Si, L = 3 m:

$$i_c = \frac{0.75\ m}{3\ m} = 0.25$$

5. Velocidades de descarga y filtración.

Velocidad de descarga:

En (C) $\quad V_{dc} = K \cdot i \quad \Rightarrow$ Por la ecuación de Darcy.

$$V_{dc} = K \cdot i_c = 2 \cdot 10^{-3}\ cm/seg \cdot 0{,}25$$
$$V_{dc} = 5 \cdot 10^{-4}\ cm/seg$$

Velocidad de filtración:

$$V_{fc} = \frac{V_{dc}}{n} = V_{dc}\left(\frac{1+e}{e}\right) \quad ; \quad \gamma_{sat} = \gamma_d + n \cdot \gamma_w$$

$n = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_d}{\gamma_w}$; se conoce γ_d, W_{sat}, donde: $\gamma_d = \frac{\gamma_{sat}}{1 + w_{sat}}$

6. Gradiente hidráulico de salida y factor de seguridad contra arena movediza.