

### 3 - ESCOAMENTOS EM MEIOS POROSOS

#### Equação de Bernoulli

No caso de escoamentos em meios porosos, dado que a velocidade de percolação é muito pequena, despreza-se o termo  $v^2/2g$ , altura cinemática da equação de Bernoulli. Assim, esta equação toma a forma:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + z$$

em que:

h- carga hidráulica num ponto determinado da massa do solo

p - pressão hidrostática devido à carga hidráulica

$\gamma_w$  - peso volúmico da água

z - cota da partícula relativamente a um plano de referência, que nos problemas de percolação pode ser o plano de jusante.

$p/\gamma_w$  - altura piezométrica.

Se imaginarmos um tubo piezométrico inserido no ponto em questão, a água subirá verticalmente numa altura igual à altura piezométrica.

#### Lei de Darcy

$$v = k i$$

$$Q = A k i$$

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

em que:

v - velocidade aparente de escoamento

k - coeficiente de permeabilidade

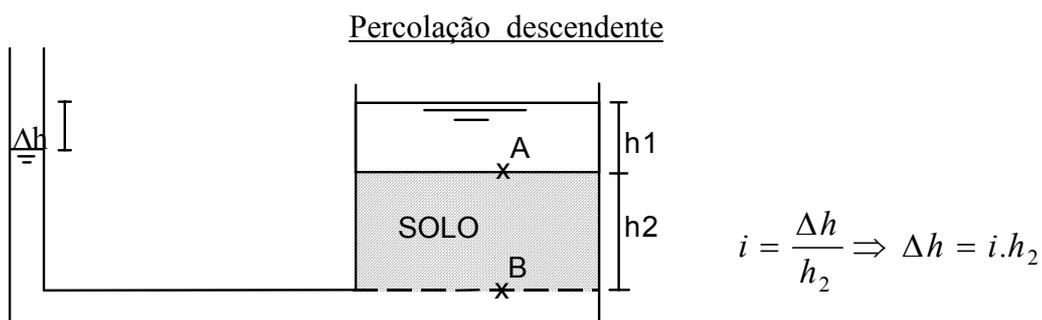
i - gradiente hidráulico

Q - caudal através duma secção de área A do solo

$\Delta h$  - perda de carga hidráulica ao longo do solo.

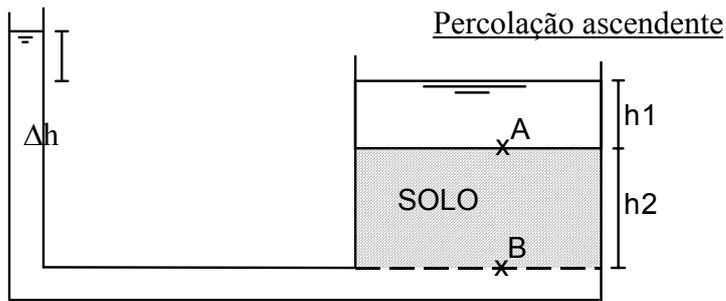
l - espessura da camada de solo na direcção do movimento da água

#### Tensões durante a percolação



$$\mathbf{B} \begin{cases} \sigma = h_1\gamma_w + h_2\gamma_{sat} \text{ (não varia com a percolação)} \\ u = (h_1 + h_2 - \Delta h) \cdot \gamma_w \text{ (altura de água no tubo piezométrico x peso volúmico da água)} \\ \quad = h_1\gamma_w + h_2\gamma_w - \Delta h\gamma_w = h_1\gamma_w + h_2\gamma_w - i \cdot h_2 \cdot \gamma_w = h_1\gamma_w + h_2(\gamma_w - i \cdot \gamma_w) \\ \sigma'_B = \sigma_B - u_B = h_1\gamma_w + h_2\gamma_{sat} - [h_1\gamma_w + h_2(\gamma_w - i \cdot \gamma_w)] = \\ \quad = h_1\gamma_w + h_2\gamma_{sat} - h_1\gamma_w - h_2\gamma_w + i \cdot h_2 \cdot \gamma_w = h_2(\gamma_{sat} - \gamma_w + i\gamma_w) = h_2(\gamma' + i\gamma_w) \end{cases}$$

Em percolação descendente  $u$  diminui e  $\sigma'$  aumenta relativamente ao estado de repouso.



$$i = \frac{\Delta h}{h_2} \Rightarrow \Delta h = i \cdot h_2$$

$$\mathbf{B} \left\{ \begin{array}{l}
 \sigma = h_1 \gamma_w + h_2 \gamma_{sat} \text{ (não varia com a percolação)} \\
 u = (h_1 + h_2 + \Delta h) \cdot \gamma_w \text{ (altura de água no tubo piezométrico x peso volúmico da água)} \\
 = h_1 \gamma_w + h_2 \gamma_w + \Delta h \gamma_w = h_1 \gamma_w + h_2 \gamma_w + i \cdot h_2 \gamma_w = h_1 \gamma_w + h_2 (\gamma_w + i \gamma_w) \\
 \sigma' = \sigma_B - u_B = h_1 \gamma_w + h_2 \gamma_{sat} - [h_1 \gamma_w + h_2 (\gamma_w + i \gamma_w)] = \\
 = h_1 \gamma_w + h_2 \gamma_{sat} - h_1 \gamma_w - h_2 \gamma_w - i \cdot h_2 \gamma_w = h_2 (\gamma_{sat} - \gamma_w - i \gamma_w) = h_2 (\gamma' - i \gamma_w)
 \end{array} \right.$$

Em percolação ascendente  $u$  aumenta e  $\sigma'$  diminui relativamente ao estado de repouso.

Se aumentarmos gradualmente a altura de água no tubo piezométrico na figura, o valor de  $\Delta h$  aumenta e atingir-se-á um ponto em que a pressão intersticial em B se torna tão elevada que iguala o peso de água e de solo acima de B, resultando uma situação de instabilidade, ou seja, anula-se a tensão efectiva.

$\sigma' = 0$  é uma situação de gradiente hidráulico crítico

$$\sigma' = h_2 \gamma' - h \gamma_w = 0 \qquad \frac{\Delta h}{h_2} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = i_{crit}$$

### Percolação bidimensional (redes de percolação)

Rede de escoamento ou rede de percolação - é a representação gráfica da família das linhas de percolação e das correspondentes linhas equipotenciais.

- Fronteira impermeável - a água não pode penetrar e assim a velocidade normal a essa superfície deve ser nula. É uma linha de percolação.
- Fronteiras permeáveis de estruturas de retenção de águas - ao longo destas fronteiras a distribuição das pressões é hidrostática. São linhas equipotenciais

Caudal de percolação:

$$Q = k \cdot H \cdot \frac{N_q}{N_h}$$

em que:

$k$  é o coeficiente de permeabilidade;

$H$  é a carga hidráulica total;

$N_q$  é número de canais de percolação;

$N_h$  é o número de saltos de equipotenciais.

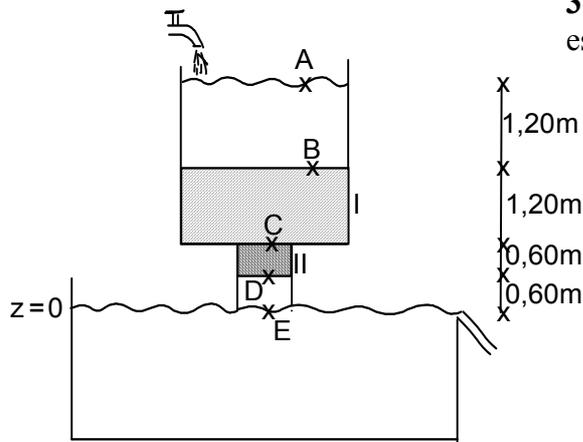
Pressão intersticial num ponto qualquer da rede de escoamento

Calcula-se o nível piezométrico correspondente à equipotencial que passa pelo ponto.

$$\Delta h_i = \frac{H}{N_h}$$

em que  $\Delta h_i$  a perda de carga entre cada equipotencial.

**Problemas**



**3.1** - O nível de referência nos reservatórios do esquema anexo é suposto constante.

As características das duas amostras de solo são as seguintes:

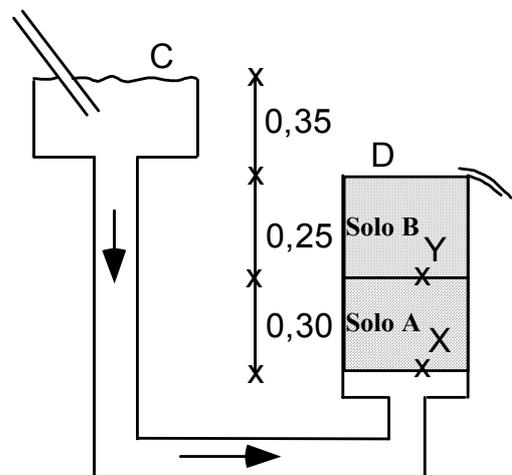
$$\begin{cases}
 \text{I} & \begin{cases} A = 4 \text{ cm}^2 \\ k = 60 \text{ cm/min} \\ n = 0,5 \end{cases} \\
 \text{II} & \begin{cases} A = 2 \text{ cm}^2 \\ k = 30 \text{ cm/min} \\ n = 0,33 \end{cases}
 \end{cases}$$

- Determinar os diagramas que representam a variação da altura piezométrica e da carga hidráulica total.
- Determinar a velocidade de percolação real em cada um dos solos.

**R:** b)  $v_I = 2 \text{ cm/s}$ ;  $v_{II} = 6 \text{ cm/s}$

**3.2** - Na experiência preparada como se representa na figura o escoamento produz-se, para uma altura de queda constante, através dos solos A e B, cujas propriedades hidráulicas são diferentes.

- Determine a carga hidráulica e a altura piezométrica no ponto X.
- Se 35% da carga hidráulica se dissipam quando do escoamento através do solo A, quais são a carga hidráulica e a altura piezométrica no ponto Y?
- Se a permeabilidade do solo A for de  $0,40 \text{ mm/s}$ , que quantidade de água se escoar por segundo através da unidade de superfície horizontal do solo?
- Qual é o coeficiente de permeabilidade do solo B?

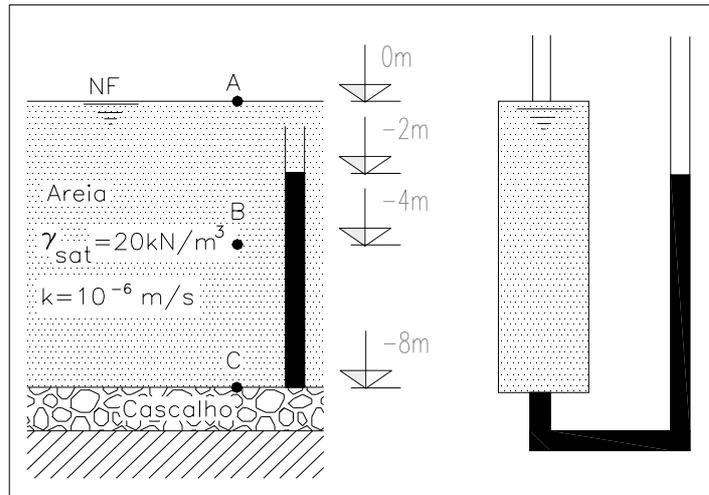


**R:** b)  $h = 0,23 \text{ m}$  e  $p/\gamma_w = 0,48 \text{ m}$ ;  
 c)  $Q = 1,632 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ ;  
 d)  $k = 1,79 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ .

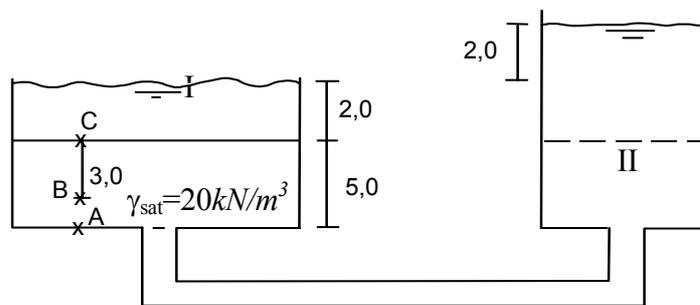
**3.3** - Considere o perfil geotécnico indicado na figura:

- Calcule a velocidade de escoamento.
- Determine a pressão intersticial e a tensão efectiva nos pontos A, B e C.
- Calcule a carga hidráulica\* nos mesmos pontos.

\*Nota: considere o plano de referência situado à cota - 8.0m.



**3.4** - a) Para a instalação esquematizada, calcule a tensão efectiva nos pontos A, B e C.



b) Qual passaria a ser a tensão efectiva nesses mesmos pontos se o nível da água descesse de 4 m no dispositivo da direita, mantendo-se constantes os níveis I e II.

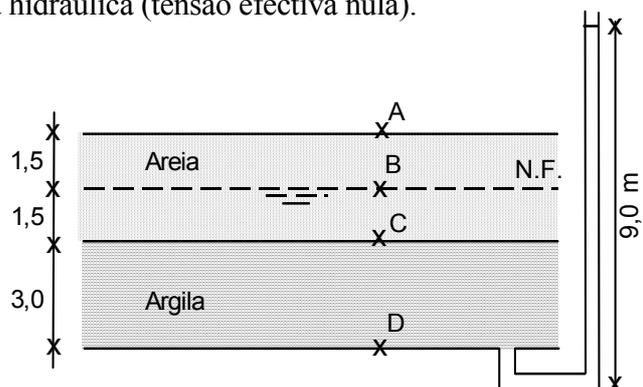
**R:** a)  $\sigma'_A = 30 \text{ kPa}$   
 $\sigma'_B = 18 \text{ kPa}$   
 $\sigma'_C = 0$

**3.5** - A camada inferior de argila está sob uma pressão artésiana de 9 m de água;

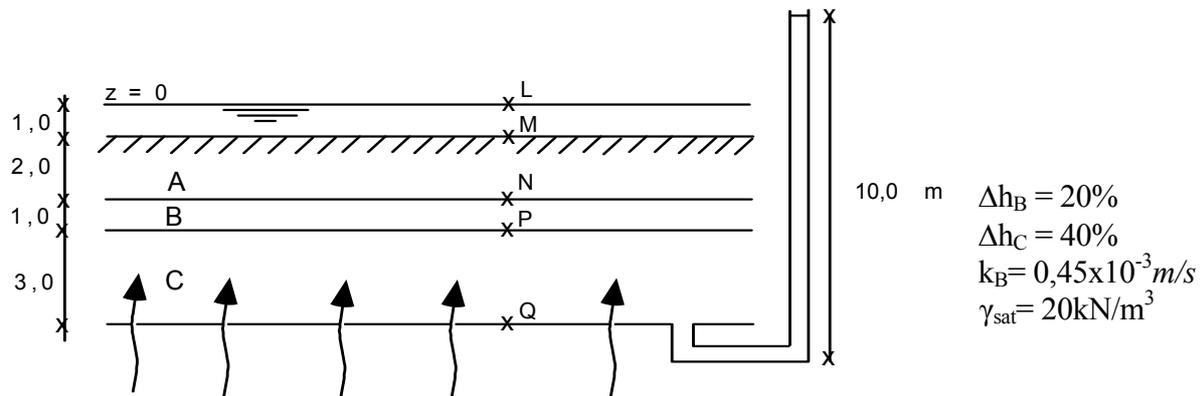
- Calcule o caudal de água que passa pela argila por  $m^2$  por dia.
- A pressão intersticial e efectiva na base da camada argilosa.
- A carga hidráulica  $h$  que provocaria rotura hidráulica (tensão efectiva nula).

	Areia	Argila
$\gamma_{sat} (\text{kN/m}^3)$	19	19
$\gamma_d (\text{kN/m}^3)$	17	16
$k (\text{cm/s})$	$10^{-3}$	$10^{-6}$

**R:** a) 1,3 l/m . dia



**3.6** - A figura apresenta um corte vertical de um maciço estratificado, que apresenta, a 6 m da superfície do solo, uma carga piezométrica ascendente de 10 m.



- Calcule o valor das cargas hidráulicas e piezométrica nos pontos P e M;
- Determine o coeficiente de permeabilidade do estrato C;
- Trace o diagrama das tensões efectivas referenciando os pontos L, M, N, P, Q.
- Reelabore o diagrama das tensões efectivas para o caso de se anular o desnível piezométrico.

**R:** b)  $k_C = 6,75 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ; c)  $\sigma'_{N'} = 8 \text{ kPa}$  e  $\sigma'_{P'} = 12 \text{ kPa}$ ; d)  $\sigma'_{N'} = 20 \text{ kPa}$  e  $\sigma'_{P'} = 30 \text{ kPa}$

**3.7** - Uma camada de argila de 10 m de espessura está sujeita a percolação permanente de água, ascendente, ocasionada por um nível artesianiano que sobe num tubo piezométrico 20 m acima da base da camada. A argila encontra-se coberta por uma camada de água com 4 m de profundidade.

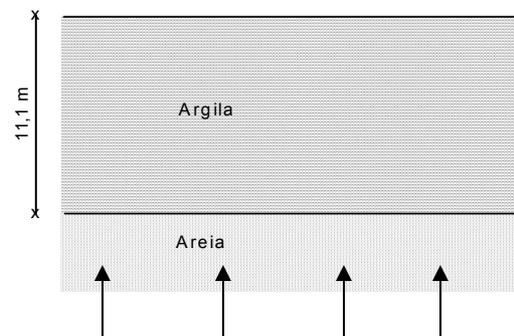
- Trace os diagramas das tensões total, intersticial e efectiva ao longo da camada.
- Se o nível artesianiano baixar rapidamente de 20 m trace os mesmos diagramas para:
  - a situação imediatamente após o rebaixamento;
  - uma situação em que tenha decorrido o tempo suficiente para se estabelecer um escoamento permanente.

**R:** a)  $\sigma'_{C'} = 40 \text{ kPa}$  b)  $\sigma'_{C'}(1) = 100 \text{ kPa}$  e  $\sigma'_{C'}(2) = 240 \text{ kPa}$  (ponto C – fundo da camada de argila)

**3.8** - Uma escavação de grandes dimensões estava a ser feita num estrato de argila compacta com  $\gamma = 17,65 \text{ kN/m}^3$ . Quando a profundidade de escavação atingiu 7,5 m o fundo abaulou, apareceram sucessivamente várias fendas e foi inundado por uma mistura de areia e água vindos de baixo.

Sondagens posteriores, mostraram que a argila estava assente sobre uma camada de areia que começava à profundidade de 11,1 m.

Se antes de iniciada a escavação tivesse sido introduzido um tubo piezométrico na camada de areia, a que altura subiria a água do tubo.



**R:** 6,35 m

**3.9** - Num determinado local, existe um estrato com 10 m de espessura de areia uniforme que está sujeito a uma percolação ascensional de água sob uma carga piezométrica de 15 m medida sobre o fundo do estrato de areia. O índice de vazios da areia é 0,5 e a densidade dos grãos é 2,65. Determinar a que profundidade se poderia escavar a areia sem se verificar a sua fluidificação por levantamento hidráulico.

**R :** 2,86 m

**3.10** - Considere um estrato de areia média uniforme de 10 m de espessura e com  $\gamma_{\text{sat}} = 21 \text{ kN/m}^3$  e suponha-o sujeito a uma percolação ascensional de água sob um desnível piezométrico de 5 m.

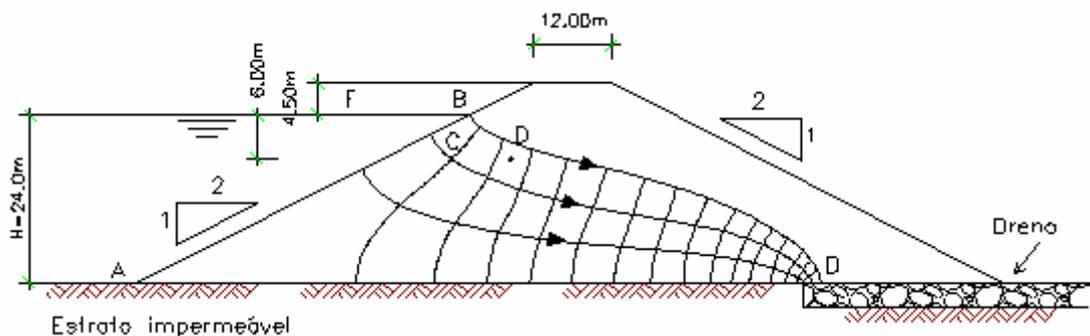
- Trace os diagramas das tensões verticais totais e efectivas ao longo do estrato;
- trace os diagramas das tensões verticais totais e efectivas para o caso de se anular o desnível piezométrico;
- trace os diagramas das tensões totais e efectivas quando o desnível sobe para 11 m.

**R :** a)  $\sigma' = 60 \text{ kPa}$  no fundo da camada.

**3.11** – Qual o valor da tensão efectiva, num ponto situado a 2 m acima do fundo de uma camada de argila com 10 m de espessura, coberta por 5 m de água, que provoca um escoamento permanente descendente para um substrato muito permeável, onde o nível estático da água indicado por um piezómetro instalado no substrato, se situa 2 m acima do fundo da camada de argila. O peso volúmico saturado da argila é de  $20 \text{ kN/m}^3$ .

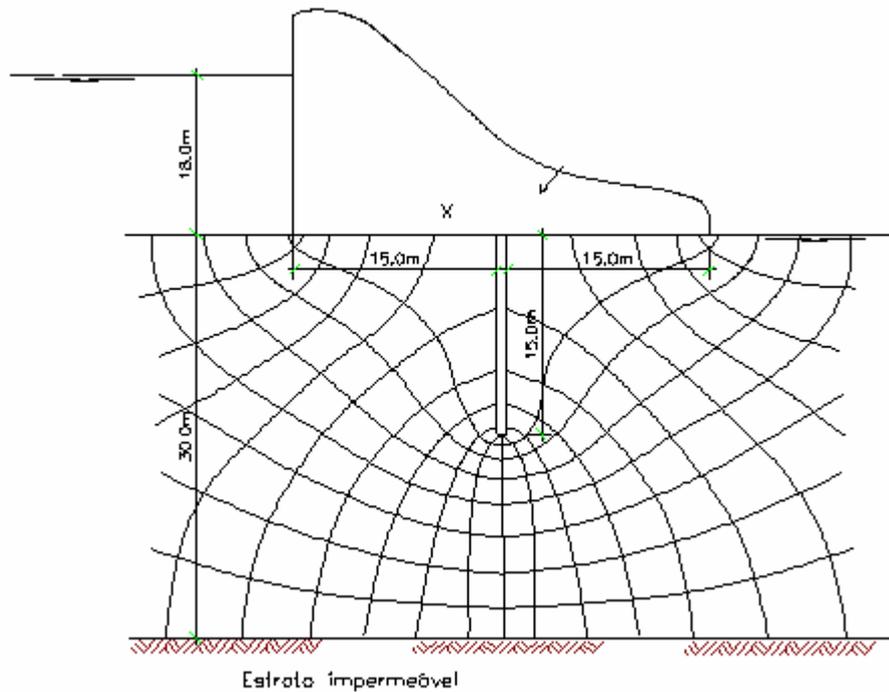
**R :**  $\sigma' = 184 \text{ kPa}$

**3.12** - Uma barragem de terra de perfil homogéneo, tem um dreno filtrante para controlar a percolação. Se o coeficiente de permeabilidade do solo da barragem for de 30 m/dia, calcular o valor de água perdida por dia na percolação através de uma extensão de 10 metros de barragem.



- Defina as condições de fronteira
- Avalie o caudal percolado por metro de desenvolvimento longitudinal da barragem
- Calcule a pressão intersticial e carga hidráulica nos pontos A, B, C e D.
- Indique o ponto com carga hidráulica de 10 m e pressão intersticial igual a 50 Pa.

**3.13** - Uma barragem com o comprimento de 30 m, está fundada na superfície horizontal de um depósito de solo isotrópico de 30 m de espessura, como indicado na figura.

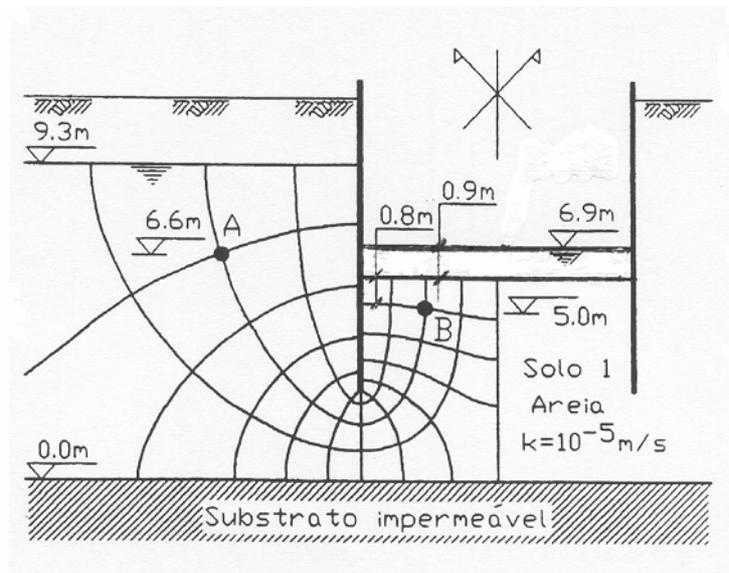


Esta barragem tem uma cortina impermeável a meio da largura da fundação, estendendo-se até 15 m abaixo do seu nível. A altura da água a montante da barragem é de 18 m acima do nível do solo. O coeficiente de permeabilidade é  $6 \times 10^{-3}$  m/hora. Determinar:

- o caudal filtrado;
- a distribuição da sub-pressão na fundação da barragem.

**3.14** - Na figura representa-se a rede de escoamento numa obra de escavação com recurso a cortinas de estacas-prancha.

- Determine o caudal total percolado, por metro de escavação, considerando para a areia  $\gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3$ .
- Calcule as pressões intersticiais nos pontos A e B.
- Calcule o factor de segurança ao piping.
- Considerando que sobre a areia se coloca enrocamento ( $k = \infty$ ) até à cota 6.9, calcule o novo factor de segurança.



Considere para o enrocamento um peso volúmico de  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ kN/m}^3$ .