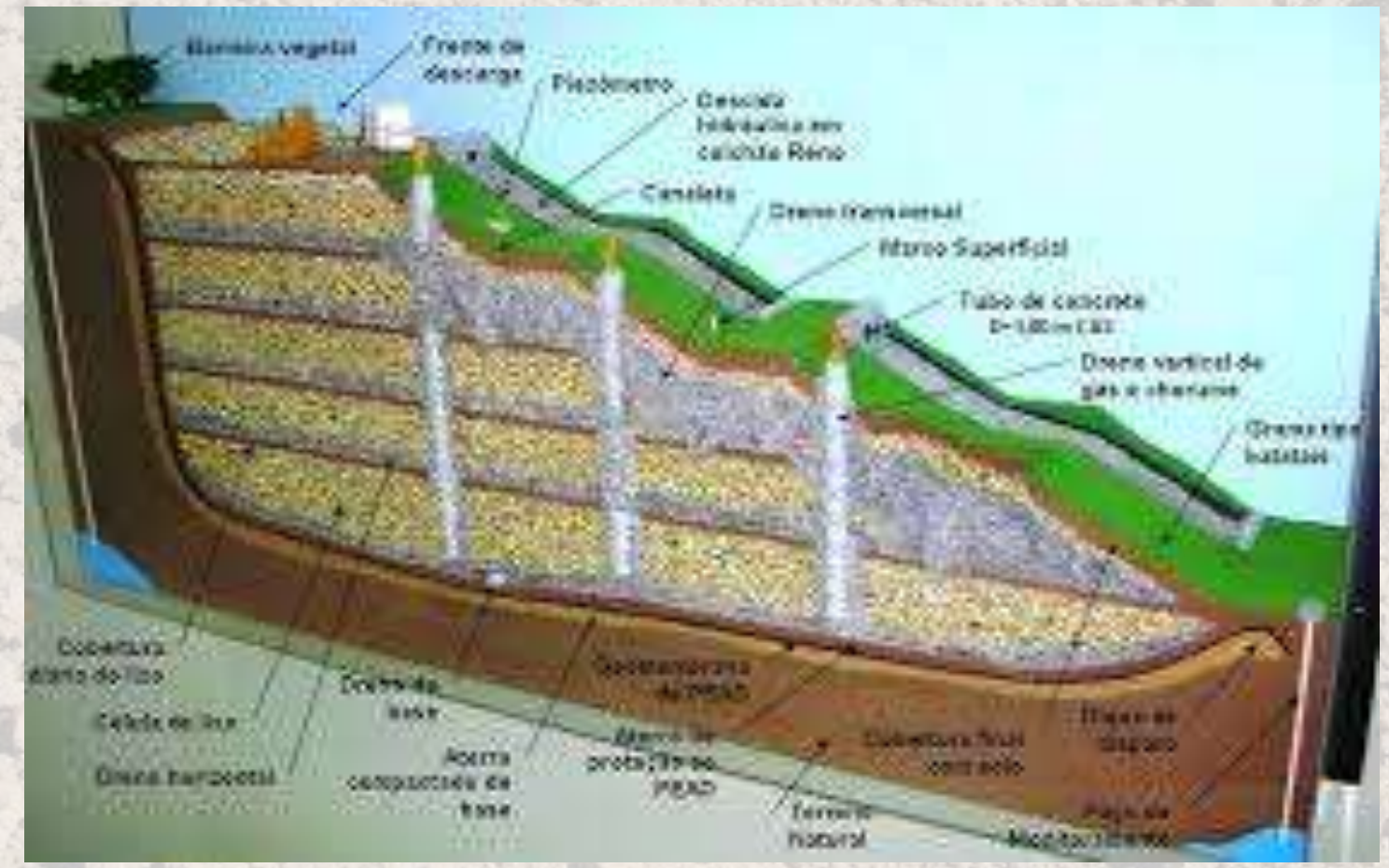
Aula 6

Permeabilidade. Fluxo 1D. Filtros

Importância do estudo do movimento da água no solo

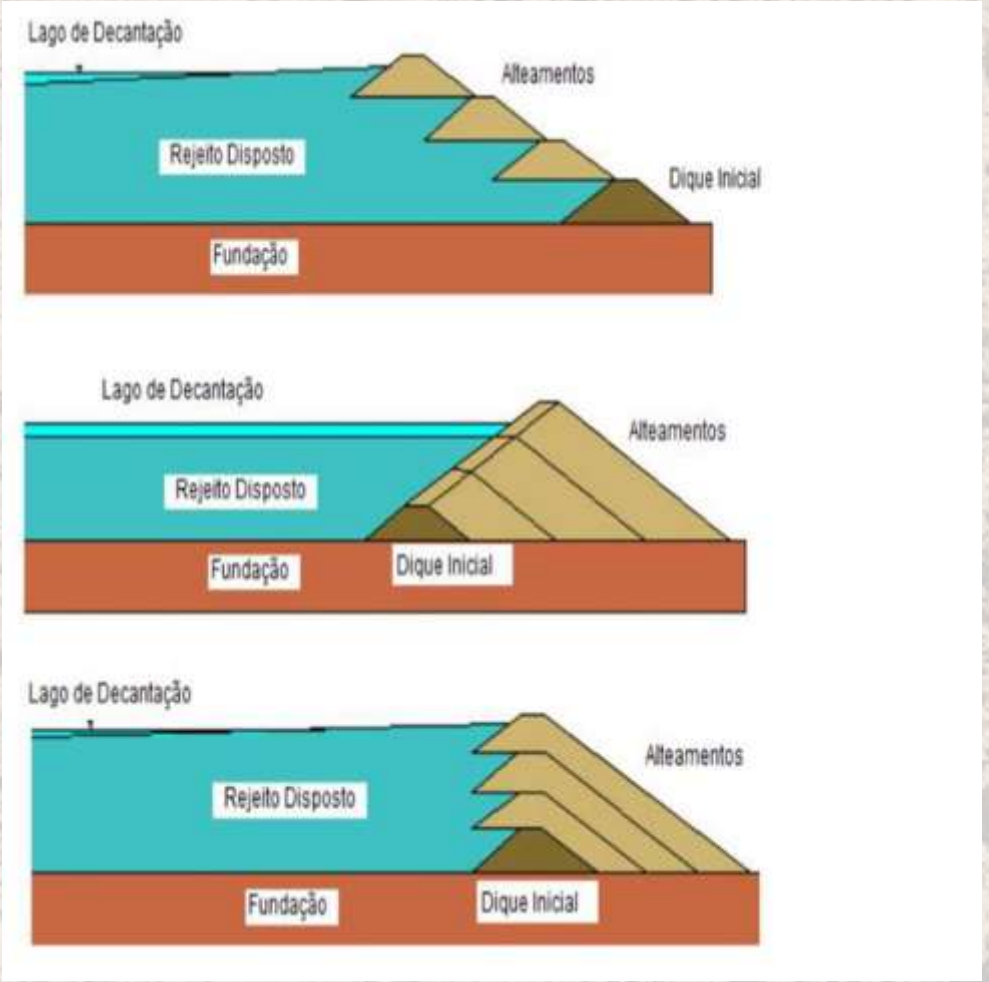
ESTIMAR O FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA SOB AS MAIS VARIADAS CONDIÇÕES HIDRÁULICAS PARA A INVESTIGAÇÃO DE PROBLEMAS

Importância do estudo do movimento da água no solo



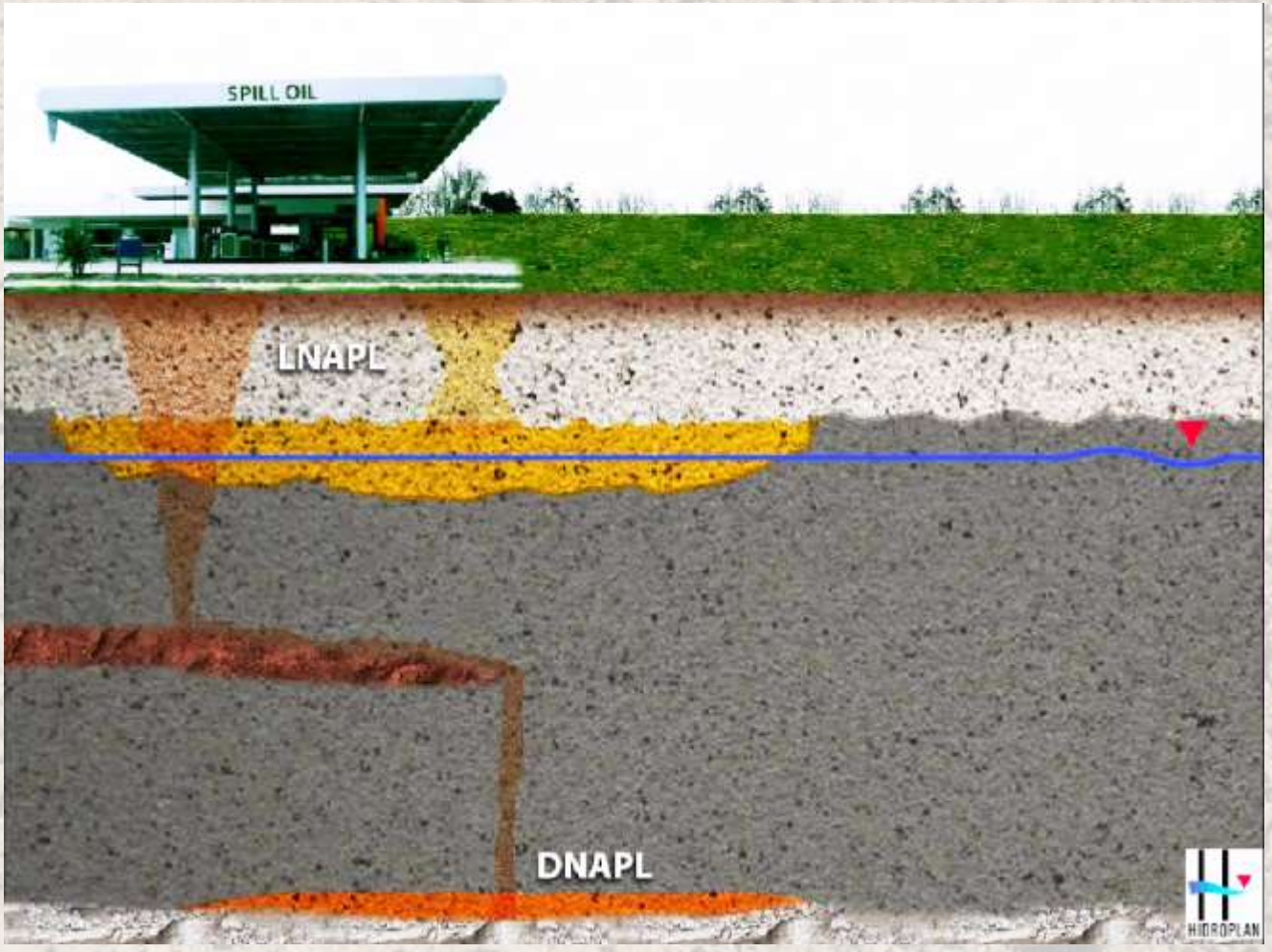
Fluxo de lixiviado e gases em aterros sanitários

Importância do estudo do movimento da água no solo



Percolação em barragens de rejeito

Importância do estudo do movimento da água no solo



Fluxo de contaminantes no solo

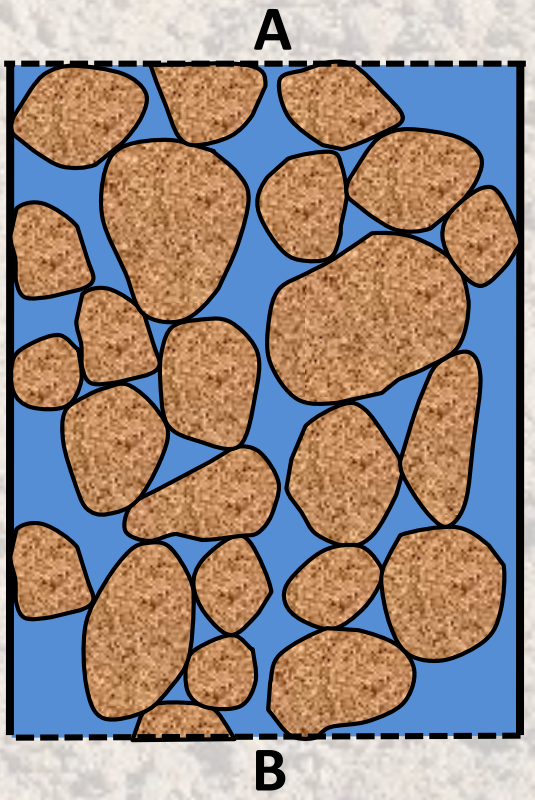
Considerações Iniciais

Os poros (vazios) de um solo são interligados

Formação de canais

Migração da água

Solos saturados



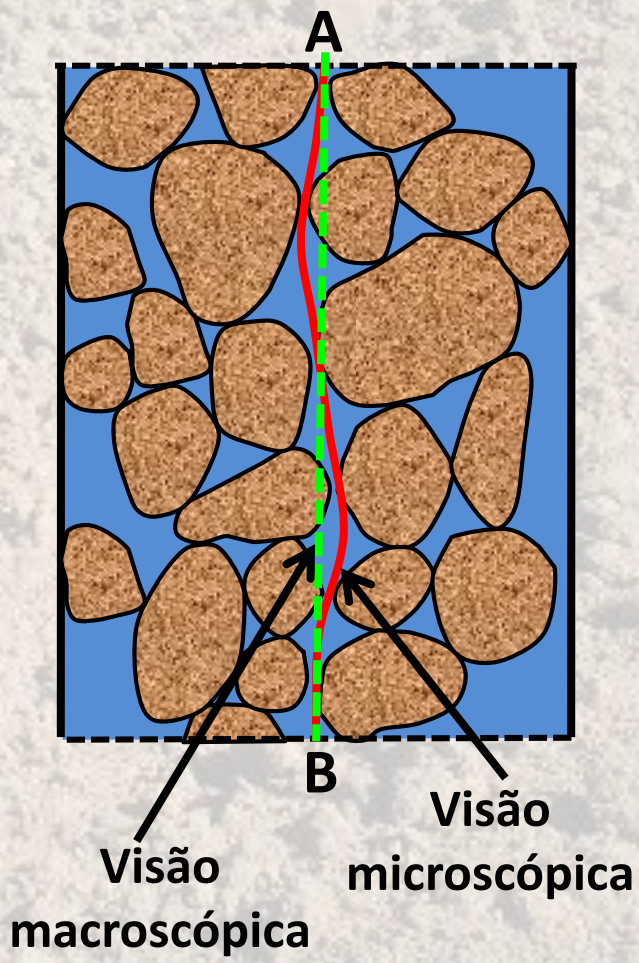
Considerações Iniciais

Os solos são permeáveis

A água livre pode circular entre as partículas

O sentido do fluxo é sempre dos pontos de maior energia para os pontos de menor energia

Bernoulli



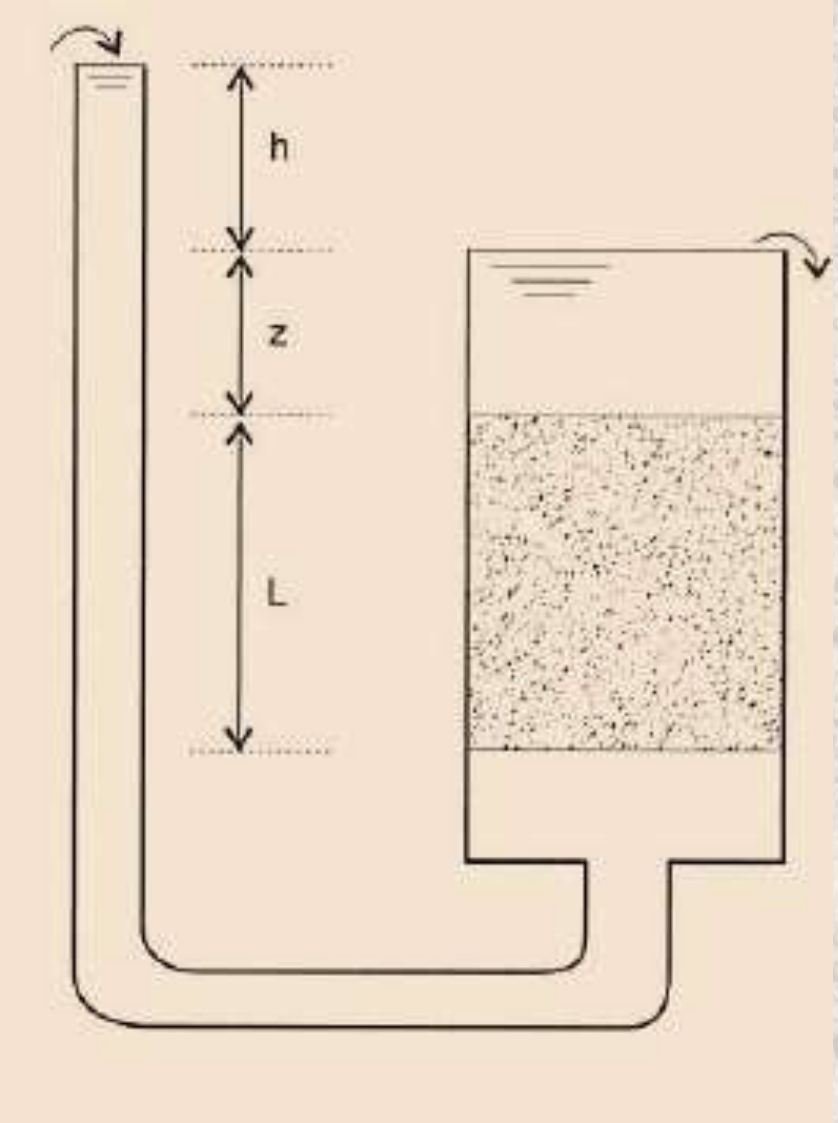
Lei de Darcy

- Existem dois tipos de escoamento para os fluidos reais: laminar e turbulento.

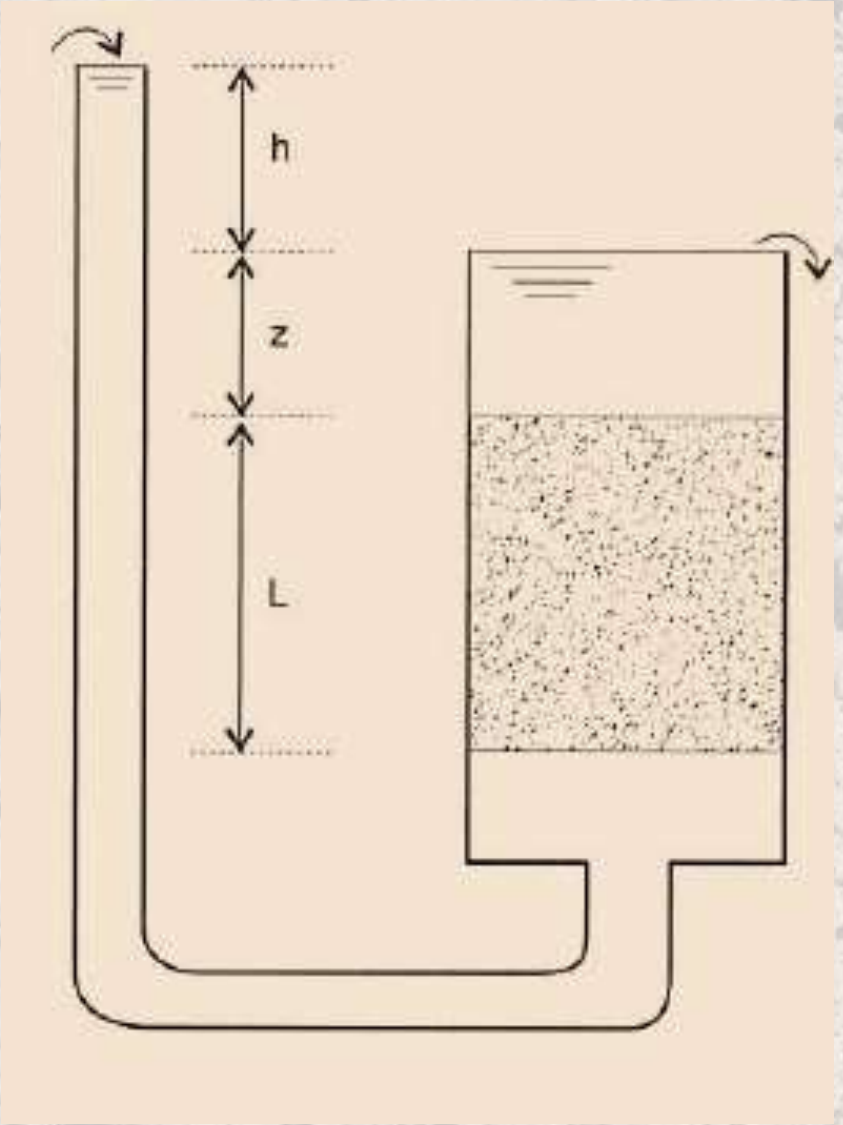
- No escoamento laminar, as partículas do fluido se movem em camadas, segundo trajetórias paralelas.

- **No âmbito da Mecânica dos Solos, interessa apenas o escoamento laminar.**

Lei de Darcy - Permeâmetro



Lei de Darcy

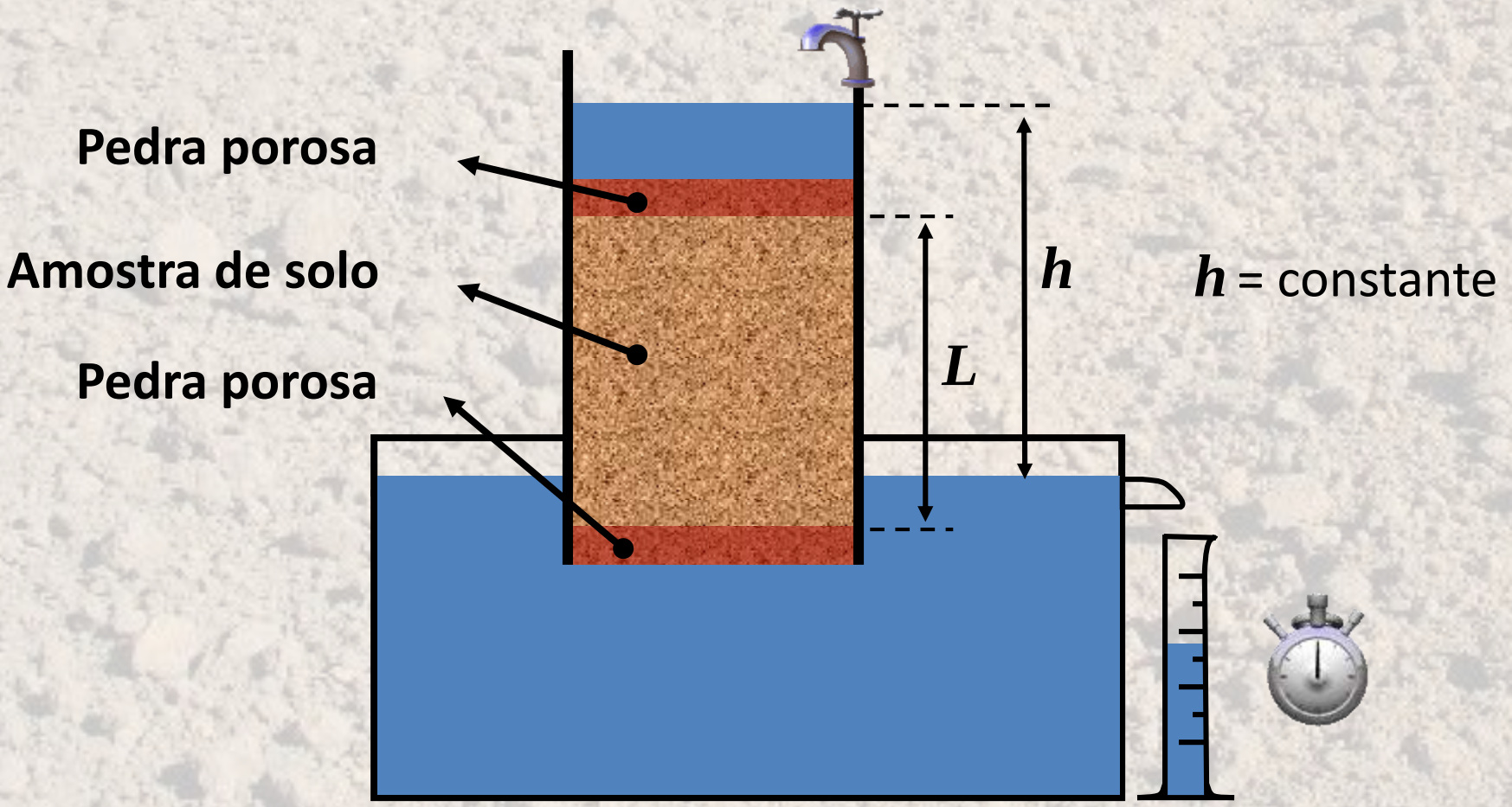


$$Q = k \frac{h}{L} A$$

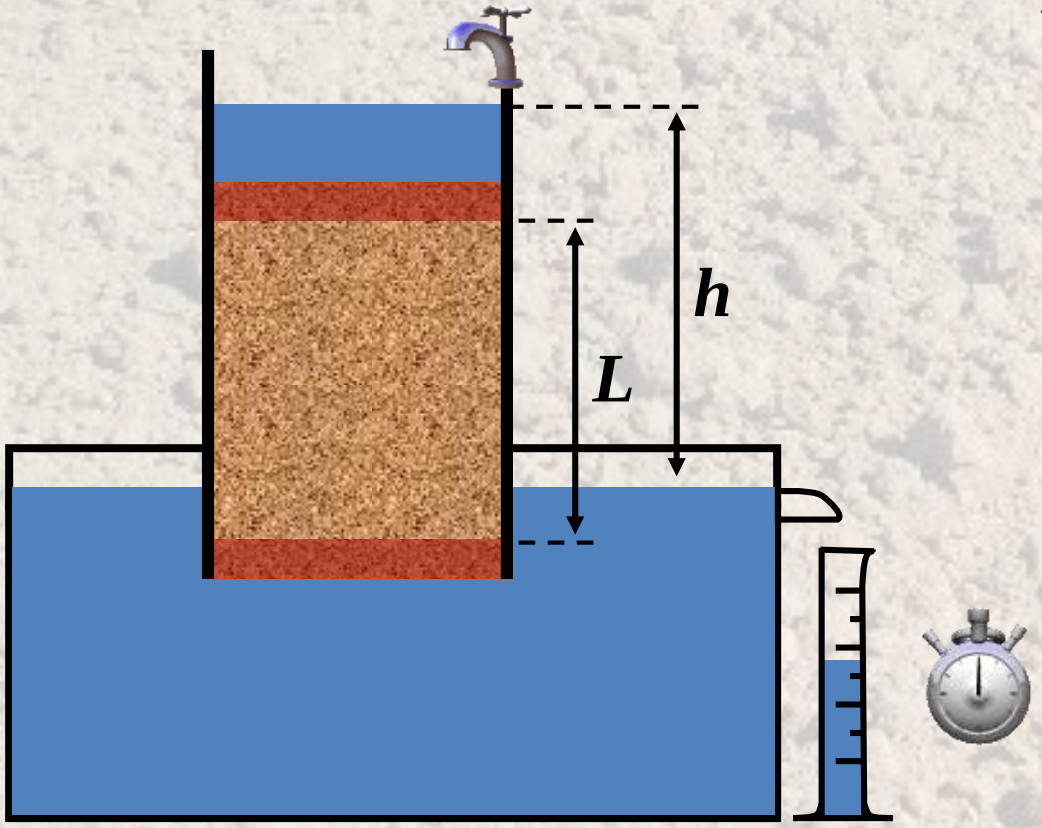
$$Q = k\, i\, A$$

$$v = k\, i$$

Ensaios de condutividade hidráulica: Carga constante



Ensaios de condutividade hidráulica: Carga constante



$$V = qt = Avt = A(ki)t$$

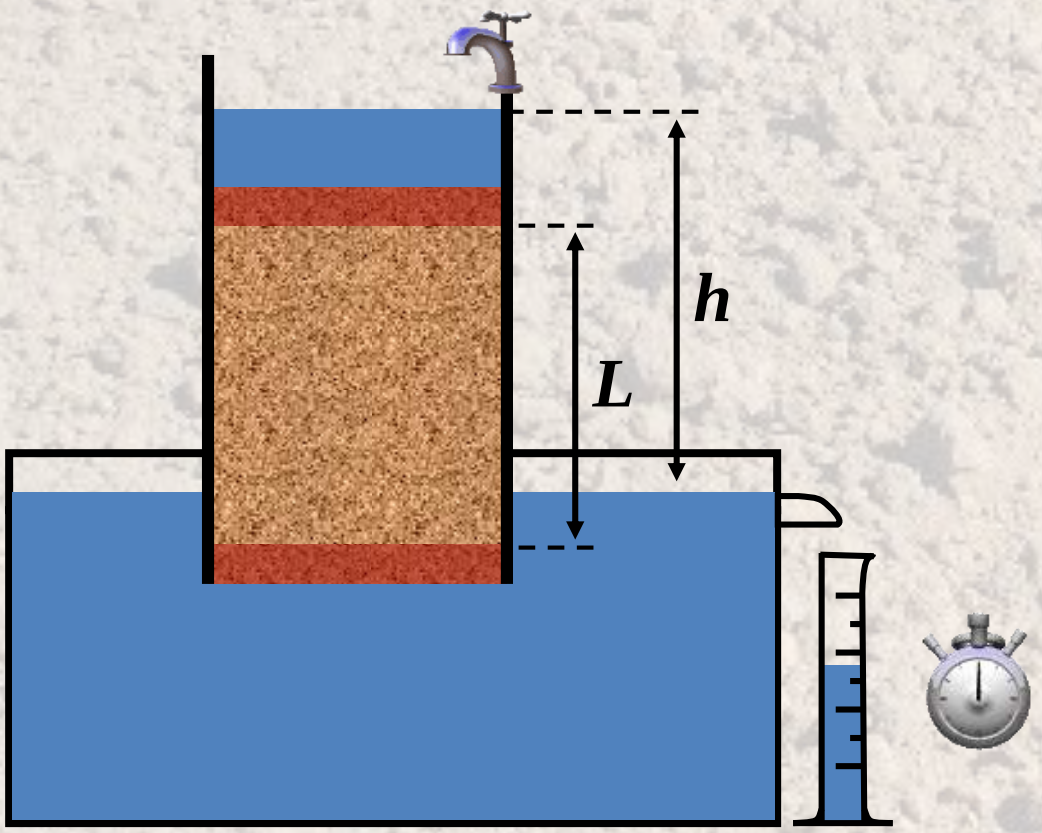
onde

V = volume de água coletado

A = área da seção transversal do elemento de solo

t = duração da coleta de água

Ensaios de condutividade hidráulica: Carga constante



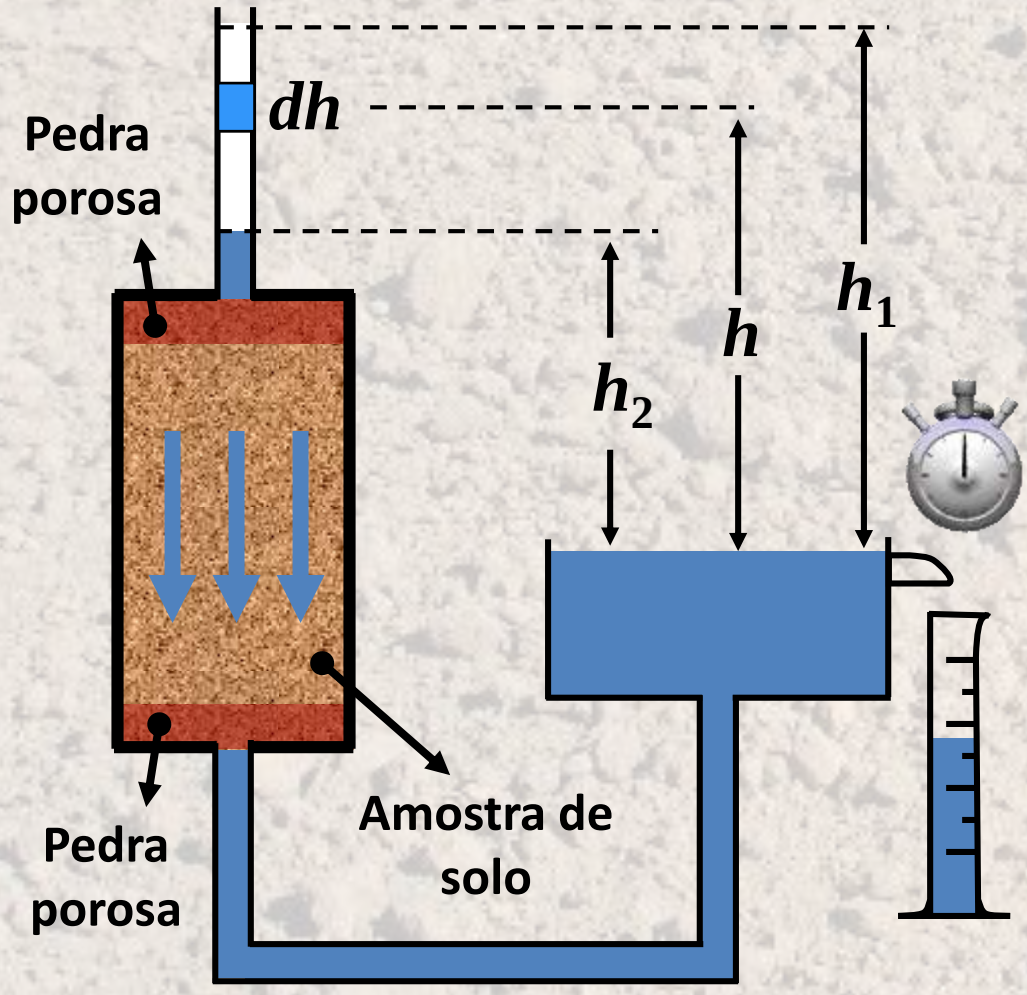
$$V = Avt = A(ki)t$$

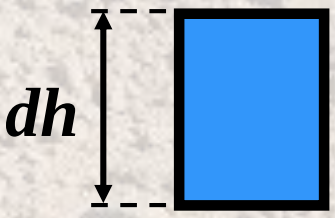
$$i = \frac{h}{L}$$

$$V = A\left(k\frac{h}{L}\right)t$$

$$k = \frac{VL}{Aht}$$

Ensaios de condutividade hidráulica: Carga variável





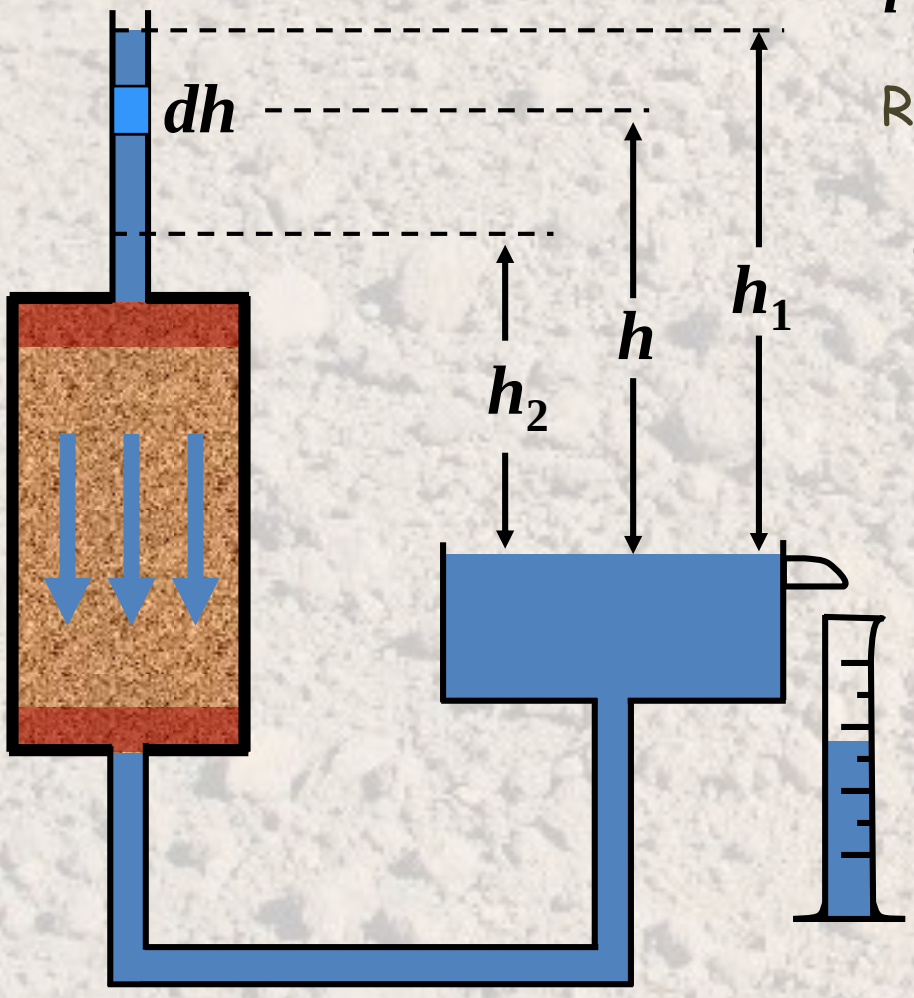
$$q = k\frac{h}{L}A = -a\frac{dh}{dt}$$

onde

q = vazão

a = área da seção transversal da bureta

Ensaios de condutividade hidráulica: Carga variável



$$q = k\frac{h}{L}A = -a\frac{dh}{dt}$$

Rearranjando e integrando:

$$dt = \frac{aL}{Ak}\left(-\frac{dh}{h}\right)$$

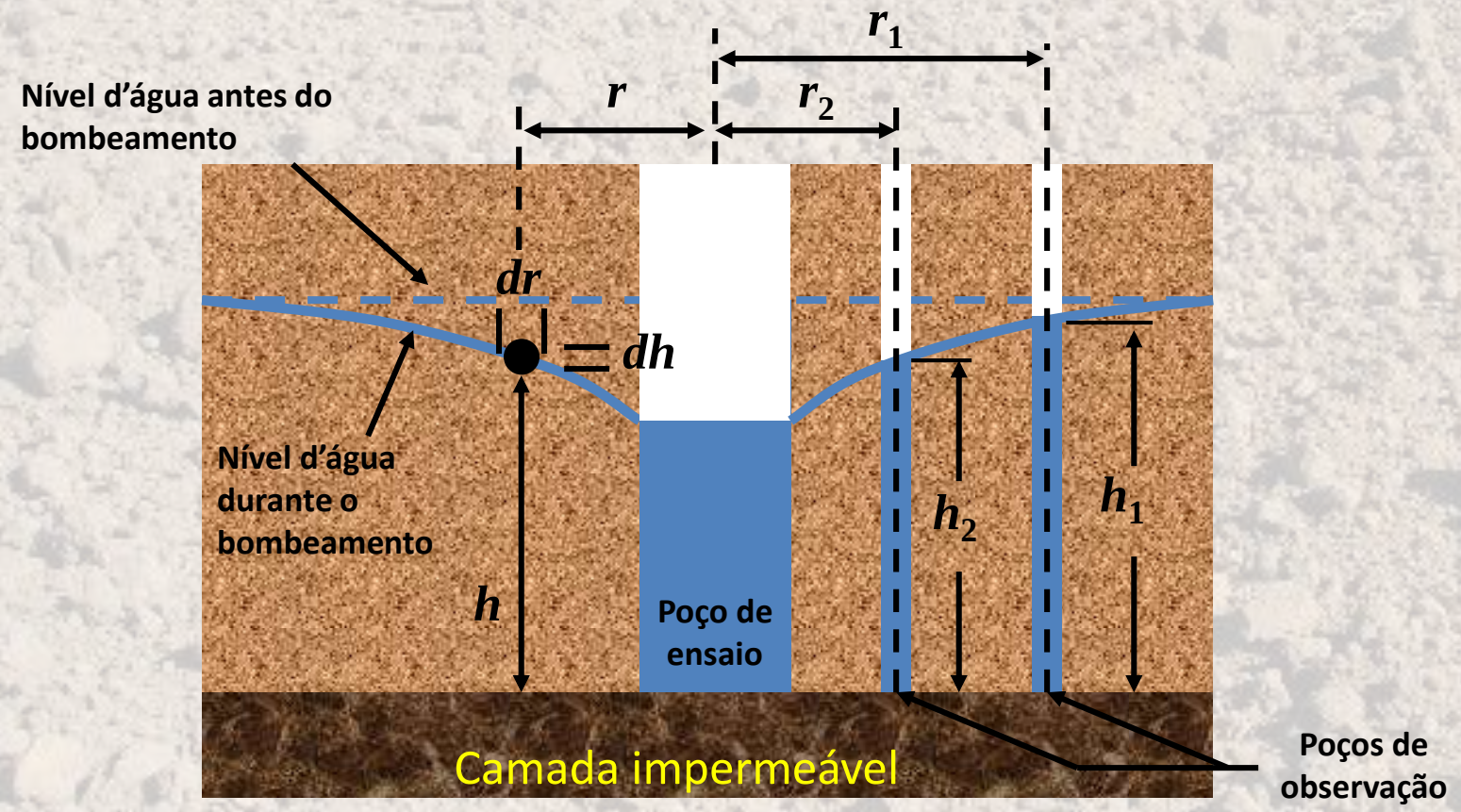
$$\int_{t_1}^{t_2} dt = -\frac{aL}{Ak}\int_{h1}^{h2}\frac{dh}{h}$$

$$t_2 - t_1 = \frac{aL}{Ak}\ln\frac{h_1}{h_2}$$

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)}\ln\frac{h_1}{h_2}$$

$$k = 2{,}3\frac{aL}{A(t_2 - t_1)}\log\frac{h_1}{h_2}$$

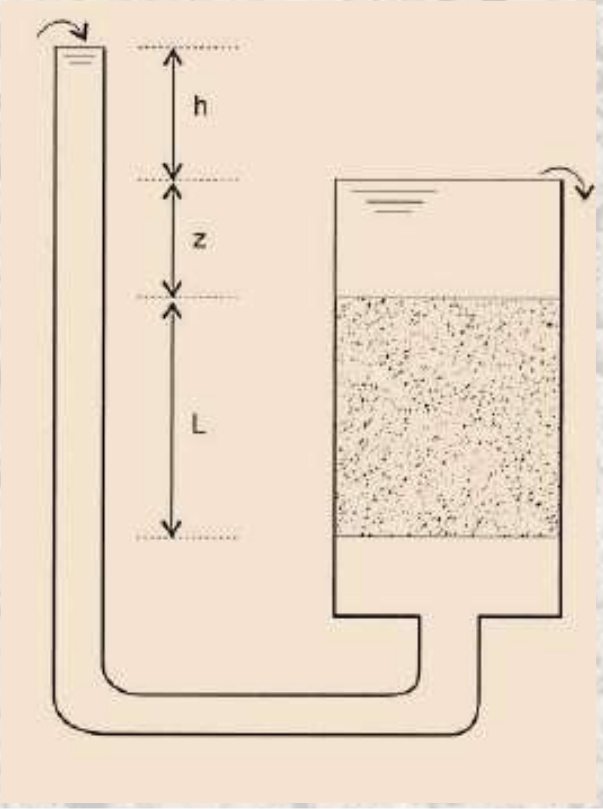
Ensaios de condutividade hidráulica *in situ* : Poço de bombeamento



16

Exemplo – Permeâmetro Carga Constante

- Calcule o coeficiente de permeabilidade considerando: h = 28cm, z = 24cm, L = 50cm, seção transversal igual a 530cm^2 e γ = 18kN/m^3. Mantendo a carga hidráulica constante, mediu-se um volume de 100cm^3 em 18s.



$$Q = k\,i\,A$$

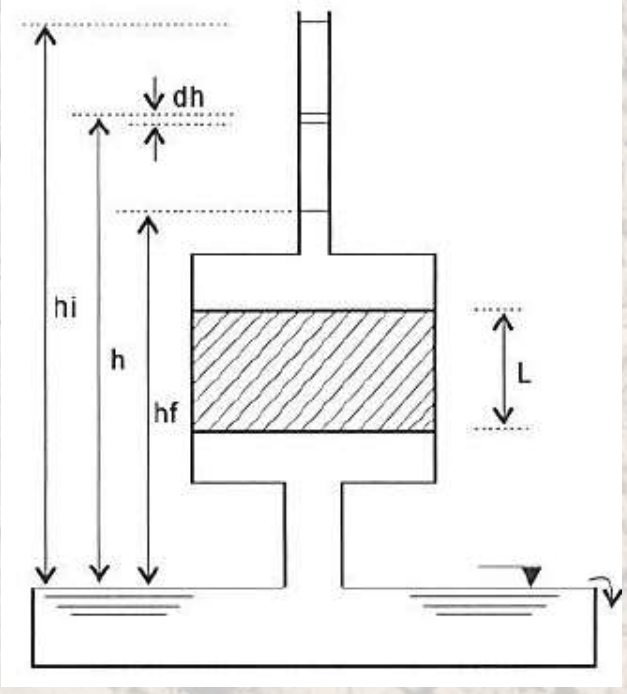
1. Vazão: Q = V/t = 100/18 = 5,5 cm^3/s

2. Gradiente: i = h/L = 28/50 = 0,56 cm/cm

3. Permeabilidade: k = Q/iA = 5,5/0,56x530 = 1,9 x 10^{-2} cm/s

Exemplo – Permeâmetro Carga Variável

Para inicio do ensaios com h = 65cm, acionou-se o cronômetro. Após 30s, mediou-se h' = 35cm. Sendo L = 20cm, área da seção transversal do corpo de prova igual a 77cm² e área da bureta igual a 1,2cm², calcule o coeficiente de permeabilidade. Tente, também, estimar o coeficiente de permeabilidade pela Lei de Darcy para carga constante.



$$k = 2{,}3\frac{aL}{A(t_2 - t_1)}\log\frac{h_1}{h_2}$$

1. Cálculo k: k = 2,3x1,2x20/(77x30) x log65/35 = 6,4 x 10^{-3} cm/s

2. Estimativa k: h inicial = 65 cm e h final = 35 cm – h médio = 50 cm

V = (65-35) x 1,2 = 36 cm³ e Q = 36/30 = 1,2 cm³/s

$$Q = k\,i\,A$$

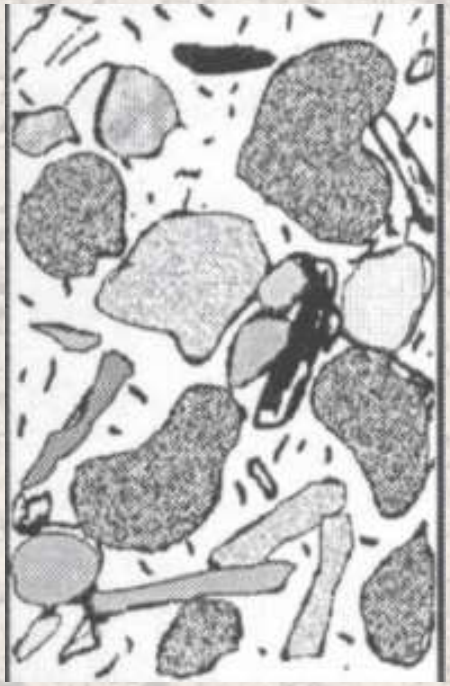
k = 1,2/2,5x77 = 6,2 x 10^{-3} cm/s

Valores do Coeficiente de Permeabilidade

10^{-8} 10^{-5} 10^{-2} m/s

argilas siltes areias pedregulhos

Finos ⟷ Grossos



Para solos granulares,

$k = f\,(\boldsymbol{e}$ ou $\boldsymbol{D_{10}})$

Valores do Coeficiente de Permeabilidade

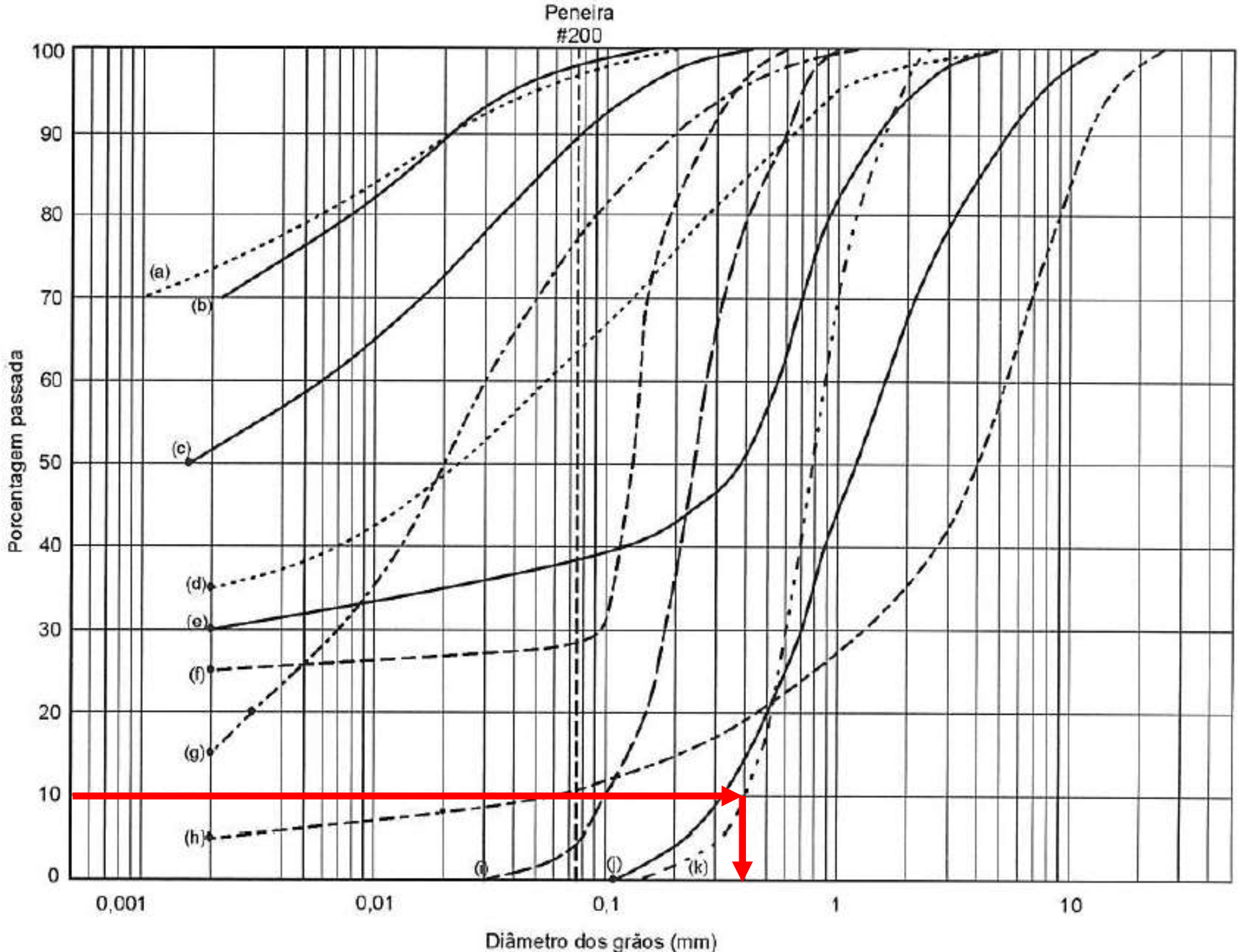
- Hazen (para areias uniformes ou mal graduadas):

$$k(cm/s) = cD_{10}^2$$

onde:

c = uma constante que varia entre 1.0 e 1.5

D_{10} = diâmetro efetivo (mm)


Peneira
#200
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Porcentagem passada
(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)
(i)
(j)
(k)
0,001
0,01
0,1
1
10
Diâmetro dos grãos (mm)

Valores do Coeficiente de Permeabilidade - Exemplo

- Estime o coeficiente de permeabilidade da areia k.
- d10 = 0,4 mm

$$k = 1{,}3x0{,}4^2 = 2{,}1x10^{-1} cm/s$$

EQUAÇÃO DE BERNOULLI

A energia (carga total) de um fluido incompressível, em regime de escoamento permanente, é constituída de três parcelas:

Piezométrica (pressão)

Cinética (velocidade)

Altimétrica (posição)

Equação de Bernoulli

- A carga total é dada por:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \cancel{\frac{v^2}{2g}} + z$$

h = carga total

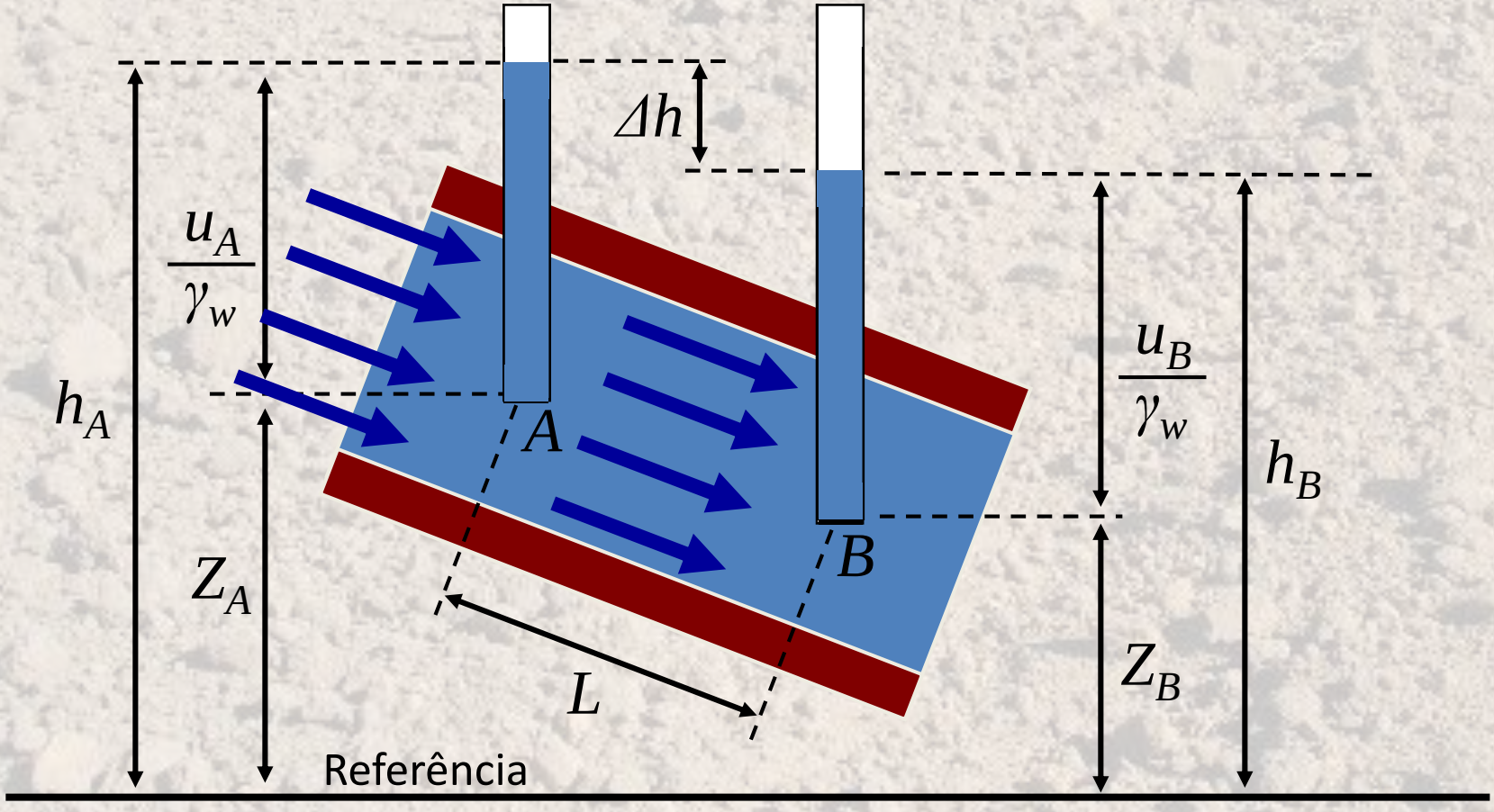
γ_w= peso específico da água

g = aceleração da gravidade

u = pressão

v= velocidade da água

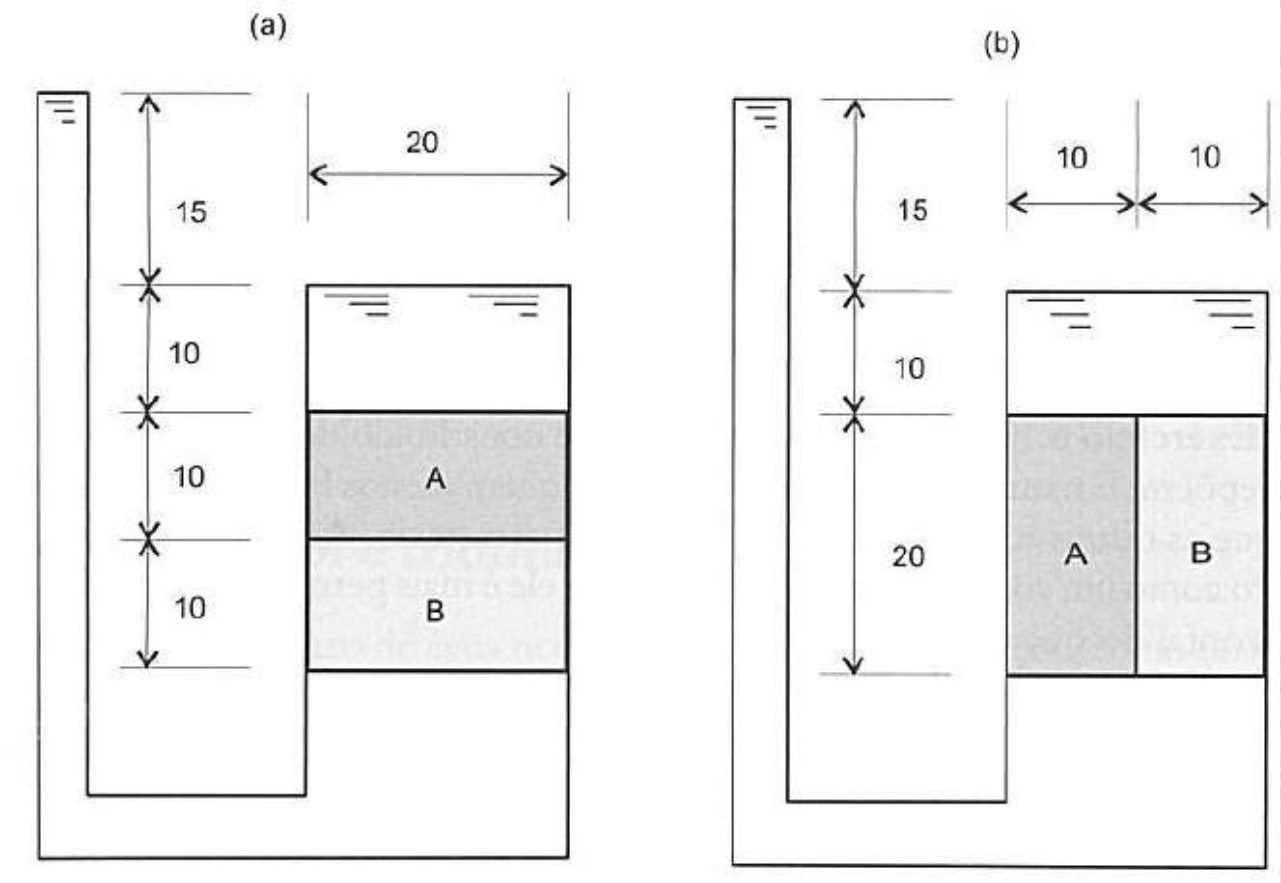
Equação de Bernoulli



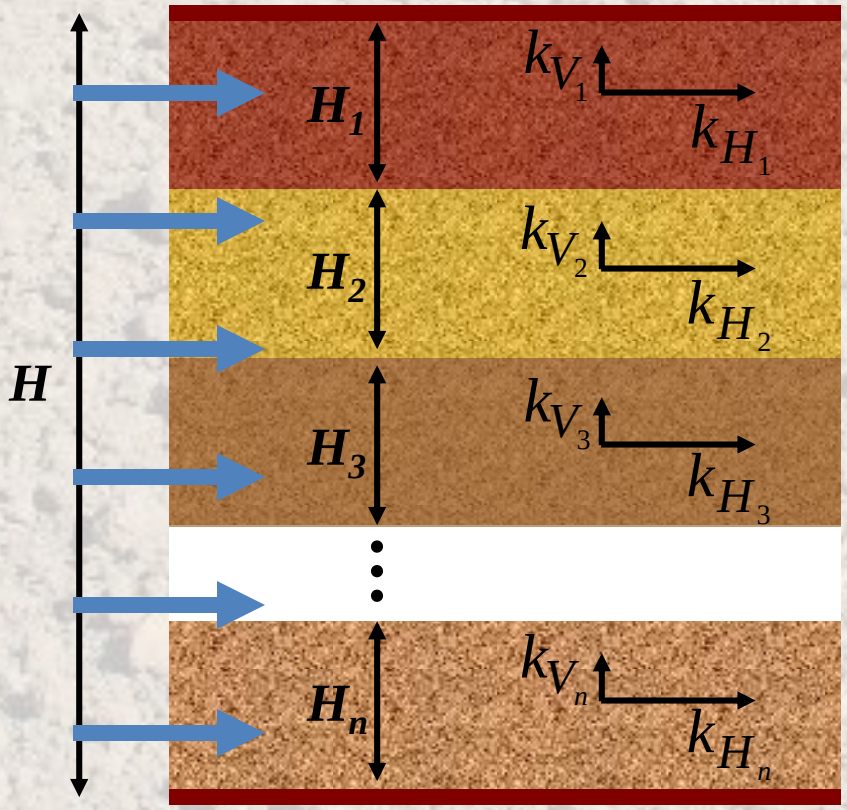
$$h_A = h_B + \Delta h$$

Condutividade hidráulica equivalente em solos estratificados – EXERCÍCIO 1

- As areias A e B foram ensaiadas em duas formas, conforme figura abaixo. Os coeficientes de permeabilidade são $k_A = 8x10^{-4}$m/s e $k_B = 3X10^{-3}$m/s. Determine qual disposição fornecerá maior vazão calculando as vazões em cada caso. Considere o permeâmetro quadrado com 20cm de lado



Condutividade hidráulica equivalente em solos estratificados



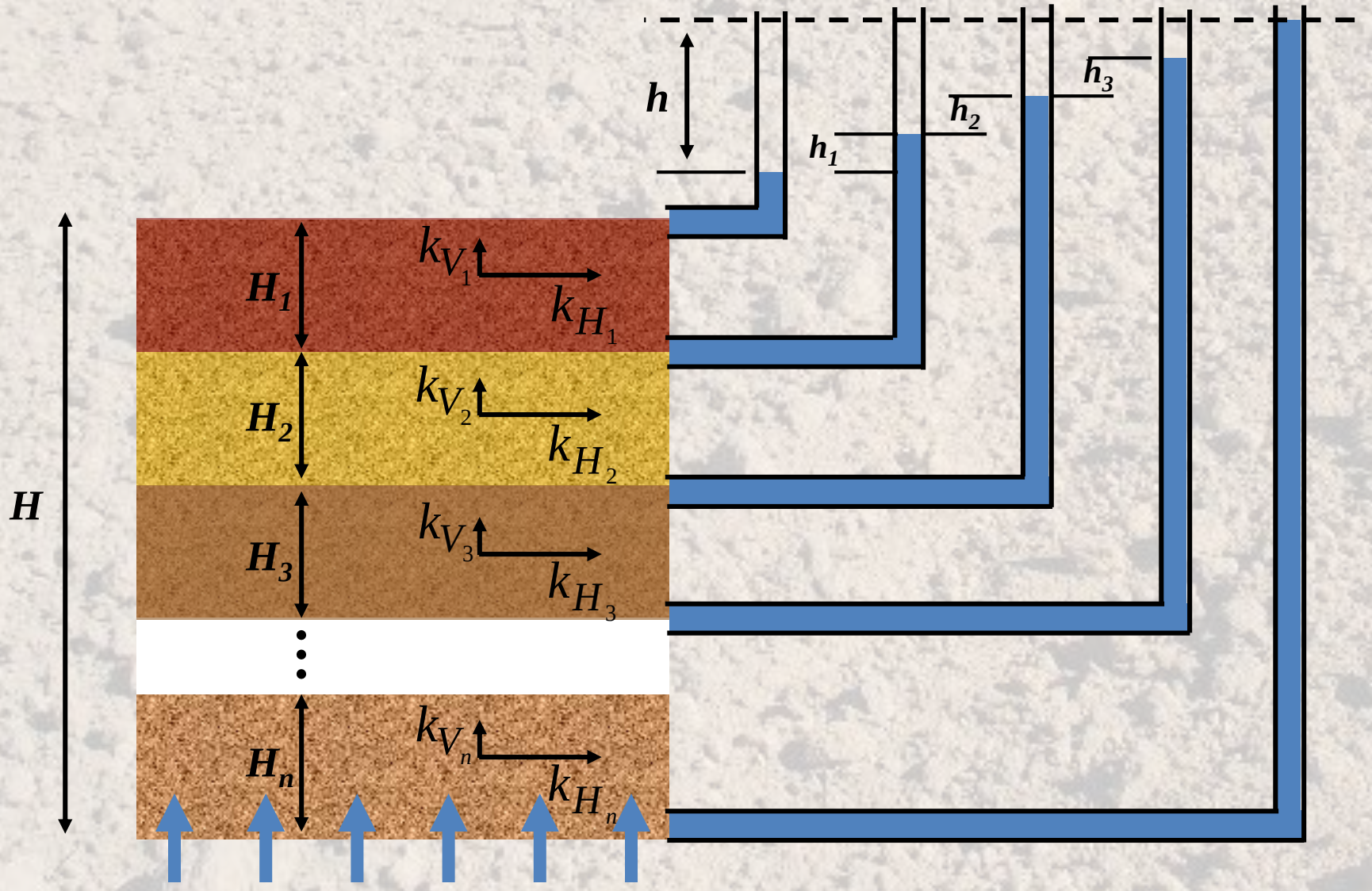
$$q = v.1.H = v_1.1.H_1 + v_2.1.H_2 + \ldots + v_n 1.H_n$$

onde:

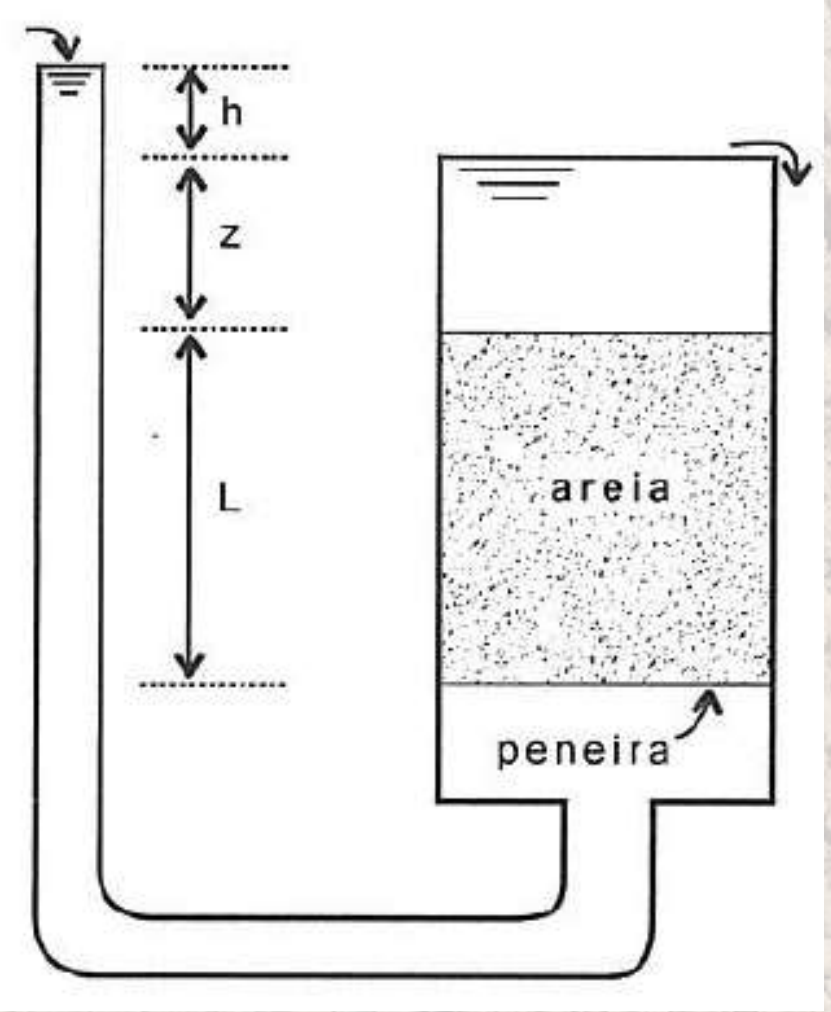
v = velocidade de descarga média

v_i = velocidade de descarga na $i^{ésima}$ camada

Condutividade hidráulica equivalente em solos estratificados



Força de Percolação



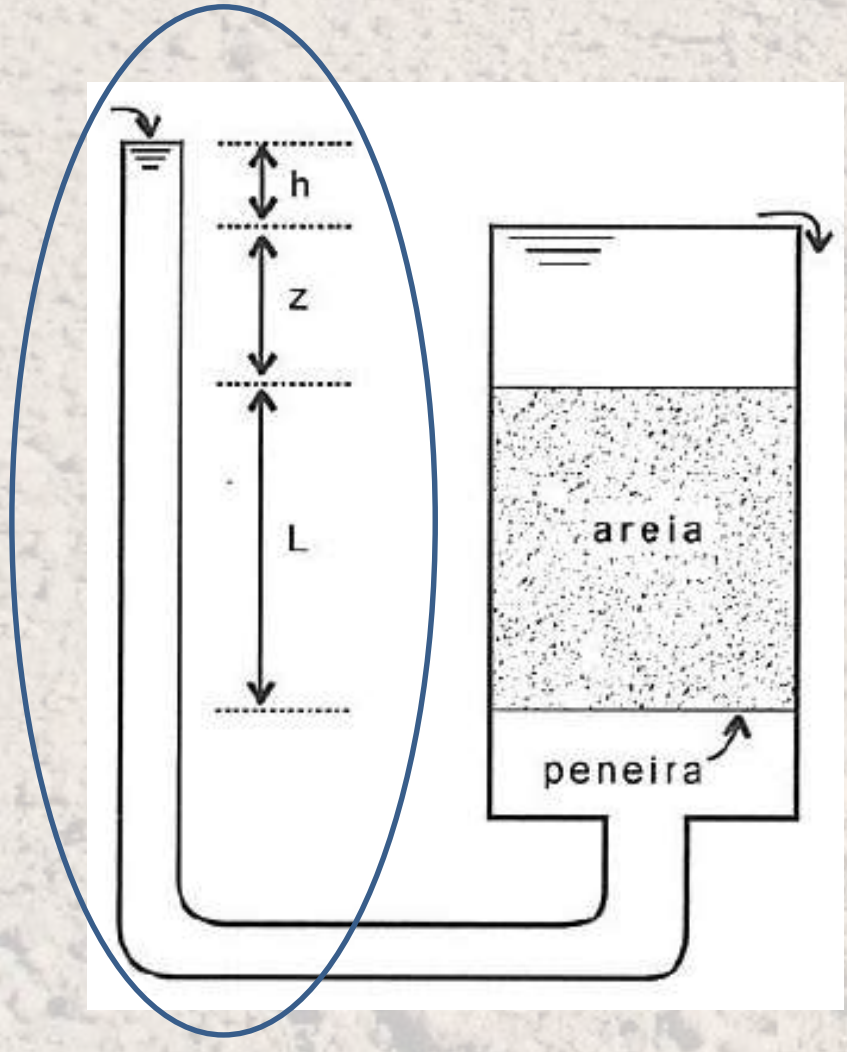
A carga h é dissipada por atrito provocando um arraste no solo no mesmo sentido do fluxo

$$F = h\gamma_w A$$

Como a força é dissipada uniformemente por todo o volume do solo, tem-se uma força por unidade de volume (força de percolação):

$$j = \frac{h\gamma_w A}{A \cdot L} = \frac{h}{L}\gamma_w = i\gamma_w$$

Força de Percolação – Fluxo Ascendente



$$\sigma' = \sigma - u$$

$$\bar{\sigma} = (z\gamma_w + L\gamma_n) - (z\gamma_w + L\gamma_w + h\gamma_w)$$

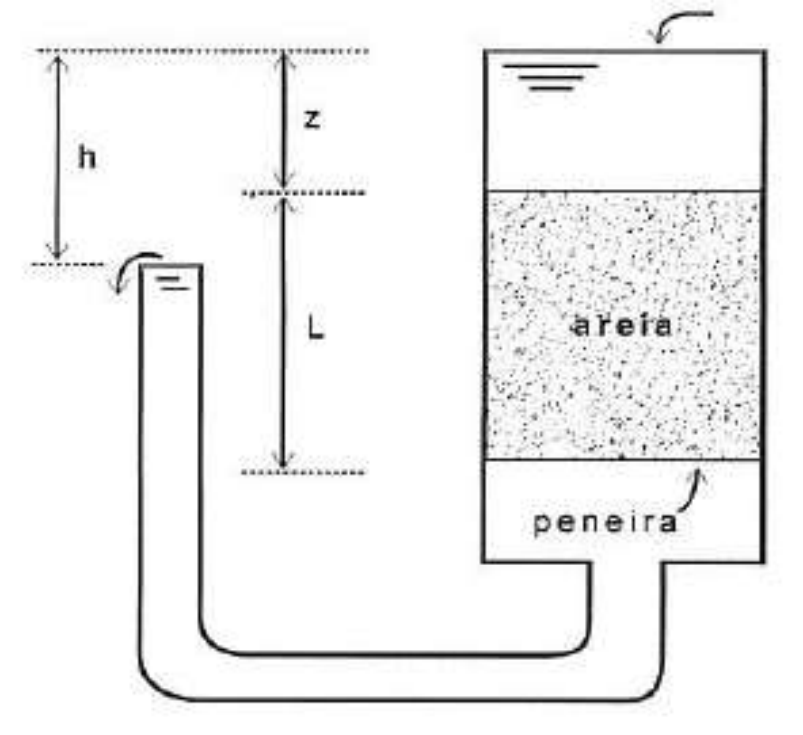
$$\bar{\sigma} = L(\gamma_n - \gamma_w) - h\gamma_w$$

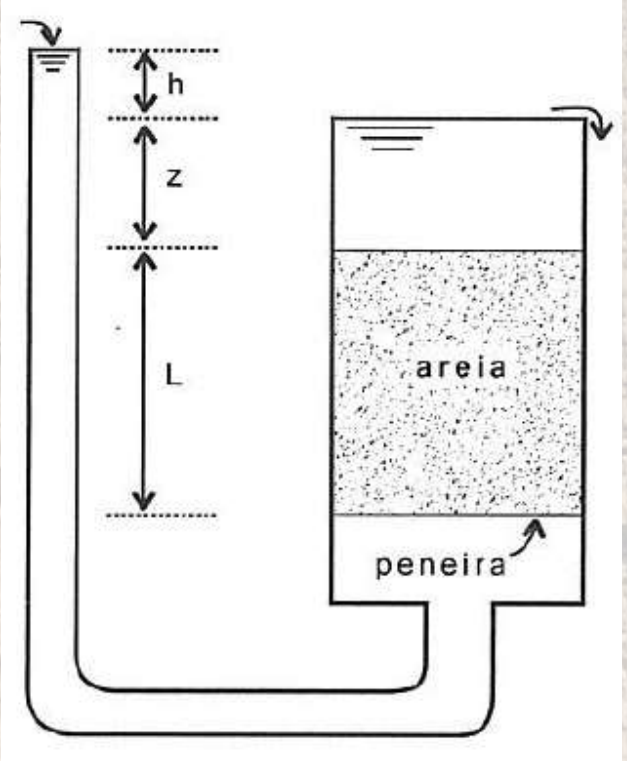
$$\bar{\sigma} = L(\gamma_n - \gamma_w) - \left(\frac{L\,h}{L}\right)\gamma_w$$

$$\bar{\sigma} = L\,\gamma_{sub} - L\,i\,\gamma_w$$

$$\bar{\sigma} = L(\gamma_{sub} - j)$$

Força de Percolação – Fluxo Descendente

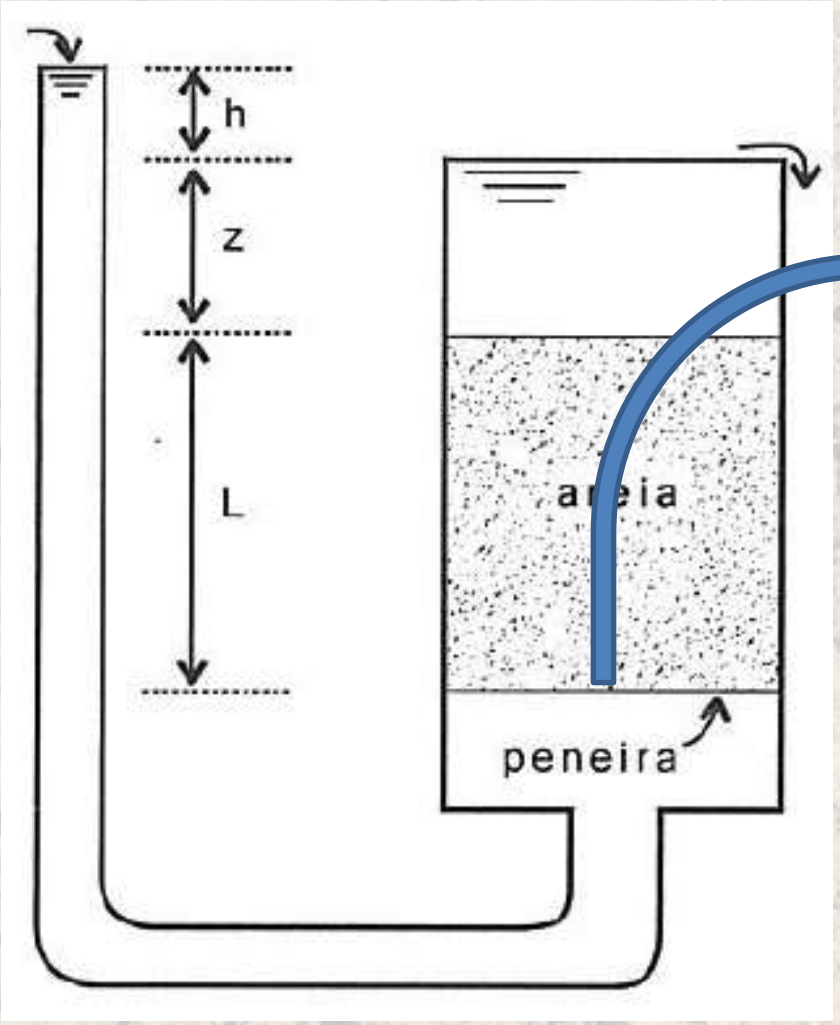




$$\bar{\sigma} = L\left(\gamma_{sub} + j\right)$$

$$\bar{\sigma} = L\left(\gamma_{sub} - j\right)$$

Força de Percolação – Gradiente Crítico



Tensão efetiva = 0?

AREIA MOVEDIÇA!

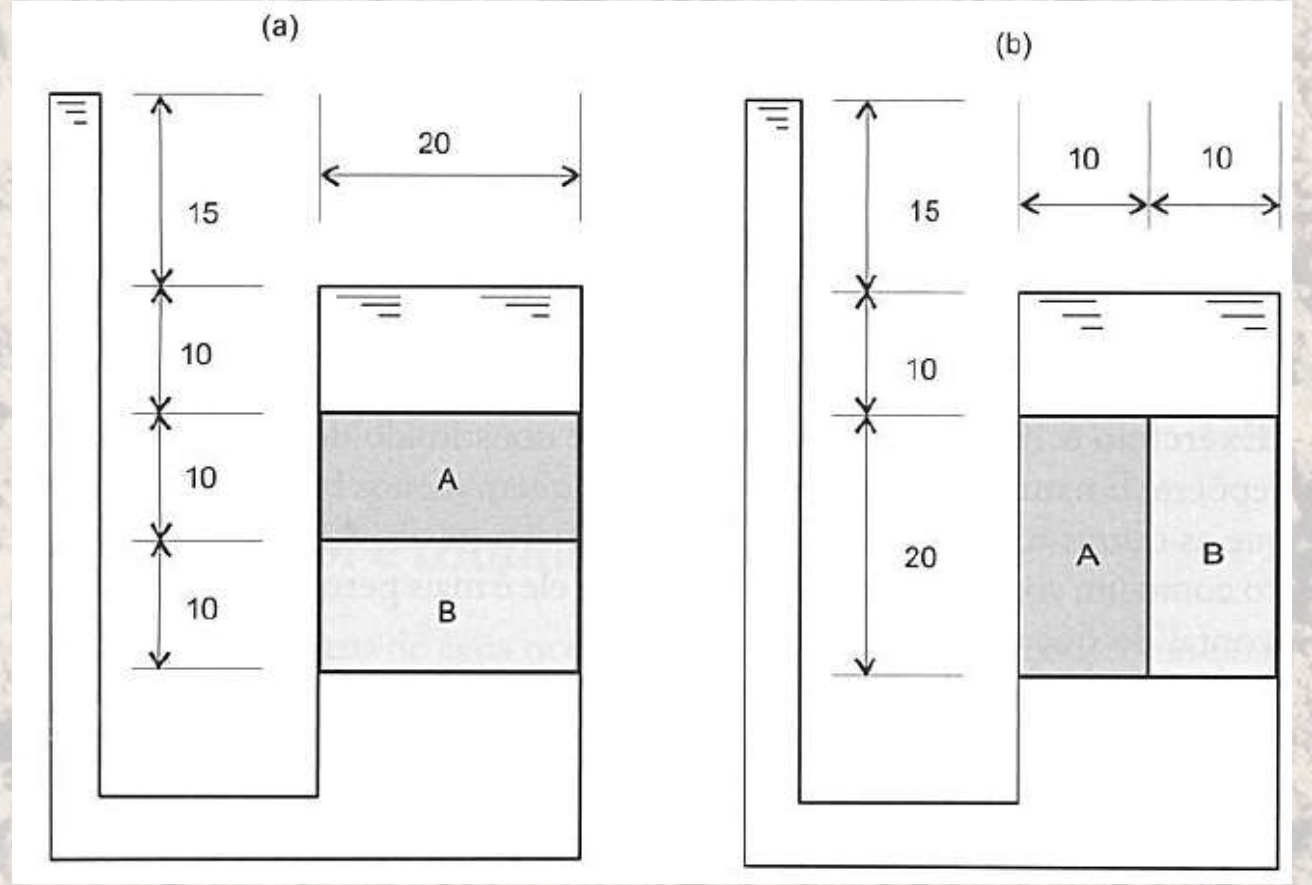
$$\bar{\sigma} = L\gamma_{sub} - L\ i\ \gamma_w = 0$$

$$\bar{\sigma} = L\ (\gamma_{sub} - i\ \gamma_w) = 0$$

$$i_{crit} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w}$$

Condutividade hidráulica equivalente em solos estratificados – EXERCÍCIO 2

- A) Em (a), sabendo que γ = 19 kN/m³ para ambas as areias, calcule a tensão efetiva no contato entre as areias A e B e no meio da camada da areia B.
- B) Em (b), calcule a tensão efetiva no meio da camada (meia altura) em ambas as areias.



Filtros de Proteção

- Reter um material
- Permitir a livre passagem de fluido

Filtros de Proteção

reção

Filtros de Proteção

Filtros de Proteção

Filtros de Proteção

Filtros de Proteção

Terzaghi

- Critério de permeabilidade

$$D_{15f} > 4 \text{ a } 5\ D_{15s}$$

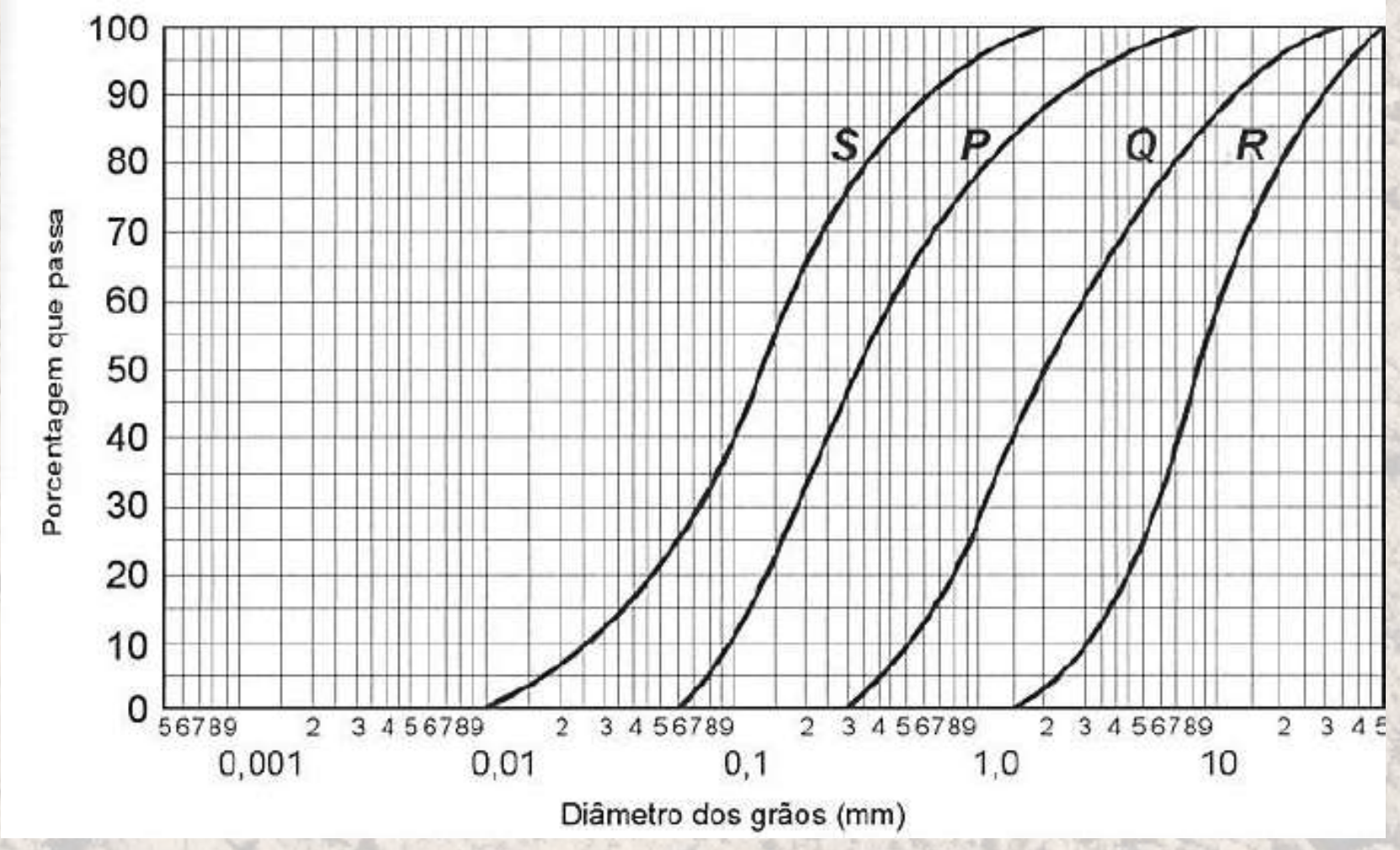
- Critério de retenção

$$D_{15f} < 4 \text{ a } 5\ D_{85s}$$

- Critério do paralelismo

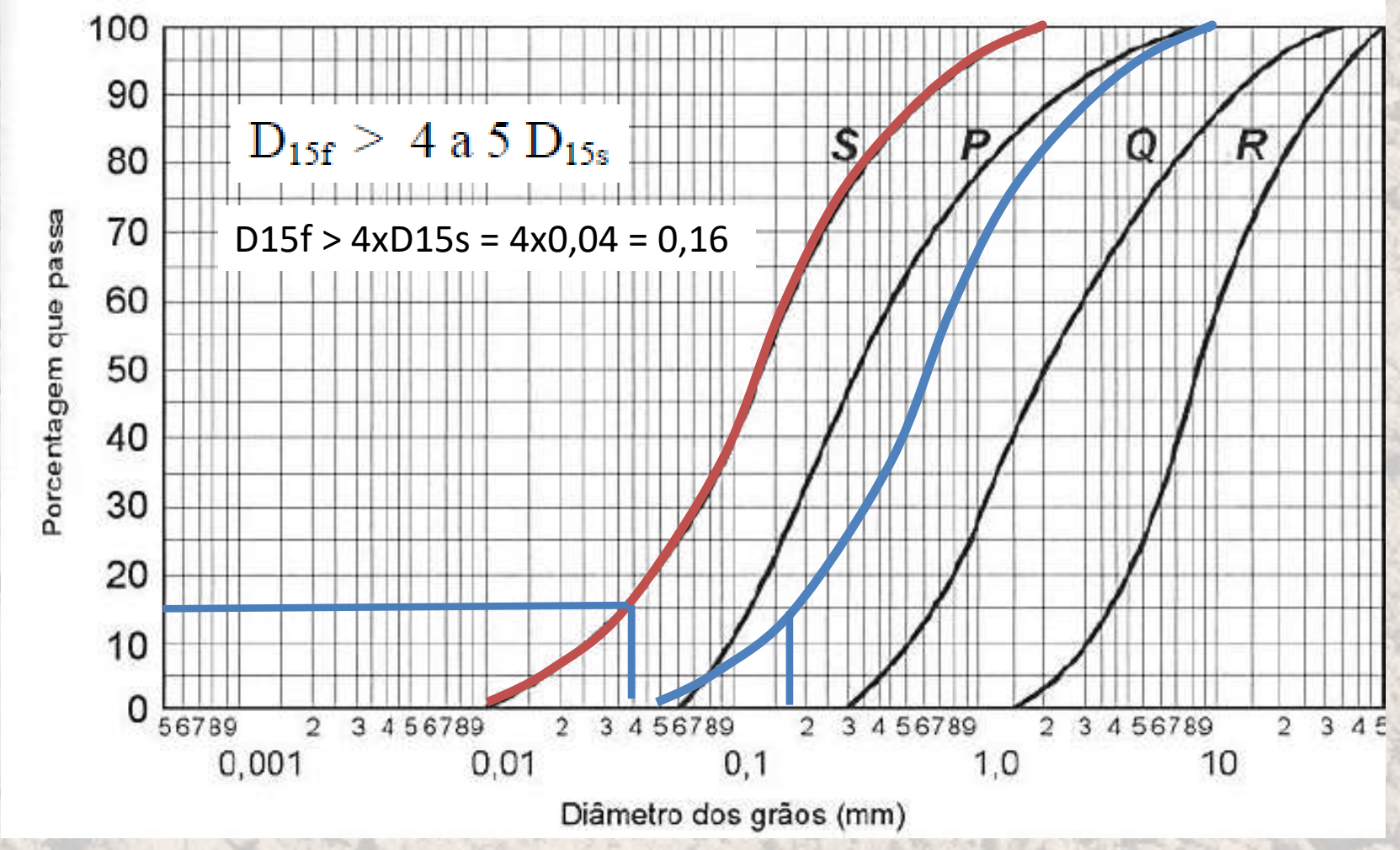
Filtros de Proteção - EXEMPLO

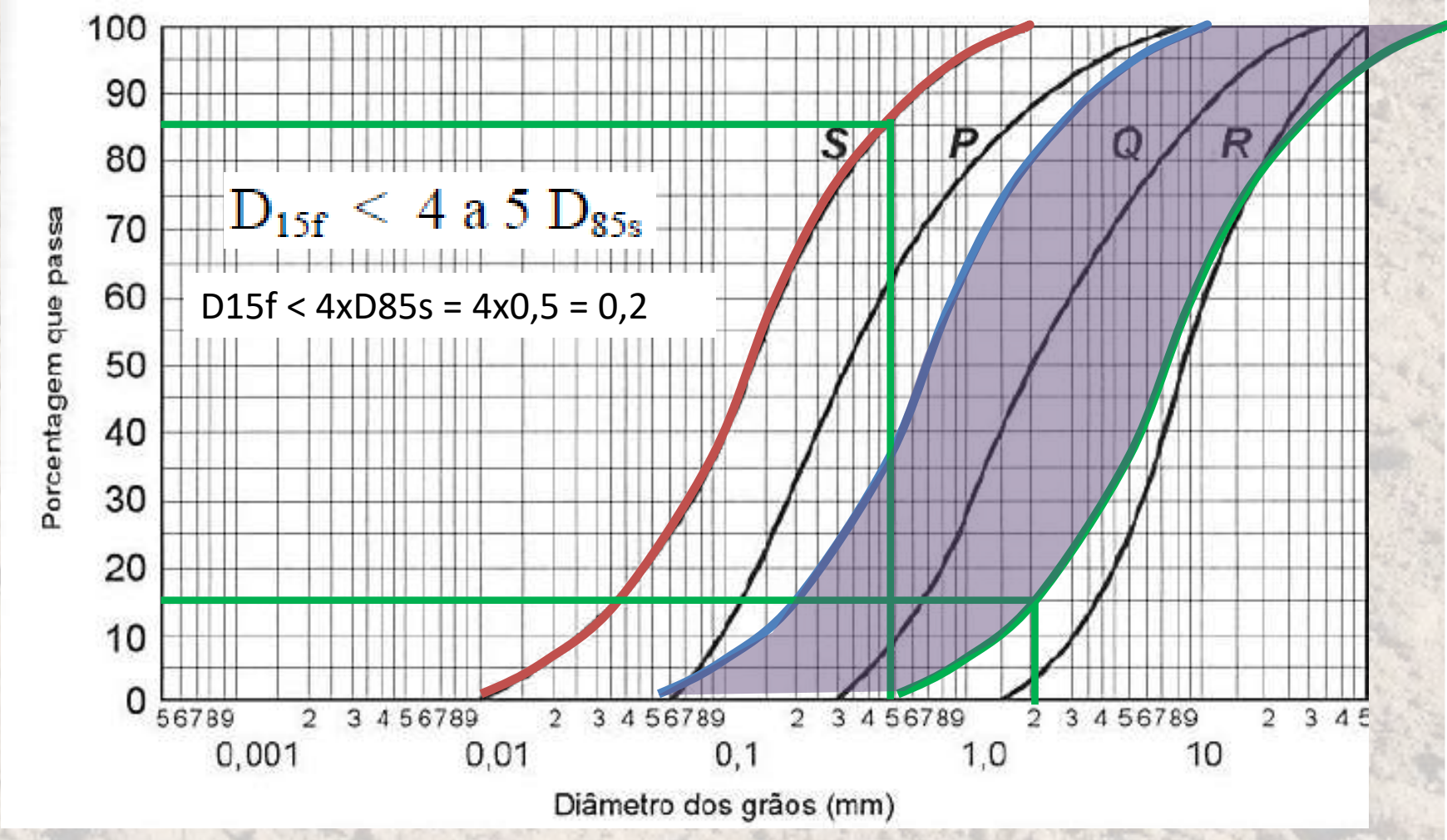
- Determinar qual dos materiais serviriam de filtro para o material S.



Filtros de Proteção - EXEMPLO

- Determinar qual dos materiais serviriam de filtro para o material S.



Filtros de Proteção - EXEMPLO

- Determinar qual dos materiais serviriam de filtro para o material S.