

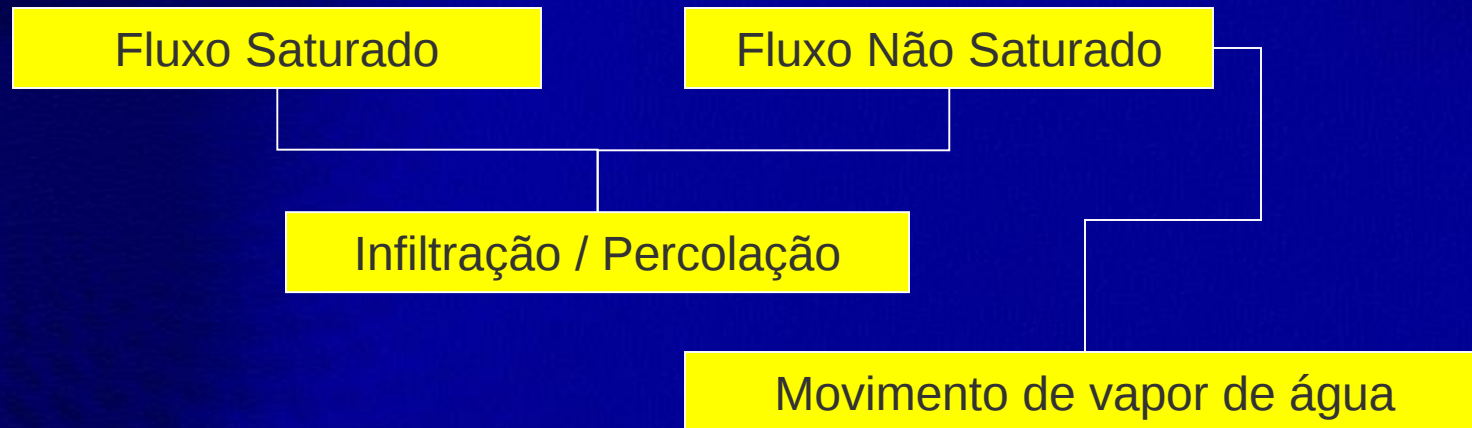
Fluxo Unidimensional

Ensaaios de Condutividade Hidráulica

Prof. Fernando A. M. Marinho

2019

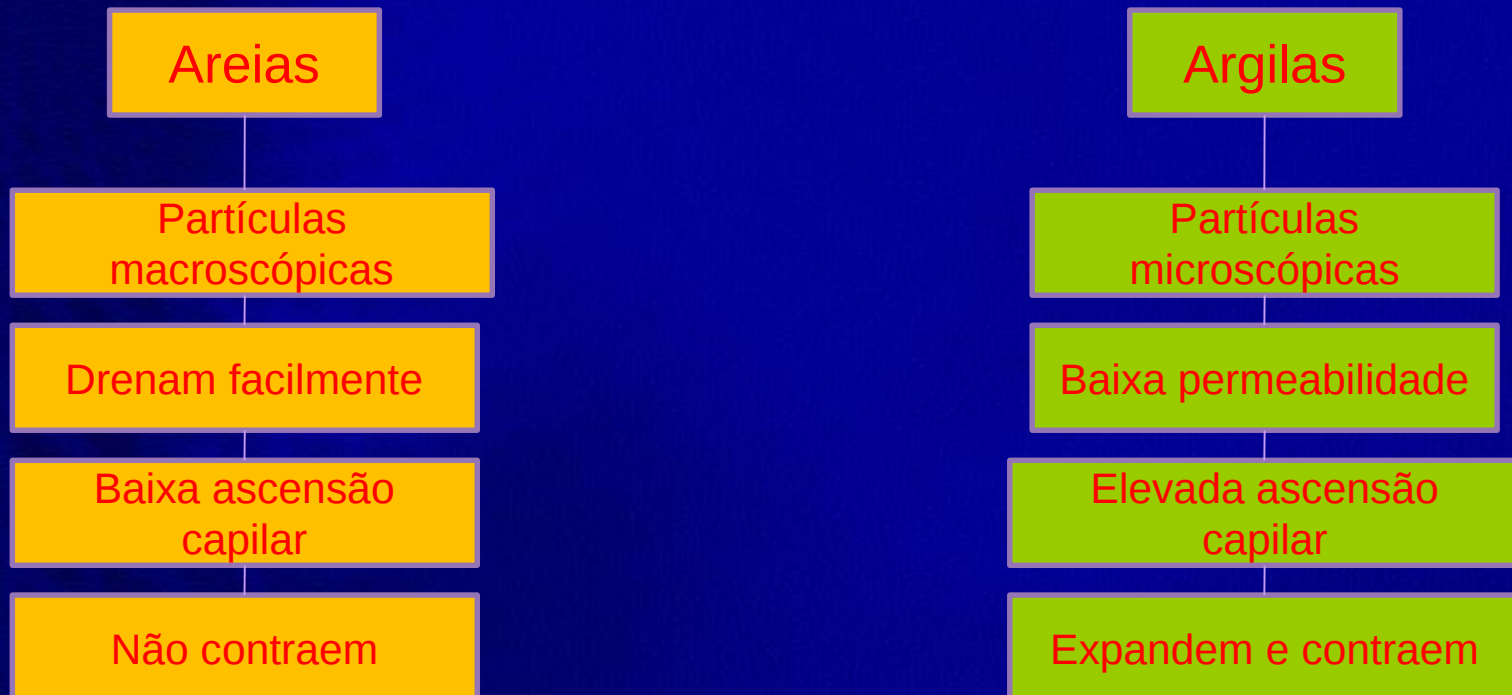
Movimento da água no solo



A Natureza da Estrutura dos Solos

Meio contínuo com “aberturas” interconectadas por onde o fluido passa.

Por simplicidade podemos dividir os solos em dois tipos:



Distribuição Granulométrica

Porosidade

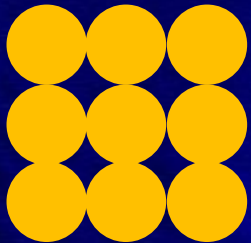
Índice de Vazios

$$n = \frac{V_v}{V}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Condutividade hidráulica

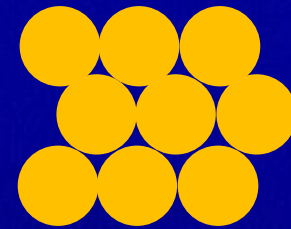
$$V_v = \frac{e}{1+e} V$$



$$n = 1 - \frac{\pi}{6} = 0.476$$

$$e = 0.322$$

$$V_v = 0.24 \text{ cm}^3 \text{ (} V = 1 \text{ cm}^3 \text{)}$$



$$n = 1 - \frac{\sqrt{2}}{6} \pi = 0.26$$

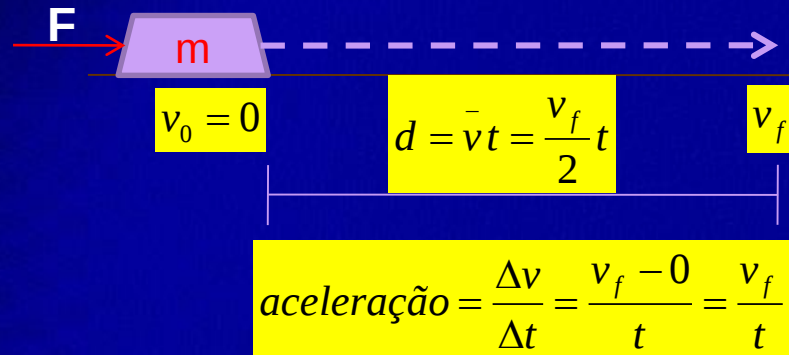
$$e = 0.206$$

$$V_v = 0.17 \text{ cm}^3 \text{ (} V = 1 \text{ cm}^3 \text{)}$$

Energia Cinética (Energia de movimento)

Como surge a energia cinética?

Do trabalho realizado no “objeto”



$$trabalho = Fd = mad = ma\bar{v}t = \frac{1}{2}mv_f^2 = \text{Energia Cinética}$$

Segunda Lei de Newton

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Todas as coisas que se movem possuem energia cinética. É a energia que um objeto possui devido ao seu movimento.

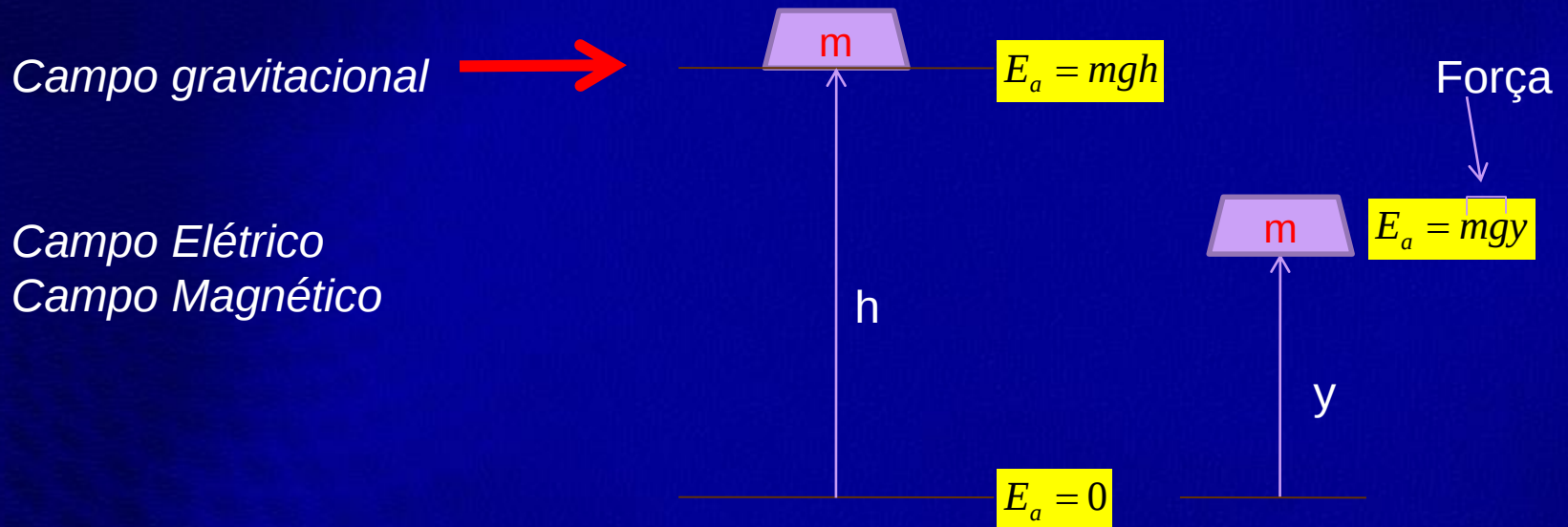
Energia Cinética de um Fluido em movimento é melhor expressa por unidade de volume

$$\frac{E_c}{V} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{V} = \frac{1}{2}\rho v^2$$

Energia Potencial (ou Altimétrica) (Energia armazenada)

Do que resulta a energia potencial?

Da posição ou configuração do “objeto”, que possui capacidade de realizar um trabalho



A energia potencial gravitacional EP é a energia que um objetivo de massa m possui em virtude de sua posição em relação à superfície da Terra. Essa posição é medida pela altura h do objetivo em relação a um nível zero arbitrário. É chamada de potencial porque possui o potencial de ser convertida em outras formas de energia (e.g. cinética).

Energia Potencial de um Fluido em movimento é melhor expressa por unidade de volume

$$\frac{E_c}{V} = \frac{mgh}{V} = \rho gh$$

Energia de Pressão

Do que é a energia de pressão?

É a força por unidade de volume do fluido.

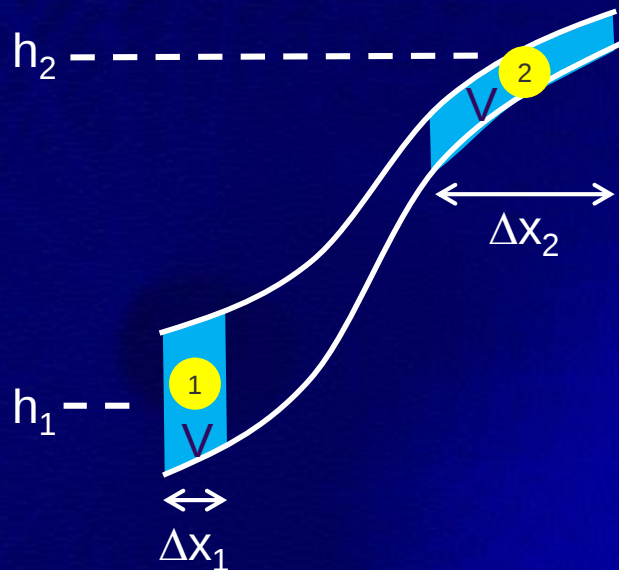
Pressão hidrostática

$$E_p = \frac{\text{Força}}{\text{Área}} = \frac{F}{A} = \frac{Fd}{Ad} = \frac{\text{Energia}}{\text{Volume}}$$

Pressão Osmótica

A pressão em um fluido pode ser considerada como uma medida de energia por unidade de volume

Considere a água movendo-se da região 1 para a região 2 (mesmo volume)



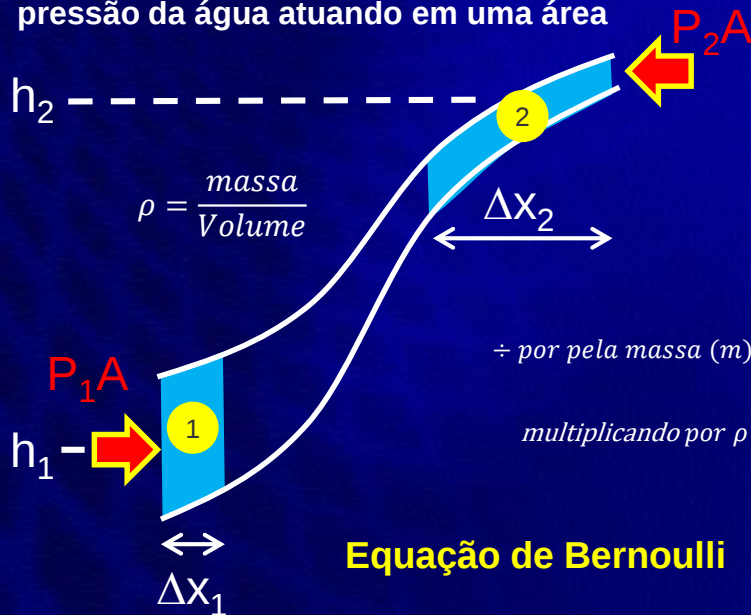
O trabalho realizado para ir de 1 para 2 vale:

$$W_{1 \rightarrow 2} = \left(\frac{1}{2} m v_2^2 + m g h_2 \right) - \left(\frac{1}{2} m v_1^2 + m g h_1 \right)$$

O trabalho é: $W = Fd$

Pressão é: $P = \frac{F}{A} \Rightarrow F = PA$

Existe uma força em 1 e 2 que é a pressão da água atuando em uma área



$$W = Fd = (P_1 A \Delta x_1 - P_2 A \Delta x_2) = (P_1 V - P_2 V)$$

$$W = (P_1 V - P_2 V) = \frac{1}{2} m v_2^2 + m g h_2 - \frac{1}{2} m v_1^2 + m g h_1$$

÷ por pela massa (m)

$$W = \left(P_1 \frac{V}{m} - P_2 \frac{V}{m} \right) = \frac{1}{2} v_2^2 + g h_2 - \frac{1}{2} v_1^2 + g h_1$$

multiplicando por ρ

$$W = \left(\frac{P_1}{\rho} - \frac{P_2}{\rho} \right) = \frac{1}{2} v_2^2 + g h_2 - \frac{1}{2} v_1^2 + g h_1$$

Equação de Bernoulli

$$W = \left(P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 \right) = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Equação de Bernoulli

- Energia é sempre conservada

Energia por unidade de volume antes = Energia por unidade de volume depois

$$\frac{E_{p1}}{V} + \frac{E_{c1}}{V} + \frac{E_{a1}}{V} = \frac{E_{p2}}{V} + \frac{E_{c2}}{V} + \frac{E_{a2}}{V}$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Energia de pressão

Energia de Cinética
por unidade de
volume

Energia Potencial
por unidade de
volume

- ✓ O fluido possui densidade constante.
- ✓ O regime do fluxo está estabelecido
- ✓ Não existe atrito



Daniel Bernoulli

Equação de Bernoulli

Fluido:

- Incompressível (densidade constante)
- Em regime permanente
- Sem atrito
- Em fluxo laminar

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

$\div \rho g$ para obter em altura de coluna do fluido

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = cte = h_T$$

Para levar em conta a perda de energia devida a resistência viscosa nos poros a equação fica:

$$\frac{P_A}{\gamma_w} + \frac{v_A^2}{2g} + z_A = \frac{P_B}{\gamma_w} + \frac{v_B^2}{2g} + z_B + \Delta h$$

Perda de carga total

Uma velocidade de 0.1 m/s implica em uma carga cinética de 0,5mm

$$0.1m / s \Rightarrow 0.0005m = 0.05cm$$

Areia
 $K = 10^{-2} \text{ m/s}$

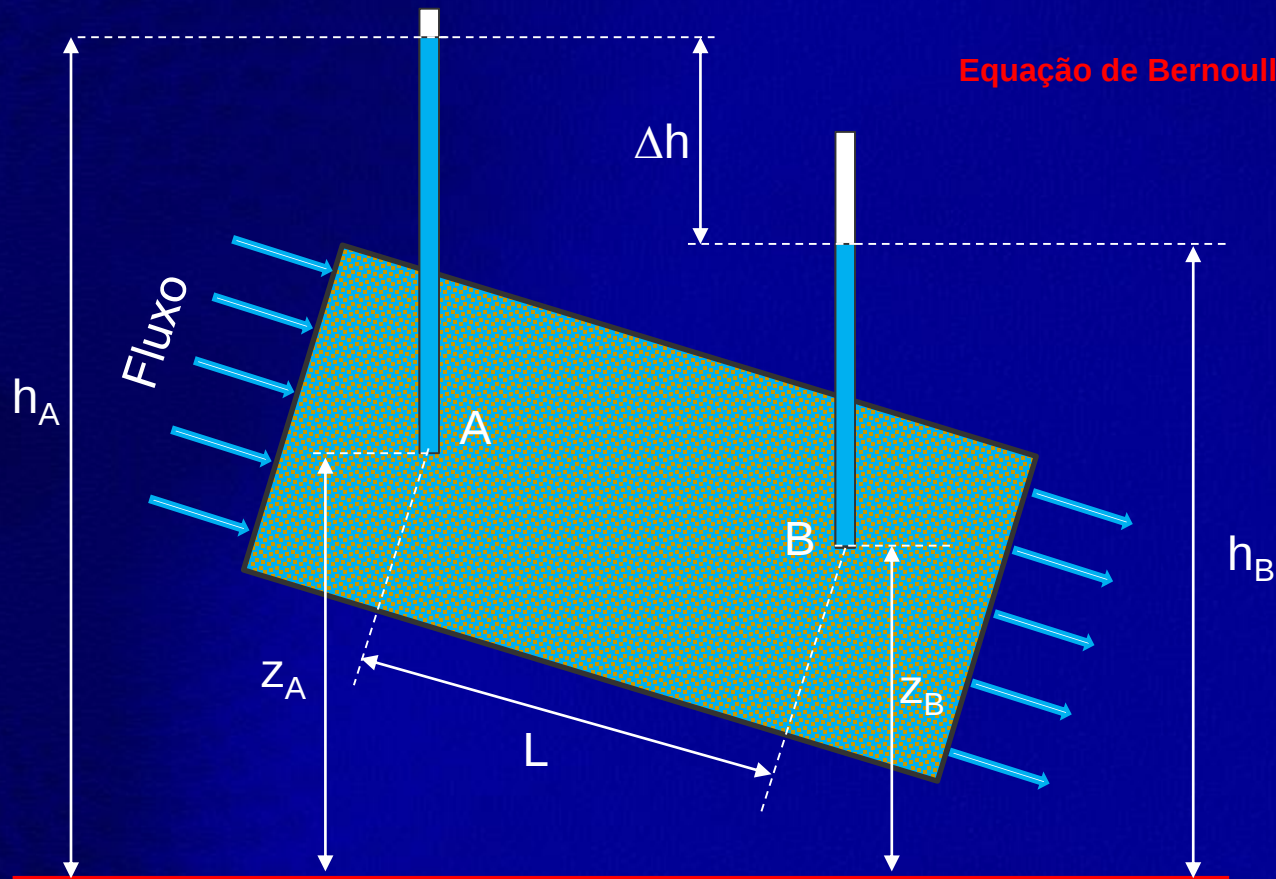
$$\frac{P_A}{\gamma_w} + \cancel{\frac{v_A^2}{2g}} + z_A = \frac{P_B}{\gamma_w} + \cancel{\frac{v_B^2}{2g}} + z_B + \Delta h$$

Logo:

$$\frac{P_A}{\gamma_w} + z_A = \frac{P_B}{\gamma_w} + z_B + \Delta h$$

A carga Total em qualquer ponto vale:

$$h_T = \frac{P}{\gamma_w} + z$$



Equação de Bernoulli em solos

Carga Total em A

$$h_A = \frac{u_A}{\gamma_w} + z_A$$

Carga Total em B

$$h_B = \frac{u_B}{\gamma_w} + z_B$$

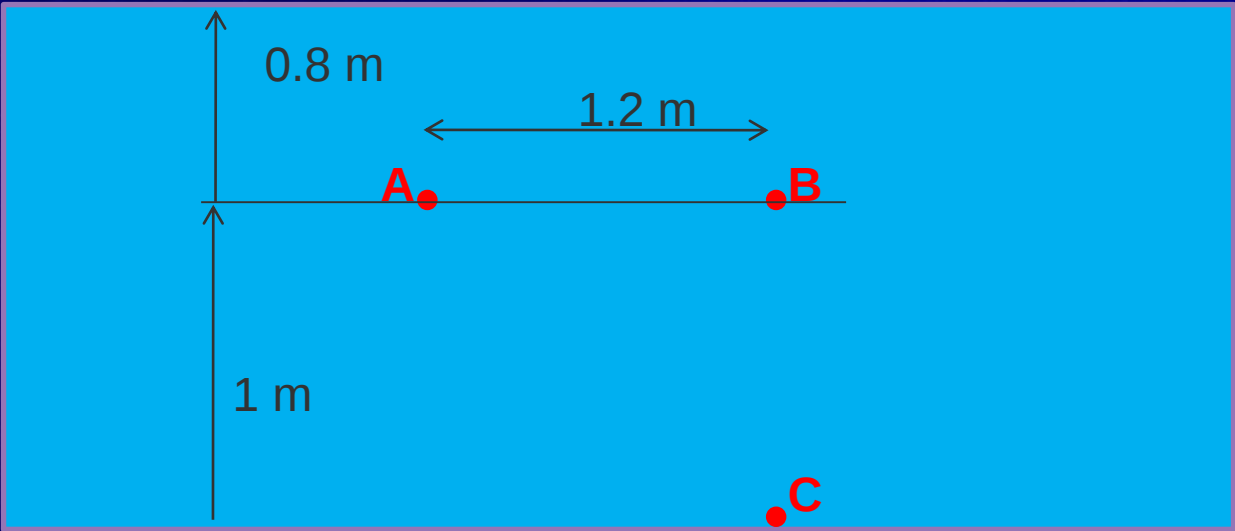
Perda de carga de A para B

$$\Delta h = h_A - h_B$$

Gradiente hidráulico

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

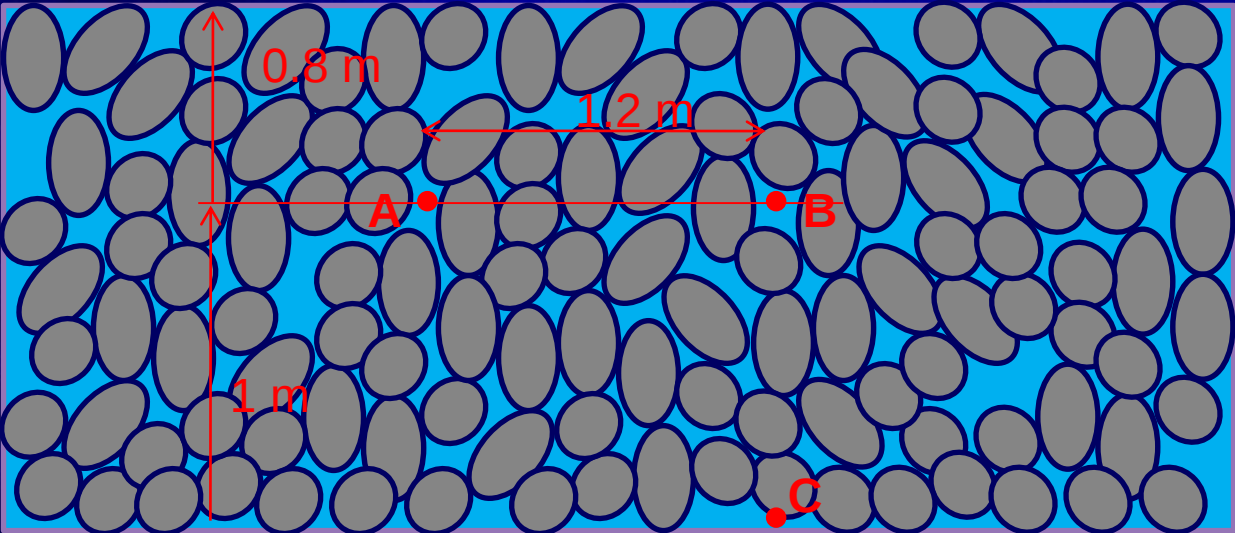
Determinar as cargas hidráulicas no pontos indicados



$$h_{TA} = h_{PA} + h_{AA}$$
$$h_{TA} = 0.8 + 1 = 1.8m$$

$$h_{TB} = h_{PB} + h_{AB}$$
$$h_{TB} = 0.8 + 1 = 1.8m$$

$$h_{TC} = h_{PC} + h_{AC}$$
$$h_{TC} = 1.8 + 0 = 1.8m$$



Determinar as cargas hidráulicas no pontos indicados

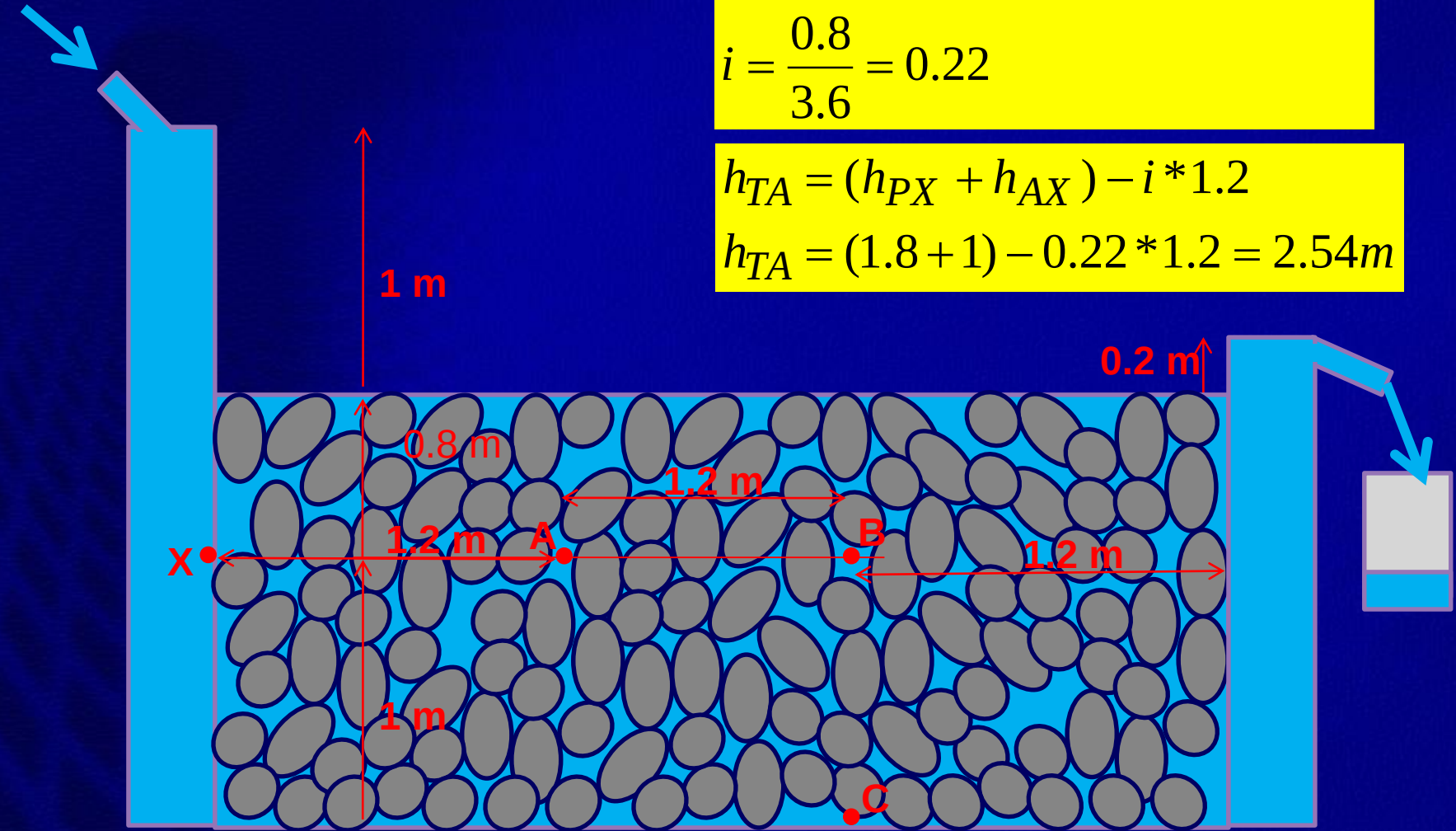
$\Delta h = 0.8m$

gradiente de perda de carga = $\frac{\Delta h}{L}$

$i = \frac{0.8}{3.6} = 0.22$

$h_{TA} = (h_{PX} + h_{AX}) - i * 1.2$

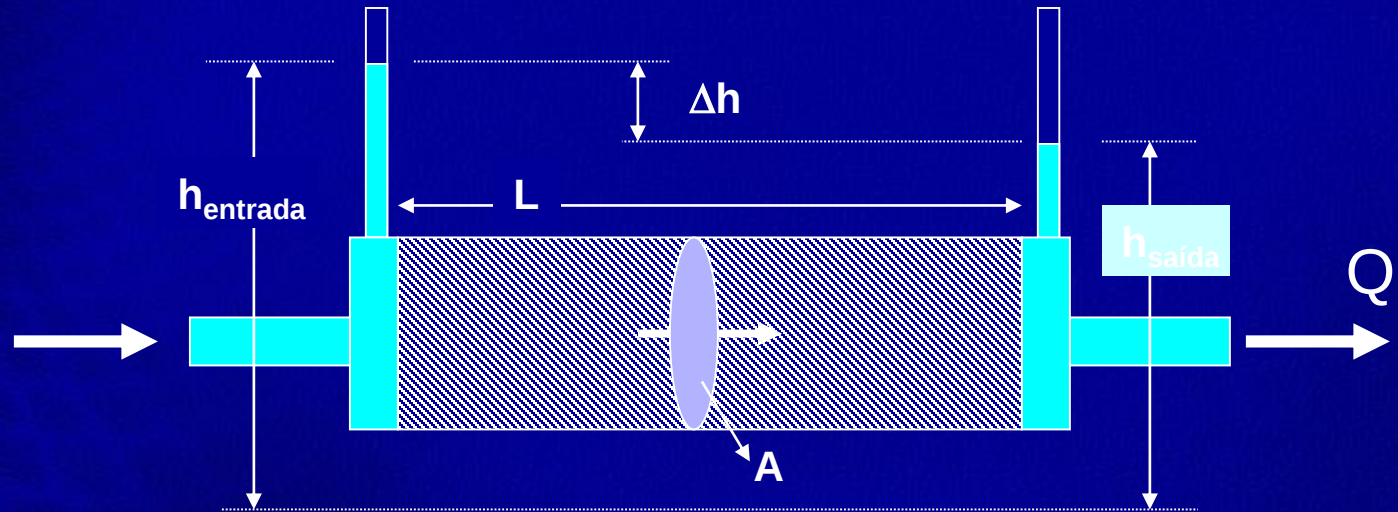
$h_{TA} = (1.8 + 1) - 0.22 * 1.2 = 2.54m$





Henry Darcy (1803 to 1858)

Na tentativa de melhorar o sistema de purificação de água do sistema de abastecimento de água de Dijon, na França em 1856, Henry Darcy, estabeleceu a relação que governa o fluxo de água em meios porosos saturados.



$$Q \approx \frac{(h_{\text{entrada}} - h_{\text{saída}})}{L} A$$

Lei de Darcy

Q - vazão

K – condutividade hidráulica

A - Área do permeâmetro

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

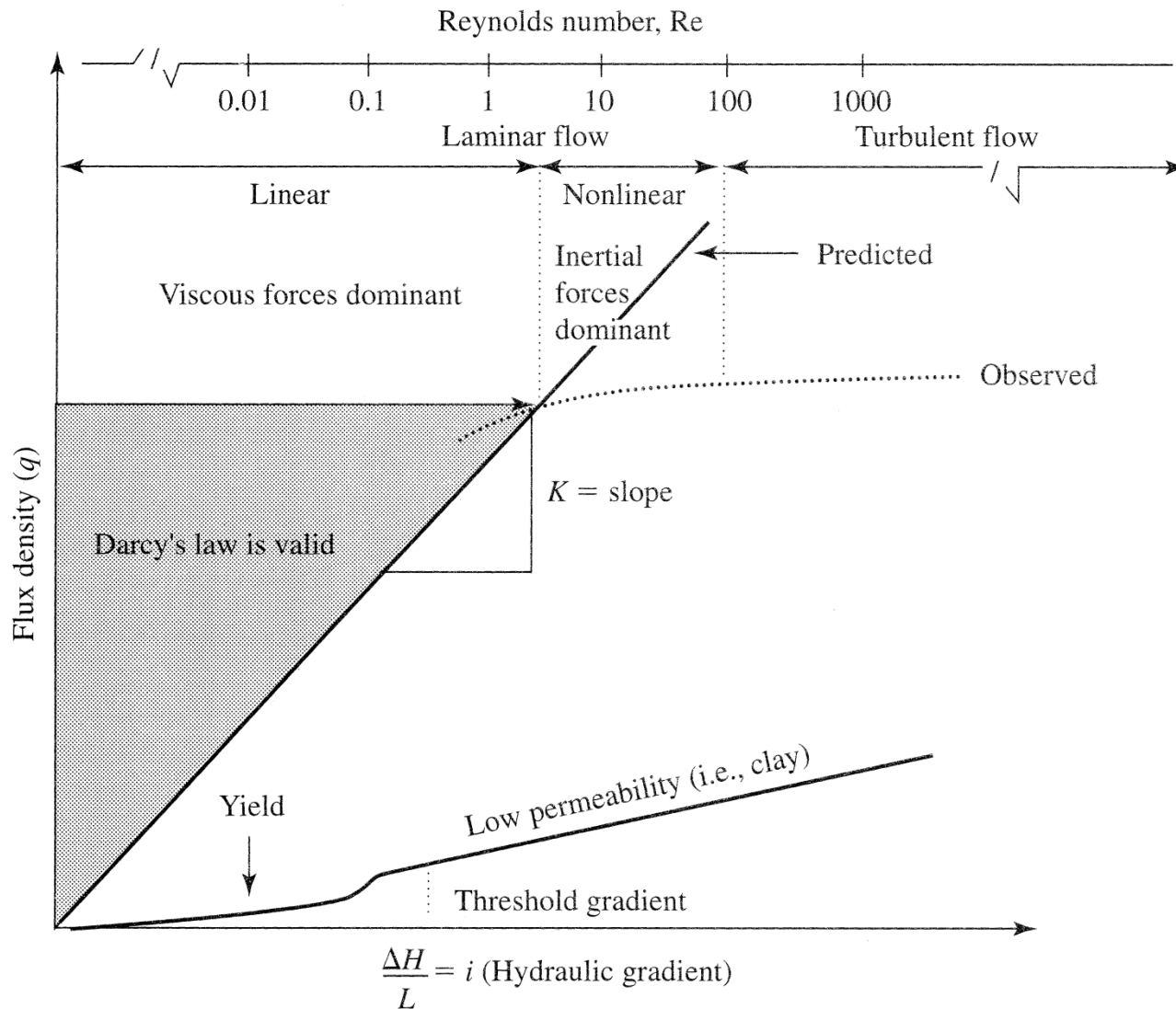
$$\frac{h}{L} = i \Rightarrow \text{gradiente hidráulico}$$

$$\frac{Q}{A} = \text{velocidade}$$

$$v = Ki$$

Se $i=1$, k indica a velocidade de percolação da água

Classificação Esquemática de Fluxo em Solos



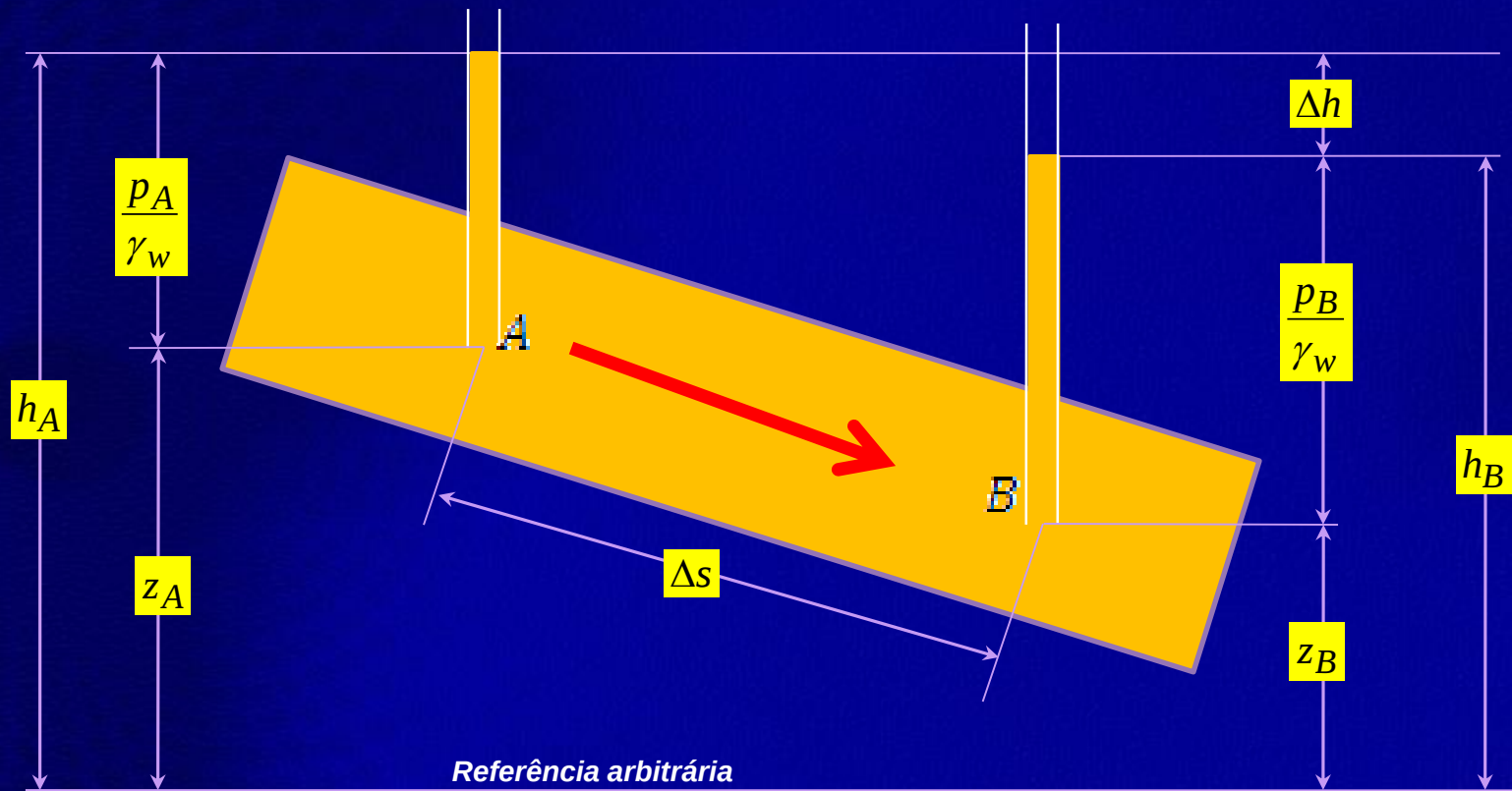
$$R = \frac{vD\rho}{\mu}$$

v – velocidade

ρ – densidade do fluido

μ – coeficiente de viscosidade

D – diâmetro médio das partículas



$$i = - \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta h}{\Delta s} = - \frac{\Delta h}{\Delta s} \rightarrow \text{Gradiente hidráulico}$$

Lembrando que a carga de velocidade (energia cinética) é muito pequena em fluxo em meios porosos, assim:

$$\frac{p_A}{\gamma_w} + z_A = \frac{p_B}{\gamma_w} + z_B + \Delta h$$

A carga total vale:

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

Permeabilidade e Condutividade Hidráulica

$$K = k_i \frac{\rho_w g}{\mu_w}$$

Permeabilidade Intrínseca (m^2)
Estrutural apenas, independe do fluido

Condutividade hidráulica (m/s)

21°C

ρ_w – densidade da água ($998.08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)

μ_w – viscosidade da água ($0.000979 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$)

g – aceleração da gravidade ($9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$)

Métodos Indiretos para Determinação de K

Hazem (1911)

$$K \text{ ou } k(?) = CD_{10}^2$$

- Areia limpa em estado fofo
- C varia de 50 a 1000
- Usualmente se usa 100

Valores de C encontrados na literatura

- 41 to 146: Taylor ~1948, p. 112,
- 100 to 150: Leonards -1962, p. 119,
- 100 to 1000: Mansur and Kaufman -1962, p. 260–261,
- 100 to 150: Terzaghi and Peck -1964, p. 44,
- 90 to 120: Cederghren -1967, p. 42,
- 1 to 42: Lambe and Whitman -1969, p. 290,
- 40 to 120: Holtz and Kovacs -1981, pp. 209–212,
- 50 to 200: Terzaghi et al. -1996, pp. 73–74,
- 100 to 150: Das -1997, p. 153,
- 80 to 120: Coduto -1999, pp. 226–227.

Ensaio de Adensamento

$$K = \frac{\gamma_w m_v TH^2}{t}$$

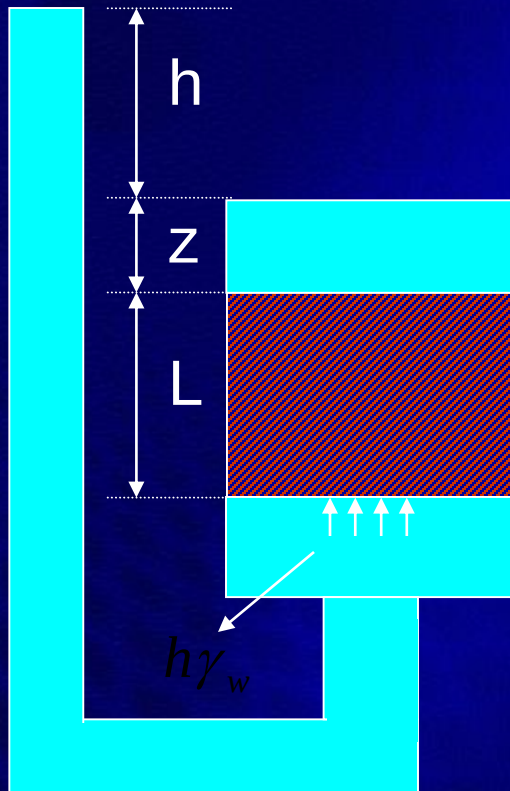
$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0}$$

$$a_v = \frac{de}{dp}$$

Condutividade Hidráulica (K)

- Tamanho dos grãos
- Arranjo das partículas (estrutura)
- Dispersão dos finos
- Densidade
- Descontinuidades
- Grau de saturação
- Natureza do fluido

Gradiente Crítico



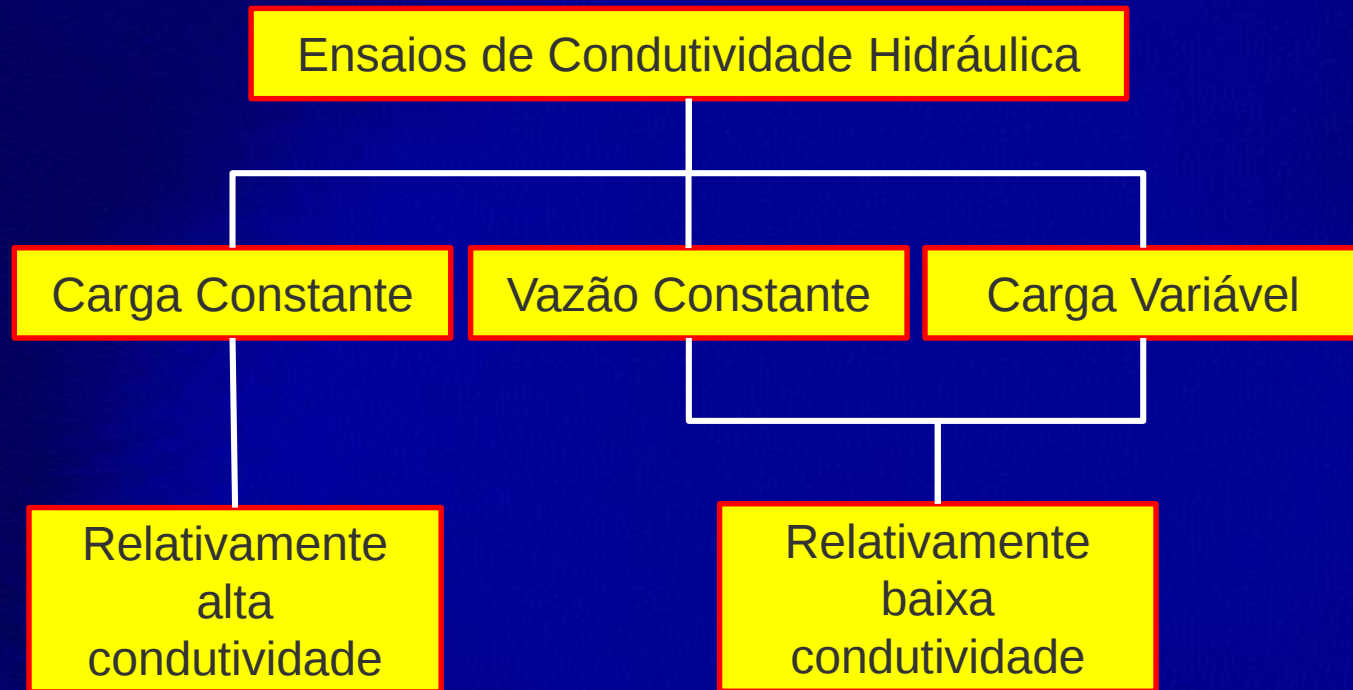
- Resistência das areias é proporcional a tensão efetiva.
- Se $\sigma' = 0$ a resistência é nula e teremos areia movediça

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

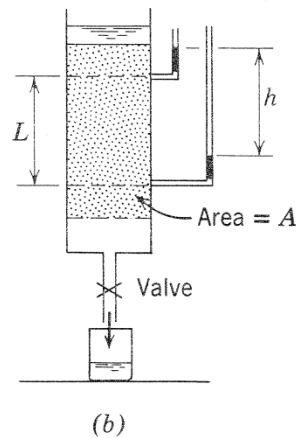
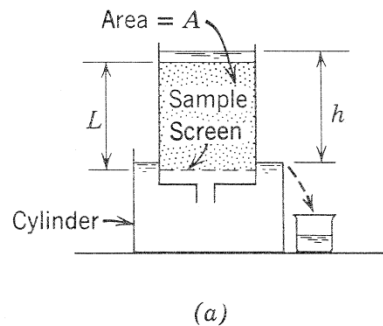
$$i_{crit} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w}$$

$$\sigma' = 0$$

Determinação da Condutividade Hidráulica

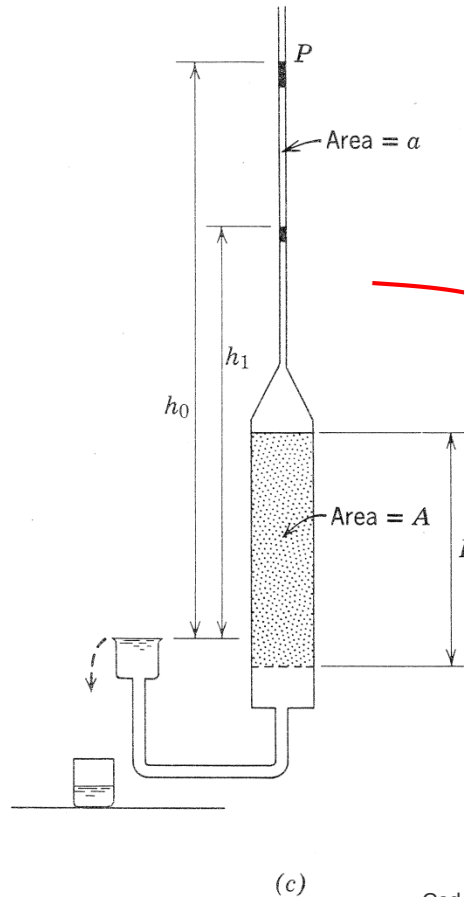


Carga Constante



$$K = V \frac{L}{hAt} = q \frac{L}{hA}$$

Carga Variável



Variação do volume

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

$$-\frac{dh}{h} = \frac{KA}{aL} dt$$

$$\int_{h_0}^{h_1} -\frac{dh}{h} = \int \frac{KA}{aL} dt$$

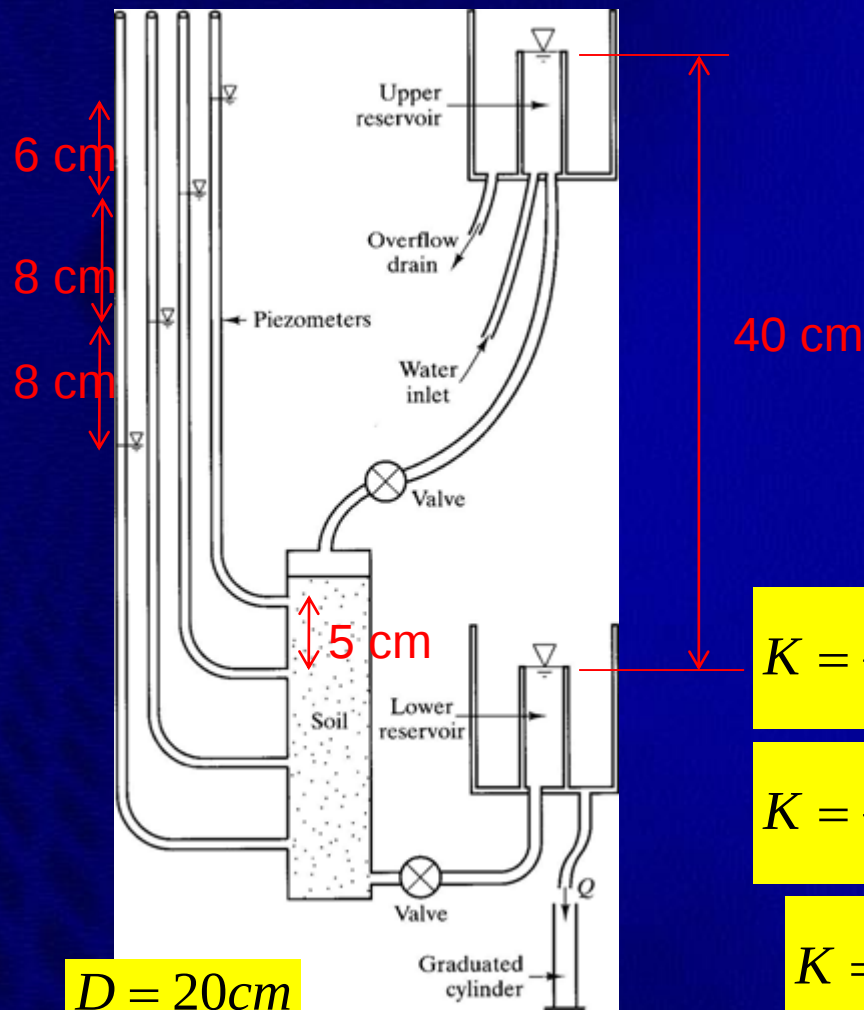
$$\ln(h_0 - h_1) = \frac{KA}{aL} t$$

$$K = \frac{aL}{At} \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right)$$

$$K = \frac{2.3aL}{At} \log \left(\frac{h_0}{h_1} \right)$$

Cedergren (1967)

Permeâmetro de Carga Constante



$$Q = 276\text{ml} / \text{min}$$

$$Q = KiA$$

$$Q = K \frac{\Delta h}{l} A$$

Conhecido

Conhecido

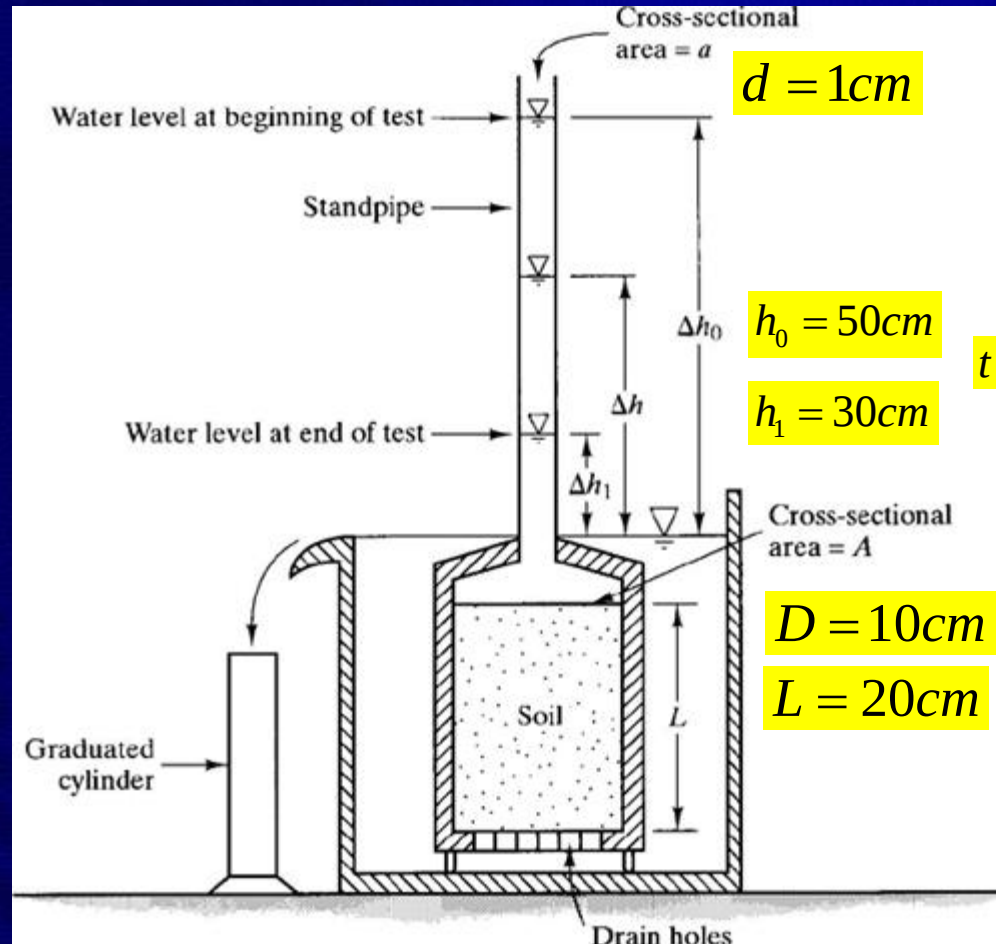
$$K = \frac{Q}{A} \frac{l}{\Delta h}$$

$$K = \frac{4.6}{314.16} \frac{5}{6} = 1.2 * 10^{-2} \text{cm} / \text{s} = 1.2 * 10^{-4} \text{m} / \text{s}$$

$$K = \frac{4.6}{314.16} \frac{5}{8} = 9.2 * 10^{-3} \text{cm} / \text{s} = 9.2 * 10^{-5} \text{m} / \text{s}$$

$$K = \frac{4.6}{314.16} \frac{15}{22} = 1 * 10^{-2} \text{cm} / \text{s} = 1 * 10^{-4} \text{m} / \text{s}$$

Permeâmetro de Carga Variável



$$d = 1\text{cm}$$

$$h_0 = 50\text{cm}$$

$$h_1 = 30\text{cm}$$

$$t = 1\text{h}$$

$$D = 10\text{cm}$$

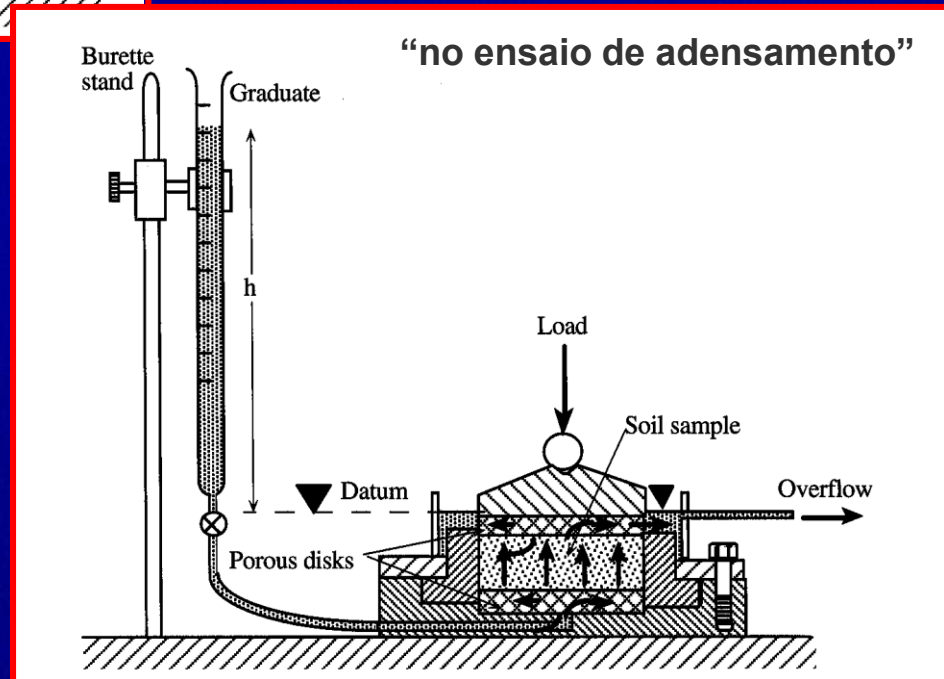
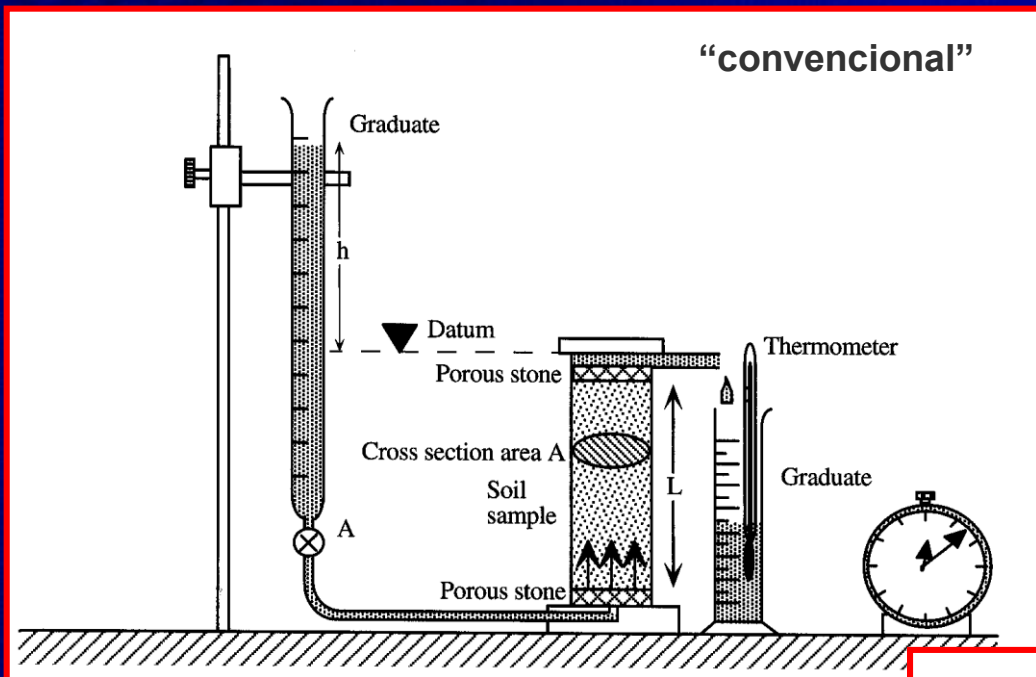
$$L = 20\text{cm}$$

$$K = \frac{aL}{At} \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

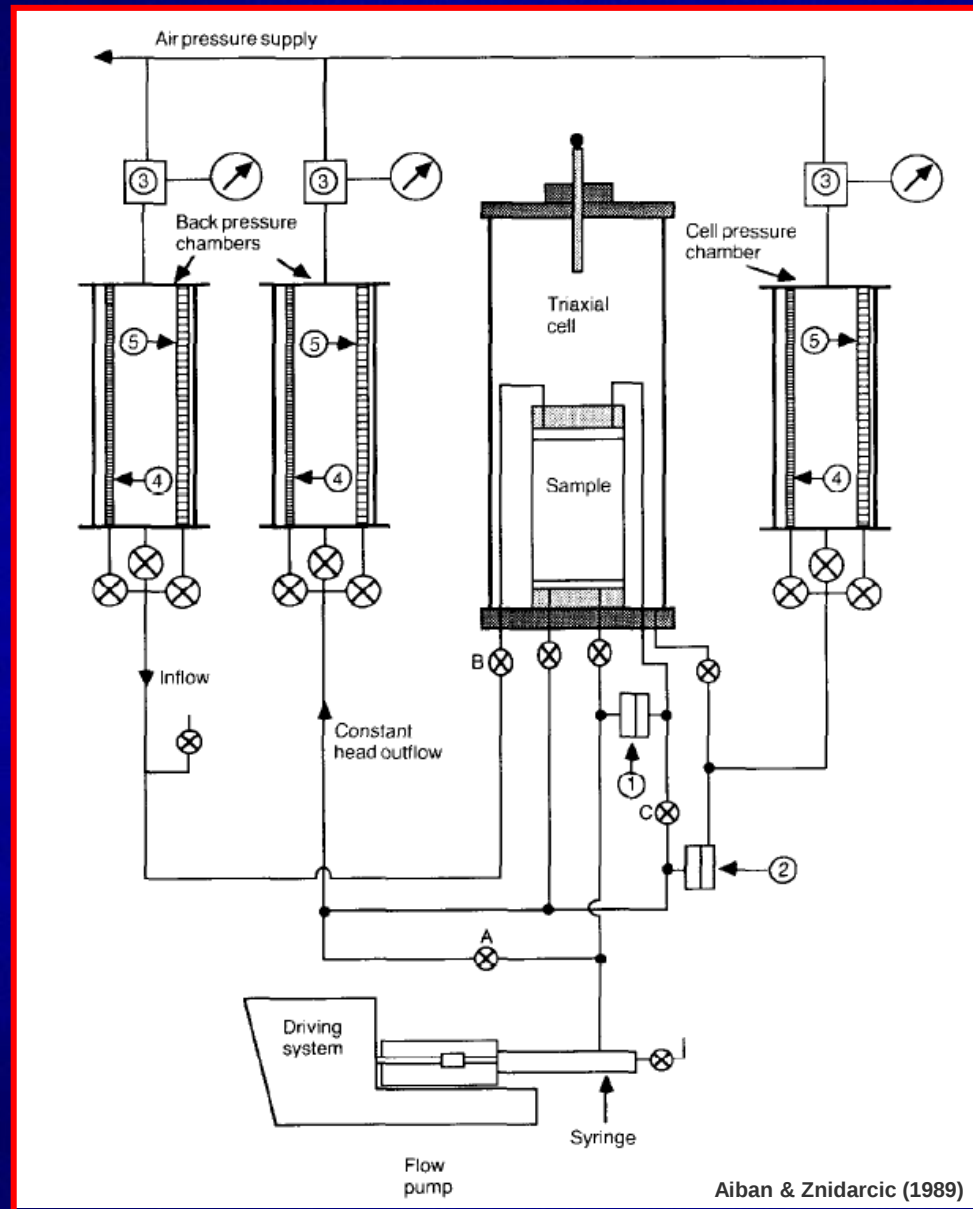
$$K = \frac{2.3aL}{At} \log\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

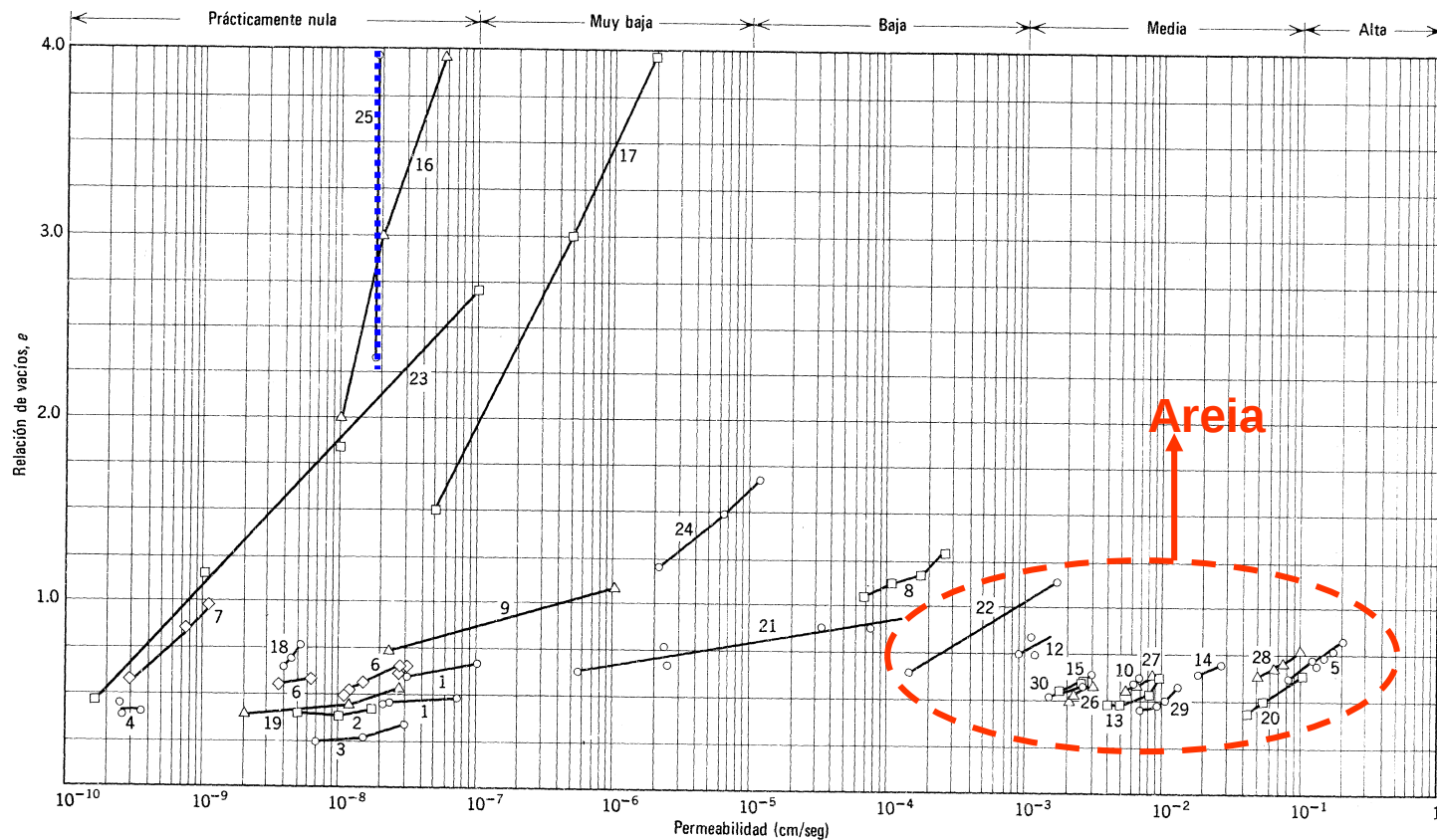
$$K = \frac{2.3 * 0.785 * 20}{78.54 * 3600} \log\left(\frac{50}{30}\right) = 2.8 * 10^{-5} \text{ cm/s} = 2.8 * 10^{-7} \text{ m/s}$$

Permeâmetro de Carga Variável



Permeâmetro de Vazão Constante



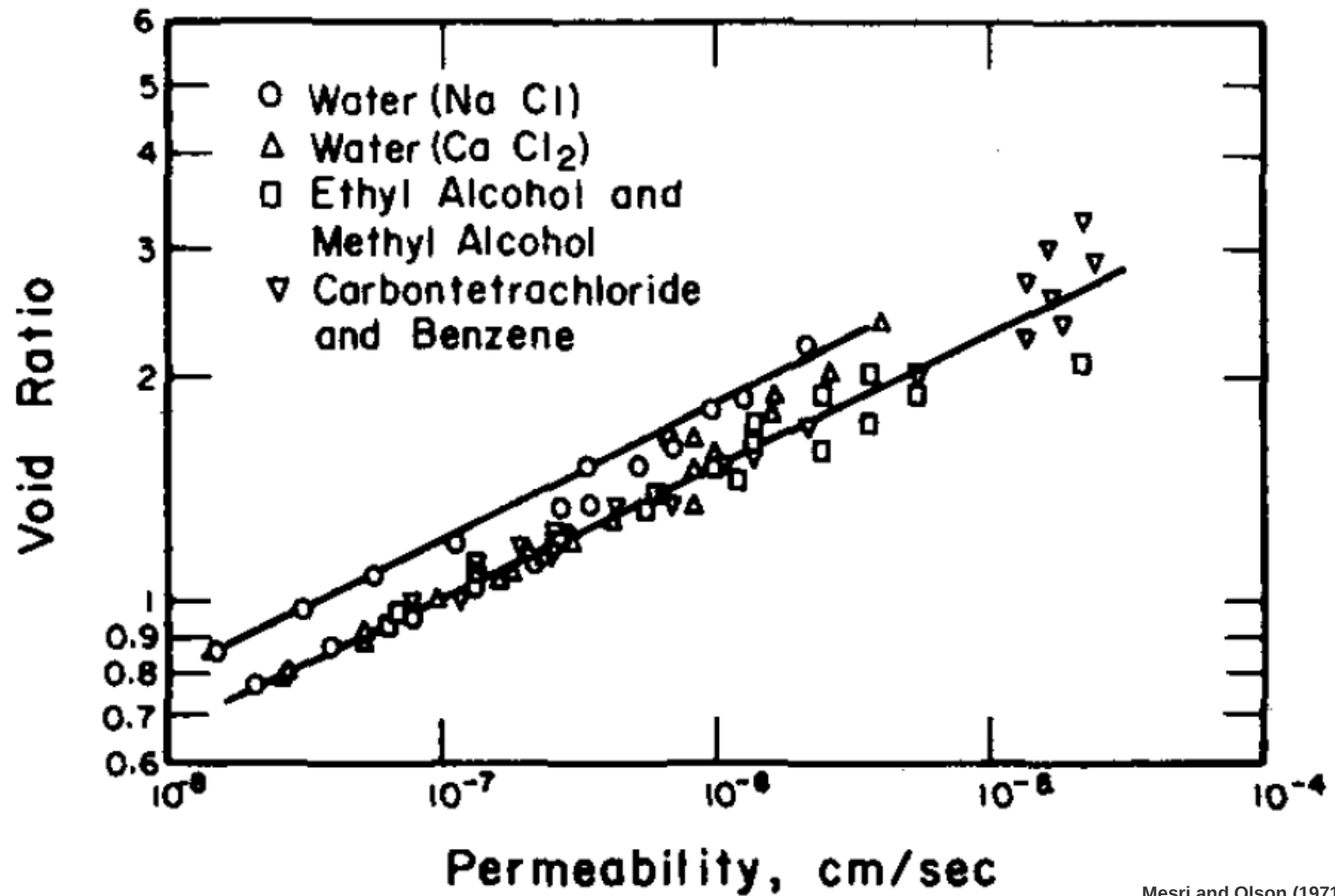


Identificación de los suelos

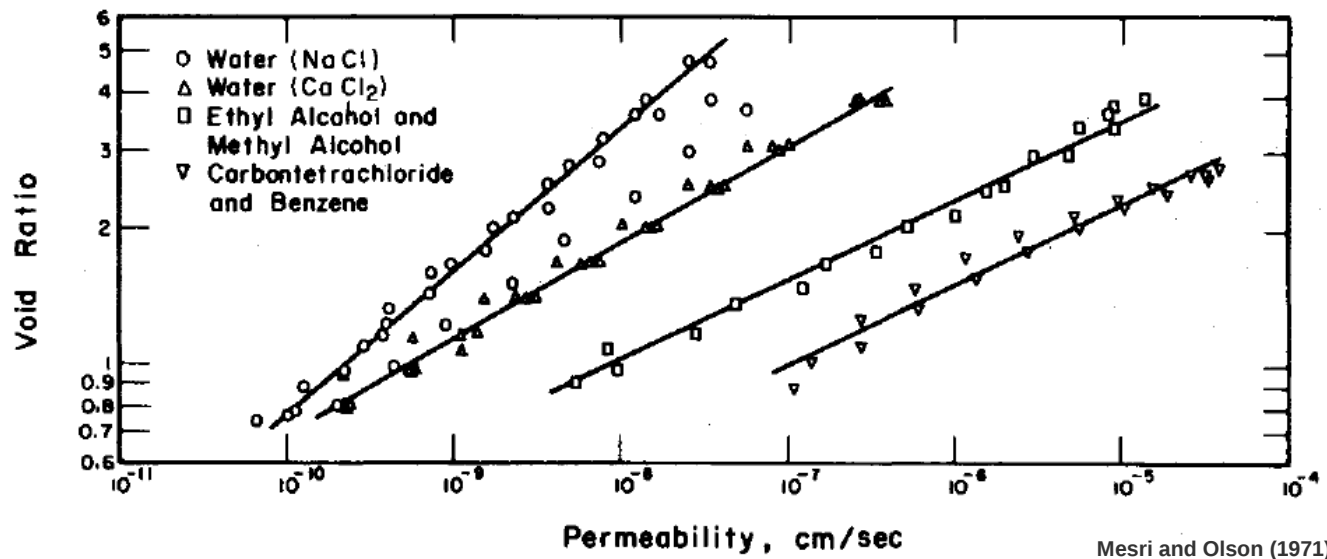
- | | | |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 1 Caliche compactado | 10 Arena de Ottawa | 19 Arcilla magra |
| 2 Caliche compactado | 11 Arena—Gaspee Point | 20 Arena—Union Falls |
| 3 Arena limosa | 12 Arena—Franklin Falls | 21 Limo—North Carolina |
| 4 Arcilla arenosa | 13 Arena—Scituate | 22 Arena de dique |
| 5 Arena de playa | 14 Arena—Plum Island | 23 Arcilla azul de Boston sódica |
| 6 Arcilla azul de Boston compactada | 15 Arena—Fort Peck | 24 Caolinita cálcica |
| 7 Arcilla de Vicksburg | 16 Limo—Boston | 25 Montmorilonita sódica |
| 8 Arcilla arenosa | 17 Limo—Boston | 26 Arena (filtro de presa) |
| 9 Limo de Boston | 18 Loes | |

Relação entre o coeficiente de permeabilidade, tipo de solo e índice de vazios.

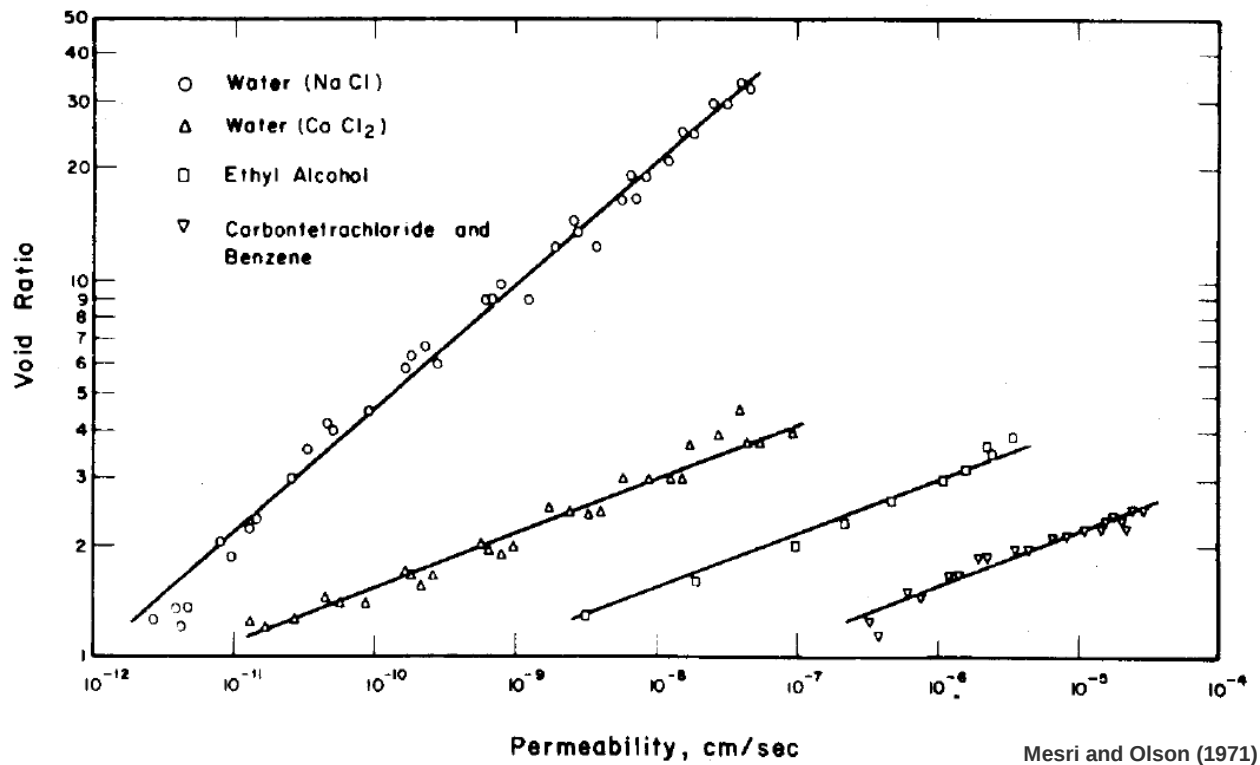
Kaolinita



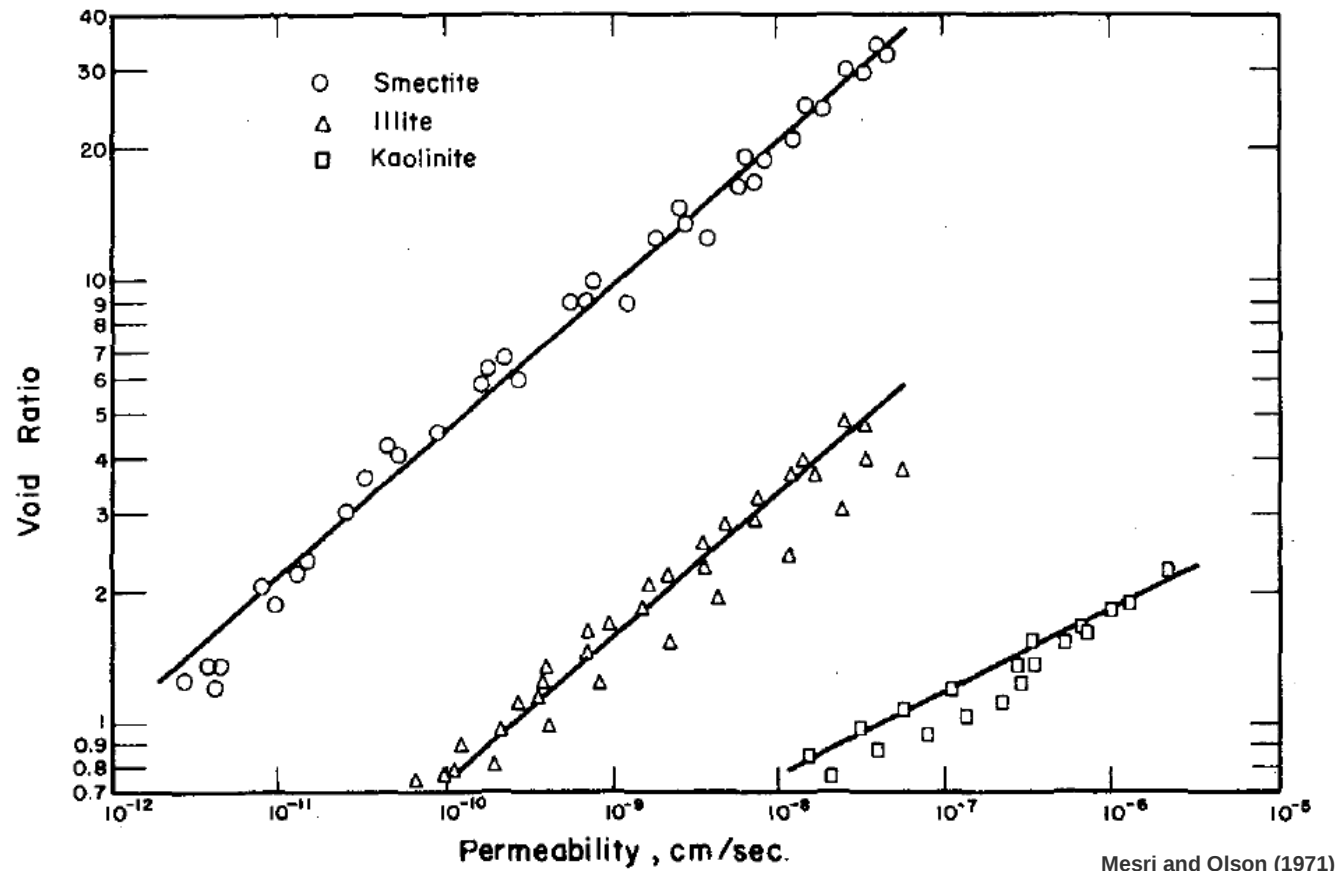
Illita



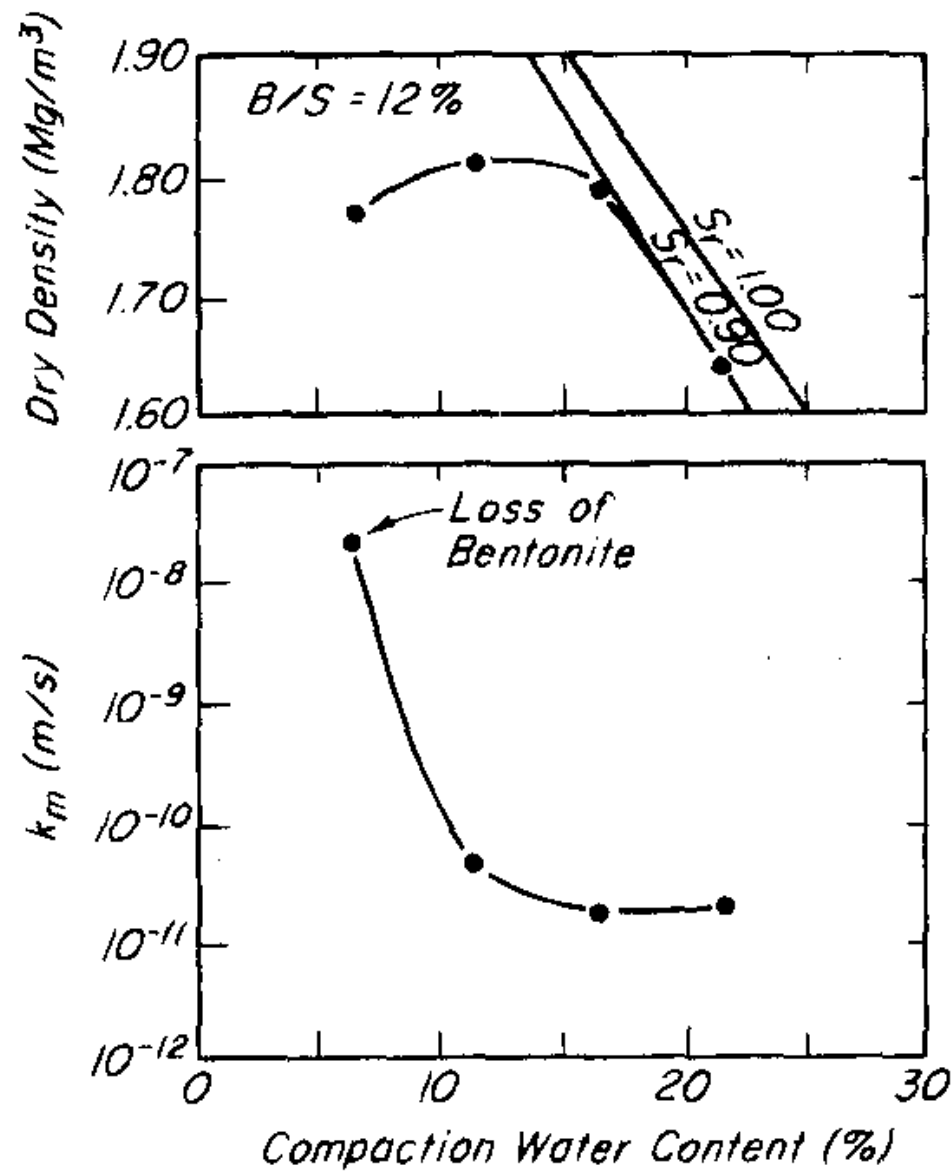
Smectita

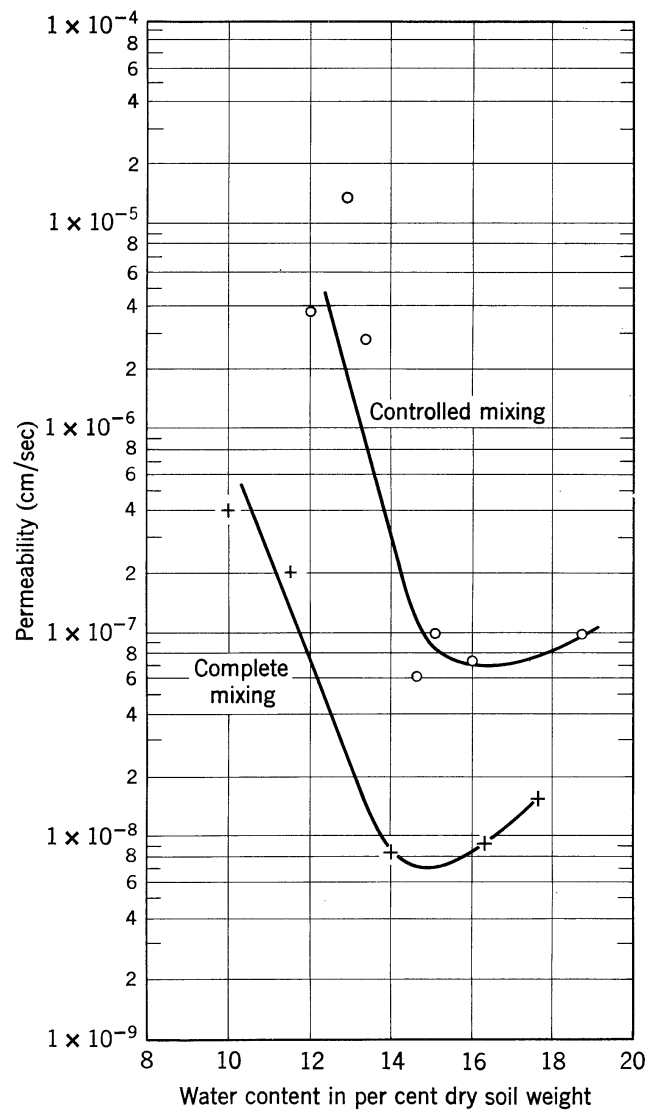


Água

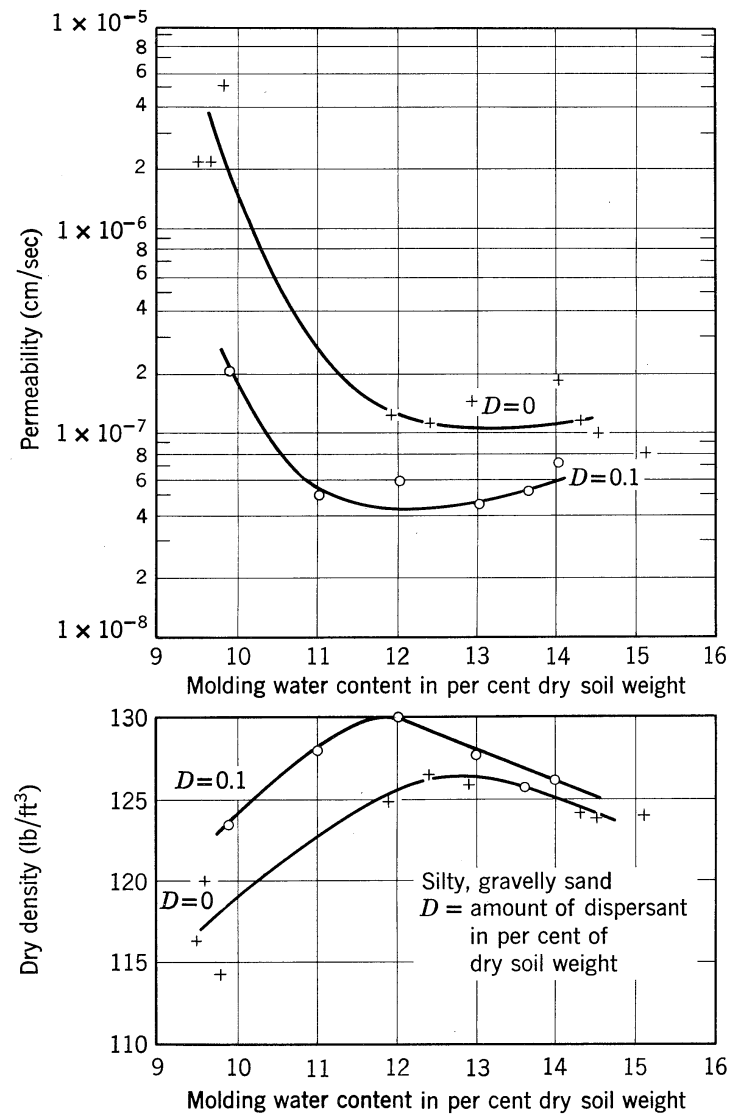


Compactação e Condutividade Hidráulica



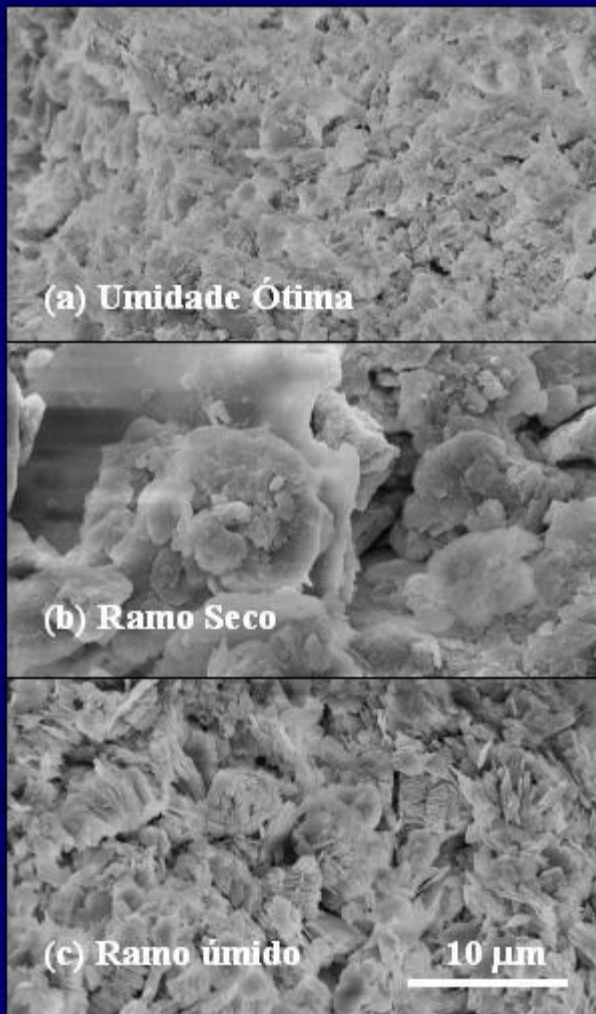


(a)

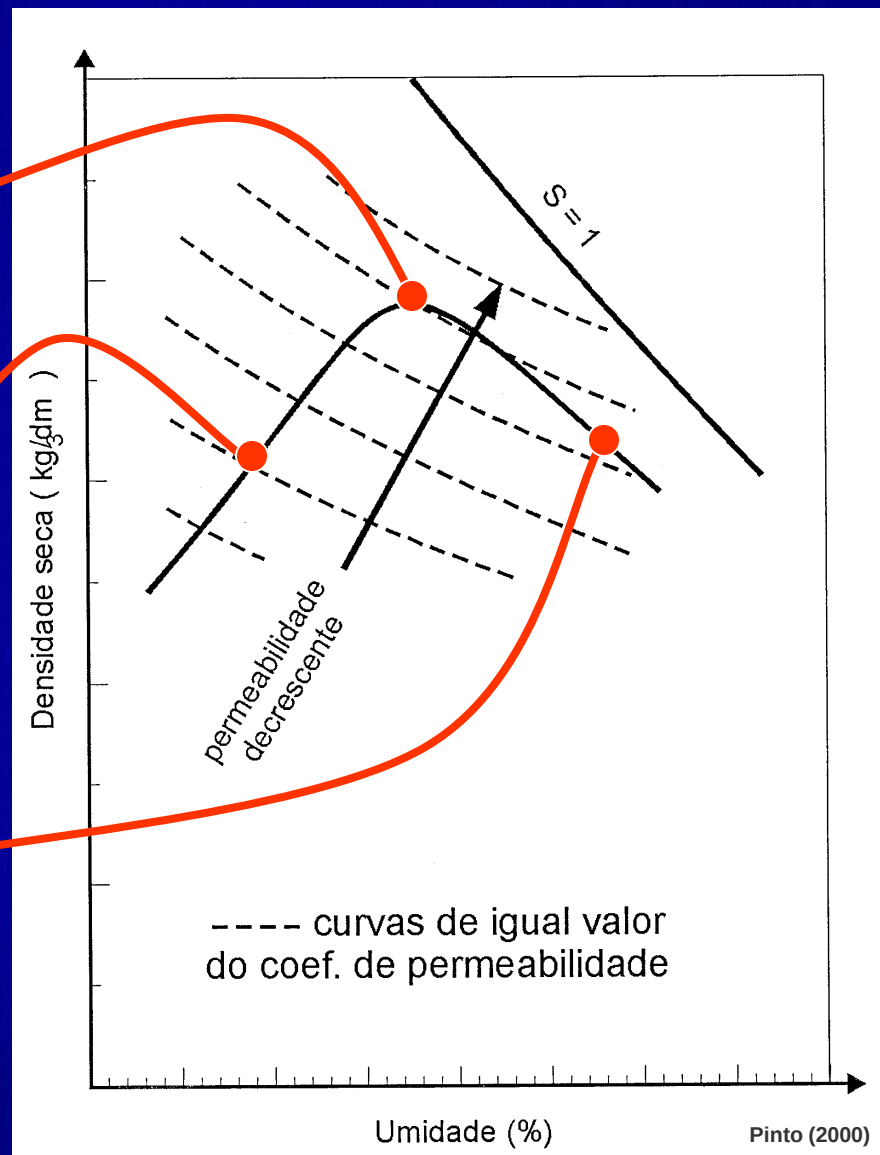


(b)

Efeito da estrutura na permeabilidade (a) efeito do grau de mistura (b) efeito da dispersão.



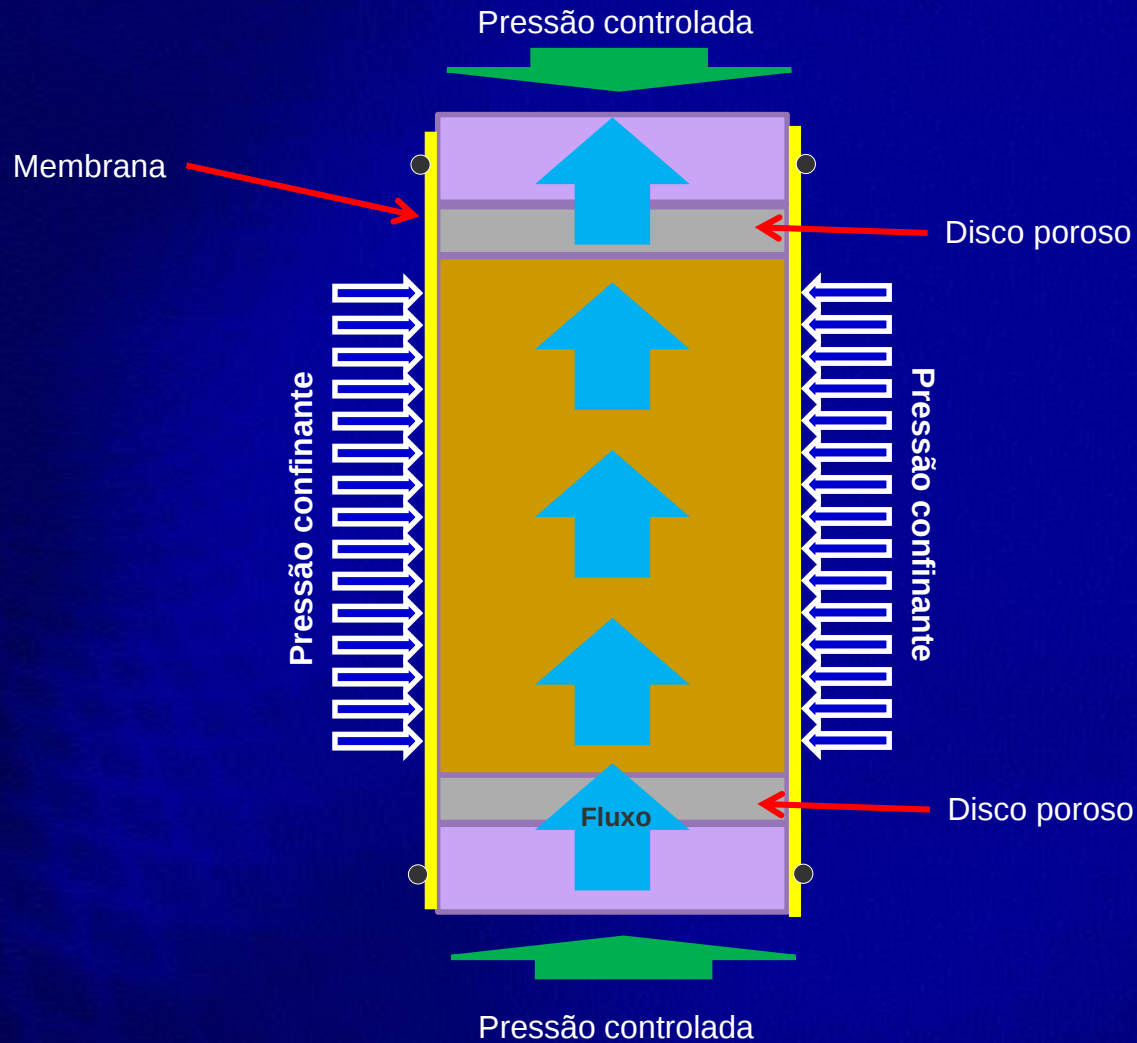
Oliveira & Marinho (2004)



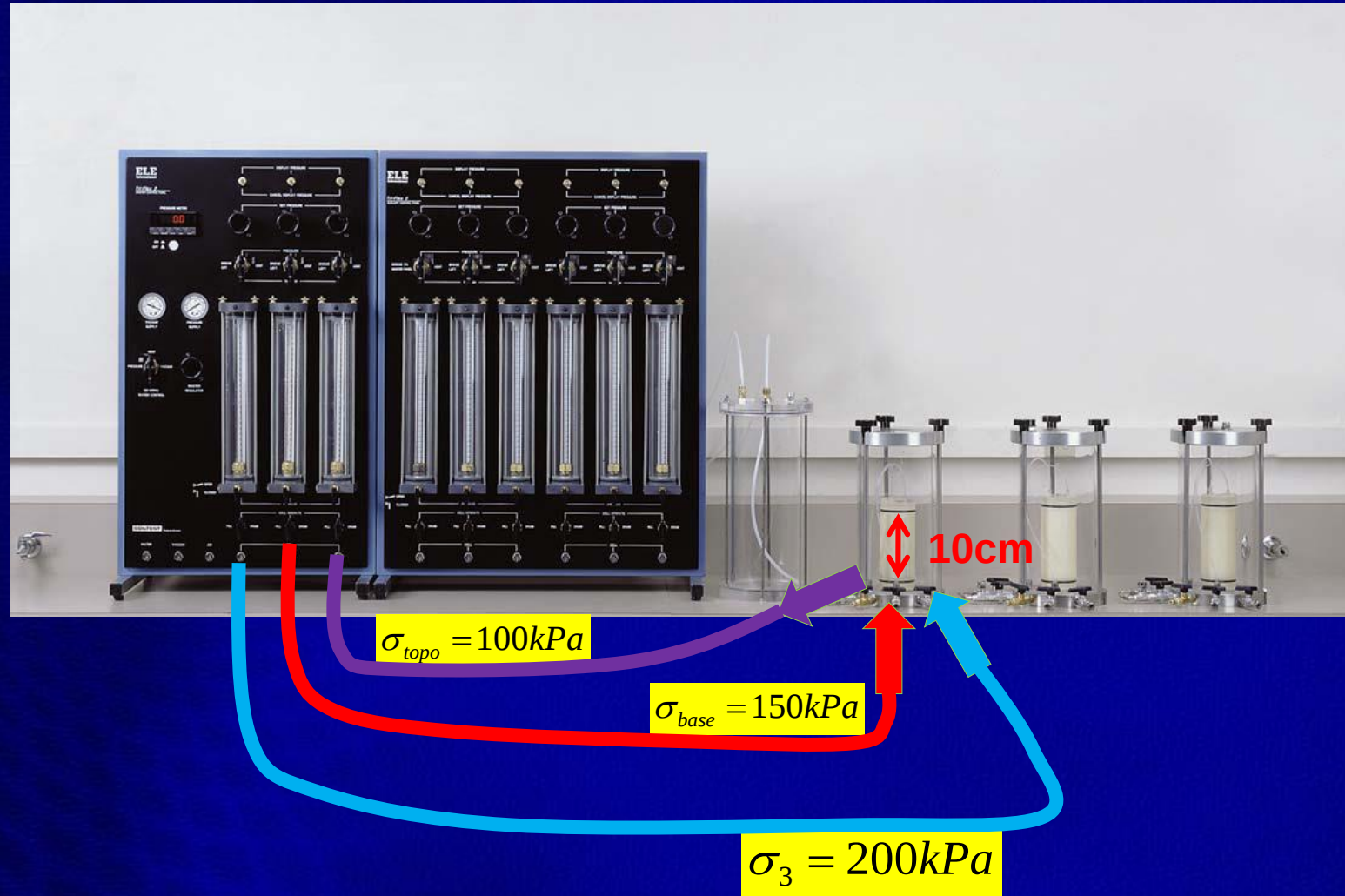
Permeâmetro de Parede Flexível (carga variável ou constante)



Permeâmetro com Membrana Flexível



Permeâmetro de Parede Flexível (carga variável ou constante)



Cuidado!!!! – Usar carga hidráulica e não pressão na hora de calcular o gradiente hidráulico

Alguns erros comuns

Permeâmetro de Parede Rígida

- Fluxo preferencial pela parede.
- Qualidade da amostra.
- Aprisionamento de ar.
- Variação de temperatura.

Permeâmetro de Parede Flexível

- A contração ou expansão da amostra.
- Qualidade da amostra.
- Aprisionamento de ar.
- Variação de temperatura

WATER MOVEMENT IN SOILS

W.H. Gardner and J.C. Haleh