Ensaios de Laboratório em Mecânica dos Solos

Fluxo Unidimensional
Ensaios de Condutividade Hidráulica

Prof. Fernando A. M. Marinho

2016

A água

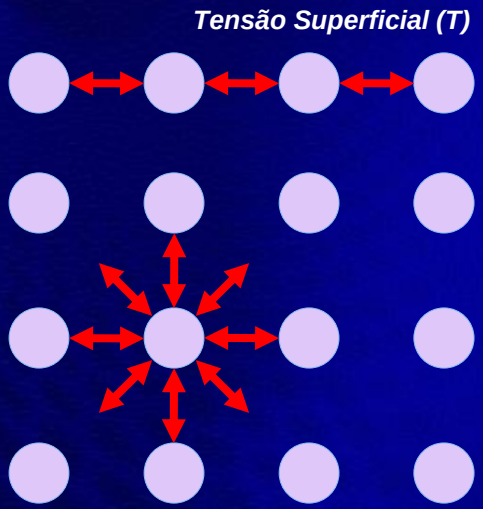
- Mudança de estado
- Densidade e compressibilidade
- Pressão de vapor
- Tensão superficial
  - Curvatura da superfície da água
  - Ângulo de contato com superfícies sólidas
  - Capilaridade
  - Adsorção da água em superfícies sólidas
- Pressão osmótica
- Solubilidade dos gases
- Viscosidade

Tensão Superficial da Água

Tensão Superficial

O que gera a tensão superficial nos líquidos?

A coesão entre moléculas de um líquido é responsável pela tensão superficial

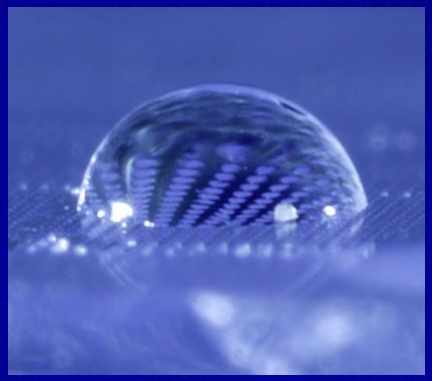


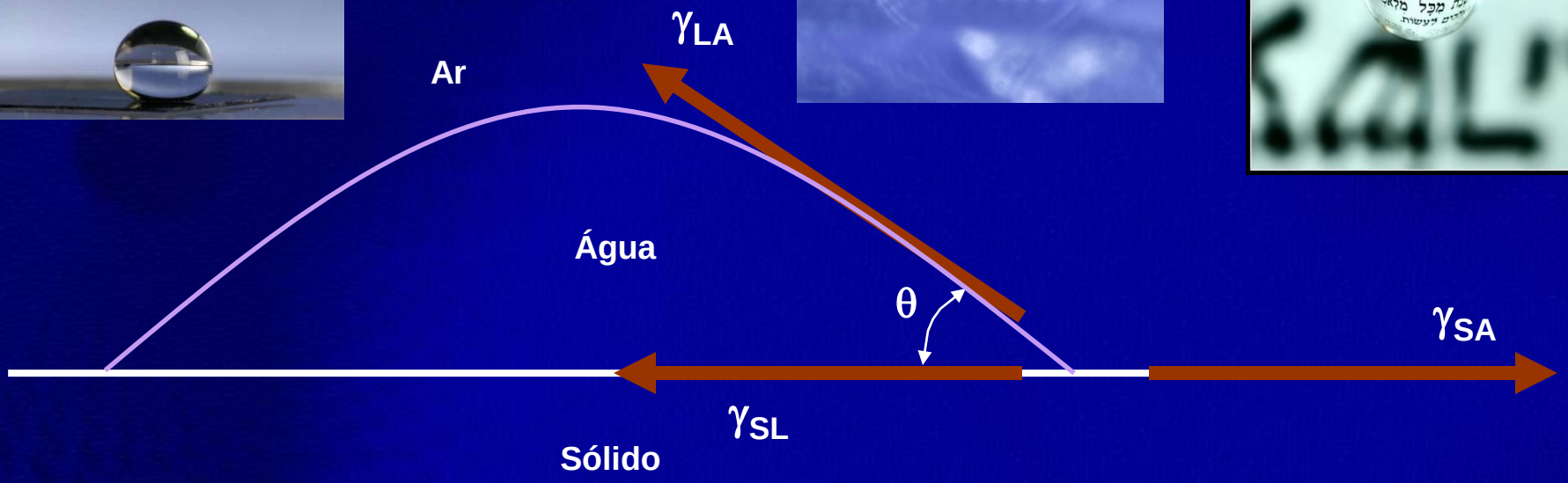
- **Existe coesão entre todas as moléculas**
- **Moléculas na superfície não possuem moléculas acima delas.**
- **Fortemente ligada a molécula ao lado**
- **Formação de um filme com mais resistência do que no corpo da água**

$$\text{Tensão superficial da água} = 72 \frac{dynes}{cm} (25^{o} C)$$

Interface Ar-Água

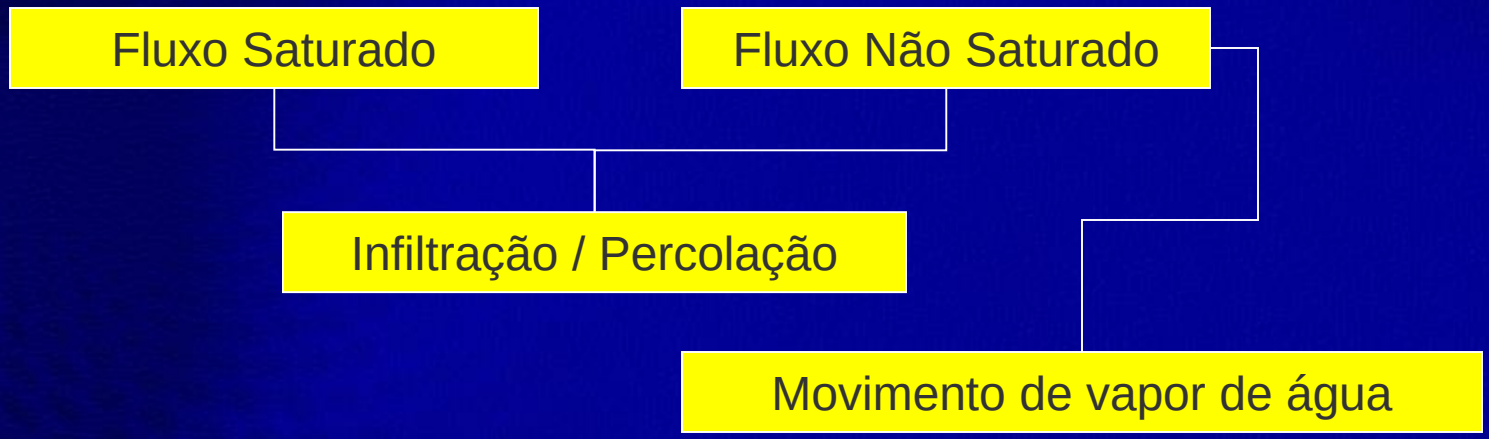
$$T = \gamma$$





$$\gamma_{LA}\cos\theta = \gamma_{SA} - \gamma_{SL}$$

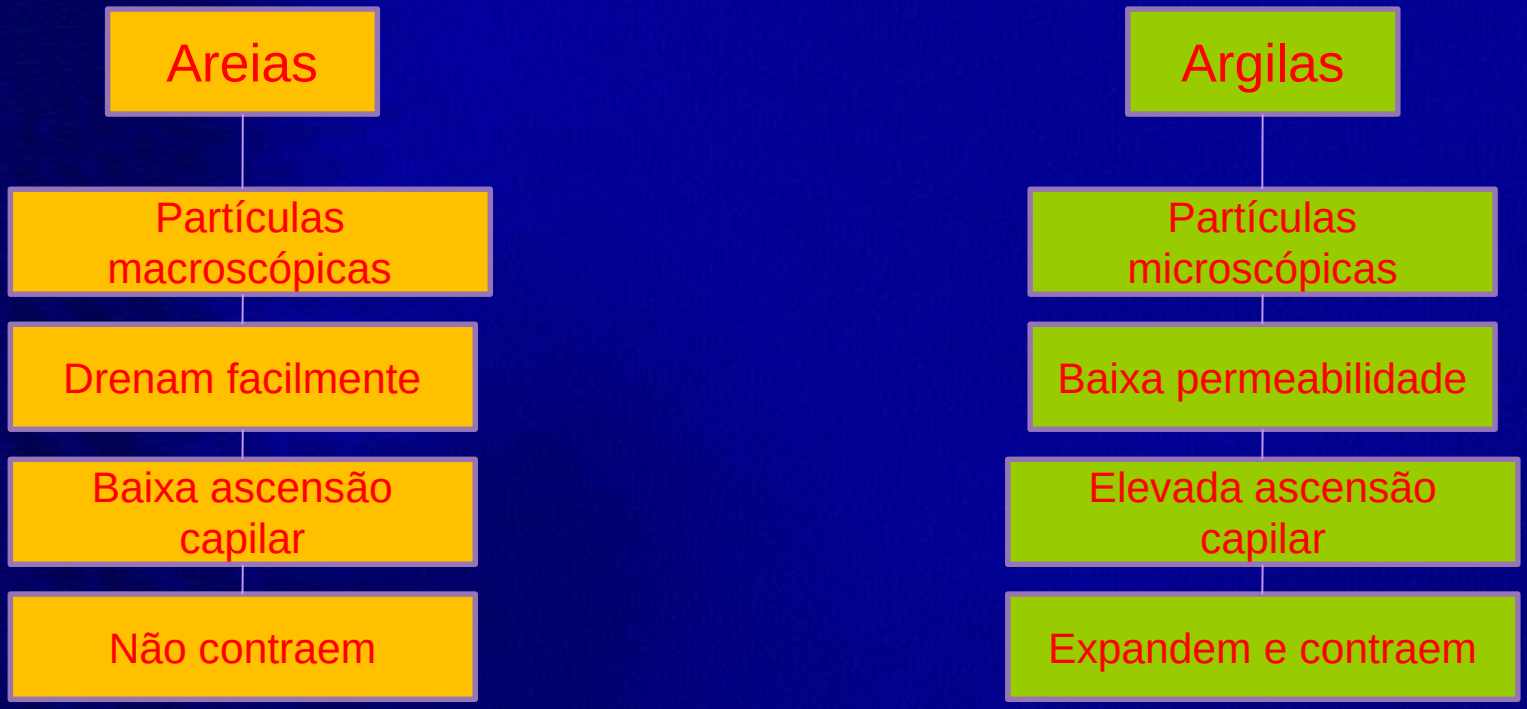
Movimento da água no solo



A Natureza da Estrutura dos Solos

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

Por simplicidade podemos dividir os solos em dois tipos:



Distribuição Granulométrica

Porosidade

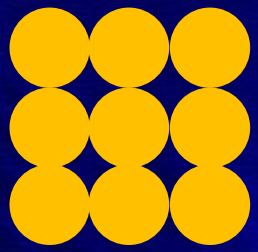
$$n = \frac{V_v}{V}$$

Índice de Vazios

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

Condutividade hidráulica

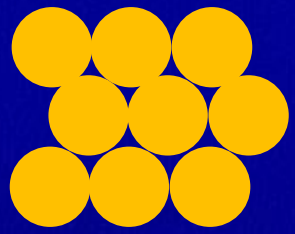
$$V_v = \frac{e}{1+e} V$$



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

$$e = 0.322$$

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



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

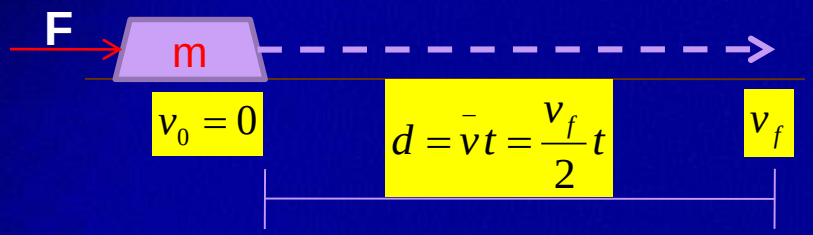
$$e = 0.206$$

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

Energia Cinética (Energia de movimento)

Como surge a energia cinética?

Do trabalho realizado no "objeto"



$$aceleração = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - 0}{t} = \frac{v_f}{t}$$

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

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

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

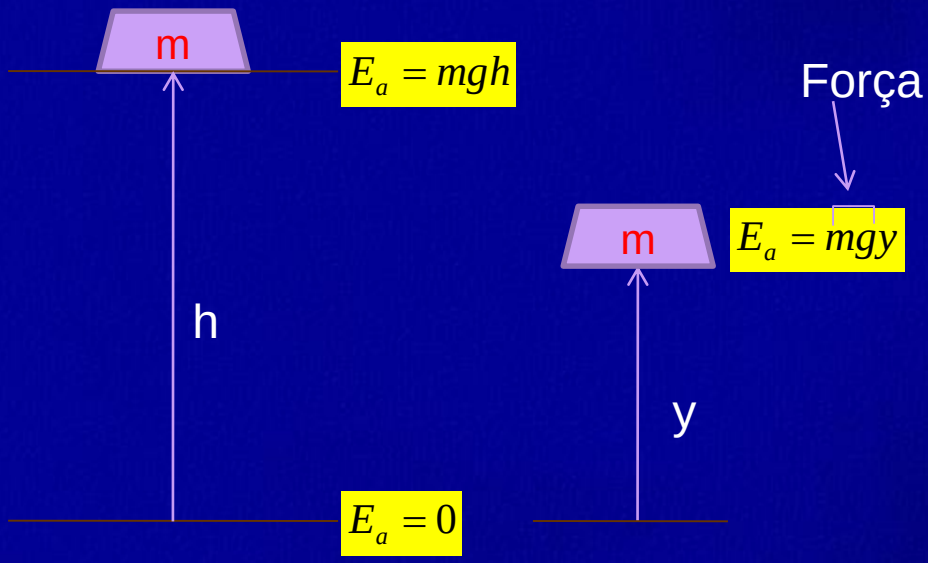
Energia Potencial (ou Altimétrica)

Do que resulta a energia potencial?

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

Campo gravitacional

Campo Elétrico
Campo Magnético



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 outra 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

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

Pressão Osmótica

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

Bernoulli Equation

Daniel Bernoulli

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

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

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

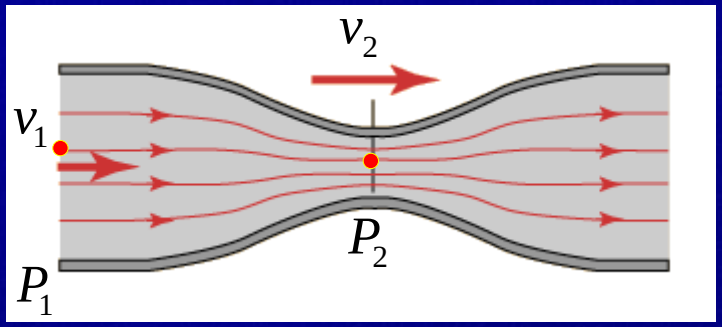
$$\frac{\text{Energia Cinética}}{\text{Volume}}=\frac{\frac{1}{2}mv^2}{V}=\frac{1}{2}\rho v^2$$

Energia de pressão

Energia de Cinética por unidade de volume

Energia Potencial por unidade de volume

- ✓ Os pontos 1 e 2 estão na mesma linha de fluxo
- ✓ O fluido possui densidade constante.
- ✓ O regime do fluxo está estabelecido
- ✓ Não existe atrito



http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/pber.html

Ver também: Tindall & Kunkel (1999)

Conservação de energia

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} m/s

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

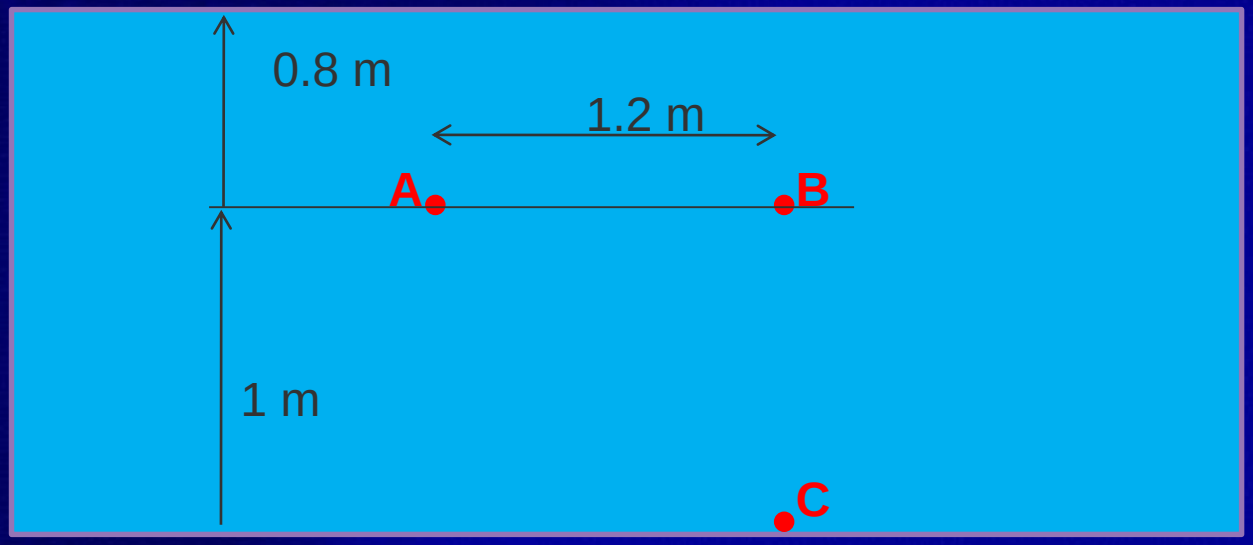
Logo:

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

A carga Total em qualquer ponto vale:

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

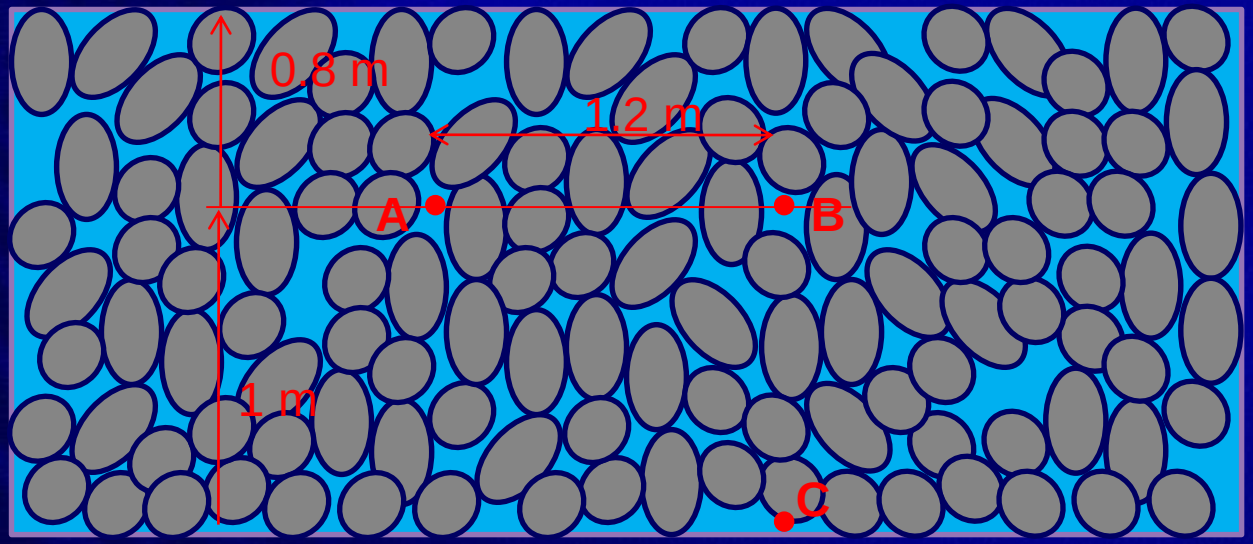
Determinar as cargas hidráulicas no pontos indicados



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

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

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



Determinar as cargas hidráulicas no pontos indicados

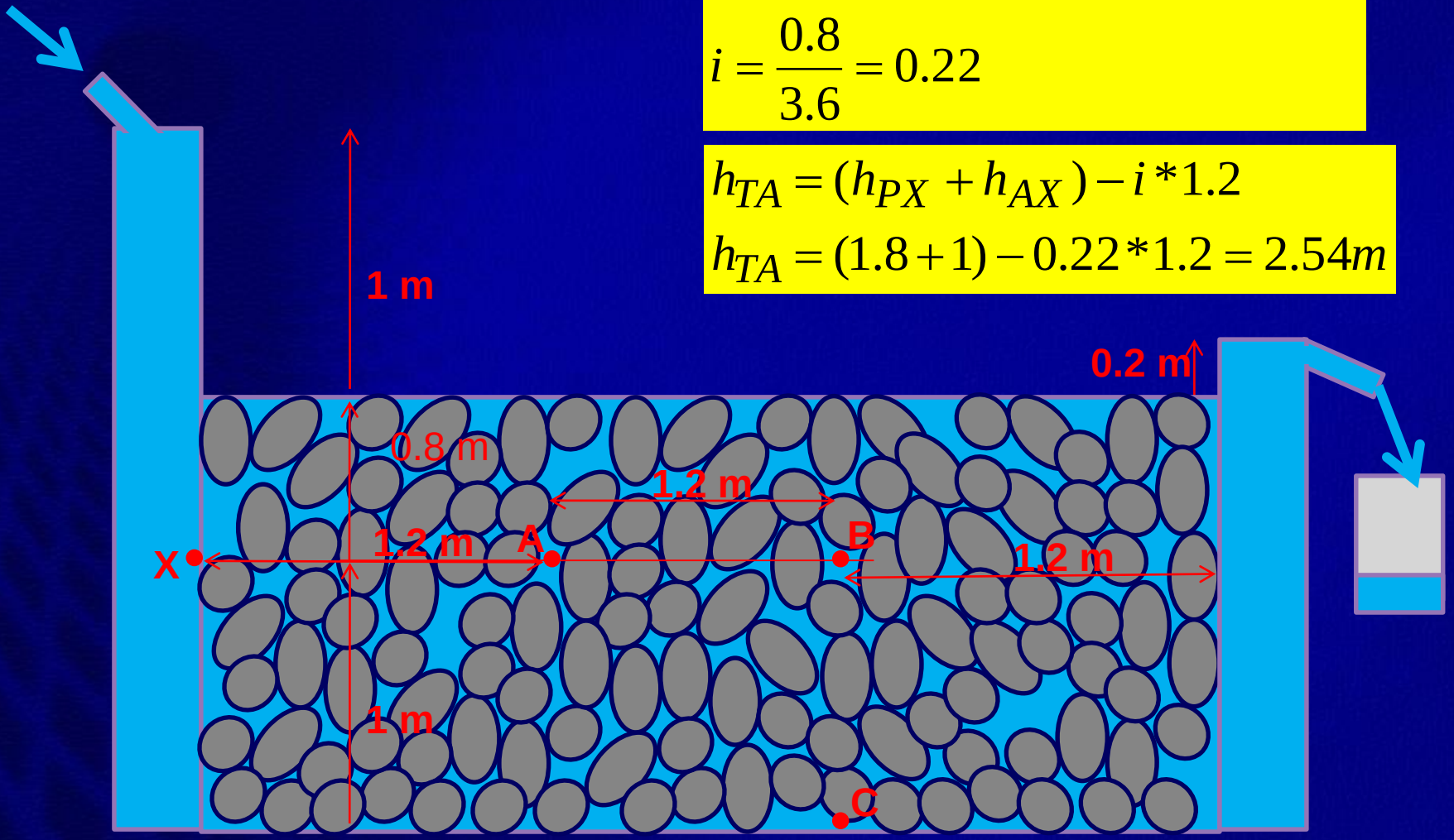
$$\Delta h = 0.8m$$

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

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

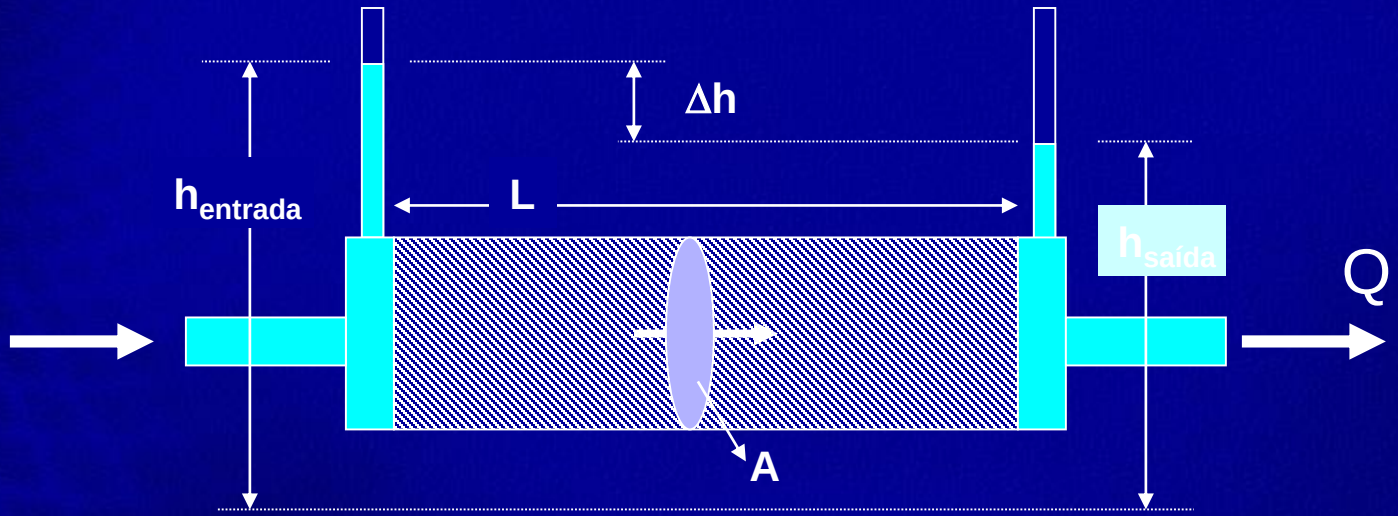
$$h_{TA} = (h_{PX} + h_{AX}) - i * 1.2$$

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



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.



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

Lei de Darcy

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

Q - vazão
K – condutividade hidráulica
A - Área do permeâmetro

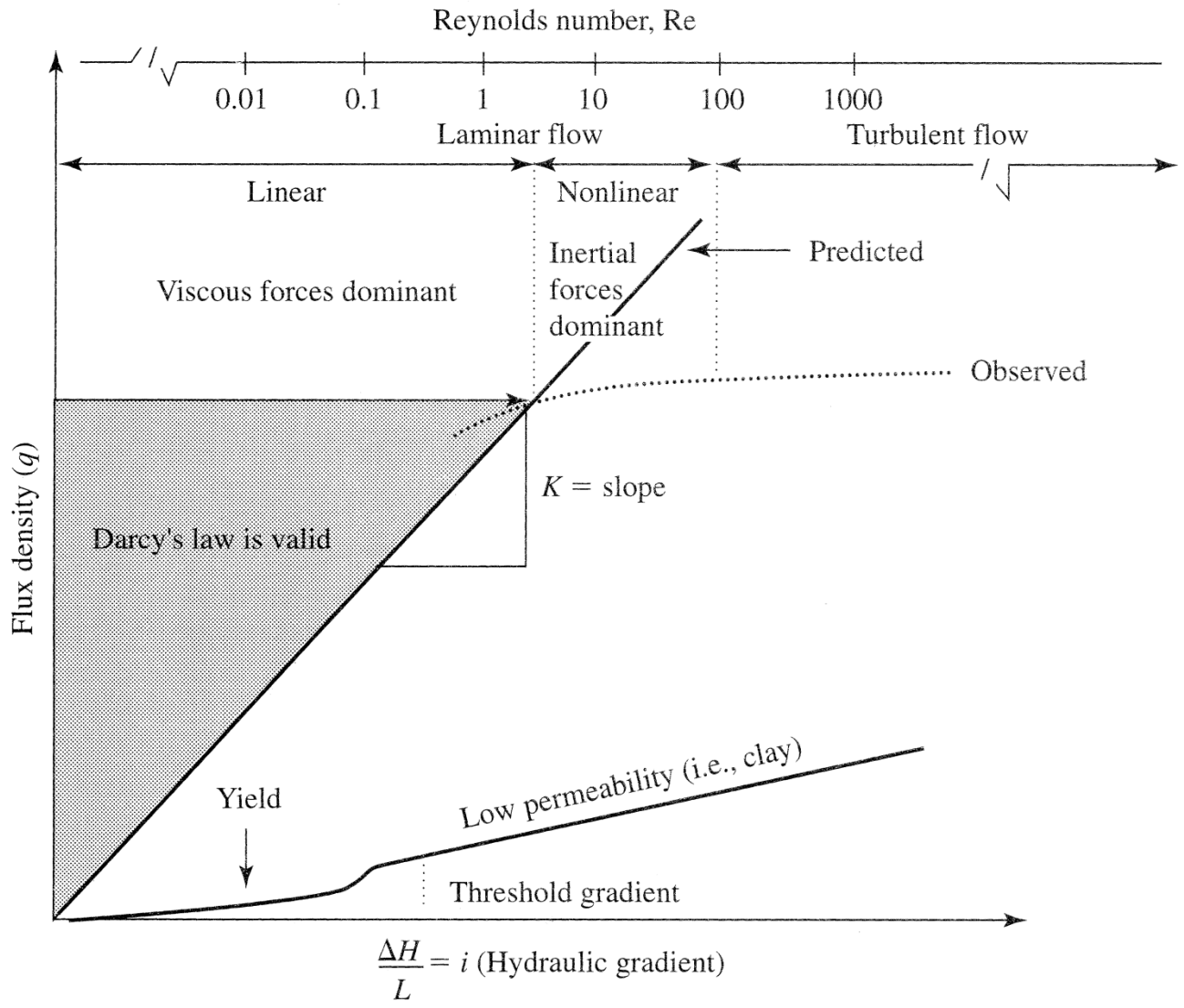
$$\frac{h}{L} = i \Rightarrow \text{gradiente hidraúlico}$$

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

$$v = Ki$$

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

Classificação Esquemática de Fluxo em Solos



Tindal & Kunkel (1999)

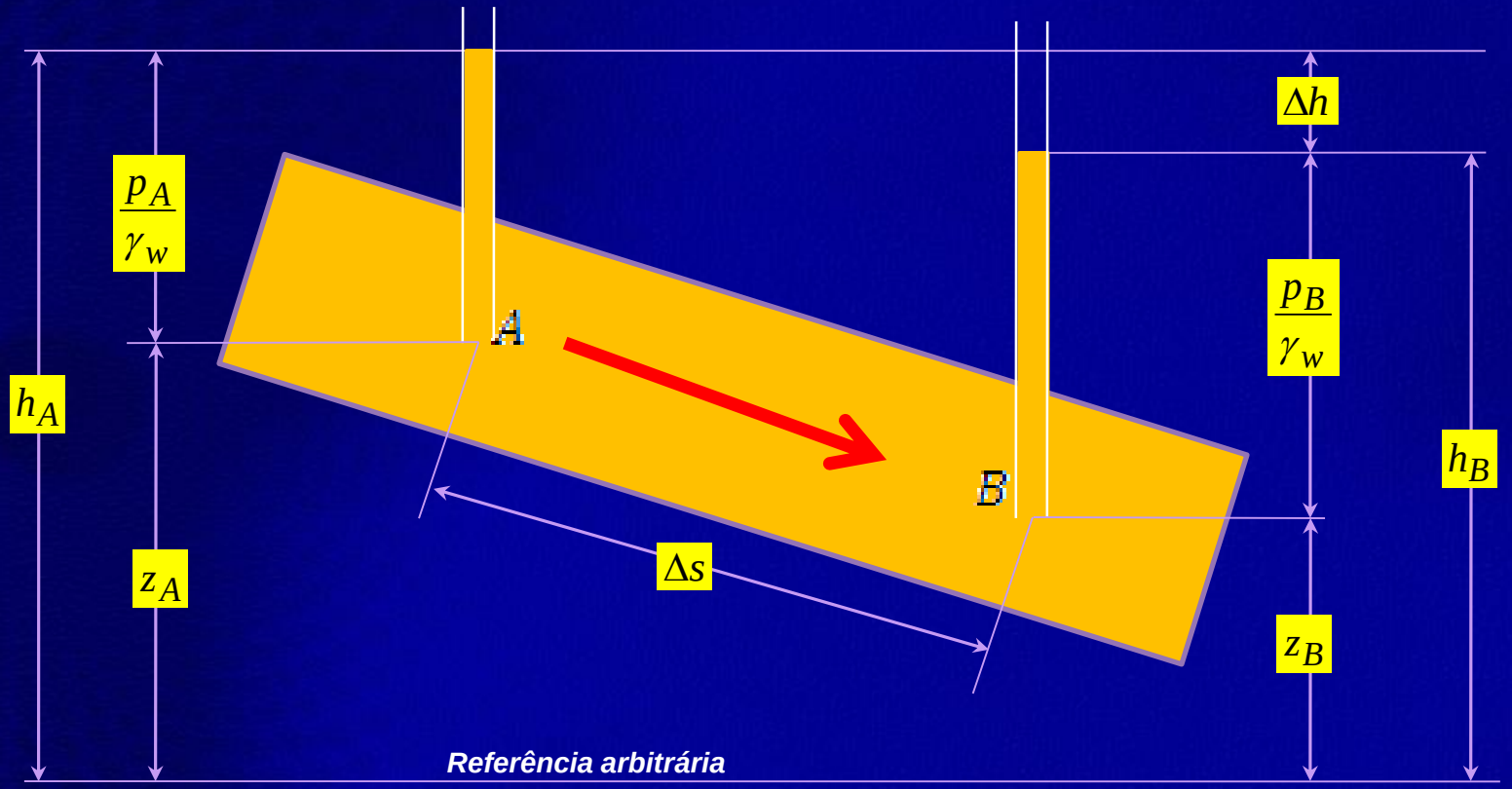
$$R = \frac{vD\rho}{\mu}$$

v – velocidade

ρ – densidade do fluido

μ – coenficiente de viscosidade

D – diâmetro médio das partículas



$$i = -\lim_{\Delta s \to 0} \frac{\Delta h}{\Delta s} = -\frac{\Delta h}{\Delta s}$$

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 Intrinseca (m^2)
Estrutural apenas, independe do fluido

Condutividade hidráulica (m/s)

$21^o C$

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

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

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

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: Cedergren -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

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

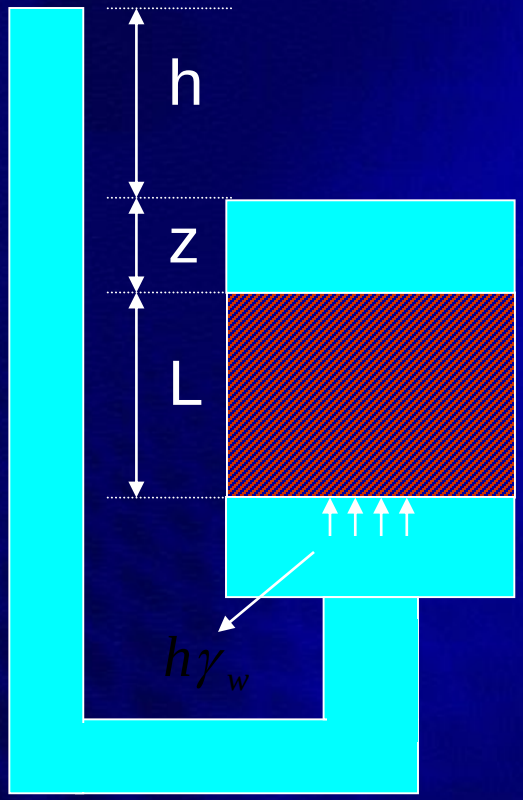
$$m_v = \frac{a_v}{1+e_0}$$

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

Condutividade Hidráulica (K)

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

Gradiente Crítico



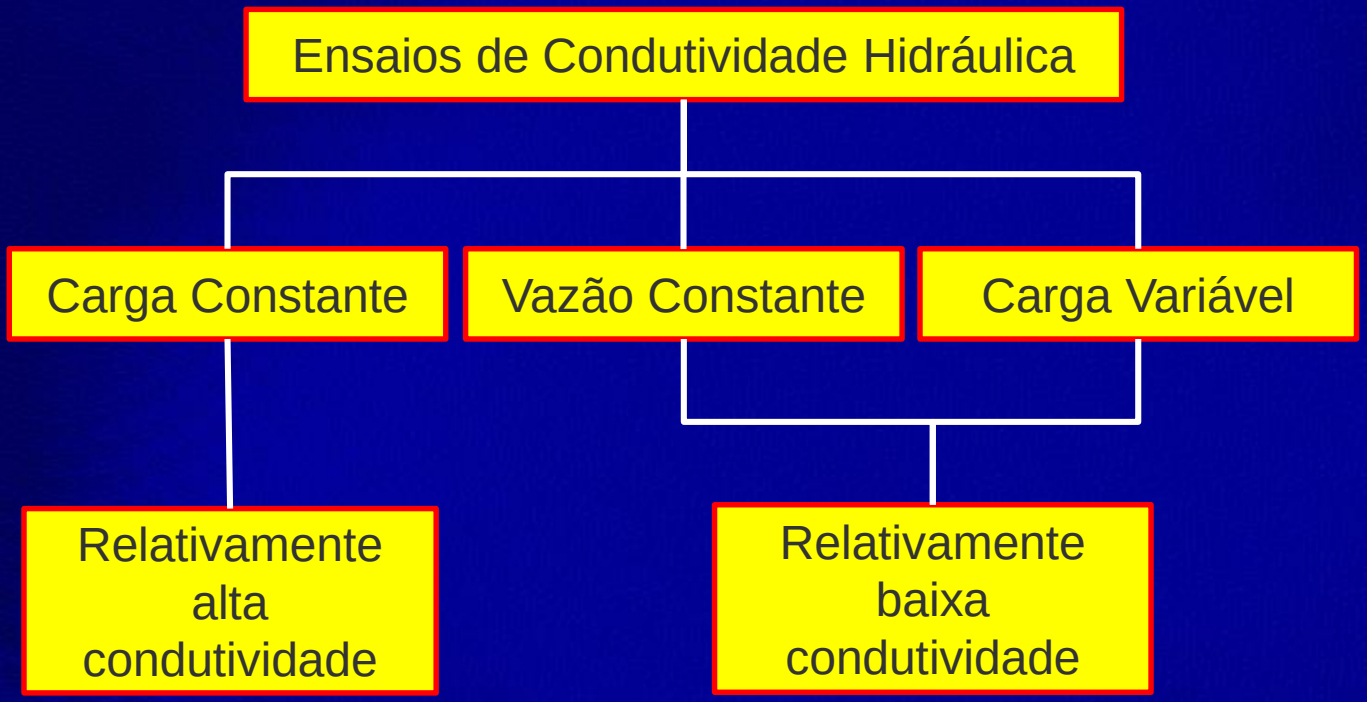
- Resistência das areias é proporcional a tensão efetiva.
- Se σ' = 0 a resistência é nula e teremos areia movediça

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

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

$$\sigma' = 0$$

Determinação da Condutividade Hidráulica

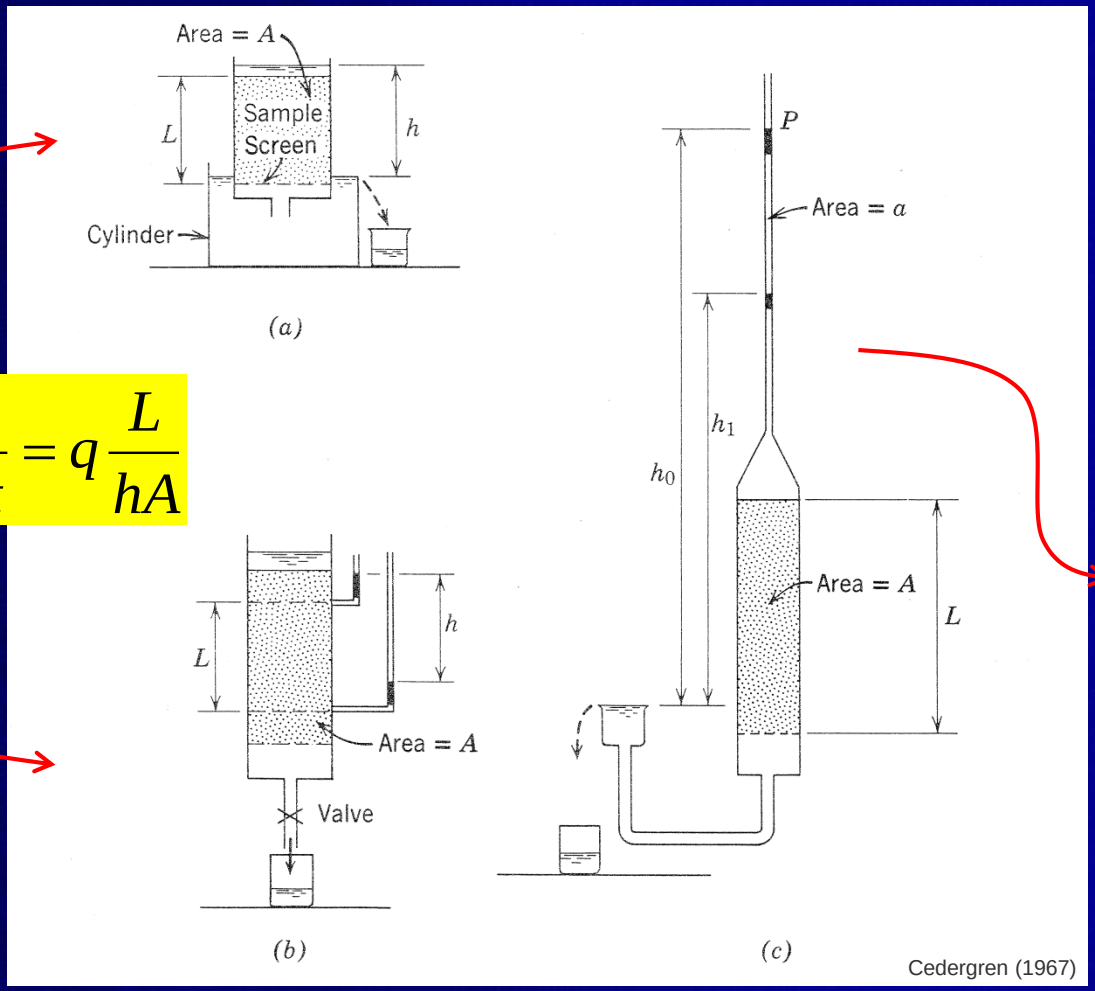

Ensaios de Condutividade Hidráulica
Carga Constante
Vazão Constante
Carga Variável
Relativamente alta condutividade
Relativamente baixa condutividade

Variação do volume

Carga Constante

Carga Variável

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



Cedergren (1967)

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

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

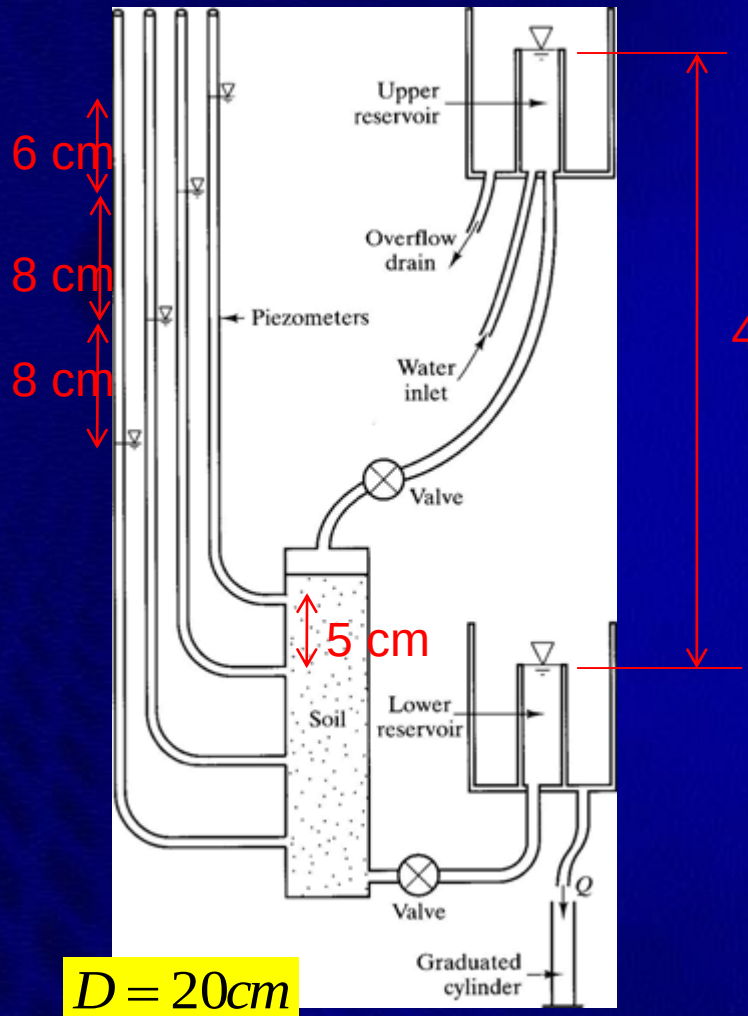
$$\int_{h_0}^{h_1} -\frac{dh}{h} = \int \frac{KA}{aL}dt$$

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

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

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

Permeâmetro de Carga Constante



$$D = 20cm$$

$$Q = 276ml/\min$$

$$Q = KiA$$

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

Conhecido

Conhecido

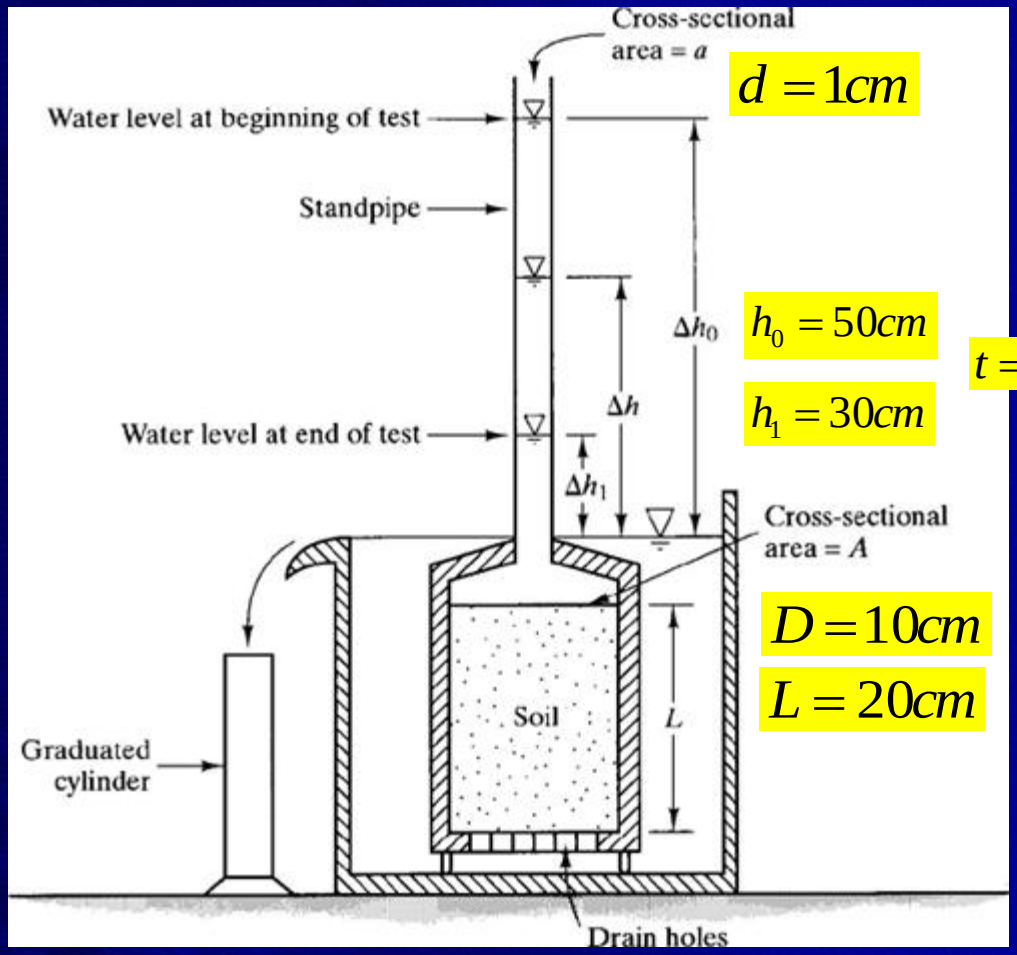
$$K = \frac{Q}{A}\frac{l}{\Delta h}$$

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

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

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

Permeâmetro de Carga Variável



$d = 1cm$

$h_0 = 50cm$

$h_1 = 30cm$

$t = 1h$

$D = 10cm$

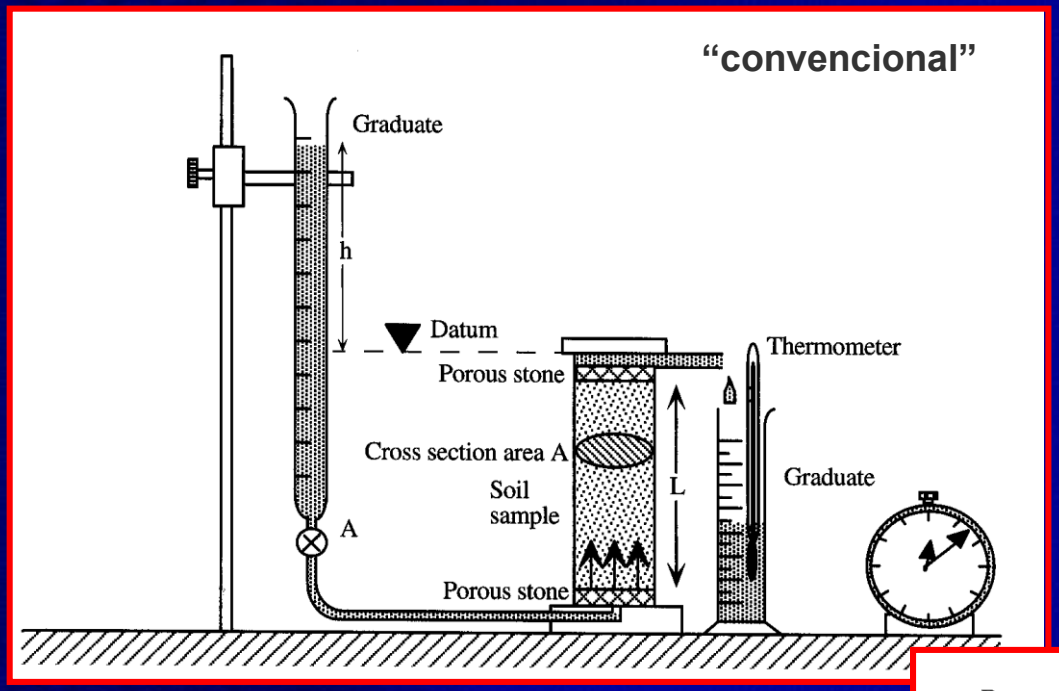
$L = 20cm$

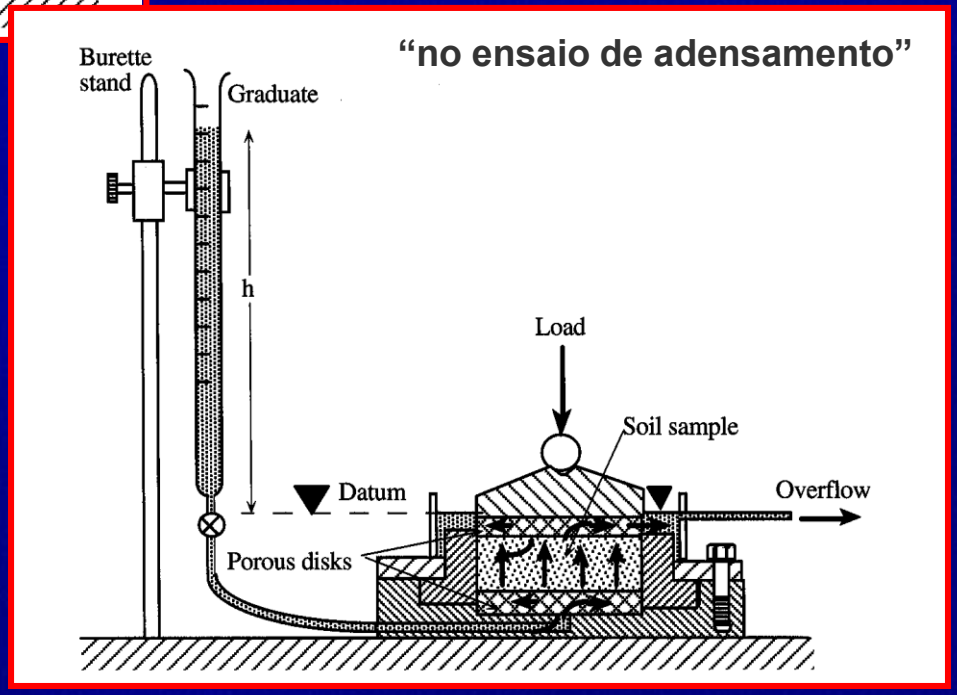
$$K = \frac{aL}{At}\ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

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

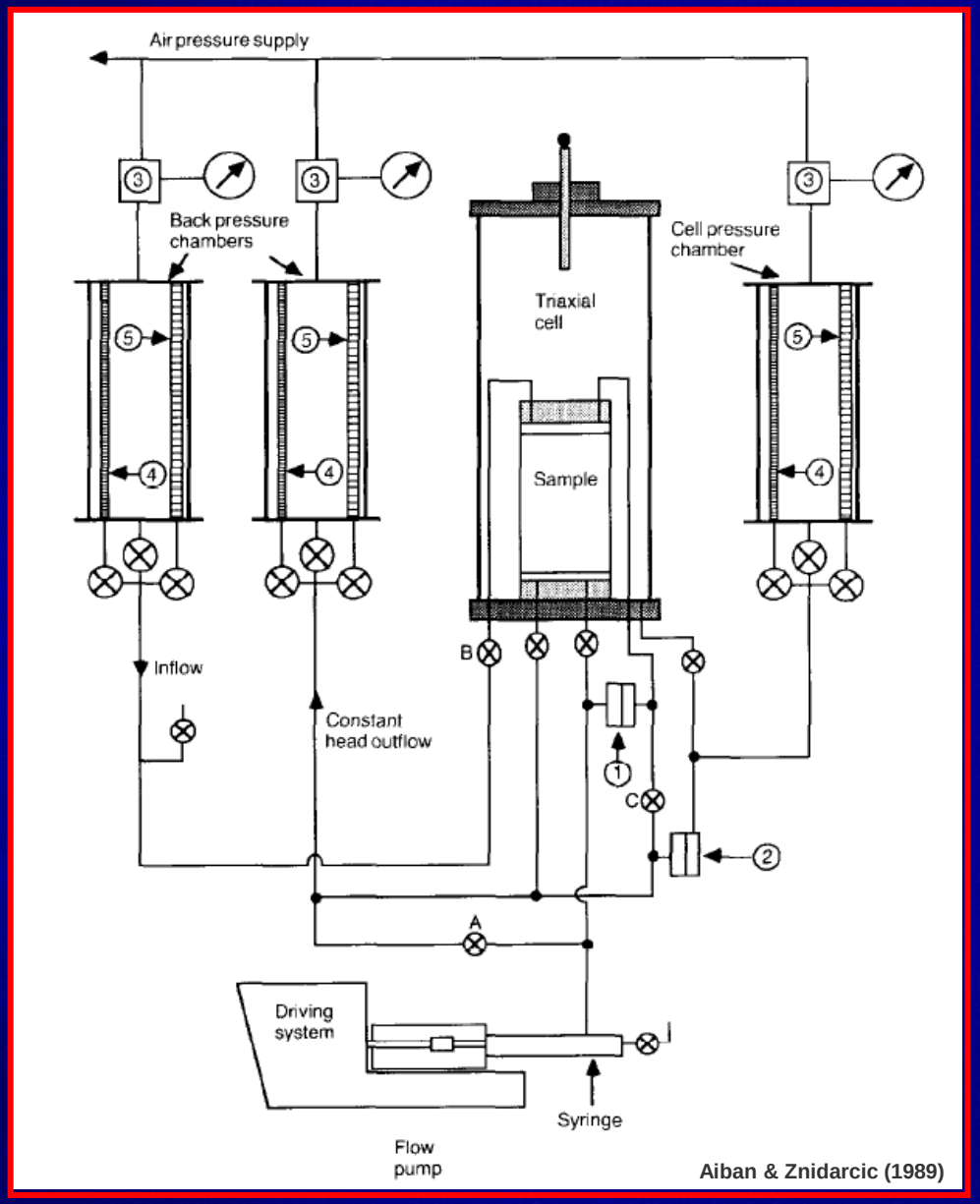
$$K = \frac{2.3*0.785*20}{78.54*3600}\log\left(\frac{50}{30}\right) = 2.8*10^{-5}cm/s = 2.8*10^{-7}m/s$$

Permeâmetro de Carga Variável

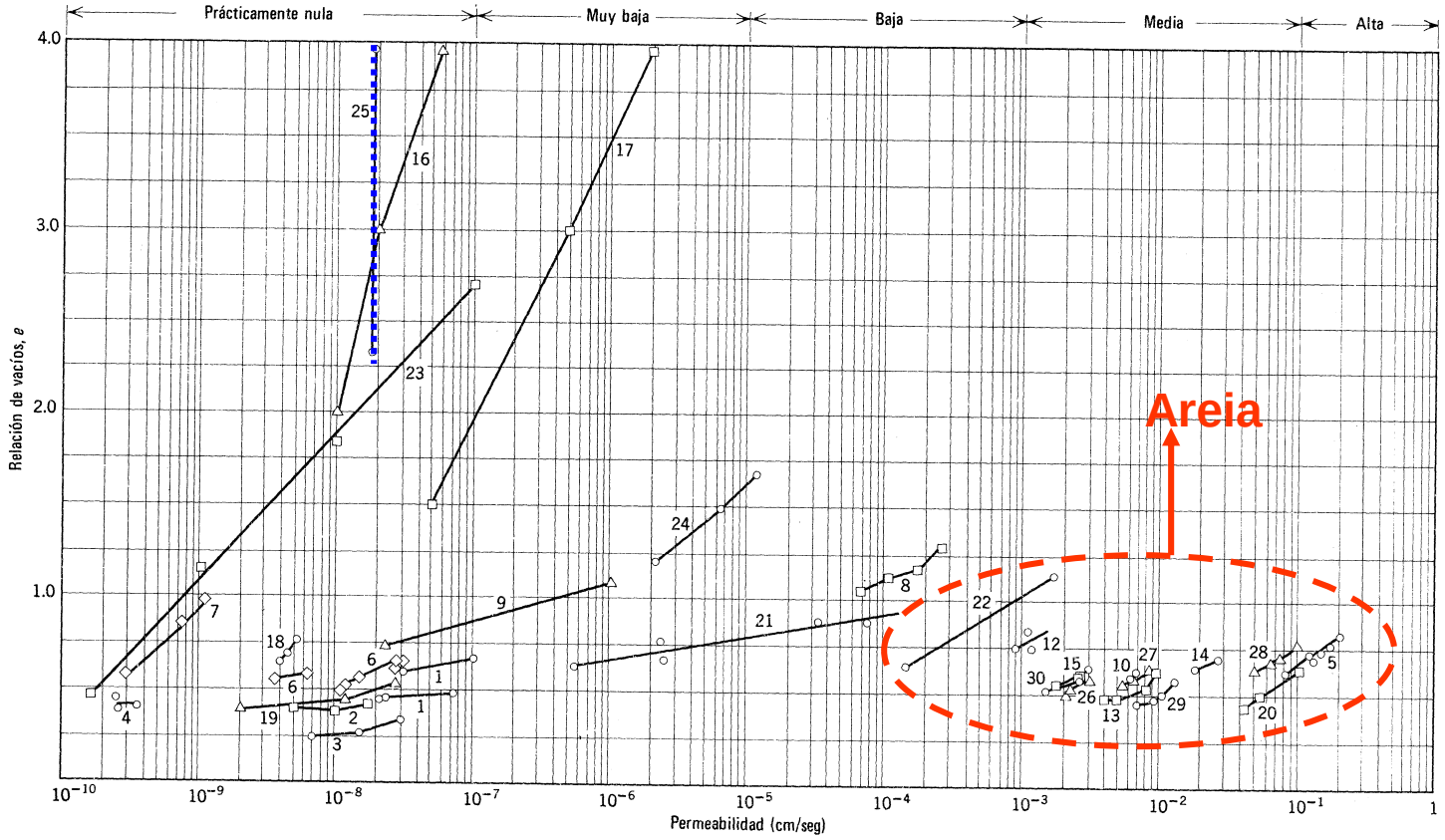




Permeâmetro de Vazão Constante



Aiban & Znidarcic (1989)



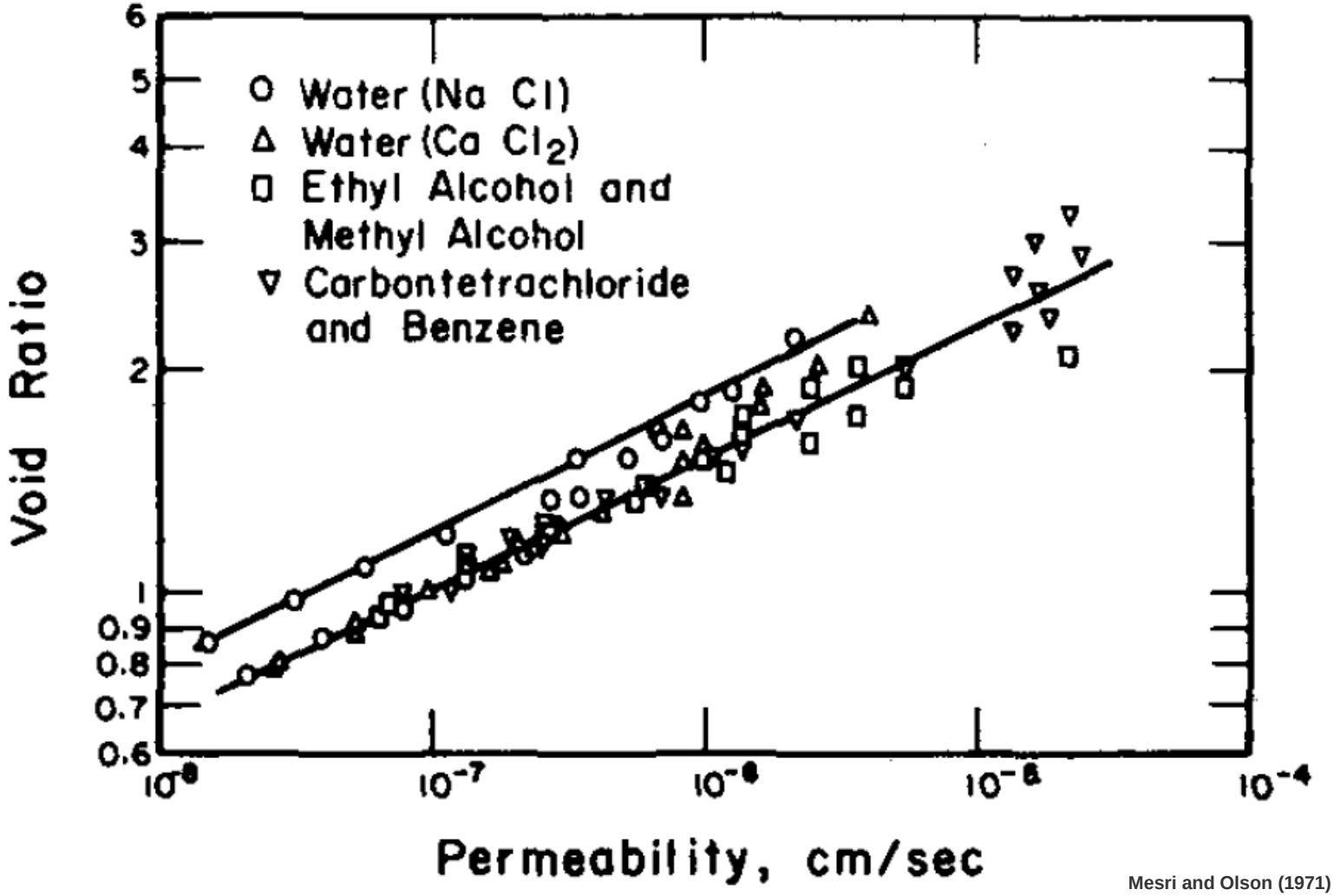
Identificación de los suelos

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

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

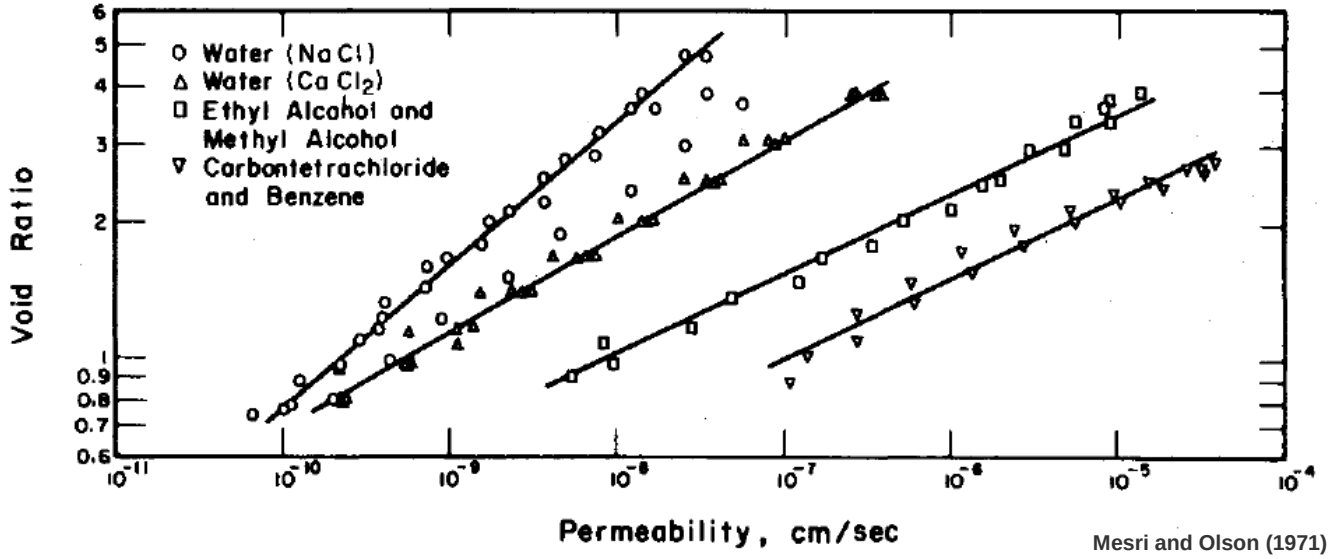
Lambe & Whitman (1969)

Kaolinita



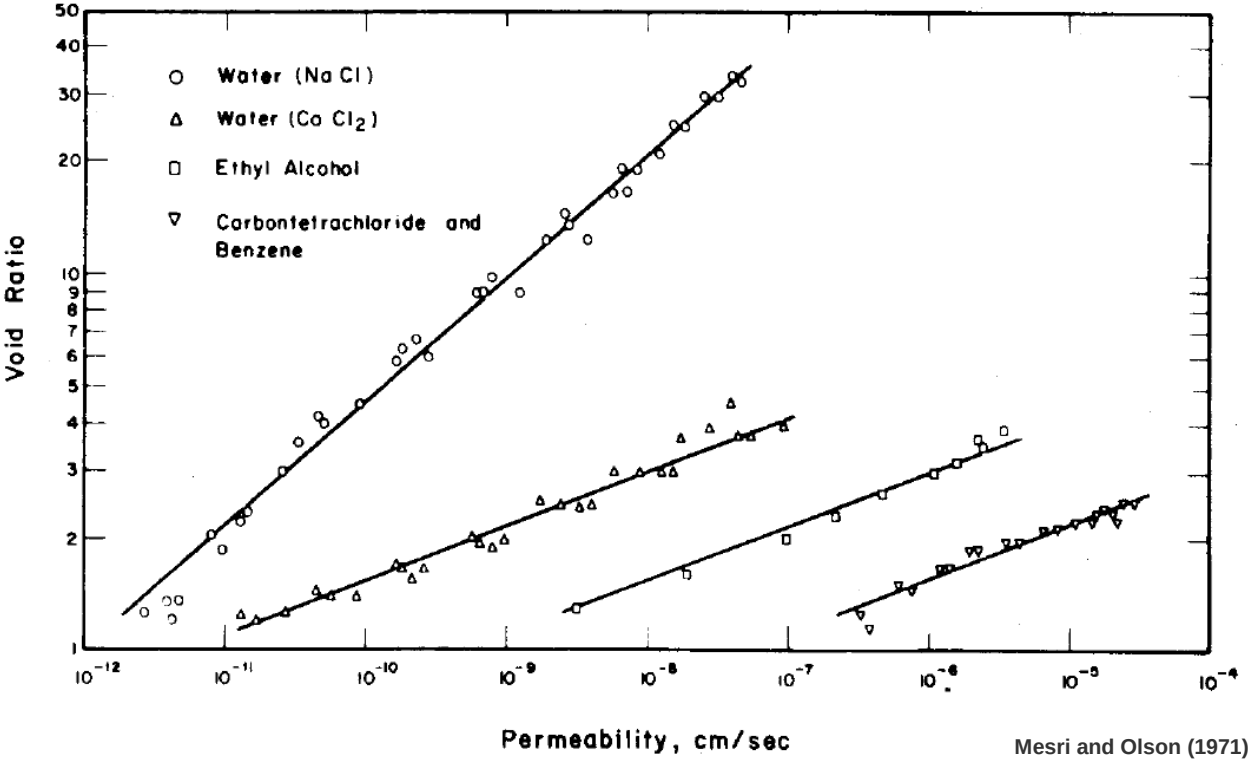
Mesri and Olson (1971)

Ilita



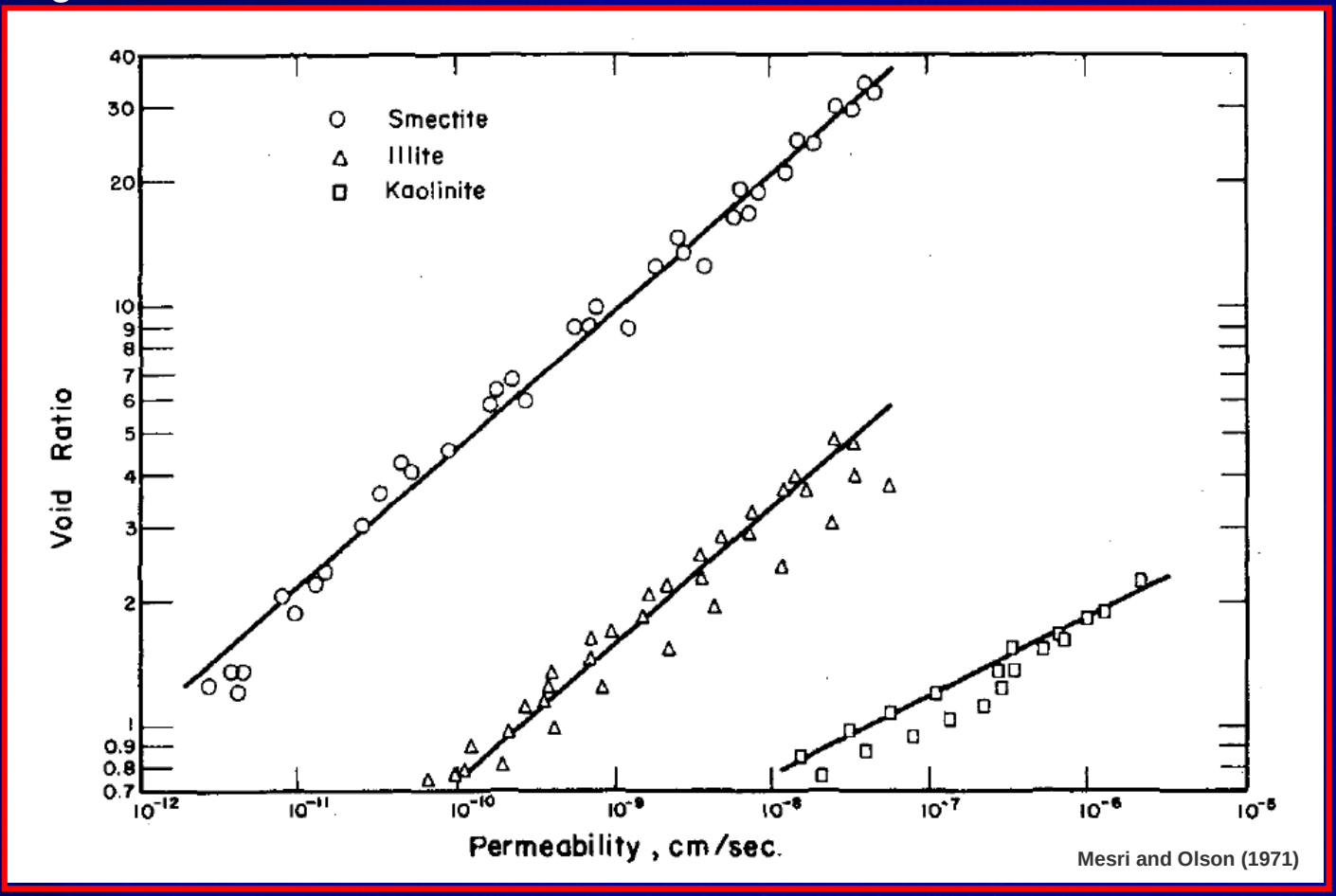
Mesri and Olson (1971)

Smectita



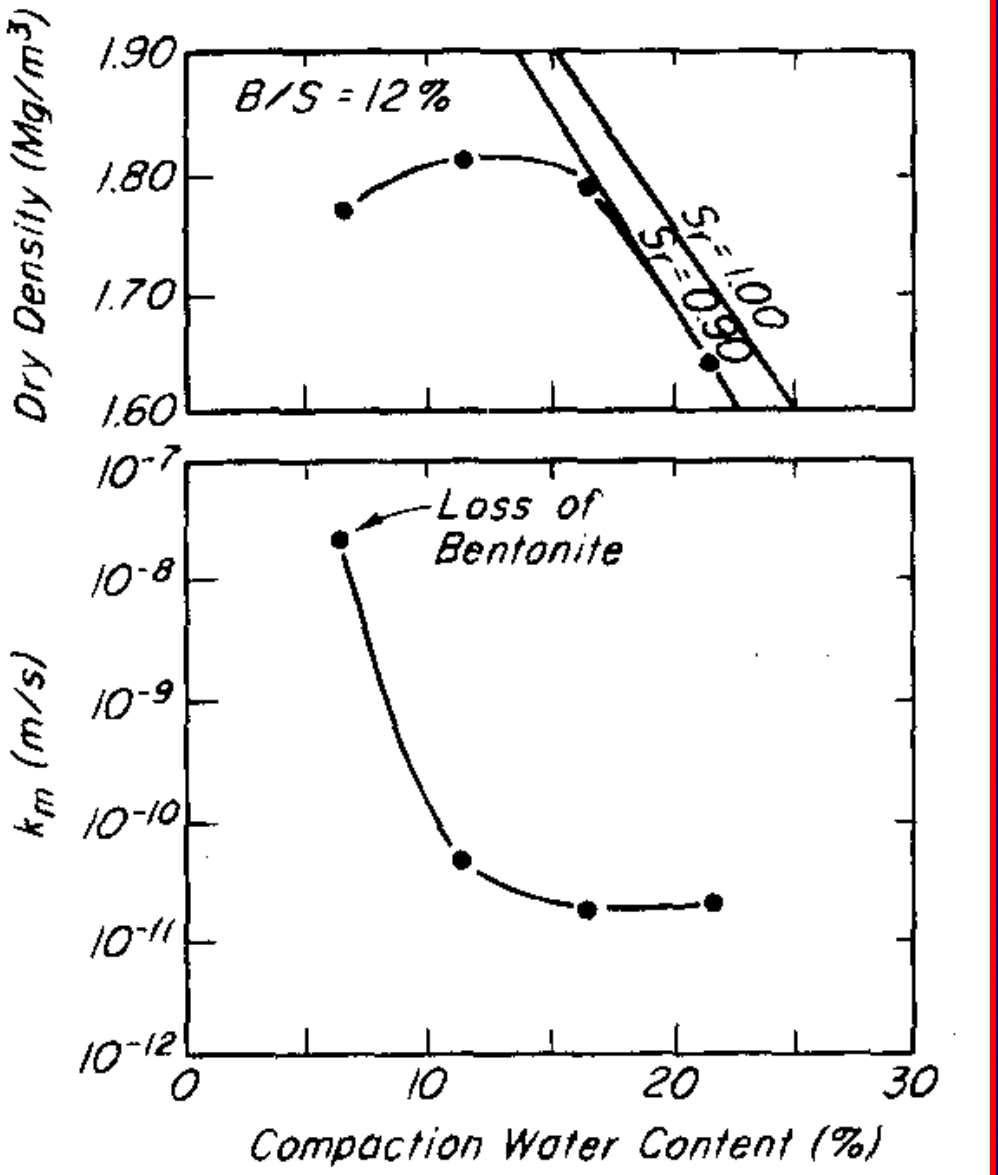
Mesri and Olson (1971)

Água

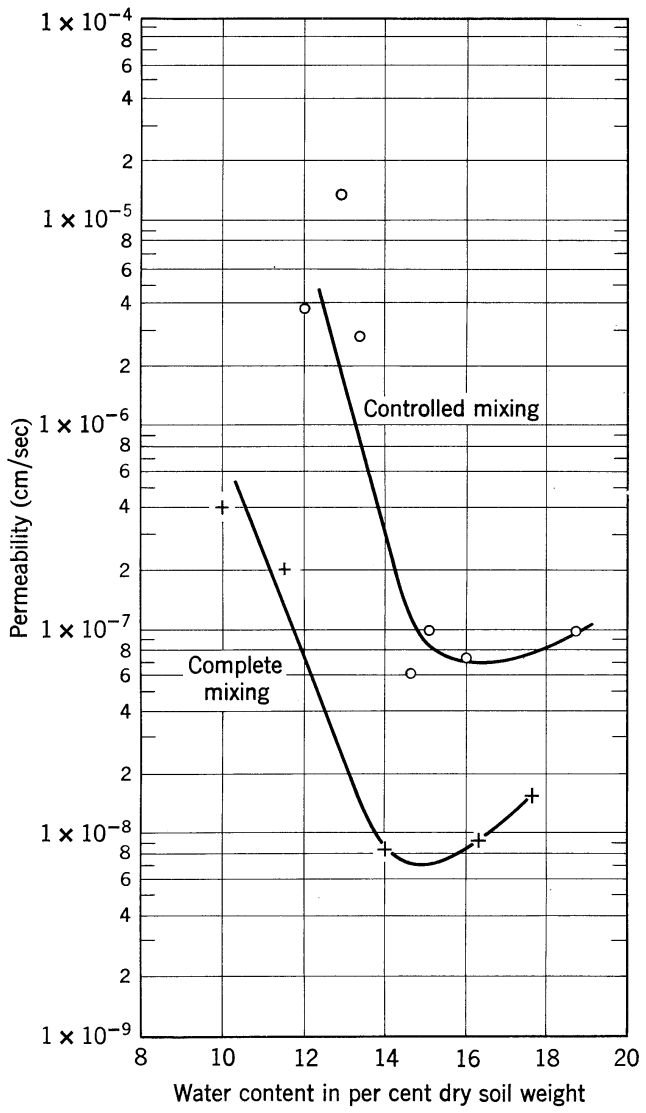


Mesri and Olson (1971)

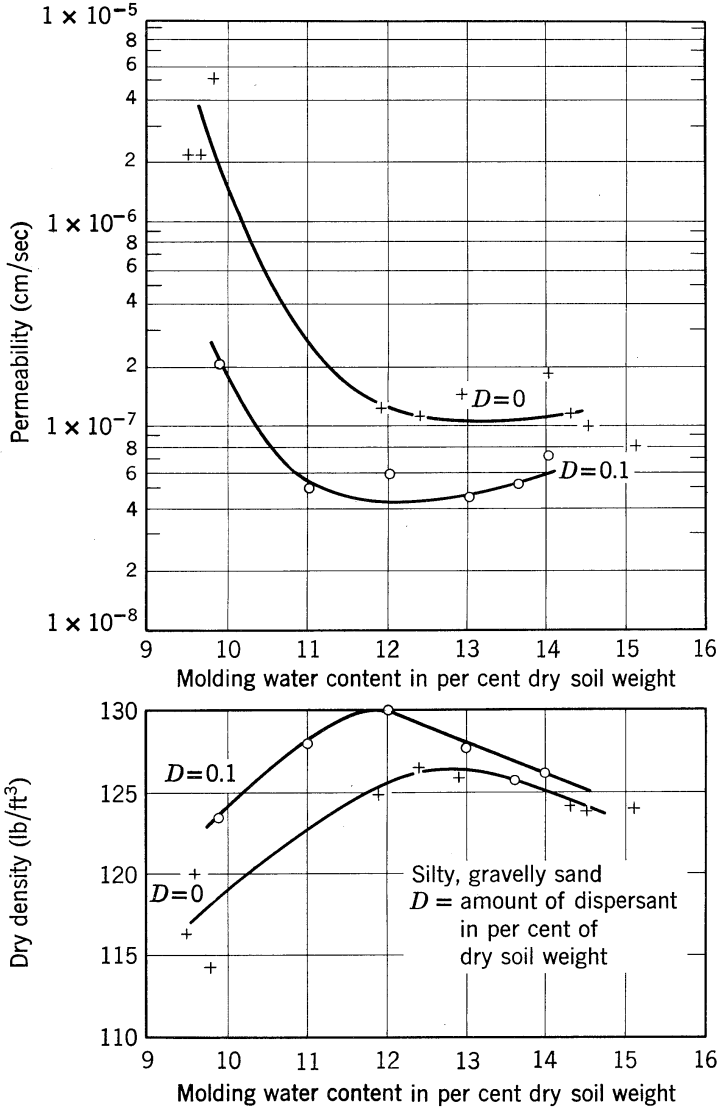
Compactação e Condutividade Hidráulica



Kenney et al. (1992)



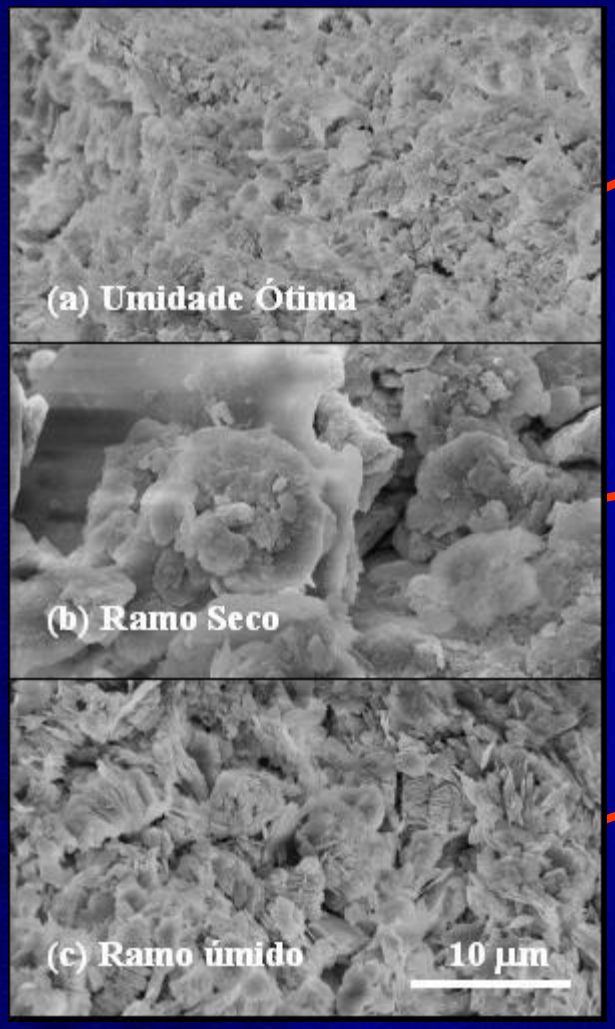
(a)



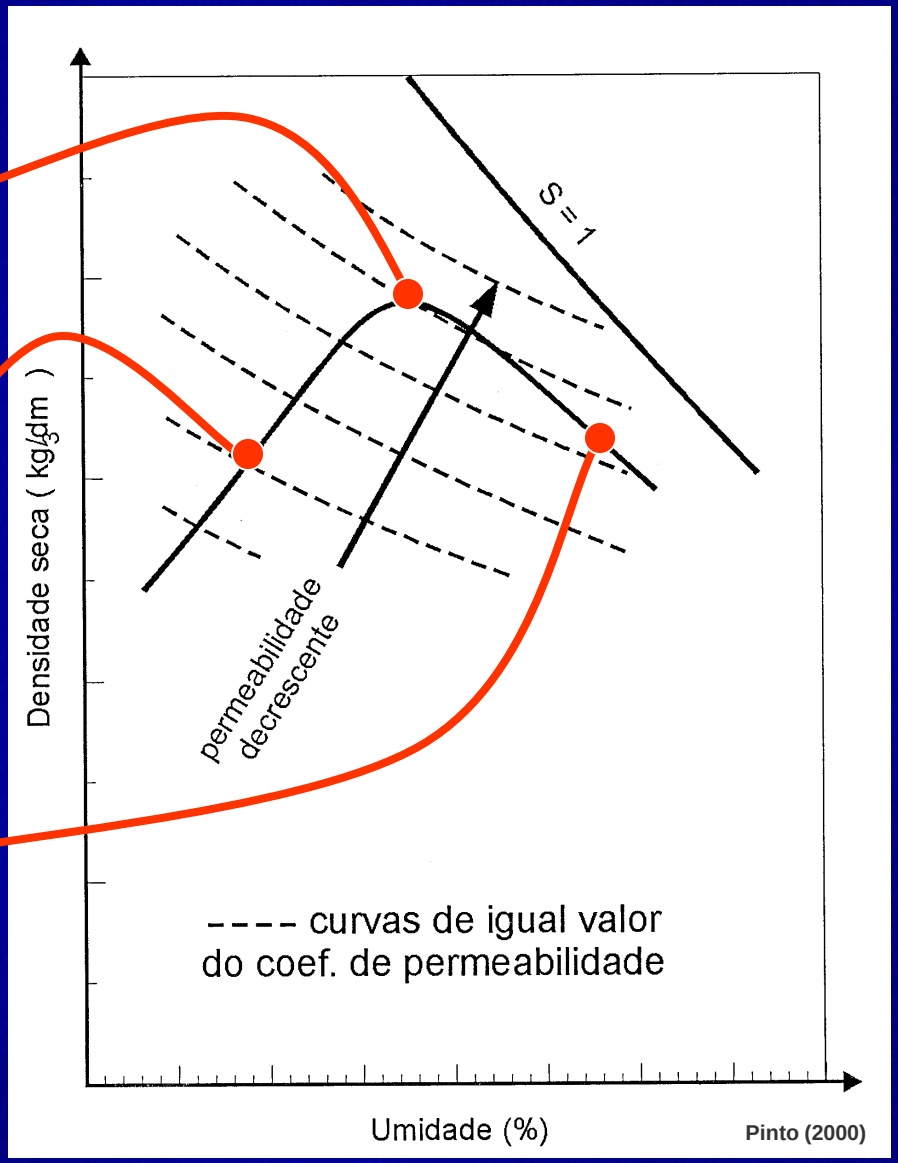
(b)

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

Lambe & Whitman (1969)



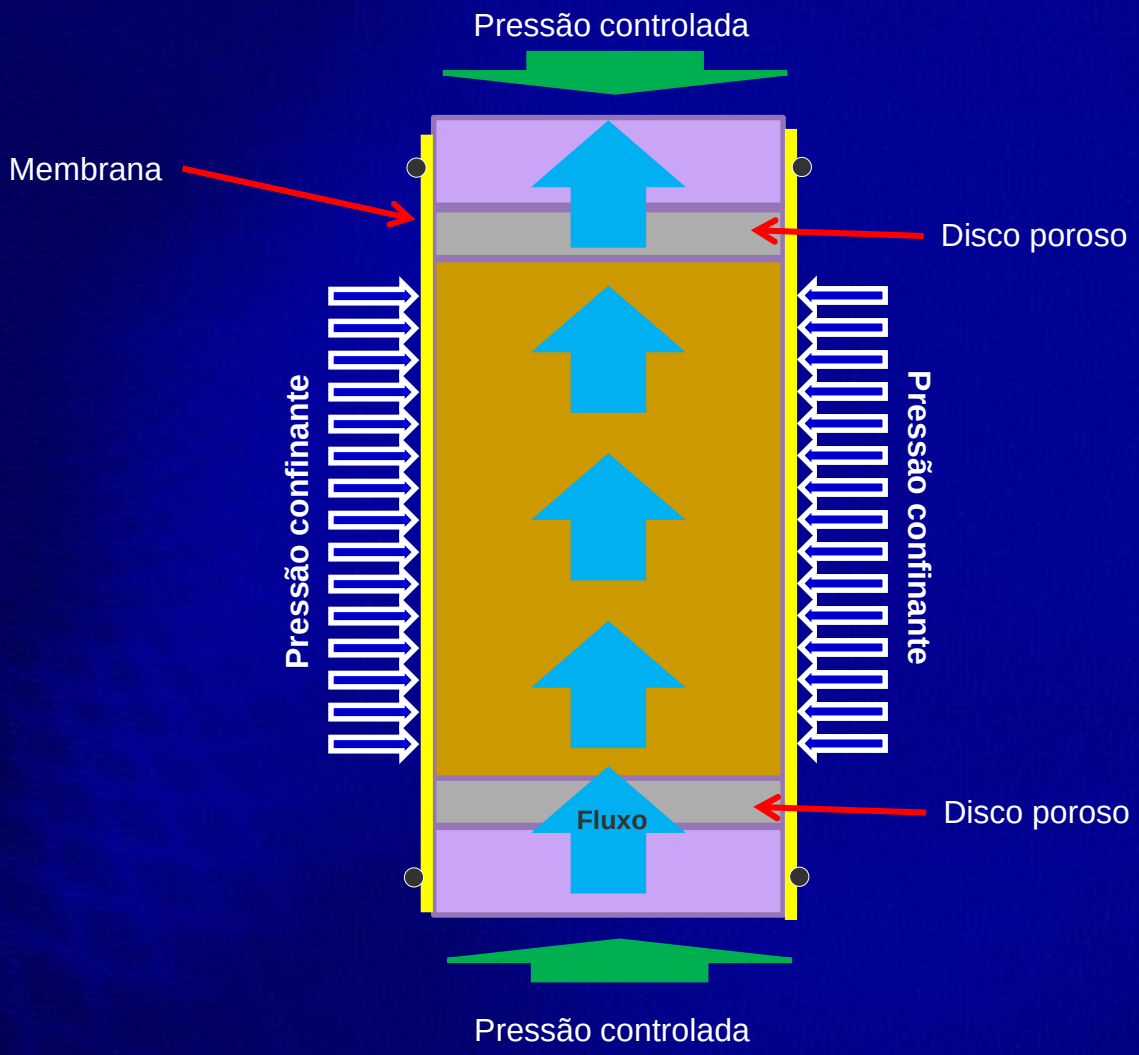
Oliveira & Marinho (2004)



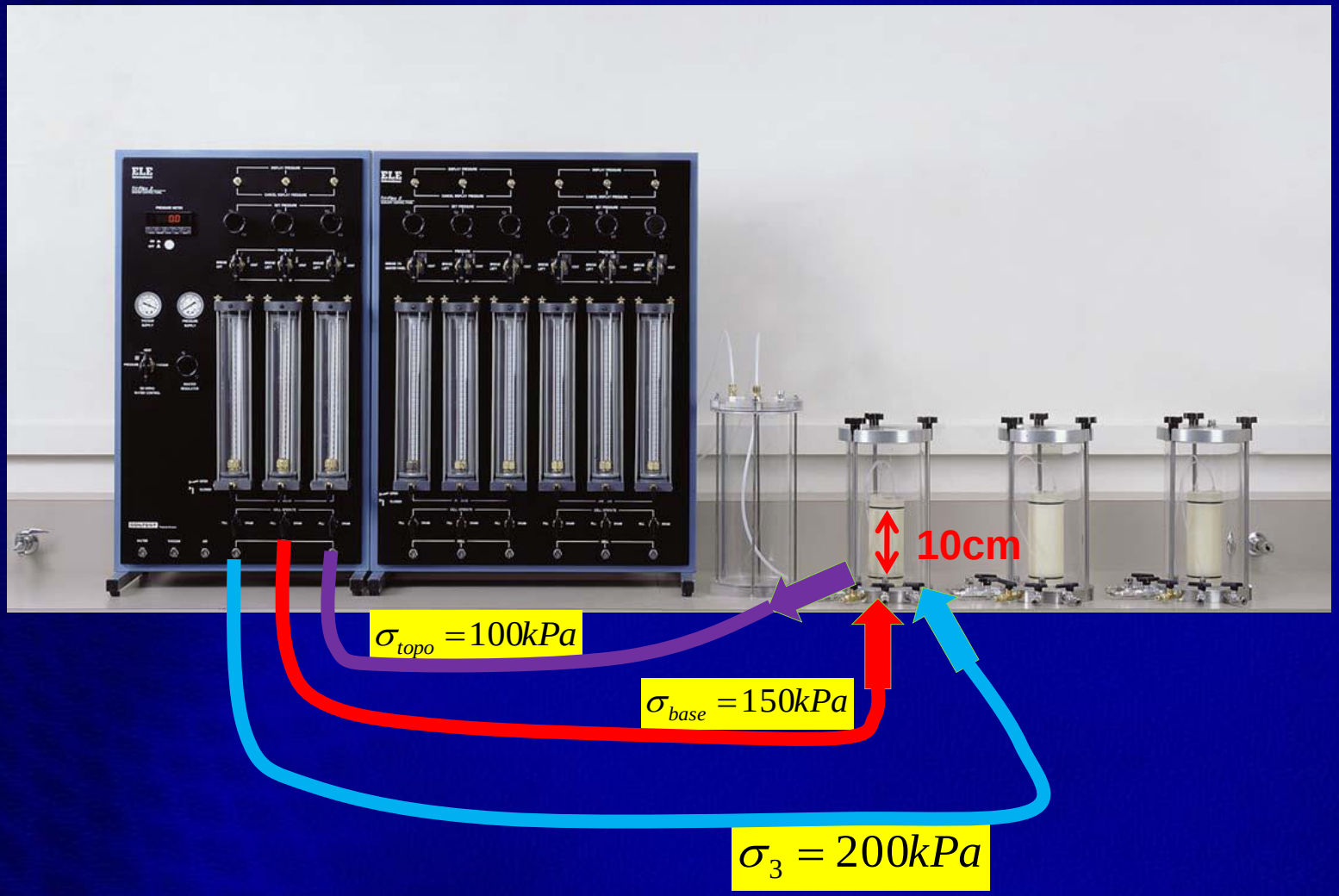
Pinto (2000)

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