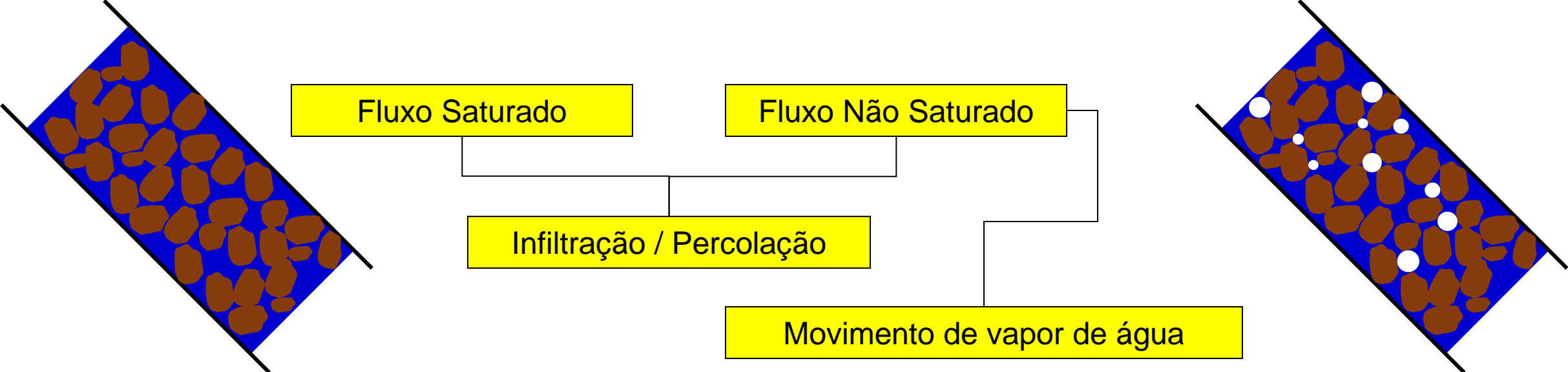


Fluxo Unidimensional em Solos

Prof. Fernando A. M. Marinho

2023

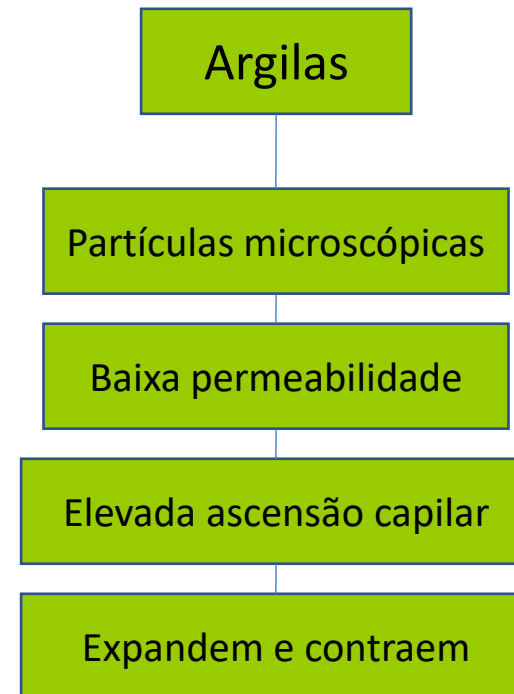
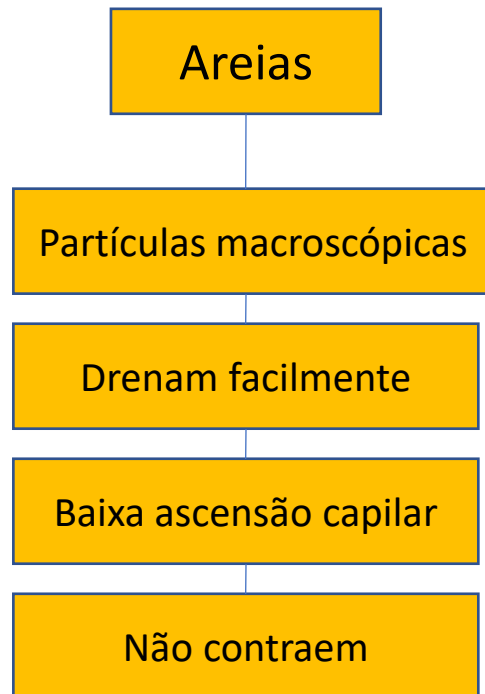
Movimento da água no solo



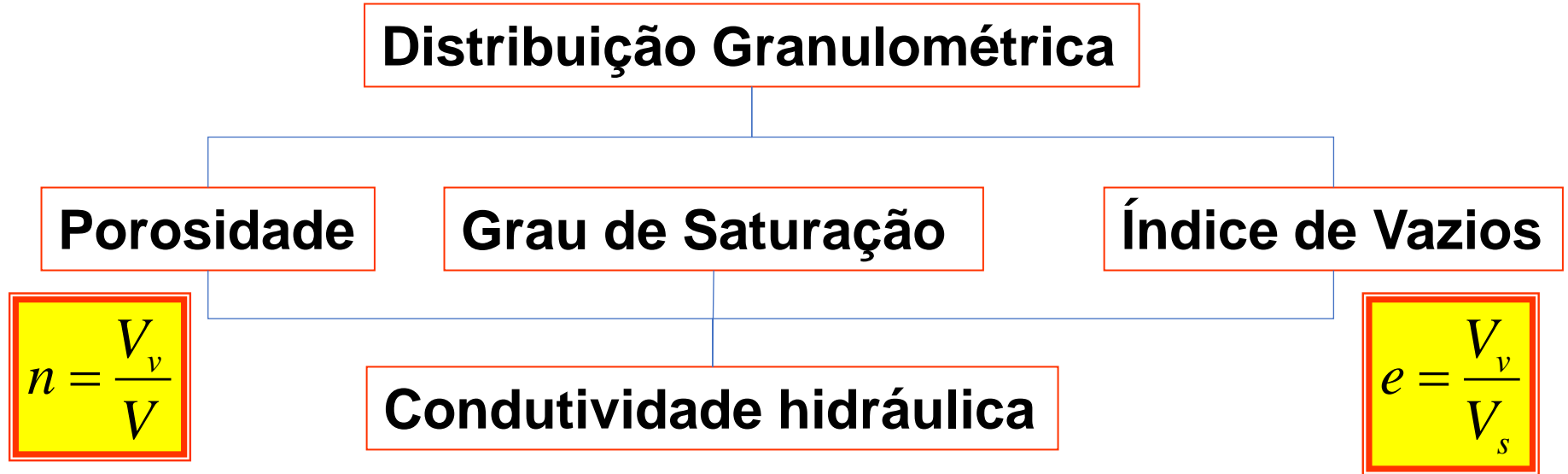
A Natureza da Estrutura dos Solos e o fluxo

Meio particulado com vazios interconectadas por onde o fluído passa.

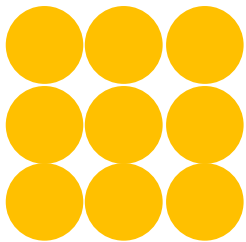
Por simplicidade podemos dividir os solos em dois tipos para destacar os seguintes aspectos:



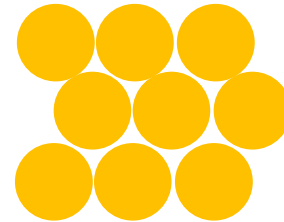
Os vazios dos solos e o fluxo



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

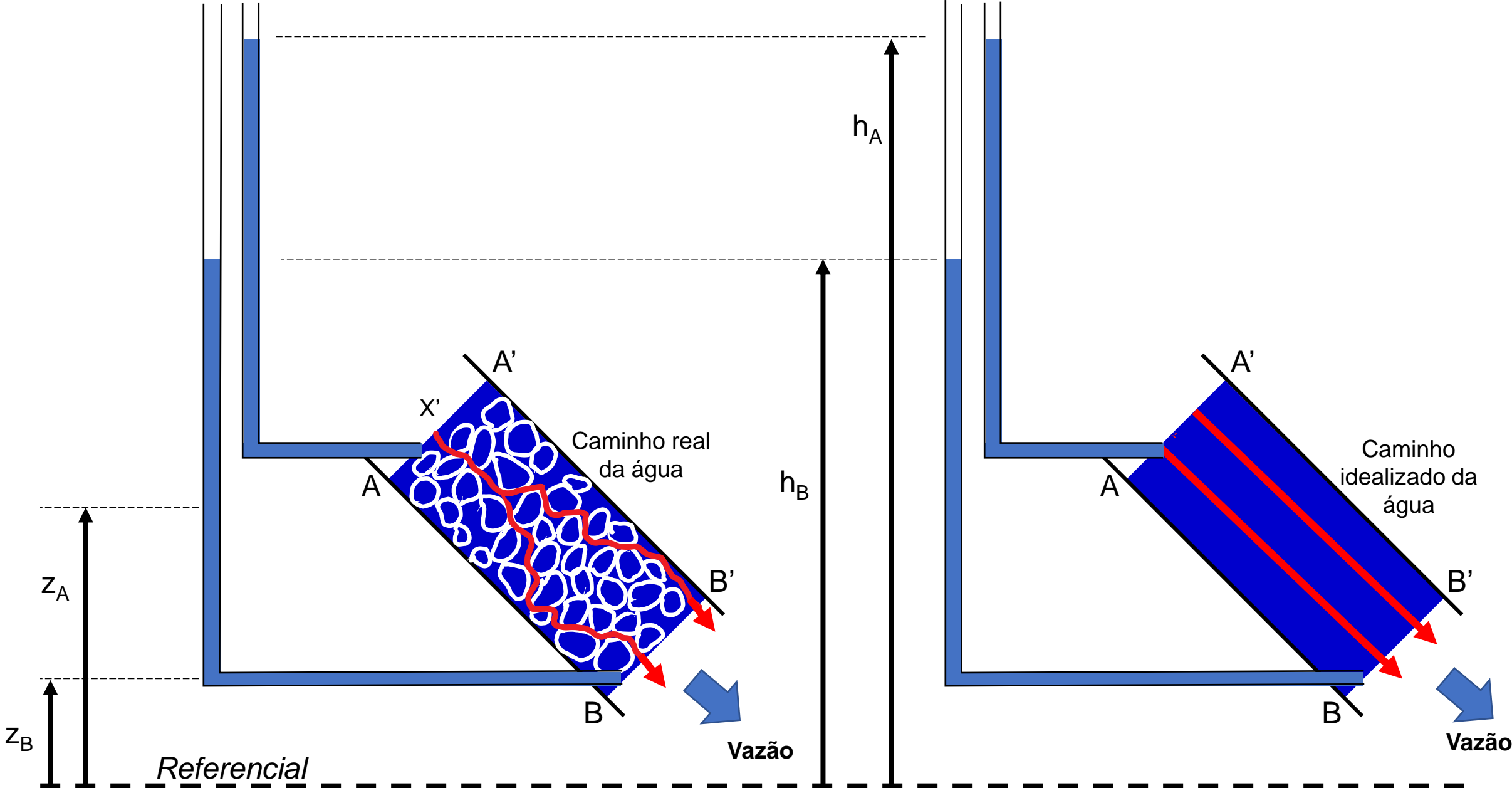


$$n = 1 - \frac{\pi}{6} = 0.476$$
$$e = 0.322$$
$$V_v = 0.24 \text{ cm}^3 \quad (V = 1 \text{ cm}^3)$$

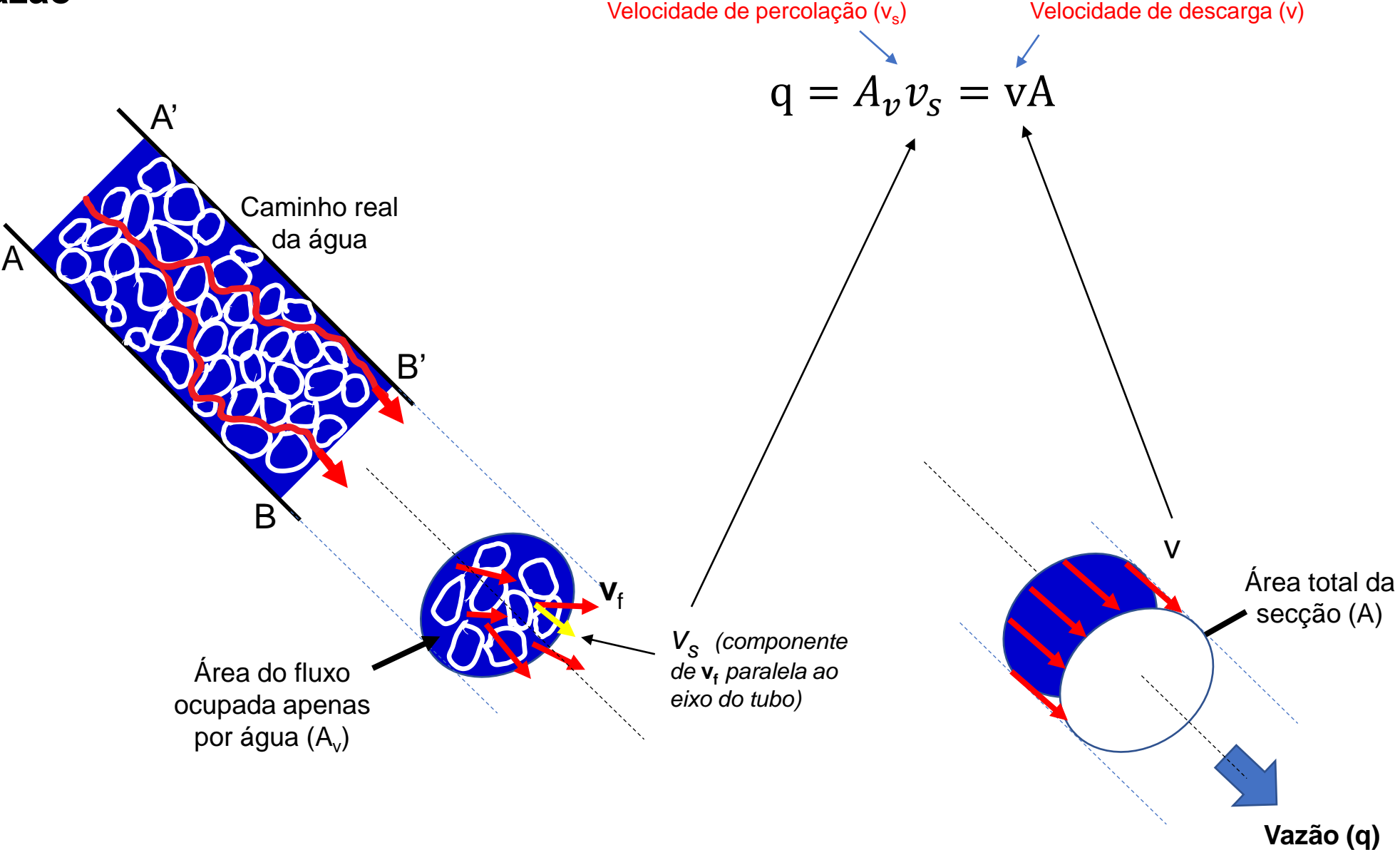


$$n = 1 - \frac{\sqrt{2}}{6} \pi = 0.26$$
$$e = 0.206$$
$$V_v = 0.17 \text{ cm}^3 \quad (V = 1 \text{ cm}^3)$$

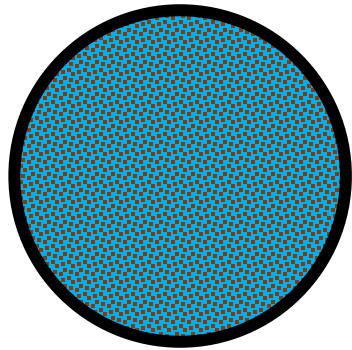
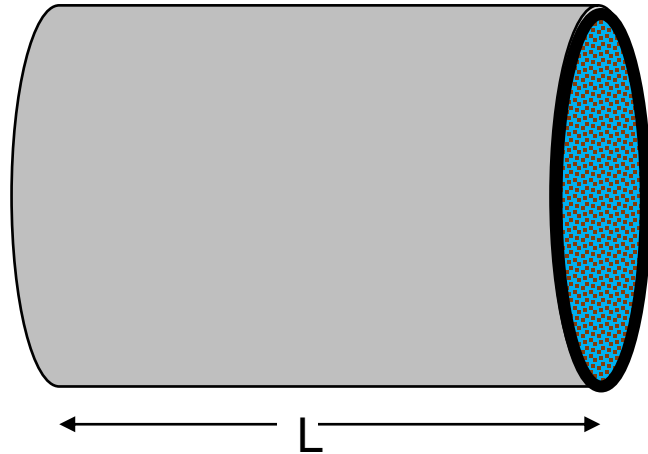
Os vazios dos solos e o caminho da água



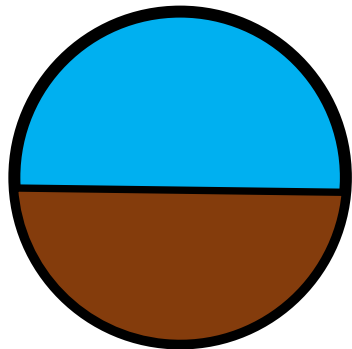
Velocidade e vazão



Velocidade, índice de vazios e porosidade



Área total (A)



Área dos vazios (A_v)

Área dos sólidos (A_s)

Velocidade de descarga (v)

Velocidade de percolação (v_s)

$$q = vA = A_v v_s$$

$$A = A_v + A_s$$

$$q = v(A_v + A_s) = A_v v_s$$

$$v_s = \frac{v(A_v + A_s)}{A_v} = \frac{v(A_v + A_s)L}{A_v L} = \frac{v(V_v + V_s)}{V_v}$$

$$v_s = v \left[\frac{1 + \left(\frac{V_v}{V_s}\right)}{\frac{V_v}{V_s}} \right] = v \left(\frac{1 + e}{e} \right) = \frac{v}{n}$$

Energia Cinética (Energia de movimento)

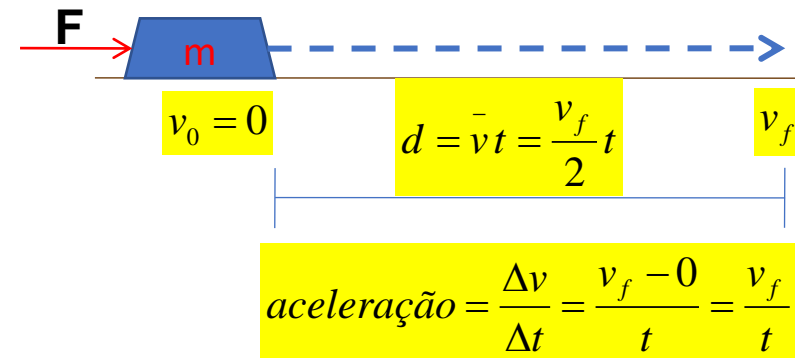
$$1N = \frac{kg\ m}{s^2}$$

Trabalho

$$Nm = J = \text{joule}$$

Como surge a energia cinética?

Do trabalho realizado no "objeto"



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

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.

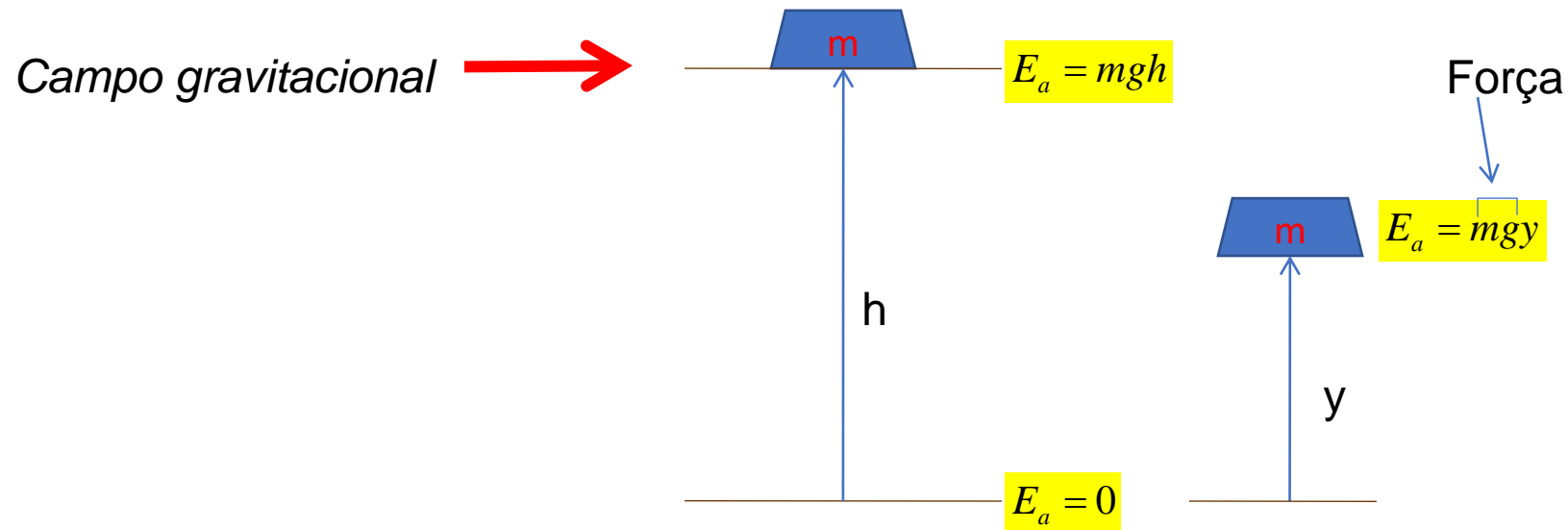
Energia Cinética de um Fluido em movimento é melhor expressa por unidade de volume

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

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 objeto de massa m possui em virtude de sua posição em relação à superfície da Terra. Essa posição é medida pela altura h do objeto em relação a um nível zero arbitrário (referencial).

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

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

Energia de Pressão

Do que é a energia de pressão?

É a força por unidade de área do fluido.

Pressão hidrostática

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

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

A 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

★ 1700 † 1782

A Equação de Bernoulli

Fluido:

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

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

÷ ρg para obter em altura de coluna do fluido

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

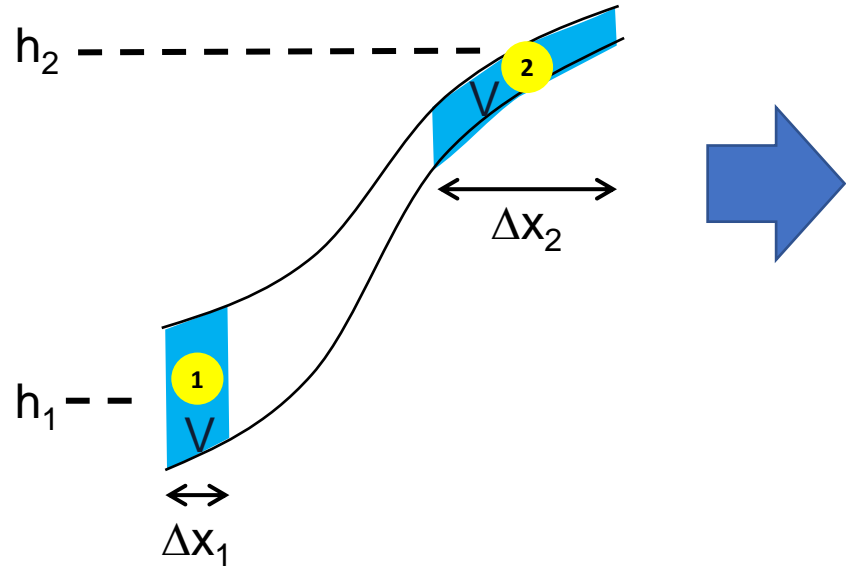
Para levar em conta a perda de energia devida a resistência viscosa nos poros a equação fica:

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

 Perda de carga total

A Equação de Bernoulli

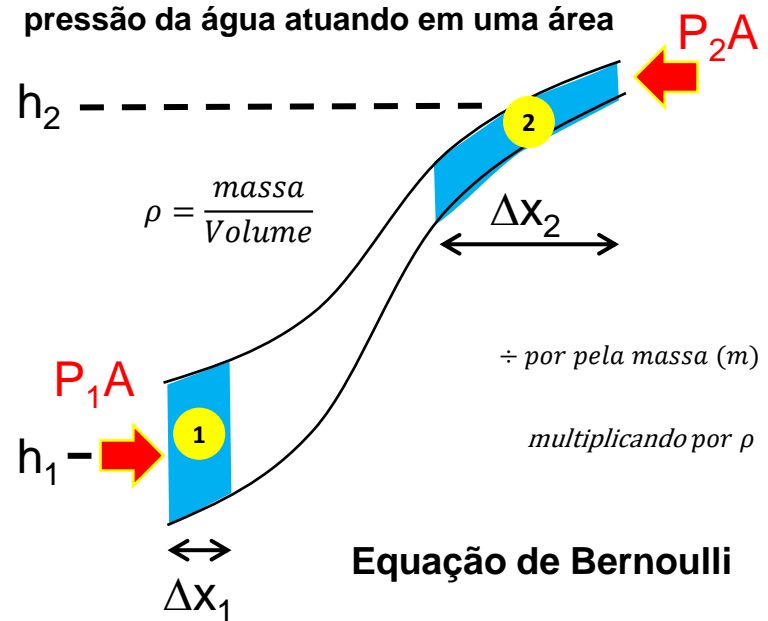
Considere a água movendo-se da região 1 para a região 2 (mesmo volume)



O trabalho realizado para ir de 1 para 2 vale:

$$W_{1 \rightarrow 2} = \underbrace{\left(\frac{1}{2}mv_2^2\right)}_{\text{cinética}} + \underbrace{mgh_2}_{\text{potencial}} - \left(\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1\right)$$

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



O trabalho é: $W = Fd$

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

$$W = Fd = (P_1A\Delta x_1 - P_2A\Delta x_2) = (P_1V - P_2V)$$

$$W = (P_1V - P_2V) = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 - \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1$$

÷ por pela massa (m) $W = \left(P_1 \frac{V}{m} - P_2 \frac{V}{m}\right) = \frac{1}{2}v_2^2 + gh_2 - \frac{1}{2}v_1^2 + gh_1$

multiplicando por ρ $W = \left(\frac{P_1}{\rho} - \frac{P_2}{\rho}\right) = \frac{1}{2}v_2^2 + gh_2 - \frac{1}{2}v_1^2 + gh_1$

Equação de Bernoulli

$$W = \left(P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1\right) = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

Desconsiderando a Energia Cinética

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

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

$$0.1 \text{ m/s} \Rightarrow 0.0005 \text{ m} = 0.05 \text{ cm}$$

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

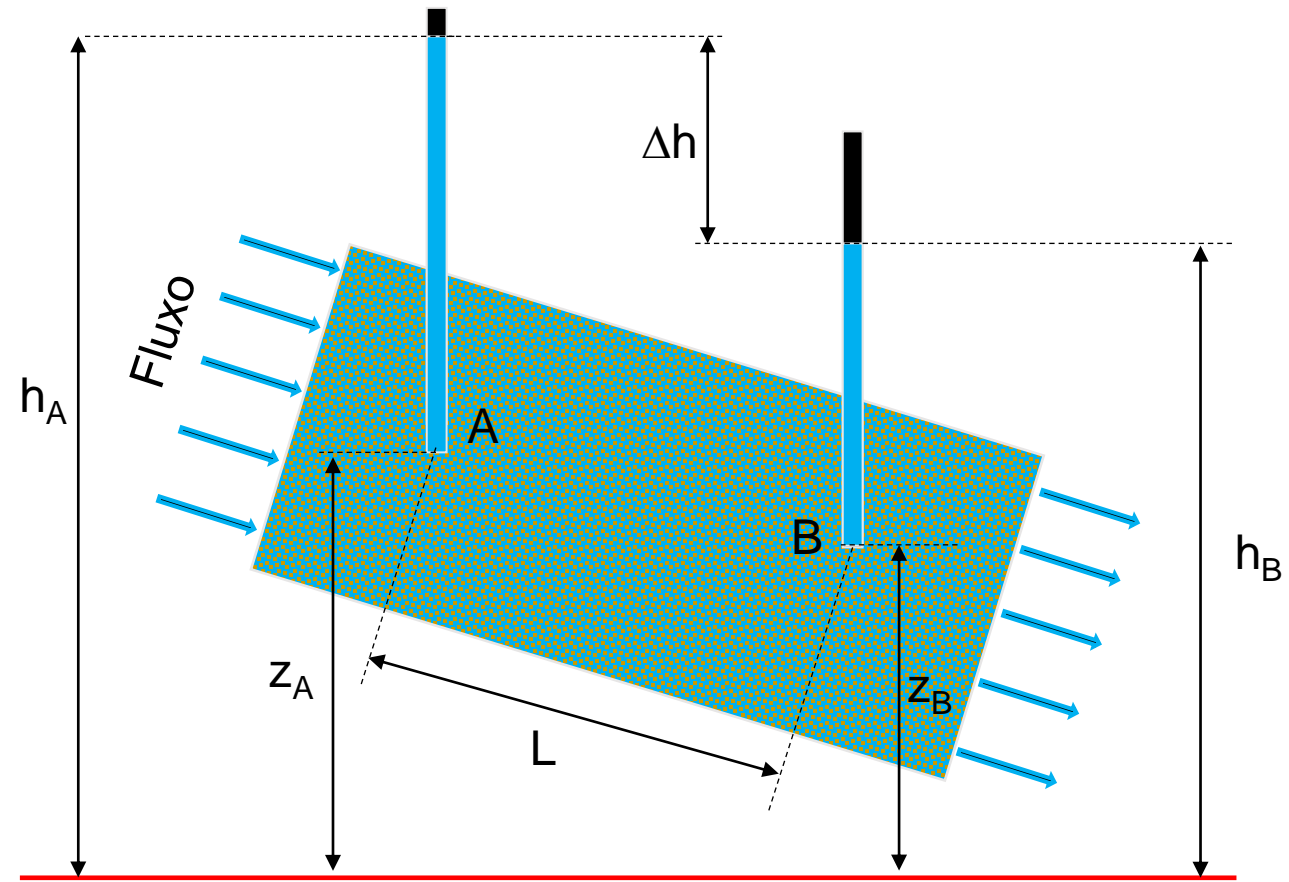
Logo:

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

A carga Total em qualquer ponto vale:

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

A 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

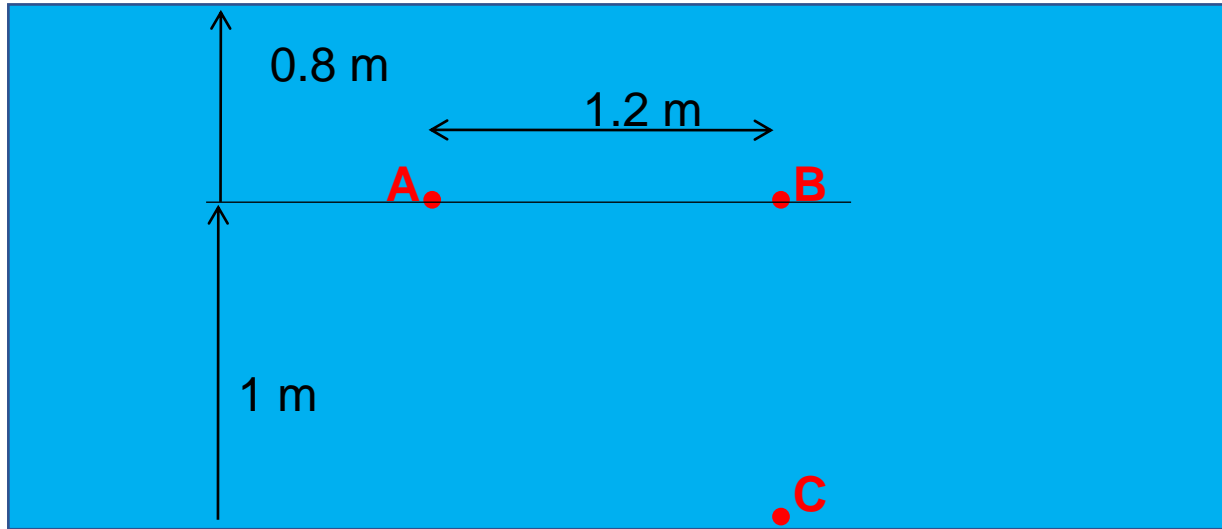
$$\Delta h = h_A - h_B$$

Gradiente hidráulico

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

Exemplo

Determinar as cargas hidráulicas no pontos indicados



$$h_{TA} = h_{PA} + h_{AA}$$

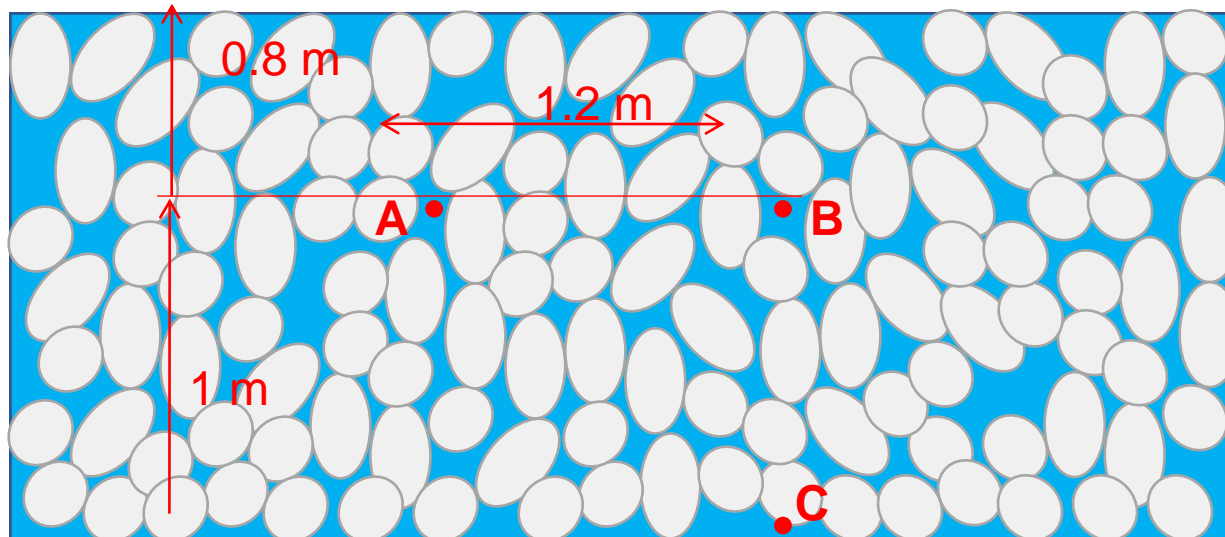
$$h_{TA} = 0.8 + 1 = 1.8m$$

$$h_{TB} = h_{PB} + h_{AB}$$

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

$$h_{TC} = h_{PC} + h_{AC}$$

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

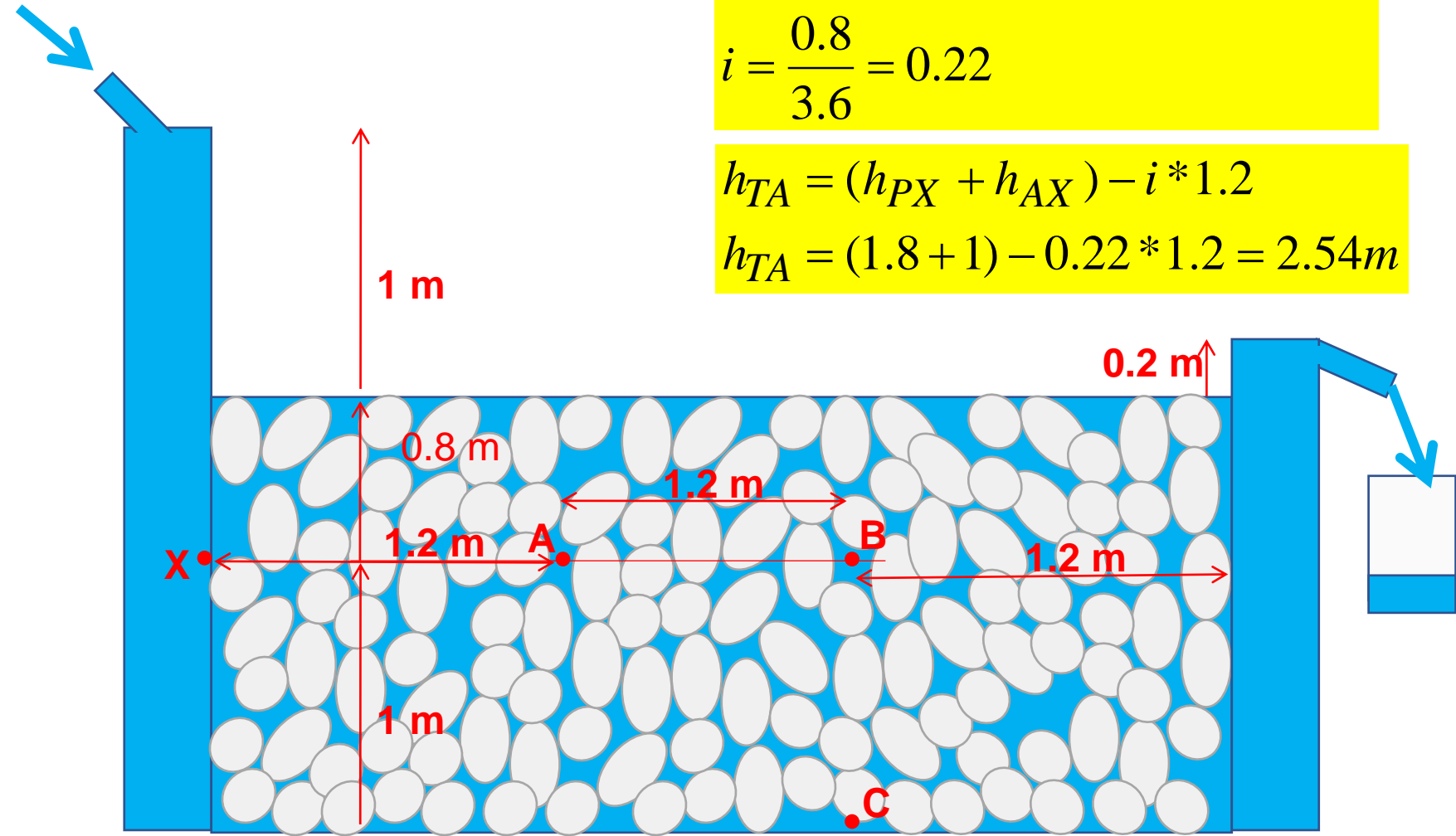


Exemplo

Determinar as cargas hidráulicas no pontos indicados

$$\Delta h = 0.8m$$
$$\text{gradiente de perda de carga} = \frac{\Delta h}{L}$$
$$i = \frac{0.8}{3.6} = 0.22$$

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

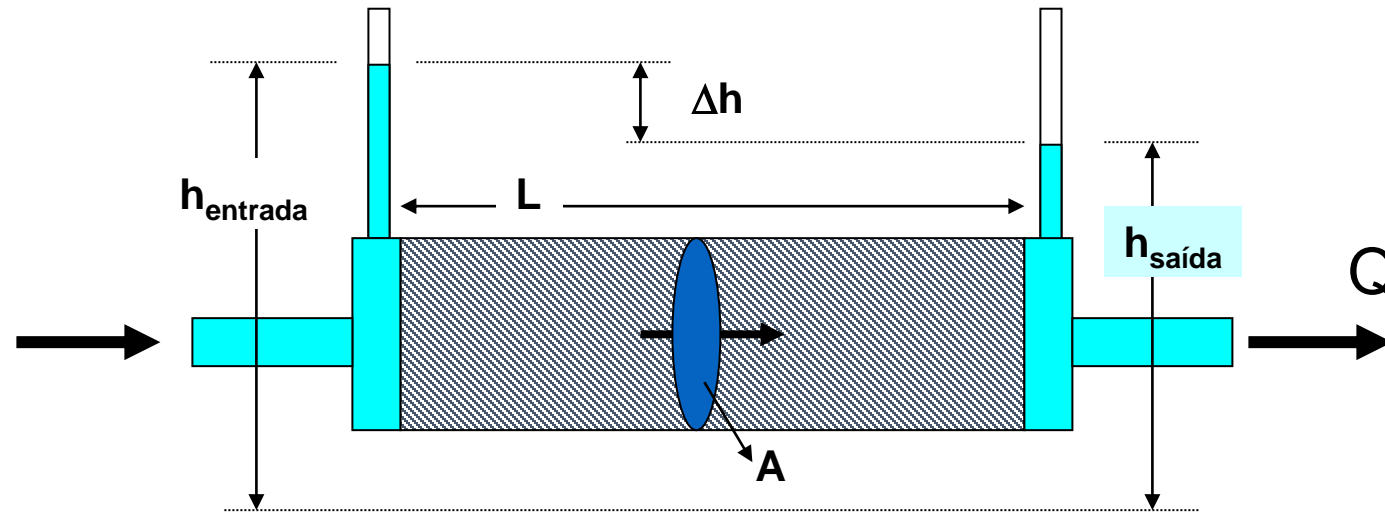


Lei de Darcy

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.



Henry Darcy (1803 to 1858)



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

Lei de Darcy

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

Q - vazão

K – condutividade hidráulica

A - Área do permeâmetro

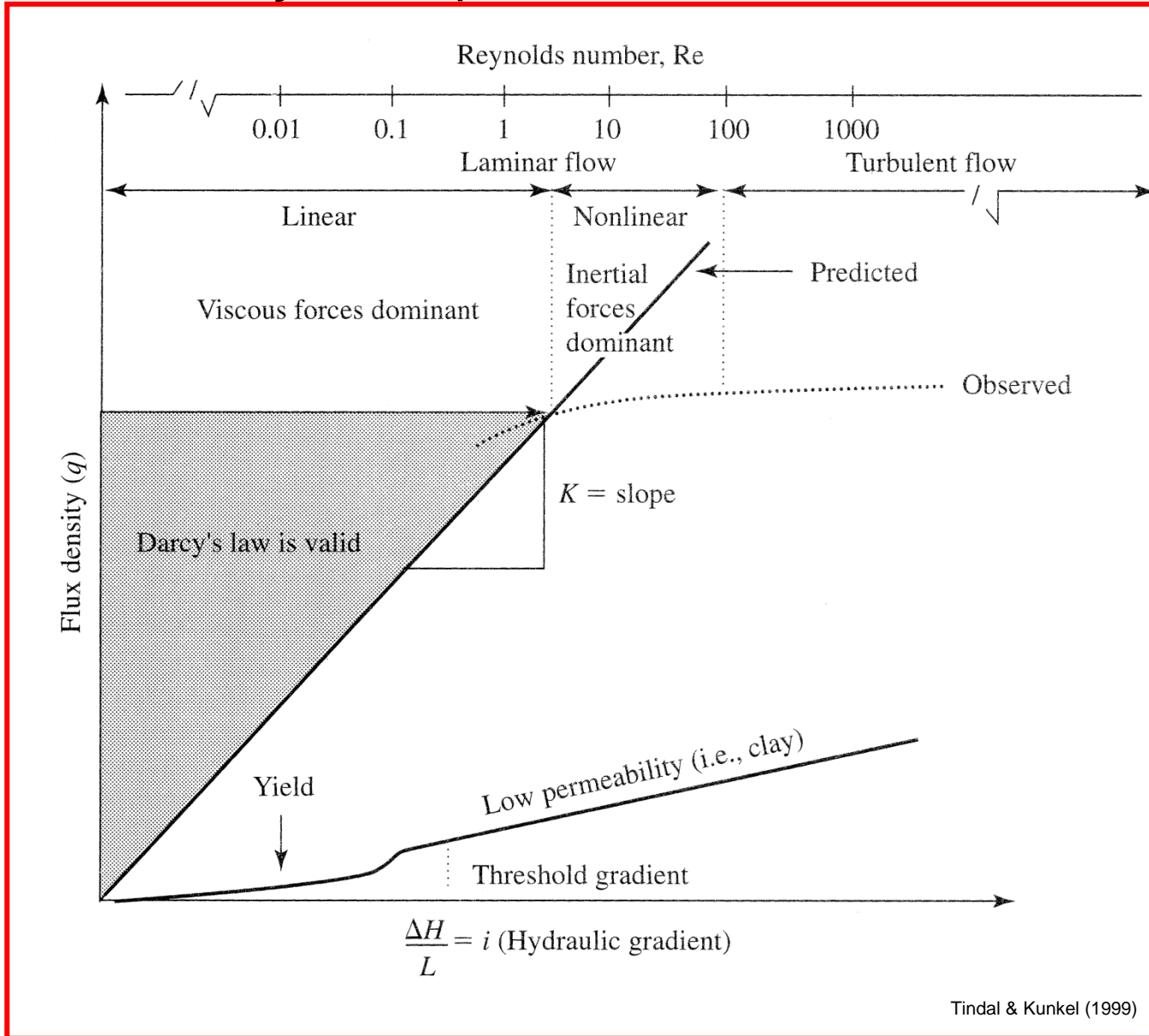
$$\frac{h}{L} = i \Rightarrow \text{gradiente hidráulico}$$

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

$$v = Ki$$

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

Permeabilidade e Condutividade Hidráulica

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

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

Condutividade hidráulica (m/s)

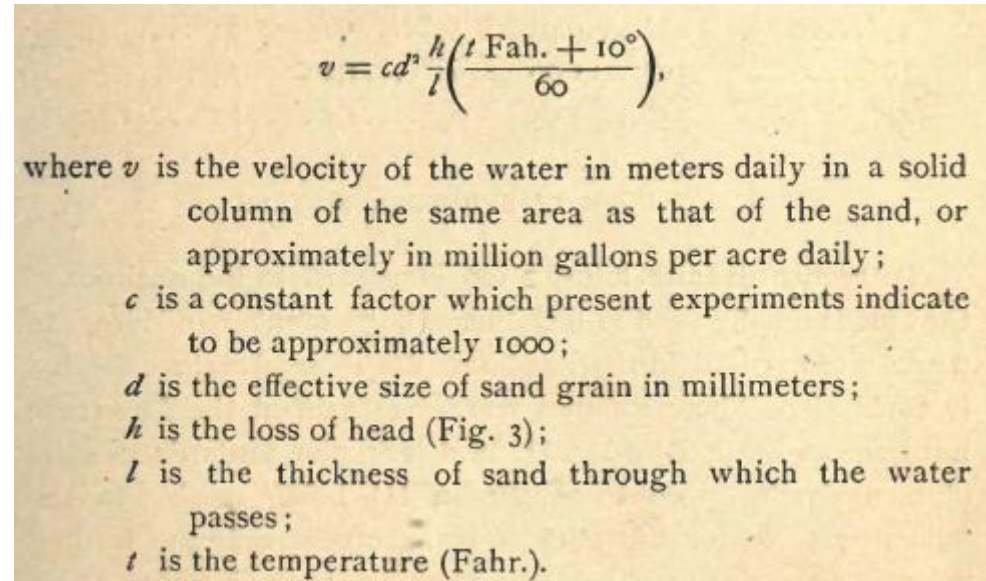
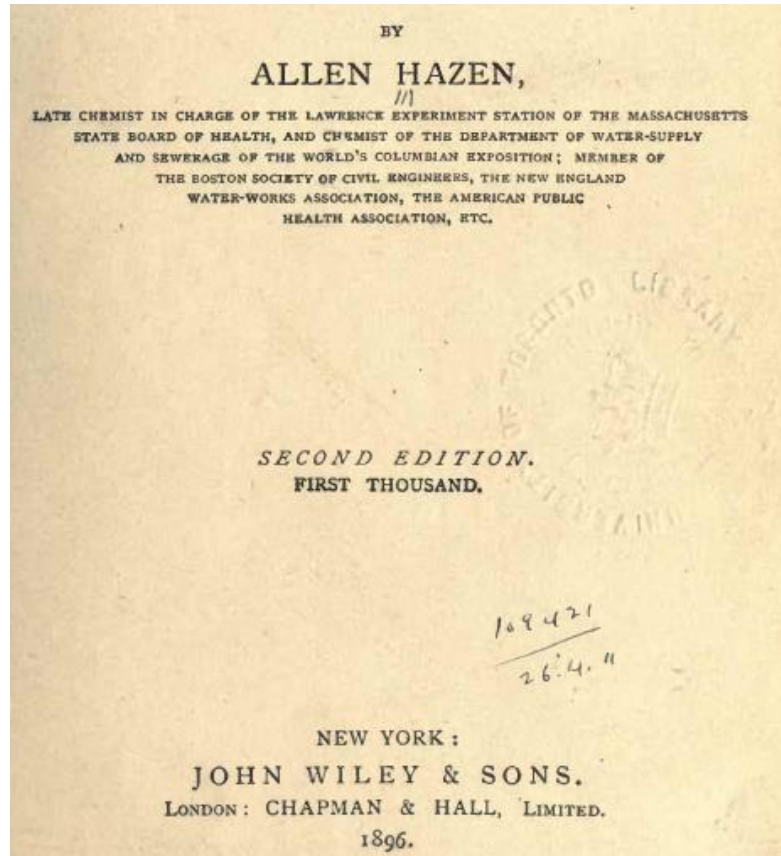
21°C

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 ($9.81 \frac{m}{s^2}$)

Correlação empírica para K



Hazen (1869-1930)

Valores de C encontrados na literatura

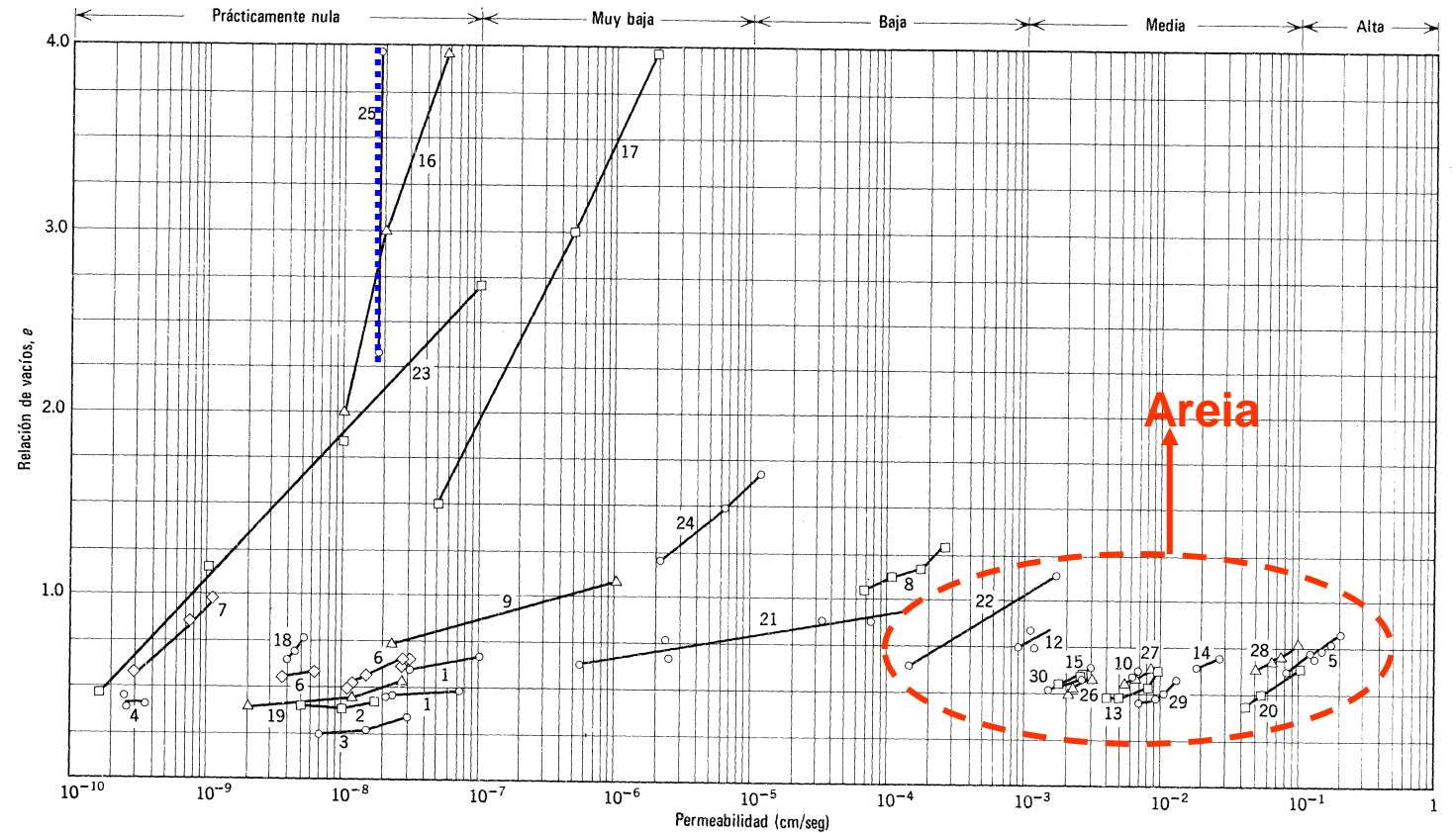
- 41 to 146: Taylor ~1948, p. 112,
- 100 to 150: Leonards -1962, p. 119,
- 100 to 1000: Mansur and Kaufman -1962, p. 260–261,
- 100 to 150: Terzaghi and Peck -1964, p. 44,
- 90 to 120: Cedergren -1967, p. 42,
- 1 to 42: Lambe and Whitman -1969, p. 290,
- 40 to 120: Holtz and Kovacs -1981, pp. 209–212,
- 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.

$$K = CD_{10}^2$$

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

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

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



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 | |

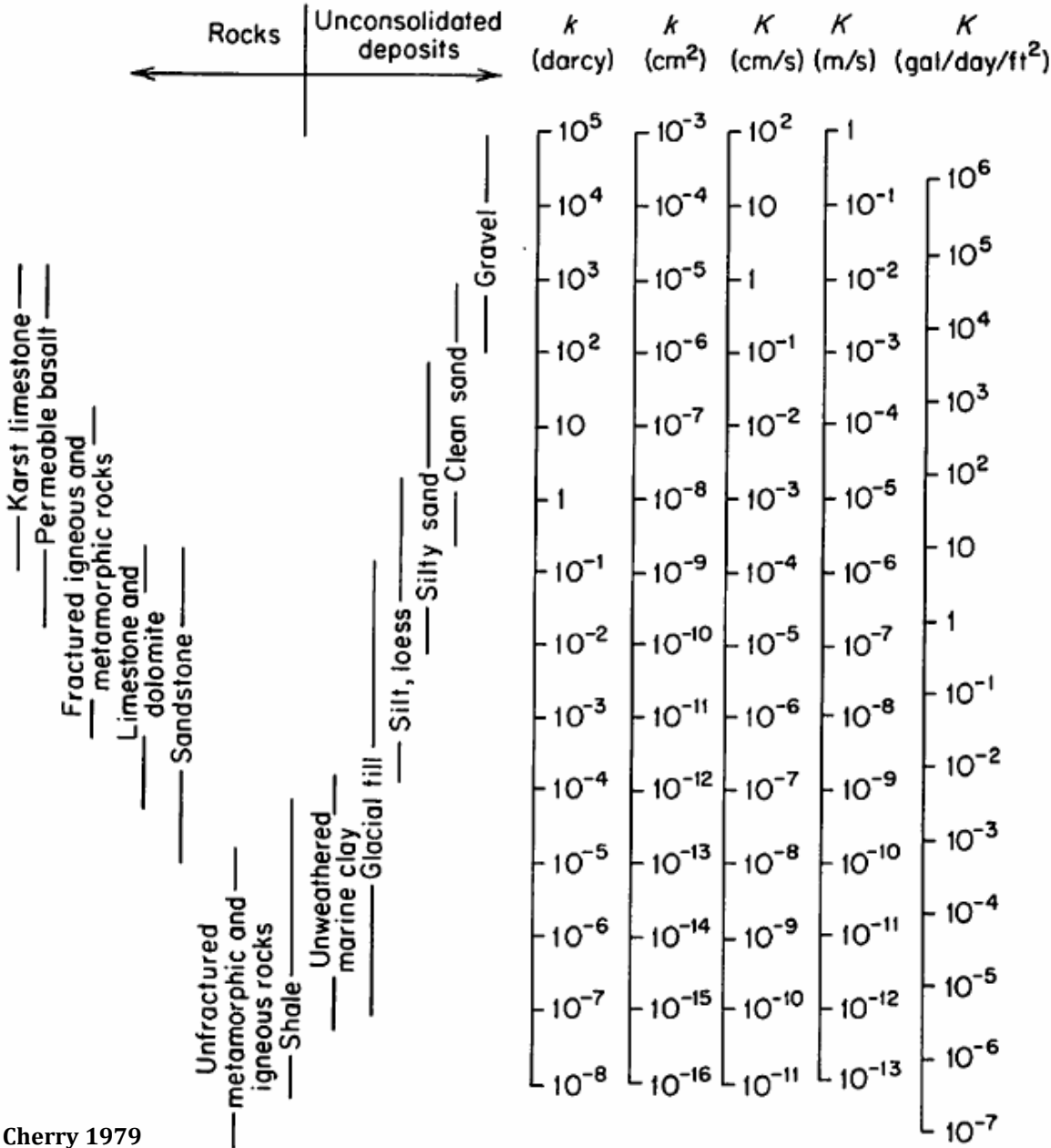
Conductividade Hidráulica de Vários Materiais



Short 2010



Ritvichai



Freeze and Cherry 1979



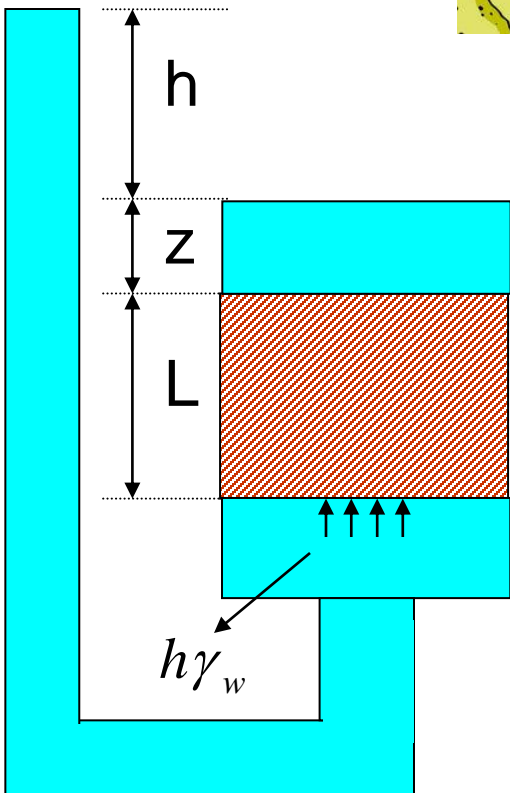
PRACTICAL ENGINEERING

<http://patreon.com/PracticalEngineering>

<http://practical.engineering>

<https://youtu.be/elmtYyuQCZ8>

Gradiente Crítico



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

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

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

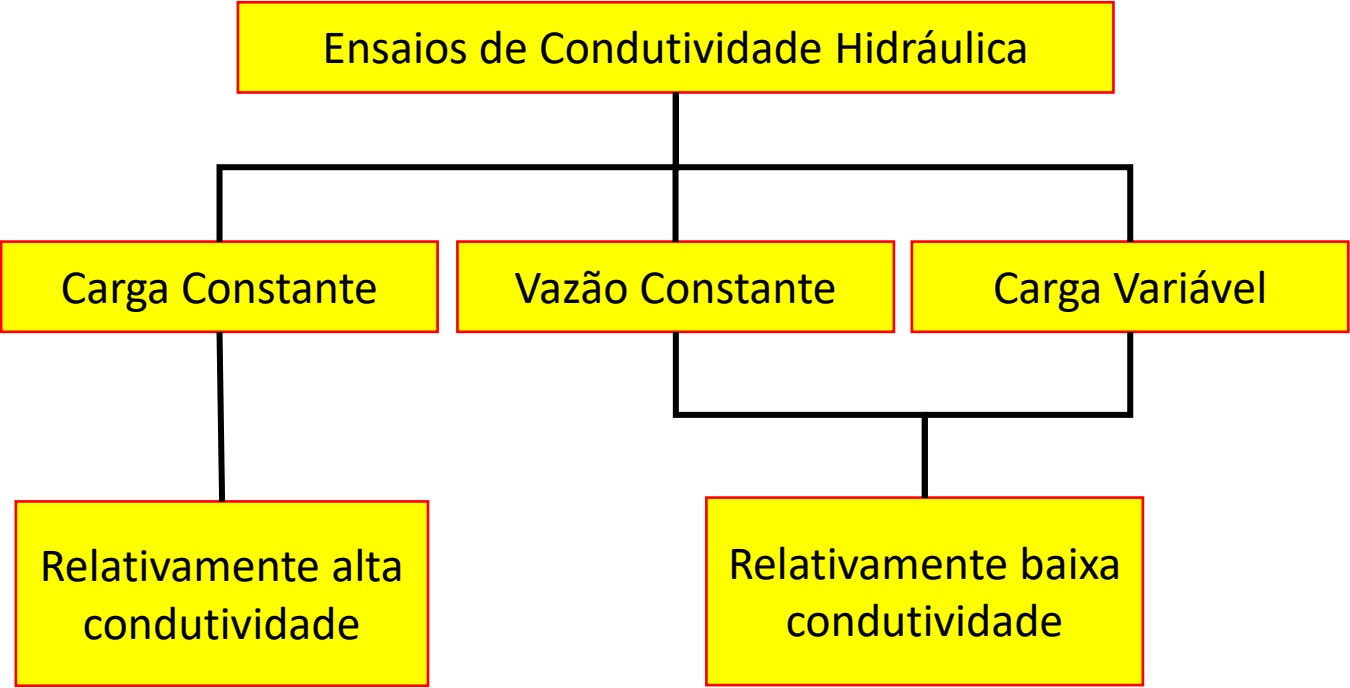
$$\sigma' = 0$$

Determinação da Condutividade Hidráulica em Laboratório

Prof. Fernando A. M. Marinho

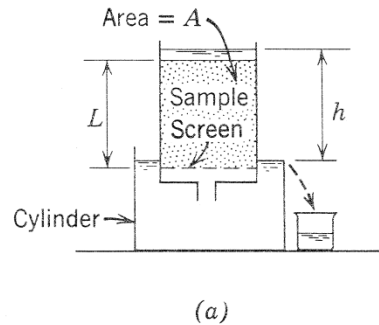
2022

Tipos de ensaios

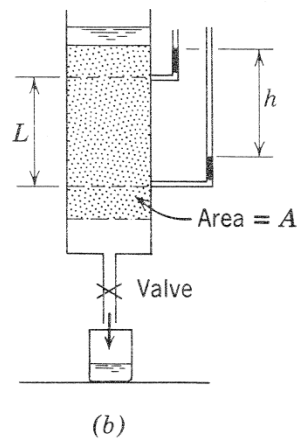


Tipos de ensaios

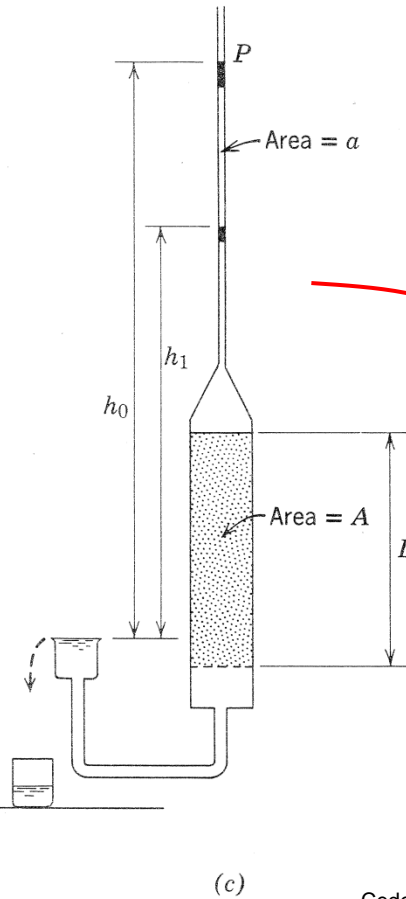
Carga Constante (solos mais permeáveis)



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



Carga Variável (solos menos permeáveis)



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)

Tipos de ensaios

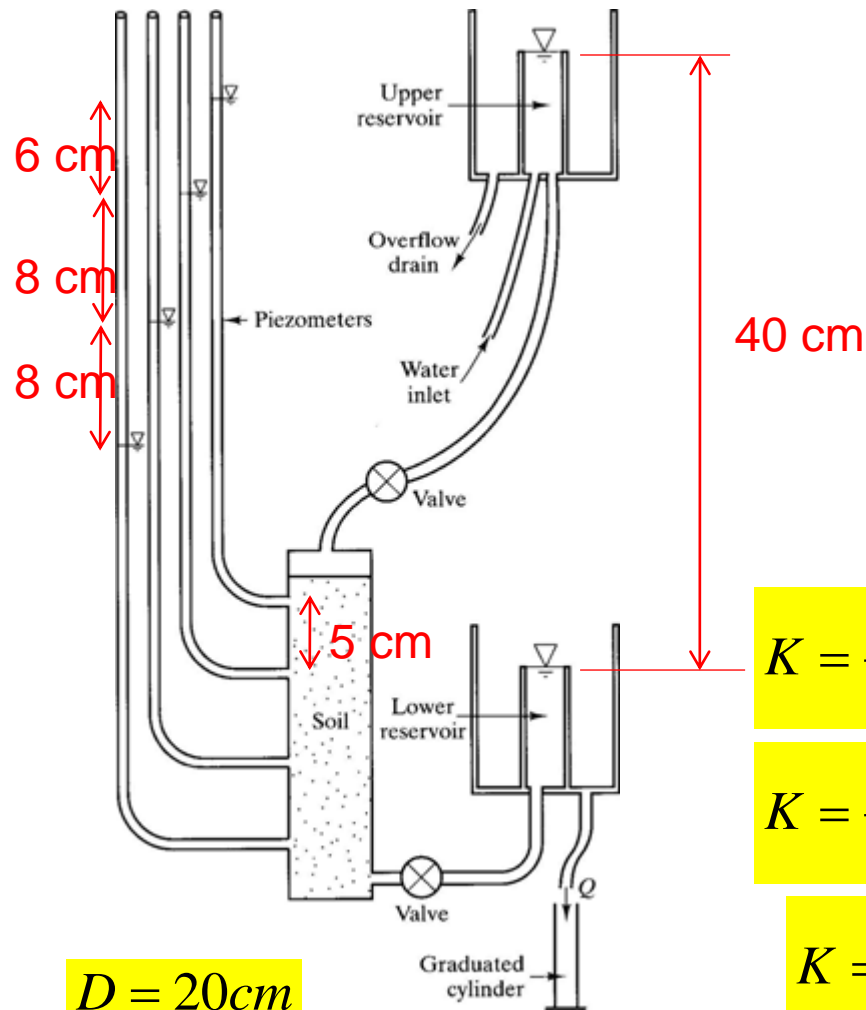
Carga Constante



Carga Variável ou Constante



Permeâmetro de Carga Constante



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

$$Q = KiA$$

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

Conhecido

Conhecido

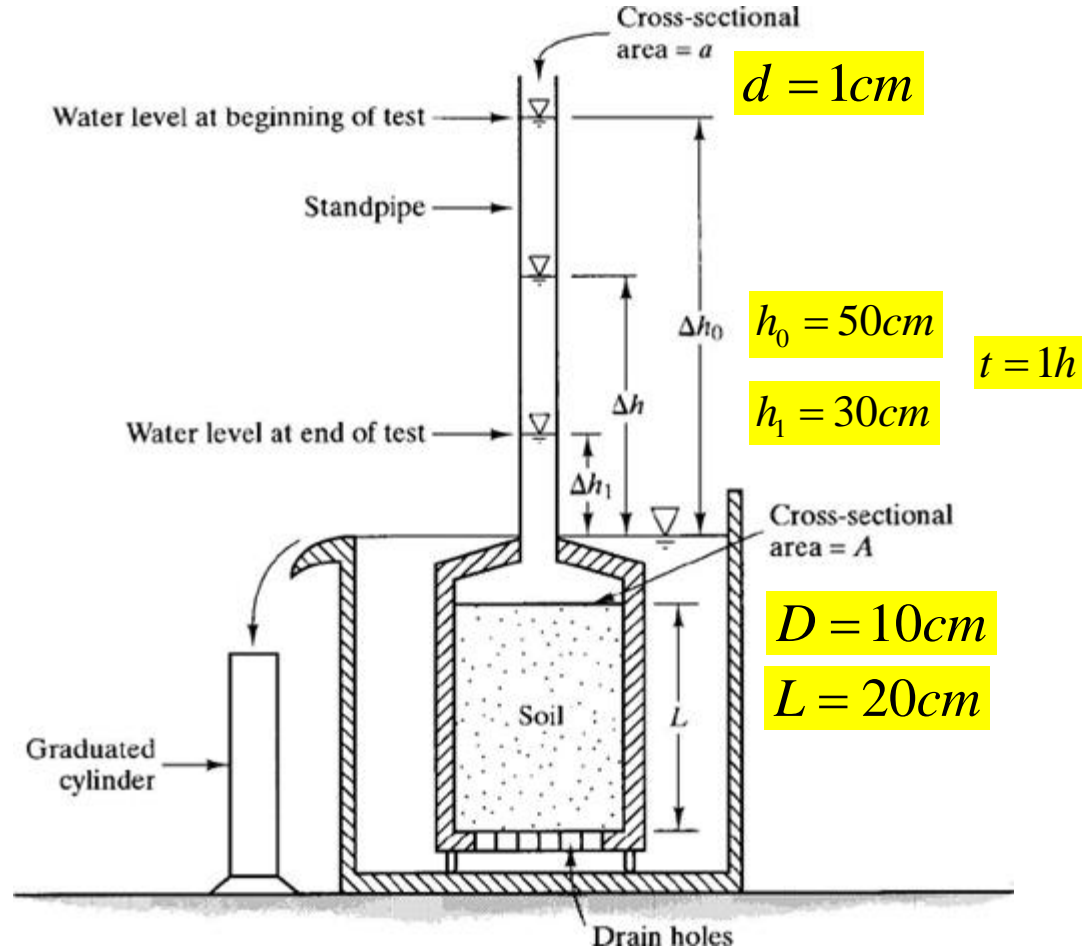
$$K = \frac{Q}{A} \frac{l}{\Delta h}$$

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

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

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

Permeâmetro de Carga Variável

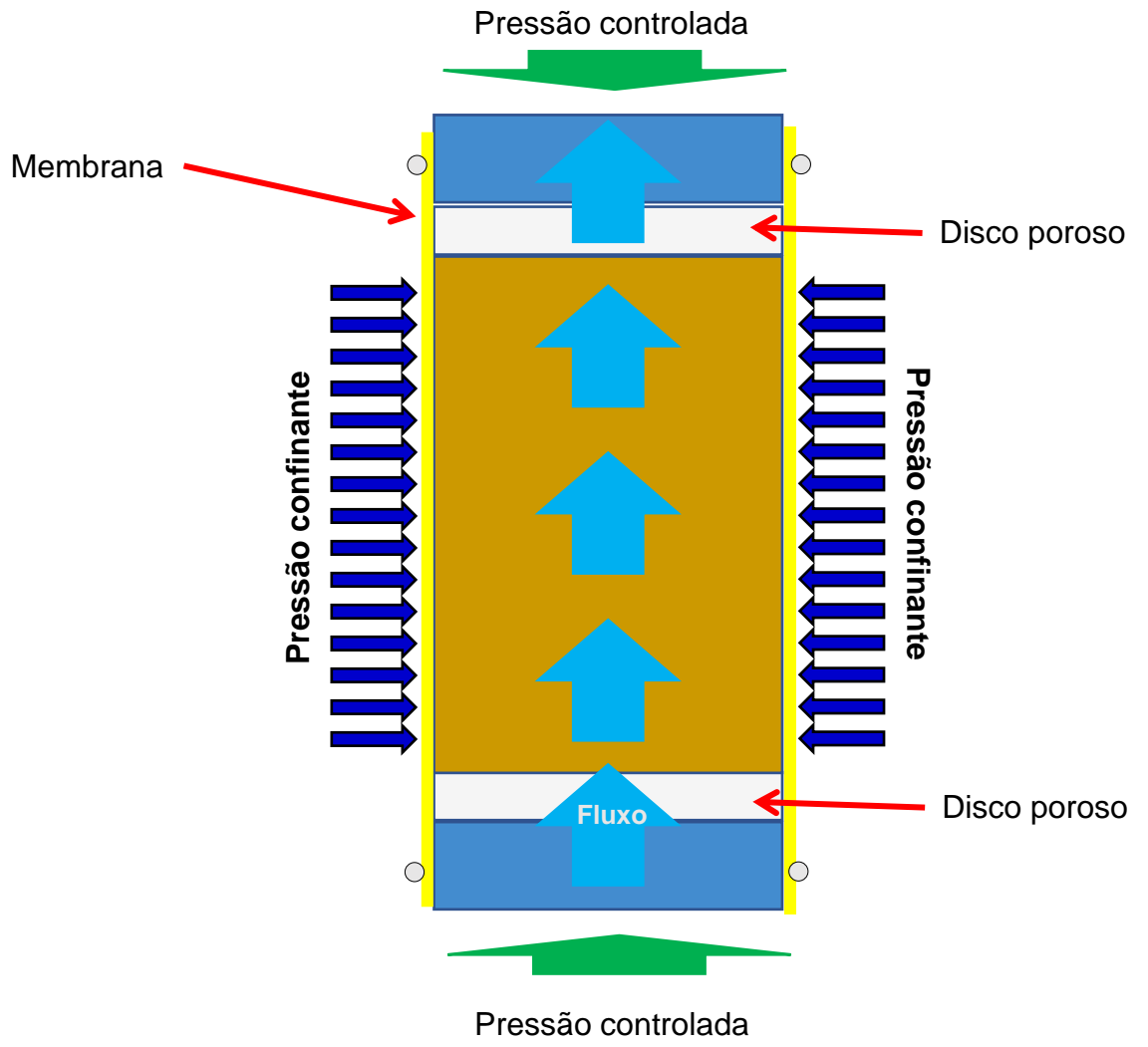


$$K = \frac{aL}{At} \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

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

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

Permeâmetro com Membrana Flexível



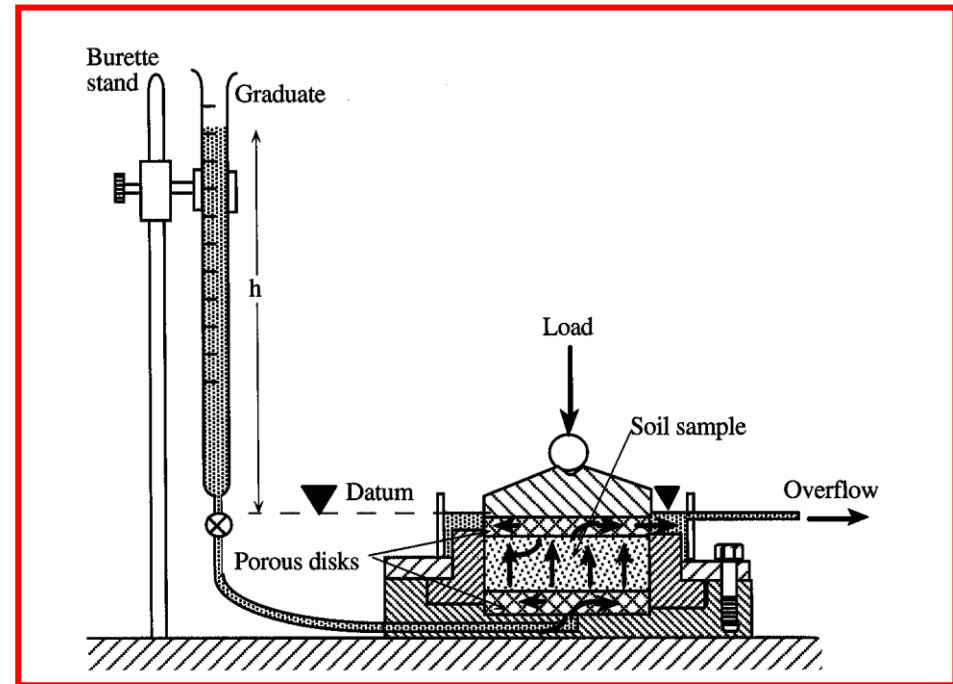
Permeâmetros



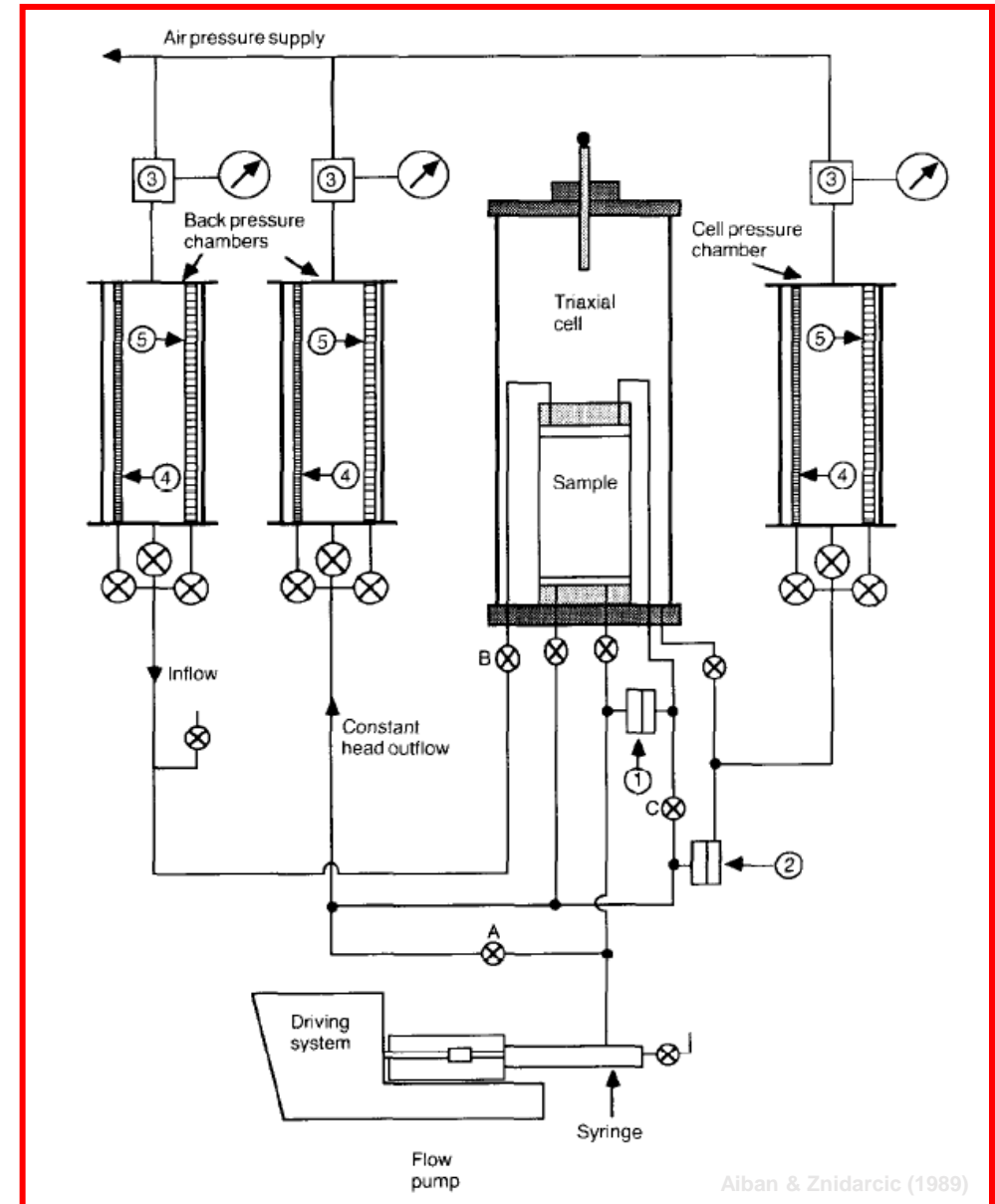
Permeâmetros



“no ensaio de adensamento”



Permeômetro de Vazão Constante



Aiban & Znidarcic (1989)

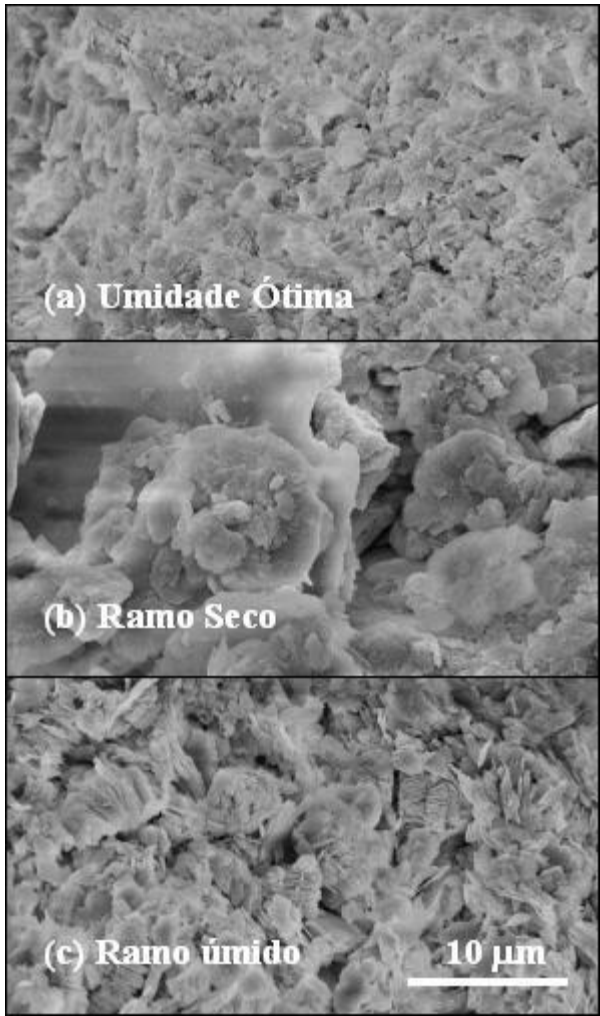
Alguns erros comuns

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



Oliveira & Marinho (2004)

