

# **AULA 06**

## **ÁGUA NO SOLO, PERMEABILIDADE E FLUXO UNIDIMENSIONAL**

Victor S. Terra  
Mecânica dos Solos e Fundações  
1º Semestre/ 2016

# Material de apoio

1 – Curso básico de mecânica dos solos (Carlos Souza Pinto) – Capítulo 06

# 1 – PROBLEMAS PRÁTICOS

- ❑ Cálculo de vazões;
- ❑ Análise de recalques;
- ❑ Estudos de estabilidade;

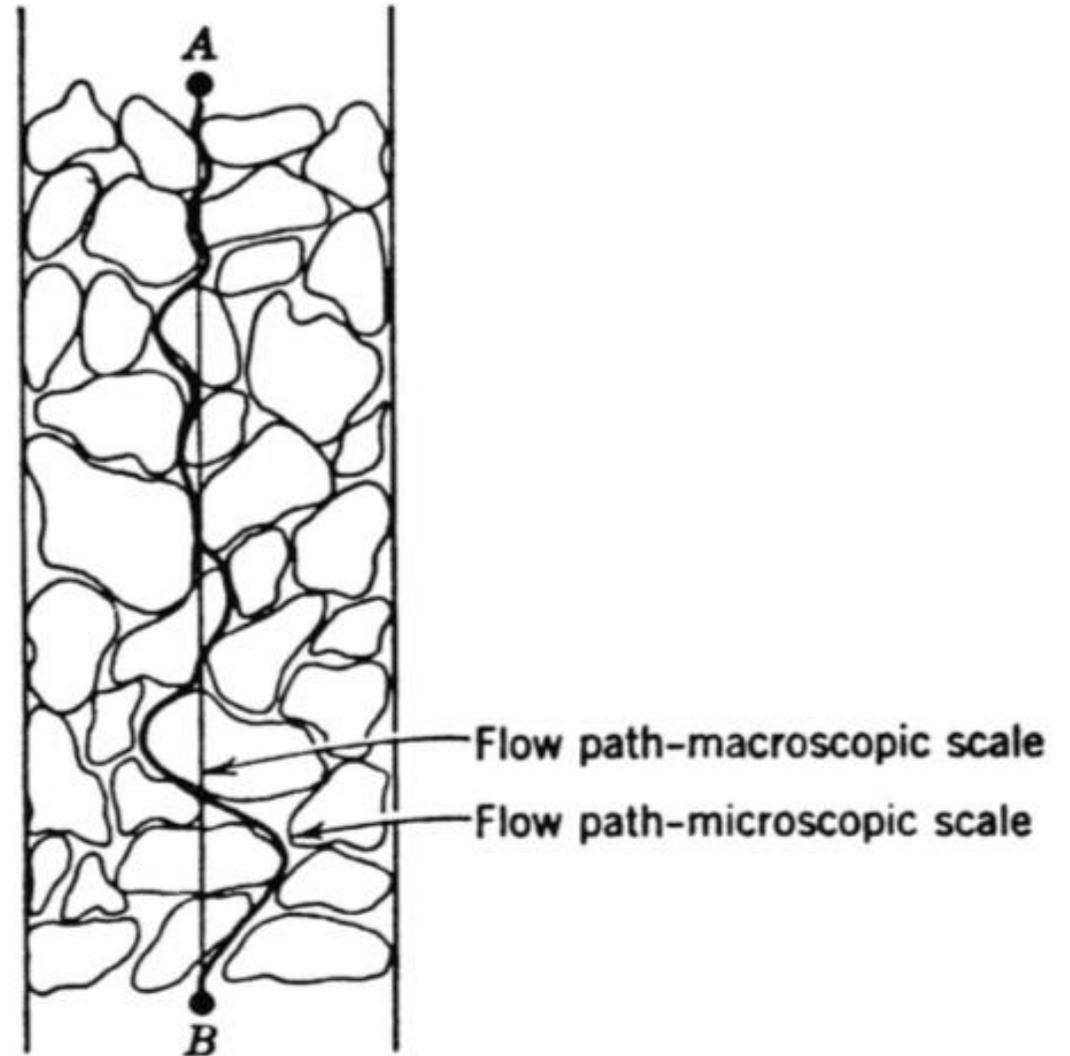


Fig. 17.1 Flow path in soil.

# AHE Foz do Chapecó, SC

- ❑ Problemas práticos
  - ❑ Cálculo de vazões
  - ❑ Análise de recalques
  - ❑ Estudos de estabilidade



22 12 2009

# Escavação para subsolo, Brasília-DF

- ❑ Problemas práticos
  - ❑ Cálculo de vazões
  - ❑ Análise de recalques
  - ❑ Estudos de estabilidade



# Escorregamento após eventos atmosféricos intensos, Medelín - Colômbia

- Problemas práticos
  - Cálculo de vazões
  - Análise de recalques
  - Estudos de estabilidade



# 2 – PERMEABILIDADE

□ “k” é uma constante de proporcionalidade e é conhecida pelos seguintes nomes:

- Coeficiente de permeabilidade;
- Condutividade hidráulica; ou
- Permeabilidade.

# 2 – PERMEABILIDADE

Valores típicos de coeficiente de permeabilidade (Souza Pinto, 2006).

---

argilas	$< 10^{-9}$ m/s
siltes	$10^{-6}$ a $10^{-9}$ m/s
areias argilosas	$10^{-7}$ m/s
areias finas	$10^{-5}$ m/s
areias médias	$10^{-4}$ m/s
areias grossas	$10^{-3}$ m/s

---

# 2 – PERMEABILIDADE

Valores típicos de coeficiente de permeabilidade (Wesley, 2010).

Soil Type		Coefficient of Permeability (m/sec)		
Parent Rock	Description	Young (Saprolitic)	Mature (True Soil)	Remolded
Granite		$4 \times 10^{-3}$ to $5 \times 10^{-9}$	$4 \times 10^{-6}$ to $5 \times 10^{-9}$	—
Gneiss		$5 \times 10^{-6}$ to $1 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-6}$ to $1 \times 10^{-6}$	—
Basalt		$3 \times 10^{-6}$ to $1 \times 10^{-9}$	—	—
Sandstone	Gray clay		$10^{-9}$ to $10^{-6}$	$10^{-10}$ to $10^{-7}$
Andesitic lahar/ volcanic ash	Tropical red clay (halloysitic)		$1 \times 10^{-9}$	$0.3-3 \times 10^{-10}$
Volcanic ash	Volcanic ash clay (allophane)	$10^{-6}$ to $10^{-7}$	$5 \times 10^{-7}$ to $10^{-8}$	$10^{-11}$ to $5 \times 10^{-10}$

# 2 – PERMEABILIDADE

Permeabilidade saturada dos principais grupos de solos (Gitirana Jr, 2005).

Hydraulic conductivity, m/s

$10^0$   $10^{-1}$   $10^{-2}$   $10^{-3}$   $10^{-4}$   $10^{-5}$   $10^{-6}$   $10^{-7}$   $10^{-8}$   $10^{-9}$   $10^{-10}$   $10^{-11}$   $10^{-12}$



0 -2.3 -4.6 -6.9 -9.2 -11.5 -13.8 -16.1 -18.4 -20.7 -23.0 -25.3 -27.6

Natural logarithm of the hydraulic conductivity, m/s

← Gravel →

← Sand →

← Silty sand →

← Silt, Loess →

← Glacial till →

← Unweathered marine clay →

# 2 – PERMEABILIDADE

O coeficiente de permeabilidade pode variar para o mesmo solo?



## 2 – PERMEABILIDADE

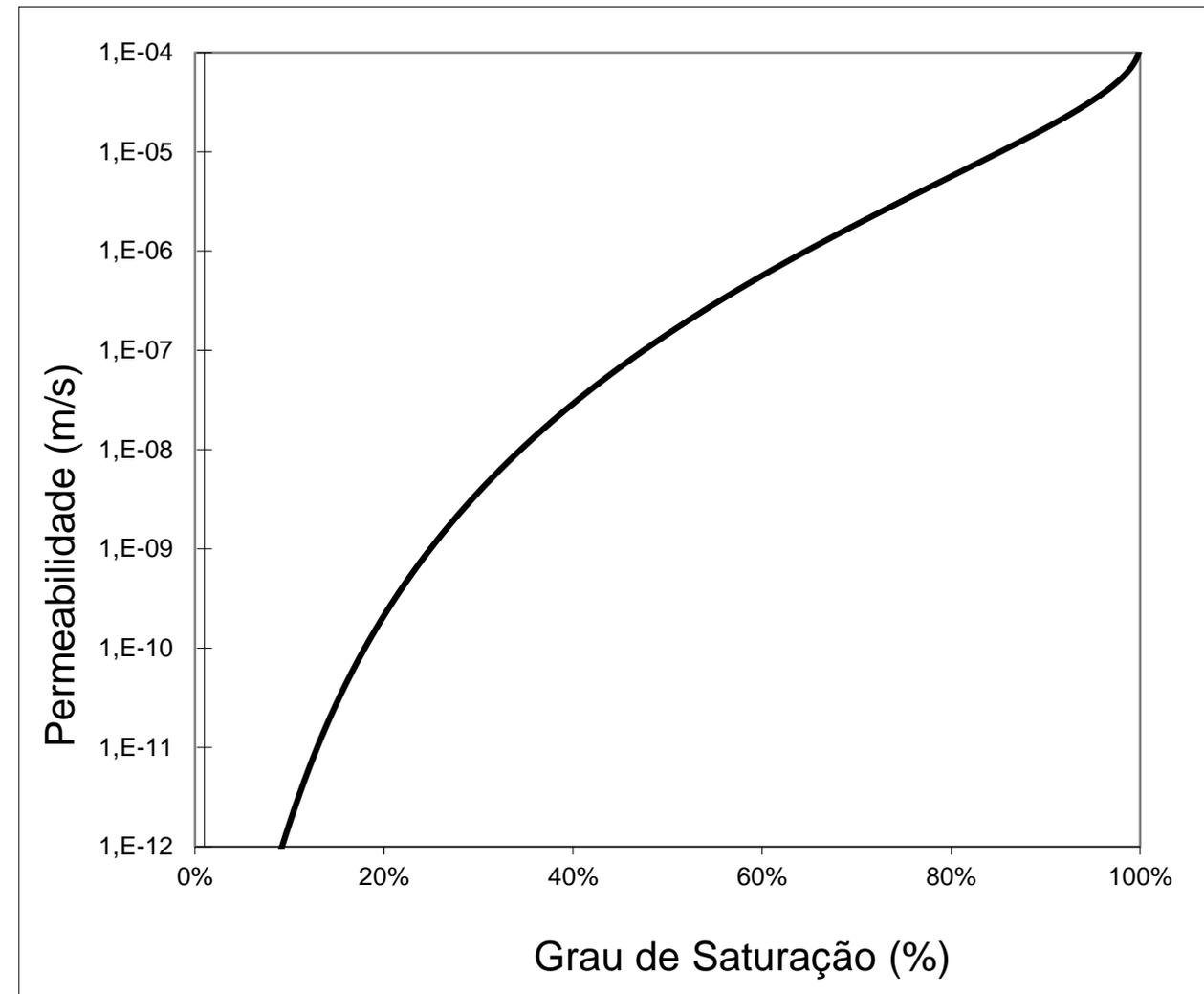
O coeficiente de permeabilidade de um solo pode variar em decorrência de vários fatores:

- a) Grau de saturação;
- b) Temperatura;
- c) Estado do solo;
- d) Estrutura e anisotropia.



## 2 – PERMEABILIDADE

### a) Grau de saturação



Dados referente a um solo residual do Rio de Janeiro (Gerscovich, Vargas Jr e de Campos, 2011)

## 2 – PERMEABILIDADE

### b) Temperatura

❖ Equação de Taylor (1948)

$$Q = D^2 \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} C$$

D = diâmetro de uma esfera equivalente ao tamanho dos grãos do solo;

C = coeficiente de forma;

$\mu$  = viscosidade dinâmica do fluido percolante

## 2 – PERMEABILIDADE

c) Estado do solo → o grau de compactação de uma argila e o grau de compacidade de uma areia também influenciarão na permeabilidade do solo.

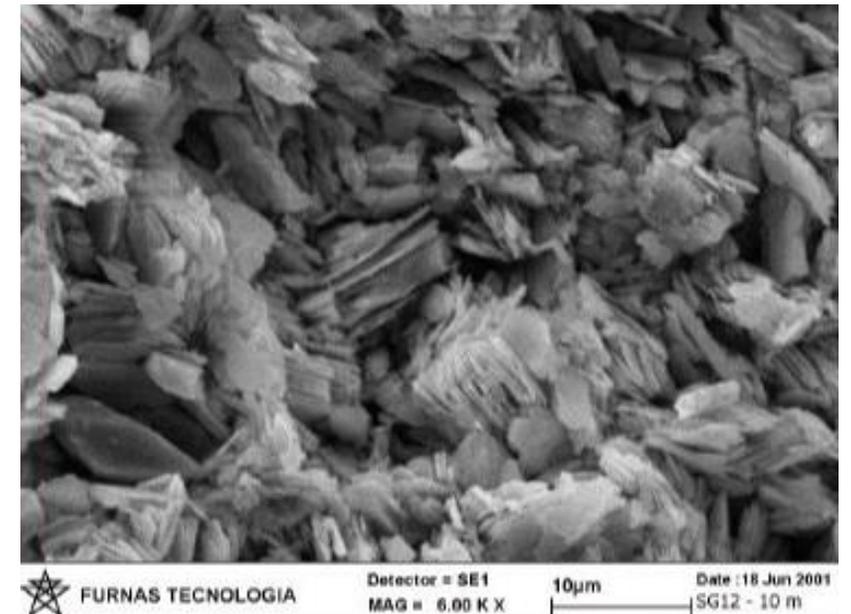
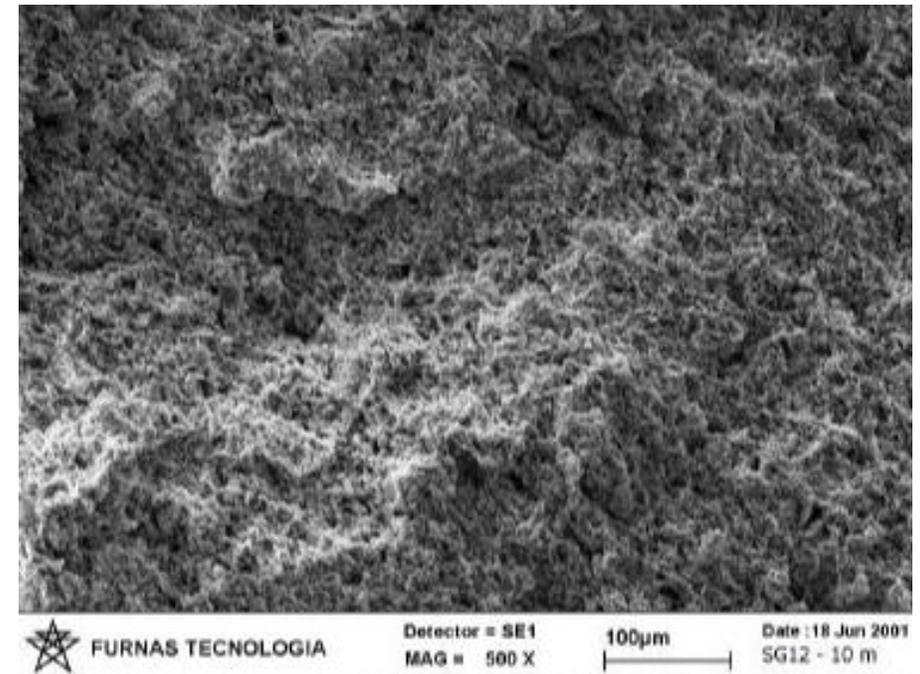
❖ Equação de Taylor (1948)

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{e_1^3}{1 + e_1} \frac{1 + e_2}{e_2^3}$$

## 2 – PERMEABILIDADE

### d) Estrutura e anisotropia

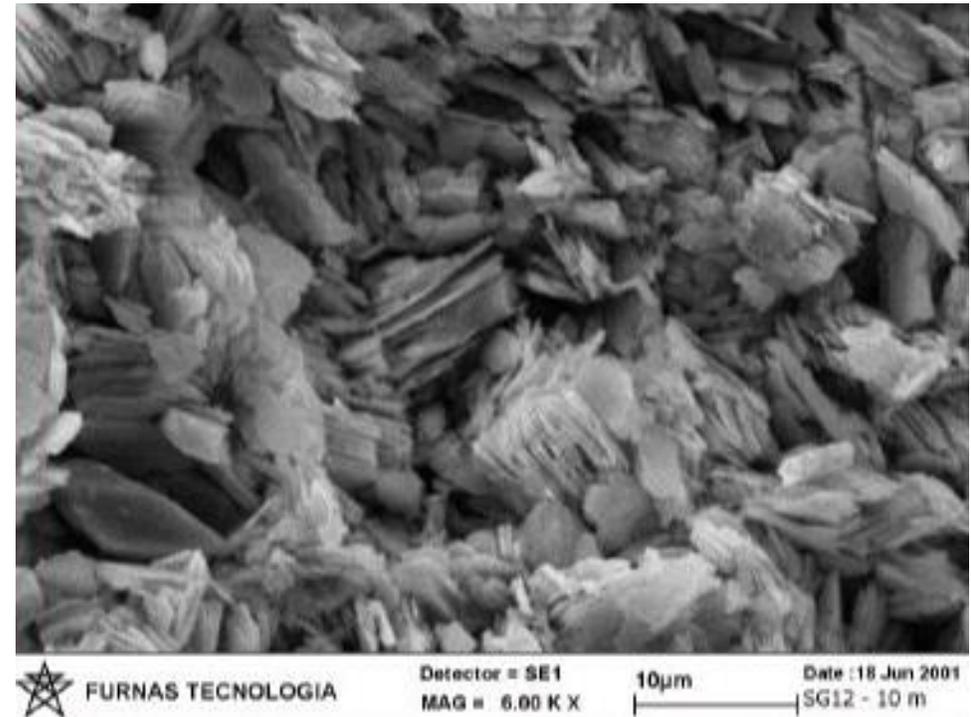
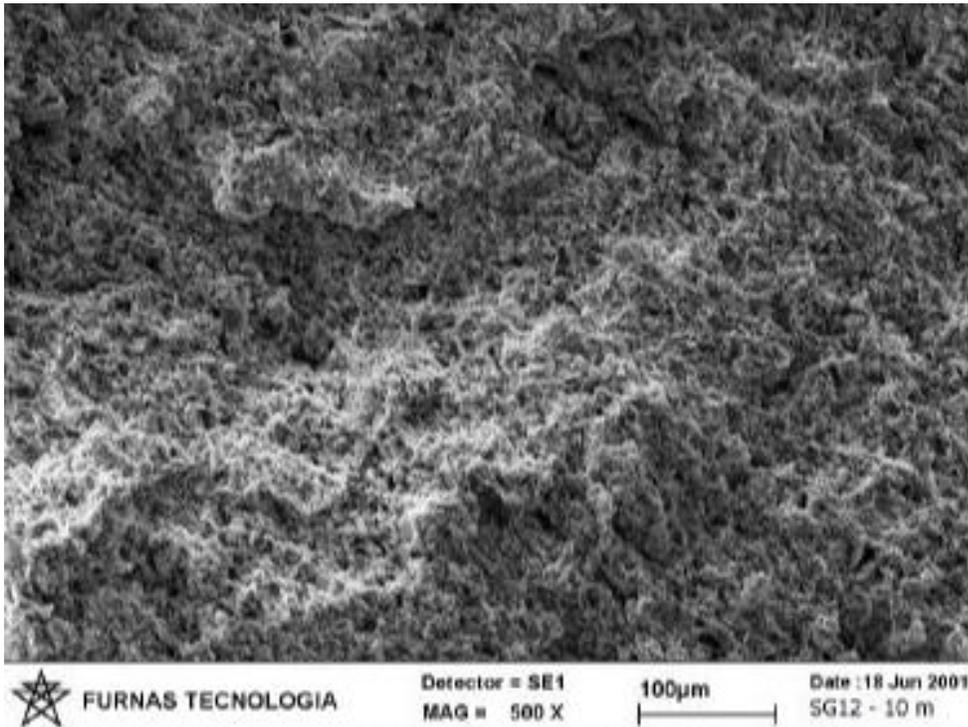
- ❖ A permeabilidade das argilas depende bastante da estrutura. Em depósitos naturais, é comum que a permeabilidade na direção horizontal seja maior do que na direção vertical, devido a tendência das partículas se depositarem com suas maiores dimensões orientadas horizontalmente;



## 2 – PERMEABILIDADE

### d) Estrutura e anisotropia

- ❖ O fluxo na direção vertical é mais tortuoso do que na direção horizontal;
- ❖ Em depósitos naturais é comum a ocorrência de camadas alternadas de partículas com tamanhos distintos.



# 3 – LEI DE DARCY

□ Darcy em 1850 propôs a seguinte equação que define o fluxo de água em solos saturados:

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

□ Onde:

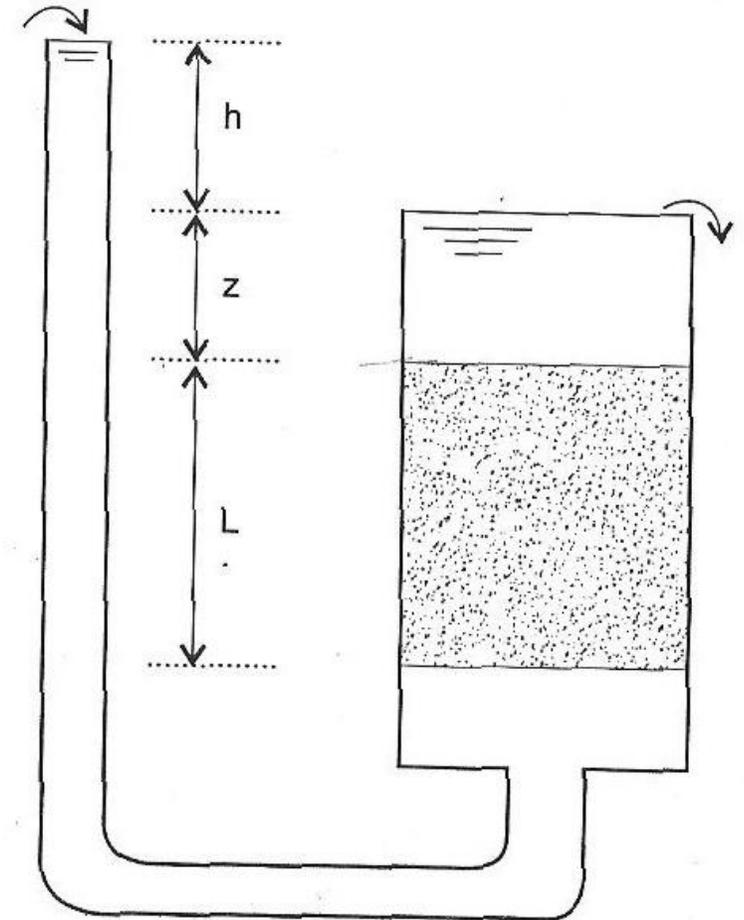
□  $Q$  = taxa de vazão,  $L^3/T$  ( $m^3/s$ ;  $cm^3/s$ ; etc.);

□  $A$  = área,  $L^2$  ( $m^2$ ;  $cm^2$ ; etc.);

□  $k$  = coeficiente de permeabilidade,  $L/T$  ( $m/s$ ;  $cm/s$ ; etc.);

□  $\Delta h$  é a “carga hidráulica” ou perda de carga ( $m$ ;  $cm$ ; etc.);

□  $\Delta L$  é a distância percorrida pela água no solo ( $m$ ;  $cm$ ...)



# 3 – LEI DE DARCY

❑ Pode-se reescrever a equação da lei da Darcy da seguinte forma

$$Q = kiA$$

❑  $i = \Delta h / \Delta L$  é o gradiente hidráulico

❑ Outra forma útil de se escrever a lei de Darcy é apresentada a seguir

$$v = ki$$

❑  $v$  é a taxa de vazão por unidade de área,  $[L^3]/[L^2][T]$

❑  $v$  é também conhecida como a velocidade de fluxo (ou percolação), também chamada velocidade de Darcy

❑ Uma forma matematicamente mais conveniente de se expressar a lei de Darcy utiliza derivadas parciais

$$v_z^w = -k_z^w \frac{\partial h}{\partial z}$$

❑ o sub-índice  $z$  indica a direção

❑ o super-índice  $w$  indica fluxo de água

❑ A água pode ter fluxos e permeabilidades distintas em diferentes direções em uma massa da solo

❑ A lei de Darcy pode ser utilizada para descrever o fluxo de outros fluidos

# 3 – LEI DE DARCY

- Componentes da carga hidráulica

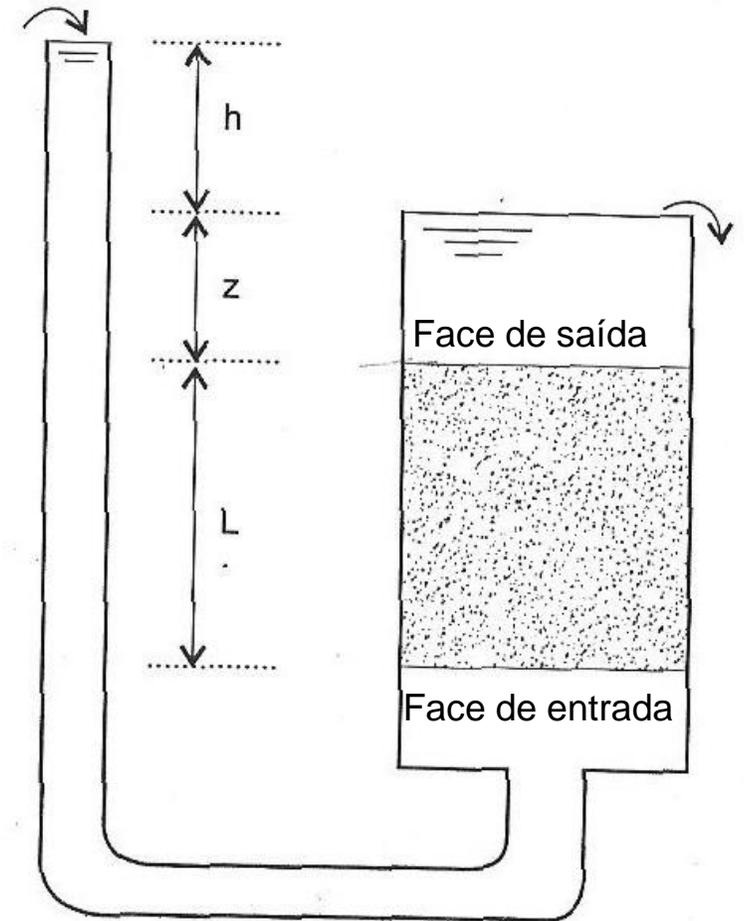
$$Q = k \frac{\Delta h}{\Delta L} \Delta A$$

$$\Delta h = h_{\text{entrada}} - h_{\text{saída}}$$

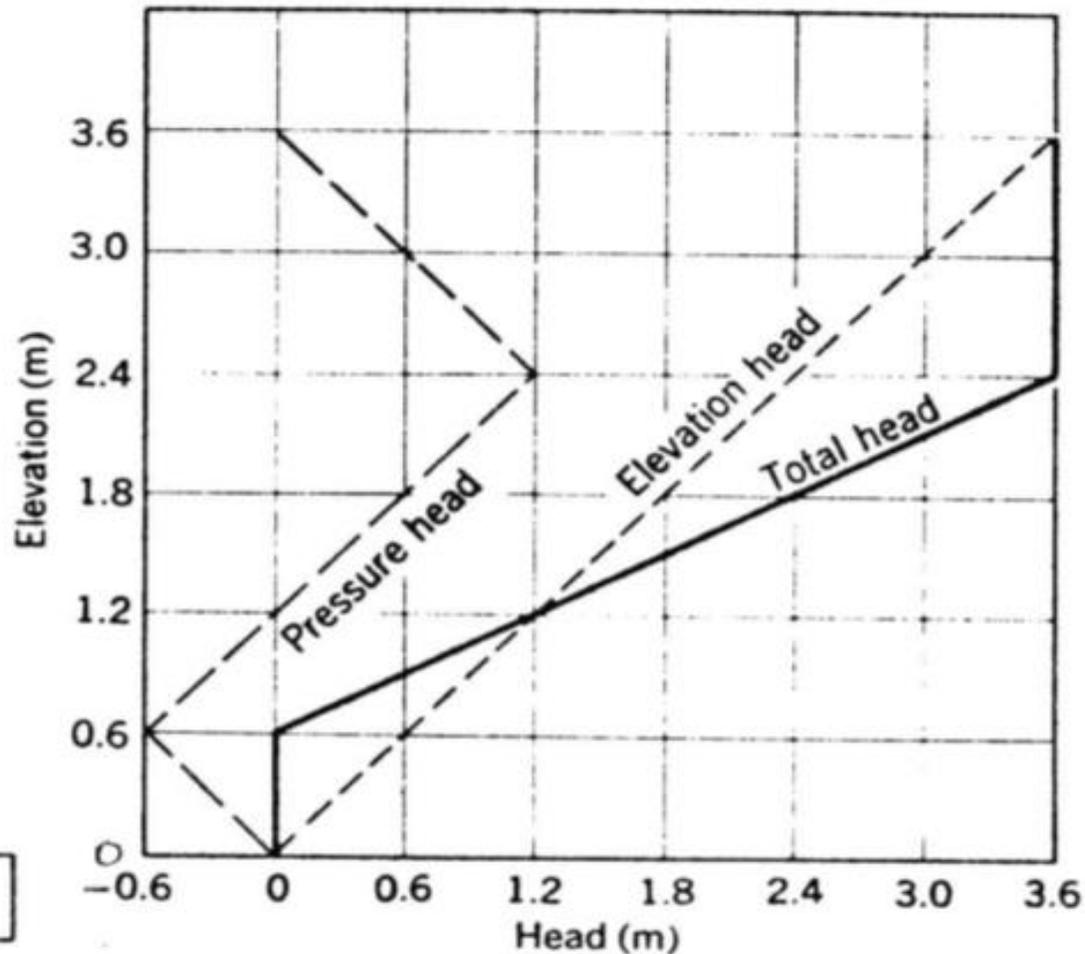
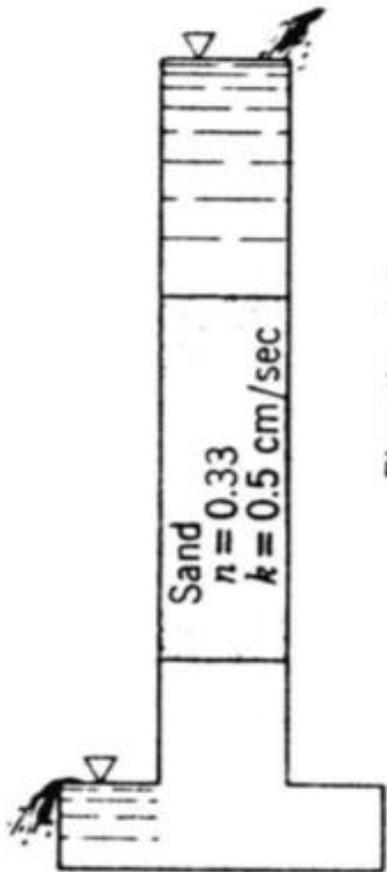
$$h = h_{\text{altimétrica}} + h_{\text{piezométrica}}$$

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

- $z$  – elevação em relação a um nível de referência arbitrário
- $u_w$  – poropressão de água (kPa);
- $\gamma_w$  – peso específico da água (10 kN/m<sup>3</sup>);

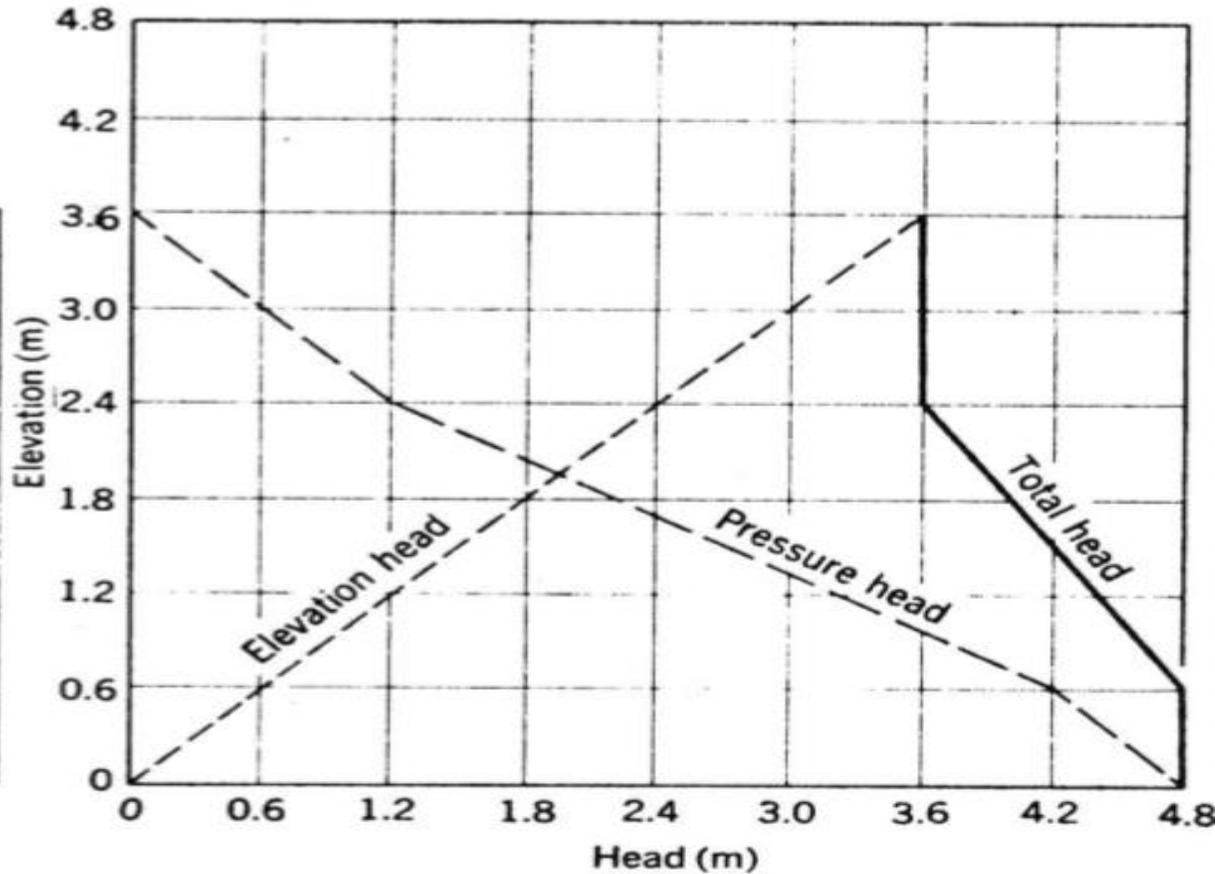
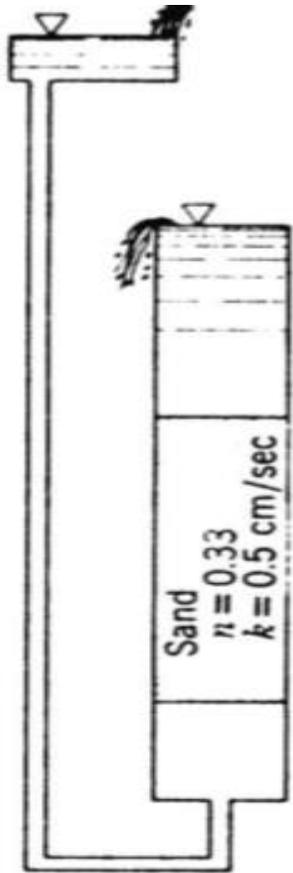


# 3.1 – Exemplo 01: Fluxo descendente



- ❑ Carga altimétrica, carga de elevação, ou altura de elevação ( $h_a$ ) → Para qualquer elevação, será igual ao valor da cota a partir de um nível de referência (datum);
- ❑ Carga piezométrica, carga de pressão ou altura piezométrica ( $h_p$ ) → é representada pela altura de coluna d'água acima do ponto de análise (face livre);
- ❑ Carga hidráulica ou carga total ( $h_t$ ) → é a soma das cargas altimétrica e piezométrica.

## 3.2 – Exemplo 02: Fluxo Ascendente



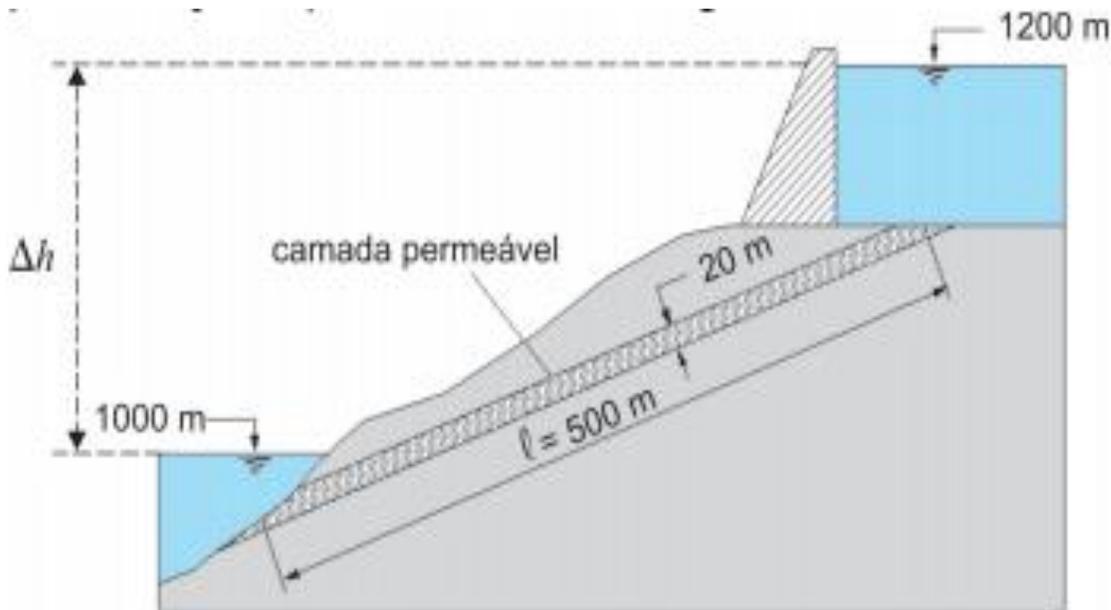
- ❑ Carga altimétrica, carga de elevação, ou altura de elevação ( $h_a$ ) → Para qualquer elevação, será igual ao valor da cota a partir de um nível de referência (datum);
- ❑ Carga piezométrica, carga de pressão ou altura piezométrica ( $h_p$ ) → é representada pela altura de coluna d'água acima do ponto de análise (face livre);
- ❑ Carga hidráulica ou carga total ( $h_t$ ) → é a soma das cargas altimétrica e piezométrica.

## 3.3 – Exemplo 03: Enade (2008)

Após a construção de uma barragem, detectou-se a presença de uma camada permeável de espessura uniforme igual a 20 m e que se estende ao longo de toda a barragem, cuja a seção transversal está ilustrada abaixo. Essa camada provoca, por infiltração, a perda de volume de água armazenada.

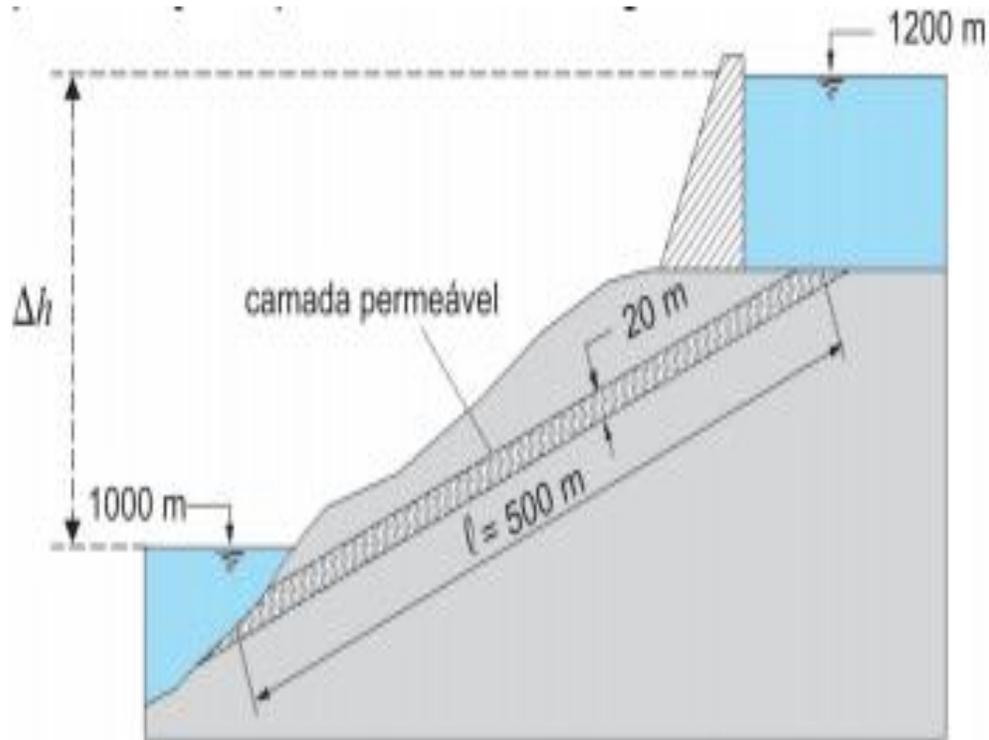
Suponha que a permeabilidade da camada permeável seja igual a  $0.0001 \text{ m}^3/\text{s}$ , que ocorram perdas de carga somente no trecho percorrido pela água dentro dessa camada e que a barragem e as demais camadas presentes sejam impermeáveis. Sob essas condições, calcule:

- A Vazão ( $Q$ ) na camada, por unidade de comprimento da barragem ( $\text{m}^3/\text{s} / \text{m}$ );
- A Vazão total ( $Q_t$ ) na camada permeável, considerando que a barragem tenha uma extensão de 180 m.



## 3.3 – Exemplo 03: Enade (2008)

a) A Vazão (Q) na camada, por unidade de comprimento da barragem (m<sup>3</sup>/s /m);



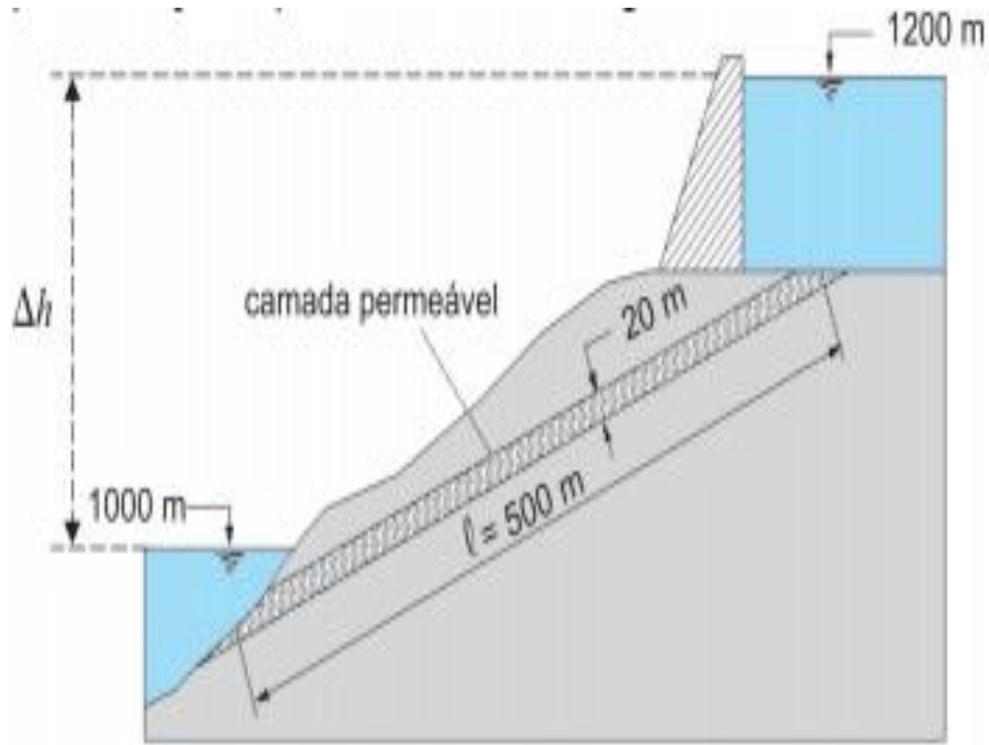
$$Q = k \frac{\Delta h}{\Delta L} \Delta A$$

$$Q = 1 \times 10^{-4} \frac{(1200 - 1000)}{500} (20 \times 1)$$

$$Q = 8 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m}$$

## 3.3 – Exemplo 03: Enade (2008)

b) A Vazão total ( $Q_T$ ) na camada permeável, considerando que a barragem tenha uma extensão de 180 m.

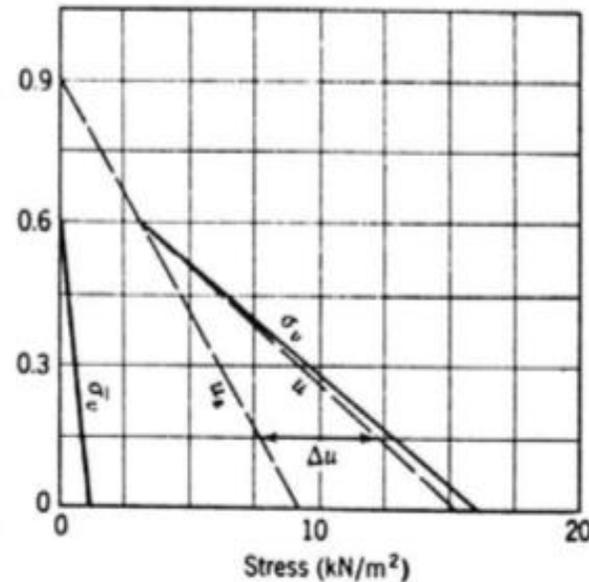
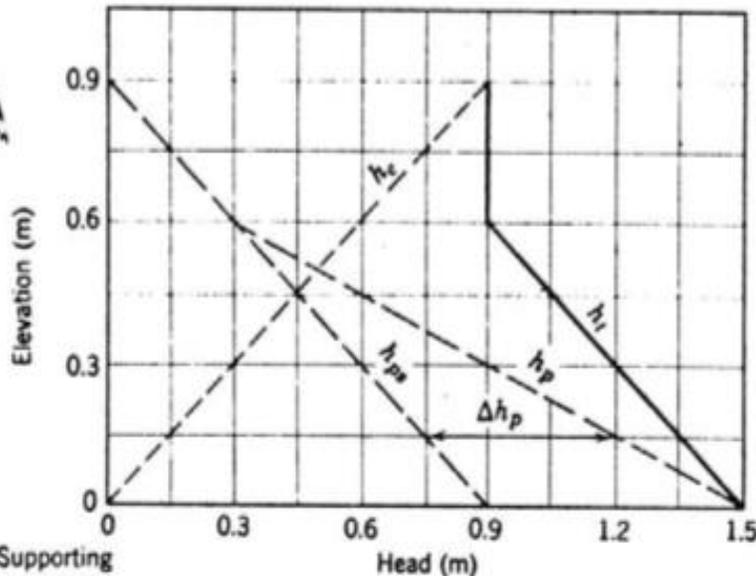
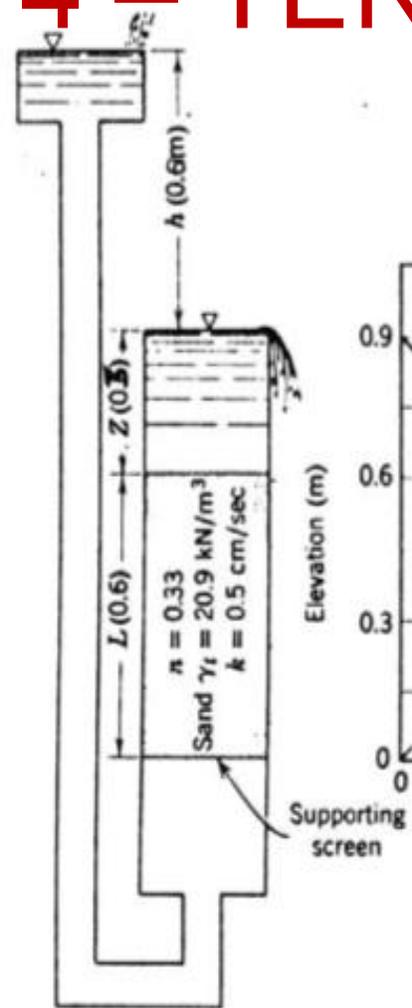


$$Q_T = k \frac{\Delta h}{\Delta L} \Delta A$$

$$Q_T = 1 \times 10^{-4} \frac{(1200 - 1000)}{500} (20 \times 180)$$

$$Q = 0.144 \text{ m}^3 / \text{s}$$

# 4 – TENSÕES EFETIVAS ( $\sigma'$ ou $q$ )



□ Onde:

□  $\gamma_{nat}$  é o peso específico natural ( $\text{kN/m}^3$ );

□  $\gamma_{sub}$  é o peso específico submerso ( $\text{kN/m}^3$ );

□  $\gamma_w$  é o peso específico da água ( $9.81 \text{ kN/m}^3$ );

□  $z$  é a profundidade do solo onde se calcula a tensão efetiva (m);

□  $h_p$  é a altura piezométrica (m).

□ Solos não saturados  $\rightarrow \sigma' = \sigma = \gamma_{nat} \times z$

□ Solos saturados  $\rightarrow \sigma' = \sigma - u = \gamma_{sub} \times z = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \times z$

# 5 – TENSÕES DE PERCOLAÇÃO

**Pressões de água no solo**  
(figura exemp. anterior)

**pressões periféricas:**

superior  $0,3 \times 9,8 = 2,94$

inferior  $1,5 \times 9,8 = 14,7$

**pressões de imersão ou hidrostáticas:**

superior  $0,3 \times 9,8 = 2,94$

inferior  $0,9 \times 9,8 = 8,82$

**pressão de percolação:**  
(diferencia)

superior  $= 2,94 - 2,94 = 0$

inferior  $= 14,7 - 8,82 = 5,88$

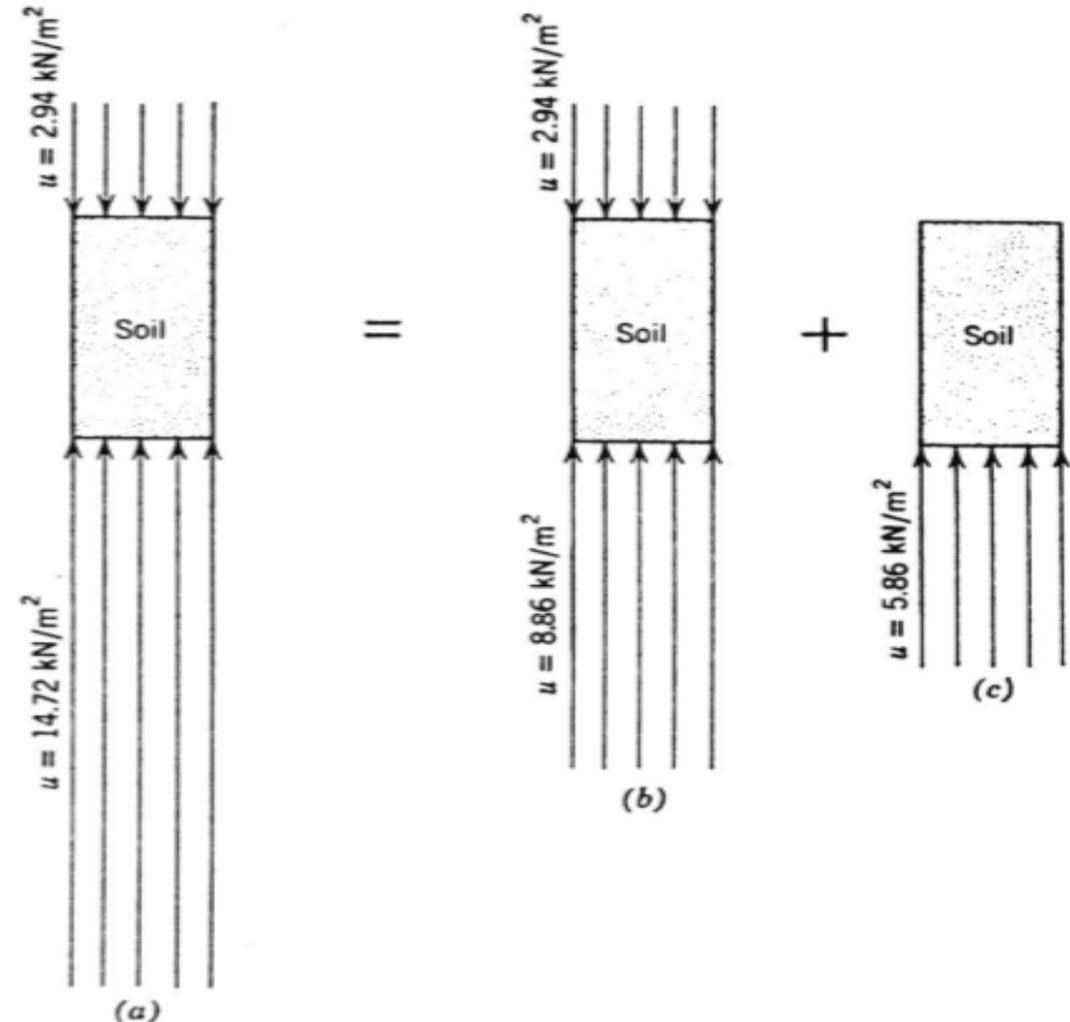
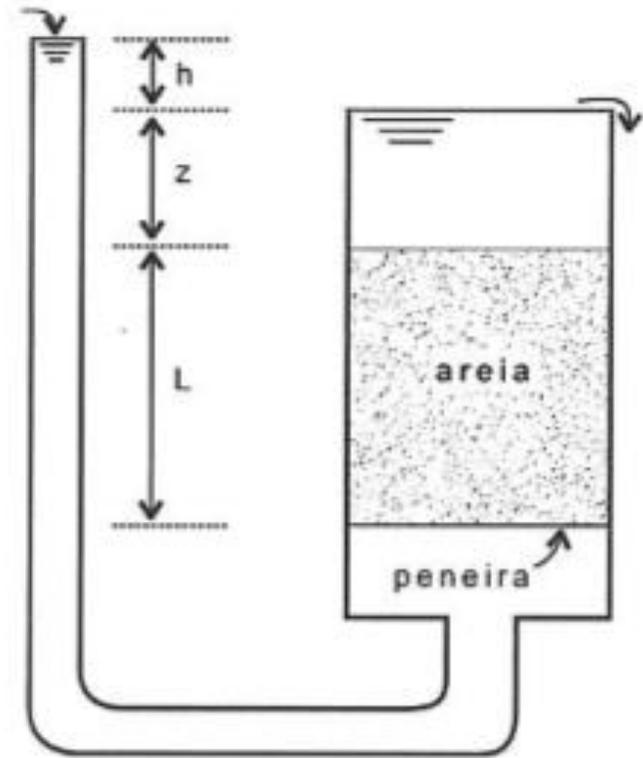


Fig. 17.14 Water pressures on soil sample. (a) Boundary water pressures. (b) Bouyancy water pressures (static). (c) Pressure lost in seepage.

## 6 – RUPTURA DE FUNDO (AREIA MOVEDIÇA)

No exemplo ao lado, considere-se que a carga hidráulica ( $h$ ) aumente progressivamente. A tensão efetiva ao longo de toda a espessura irá diminuir até se tornar nula. Nessa situação, as forças transmitidas de grão para grão são nulas. Os grãos permanecem, teoricamente, nas mesmas posições, mas não transmitem forças nos pontos de contato. A ação do peso dos grãos (gravidade) contrapõe-se a ação de arraste por atrito da água que percola para cima (força de percolação).

Como a resistência das areias é proporcional à tensão efetiva, quando esta se anula, a areia perde completamente sua resistência e fica num estado definido como areia movediça.



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

# 6 – RUPTURA DE FUNDO (AREIA MOVEDIÇA)

- Portanto para a ocorrência de areia movediça, três condições devem ser obedecidas:
  - i) O solo deve ser uma areia;
  - ii) Fluxo ascendente;
  - iii) Tensões efetivas nulas.
  
- Gradiente crítico (quando ocorre areia movediça):

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