

# MECÂNICA DOS SOLOS

## FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

*(Nível: Graduação)*

**Herlander MATA-LIMA**

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)


## Relevância para Engenharia Geotécnica:



- As redes de fluxo permitem determinar facilmente a vazão percolada
- Permitem calcular a pressão da água dos poros (pressão neutra) e, logo, a tensão efetiva em cada ponto do maciço
- Permitem avaliar o risco de ocorrência de acidentes resultantes de **quick condition** (anulação da resistência, passando o solo a comportar-se como líquido denso)
- Permitem adotar medidas de prevenção contra o **piping** (erosão interna) e o “**levantamento hidráulico**”. A colocação de filtros é uma boa medida de prevenção.

## Tópicos a serem abordados:

- Permeabilidade dos solos
- Equação de Bernoulli
- Lei de Darcy
- Condutividade hidráulica
- Testes de condutividade hidráulica



Tópicos incluídos visando a contextualização inicial

- Estimativa da percolação através da rede de fluxo
- Redes de fluxo em solos anisotrópicos

Leitura recomendada: [Das \(2006: cap. 6\)](#); [Pinto \(2009:143-157\)](#)

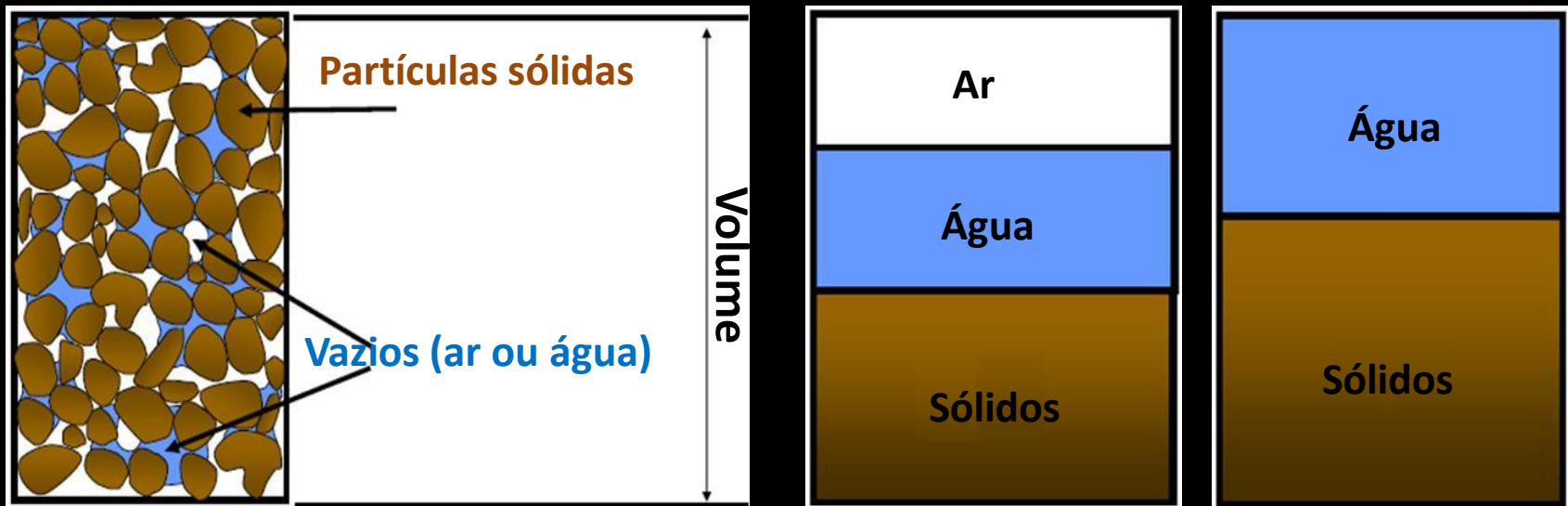
# Equivalência linguística

A equivalência linguística é importante porque o docente ainda usa, involuntariamente, muitos termos técnicos que predominam em Portugal.

Portugal	Brasil	English
Assentamento	Recalque	<i>Settlement</i>
Caudal	Vazão	<i>Flow rate</i>
Consolidação	Adensamento	<i>Consolidation</i>
cortina	Pranchada	<i>Sheet pile</i>
Fissuras	Trincas	<i>Fractures</i>
Impulsão	Empuxo	<i>Thrust</i>
Meteorização	Intemperismo	<i>Weathering</i>
Peneiração	Peneiramento	<i>screening</i>
Resistência ao corte	Resistência ao cisalhamento	<i>Shear strength</i>
Rocha mãe	Rocha matriz	<i>Fresh rock or Parent rock</i>
Tensão de corte	Tensão de cisalhamento	<i>Shear stress</i>

# ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO (ESTADO DO SOLO)

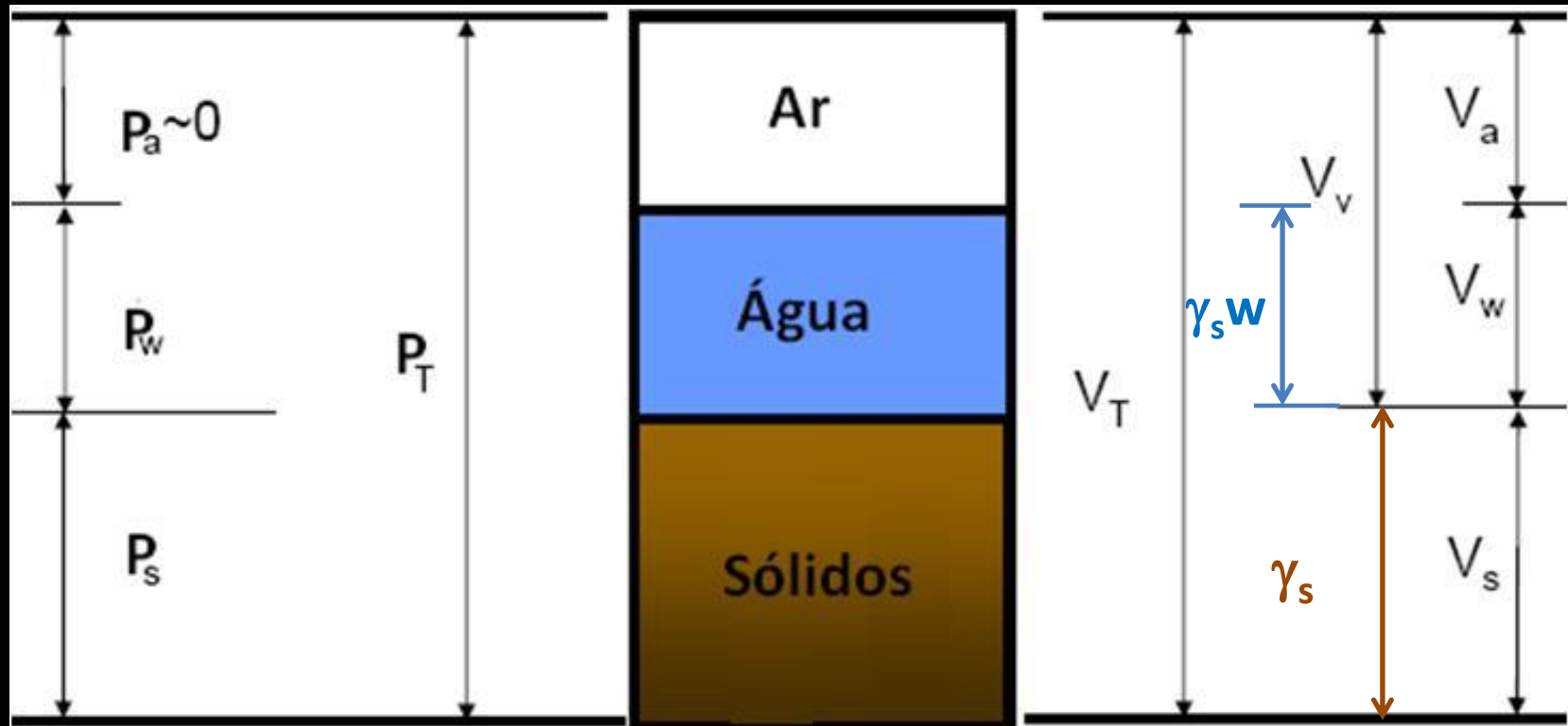
- O solo apresenta três fases: partículas sólidas, água e ar visto que o seu volume não é completamente ocupado por partículas sólidas (minerais);
- A proporção de cada fase varia em função do tipo do solo e para o mesmo tipo de solo varia consoante o clima da região, entre outros aspectos;
- Portanto, o comportamento do solo depende do peso relativo de cada uma das fases (sólida, líquida e gasosa).



O último diagrama de fases corresponde a um solo saturado (fase sólida+líquida). Quando em vez de água se tem apenas Ar e sólidos, o solo diz-se drenado (*dry soil*).

# ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO (ESTADO DO SOLO)

- A figura ilustra os principais índices usados na identificação do solo.



Pesos

Volume

$$S = \frac{\gamma_s w}{e \gamma_w}$$

Leitura recomendada: [Pinto \(2009:35\)](#)

H. Mata-Lima (2014)

# ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO (ESTADO DO SOLO)

Definição dos índices (continuação):

- **Peso específico natural ( $\gamma_n$ )** – razão entre o peso total do solo ( $P_T$ ) e o seu volume total ( $V_T$ ).
- **Peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )** – razão entre o peso total do solo ( $P_T$ ) e o seu volume total ( $V_T$ ).
- **Peso específico aparente saturado ( $\gamma_{sat}$ )** – peso específico do solo caso ficasse saturado, mantendo o volume constante.
- **Peso específico submerso ( $\gamma_{sub}$ )** – quando submerso o peso específico do solo resulta da diferença entre o peso específico natural e o peso específico da água. É útil para o cálculo da **tensão efetiva que ...**

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

$$\gamma = \frac{\gamma_s(1 + w)}{1 + e}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + e}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1 + e}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1 + w}$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$$

$$S = \frac{\gamma_s w}{e\gamma_w}$$

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

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

Leitura recomendada: **Pinto (2009:38)**

# TENSÕES GEOSTÁTICAS E ACRÉSCIMO DE TENSÃO

## Tensão: solos saturados com percolação ascendente

Consequência de  $\sigma'$  nula  $\rightarrow$

$$\sigma'_c = z\gamma_{sub} - i_{cr}z\gamma_w = 0$$

- Nessa condição ( $\sigma' = 0$ ) perde-se a estabilidade do solo. Na engenharia refere-se a essa situação como *boiling* ou *quick condition*.
- Quando  $\sigma' = 0$  significa que o gradiente hidráulico crítica é expresso por:

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

- Para maioria dos solos o  $i_{cr}$  varia de 0,9 a 1,1 – o valor médio é 1,0.

- Para  $i_{cr} = 1,0$  vem que

$$\frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} = 1 \Rightarrow \gamma_{sub} = \gamma_w$$

$$\gamma_{sub} = \gamma_{sat} - \gamma_w \Rightarrow \gamma_{sat} = 2\gamma_w$$

Quando o gradiente hidráulico alcança a condição crítica ( $i = i_{cr}$ ), a tensão efetiva é nula. Nessa condição, não existe força exercida pelo esqueleto sólido do solo!

**Qual é a consequência? | Boa compactação favorece a segurança!**



# PERMEABILIDADE DOS SOLOS

## Conceitos da Porosidade e Permeabilidade

### POROSIDADE $n$ ?

- São os espaços vazios existentes nas formações geológicas (e.g. solo ou rocha)
- Trata-se de uma grandeza escalar (boa porosidade implica sempre bom  $k$ ?).

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

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

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

### PERMEABILIDADE

- Os solos são permeáveis devido à existência de interconexão entre os poros
- Solos permeáveis permitem o fluxo da água de pontos de maior energia (ou carga hidráulica) para pontos de menor energia, sendo que a água é transmitida através dos poros (espaços vazios)
- A permeabilidade é o parâmetro que permite caracterizar a capacidade do solos transportar água
- Trata-se de uma grandeza tensorial (vulgarmente designada de vetorial) que, por conseguinte, define o padrão do fluxo (*flow pattern*)
- É, sem dúvida, uma das propriedades do solo de maior interesse para a engenharia geotécnica.

Leitura recomendada: [Pinto \(2009:38, 114-\)](#); [Das \(2006: cap. 8, cap. 9\)](#)

# PERMEABILIDADE DOS SOLOS

## Permeabilidade vs Dimensionamento Geotécnico:

- A permeabilidade influencia a taxa de recalque de um solo saturado quando sob carga
- No caso de barragens de terra (*earth dams*), o dimensionamento está condicionado à permeabilidade dos solos usados
- A estabilidade dos taludes (*slopes*) e estruturas de retenção podem ser severamente afetadas pela permeabilidade de solos envolvidos
- Filtros construídos com solos são dimensionados com base na permeabilidade
- A permeabilidade é fundamental para avaliar a quantidade de percolação subterrânea (*underground seepage*)
- É fulcral para resolver problemas referentes ao bombeamento (*pumping*) de água subterrânea das escavações da construção
- Analisar a estabilidade das estruturas de terra e murros de contenção de terra sujeitos à força de percolação ( $i\gamma_w$ , força de percolação por unidade do volume)
- Analise a eventual variação da tensão efetiva.

Leitura recomendada: Das (2006: cap. 6); Pinto (2009:97-10; 114-130)

# PERMEABILIDADE DOS SOLOS

## Equação de Bernoulli

De acordo com a equação de Bernoulli, a energia mecânica total por unidade do peso do fluido  $h$  (também designada por carga hidráulica ou carga total) é expressa por:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + \frac{U^2}{2g} + z$$

onde:

$h$  – carga hidráulica total (*total head*) (m);

$p$  – pressão (Pa);

$\gamma_w$  – peso específico da água (*unit weight of water*) (N/m<sup>3</sup>);

$p/\gamma$  – carga piezométrica (*pressure head*);

$U$  – velocidade do fluxo (m/s);

$g$  – aceleração da gravidade (*gravity acceleration*) (9,8 m/s<sup>2</sup>);

$U^2/2g$  – carga cinética (*dynamic head*) (m); e

$z$  – carga altimétrica ou energia de posição (*elevation head*) (m).

Leitura recomendada: Das (2006: cap. 6)

# PERMEABILIDADE DOS SOLOS

## Equação de Bernoulli: simplificação

- Como se afirmou anteriormente, a velocidade de percolação da água no solo é muito pequena ao ponto de ser válido admitir que a carga cinética ou carga dinâmica ( $U^2/2g$ ) é nula
- Do exposto resulta que a equação de Bernoulli que representa a carga hidráulica total ( $h$ ) em qualquer ponto no interior do solo será:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + \frac{U^2}{2g} + z$$

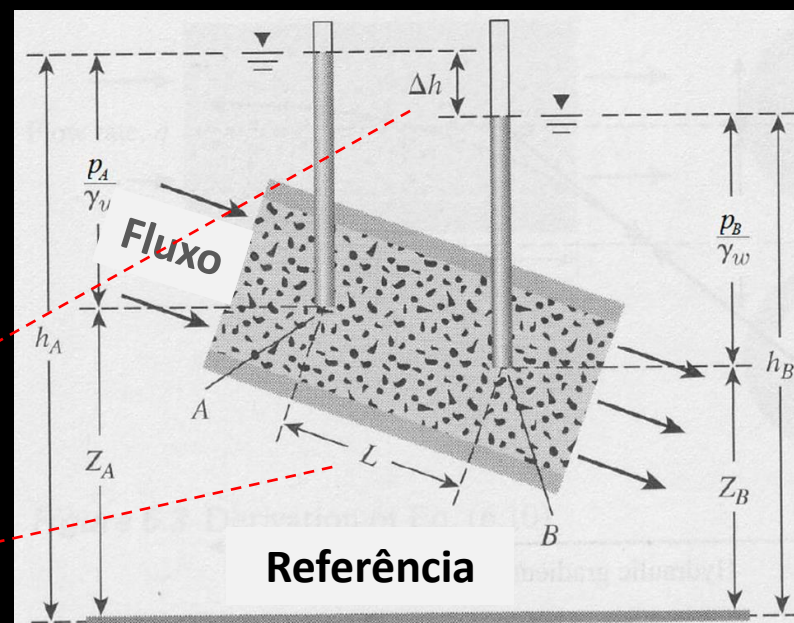


$$h = \frac{p}{\gamma_w} + z$$

Gradiente hidráulico  
(hydraulic gradient)



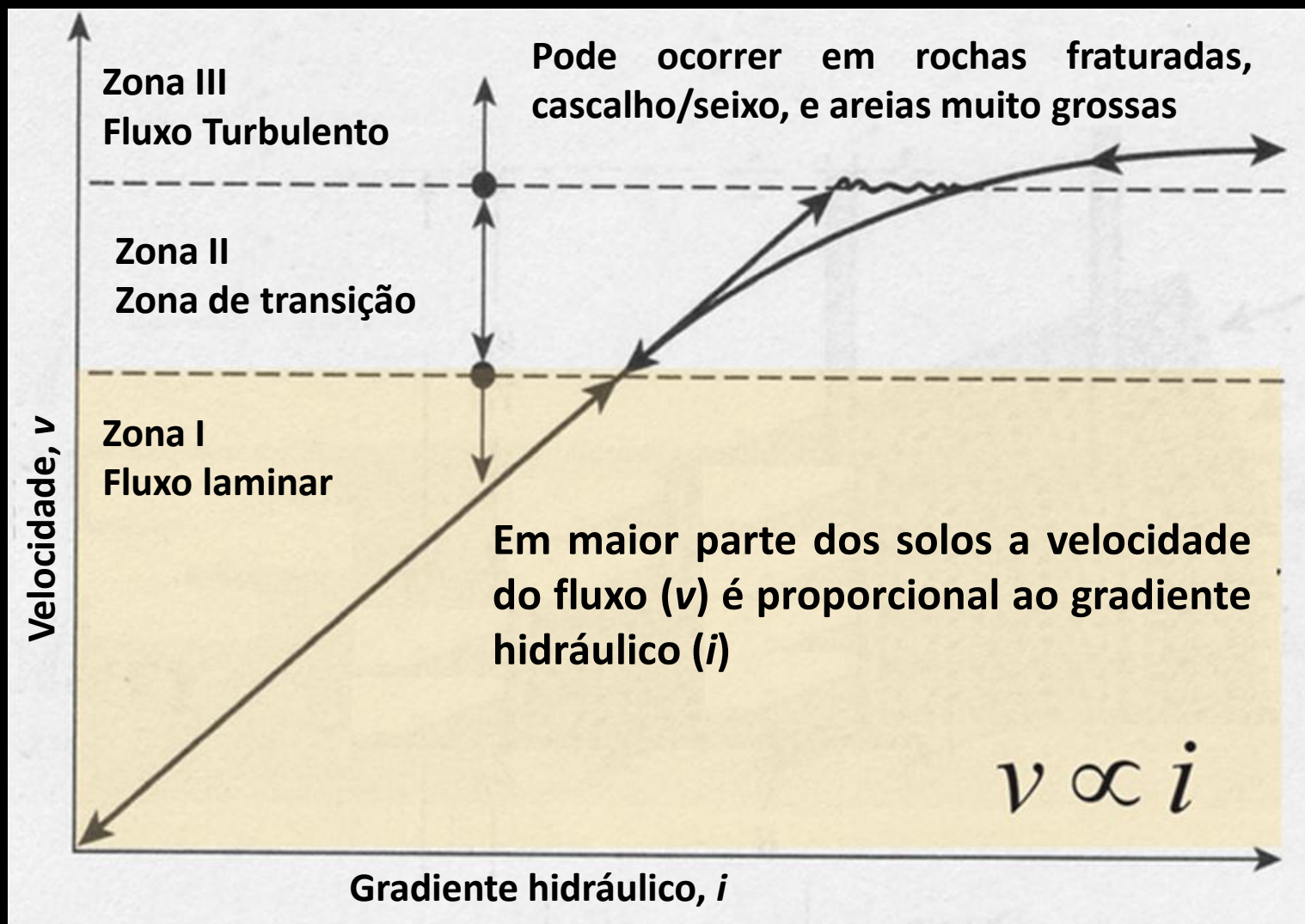
$$i = \frac{\Delta h}{L}$$



Leitura recomendada: Das (2006: cap. 8, cap. 9)

# PERMEABILIDADE DOS SOLOS

## Regimes de Fluxo em Meio Subterrâneo



Leitura recomendada: Das (2006: cap. 8, cap. 9)

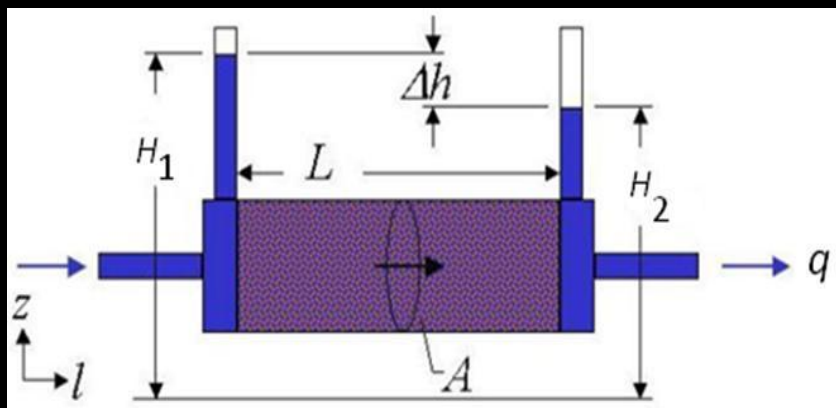
# PERMEABILIDADE DOS SOLOS

## Lei de Darcy

- Em 1856, Darcy definiu uma relação empírica para fluxo da água em meios porosos
- O coeficiente de permeabilidade **k** (ou condutividade hidráulica) das formações (solo ou rocha) resulta da lei de Darcy que estabelece o seguinte:

$$v = -k \frac{dH}{dx} = -ki \text{ ou } q = -kiA$$

O **sinal negativo** significa que o sentido de fluxo é oposto ao sentido positivo do gradiente hidráulico.



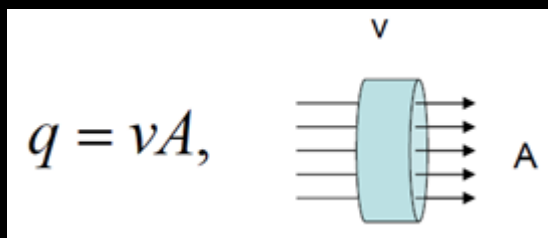
onde:

**q** – fluxo volumétrico (cm<sup>3</sup>/s)

**k** – coeficiente de permeabilidade (cm/s)

**A** – área da seção transversal (cm<sup>2</sup>)

**i** – gradiente hidráulico (m/m)



Leitura recomendada: Pinto (2009:114 –; Das (2006: cap. 8, cap. 9)

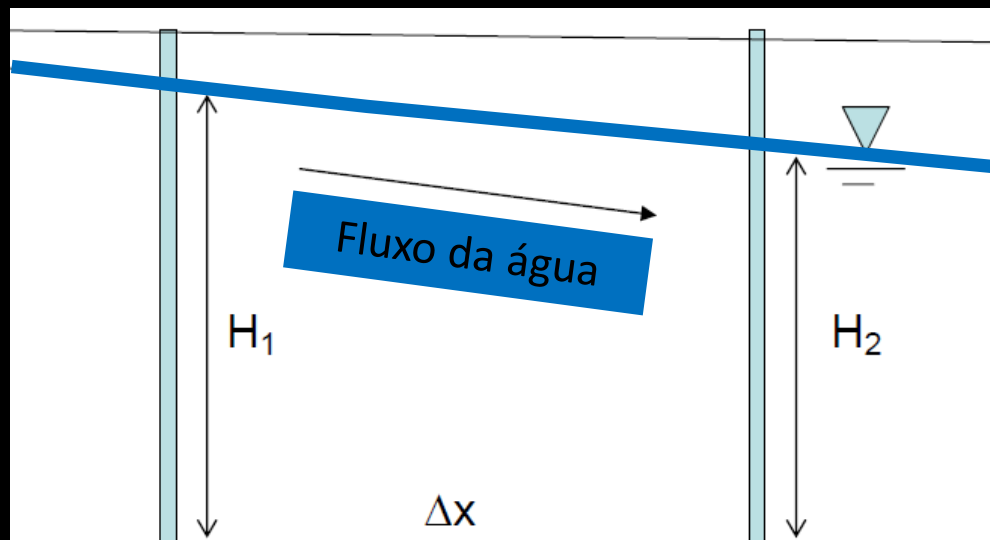
# PERMEABILIDADE DOS SOLOS

## Aplicação: procedimento no campo

Em trabalhos de medição no campo, o gradiente de carga hidráulica é a diferença entre as cargas hidráulicas a montante  $H_1$  (origem do fluxo) e jusante  $H_2$  (destino do fluxo) ao longo de um dado percurso entre dois furos (poços) (ver [Figura](#)).

$$v = -k \frac{dH}{dx} = -k \frac{H_2 - H_1}{\Delta x}$$

O  **sinal negativo**  significa que o sentido de fluxo é oposto ao sentido positivo do gradiente hidráulico.



Leitura recomendada: [Das \(2006: cap. 8, cap. 9\)](#)

# PERMEABILIDADE DOS SOLOS

**A Lei de Darcy estabelece que a velocidade do fluxo no meio poroso é diretamente proporcional:**

- ao gradiente da carga hidráulica ( $i = dH/dx$ )
- ao coeficiente de permeabilidade (condutividade hidráulica,  $k$ ) que é o parâmetro que descreve quão permeável é o meio.

## **Validade da Lei de Darcy :**

- fluxo em regime laminar ( $Re < 2000$ )
- meio completamente saturado
- fluxo em regime permanente (i.e. sem variação temporal das características)

Leitura recomendada: [Pinto \(2009:114-116\)](#); [Das \(2006: cap. 6\)](#)



# PERMEABILIDADE DOS SOLOS

## Valores típicos do coef. permeabilidade (SOLOS & ROCHAS)

- A condutividade hidráulica  $k$  é uma medida da permeabilidade do solo.

Material	$k$ cm/sec	$k$ (gal/ft <sup>2</sup> /day or Meinzers)	$K$ (darcies)
<b>1. Ranges of Values Gravel</b>	$1 - 10^2$	$10^4 - 10^6$	$10^3 - 10^5$
Clean sands (good aquifers)	$10^{-3} - 1$	$10 - 10^4$	$1 - 10^3$
Clayey sands, fine sands (poor aquifers)	$10^{-6} - 10^{-3}$	$10^{-2} - 10$	$10^{-3} - 1$
<b>2. Specific Values Argillaceous limestone, 2% porosity</b>	$8.6 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-3}$	$10^{-4}$
Limestone, 16% porosity	$1.2 \times 10^{-4}$	2.5	$1.4 \times 10^{-1}$
Sandstone, silty, 12% porosity	$2.23 \times 10^{-6}$	$4.74 \times 10^{-2}$	$2.6 \times 10^{-3}$
Sandstone, coarse, 12% porosity	$9.4 \times 10^{-4}$	19.9	1.1
Sandstone, 29% porosity	$2.1 \times 10^{-3}$	43.6	2.4
Very fine sand, very well sorted	$8.4 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^2$	9.9
Medium sand, very well sorted	$2.23 \times 10^{-1}$	$4.7 \times 10^3$	$2.6 \times 10^2$
Coarse sand, very well sorted	$3.69 \times 10^1$	$7.83 \times 10^5$	$4.3 \times 10^4$
Montmorillonite clay	$\approx 10^{-8}$	$\approx 10^{-4}$	$\approx 10^{-5}$
Kaolinite clay	$\approx 10^{-6}$	$\approx 1.0^{-2}$	$\approx 10^{-3}$

### 3. Equivalencies

1 darcy = 18.2 Meinzer units for water @ 60°F, or  $8.58 \times 10^{-4}$  cm/sec for water @ 60°F; 1 Meinzer = 0.134 ft/day =  $4.72 \times 10^{-5}$  cm/sec =  $5.49 \times 10^{-2}$  darcies, water @ 60°F; 1 cm/sec =  $1.165 \times 10^3$  darcies for water @ 60°F =  $21.2 \times 10^3$  Meinzers;  $10^{-6}$  cm/sec = 1.165 millidarcies for water @ 60°F; 1 cm/sec =  $1.03 \times 10^6$  ft/yr = 864 m/day; 1 millidarcy = 0.001 darcy =  $0.858 \times 10^{-6}$  cm/sec for water @ 60°F.

# PERMEABILIDADE DOS SOLOS

## Valores típicos do coef. permeabilidade (SOLOS)

- A condutividade hidráulica  $k$  é uma medida da permeabilidade do solo.

**Tabela.** Permeabilidade dos solos vs diâmetro efetivo

Material	$k$ (cm/sec)	Effective Size, $D_{10}$ (mm)
Uniform coarse sand	0.4	0.6
Uniform medium sand	0.1	0.3
Clean, well-graded sand and gravel	0.01	0.1
Uniform, fine sand	$4 \times 10^{-3}$	0.06
Well-graded, silty sand and gravel	$4 \times 10^{-4}$	0.02
Silty sand	$10^{-4}$	0.01
Uniform silt	$5 \times 10^{-5}$	0.006
Sandy clay	$5 \times 10^{-6}$	0.002
Silty clay	$10^{-6}$	0.0015
Clay (30% to 50% clay size)	$10^{-7}$	0.0008
Colloidal clay (minus $2 \mu\text{m} \geq 50\%$ )	$10^{-9}$	$40 \text{ \AA} = 4 \times 10^{-6}$

Fonte: Das (2006: cap. 6)

# PERMEABILIDADE DOS SOLOS

## Determinação do $k$ no laboratório

A condutividade hidráulica pode ser determinada no laboratório através de dois métodos:

- Teste com carga hidráulica constante (*Constant-Head Test*)
- Teste com carga hidráulica decrescente (*Falling-Head Test*)

Importa considerar que o  $k$  dos solos depende dos seguintes fatores:

- Viscosidade do fluido
- Distribuição do tamanho dos poros
- Distribuição do tamanho dos grãos (é importante conhecer a curva granulométrica)
- Índice de vazios (*void ratio*)
- Grau de saturação do solo.

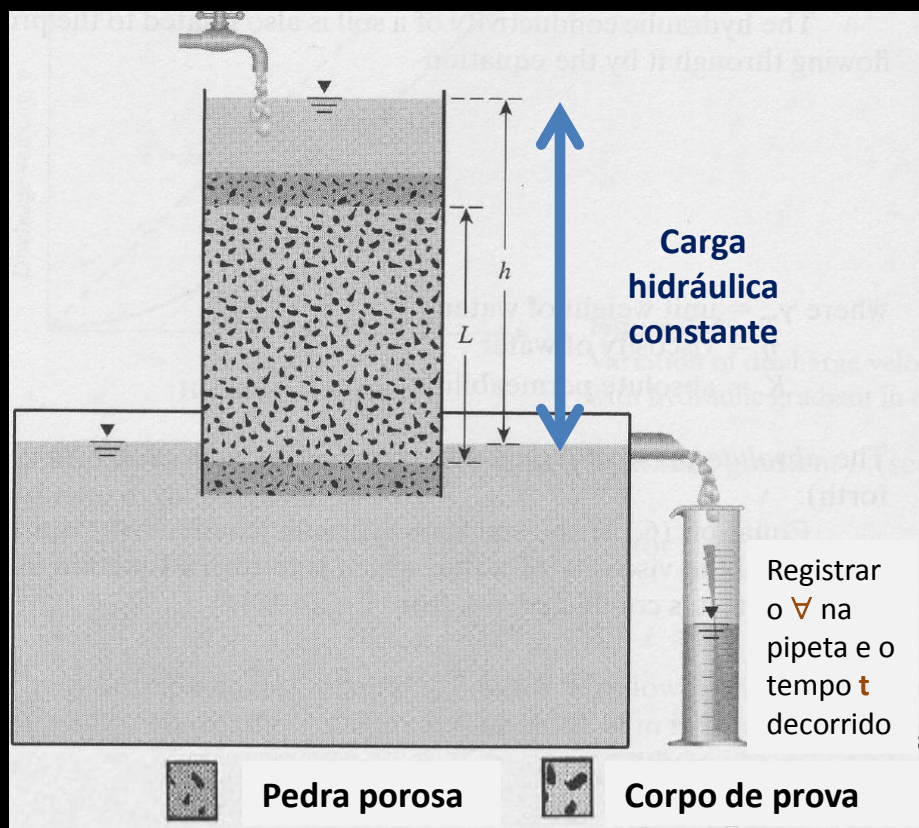
Leitura recomendada: Pinto (2009:115-116; Das (2006: cap. 6)

# PERMEABILIDADE DOS SOLOS - Fluxo Unidimensional

## Testes laboratoriais para estimar a cond. hidráulica $k$

Esquema ilustrativo da experiência

- Teste com carga hidráulica constante (*constant-Head Test*)



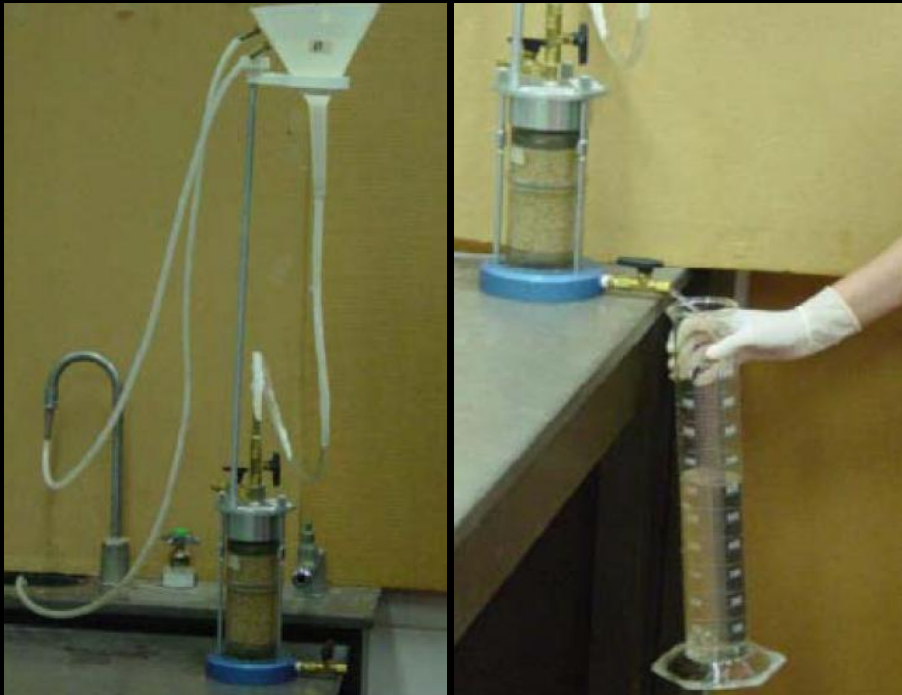
- O teste de carga constante é usado principalmente em solos granulares
- Este teste se baseia na assunção do escoamento laminar onde  $k$  é independente de do gradiente hidráulico  $i$  (baixos valores do  $i$ )
- No teste aplica-se uma carga hidráulica total constante em cada extremidade da amostra do solo num permeâmetro.

Ver: Pinto (2009: 115-116); Das (2006: cap. 6)

# PERMEABILIDADE DOS SOLOS - Fluxo Unidimensional

## Procedimento para determinação da cond. hidráulica $k$

- Teste com carga hidráulica constante usando um permeâmetro



Fotos: Prof. Lanbo Liu

### Procedimento sequencial do ensaio/teste:

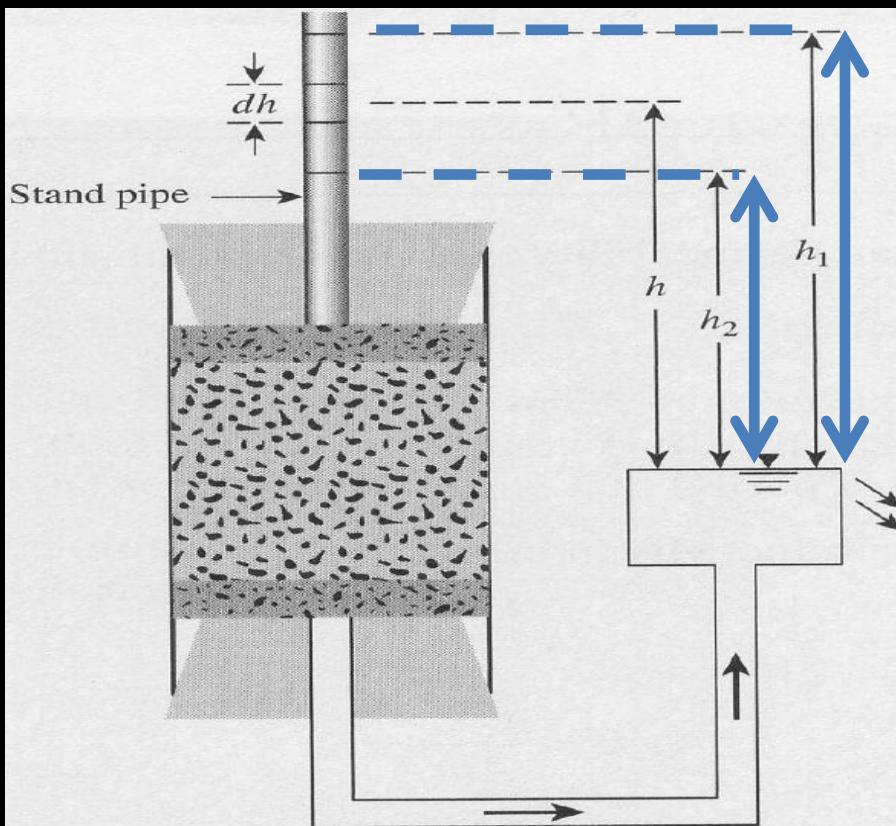
- 1) Colocar o disco poroso (*screen*) no permeâmetro
- 2) Efetuar medições para o permeâmetros ( $D$ ,  $L$ ,  $H_1$ )
- 3) Coletar 1000 g do solo que atravessa a peneira nº 4 (M1)
- 4) Coletar uma amostra para M.C.
- 5) Montar o permeâmetro
- 6) Preencher o molde com várias camadas do solo e compactar corretamente (ver manual laboratorial)
- 7) Colocar o disco poroso superior e medir  $H_2$
- 8) Pese o solo remanescente (M2)
- 9) Completar a montagem do permeâmetro (manter a válvula de saída fechada)
- 10) Conectar os tubos de manômetros, mantendo as válvulas fechadas
- 11) Use a bomba de vácuo para remover o ar durante 15 minutos (através do topo do tubo de entrada)
- 12) Realizar o teste seguindo rigorosamente as instruções do manual do laboratório
- 13) Registrar dados (e.g. cargas hidráulicas nos manômetros  $H_1$  e  $H_2$ ; volume de água coletado à saída  $\nabla$  (ml) para  $t \sim 60$  segundos.

# PERMEABILIDADE DOS SOLOS - Fluxo Unidimensional

## Testes laboratoriais para estimar a cond. hidráulica $k$

Aplicação de cada um dos dois métodos comuns de teste (ou ensaio)

### Teste com carga hidráulica decrescente (*Falling-Head Test*)



- O teste com carga decrescente é mais versátil e pode ser usado tanto em solos de granulometria grossa (*coarse-grained soils*) como em solos de granulometria fina (*fine-grained soils*)
- É o método mais preciso para situações em que o coeficiente de permeabilidade é muito baixo (e.g. solos argilosos).

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## Considerações sobre o fluxo em meio poroso:

1. O fluxo diz-se unidimensional quando ocorre numa única direção (e.g. caso dos permeâmetros). Por exemplo, em areias uniformes ocorre fluxo com direção e gradiente hidráulico ( $i = dH/dx$ ) constantes em qualquer ponto, mas na natureza não existem areias uniformes.

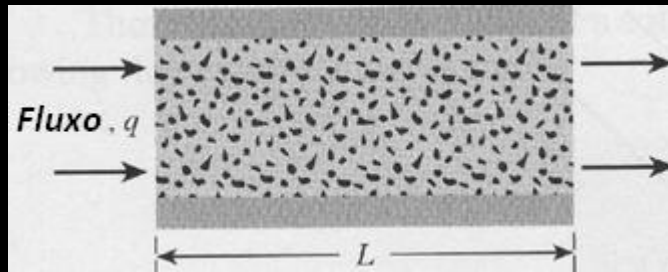
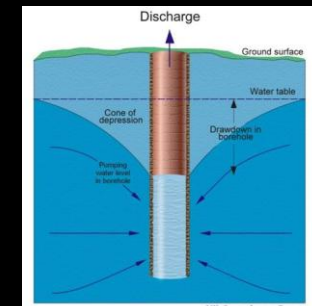
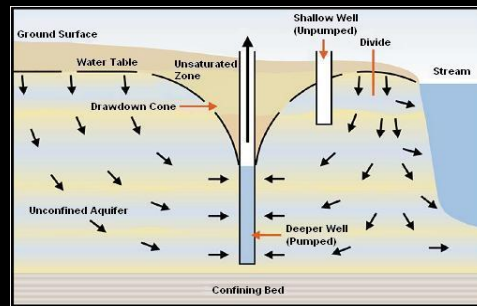
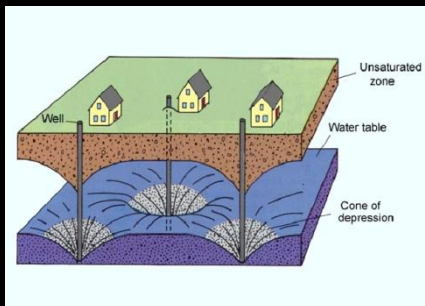


Fig. Fluxo unidimensional ( $Ox$ ) num permeâmetro

2. Se as partículas da água movimentam-se em todas as direções, o fluxo é considerado tridimensional (e.g. afluência da água para um poço)

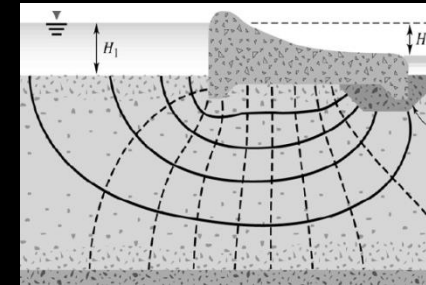
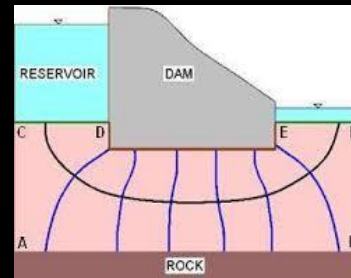
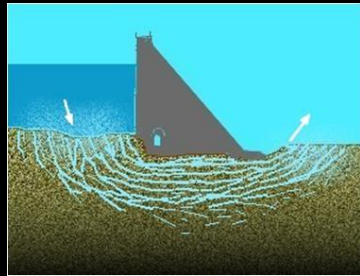


Leitura recomendada: Das (2006: cap. 7); Pinto (2009:143-144)

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## Considerações sobre o fluxo em meio poroso (cont.):

3. Se as partículas da água seguem trajetórias curvas contidas em planos paralelos o fluxo é bidimensional (e.g. percolação na fundação da barragem)



4. A análise é feita recorrendo-se à representação de **linhas de fluxo** (percursos das partículas da água) e a respectiva perda de carga (*potencial drop*) (dissipação da energia ao longo do percurso). O conjunto das linhas de fluxo recebe a designação de rede de fluxo

5. Assim como a curva de nível é o lugar geométrico dos pontos que ocupam a mesma cota, união de pontos com a mesma carga hidráulica (definida pela equação de Bernoulli) recebe a designação de **linha equipotencial** (i.e. de igual potencial hidráulico).



# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## Lei de Darcy vs Fluxo Bidimensional

- De acordo com a lei de Darcy a vazão é expressa pela equação

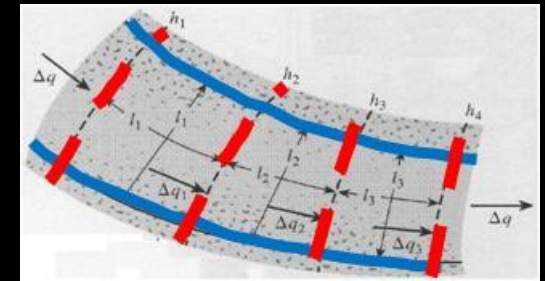
$$q = kiA$$

onde:  $q$  – vazão volumétrica ( $L^3T^{-1}$ );  $k$  – condutividade hidráulica ( $LT^{-1}$ );  $i$  – gradiente hidráulico ( $L/L$ );

$A$  é a área da seção transversal ( $L^2$ ).

- Para analisar o fluxo bidimensional a equação anterior deve ser expressa em formato para 2D obtendo-se

$$q = kiL$$



onde:  $q$  é a vazão por unidade de comprimento (i.e.  $L^3T^{-1}L^{-1}$ ).

O  $q$  pode ser interpretado como “condutividade hidráulica por unidade de comprimento lateral na direção perpendicular ao plano do papel (ou projeção do *slide*).

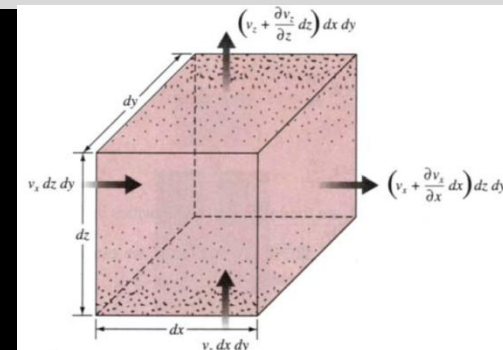
Leitura recomendada: Das (2006: cap. 7)

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## Equação do Fluxo Tri- e Bidimensional

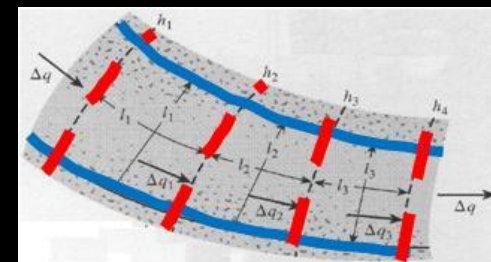
- Para regime permanente ( $q$  constante) a soma da diferença da vazão de saída e entrada segundo as e direções ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) é nula:

$$\left( k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) dx dy dz = 0$$



- Para fluxo bidimensional (**inexistência de percolação segundo  $y$** ):

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$



- Para **solo isotrópico** ( $k_x = k_z$ ) a equação é simplificada em:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Obtém-se a equação de Laplace. As linhas de fluxo interceptam ortogonalmente as linhas equipotenciais na formação das redes de fluxo, como se ilustra na figura acima.

Leitura recomendada: **Das (2006: cap. 7)**

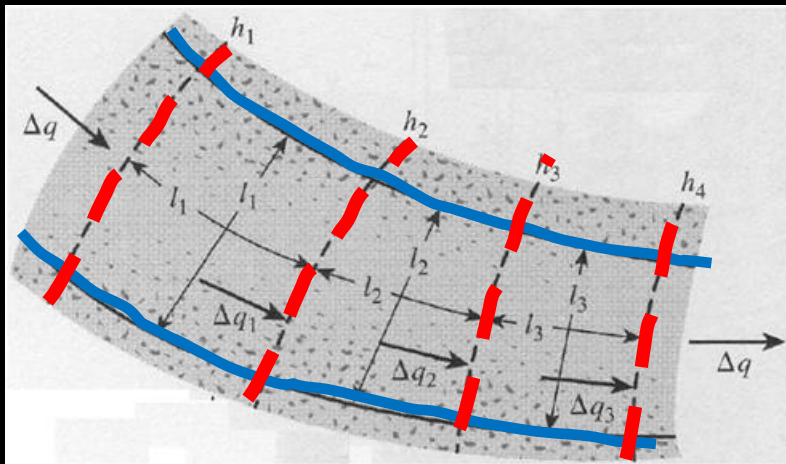
# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## Descrição das redes de fluxo em meio poroso:

- As **linhas de fluxo** devem proporcionar **canais de fluxo** (i.e. faixas limitadas por linhas de fluxo) que transportam a mesma vazão visto que todos possuem a mesma largura
- As **linhas equipotenciais** devem ser desenhadas em faixas (ou intervalos) de perda de potencial de igual valor

— Linha de fluxo  
- - - Linha equipotencial

Podem desenhar-se linhas de fluxo com separações idênticas para construir elemento quadrado ( $l_i = l_j$ , Fig.).



Vazão num elemento quadrado ( $l_i = l_j$ ):

$$\Delta q_1 = \Delta q_2 = \Delta q_3 = \dots = \Delta q$$

$$\Delta q = k \left( \frac{h_1 - h_2}{l_1} \right) l_1 = k \left( \frac{h_1 - h_2}{l_2} \right) l_2 = k \left( \frac{h_1 - h_2}{l_3} \right) l_3 = \dots \text{Lei de Darcy}$$

$$\Delta h = h_1 - h_2 = h_2 - h_3 = h_3 - h_4 = \dots = \frac{H}{N_d}$$

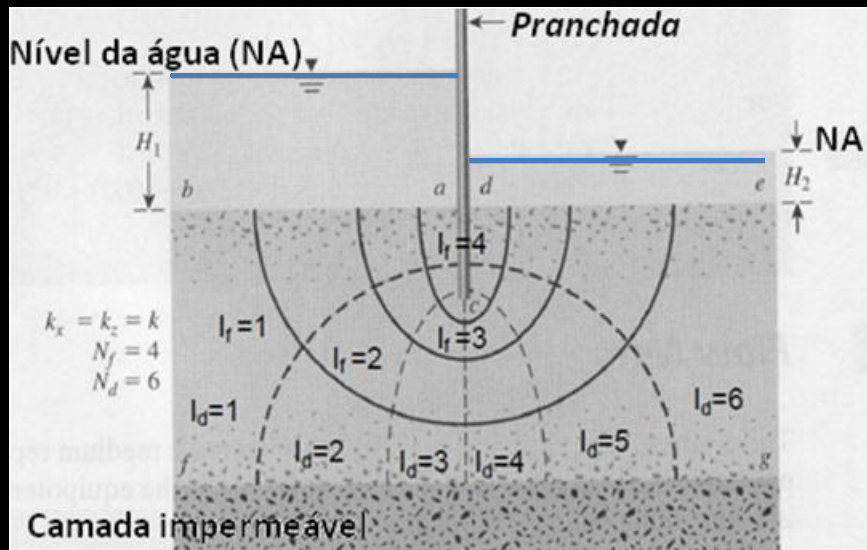
Leitura recomendada: Das (2006: cap. 7); Pinto (2009: 144-145)

H. Mata-Lima (2014)

$$\Delta q = k \frac{H}{N_d}$$

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## Análise da Percolação sob Pranchada (*sheet pile*)



### Significado das variáveis:

$H$  – diferença de carga entre os lados de montante e jusante (ver Fig.)

$N_d$  – número de faixas de perda de potencial

$N_f$  – número de canais de fluxo na rede de fluxo desenhada.

- A vazão total através de todos os canais por unidade de comprimento é

$$q = k \frac{HN_f}{N_d}$$

Para o exemplo apresentado na figura, tem-se:

$$H = H_1 - H_2$$

$$k = k_x = k_z$$

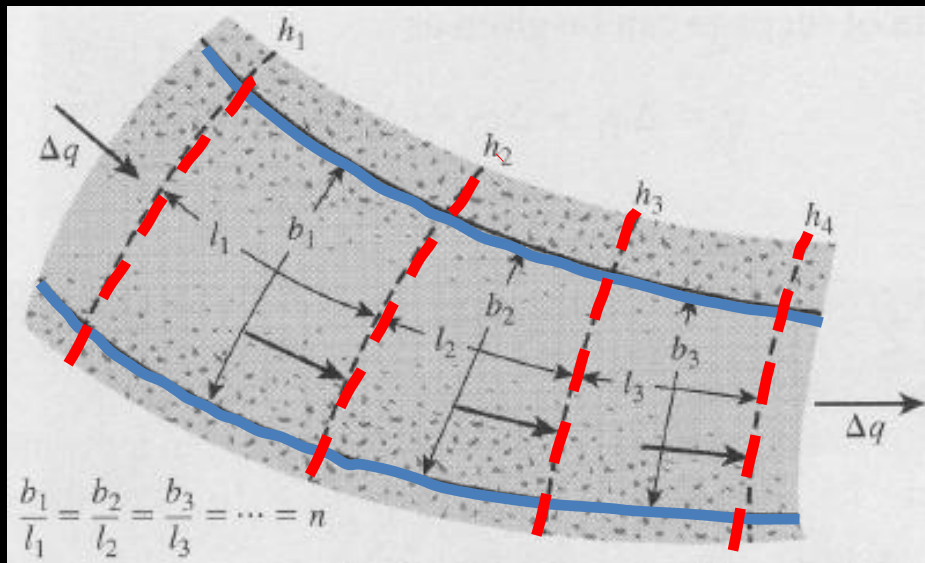
$$N_d = 6$$

$$N_f = 4$$

Leitura recomendada: Das (2006: cap. 7); Pinto (2009:148)

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## Percolação em Canais de Fluxo com Elementos Retangulares



Podem desenhar-se linhas de fluxo com diferentes separações (para construir elemento retangular em vez de elemento quadrado (apesar de conveniente), mas as linhas equipotenciais têm que ser desenhadas sempre com perda de carga/potencial constante.

- Na **figura** acima a razão entre a largura ( $b_i$ ) e comprimento ( $l_i$ ) para todos os elementos retangulares na rede de fluxo são iguais. Assim, a equação de fluxo através de um canal é:

$$\Delta q = k \left( \frac{h_1 - h_2}{l_1} \right) b_1 = k \left( \frac{h_2 - h_3}{l_2} \right) b_2 = k \left( \frac{h_3 - h_4}{l_3} \right) b_3 = \dots$$

- Como os elementos não são quadrados (i.e.  $b_i/l_i = n$ ), então as equações anteriores  $\Delta q = k \left( \frac{H}{N_d} \right)$  e  $q = k \frac{HN_f}{N_d}$  são alteradas para

$$\Delta q = k \left( \frac{H}{N_d} \right)$$

$$q = k \frac{HN_f}{N_d}$$

$$\Delta q = kH \left( \frac{n}{N_d} \right)$$

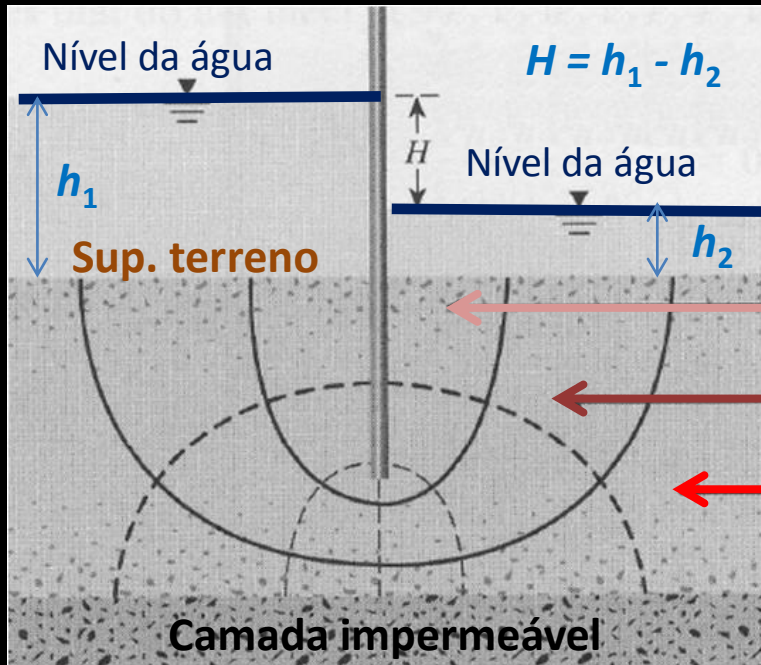
$$q = kH \left( \frac{N_f}{N_d} \right) n$$

Leitura recomendada: Das (2006: cap. 6); Pinto (2009:83-, xx, xx-);

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## Percolação em Canais com Elementos de Seção Distintos

- Considere uma **figura** com rede de fluxo sob pranchada (com o nível de água rebaixado de um dos lados). Os canais de fluxo 1 e 2 possuem elementos quadrados. Pretende-se que escreva a equação da vazão (*rate of flow*) através desses dois canais, assim como no 3º canal cujo elemento é retangular.



Como canal 1 tem elemento quadrado:

$$\frac{b}{l} = 1$$

Como canal 2 tem elemento quadrado:

$$\frac{b}{l} = 1$$

Como canal 2 tem elemento retangular:

$$\frac{b}{l} \approx 0,38$$

$$\Delta q_1 = \frac{k}{N_d} H$$

$$\Delta q_2 = \frac{k}{N_d} H$$

$$\Delta q_1 + \Delta q_2 = \frac{2kH}{N_d}$$

$$\Delta q_3 = \frac{k}{N_d} H(0.38)$$

$$q = 2\Delta q_1 + \Delta q_3$$

Leitura recomendada: Das (2006: cap. 7); Pinto (2009:146-152)

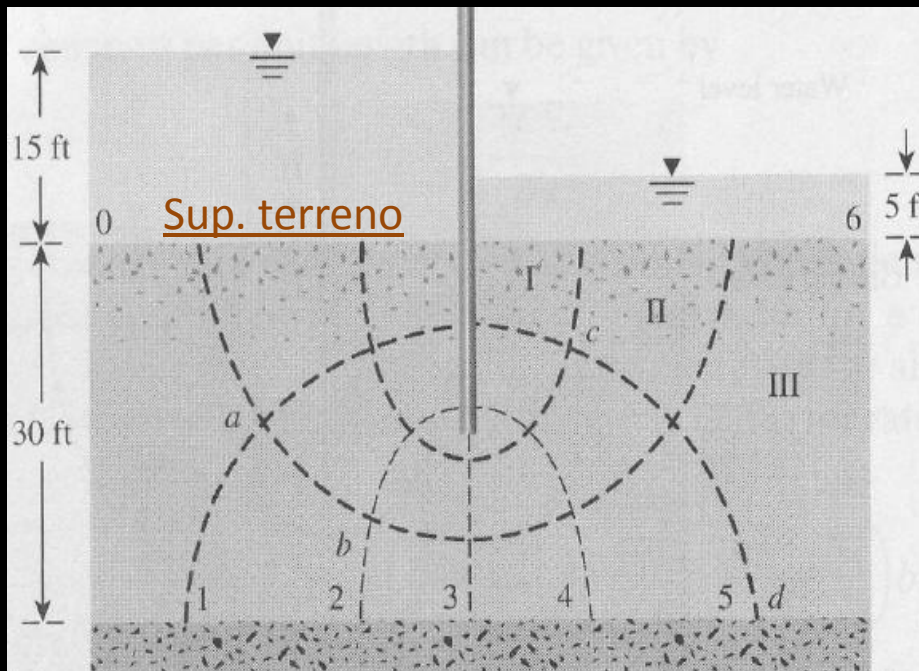
H. Mata-Lima (2014)

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## Exercício 1 (consolidação da compreensão)

Considere uma rede de fluxo referente a percolação sob pranchada penetrante numa camada de solo (ver **figura**) cuja condutividade hidráulica é

$k_x = k_z = k = 5 \cdot 10^{-3}$  cm/s (**areia fina**), determine:



- a) a altura máxima (acima da superfície do terreno) atingida pela água se os piezômetros são colocados nos pontos a, b, c e d
- b) a vazão da percolação através do canal II por unidade de comprimento (perpendicular à seção mostrada)
- c) a vazão total da percolação, através da camada permeável, por unidade de comprimento.

Leitura recomendada: **Das (2006: cap. 7); Pinto (2009:146-152)**

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## Exercício 1 (Resolução)





# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## REDES DE FLUXO EM SOLO ANISOTRÓPICO

- No meio natural os coeficientes de permeabilidade raramente são iguais em ambas as direções ( $x, z$ )
  - Estudos realizados vêm demonstrando que o  $k_x$  é habitualmente maior que o  $k_z$ . Há, por conseguinte, maior distorção da linha de fluxo na direção horizontal em virtude da permeabilidade ser maior nessa direção
  - No caso de meio anisotrópico as linhas de fluxo já não interceptam ortogonalmente as linhas equipotenciais na formação de redes de fluxo, ou seja, deixam de ser perpendiculares às equipotenciais
  - Da afirmação anterior resulta que a equação de fluxo já não se expressa pela equação de Laplace.
- Pelas razões supramencionadas, o traçado das redes de fluxo na situação de solo anisotrópico requer a transformação do problema para reduzir as distâncias horizontais (porque a  $k_z$  – vertical é menor que a  $k_x$  – horizontal)

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## Procedimento de transformação (redes de fluxo)

- 1) Adotar uma escala vertical ( $z$ ) para desenhar a seção transversal
- 2) Adotar uma escala horizontal ( $x$ ) tal que a escala horizontal seja  $= \sqrt{k_z/k_x} \times \text{escala vertical}$
- 3) Com as escalas adotadas nos passos 1) e 2), representar a seção vertical através da camada permeável paralela à direção do fluxo
- 4) Desenhar a rede de fluxo para a camada permeável sobre a seção obtida no passo 3, com as linhas de fluxo interceptando perpendicularmente as linhas equipotenciais e os elementos aproximadamente quadrados.

A vazão de percolação por unidade de comprimento pode ser agora calculada:

$$q = \sqrt{k_x k_z} H \left( \frac{N_f}{N_d} \right)$$

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## Representação Matemática da Transformação

$$k_H \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_V \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

+

$$x = \alpha \bar{x}$$

$$z = \bar{z}$$



$$\frac{k_H}{\alpha^2 k_V} \frac{\partial^2 h}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial \bar{z}^2} = 0$$

+

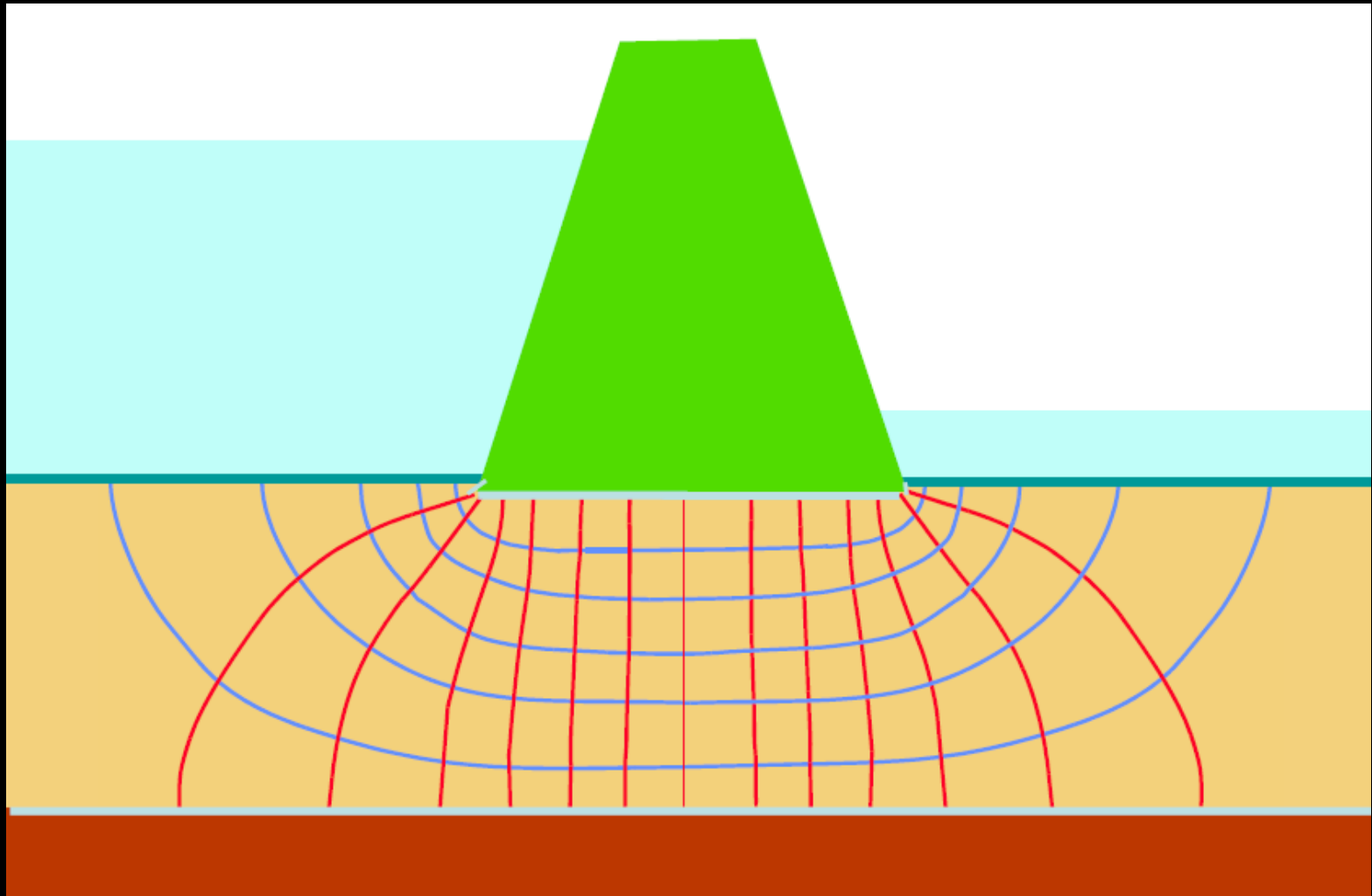
$$\frac{\partial^2 h}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial \bar{z}^2} = 0$$



$$\alpha = \sqrt{\frac{k_H}{k_V}}$$

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## EXEMPLO DA REDE DE FLUXO EM SOLO ANISOTRÓPICO



# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## EXEMPLO DE APLICAÇÃO (SOLO ANISOTRÓPICO)

Assuma que o solo subjacente a barragem ilustrada no *slide* da página anterior possui permeabilidades horizontal e vertical diferentes, tal que  $k_H = 4k_v$ .

Resolução:

- A transformação implica considerar que

$$\alpha = \sqrt{\frac{k_H}{k_v}} = \sqrt{\frac{4k_v}{k_v}} = 2$$

- Então

$$x = 2\bar{x} \quad \text{ou} \quad \bar{x} = \frac{1}{2}x$$

$$z = \bar{z}$$

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## EXEMPLO DE APLICAÇÃO (SOLO ANISOTRÓPICO) – cont.

- O fluxo para solo anisotrópico pode agora ser quantificado como no caso do solo isotrópico

$$q = kiL$$

- O fluxo é calculado pela equação como anteriormente

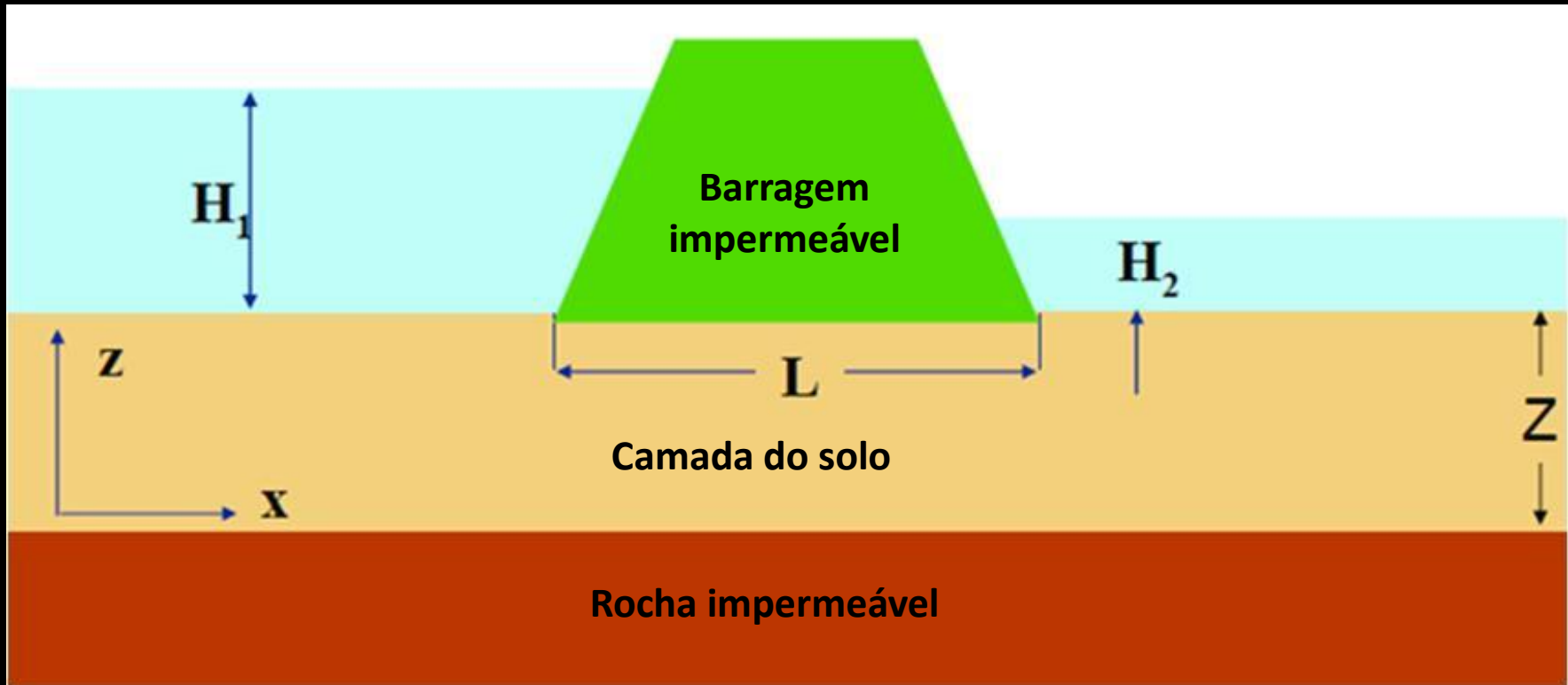
- Considerando uma permeabilidade equivalente

$$k = k_e = \sqrt{k_H k_v}$$

# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## EXEMPLO DE APLICAÇÃO (SOLO ANISOTRÓPICO) – cont.

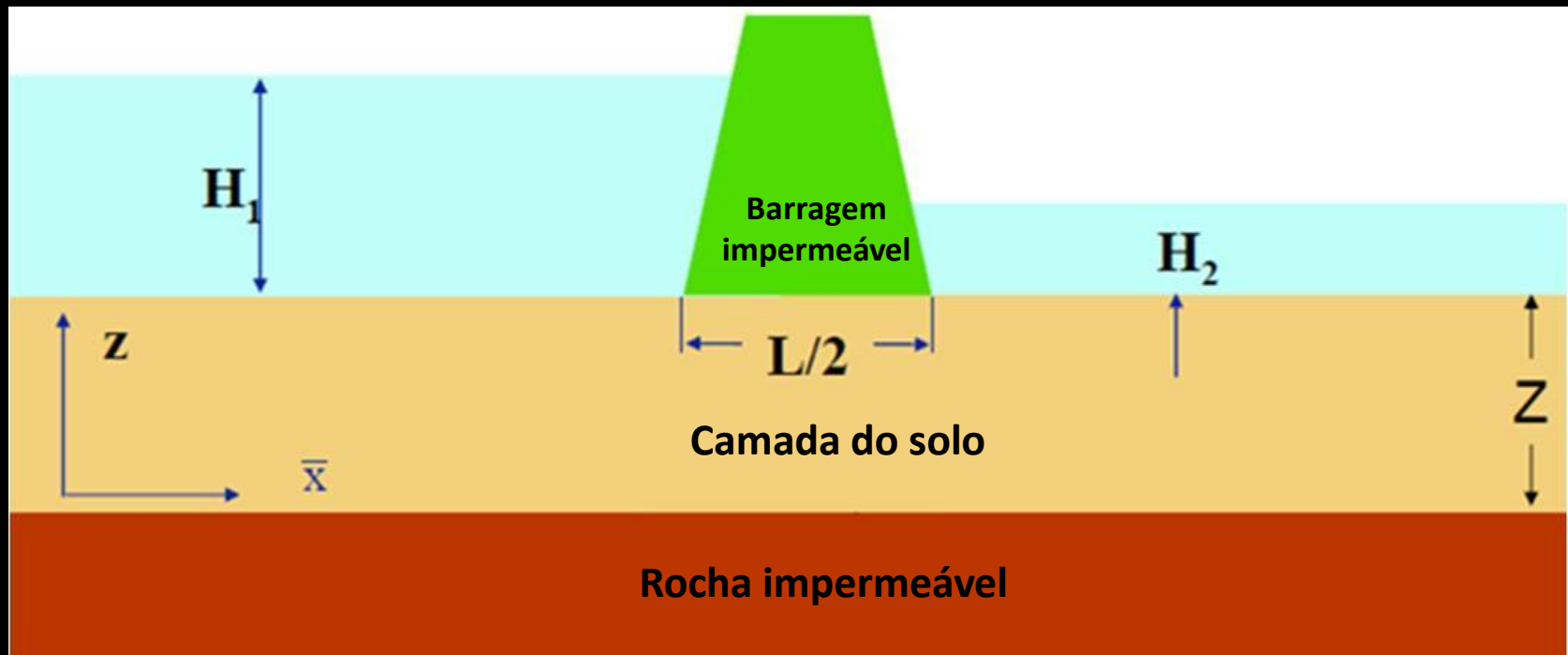
A Figura ilustra a barragem desenhada na escala natural.



# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

## EXEMPLO DE APLICAÇÃO (SOLO ANISOTRÓPICO) – cont.

A Figura ilustra a barragem desenhada na escala transformada.



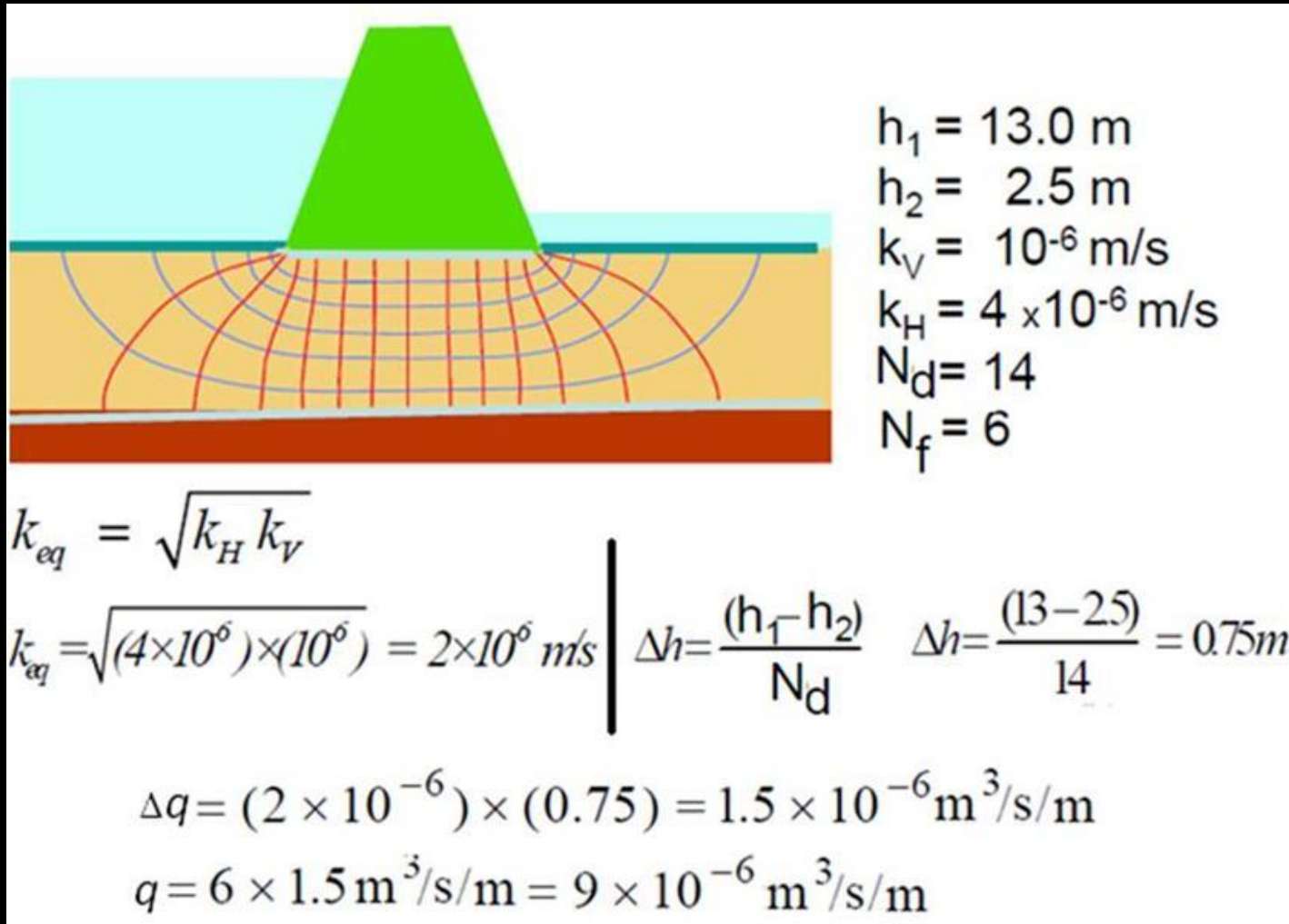
Leitura recomendada: Das (2006: cap. 7)



# FLUXO BIDIMENSIONAL (Redes de Fluxo)

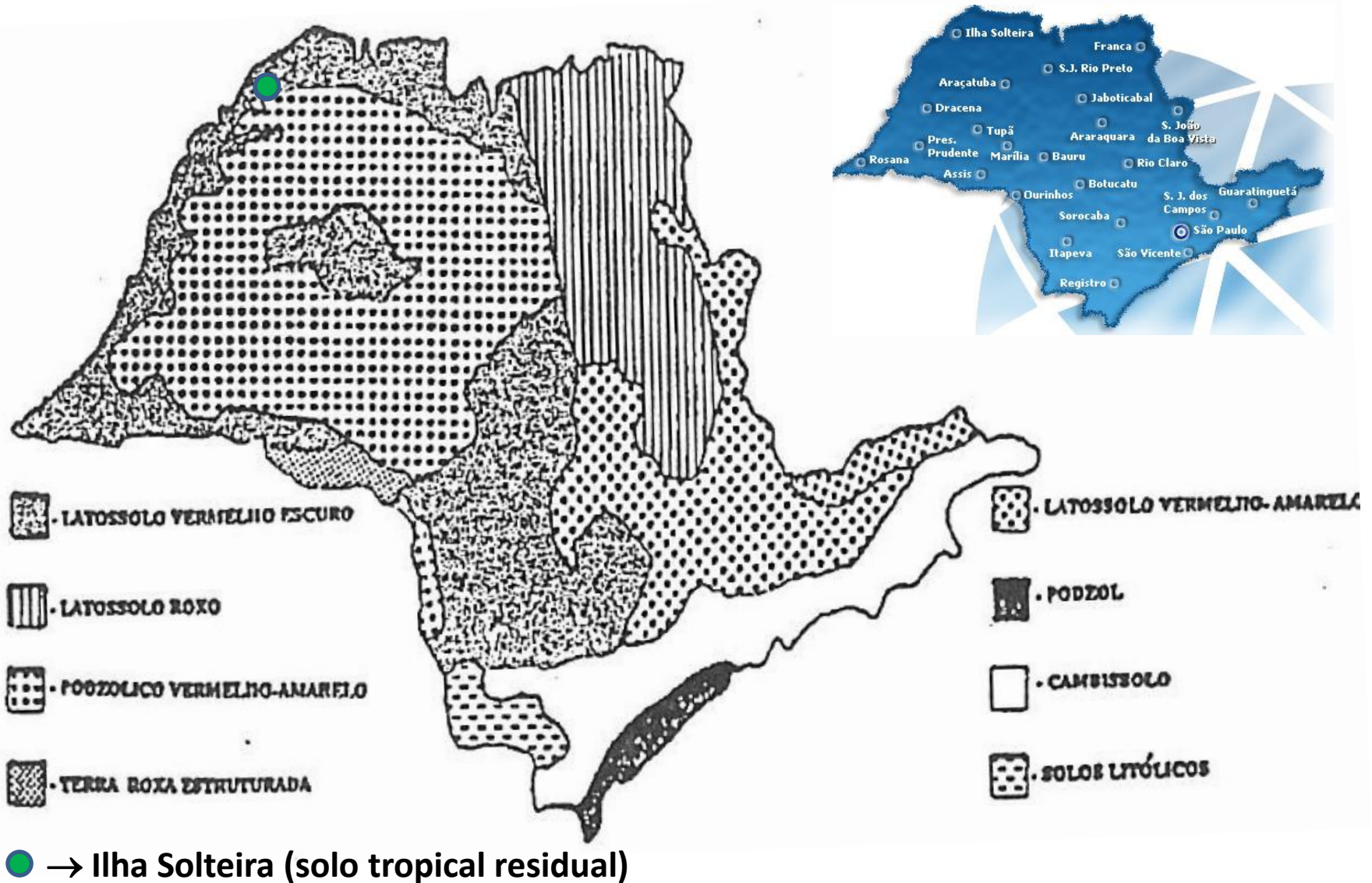
## EXEMPLO DE APLICAÇÃO (SOLO ANISOTRÓPICO) – cont.

Resultados dos cálculos efetuados:



# TIPO DE SOLOS

## Principais Solos Ocorrentes no Estado de São Paulo



# TIPO DE SOLOS

## Guia para Características Geotécnicas de Solos Residuais Tropicais

Pedological Terminology		Adopted Terminology NOTE (1)	Engineering Terms in Common Usage		COMMENTS: NOTE (2)
U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE	FAO/UNESCO		ENGINEERING 'SOIL'	ENGINEERING 'ROCK'	
OXISOLS	PLINTHISOLS	FERRALLITIC SOILS DURICRUST (FERRICRETE) (ALUCRETE)		CHECK FOR EROSIIVE & DISPERSIVE CHARACTERISTICS. CHECK FOR COLLAPSE POTENTIAL SOIL BEHAVIOUR MAY BE AFFECTED BY TEST PREPARATION METHODS: CARRY OUT PILOT TESTING PROGRAMME AND IF POSITIVE ENSURE THAT PREPARATION PROCEDURES IN MAIN TEST PROGRAMME, MIMIC FIELD CONDITIONS. CHECK DURABILITY OF CONCRETIONARY PARTICLES	
ULTISOLS	FERRALSOLS	FERRISOLS		CHECK FOR EROSIIVE AND DISPERSIVE CHARACTERISTICS. CHECK FOR COLLAPSE POTENTIAL.	
ALFISOLS	NITOSOLS ALFISOLS LIXISOLS	FERRUGINOUS SOILS		CHECK FOR SWELLING CHARACTERISTICS. CHECK FOR EROSIIVE AND DISPERSIVE CHARACTERISTICS.	
VERTISOLS	VERTISOLS	(FERRIALLITIC) VERTISOLS		CHECK FOR EROSIIVE AND DISPERSIVE CHARACTERISTICS. CHECK FOR COLLAPSE POTENTIAL SOIL BEHAVIOUR MAY BE AFFECTED BY TEST PREPARATION METHODS: CARRY OUT PILOT TESTING PROGRAMME AND IF POSITIVE ENSURE THAT PREPARATION PROCEDURES IN MAIN TEST PROGRAMME, MIMIC FIELD CONDITIONS.	
INCEPTISOLS	ANDOSOLS	FERRIALLITIC ANDOSOLS			

Fonte: Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1990, v.23, p.4-101

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**AYSEN, A. Soil Mechanics: Basic Concepts and Engineering Applications.** Lisse: Swets & Zeitlinger, 2002.

**DAS, B.M. Principles of Geotechnical Engineering.** 6th Edition. New York: Thomson Press, 2006.

**PINTO, C.S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 3ª edição, São Paulo: Oficina de Textos, 2009.