A Hidráulica dos Solos: Fluxo Unidimensional

Prof. Maristâni G. Spannenberg F.

ÁGUA NOS SOLOS

- Quando submetida a gradiente de pressões (entre outros), a água livre ou intersticial presente nos poros do solo movimenta-se no seu interior provocando tensões adicionais na estrutura do solo.

IMPORTÂNCIA PRÁTICA ESTUDO DA PERCOLAÇÃO:

- Barragens;

IMPORTÂNCIA PRÁTICA ESTUDO DA PERCOLAÇÃO:

- Cálculo de vazões, rebaixamento de lençol freático (escavações);

Perdizes – São Paulo - Geodactha

IMPORTÂNCIA PRÁTICA ESTUDO DA PERCOLAÇÃO:

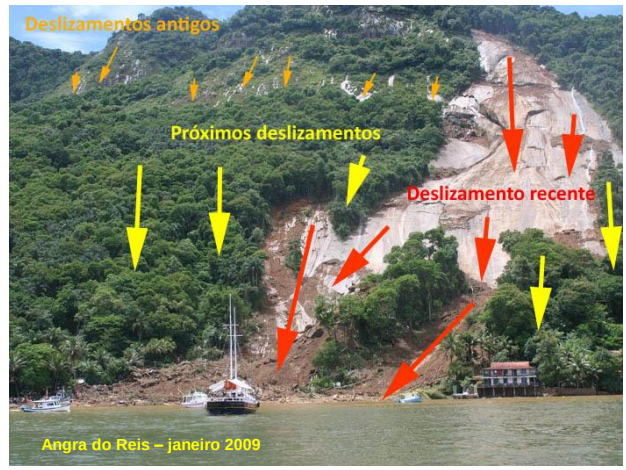
- Análise de recalques (fundações);

Santos - SP

Santos - SP

IMPORTÂNCIA PRÁTICA ESTUDO DA PERCOLAÇÃO:

- Estudos de estabilidade (taludes, estruturas de contenção, túneis, etc.).



FENÔMENOS CAPILARES

Capilaridade: o que é?

É definida como a **propriedade dos fluidos de "subir" ou "descer" por tubos muito finos.**

Ou seja, a capilaridade é uma propriedade do fluido (água) e

não do solo!

Se a capilaridade é uma propriedade da água, por que ela é importante para o solo?

Já sabemos que o solo apresenta pequenos espaços entre suas partículas. Logo, a água presente no solo consegue, por capilaridade, "subir" por esses *interstícios* do solo alcançando cotas acima da cota do lençol freático, e esse fenômeno precisa assim ser considerado!

**Interstícios: pesquise os sinônimos e entenda o que é!!*

FENÔMENOS CAPILARES

Vale ainda ressaltar que a altura que a água pode alcançar além do lençol freático, devido a capilaridade depende da natureza do solo; da granulometria do solo e outros diversos fatores!

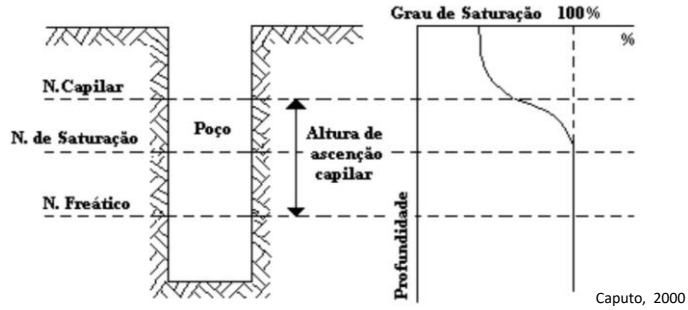
De maneira geral, em solos com granulometria mais fina, como argilas e siltes a ascensão capilar tem valores mais elevados do que em solos arenosos.

A ascensão capilar da água no solo pode atingir as seguintes ordens de grandeza:

Solo	hc
Pedregulhos	Poucos centímetros
Areias	1m a 2m
Siltes	3m a 4m
Argilas	Dezenas de metros

Souza Pinto, 2000

FENÔMENOS CAPILARES



Caputo, 2000

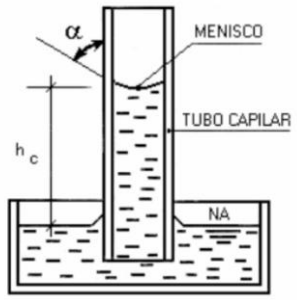
Esquema de ascensão capilar e grau de saturação do solo

Pode-se perceber que o solo não está saturado ao longo de toda a ascensão capilar.

Também vale conceituar os termos nível freático e zona saturada:

- **Nível freático**: é o nível abaixo do qual o solo se encontra submerso.
- **Zona saturada**: é a região onde os vazios do solo encontram-se completamente preenchidos d'água.

FENÔMENOS CAPILARES



Observado o Fenômeno Capilar quando inserimos um tubo bem fino em um recipiente com água, forma-se um menisco com concavidade voltada para cima e, no ponto de contato com o tubo forma um "ângulo de tensão capilar" (α).

Nesse sentido, é preciso notar também que esse "menisco" é ocasionado pela tensão superficial do fluido, que aqui iremos retratar como T.

Como posso associar isso ao solo?

Vamos imaginar que **os vazios do solo são pequenos tubos para a ascensão capilar da água**, porém, são tubos irregulares.

Ainda assim é possível estimar a **altura de ascensão capilar.** Existem algumas fórmulas que podemos utilizar para estimar grosseiramente o valor ascensão capilar no solo.

FENÔMENOS CAPILARES

Teoria do Tubo Capilar

$$h_{c,máx} = (4T) / (d\gamma_w)$$

Para fins práticos:

$$h_{c,máx} = 0{,}306/d \quad (d \text{ em cm})$$

$$\mathbf{h_c = C/(e.\ d_{10})}$$

Que é a **fórmula de Hazen**, onde :

- **C**: coeficiente com valores geralmente na faixa de 0,1cm² a 0,5cm²;
- **e**: índice de vazios do solo;
- **d_{10}**: diâmetro efetivo do solo;

FENÔMENOS CAPILARES

Coesão aparente: ocorre em solos arenosos não saturados.

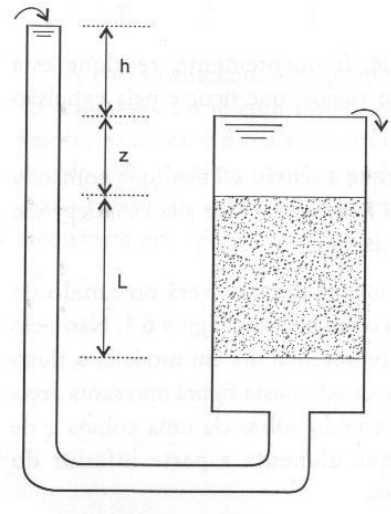
Coesão aparente pode ser entendida como o resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo, formando meniscos de água entre as partículas dos solos parcialmente saturados, que tendem a aproximá-las entre si (Fredlund e Rahardjo, em seu livro sobre Mecânica dos Solos não saturados).

Se você tenta fazer um castelo de areia com areia seca você não vai conseguir, justamente pela falta de coesão entre os grãos.

Entretanto, se você umidificar, sem saturar a areia, você consegue fazer seu castelo, justamente por essa coesão aparente, ocasionada pela tensão superficial!

PERMEABILIDADE DOS SOLOS

- O experimento de Henry Darcy (1850)
- Estudou a influência dos diversos fatores geométricos no cálculo da vazão de água em meio poroso.



PERMEABILIDADE DOS SOLOS

- **A Lei de Darcy**

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

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

- Q é a vazão;
- A é a área transversal ao fluxo;
- k é uma constante do meio denominada **Coeficiente de Permeabilidade**;
- A relação entre a carga hidráulica h que dissipa no movimento e a distância L de percolação é chamada **Gradiente Hidráulico**.

PERMEABILIDADE DOS SOLOS

- A facilidade com que a água flui através de um meio poroso, como o solo, constitui uma importante propriedade conhecida como **Permeabilidade.**

A **Permeabilidade** do solo é quantificada pelo coeficiente de permeabilidade k (unidade m/s).

PERMEABILIDADE DOS SOLOS

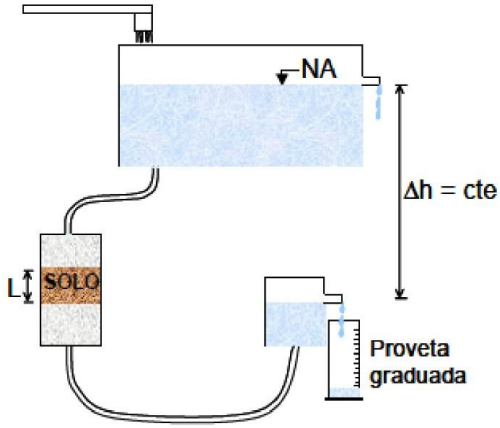
- **Velocidade de Percolação**
  - É o quociente entre a vazão (Q) e a área da seção transversal ao fluxo (A).

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad \Rightarrow \quad v = \frac{Q}{A} = k \cdot i$$

Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de um Solo

- Ensaios de Laboratório
  - Permeâmetro de Carga Constante
  - Permeâmetro de Carga Variável
  - Ensaios de adensamento (método indireto)
- Ensaios de Campo
  - Ensaio de perda d'água
  - Ensaio de infiltração
  - Piezômetros
- Correlações Empíricas

PERMEABILIDADE DOS SOLOS

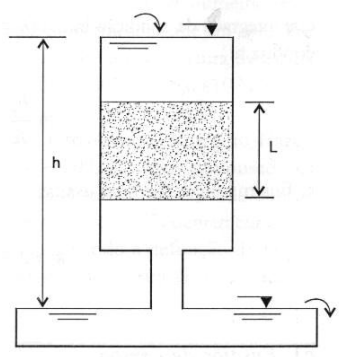


- **Permeâmetro de Carga Constante**

Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de um Solo em Laboratório

- **Permeâmetro de Carga Constante**

(baseado na experiência original de Darcy).



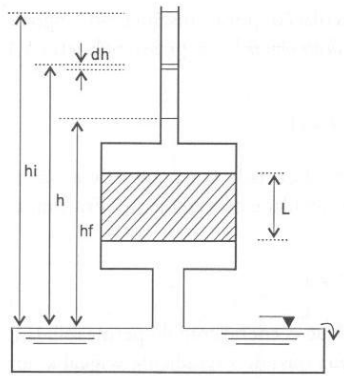
- Conhecidas a vazão e a geometria do fluxo, o Coeficiente de PERMEABILIDADE é calculado pela Lei de Darcy:

$$k = \frac{Q}{i \cdot A}$$

- Solos permeáveis – areias e pedregulhos.

Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de um Solo em Laboratório

- **Permeâmetro de Carga Variável**



- Num instante *t* qualquer, a vazão na amostra é dada pela lei de Darcy sendo igual à vazão medida na bureta:

$$Q = k\frac{h}{L}A = -\frac{a \cdot dh}{dt}$$

- Solos pouco permeáveis – argilas e siltes.

Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de um Solo em Laboratório

- **Permeâmetro de Carga Variável**
  - Desta igualdade tem-se que:

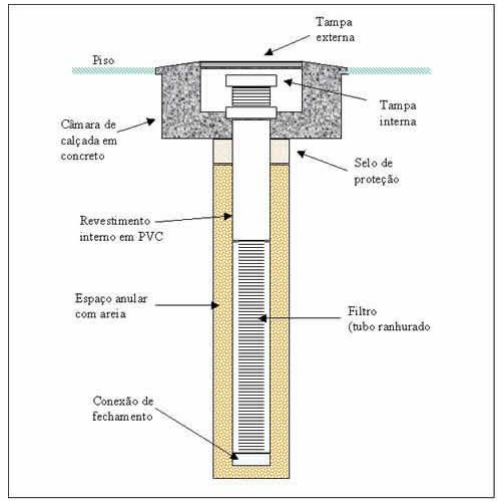
$$\frac{dh}{h} = -k \cdot \frac{A}{a \cdot L} dt$$

  - Integrando da condição inicial ($h=h_i$, $t=0$) à condição final ($h=h_f$, $t=t_f$) , e isolando *k*, chega-se finalmente a:

$$k = 2{,}3 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \log \frac{h_i}{h_f}$$

Determinação do Coeficiente de Permeabilidadede um Solo em Campo

- **Piezômetro**



Valores Típicos do Coeficiente de Permeabilidade

- Dependência do tamanho dos poros;
- Correlação empírica de Hazen (para areias):

$$k(cm/s) = 100 \cdot D_{10}^2$$

- Para argilas e areias sedimentares:

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

Variação do Coeficiente de Permeabilidade de cada Solo

- Equação de Taylor (1948) para o Coeficiente de Permeabilidade (baseada no fluxo de água por um conjunto de tubos capilares e na Lei de Darcy):

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

D = diâmetro da partícula de solo
e = índice de vazios
γ_w= peso específico da água
μ = viscosidade da água
C = coeficiente de forma

OBSERVAÇÕES IMPORTANTES

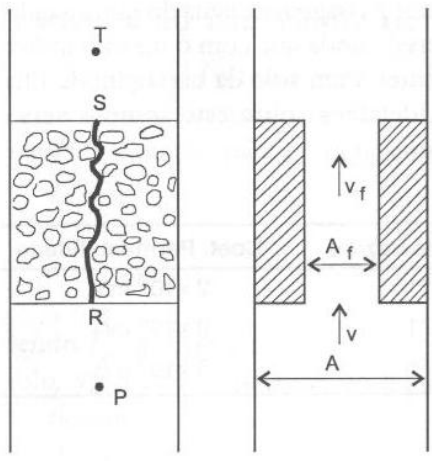
- Pedregulhos e algumas areias grossas: a velocidade de percolação pode ser muito elevada quando o fluxo torna-se turbulento (ATENCÃO: a Lei de Darcy é valida somente para fluxo laminar);
- Solos residuais e solos evoluídos apresentam estrutura de macroporos;
- Argilas rijas (possível existência de fissuras).
- Permeabilidade no campo x permeabilidade no laboratório!

Fatores que interferem no Coeficiente de Permeabilidade

- Solo
  - Forma e tamanho das partículas do solo;
  - Índice de vazios – quanto maior e maior será k;
  - Grau de saturação - k aumenta com S.
  - Composição das partículas do solo – mineralogia;
  - Estrutura do solo – anisotrópico;
- Fluido
  - Temperatura;
  - Peso específico;
  - Concentração do fluido.

$$k_{20} = k\frac{\mu}{\mu_{20}}$$

Velocidade de Descarga e Velocidade Real da Água



$$Q = A \cdot v = A_f \cdot v_f$$

$$v_f = v \cdot \frac{A}{A_f} = v \cdot \frac{V}{V_v} = \frac{v}{n}$$

$$v_f = \frac{d_{RS}}{t} = \frac{v}{n}$$

vf ainda é uma velocidade fictícia.

Cargas Hidráulicas

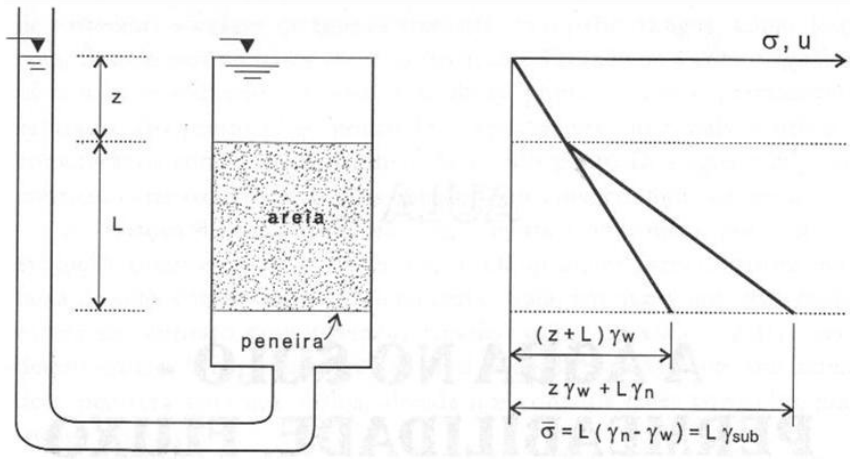
- No estudo do fluxo da água, pode-se expressar as componentes da energia por correspondentes cargas em termos de altura de coluna d'água equivalente.
- Segundo o Teorema de Bernoulli, a **carga hidráulica total** ao longo de uma linha de fluxo de um fluido incompressível é igual a soma de três parcelas:

Carga Total = C. Altimétrica + C. Piezométrica + C. Cinética

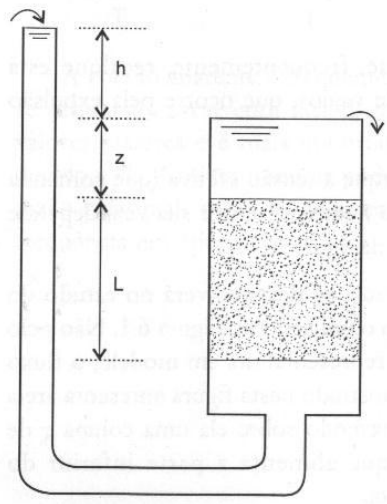
Cargas Hidráulicas

- Carga Altimétrica é a diferença de cota entre o ponto considerado e a cota de referência.
- Carga Piezométrica é a pressão atuante no ponto considerado expressa em altura de coluna d'água.
- Carga Cinética é a parcela calculada pela expressão $v^2/2g$ e poder ser considerada desprezível nos problemas de percolação em solos.

Cargas Hidráulicas



Cargas Hidráulicas



Cargas Hidráulicas

- **Observações Importantes:**
  - Para haver fluxo entre dois pontos é necessário haver diferença entre as cargas hidráulicas totais.
  - O fluxo se dá do ponto de maior para o de menor carga hidráulica total;
  - A vazão e a velocidade calculadas pela lei de Darcy são funções diretas da diferença de carga hidráulica (gradiente hidráulico).

Cargas Hidráulicas

- Em situação de fluxo, à diferença de carga hidráulica total h corresponde uma pressão dada por $h \cdot \gamma_w$
- Esta diferença é dissipada ao longo do comprimento de percolação pelo atrito viscoso entre a água e as partículas de solo, gerando uma força de arraste sobre estas partículas, no sentido do movimento.

Força de Percolação

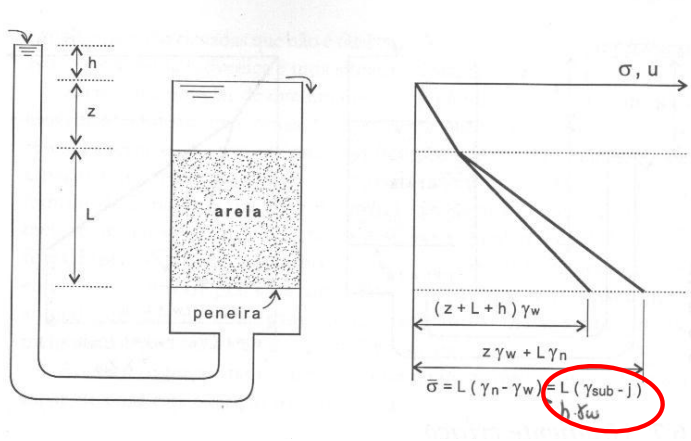
- A **força de percolação** por unidade de volume é dada por:

$$j = \frac{h \cdot \gamma_w \cdot A}{A \cdot L} = \frac{h}{L} \cdot \gamma_w = i.\gamma_w$$

- A força de percolação possui unidades de peso específico e atua de forma semelhante à força gravitacional.

Tensões no Solo Submetido à Percolação

- Caso de Fluxo Ascendente



Gradiente Hidráulico Crítico

- Quando durante o fluxo ascendente a tensão efetiva em um ponto do solo se torna nula.

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

$$i_{crit} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} \cong 1$$

- É a principal causa das chamadas rupturas hidráulicas em estruturas geotécnicas.

Gradiente Hidráulico Crítico

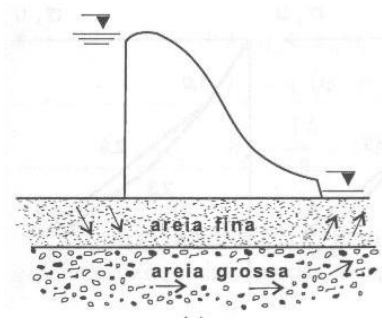
- **Levantamento Hidráulico ou Areia Movediça**: quando, devido ao gradiente ser maior do que o crítico, a areia perde a sua resistência ao cisalhamento, comportando-se como um líquido viscoso.
  - Ocorrência rara na natureza;
  - Pode ocorrer, contudo, em determinados tipos de obras geotécnicas, principalmente em areias finas.
  - Não existem argilas movediças!

Gradiente Hidráulico Crítico

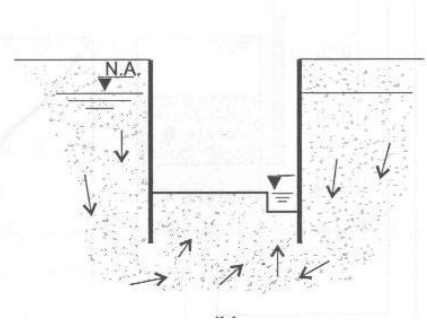
- **Erosão progressiva ou Entubamento** (Piping): quando, devido a heterogeneidade do solo, há concentração de fluxo em zonas de maior permeabilidade, causando a perda de resistência localizada e o arraste das partículas sólidas.
  - A partir de um pequeno furo, a erosão progride regressivamente para o interior do solo;
  - É a mais freqüente causa de ruptura em barragens de terra.

Gradiente Hidráulico Crítico

- Exemplos de estruturas geotécnicas sujeitas à rupturas hidráulicas:



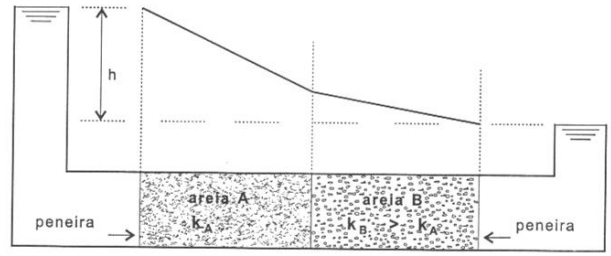
Barragem Vertedouro

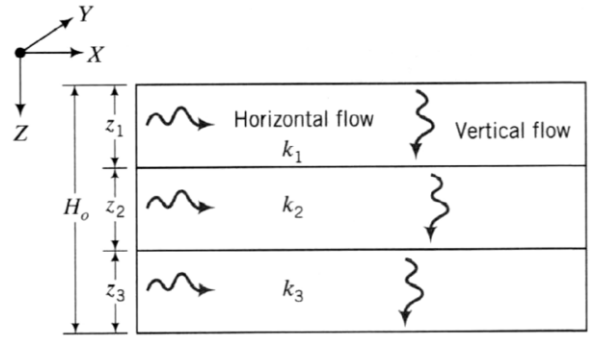


Escavação

Fluxo Horizontal

- Percolação através do substrato de uma barragem caracterizam fluxo horizontal.
- As forças de percolação neste caso são horizontais, não havendo possibilidade de levantamento hidráulico.



Fluxo em Meio Estratificado

- Estratificação paralela ao fluxo;
- Estratificação perpendicular ao fluxo.