

A Hidráulica dos Solos: Fluxo Unidimensional

Prof. Maristâni G. Spannenberg F.

1

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.

2

IMPORTÂNCIA PRÁTICA ESTUDO DA PERCOLAÇÃO:

■ Barragens;



3

INSPEÇÃO DE CAMPO DA BARRAGEM FUNDÃO:



Vista de talude de jusante sem proteção vegetal.



Ombreira direita – trecho onde detectou-se surgência, já controlada na época da inspeção

RUPTURA DE BARRAGEM POR LIQUEFAÇÃO



4

IMPORTÂNCIA PRÁTICA ESTUDO DA PERCOLAÇÃO:

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



5

IMPORTÂNCIA PRÁTICA ESTUDO DA PERCOLAÇÃO:

- Análise de recalques (fundações);



6

IMPORTÂNCIA PRÁTICA ESTUDO DA PERCOLAÇÃO:

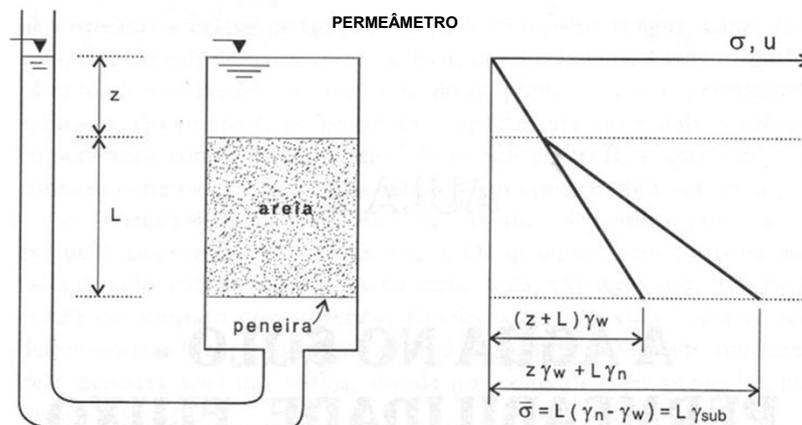
- Estudos de estabilidade (taludes, estruturas de contenção, túneis, etc.).



7

ÁGUA NOS SOLOS

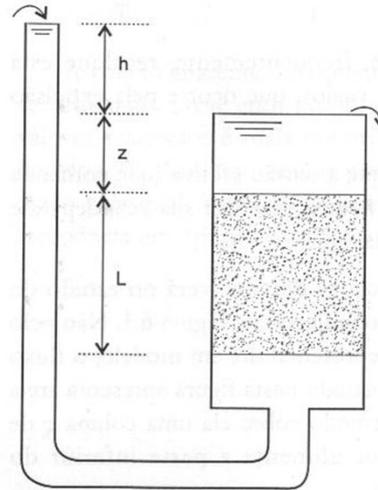
- Estudo experimental do fluxo de água em solos;
- Tensões do solo em regime estacionário;



8

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.



9

PERMEABILIDADE DOS SOLOS

- A Lei de Darcy

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

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

10

PERMEABILIDADE DOS SOLOS

■ CONCEITO:

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 (unidade m/s).

11

PERMEABILIDADE DOS SOLOS

■ Velocidade de Percolação

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

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

12

Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de um Solo

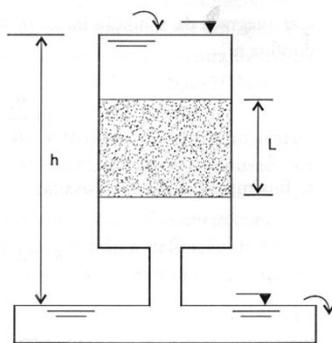
- Ensaio de Laboratório
 - Permeâmetro de Carga Constante
 - Permeâmetro de Carga Variável
 - Ensaio de adensamento (método indireto)
- Ensaio de Campo
 - Ensaio de perda d'água
 - Ensaio de infiltração
 - Piezômetros
- Correlações Empíricas

13

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:

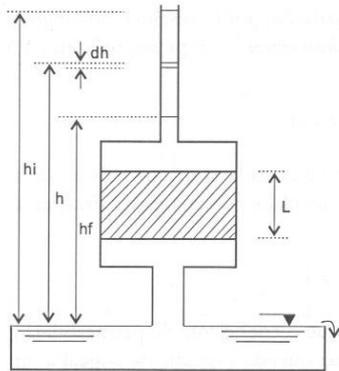
$$k = \frac{Q}{i \cdot A}$$

- Solos permeáveis – areias e pedregulhos.

14

Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de um Solo em Laboratório

■ Permeômetro 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.

15

Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de um Solo em Laboratório

■ Permeômetro de Carga Variável

- Desta igualdade tem-se que:

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

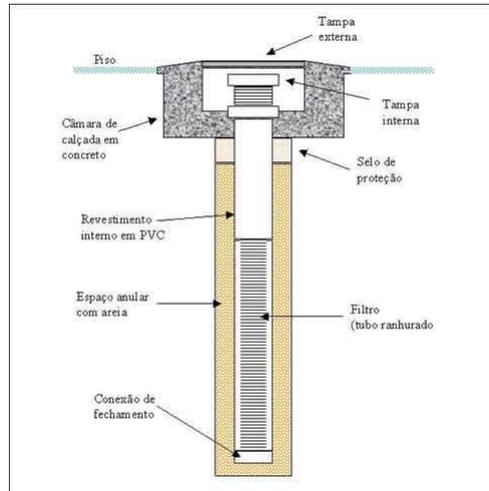
- Integrando da condição inicial ($h=h_i$, $t=0$) à condição final ($h=h_f$, $t=t_f$), e isolando k , chega-se finalmente a:

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

16

Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de um Solo em Campo

■ Piezômetro



17

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
siltos	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

18

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

19

OBSERVAÇÕES IMPORTANTES

- Pedregulhos e algumas areias grossas: a velocidade de percolação pode ser muito elevada quando o fluxo torna-se turbulento (ATENÇÃO: a Lei de Darcy é válida 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!

20

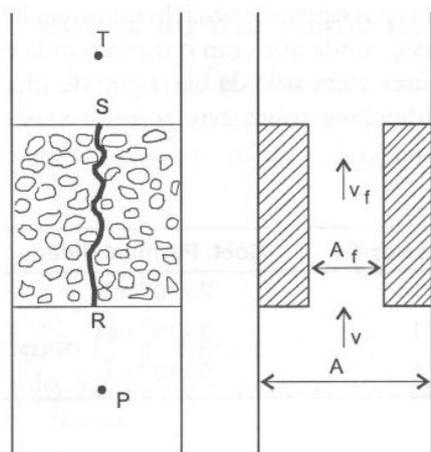
Fatores que interferem no Coeficiente de Permeabilidade

- 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.

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

21

Velocidade de Descarga e Velocidade Real da Água



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

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

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

v_f ainda é uma velocidade fictícia.

22

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:

$$\text{Carga Total} = \text{C. Altimétrica} + \text{C. Piezométrica} + \text{C. Cinética}$$

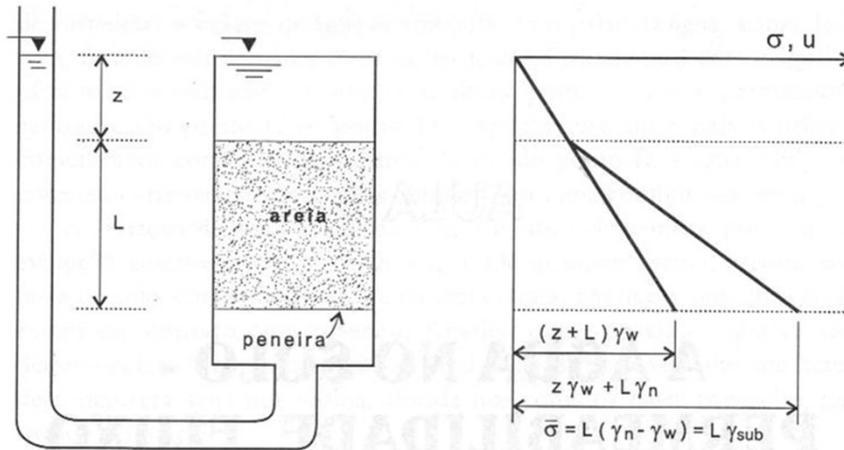
23

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.

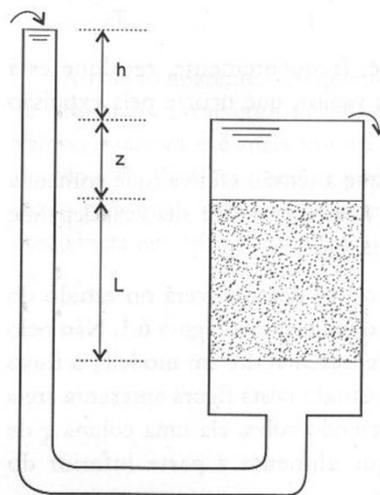
24

Cargas Hidráulicas



25

Cargas Hidráulicas



26

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).

27

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.

28

Força de Percolação

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

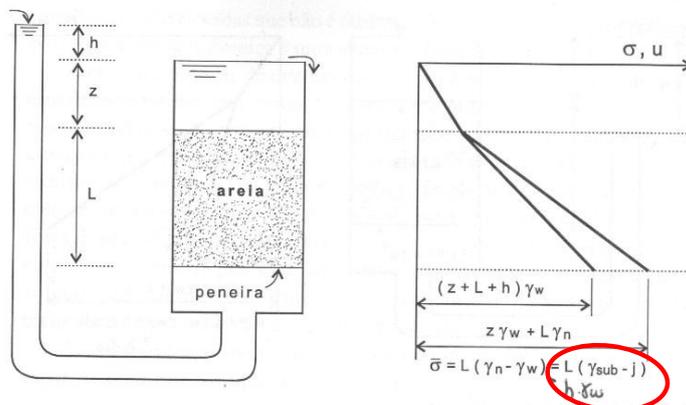
$$j = \frac{h \cdot \gamma_w \cdot A}{A \cdot L} = \frac{h}{L} \cdot \gamma_w = i \cdot \gamma_w$$

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

29

Tensões no Solo Submetido à Percolação

- Caso de Fluxo Ascendente



30

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.

31

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!

32

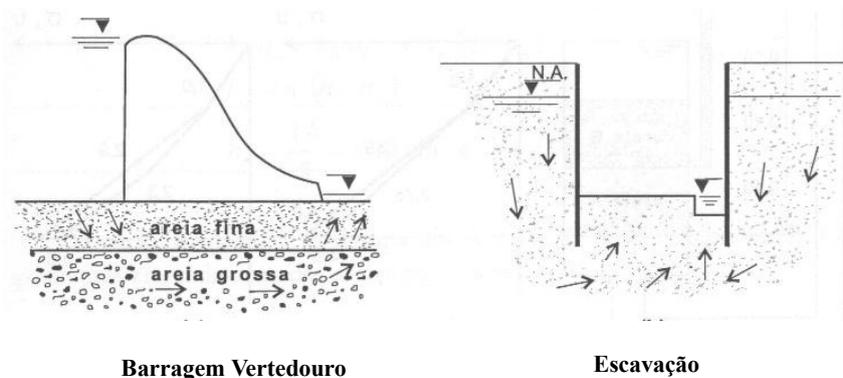
Gradiente Hidráulico Crítico

- **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.

33

Gradiente Hidráulico Crítico

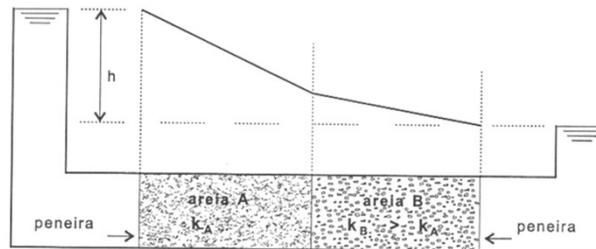
- Exemplos de estruturas geotécnicas sujeitas à rupturas hidráulicas:



34

Fluxo Horizontal

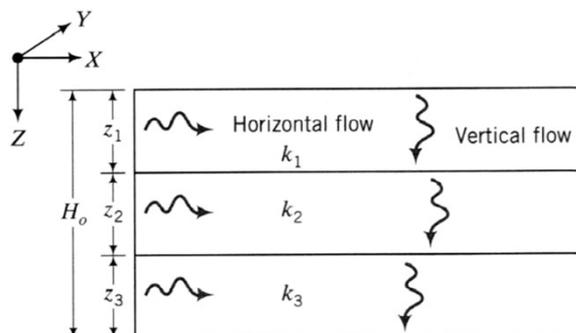
- Percolação através do substrato de uma barragem caracterizam fluxo horizontal.
- As forças de percolação neste caso são horizontais, não havendo possibilidade de levantamento hidráulico.



35

Fluxo em Meio Estratificado

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



36