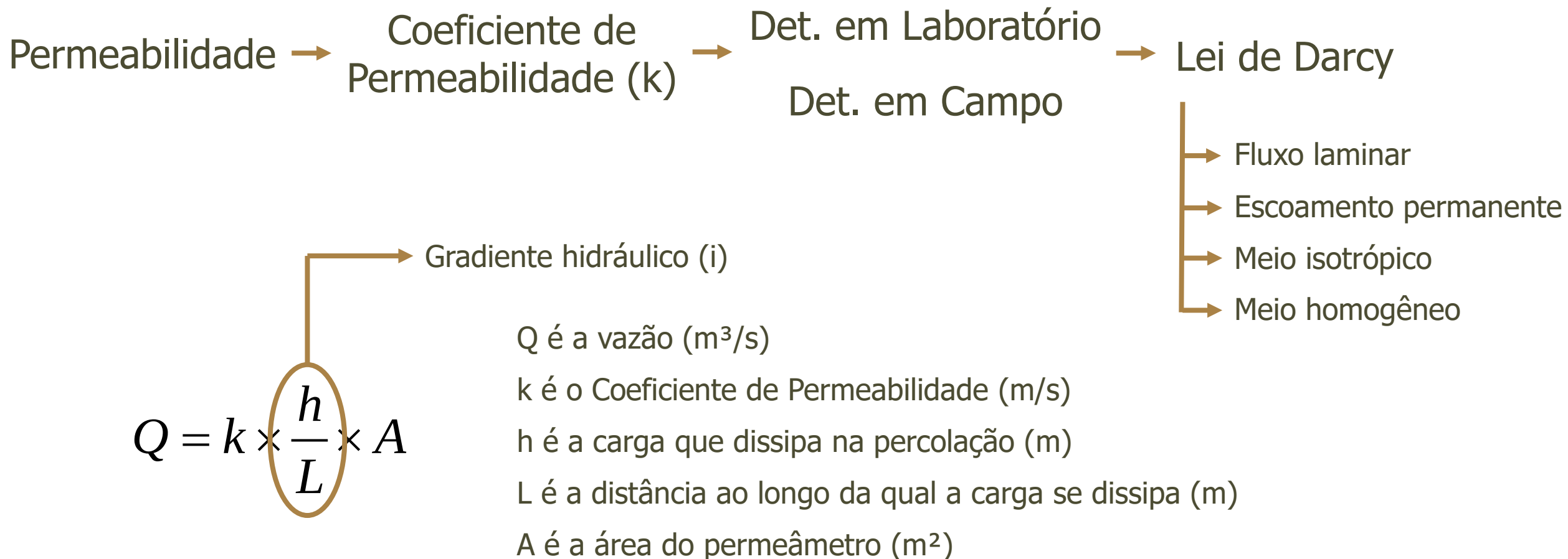


ENSAIO DE PERMEABILIDADE IN-SITU





Valores Típicos (Souza Pinto, 2006)

Solos Sedimentares	Valores Típicos (m/s)	Valores Típicos (cm/s)
Argilas	$< 10^{-9}$ m/s	$< 10^{-7}$ cm/s
Siltes	10^{-6} a 10^{-9} m/s	10^{-4} a 10^{-7} cm/s
Areias argilosas	10^{-7} m/s	10^{-5} cm/s
Areias finas	10^{-5} m/s	10^{-3} cm/s
Areias médias	10^{-4} m/s	10^{-2} cm/s
Areias grossas	10^{-3} m/s	10^{-1} cm/s

Exceção: mistura de solos

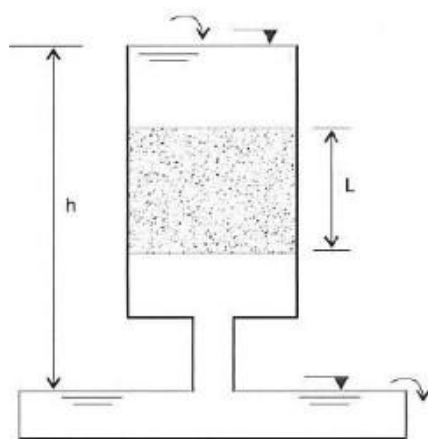
Determinação em Laboratório

Permeâmetro de Carga Constante

- Mantêm o NA constante
- Mede-se o volume de água e o tempo (solos granulares)

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

A é a área da seção do permeâmetro (m²)

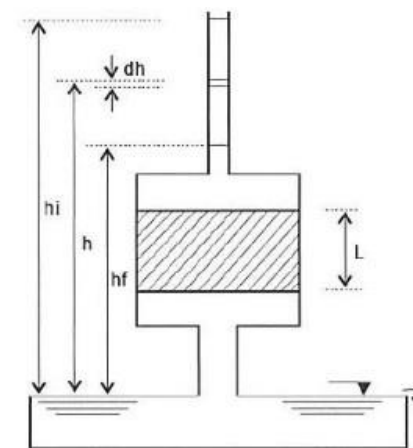


Permeâmetro de Carga Variável

- Mede-se o volume de água, o tempo e a variação da coluna d'água (solos pouco permeáveis)

$$k = 2,3 \times \frac{a \times L}{A \times t} \times \log\left(\frac{h_i}{h_f}\right)$$

a é a área da seção da bureta (m²)



Determinação em Laboratório

X

Determinação em Campo

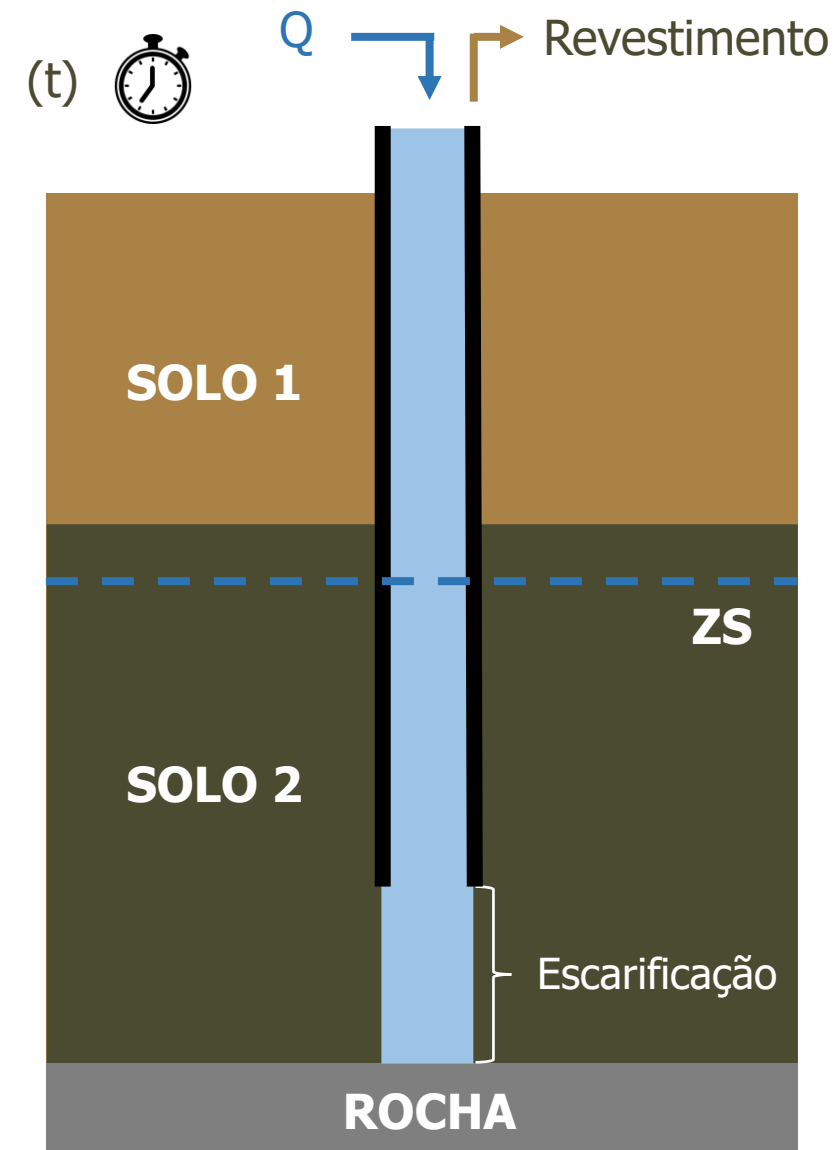
- Maior controle (áreas bem determinadas, vazão bem aferida, saturação bem definida, tipo de solo fixado)
 - Teoria bem fundamentada
 - Ensaio unidimensional
 - Resultados mais confiáveis
 - Profundidade limitada pela viabilidade de recuperação de uma amostra indeformada
 - Preço da amostra indeformada
 - Erros de conformidade (deformação da amostra)
 - Lento
 - Necessita a disponibilidade de um laboratório de mecânica de solos próximo
- Mais rápido
 - Mais barato
 - Pode atingir grandes profundidades
 - Feito em furos pré-existentes (sondagens realizadas no local, não necessita amostra)
 - Alta conformidade
 - Simplificação de um fenômeno complexo
 - Áreas não tão bem definidas
 - Materiais e estratigrafia não tão bem definidos
 - Saturação do solo incerta
 - Ensaio tridimensional (não diferencia entre permeabilidade horizontal e vertical, anisotropia)



Melhor amostragem

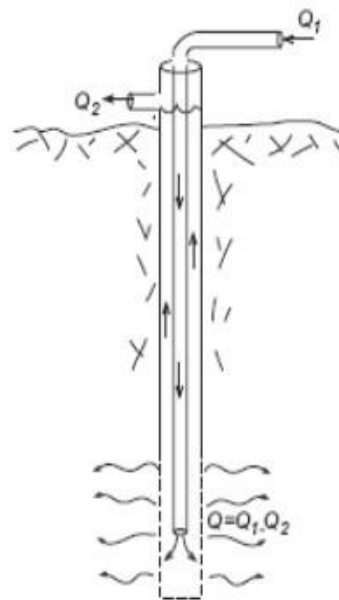
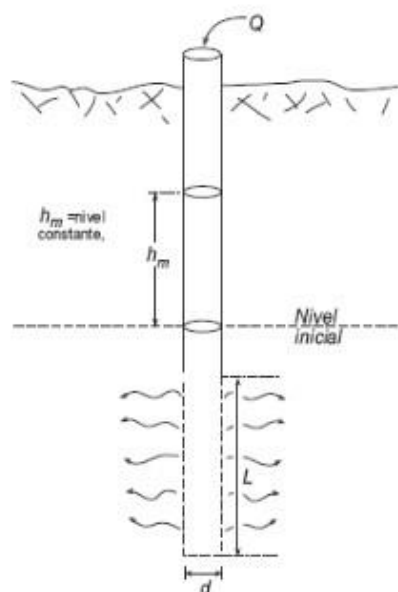
Ensaio Lefranc

- Medição da condutividade hidráulica em uma escavação
- O ensaio pode ser de infiltração ou de rebaixamento (inserção de água), ou ainda de recuperação ou bombeamento (retirada de água)
- Furo revestido (apenas o trecho ensaiado deve estar desobstruído)
- Trecho ensaiado normalmente de 0,5 a 1,0 metro
- Hipótese simplificadora: Aplica-se a Lei de Darcy
 - Fluxo laminar
 - Escoamento permanente
 - Meio isotrópico e homogêneo
- Furo estabilizado quando não houver variação progressiva ou a diferença entre 2 medidas isoladas e a média for inferior a 20%



Carga Constante X Carga Variável

- Mais trabalhoso
 - Mais confiável
- Difícil interpretação
 - Utilizado em solos MUITO permeáveis onde manter a carga constante é complexo



$$k = \frac{Q}{C \times h_m}$$

$$C = \frac{2 \times \pi \times L}{\ln\left(\frac{2 \times L}{d}\right)} \quad L \gg d \quad (\text{ábacos})$$

k é a condutividade hidráulica (m/s)

Q é a vazão injetada (ou bombeada) (m^3)

C é o coeficiente de forma

h_m é a altura de coluna d'água acima da zona saturada (m)

L é a altura da zona filtrante (sem revestimento) (m)

d é o diâmetro da perfuração (m)

Normatização

Não existe norma brasileira. Recomendação da ABGE (Boletim nº 4) e do U.S. Bureau of Reclamation

Equipamentos

- Bomba
- Hidrômetro
- Tambor
- Funil
- Proveta graduada
- Cronômetro
- Escarificador
- Tubo de revestimento de 2 ½"

Tipos de Ensaio

- Ensaio de Infiltração (mais usual): Quando se aplica uma carga hidráulica, mantendo sempre o nível d'água constante;
- Ensaio de Rebaixamento: Quando se aplica uma carga hidráulica e acompanha seu rebaixamento (nível variável)
- Ensaio de Recuperação: Quando se rebaixa o nível d'água e acompanha a sua recuperação
- Ensaio de Bombeamento: quando se descarrega o aquífero, medindo a vazão necessária para manter o nível d'água constante

Resultado do Ensaio Lefranc

Altura de coluna d'água acima da ZS (h_m) = 4 m

Altura da zona filtrante (L) = 1 m

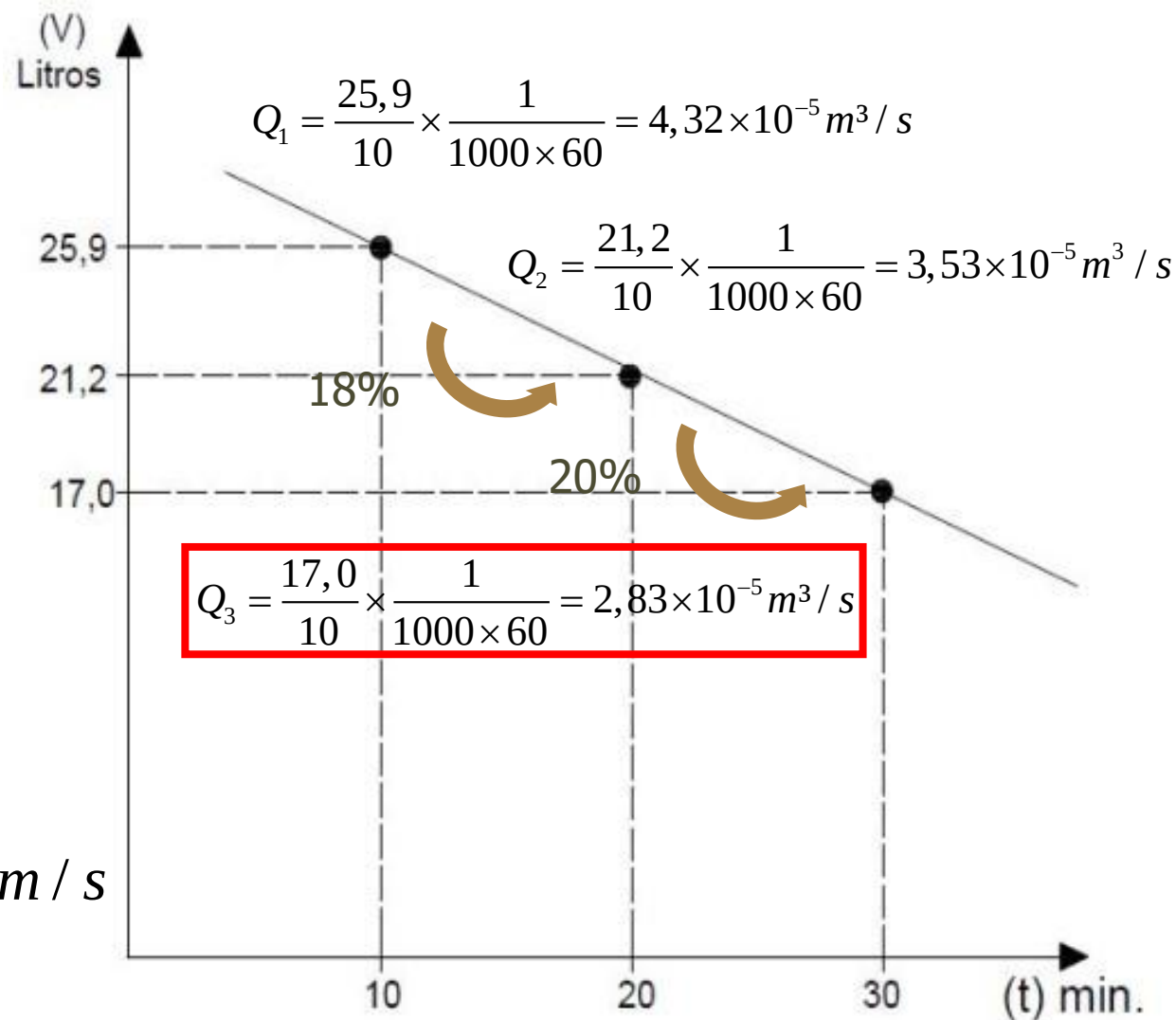
Diâmetro da perfuração (d) = 0,65 m

$$k = \frac{Q}{C \times h_m}$$

$$C = \frac{2 \times \pi \times L}{\ln\left(\frac{2 \times L}{d}\right)}$$

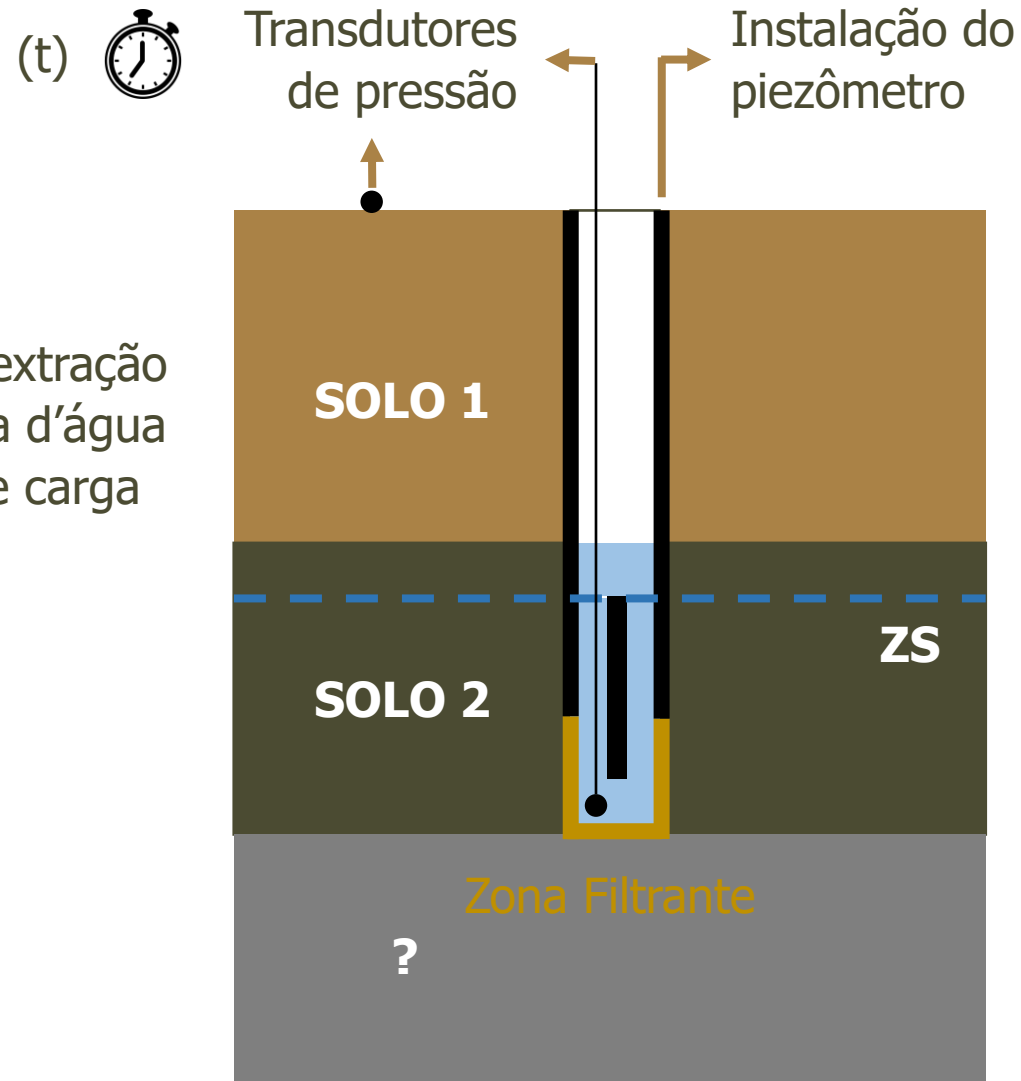
$$C = \frac{2 \times \pi \times 1}{\ln\left(\frac{2 \times 1}{0,65}\right)} = 5,59$$

$$k = \frac{2,83 \times 10^{-5}}{5,59 \times 4} = 1,26 \times 10^{-6} \text{ m / s}$$



“ Slug Test ”

- Ensaio utilizado em poços de monitoramento ou piezômetros
- Consiste na elevação do nível d'água através da introdução ou extração de uma sonda (ou ar) e aferir o tempo necessário para a coluna d'água retornar para sua posição estática, monitorando as variações de carga no decorrer do tempo (dados contínuos)
 - Dois ensaios em um (introdução e extração)
- Ensaio rápido
- Não introduz nem retira água (sem contaminação cruzada)
- Determina a condutividade hidráulica apenas no trecho filtrante
- Interpretação matemática complexa



Normatização

Não existe norma brasileira. Norma americana: ASTM D 4104, 2004

Equipamentos

- Poço revestido ou piezômetro instalado
- Transdutor de pressão
- Medidor de pressão atmosférica
- Cronômetro
- Sonda ("Slug")

Métodos de Cálculo do k

- Método Hvorslev
 - Mais simples (mais utilizado)
 - Hipótese simplificadora: regime permanente
- Método de Bouwer e Rice
 - Para solos isotrópicos e anisotrópicos
 - Bons resultados em solos estratificados
 - Complexo (ábacos)

Método de Hvorslev

Passos:

- 1) Plota-se $H(t)/H_0 \times t$
- 2) Traça-se o melhor ajuste entre os pontos (regressão linear)
- 3) Estima-se o tempo que proporciona uma carga $(H(t)/H_0)$ de 0,368, denominado Tempo Básico (T_0)
 - No início do ensaio o $\log(H(t)/H_0)$ é 1 e o tempo é 0, resultando numa inclinação de $\log(0,368)$
- 4) Utiliza-se a fórmula normalizada com T_0

$$k = \frac{r^2 \times \ln\left(\frac{L_e}{R}\right)}{2 \times L_e \times T_0}$$

k é a condutividade hidráulica (m/s)

r é o raio da perfuração / revestimento (m)

L_e é o comprimento da seção filtrante (m)

R é o raio da seção filtrante (m)

Resultado do " Slug Test "

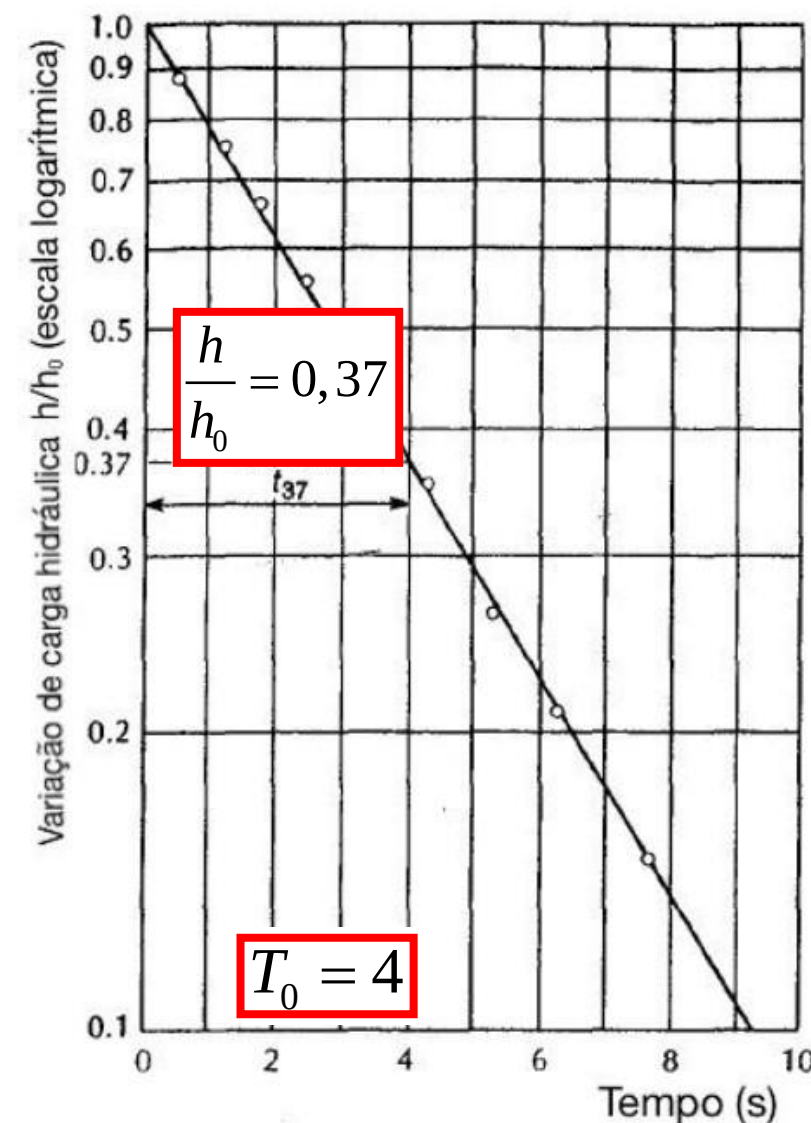
Diâmetro da perfuração ($2r$) = 0,27 m

Comprimento do filtro do piezômetro (L_e) = 1,50 m

Diâmetro do filtro do piezômetro ($2R$) = 0,34 m

$$k = \frac{r^2 \times \ln\left(\frac{L_e}{R}\right)}{2 \times L_e \times T_0}$$

$$k = \frac{0,14^2 \times \ln\left(\frac{1,5}{0,17}\right)}{2 \times 1,5 \times 4} = 3,56 \times 10^{-3} \text{ m / s}$$



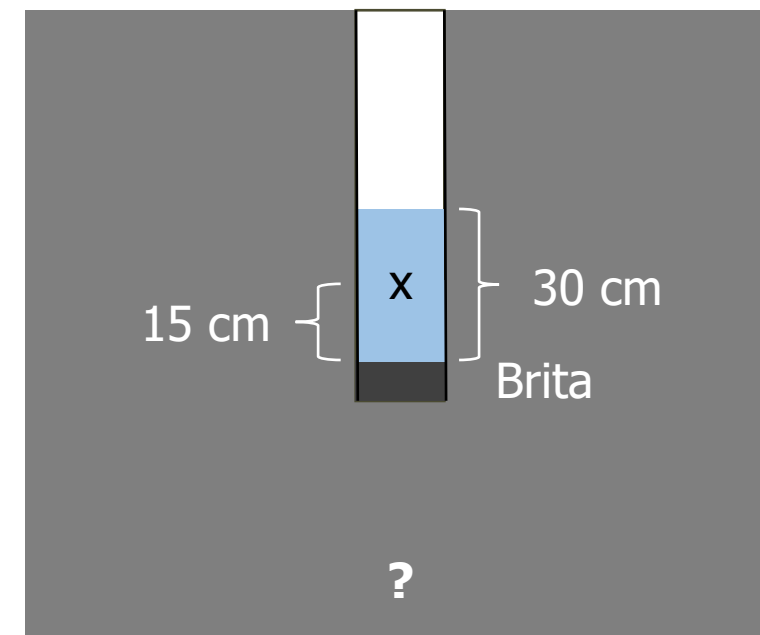
Método para Valas de Infiltração

- Cova prismática ou cilíndrica (mais utilizada)
- Mínimo 3 pontos
- Escava-se até a profundidade prevista da vala de infiltração (minimamente 1,5 m de distância da zona saturada)
- Retirar o material solto do fundo e preencher com 5 cm de brita
- Encher com uma coluna d'água de 30 cm e mantê-la por 4 horas
- Com uma coluna d'água de 15 cm medir seu rebaixamento a cada 30 min
- Encha a cava ou furo novamente e repita o processo até obter 3 medidas sucessivas com variação inferior à 1,5 cm (mínimo 1 hora)
 - Se toda a água for drenada diminuir o intervalo para 10 min (solos muito arenosos)

$$X_n - 1,5 \leq X_{n+1} \leq X_n + 1,5 \text{ (cm)}$$



30 min



Normatização

- **NBR 13969 (1997)** – Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação

Tabela A.1 - Conversão de valores de taxa de percolação em taxa de aplicação superficial¹⁾

Taxa de percolação min/m	Taxa máxima de aplicação diária m ³ /m ² .d	Taxa de percolação min/m	Taxa máxima de aplicação diária m ³ /m ² .d
40 ou menos	0,20	400	0,065
80	0,14	600	0,053
120	0,12	1200	0,037
160	0,10	1400	0,032
200	0,09	2400	0,024

¹⁾ Adaptado da referência (43) do anexo C.

Equipamentos

- Trado de 150 mm
- Cronômetro
- Régua
- Medidor de Nível d'água

Cálculo da Taxa de Percolação

- Calcula-se a taxa de percolação dividindo o intervalo de tempo entre as determinações (30 min) pelo rebaixamento obtido na última leitura (min/m)
- Calcular o valor médio entre as 3 ou mais cavas
- Com o valor obtém-se a taxa máxima de aplicação diária (m³/m².d)
- A área necessária para a vala é obtida dividindo-se o volume total diário estimado de esgoto (m³/dia) pela taxa máxima de aplicação diária.

Método para Sumidouro

- Feito de maneira análoga ao Método para Valas de Infiltração
- Maiores profundidades
 - A cota do fundo da cava deve ser a mesma cota do fundo do sumidouro
 - Necessidade de conhecer a estratigrafia do solo

Norma Complementar

- **NBR 7229 (1993)** – Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos

Resultado do Método de Valas de Infiltração

Intervalo entre as medidas: 30 min

Rebaixamento após 3 medidas consecutivas (local 1): 70 mm

Rebaixamento após 3 medidas consecutivas (local 2): 68 mm

Rebaixamento após 3 medidas consecutivas (local 3): 63 mm

$$Taxa_{média} = 448,65 \text{ min/ } m$$

$$Taxa_{aplicação} = 0,062 m^3 / m^2 \times dia$$

$$Taxa_1 = \frac{30}{0,07} = 428,57 \text{ min/ } m$$

$$Taxa_2 = \frac{30}{0,068} = 441,18 \text{ min/ } m$$

$$Taxa_3 = \frac{30}{0,063} = 476,19 \text{ min/ } m$$

Tabela A.1 - Conversão de valores de taxa de percolação em taxa de aplicação superficial¹⁾

Taxa de percolação min/m	Taxa máxima de aplicação diária m ³ /m ² .d	Taxa de percolação min/m	Taxa máxima de aplicação diária m ³ /m ² .d
40 ou menos	0,20	400	0,065
80	0,14	600	0,053
120	0,12	1200	0,037
160	0,10	1400	0,032
200	0,09	2400	0,024

Referências

- ABGE (1996). **Boletim 04: Ensaios de Permeabilidade em Solos**. São Paulo.
- ABNT (1993). **NBR 7229 – Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos**. ABNT. Rio de Janeiro.
- ABNT (1997). **NBR 13969 – Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação**. ABNT. Rio de Janeiro.
- FERRAZ, FERNANDO DE MEDEIROS et al. (2015). **Estudo da condutividade hidráulica obtida em ensaios de campo: infiltração em sondagem e *slug test* em poços de monitoramento**. Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade, São Paulo.
- FERREIRA DA SILVA, SUZANE (2017). **Ensaio de Permeabilidade em Solos *in situ***. USP. São Paulo.
- PEREIRA FILHO, EDGAR. **Ensaio de Permeabilidade “In Situ”**. AP&L Geotecnia de Fundações, Montes Claros.
- SOUZA PINTO, CARLOS DE (2006). **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. Oficina de. Textos. São Paulo.

OBRIGADO

Caio Henrique de Castro Almeida

E-mail: caiocastro.almeida@usp.br