DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/16

Avaliação da Permeabilidade de um Solo Residual a partir de Ensaios de Campo e de Laboratório.

Aryane Silva Carvalho
Engenheira Geotécnica, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima - MG, Brasil,
aryane.carvalho@pimentadeavila.com.br

Henrique Teixeira Godoi de Barros
Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima - MG, Brasil,
henrique.godoi@pimentadeavila.com.br

Caio Felipe Barbosa Lacerda
Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima - MG, Brasil,
caio.lacerda@pimentadeavila.com.br

Guilherme Henrique da Silva Pinto
Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima - MG, Brasil,
guilherme.henrique@pimentadeavila.com.br

André de Oliveira Faria
Engenheiro Geotécnico, Pimenta de Ávila Consultoria, Nova Lima - MG, Brasil,
andre.oliveira@pimentadeavila.com.br

RESUMO: A análise do fluxo de água em solos é de fundamental importância para a engenharia geotécnica, uma vez que o movimento da água no interior do maciço gera forças atuantes sobre as partículas sólidas, influenciando diretamente o estado de tensões, a deformabilidade e o comportamento mecânico do solo. Nesse sentido, a correta determinação do coeficiente de permeabilidade torna-se essencial, pois esse parâmetro expressa a facilidade com que a água escoa através dos vazios interconectados do solo e exerce papel decisivo em análises de estabilidade de taludes, recalques e fluxo subterrâneo. Diante desse contexto, o presente artigo tem como objetivo determinar e comparar os valores do coeficiente de permeabilidade de um solo residual a partir de ensaios de campo e de laboratório. A metodologia adotada baseia-se na análise integrada de resultados obtidos por meio de ensaios de permeabilidade à carga variável, ensaio de infiltração *in situ* e ensaios de piezocone (CPTu) com avaliação da dissipação de poropressão. Os resultados indicam boa convergência entre os valores de permeabilidade obtidos pelas diferentes metodologias.

PALAVRAS-CHAVE: coeficiente de permeabilidade, solo residual, ensaios de campo, ensaios de laboratório, desempenho hidráulico.

ABSTRACT: The analysis of water flow in soils is of fundamental importance in geotechnical engineering, since the movement of water within the soil mass generates forces acting on solid particles, directly influencing the stress state, deformability, and mechanical behavior of the soil. In this context, accurate determination of the soil permeability coefficient is essential, as this parameter represents the ease with which water flows through the interconnected voids of the soil and plays a decisive role in slope stability analyses, settlement evaluations, and groundwater flow assessment. Accordingly, this paper aims to determine and compare permeability coefficient values of a residual soil based on field and laboratory tests. The adopted methodology is based on the integrated analysis of results obtained from variable-head permeability tests, in situ infiltration tests and piezocone tests (CPTu) with pore pressure dissipation analysis. The results indicate good agreement among the permeability values obtained using the different methodologies.

KEYWORDS: Permeability coefficient, residual soil, field tests, laboratory tests, hydraulic performance.

1 INTRODUÇÃO

A análise da percolação em solos é um componente central da geotecnia, pois subsidia a estimativa de vazões, a previsão de recalques por adensamento e a avaliação da estabilidade de maciços de terra. Conforme indicado por Maragon (2018), o fluxo de água no interior do maciço induz forças de percolação que interagem com as partículas sólidas, modificando o estado de tensões atuante. Em obras geotécnicas, a compreensão do regime de fluxo é essencial para a maior confiabilidade das análises de estabilidade, orienta o dimensionamento dos elementos de drenagem e previne problemas de ruptura hidráulica dos solos.

A permeabilidade do solo (k) pode ser definida como a maior ou a menor capacidade da água intersticial percolar através dos poros do solo. Tal propriedade é função de fatores intrínsecos ao: i) solo (granulometria, composição mineralógica e forma e rugosidade das partículas sólidas); ii) meio percolante (natureza do fluido, temperatura e regime de escoamento); e iii) estado do solo *in situ* (índice de vazios e grau de saturação).

Darcy (1856) através de observações experimentais verificou, considerando um fluxo laminar em um meio poroso, que a velocidade média do fluxo é proporcional ao gradiente hidráulico (i), de modo que o coeficiente de proporcionalidade dessa relação é chamado de condutividade hidráulica do solo (k). Tal relação pode ser expressa matematicamente segundo a Equação 1, a qual ficou conhecida como Lei de Darcy.

$$Q = k^* i^* A \quad (1)$$

Sendo:
Q: vazão (m^3/s);
A: área do permeâmetro (m^2);
k: condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade (m/s);
i: gradiente hidráulico (razão entre a diferença de pressão h e a distância L).

O coeficiente de permeabilidade pode ser obtido por meio de métodos diretos, como ensaios de laboratório (permeâmetros) e ensaios *in situ*, bem como por métodos indiretos, que se baseiam em correlações com resultados de ensaios de adensamento, piezocone e de dissipação de poropressão, além de relações empíricas baseadas na granulometria dos solos.

Dado o referido contexto, o presente artigo tem como objetivo determinar e comparar os valores de coeficiente de permeabilidade de um solo residual de filito obtidos a partir de dados provenientes de diferentes ensaios e metodologias. Como base de dados, foram utilizados cinco ensaios de permeabilidade à carga variável, um ensaio de infiltração *in situ* e um ensaio de piezocone (CPTu) com dez ensaios de dissipação de poropressão.

2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DE ESTUDO

A Figura 1 apresenta os resultados dos ensaios granulométricos realizados em seis amostras do solo residual de filito. Observa-se consistência entre os dados obtidos, evidenciando comportamento semelhante entre as amostras analisadas. Em valores médios, as amostras apresentaram cerca de 45% de argila, 48% de silte e 7% de areia. Dessa forma, verifica-se que o material possui elevado teor de finos, com aproximadamente 93% passante na peneira #200, sendo predominantemente constituído por partículas com diâmetro correspondente à fração silte.

Os resultados também indicaram um coeficiente de não uniformidade médio (Cu) igual a 2,80, calculado a partir da relação entre os diâmetros característicos da curva granulométrica. Esse valor sugere que o material apresenta baixa variabilidade no tamanho das partículas, caracterizando um solo relativamente uniforme ou mal graduado, com distribuição granulométrica concentrada em uma faixa limitada de diâmetros.

Além das curvas granulométricas, a Figura 1 apresenta a carta de plasticidade, na qual estão plotados os valores de índice de plasticidade (IP) e limite de liquidez (LL) obtidos para cada amostra ensaiada. Os resultados indicam valores de limite de liquidez ligeiramente inferiores a 50%, o que caracteriza um solo de plasticidade baixa. A posição dos pontos na carta de plasticidade sugere comportamento típico de solos finos com predominância de silte e argila, que confirma o resultado obtido na análise granulométrica.

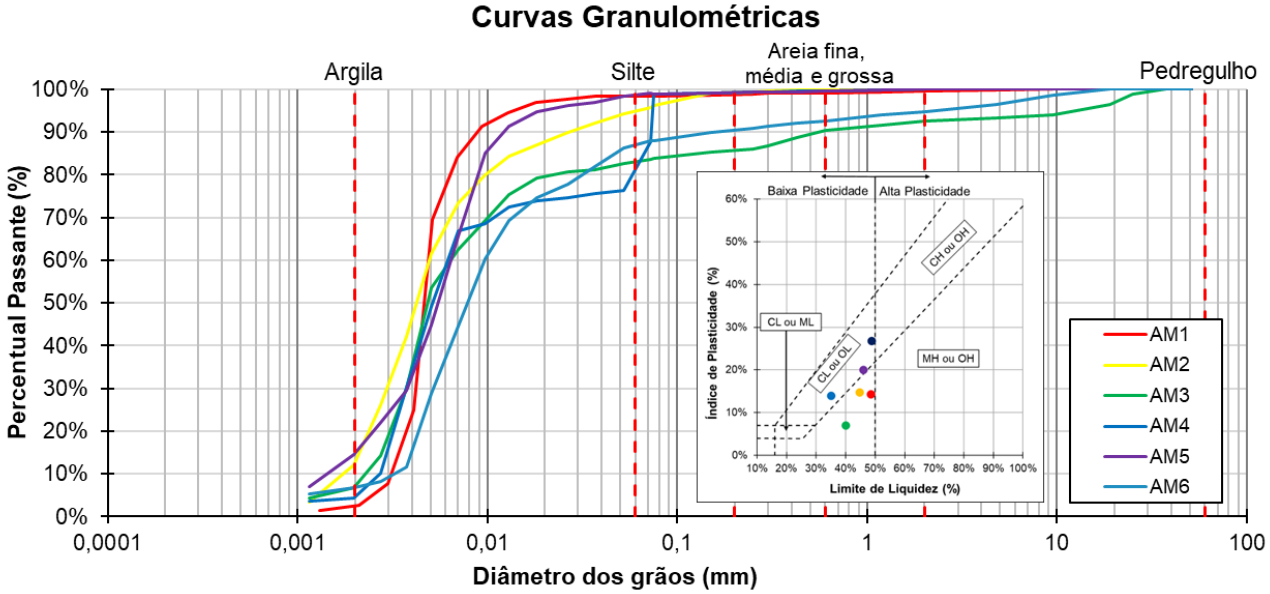


Figura 1 – Curvas granulométricas com os limites de cada granulometria conforme NBR6502 (ABNT, 2022), bem como índice de plasticidade de cada amostra com a classificação segundo ASTM D2487-10.

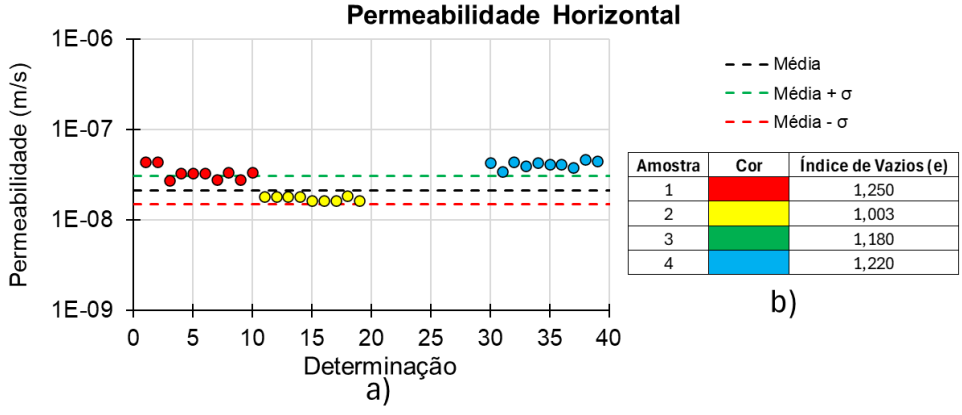
3 ESTIMATIVA POR MÉTODOS DIRETOS

3.1 Ensaios de laboratório

Em laboratório, o coeficiente de permeabilidade pode ser determinado por meio dos ensaios com permeâmetros de carga constante (solos granulares) e de carga variável (solos finos), conforme as normas brasileiras NBR 13.292 (ABNT, 2021) e NBR 14.545 (ABNT, 2021), respectivamente.

No ensaio de permeabilidade à carga constante utiliza-se um permeâmetro de parede rígida, de modo que a carga hidráulica (Δh) é mantida constante e o volume de água que percola pela amostra é medido ao longo de um dado intervalo de tempo (Δt), considerando-se a altura do corpo de prova (L) e a área da seção transversal (A) conhecida, com base na Lei de Darcy (Equação 1). Já no ensaio de permeabilidade à carga variável, o princípio é semelhante, porém utiliza-se uma bureta graduada, na qual o nível da coluna de água varia ao longo do tempo, resultando em uma carga hidráulica variável durante o ensaio.

Considerando o solo residual de filito analisado e a sua caracterização majoritariamente fina (Figura 1), a Figura 2a apresenta os valores do coeficiente de permeabilidade obtidos por meio do ensaio de permeabilidade à carga variável, executado em cinco amostras indeformadas. Verifica-se que os valores determinados se situam predominantemente entre 1×10^{-8} e 1×10^{-7} m/s, com valor médio da ordem de 3×10^{-8} m/s, de modo que na Figura 1b são apresentados os índices de vazios de moldagem de cada amostra. Destaca-se que os valores foram obtidos na condição vertical da amostra (k_v).



Amostra	Cor	Índice de Vazios (e)
1		1,250
2		1,003
3		1,180
4		1,220

Figura 2 – Resultados de permeabilidade vertical por meio de ensaio de permeabilidade à carga variável: a) Valores de k; b) Índices de vazios dos corpos de prova.

3.2 Ensaio de infiltração in situ

O ensaio de permeabilidade em solos por furo de sondagem (ensaio de infiltração) é interpretado sob as hipóteses de escoamento laminar e validade da Lei de Darcy, admitindo fluxo em regime permanente e meio aproximadamente homogêneo e isotrópico. No procedimento, o furo é preenchido com água até a boca do revestimento, mantendo-se o nível d'água constante. Registra-se o volume introduzido em cada intervalo de tempo e constrói-se o gráfico de vazão em função do tempo para identificação da vazão estabilizada, caracterizada por um trecho aproximadamente linear. O coeficiente de permeabilidade (k) é então determinado relacionando a vazão de infiltração estabilizada (Q) à carga hidráulica efetiva aplicada (h) e à geometria do trecho ensaiado, conforme Equação 2 apresentada no boletim 107 (ABGE, 2024).

$$k = \frac{Q}{h} * \frac{1}{C.r} \tag{2}$$

O coeficiente C é adimensional e depende das condições de contorno e da configuração do ensaio, enquanto r corresponde ao raio do furo. O valor de C é obtido graficamente em ábacos, selecionando-se o caso aplicável para meio saturado (abaixo do nível d'água, Cs) ou meio não saturado (acima do nível d'água, Cu), em função das relações geométricas do ensaio. Uma vez definido C, aplica-se a Equação 2 para o cálculo do coeficiente de permeabilidade.

Cabe destacar que, pela geometria do ensaio, em que o comprimento do trecho ensaiado é muito superior ao seu diâmetro, o escoamento de infiltração é predominantemente radial. Assim, o coeficiente de permeabilidade k obtido representa essencialmente a condutividade hidráulica na direção horizontal (k_h). A influência da permeabilidade vertical (k_v), associada ao fluxo pela base, tende a ser secundária no resultado, salvo em ensaios com fluxo restrito ao fundo ou em maciços com anisotropia vertical acentuada.

A partir da metodologia descrita anteriormente, é apresentado na Figura 3 os valores do coeficiente de permeabilidade (k_h) obtidos por meio do ensaio de infiltração realizado em um furo de sondagem no solo residual de filito, considerando meio saturado. Verifica-se que os valores determinados se situam predominantemente entre 1×10^{-7} e 1×10^{-6} m/s, com valor médio da ordem de 7×10^{-7} m/s.

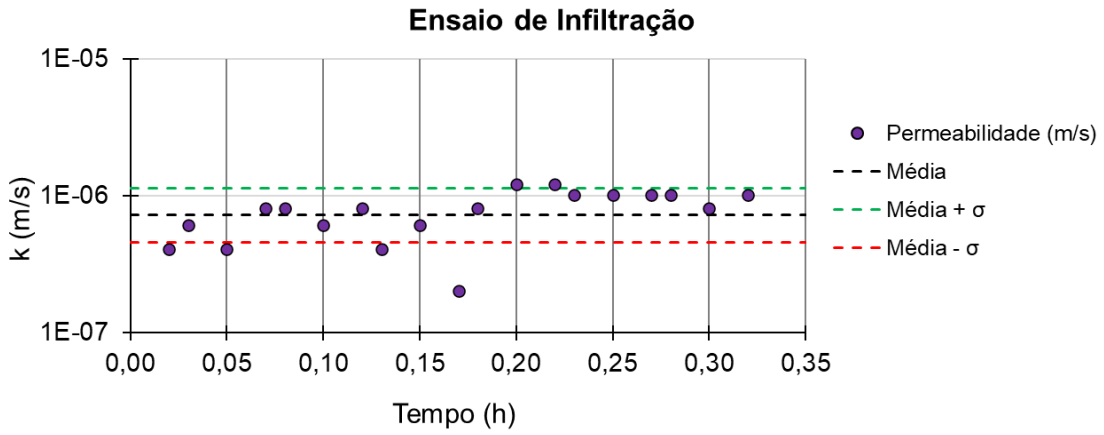


Figura 3 - Resultados de permeabilidade por meio do ensaio de infiltração *in situ*.

4 ESTIMATIVAS POR MÉTODOS INDIRETOS

4.1 Ensaio CPTu

A estimativa dos coeficientes de permeabilidade segundo o Índice Comportamental (I_c) obtido a partir do ensaio CPTu, pode ser realizada segundo as equações propostas por Robertson (2010), as quais são indicadas na Figura 4. O valor de I_c pode ser determinado pela Equação 3.

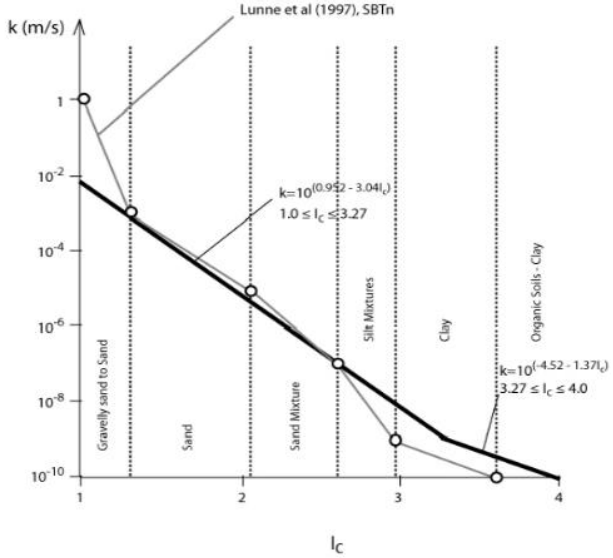


Figura 4 - Estimativa do coeficiente de permeabilidade segundo Robertson (2010).

$$I_C = \sqrt{\left[\left(3{,}47 - \log\left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}\right)\right)^2 + \left(\log\left(\frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}}\right) + 1{,}22\right)^2\right]} \quad (3)$$

Sendo:
f_s: atrito lateral;
q_t: resistência de ponta corrigida;
σ_{v0}: tensão total vertical; e
σ'_{v0}: tensão vertical efetiva (obtido por $\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$).

Para a estimativa do coeficiente de permeabilidade através dessa metodologia, foi realizado um ensaio de piezocone (CPTu) conforme a NBR 12.069 (ABNT, 2021), considerando a profundidade aproximada de 37,0 m e a região de ocorrência do material de estudo. A Figura 5 apresenta a interpretação do ensaio, incluindo os perfis de resistência de ponta total (q_t), atrito lateral (f_s), resistência de ponta normalizada (Q_t), atrito lateral normalizado (F_r), índice comportamental (I_c) e os coeficientes de permeabilidade estimados ao longo da profundidade.

De modo geral, os resultados indicam boa competência do litotipo, com valores de resistência de ponta variando entre 5.000 e 10.000 kPa. Observam-se ainda valores de I_c predominantemente entre 2,0 e 3,6, os quais resultaram em coeficientes de permeabilidade estimados na faixa de 1×10^{-9} a 1×10^{-7} m/s, com valor médio da ordem de 2×10^{-8} m/s. Destaca-se que os valores de I_c fora do intervalo indicado (2,0 a 3,6) foram desconsiderados no cálculo do k, visto não serem representativos do material em estudo.

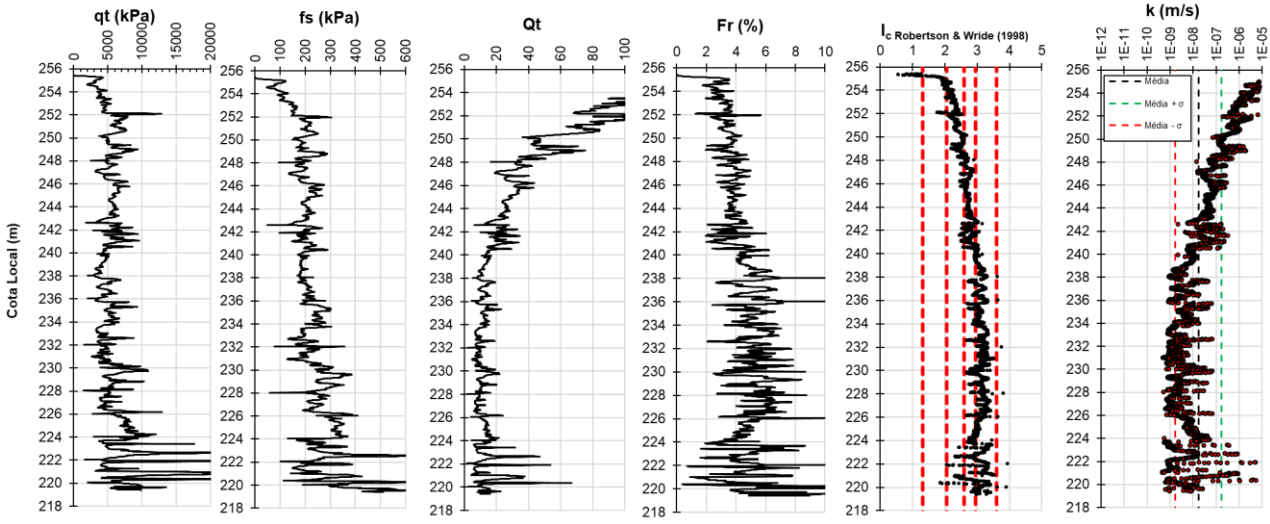


Figura 5 - Resultados do ensaio de CPTu.

4.2 Ensaio de dissipação de poropressão

Os valores da condutividade hidráulica podem também ser aferidos pelos ensaios de dissipação de poropressão, utilizando a correlação proposta por Teh e Houlsby (1991), apresentada na Equação 4.

$$k_h = \frac{c_h \gamma_w}{M} \quad (4)$$

O valor do coeficiente de adensamento horizontal (c_h) pode ser estimado diretamente pelo t_{50} (tempo para dissipação de 50% do excesso de poropressão gerado) conforme apresentado na Equação 5, proposta por Robertson (2010), em que o valor de t_{50} é expresso em minutos. Para estimativa do valor de M, o autor sugere a Equação 6, a qual é função da resistência de ponta normalizada (aplicável para $I_{CRW} > 2{,}20$).

$$c_h = (1{,}67 * 10^{-6}) * 10^{(1-\log t_{50})} \quad (5)$$
$$M = \alpha_m (q_t - \sigma_{vo}) \quad (6)$$

Sendo:

$$\alpha_m = Q_{tn} \text{ se } Q_{tn} \leq 14 \quad (6a)$$
$$\alpha_m = 14 \text{ se } Q_{tn} > 14 \quad (6b)$$

Para a estimativa do coeficiente de permeabilidade (k), foram considerados dez ensaios de dissipação de poropressão realizados em conjunto com o ensaio CPTu descrito no item 4.1 Ensaio CPTu. Os ensaios tiveram início a partir da cota 238,0 m, sendo executados a intervalos regulares de 2,0 m até atingir a cota de 220,0 m.

A Figura 6 apresenta a distribuição de poropressões obtida a partir do ensaio de piezocone, em que u100% é a poropressão associada à condição de equilíbrio após 100% de dissipação da poropressão gerada ao longo do ensaio e u0% representa a condição de poropressão antes do início da dissipação. Além disso, os valores de t_{50} determinados em cada ensaio de dissipação e os coeficientes de permeabilidade calculados também são indicados na Figura 6. Observa-se que os valores estimados de k_h situam-se predominantemente entre 1×10^{-8} e 1×10^{-7} m/s, com valor médio da ordem de 6×10^{-8} m/s.

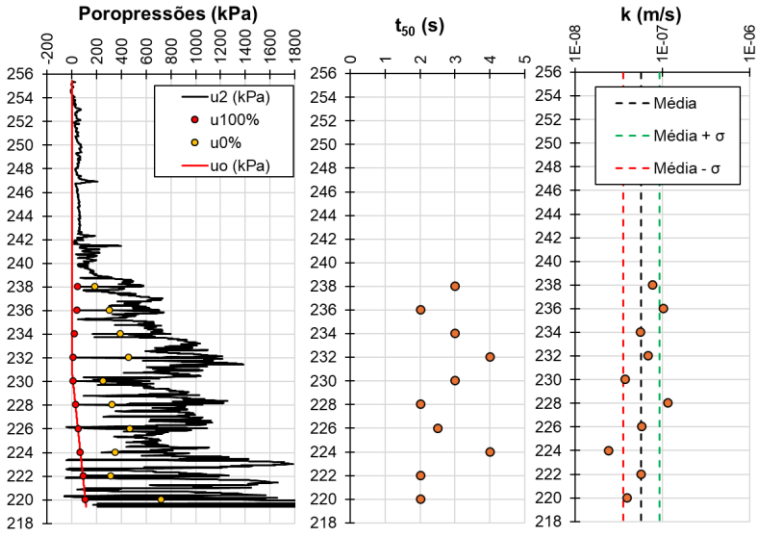


Figura 6 – Resultados do ensaio de dissipação de poropressão.

5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos, é indicado na Figura 7 o resumo dos coeficientes de permeabilidade obtidos através das metodologias descritas, considerando a comparação com os intervalos típicos propostos por Pinto (2011) e Schinaid (2009) para cada classe de solo. Nesse contexto, foi considerada a condição isotrópica do material ($k_v = k_h$).

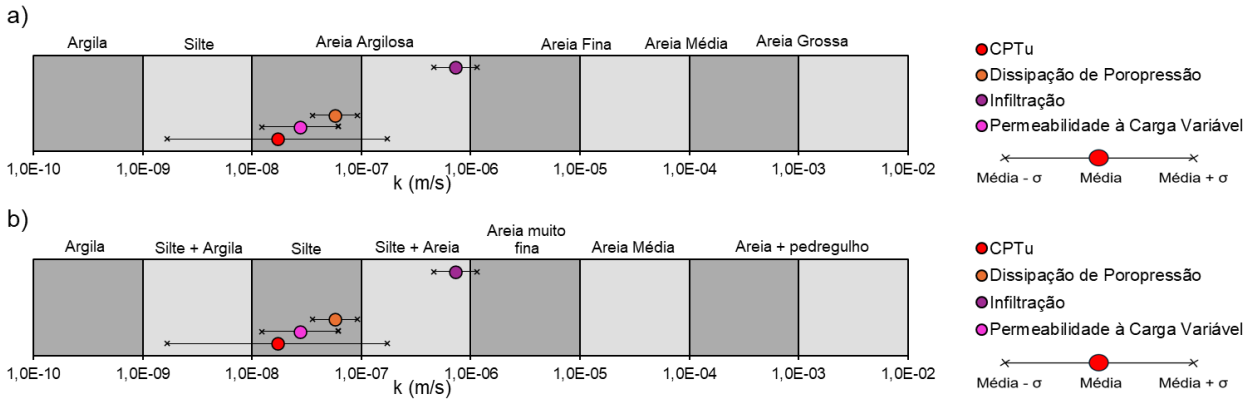


Figura 7 - Resultados dos coeficientes de permeabilidade obtidos e valores típicos segundo: a) Pinto (2011) e b) Schnaid (2009).

Os resultados apresentados na Figura 7 indicam que, considerando as metodologias de CPTu, dissipação de poropressão e ensaios de laboratório, os valores do coeficiente de permeabilidade situam-se no intervalo entre $1{,}0\times10^{-8}$ e $1{,}0\times10^{-7}$ m/s, caracterizando uma areia argilosa, conforme Pinto (2011), e um silte, conforme Schinaid (2009). Tal fato é comprovado a partir das curvas granulométricas que indicam uma alta porcentagem de finos do material.

A maior dispersão dos resultados foi observada nos ensaios de piezocone (CPTu), uma vez que essa metodologia apresenta maior espaço amostral. Adicionalmente, tendo em vista que o material possui faixa de resistência de ponta variando entre 5.000 e 10.000 kPa, a dispersão observada pode estar associada a diferentes graus de intemperismo do solo analisado. Já os ensaios de dissipação se mostraram assertivos se comparados com os ensaios de laboratório (permeabilidade à carga variável).

Quanto aos ensaios de infiltração, nota-se que os valores obtidos se encontram acima das demais referências, com permeabilidade da ordem de $1{,}0\times10^{-6}$ m/s. Tal resultado é coerente com a literatura, uma vez Gómez-Hernández et. al (2018) apontam que métodos de campo tendem a produzir condutividades hidráulicas de uma a duas ordens de grandeza superiores àquelas obtidas em laboratório e em métodos indiretos. Conforme indicado pelos autores, isso se deve a efeitos de escala, fluxo tridimensional, interceptação de heterogeneidades, macroporos e preservação da estrutura natural do solo.

6 CONCLUSÃO

O presente artigo apresentou uma análise comparativa entre diferentes metodologias de estimativa do valor da permeabilidade de um solo residual de filito, considerando ensaios de: i) laboratório (permeabilidade à carga variável); ii) infiltração *in situ*; iii) CPTu; e iv) dissipação de poropressão.

A partir da comparação dos resultados, foi verificado que a estimativa a partir do ensaio CPTu (em função do I_c) apresentou alta dispersão de dados, sugerindo a sua utilização como uma avaliação inicial do parâmetro. Apesar disso, o valor médio obtido encontra-se dentro da ordem de grandeza das demais medições. De forma complementar, a estimativa a partir do ensaio de dissipação se mostrou assertiva quando comparado com a avaliação a partir da medição direta do ensaio de laboratório. Quanto aos ensaios de infiltração, foi verificado que os valores obtidos se encontram acima das demais referências, o que pode ser explicado devido a fatores associados à heterogeneidade do material em campo. Além disso, a anisotropia intrínseca do filito pode ser um dos fatores que contribuem para as divergências observadas entre ensaios de laboratório e de campo.

Em termos de valores, a ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade do solo residual de filito variou em até 100x, a depender das metodologias adotadas. Foi observado maior convergência das metodologias de CPTu, dissipação de poropressão e ensaios de laboratório ($1{,}0\times10^{-8}$ a $1{,}0\times10^{-7}$ m/s), e menor convergência para o ensaio de infiltração (aproximadamente $1{,}0\times10^{-6}$ m/s).

Tendo em vista as observações indicadas no presente estudo, considerando o contexto de desenvolvimento de estudos geotécnicos, recomenda-se a adoção de um intervalo de valores para a caracterização da permeabilidade do material, em detrimento da utilização de apenas um valor específico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Pimenta de Ávila pelo apoio e incentivo na elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D2487-10: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System).* West Conshohocken: ASTM International, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12069: Solo – Ensaio de penetração de cone in situ (CPT). Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e Solos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13292: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. ABGE 107: Ensaios de permeabilidade em solo utilizando furo de sondagem, poço, cava, *slug test* e anel duplo – Procedimentos para execução e interpretação de resultados. São Paulo: ABNT, 2024.

Darcy, H. (1856) – *Les fontaines publiques de la ville de Dijon.*

GODOY, Vanessa A.; ZUQUETTE, Lázaro Valentin; GÓMEZ-HERNÁNDEZ, J. Jaime. Scale effect on hydraulic conductivity and solute transport: Small and large-scale laboratory experiments and field experiments. Engineering Geology, [*s. l.*], v. 243, p. 196-205, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.06.020.

HAZEN, A. *Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration.* Annual Report of the Massachusetts State Board of Health, Boston, 1892.

MARAGON, M. Capítulo 1 – Hidráulica dos Solos. Notas de aula – Mecânica dos Solos II. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2018.

PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

ROBERTSON, P.K. Soil Behaviour Type from the CPT: An Update. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, 2010.

SCHNAID, F. Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

TEH, C. I., & HOULSBY, G. T. *An Analytical Study of the Cone Penetration Test in Clay*. Géotechnique, 1991.