

Avaliação do método de obtenção do coeficiente de permeabilidade a partir de ensaios de dissipação de poropressão

Bernardo Barcelos Rosa
Engenheiro Geólogo, Fugro, Belo Horizonte, Brasil, bernardo.rosa@fugro.com

Bruno Corrêa dos Santos
Estudante de Engenharia Civil, Fugro, Curitiba, Brasil, bruno.santos@fugro.com

Heloísa Neres Lopes
Engenheira Geotécnica, Fugro, Curitiba, Brasil, heloisa.lopes@fugro.com

RESUMO: Em grandes obras geotécnicas, como barragens, é comum a utilização de diferentes métodos de investigação geotécnica de campo para obter todos os parâmetros necessários para o projeto ou monitoramento da estrutura em questão. No entanto, a escolha dos ensaios mais adequados é determinada pela composição do material, pela sua resistência e questões de acesso aos equipamentos. O ensaio de infiltração realizado em perfuração de sondagem possibilita o entendimento da permeabilidade do material em um trecho ensaiado, durante um determinado tempo de absorção, resultando no coeficiente de permeabilidade k . Por outro lado, o ensaio de dissipação de poropressão é realizado em conjunto com o ensaio CPTu (Cone Penetration Test), com o cone estático em uma profundidade específica, onde medidas de poropressão são registradas a cada segundo até que a poropressão se estabilize, resultando em um valor que corresponde à poropressão de equilíbrio do solo naquela profundidade. Este trabalho tem como objetivo estabelecer correlações entre o método de interpretação de k para cada tipo de granulometria, conforme estabelecido pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE) (2020) e o método de Robertson (2022). Desta forma, apresenta-se como resultado a correlação entre os valores de k obtidos por ensaios de dissipação de poropressão com a descrição geológica-geotécnica de sondagens rotativas próximas com cotas correlatas.

PALAVRAS-CHAVE: Permeabilidade, dissipação de poropressão, sondagem, CPTu.

ABSTRACT: In large geotechnical works, such as dams, it is common to use different methods of field geotechnical investigation to obtain all the necessary parameters for the design or monitoring of the structure in question. However, the choice of the most appropriate tests is determined by the composition of the material, its resistance, and issues related to equipment access. The infiltration test conducted in drilling allows for understanding the permeability of the material in a tested section during a specific absorption time, resulting in the permeability coefficient k . On the other hand, the pore pressure dissipation test is performed in conjunction with the CPTu (Cone Penetration Test), with the cone static at a specific depth, where pore pressure measurements are recorded every second until the pore pressure stabilizes, resulting in a value that corresponds to the equilibrium pore pressure of the soil at that depth. This work aims to establish correlations between the method of interpreting k for each type of granulometry, as established by the Brazilian Association of Engineering Geology and the Environment (ABGE) (2020) and the method of Robertson (2022). Thus, the correlation between the values of k obtained from pore pressure dissipation tests and the geological-geotechnical description of nearby rotary drilling with correlated depths is presented as the result.

KEYWORDS: Permeability, pore pressure dissipation, drilling, CPTu.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos da permeabilidade do solo, iniciados por Henry Darcy (1856) ao descrever o fluxo da água em um meio poroso, são de grande importância e amplamente utilizados em diversas áreas da engenharia geotécnica, tais como drenagem, infiltração da água no solo e projetos de mineração, como armazenamento de rejeitos e estruturas como barragens. Dessa forma, o conhecimento da permeabilidade do solo se apresenta como um dos pilares para a gestão da estabilidade de estruturas geotécnicas.

Geralmente, na investigação geotécnica brasileira, o coeficiente de permeabilidade (k) é determinado através de ensaios de infiltração realizados por sondagem rotativa, aplicando a lei de Zangar (1953) com apoio da definição de intervalos para comportamento dos solos estabelecidos pela ABGE (2020). A ideia deste trabalho é utilizar parâmetros de poropressão em conjunto com o módulo de cisalhamento para o cálculo de k (Robertson, 2022), obtidos por meio de ensaios de dissipação de poropressão (DPP) e ensaios sísmicos realizados através de verticais de CPTu (Cone Penetration Test), em comparação com a descrição geológica de sondagens rotativas com recuperação de testemunhos de uma determinada estrutura geotécnica.

Um dos maiores desafios na engenharia geotécnica atualmente é a precisão e confiabilidade dos métodos de investigação de campo. Problemas como a variabilidade espacial dos solos, a complexidade das condições de campo e as limitações dos equipamentos podem influenciar significativamente os resultados obtidos. Além disso, a gestão de barragens e estruturas de armazenamento de rejeitos tem se tornado uma preocupação crítica, especialmente após incidentes de falhas catastróficas. Assim, a implementação de métodos mais robustos e a correlação de dados de diferentes fontes são essenciais para garantir a segurança e a eficácia dos projetos geotécnicos. A investigação das relações entre diferentes métodos de determinação da permeabilidade do solo, como proposto neste trabalho, é fundamental para avançar na precisão e confiabilidade das práticas geotécnicas.

2. METODOLOGIA

O método empregado no trabalho consistiu na realização das etapas a seguir:

- Discorrer sobre a área de estudo;
- Explicar do uso da descrição geológico-geotécnica de testemunhos recuperados de sondagem rotativa;
- Exibir as definições do ensaio de DPP e ensaio de piezocone sísmico;
- Efetuar uma compilação da literatura e adaptar cálculos para a obtenção de k ;
- Realizar comparação entre os métodos e resultados obtidos.

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A estrutura geotécnica em que os dados foram adquiridos estão localizadas em diques de reservatórios de rejeitos de mineração, estes compostos por camadas de aterro e fundação em solo natural. Devido à heterogeneidade geológica dos locais dos ensaios espera-se uma variação entre os resultados.

Para esse estudo foram escolhidas três diferentes ilhas de ensaios que apresentam verticais de sondagem rotativa com recuperação de testemunhos e verticais de CPTu com ensaios de dissipação de poropressão, realizados com deslocamento horizontal mínimo e cotas correlatas (Figura 1).



Figura 1: Ilhas de pontos. SR caracteriza sondagem rotativa com recuperação de testemunhos e CPTu define ensaio CPTu com ensaio de dissipação de poropressão.

2.2 TESTEMUNHOS RECUPERADOS DE SONDAAGEM ROTATIVA

A descrição geológico-geotécnica de testemunhos recuperados de sondagem rotativa (Figura 2) é fundamental para definir a característica de permeabilidade dos materiais. Esse processo permite a identificação dos contatos entre camadas de solo e rocha, suas composições, estruturas e condições. A análise dos testemunhos fornece informações importantes sobre a granulometria, a presença de fraturas, a compactação e outros fatores que influenciam a permeabilidade.



Figura 2: Caixa de testemunhos recuperados de sondagem rotativa.

A Tabela 1 da ABGE (2020) correlaciona a variação do coeficiente de permeabilidade (k) com as granulometrias presentes no solos.

Tabela 1. Relação entre granulometria e coeficiente de permeabilidade (k).

Solo (granulometria)	Variação de k (m/s)
Pedregulhos	10^3 a 1
Areias	1 a 10^{-3}
Areias finas siltsosas e argilosas, siltes argilosos	10^{-3} a 10^{-7}
Argilas	10^{-7} a 10^{-9}

2.3 DEFINIÇÃO DOS ENSAIOS

O ensaio de dissipação de poropressão tem por objetivo medir o tempo para dissipar a poropressão gerada pela penetração do cone em uma vertical de CPTu. A evolução das poropressões é monitorada ao longo do tempo, empregando-se o sistema de aquisição de dados. Para cada profundidade especificada, é efetuada a paralisação da cravação e o monitoramento da poropressão durante a dissipação. Para barragens de rejeito, aterros sobre solos moles e regiões onde se nota percolação, a dissipação é realizada até atingir a poropressão estabilizada, a qual será denominada como a poropressão de equilíbrio (u_0).

Este ensaio possibilita inferir informações sobre permeabilidade, coeficiente de adensamento e determinação da poropressão de equilíbrio (u_0). Com o ensaio finalizado, é possível obter o tempo final de dissipação t_f e a partir disso, o tempo necessário para que ocorra 50% da dissipação ($t_{50\%}$). A Figura 1 apresenta um exemplo gráfico de ensaio de ensaio de dissipação de poropressão de característica estabilizada.

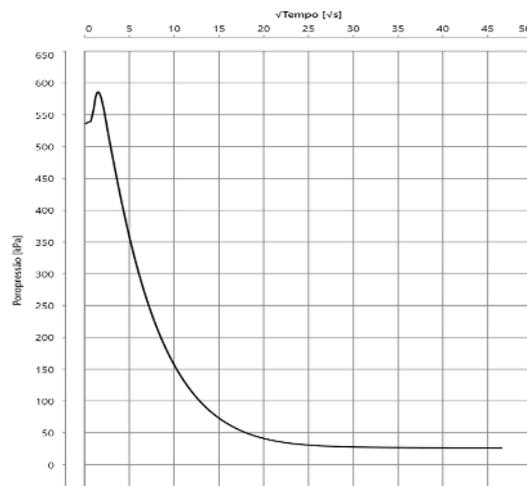


Figura 3: Ensaio de dissipação de poropressão (DPP). Fonte: Os autores.

O ensaio de piezocone sísmico é realizado com o uso de dois geofones, com a paralisação da cravação ao atingir a profundidade de interesse. Em seguida, é aplicada uma quantidade específica de golpes a partir de uma fonte sísmica, gerando ondas que são registradas pelos geofones. A qualidade das ondas sísmicas podem ser influenciadas por ruídos externos, gerados, por exemplo, pelo tráfego de maquinário pesado nas proximidades, por fios de alta tensão elétrica, entre outros. A partir da captação das ondas pelos geofones, é calculada a velocidade de propagação da onda (V_s), e com base nisso, é possível calcular o módulo de cisalhamento máximo (G_0).

2.4 CÁLCULOS EMPREGADOS

O ponto de interação entre a determinação do coeficiente de permeabilidade e o ensaio de dissipação de poropressão é o tempo, durante o qual a água permeia o solo conforme a lei de Darcy (1856), considerando o tempo de dissipação final da poropressão a partir de $t_{50\%}$. Com base nisso, é possível adaptar a equação de Robertson (2022) para calcular o coeficiente de permeabilidade (k) a partir de um ensaio de dissipação de poropressão, mas primeiramente deve-se entender o índice de rigidez (I_r) (Equação 1), o coeficiente de adensamento (c) (Equação 2) e módulo de deformação (M) (Equação 3).

Conforme C.P. Krage et al (2014), o índice de rigidez sofre influencia das tensões e pressões dos poros quando calculado a partir de dados do CPTu. O índice de rigidez (I_r) é definido pela razão entre o módulo de cisalhamento máximo (G_0) e a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) apresentado na Equação 1.

$$I_r = \left(\frac{G_0}{S_u} \right) \quad (1)$$

I_r = índice de rigidez (adimensional);
 G_0 = módulo de cisalhamento máximo;
 S_u = resistência ao cisalhamento não drenada;

$$c = \left(\frac{T_{50}}{t_{50}} \right) * r_0^2 * (I_r)^{0.5} \quad (2)$$

c = coeficiente de adensamento (adimensional);
 r_0 = raio do cone (m);

$$M = \alpha M * (qt - \sigma_v) \quad (3)$$

M = módulo de deformação (adimensional);
 αM = fator de variação da plasticidade do solo (adimensional);
 qt = resistência de ponta corrigida (MPa);
 σ_v = tensão vertical in situ (MPa).

Por fim, o coeficiente de permeabilidade k é calculado com base nos parâmetros e correlações empíricas disponibilizados pelo livro de Robertson (2022), representada na Equação 4.

$$k = \frac{c * Y_w}{M} \quad (4)$$

Y_w = peso específico da água (kN/m^3);

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Uma das adaptações realizadas ocorreu no cálculo do índice de rigidez, com a substituição do módulo de cisalhamento (G) pelo módulo de cisalhamento máximo (G_0), obtido através dos ensaios sísmicos, em que as deformações dos solos são mínimas e o G_0 é torna-se representativo. Outra adaptação feita foi a possibilidade de modificar o cálculo do coeficiente de adensamento para chegar em um resultado do coeficiente de permeabilidade, onde os parâmetros das fórmulas utilizadas foram alternados para serem feitas novas correlações.

A Tabela 2 apresenta um resumo das profundidades em que foram realizadas a descrição geológico-geotécnica tátil-visual do material, obtida através da recuperação de material nas sondagens rotativas, ensaios de dissipação de poropressão, assim como houve a definição intervalo para k de acordo com o tipo de material, determinado pela ABGE (2020).

Tabela 2. Resultados dos cálculos

Sondagem/CPTu	Prof. da DPP (m)	Granulometria obtida da sondagem	Geologia do local	k obtido pelo ensaio DPP* (m/s)	Faixa de k pela ABGE (m/s)
SR-01/SCPTu-01	9,70	Argila siltosa	Depósito	$1,34 \cdot 10^{-6}$	10^{-7} a 10^{-9}
	14,38	Areia fina siltosa	Sedimentar	$1,56 \cdot 10^{-7}$	10^{-3} a 10^{-7}
SR-02/SCPTu-02	13,85	Argila siltosa	Aterro	$3,85 \cdot 10^{-8}$	10^{-7} a 10^{-9}
	23,90	Areia fina silto-argilosa	Depósito Sedimentar	$6,76 \cdot 10^{-7}$	10^{-3} a 10^{-7}
SR-03/SCPTu-03	5,99	Areia fina siltosa	Deposito Sedimentar	$8,18 \cdot 10^{-6}$	10^{-3} a 10^{-7}

Os resultados dos ensaios SCPTu e DPP geram correlações empíricas e semiempíricas que foram desenvolvidas para estimar os parâmetros geotécnicos, mas devido a alta complexidade de solos naturais ou antrópicos essas correlações variam a confiabilidade. Essa confiabilidade para o coeficiente de permeabilidade (k) é dada na Tabela 3 a partir de uma adaptação de Robertson (2022), em que 1 = alta, 2 = alta a moderada, 3 = moderada, 4 = moderada a baixa e 5 = baixa.

Tabela 3. Confiabilidade de CPTu obtido por correlações empíricas.

Tipo de Solo	k
Fino (Argilas)	2 - 3
Granular (Areia)	3 - 4

Percebe-se que a confiabilidade e aplicabilidade para os solos finos (argilosos) é de alta a moderada e para solos granulares (areias) é de moderada a baixa. Essa questão pode ter influenciado a análise, visto que na Tabela 2 está indicado que os coeficientes de permeabilidade obtido através das DPP's em solos de característica arenosa ficaram fora dos intervalos estabelecidos pela ABGE (2020). Para as análises efetuadas em solos finos obteve-se o resultado esperado, com o k calculado em acordo com os intervalos estabelecidos pela ABGE (2020).

Os cálculos executados foram estimados para aterros e solos naturais, onde as correlações podem sofrer variabilidade devido à heterogeneidade do terreno.

Por fim, constatou-se que os valores obtidos para o coeficiente de permeabilidade têm equivalência de comparação entre os valores obtidos a partir dos ensaios de dissipação de poropressão e os valores da ABGE (2020).

5 CONCLUSÕES

Conclui-se que os valores do coeficiente de permeabilidade a partir dos ensaios de dissipação de poropressão calculados a partir das correlações de Robertson (2022) são equivalentes com os valores da ABGE (2020) para a representação que descreve o fluxo de água no meio poroso. Desta forma os valores obtidos de k contribuem para a representatividade da estratigrafia do solo sem que haja uma sondagem com recuperação de material, levando em consideração os valores de aquisição do ensaio SCPTu.

Outra comparação possível para a validação do coeficiente de permeabilidade a partir do ensaio de dissipação de poropressão, é a recomendação de comparar os valores de k obtidos em ensaios de infiltração em ilhas de ensaios, estendendo a análise para terrenos de pilha de estéril e em rejeitos de minério.

Por fim, recomenda-se a realização de mais ilhas de ensaios para permitir maiores correlações e a consolidação dos resultados obtidos empiricamente. Dessa forma, será possível correlacioná-los estatisticamente, aumentando a confiabilidade e permitindo o cálculo de novos fatores de correção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agaiby, S.S. and Mayne, P. W. (2020). Analytical evaluation of CPTu soundings in soft Chicago clay. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).
- CPT Data Interpretation Theory Manual (2021), Rocscience Inc, 2015.
- Ensaio de permeabilidade em solos : orientações para sua execução no campo. -- São Paulo : ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2013.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: Dalmont.
- Krage, C.P., DeJong, J.T. and Schnaid, F. (2014) "Estimation of consolidation coefficient from incomplete piezocone dissipation tests." J. Geotech. And Geoenviron. Eng.
- Robertson, P. K. (2022). *Guide to Cone Penetration Testing*. Gregg drilling LLC. 7^o edition.
- Robertson, P. K. and Cabal K.L. (2010). Estimating soil unit weight from CPT. Gregg Drilling & Testing Inc., Signal Hill, California, USA.
- Schnaid, F. e Odebrecht, E. (2012). *Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. São Paulo, Oficina de Textos. 2^a edição. p. 195-196.
- Teh, C. I. & Houlsby, G. T. (1991). *Géotechnique* 41, No. 1, 17-34.
- Zangar, C. N. (1953). *Physical properties of saturated porous materials*. Washington, D.C.: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.