

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Estudo da Condutividade Hidráulica de um Perfil de Solo Arenoso Empregando um Permeâmetro de Parede Flexível

Jhaber Dahsan Yacoub

Estudante, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil, jhaber.yacoub@gmail.com

Roger Augusto Rodrigues

Professor, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil, roger.rodrigues@unesp.br

Giulliana Mondelli

Professora, Universidade Federal do ABC, Santo André, Brasil, g.mondelli@ufabc.edu.br

Heraldo Luiz Giacheti

Professor, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil, h.giacheti@unesp.br

RESUMO: Em áreas onde se faz a disposição de resíduos é necessário avaliar o nível de poluição causado por eles. Nesse contexto, o principal parâmetro a ser determinado é a condutividade hidráulica (k), que pode ser obtida por meio de ensaios de campo ou laboratório. Os ensaios de campo têm como vantagem o fato de provocar menor perturbação no maciço bem como o de ensaiar uma região mais representativa. Por outro lado, os ensaios de laboratório permitem que se tenha um melhor controle das condições de ensaio. No entanto, simular o confinamento do solo em laboratório não é possível em permeâmetros de parede rígida. Neste sentido, um permeâmetro de parede flexível foi utilizado para determinar a condutividade hidráulica em diferentes tensões de confinamento e compará-la com resultados em permeâmetro de parede rígida e ensaios de campo. Os resultados estão de acordo com as características do solo estudado, e possibilitaram uma melhor compreensão da relação desse parâmetro com o confinamento e índice de vazios.

PALAVRAS-CHAVE: Investigação do subsolo, Condutividade hidráulica, Ensaios de campo e laboratório, Permeâmetro de parede flexível.

ABSTRACT: In areas where the waste is disposed, it is necessary to assess pollution level due to it. In this context, the main parameter to be determined is the hydraulic conductivity (k), which can be obtained by in situ or laboratory tests. In situ test has the advantage to cause less disturbance to the soil mass as well as testing a more representative region of the soil mass. On the other hand, the laboratory tests allow a better control of the test conditions. However, simulating the soil confinement in laboratory is not possible by using the rigid wall permeameter. In this way, a flexible wall permeameter was used to determine the hydraulic conductivity under different confinement stress and compare it to rigid wall permeameter and in situ test results. The test data are in accordance to the characteristics of the studied soil and allowed a better understanding on the relationship of this parameter to confinement and void ratio.

KEYWORDS: Site investigation, Hydraulic conductivity, In situ and laboratory tests, Flexible wall permeameter.

1 Introdução

A permeabilidade é um importante parâmetro geotécnico e geoambiental, relacionada à estanqueidade de barragens de terra (Venuja & Kurukulasuriya, 2020), problemas de recalque (Nikolaos et al. 2019), estabilidade de taludes (Liu et al., 2017), bem como questões geoambientais (Mondelli et al., 2007).

Definida como a propriedade de um meio em permitir com maior ou menor facilidade a passagem de um fluido e quantificada pela condutividade hidráulica, sua determinação pode ocorrer em ensaios de campo ou laboratório. Nestes, podem ser utilizados permeâmetros de parede rígida ou flexível, empregando-se a lei de Darcy (Equação 1).



$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (1)$$

Em que, Q : vazão; k : condutividade hidráulica; i : gradiente hidráulico; A : área.

Programas experimentais em campo permitem conduzir ensaios mais representativos, com menos perturbação do maciço, mas possuem menor controle das condições de ensaio. Por outro lado, experimentos conduzidos em laboratório permitem controlar melhor as condições de ensaio e efetuar diferentes simulações, com seus resultados dependentes da qualidade das amostras indeformadas e representatividade das mesmas, podendo não retratar bem as condições in situ.

Ensaio de laboratório com permeâmetro de parede rígida não permitem investigações que envolvam elevados gradientes hidráulicos ou em condições confinadas, em tais situações o permeâmetro de parede flexível é indicado, uma vez que pressões confinantes podem ser aplicadas, contrapressões de topo e base controladas permitindo imposição do gradiente hidráulico, além do acompanhamento das variações de volume da amostra (Daniel et al., 1984; Kandalai et al., 2018).

Pesquisas voltadas à solos tropicais envolvendo permeâmetro de parede flexível são pouco encontradas na literatura, já que seu desenvolvimento ocorreu principalmente em países cujos os solos possuem comportamentos típicos de argilas e areias (Morandini e Leite 2015; Conciani 2016).

Em virtude do exposto, a determinação da condutividade hidráulica de um solo arenoso fino laterítico, vastamente encontrado no Brasil, utilizando-se de um permeâmetro de parede flexível pretende colaborar no entendimento deste parâmetro, comparando-o com resultados prévios em permeâmetro de parede rígida e ensaios de campo em cava cilíndrica. O objetivo desse trabalho é estudar a variação da condutividade hidráulica com a tensão de confinamento e índice de vazios empregando um permeâmetro de parede flexível em um perfil de solo arenoso.

2 Local estudado

O perfil de solo estudado é típico da região de Bauru-SP, onde ocorrem sedimentos e solos residuais de arenito do Grupo Bauru. O solo estudado foi oriundo de três locais no município de Bauru: antigo campo experimental da Unesp-Bauru, atual campo experimental da Unesp-Bauru, além do Hospital Lauro de Souza Lima (Figura 1). Os dois últimos estão situados na Rodovia João Ribeiro de Barros, SP 225, nos quilômetros 233 e 226, respectivamente, já o primeiro campo experimental encontra-se na Avenida Municipal José Sandrin. O antigo campo experimental e o Hospital Lauro de Souza Lima serão respectivamente referidos neste trabalho como local 1 e local 2. O solo das três localidades constitui-se de uma areia fina pouco argilosa vermelha, onde cerca de 75% de sua composição é arenosa. De acordo com a classificação Unificada é um solo do Grupo SM-SC e na HBR é um A-2-4. O solo do campo experimental da Unesp-Bauru foi detalhadamente investigado em pesquisas anteriores que incluem ensaios de permeabilidade (Giacheti et al., 2000), edométricos com sucção controlada (Saab, 2016), triaxiais com sucção controlada (Fernandes, 2016) e ensaios de campo (Giacheti, 2001; Rocha, 2018).

3 Ensaios

Ensaio de infiltração foram conduzidos por Yano (1995) (local 1) até 9 m de profundidade e por Ferreira et al. (1994) até 8 m de profundidade (local 2) por meio de cava cilíndrica escavada com o emprego de trado manual de 0,3 m de diâmetro, seguindo as orientações propostas pela ABNT NBR 7229 (1993) e ABGE (2013), ambos os trabalhos reinterpretados por Giacheti et al. (2000). Em relação aos ensaios de laboratório, foram coletadas amostras indeformadas de metro em metro para realização de ensaios convencionais de permeabilidade utilizando-se das técnicas de carga variável e constante com fluxo d'água descendente conforme as normas ABNT NBR 14545 (2000) e ABNT NBR 13292 (1995), vigentes à época. Tais ensaios conduzidos por Giacheti et al. (2000) para o local 1 e Rocha (2018) para o campo experimental Unesp – Bauru não permitiram, contudo, estudar o efeito do confinamento na condutividade hidráulica do solo. Deste modo, ensaios com permeâmetro de parede flexível com fluxo ascendente foram realizados em conformidade com a norma ASTM D5084 (2016) para amostras coletadas a 1, 4, 7 e 13 m de profundidade e comparados com os ensaios anteriormente mencionados. Com o propósito de verificar o efeito do confinamento, diferentes condições de tensão média (20, 40, 80, 160 e 320 kPa) foram aplicadas ao corpo de prova da amostra de 4 m de profundidade. Além do confinamento, investigou-se a influência de gradientes



hidráulicos iguais a 5 e 10 nas quatro profundidades, a escolha dos mesmos foi norteada pelo equipamento, uma vez que o permeâmetro de parede flexível tem melhor desempenho com maiores gradientes hidráulicos, haja vista que foi desenvolvido para materiais pouco permeáveis. As pesquisas mencionadas neste parágrafo estão dispostas na Tabela 1, bem como o número de determinações necessárias para definir a condutividade hidráulica em cada local e método utilizado.

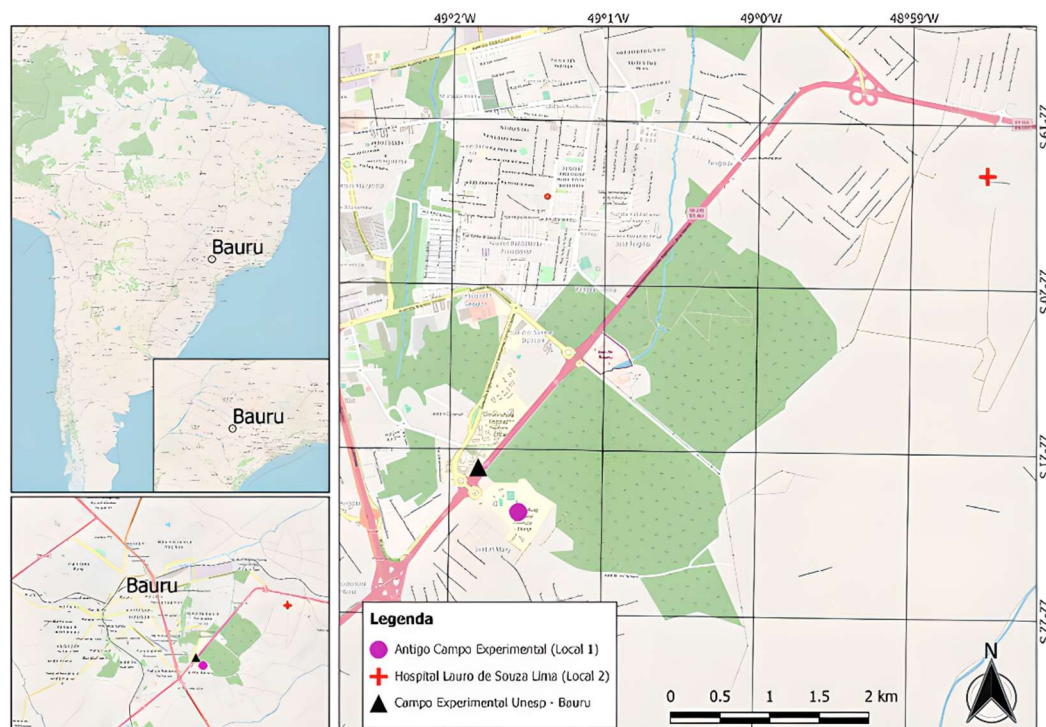


Figura 1 – Locais de amostragem do solo e campanhas de ensaios de campo (WGS 84 – UTM 22 S).

A Figura 3 e a Figura 2 ilustram, respectivamente, um desenho esquemático do ensaio com o permeâmetro de parede flexível e a montagem do corpo de prova.

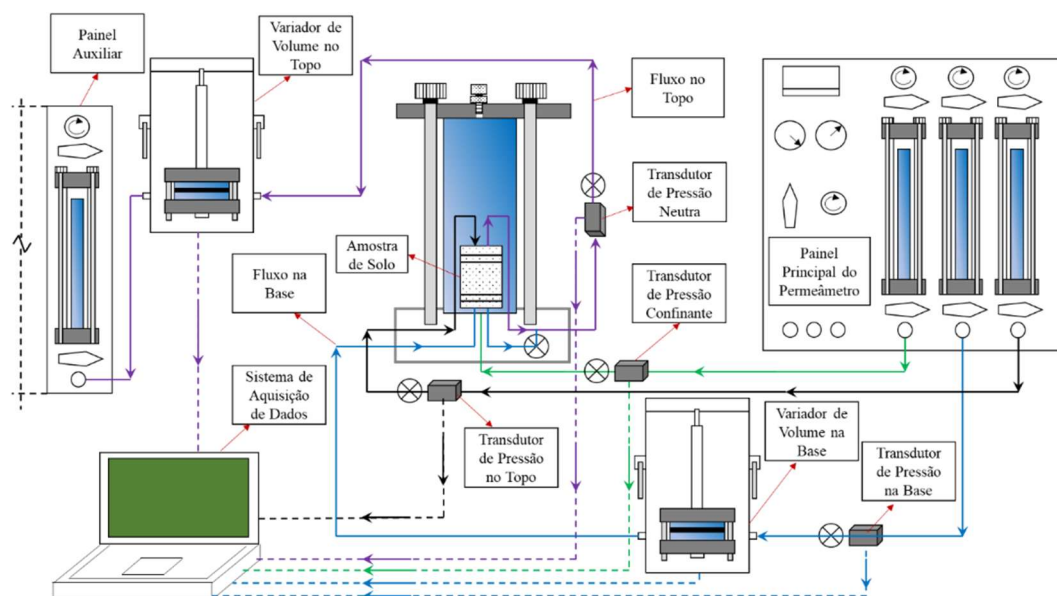
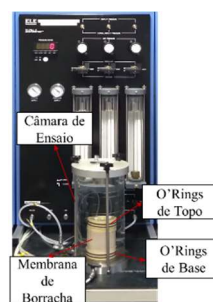


Figura 2. Representação esquemática do permeâmetro de prede flexível.



a) Preparação do corpo de prova (b) Corpo de prova durante o ensaio
 Figura 3. Disposição do corpo de prova para realização do ensaio.

Tabela 1. Resumo dos ensaios conduzidos para os locais estudados

Autor	Local	Método de Ensaio	Profundidade (m)	Determinações
Giacheti et al. (2000)	1	Laboratório – Parede Rígida	1	8
			2	8
			3	9
			4	10
			5	10
			6	12
			7	13
			8	11
			9	8
Giacheti et al. (2000)	1	Campo – Cava Cilíndrica	1 a 9	1 para cada profundidade
			1	3
Giacheti et al. (2000)	2	Campo – Cava Cilíndrica	2	2
			3	2
			4	1
			5	3
			6	1
			7	3
			8	1
			3	21
Rocha (2018)	Campo Experimental Unesp - Bauru	Laboratório – Parede Rígida	5	26
			1	166
Este Trabalho	Campo Experimental Unesp - Bauru	Laboratório – Parede Flexível	4 (Não Consolidado)	194
			4 (Consolidado 20 kPa)	178
			4 (Consolidado 40 kPa)	119
			4 (Consolidado 80 kPa)	177
			4 (Consolidado 160 kPa)	247
			4 (Consolidado 320 kPa)	287
			7	70
			13	186



4 Resultados

A Figura 4 apresenta os resultados de ensaio SPT para o local 1 e para o campo experimental da Unesp-Bauru considerando-se o desvio padrão ($\pm DP$), bem como o índice de vazios. Exceção ao local 2, no qual não há sondagens de simples reconhecimento.

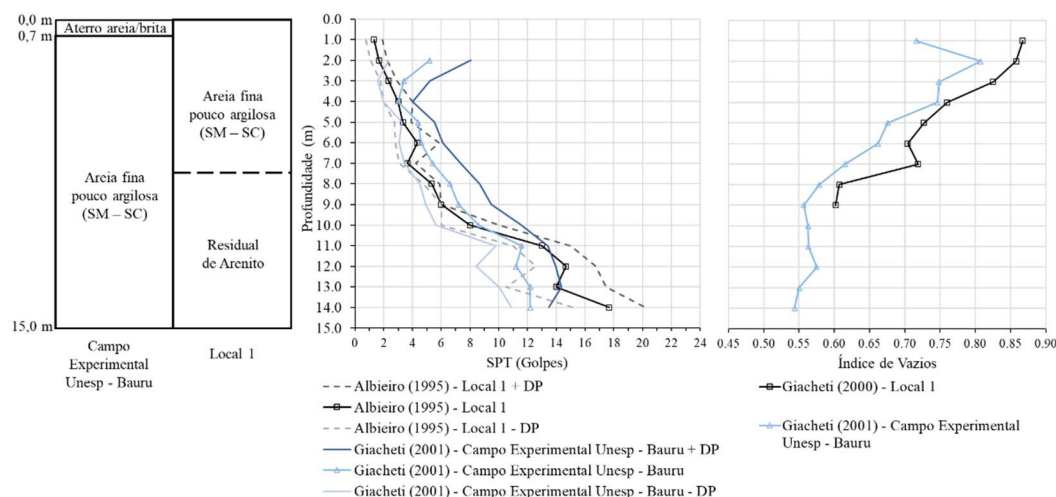


Figura 4. Resultados de sondagens SPT e de índice de vazios ao longo da profundidade.

Os resultados das sondagens SPT e índice de vazios permitiram assumir que os diferentes locais têm características semelhantes, dado que a gênese e a textura do solo estão de acordo com as variações de N_{SPT} e índice de vazios.

A Figura 5 reúne os valores de condutividade hidráulica de campo e laboratório em função do índice de vazios incorporando o desvio padrão ($\pm DP$) nos valores médios obtidos, com exceção do ensaio de campo para o local 1, por não possuir dados suficientes para verificar sua variabilidade, sendo apresentados apenas seus valores pontuais. Não são mostrados os valores para o local 2, pois não foram determinados os índices físicos do mesmo.

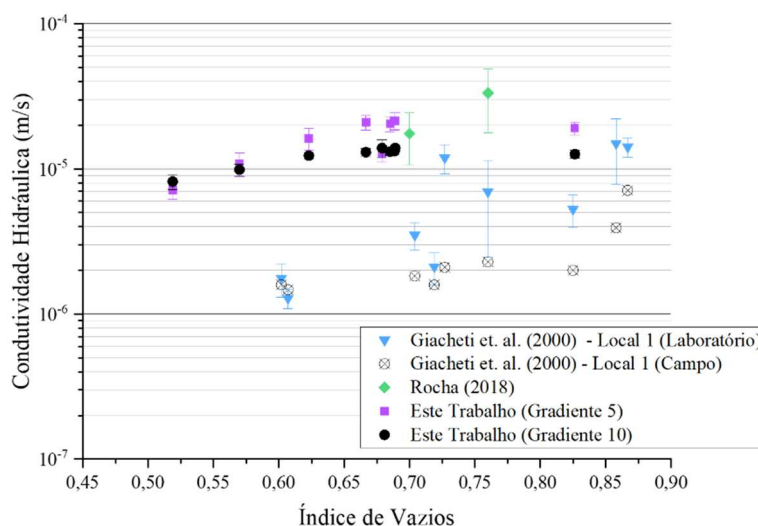


Figura 5. Resultados de condutividade hidráulica em função do índice de vazios.

Da Figura 5 nota-se a maior variabilidade dos valores de campo (Giacheti et al., 2000) e do permeâmetro de parede rígida (Rocha, 2018), quando comparados ao permeâmetro de parede flexível, tal variabilidade pode estar relacionada com o sistema de aquisição de dados incorporado ao último que independe do operador. No entanto, os resultados com o permeâmetro de parede flexível estão no intervalo de variação daqueles obtidos por Rocha (2018) para o solo do campo experimental da Unesp-Bauru. Similarmente, os resultados de Giacheti



et al. (2000) e a variação dos mesmos em laboratório mostraram-se próximos aos obtidos em campo pelo mesmo autor para o local 1, o que implica em boas condições com as quais os ensaios foram conduzidos, destacando-se a tendência de redução da condutividade hidráulica com a redução do índice de vazios em ambos os locais.

De modo geral, os ensaios para o local 1 apresentaram valores menores de condutividade hidráulica para o mesmo índice de vazios em relação aos do campo experimental da Unesp – Bauru, contudo, os resultados de ambos se enquadram aos valores característicos de areias.

Os resultados de condutividade hidráulica $\pm$ DP para o corpo de prova de 4 m e seu comportamento frente ao confinamento são mostrados pela Figura 6.

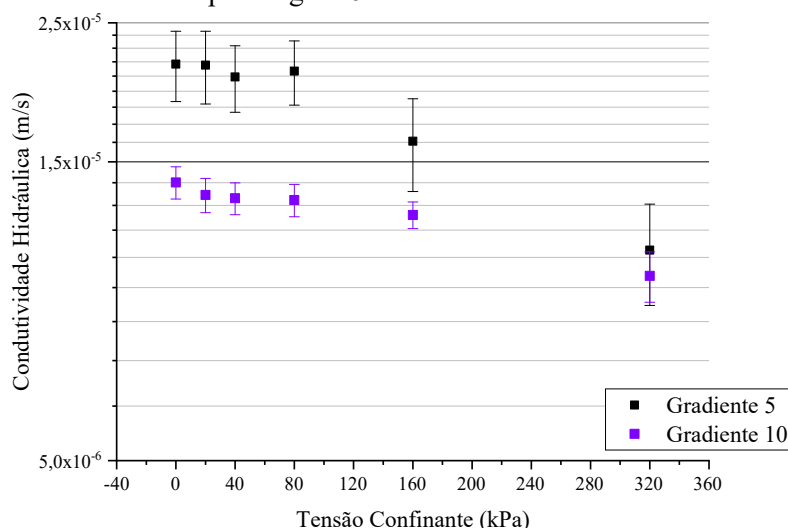


Figura 6. Influência do confinamento na condutividade hidráulica.

Como ilustrado pela Figura 6, o aumento do confinamento mostrou maior influência para as tensões de 160 e 320 kPa. O efeito da consolidação em tensões inferiores a 160 kPa não acarretou em reduções significativas de índice de vazios, refletindo-se em valores praticamente constantes de condutividade hidráulica até 80 kPa de confinamento. Em relação ao gradiente hidráulico, o aumento do mesmo reduziu a condutividade hidráulica, bem como sua variabilidade, por outro lado, a ordem de grandeza dos valores se mostrou próxima para ambos os gradientes.

A redução da variabilidade com aumento do gradiente pode estar relacionado com o aumento da força de percolação responsável por deslocar o êmbolo dos variadores de volume e consequentemente o LVDT, proporcionando leituras mais constantes. Tal redução na variabilidade foi também observada por Mitchell et al. (1967) e Costa et al. (2018). Fox (1996) comenta que a norma ASTM D5084 apresenta recomendações de uso do gradiente hidráulico, nenhum deles, porém, as justificando.

Os resultados para as três localidades em campo e laboratório, sua variação com a profundidade e um desvio padrão acima e abaixo da média (para os locais e profundidades em que o cálculo foi possível) são apresentados pela Figura 7.

Dos resultados, depreende-se que o aumento da profundidade e consequentemente do confinamento implicaram na diminuição do índice de vazios e da condutividade hidráulica. Esta teve valores determinados em laboratório maiores que os de campo, tal fato pode estar relacionado com a infiltração em campo, pois o fluxo não é somente vertical como em ensaios laboratoriais, os quais também podem ter sofrido colmatção naqueles que fizeram uso do permeâmetro de parede rígida conforme observado por Giacheti et al. (2000), o fluxo descendente pode ter acarretado na redução de praticamente uma ordem de grandeza em relação ao permeâmetro de parede flexível.

Nota-se, ainda, a pouca variação da ordem de grandeza da condutividade hidráulica para o solo do campo experimental da Unesp – Bauru refletindo, em relação à permeabilidade, a homogeneidade do perfil estudado até 13 m, neste sentido, o permeâmetro de parede flexível pode ser utilizado para simular maiores profundidades, desde que o processo de consolidação atinja o índice de vazios e as características geológico-geotécnicas sejam equivalentes, evitando assim a coleta de amostras indeformadas em grandes profundidades.

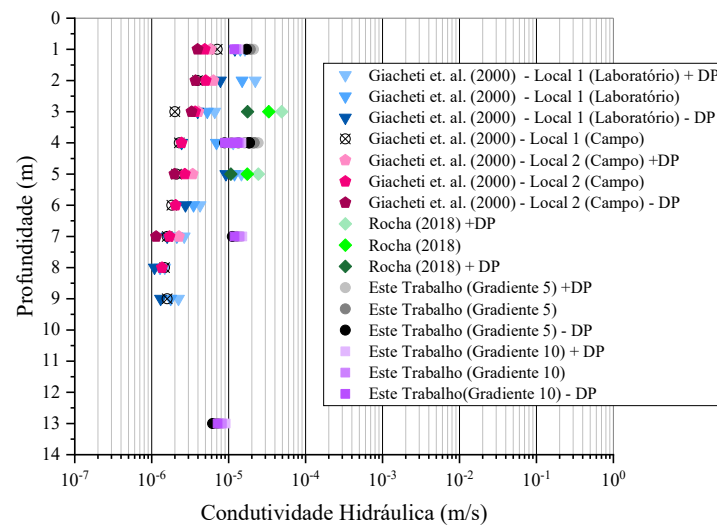


Figura 7. Condutividade hidráulica ao longo da profundidade.

5 Conclusões

Este estudo comparou amostras de solo de três diferentes locais do município de Bauru-SP frente ao seu comportamento hidráulico em condições de campo e laboratório, e neste, sob diferentes configurações de confinamento quando do uso de um equipamento de parede flexível, podendo-se concluir que:

- Os resultados de ensaios de laboratório e de campo em profundidades e locais distintos, mas com perfis geotécnicos similares demonstraram o potencial de uso do permeâmetro de parede flexível em condições confinadas e não confinadas;
- A variabilidade da condutividade hidráulica foi respectivamente maior no ensaio com permeâmetro de parede rígida (coeficiente de variação médio (CV) de 43% para o campo experimental Unesp – Bauru e 29% para o local 1), em campo (23% para o local 2), e com permeâmetro de parede flexível (10%), contudo, os valores foram os esperados para um solo arenoso.
- O aumento do gradiente hidráulico não resultou em alterações significativas nos valores de condutividade hidráulica, mas reduziu a variabilidade dos dados coletados; e
- A redução da condutividade hidráulica com aumento da profundidade e com confinamento evidenciam a relação destes parâmetros com o índice de vazios.

AGRADECIMENTOS

À CAPES e à FAPESP (2017/23174-5).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. (2013). ABGE. Ensaio de permeabilidade em solos: orientações para sua execução no campo.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). NBR 13292. Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000). NBR 14545. Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1993). NBR 7229. Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro.
- American Society for Testing and Materials (2016). ASTM D5084. Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*



- Conciani, R. (2016). *Contaminantes inorgânicos em solos laterítico e não laterítico*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília / UnB, 86p.
- Costa, W. G. S., de Lima, D. C., Pitanga, H. N., Schaefer, C. E. G. R., da Silva, T. O., & Silva, C. H. de C. (2018). Evaluation of the effects of the hydraulic gradient variation on the permeability of a compacted soil. *Acta Scientiarum - Technology*, 40(2007), p. 1–5.
- Daniel, D., Trautwein, S., Boynton, S., & Foreman, D. (1984). Permeability testing with flexible-wall permeameters. *Geotechnical Testing Journal*, 7(3), p.113–122.
- Fernandes, J. B. (2016). *Resistência e deformabilidade de um solo não saturado a partir de ensaios triaxiais*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Bauru - Universidade Estadual Paulista / Unesp, 144 p.
- Ferreira, C. V., Albieiro, J. H., & Lobo, A. S. (1994). Variação do coeficiente de infiltração de um solo residual de arenito. In: 2º Simpósio Sobre Solos Não Saturados, p.197–201.
- Fox, P. J. (1996). Analysis of hydraulic gradient effects for laboratory hydraulic conductivity testing. *Geotechnical Testing Journal*, 19(2), p. 181–190.
- Giacheti, H. L. (2001). *Os ensaios de campo na investigação do subsolo : estudo e considerações quanto à aplicação em solos tropicais*. Tese de Livre Docência, Faculdade de Engenharia de Bauru - Universidade Estadual Paulista / Unesp, 301 p
- Giacheti, H. L., Ferreira, C. V., Lobo, A. da S., & Marques, M. E. M. (2000). A condutividade hidráulica de um solo arenoso determinada a partir de ensaios de campo e de laboratório. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental XI-012, 27, p.1–8.
- Kandalai, S., Singh, P. N., & Singh, K. K. (2018). Permeability of granular soil employing flexible wall permeameter. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(2), 9 p.
- Liu, K., Vardon, P. J., Hicks, M. A., & Arnold, P. (2017). Combined effect of hysteresis and heterogeneity on the stability of an embankment under transient seepage. *Engineering Geology*, 219, p.140–150.
- Mitchell, R. J. K., Younger, J. S., & Hy, A. (1967). Abnormalities in hydraulic flow through fine-grained soils. *Permeability and Capillarity of Soils*, p. 106–141.
- Mondelli, G., Giacheti, H. L., Boscov, M. E. G., Elis, V. R., & Hamada, J. (2007). Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil. *Environmental Geology*, 52(5), p.871–887.
- Morandini, T. L. C., & Leite, A. do L. (2015). Characterization and hydraulic conductivity of tropical soils and bentonite mixtures for CCL purposes. *Engineering Geology*, 196, 251–267.
- Nikolaos, A., Grigorios, P., Polixeni, C., & Ioannis, C. (2019). Investigation on the influence of permeability coefficient K of the soil mass on construction settlements. Cases of infrastructure settlements in Greece. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 15, p.95–105.
- Rocha, B. P. (2018). *Caracterização geotécnica de solos tropicais não saturados por meio de ensaios de campo*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo / USP, 242 p.
- Saab, A. L. (2016). *Influência da sucção nos parâmetros de compressibilidade de um solo não saturado*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Bauru - Universidade Estadual Paulista / Unesp, 125 p.
- V Venuja, T., & Kurukulasuriya, L. C. (2020). Seepage in Iranamadu dam and its influence on the stability. 9^o *International Conference on Sustainable Built Environment*, 44, 365–377.
- Yano, F. H. H. (1995). *Estudo da permeabilidade de um perfil de solo da região de Bauru*. Trabalho de Graduação, Faculdade de Engenharia de Bauru - Universidade Estadual Paulista / Unesp, 42 p.