

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
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Efeito da Variação do Gradiente Hidráulico na Estrutura de um Solo Compactado

Weiner Gustavo Silva Costa

Docente, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Brasil, weiner.ufbr@gmail.com

Paulo Sergio de Almeida Barbosa

Docente, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, pbarbosa@ufv.br

Dario Cardoso de Lima

Docente, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, declima@ufv.br

Heraldo Nunes Pitanga

Docente, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, heraldo.pitanga@ufv.br

Abner Lucas Silva Costa

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil, abner_luca@yahoo.com.br

RESUMO: A busca por equipamentos de laboratório, que sejam ágeis e eficazes podendo ser empregados na realização de ensaios, vem sendo constante na atual conjuntura, em especial para aplicações geoambientais e, mais especificamente, nos ensaios de percolação em coluna para o estudo de transporte de contaminantes em solos. Esses ensaios muitas vezes são realizados em equipamentos de laboratório que empregam gradientes hidráulicos, demandando tempos excessivos para as suas execuções. Partindo-se desse pressuposto, esse trabalho objetivou caracterizar a influência do gradiente hidráulico utilizado em ensaios de percolação em coluna na estrutura de solos compactados. O solo empregado foi um residual maduro pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, de expressiva ocorrência no Brasil e, em especial, no Sudeste brasileiro. Foram realizados ensaios de caracterização geotécnica (LL, LP, granulometria e massa específica dos sólidos), bem como de compactação na energia do ensaio Proctor Normal, para a produção de corpos-de-prova na umidade ótima, que foram utilizados em ensaios de permeabilidade, nos gradientes 15, 66, 85 e 140, e, posteriormente, de penetração quase estática. Para fins práticos de engenharia, os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade e de penetração quase estática sustentam que não ocorreram mudanças significativas na estrutura do solo ensaiado, para os gradientes empregados no presente trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Gradiente Hidráulico, Coluna de Percolação, Permeabilidade, Resistência à penetração

ABSTRACT: The search for equipments of laboratory, which are agile and efficient being able to be employed in the realization of tests, is constant at present, in special for applications geoambientais and, more specifically, in the tests of column percolation for the study of contaminant transport on soils. These tests very often are carried out in equipments of laboratory that employ hydraulic gradients, demanding excessive times for his executions. By the way, this work aimed to characterize the influence of the hydraulic gradient used in tests of percolação in column in the grounds structure compactados. The soil used was a mature residual that was pedologically classified as a Red-Yellow Latosol, with a significant occurrence in Brazil and, especially, in Southeast Brazil. Geotechnical characterization tests (w_L , w_P , granulometry and specific gravity of the solids) were carried out, as well as compaction in the energy of the Proctor Normal test, for the production of specimens in the optimal moisture, which were used in permeability tests, in hydraulic gradients 15, 66, 85 and 140, and, later, of almost static penetration. For practical engineering purposes, the results obtained in the permeability and quasi-static penetration tests maintain that there were no significant changes in the structure of the tested soil, for the gradients used in the present work.

KEYWORDS: Hydraulic Gradient, Percolation Column, Permeability, Penetration strenght

1 Introdução

Nos dias atuais, a busca por inovação tecnológica tornou-se a chave mestra do desenvolvimento de um país, com resultados expressos em patentes e novas tecnologias de engenharia.

Aliado a este quadro há a limitação na disponibilidade de equipamentos de laboratório que possam ser empregados para a realização de ensaios que, simulando condições de campo, sejam ágeis e reduzam a duração de ensaios convencionais, em especial para aplicações geoambientais.

Dentre estes ensaios, cita-se o de percolação em coluna, comumente aplicado no estudo de transporte de contaminantes em solos, em geral, realizados em equipamentos de laboratório que empregam gradientes hidráulicos relativamente baixos e que, no caso do estudo de contaminantes, demandam tempos excessivos para as suas execuções.

Especificamente, no caso de ensaios em coluna, é comum o emprego de baixos gradientes hidráulicos, resultando em ensaios de laboratório que demandam períodos excessivos de tempo. Com relação a trabalhos prévios, Pacheco e Silva (2005), Boff (1999), Leite (2001) e Basso (2003) empregaram nesses ensaios pressão de ar comprimido de 76 kPa (gradiente hidráulico de 52), com base no fato de que este gradiente era representativo de pressões ocorridas em barreiras selantes de aterros sanitários (comumente, na faixa de 50 – 100 kPa); por outro lado, Yong (2001) adotou gradiente hidráulico em torno de 55, enquanto que Alves (2005) trabalhou com gradiente hidráulico de 24, a partir de recomendações da ASTM D 4874 (ASTM, 1995). Rojas, *et. al.* (2007) trabalharam com gradiente hidráulico máximo de, aproximadamente, 92.

Considerando a literatura consultada, entende-se que há interesse em se caracterizar a influência da velocidade de percolação utilizada em ensaios de percolação em coluna na estrutura dos solos, haja vista que alterações produzidas na mesma podem afetar significativamente as respostas hidráulica e mecânica destes materiais. Assim, no presente trabalho, aborda-se a influência da variação do gradiente hidráulico na estrutura de um solo argiloso compactado, empregando-se um equipamento de percolação em coluna projetado, desenvolvido e tornado operacional por Caneschi (2012) junto ao Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

O objetivo geral do presente trabalho é analisar os efeitos decorrentes da variação do gradiente hidráulico e, conseqüentemente, da velocidade de percolação na estrutura de um solo compactado, empregando-se resultados de ensaios de permeabilidade e de resistência à penetração quase estática.

2 Materiais e Métodos

2.1 Solo

A amostra de solo foi coletada na jazida de empréstimo denominada ETA, em um talude à margem direita da atual entrada para a Área de Eventos da UFV, na rodovia que liga Viçosa - MG a Paula Cândido - MG, no local de coordenadas 20°45'35"S; 42°52'28"W. A Figura 1 ilustra uma visão aérea do local de coleta da amostra e a jazida de empréstimo. Trata-se de um solo argiloso típico da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo.



Figura 1. Imagem de satélite da localização da jazida de empréstimo ETA e vista frontal do local de coleta de amostras da jazida de empréstimo do LVA.

2.2 Equipamento de percolação em coluna

Para o desenvolvimento do projeto foram feitos os estudos de laboratório relativos à preparação e execução de ensaios de percolação em coluna e de ensaios com o cone penetrométrico quase estático. A concepção do sistema desenvolvido para a realização dos ensaios de percolação em coluna foi por Caneschi (2012).

O sistema de percolação em coluna consta de: tubos de PVC com 100 mm de diâmetro interno e parede de 7 mm, para acondicionamento dos corpos de prova; tampas e fundos das células de interface e dos permeâmetros de PVC em discos de nylon; e tubos de acrílico, também com 100 mm de diâmetro interno e parede de 7 mm.

O sistema de percolação em coluna, apresenta as seguintes condições de contorno: sistema de percolação de carga constante com capacidade para ensaio simultâneo de até 36 corpos de prova; gradiente hidráulico máximo de 170; e compartimentos independentes para acondicionamento do fluido de percolação e corpo de prova. As Figura 2 ilustra o sistema desenvolvido por Caneschi (2012).

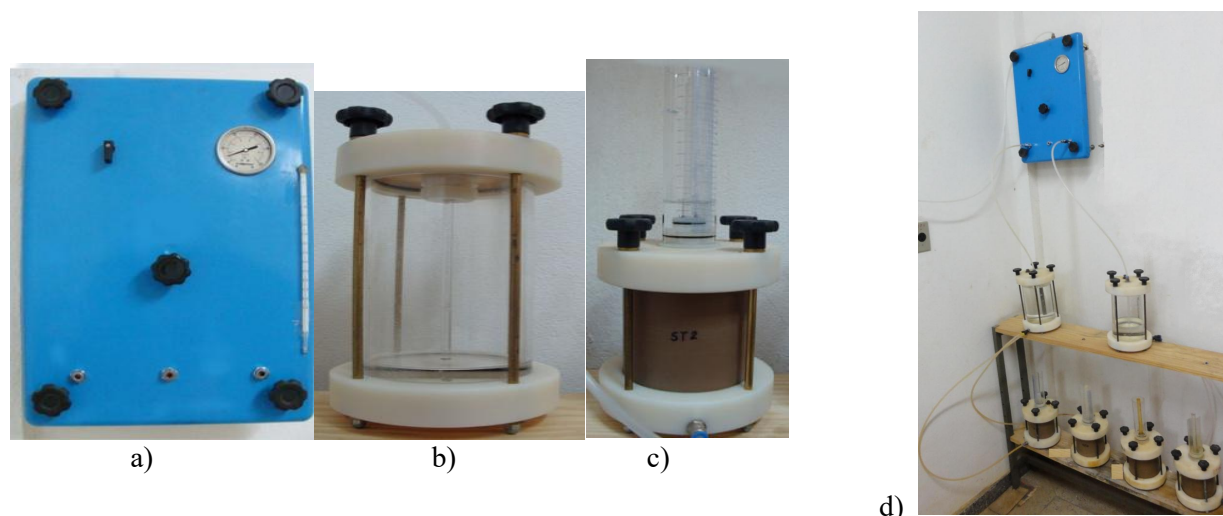


Figura 2. Sistema para a realização dos ensaios de percolação em coluna: (a) painel de controle para aplicação de pressão de ar comprimido na interface; (b) reservatório de armazenamento do líquido percolante (interface); (c) vista do permeâmetro; e (d) vista geral do sistema.

2.3 Equipamento de ensaio penetrométrico

O equipamento de penetração quase estática foi desenvolvido por Dalla Riva (2010), consistindo de: sistema de cravação hidráulico com curso de até 60 cm, célula de carga de capacidade variável (20, 50, 100 e 200 kgf), em função do material a ser ensaiado, ligada a um sistema de aquisição de dados conectado a um computador; haste de penetração com diâmetro variável; sistema de aquisição de dados; e, computador. O sistema de cravação possui uma válvula para controle de pequenas vazões, permitindo pequenos deslocamentos, bem como pode ser utilizado possibilitando maiores deslocamentos, abrindo-se a mesma, bem como elementos de nivelamento e de reação. A Figura 3 ilustra o equipamento.

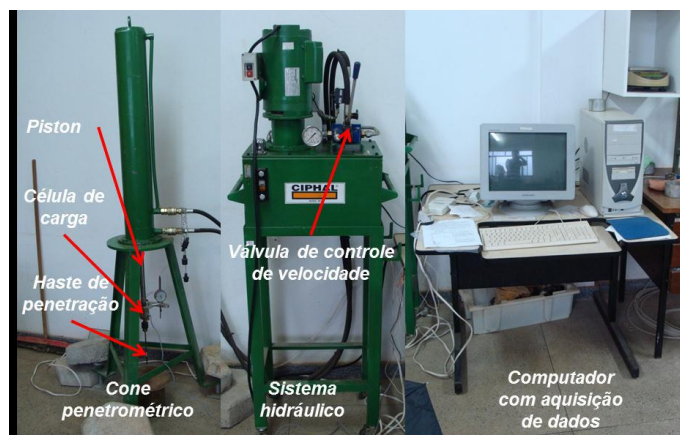


Figura 3. Equipamento de ensaio penetrométrico: (i) à esquerda, penetrômetro com pistão, célula de carga e base de apoio do corpo de prova; (ii) ao centro, sistema hidráulico incluindo bomba hidráulica e válvula de controle de velocidade.

2.4 Ensaios de caracterização geotécnica e permeabilidade

Foram coletadas amostras deformadas representativas do LVA, quanto à textura e constituição química e mineralógica, que foram, posteriormente, armazenadas no Laboratório de Engenharia Civil (LEC). As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas na peneira de abertura nominal de 2 mm e guardadas para uso futuro nos ensaios geotécnicos (NBR 6457, ABNT, 1986a). No solo em estudo foram realizados ensaios de caracterização geotécnica e de compactação, sendo que depois de compactados os corpos-de-prova foram usados nos ensaios de permeabilidade.

Os ensaios de caracterização realizados foram como segue: granulometria (NBR 7181, ABNT, 1984 d); massa específica (NBR 6508, ABNT, 1984b); limite de liquidez (NBR 6459, ABNT, 1984a); e limite de plasticidade (NBR 7180, ABNT, 1984c).

Os ensaios de compactação foram realizados segundo a NBR 7182 (ABNT, 1986b), onde os corpos de prova foram moldados por processo dinâmico na energia do ensaio Proctor Normal. Através do ensaio, foram confeccionadas as curvas de compactação e obtidos os parâmetros peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) e umidade ótima (W_{ot}) para o solo em questão e seus respectivos tratamentos.

Corpos de prova para os ensaios de percolação em coluna foram moldados segundo procedimento definido pela NBR 7182 (ABNT, 1986b), na energia do ensaio de compactação Proctor Normal nos parâmetros ótimos de compactação, nos de tubos PVC do equipamento de percolação em coluna. Os referidos cilindros foram vedados na parte superior e na parte inferior, de modo que o fluxo ocorra no sentido ascendente com a leitura de volume e coleta do líquido percolado sendo feitas na parte superior, empregando-se gradientes hidráulicos de 140, 85, 66 e 15. Para isso aplica-se pressão no sistema de 16,8 mca, 10,2 mca, 7,65 mca e 1,8 mca, respectivamente. Para o líquido percolante foram utilizadas interfaces conectadas aos corpos de prova na parte inferior nas quais se aplicou a pressão necessária a se ter o gradiente hidráulico requerido. Montados os corpos de prova e preenchidas as interfaces com água destilada, deu-se início ao fluxo, de modo a saturar os vazios e medir o coeficiente permeabilidade da amostra. Na determinação do coeficiente de permeabilidade empregou-se a Lei de Darcy. O ensaio de permeabilidade foi executado em sala com temperatura mantida constante em $21^\circ \pm 1^\circ \text{C}$.

2.7 Ensaios com o cone penetrométrico quase estático

Logo em seguida aos ensaios de permeabilidade os corpos de prova foram ensaiados empregando-se o sistema desenvolvido por Dalla Riva (2010), composto por um sistema hidráulico de cravação, células de carga de capacidade variável, haste de penetração com diâmetro igual a 6,2 mm, sistema de aquisição de dados e computador.

Com relação aos ensaios de penetração, a velocidade de deslocamento da haste foi de $15 \pm 5 \text{ mm.min}^{-1}$.



Para se analisar se houve variação na estrutura do solo compactado devido à percolação de água para cada gradiente esse ensaio foi feito da seguinte maneira: (i) primeiramente executou-se a penetração no corpo de prova no sentido do fluxo até o meio do corpo de prova (60 mm) tomando-se a resistência à penetração aos 40 mm; (ii) em seguida executou-se a penetração no corpo de prova no sentido contrário ao fluxo até o meio do corpo de prova (60 mm) também tomando a resistência à penetração aos 40 mm. Dessa forma pode-se analisar se houve variações devido à movimentação de água na entrada e na saída.

A escolha dos 40 mm como posição para avaliação da resistência à penetração foi de maneira a tomar uma posição neutra onde pudessem estar ausentes problemas relacionados a efeito de borda e onde a penetração não fosse influenciada pelo furo feito previamente.

3 Resultados

3.1 Ensaios de caracterização geotécnica

Na Tabela 1 apresentam-se os resultados da caracterização geotécnica do solo, considerando-se os limites de Atterberg (w_L e w_P), massa específica dos grãos (ρ_s), constituição granulométrica segundo a ABNT (1995) e os parâmetros ótimos de compactação, para o solo, obtidos através do ensaio de compactação, na energia do Proctor Normal.

Tabela 1. Resultados caracterização geotécnica

	Limites de Atterberg			ρ_s (g.cm ⁻³)	Granulometria			Wot (%)	γ_{dmax} (kN.m ⁻³)
	w_L (%)	w_P (%)	IP (%)		Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)		
Solo ETA	82	46	36	2,78	23	10	67	31,37	13,54

3.2 Ensaios de permeabilidade

Os resultados de permeabilidade obtidos, assim como o maior e o menor valor e o desvio padrão são apresentados a seguir para cada um dos gradientes.

Tabela 2. Resultados de permeabilidade, sendo i o gradiente hidráulico e k o coeficiente de permeabilidade

	$i = 15$	k (cm.s ⁻¹)	$i = 66$	k (cm.s ⁻¹)	$i = 85$	k (cm.s ⁻¹)	$i = 140$	k (cm.s ⁻¹)
Média	1	003E-08	6	3.28E-08	7	5.12E-08	10	5.14E-08
Maior valor		4.13E-08		5.54E-08		7.52E-08		6.23E-08
Menor valor		1.44E-08		2.04E-08		3.59E-08		3.69E-08
Desvio padrão		6.76E-09		6.23E-09		8.65E-09		5.59E-09
Média	3	2.91E-08	5	3.30E-08	8	4.48E-08	11	3.69E-08
Maior valor		4.18E-08		4.65E-08		6.19E-08		4.15E-08
Menor valor		1.70E-08		2.06E-08		3.10E-08		3.01E-08
Desvio padrão		6.48E-09		5.01E-09		6.39E-09		2.99E-09
Média	2	2.86E-08	4	3.18E-08	9	6.52E-08	12	4.28E-08
Maior valor		4.72E-08		4.62E-08		7.46E-08		4.78E-08
Menor Valor		1.19E-08		2.63E-08		4.34E-08		3.08E-08
Desvio padrão		8.12E-09		6.09E-09		6.98E-09		4.36E-09
MÉDIA GERAL		2.93E-08		3.25E-08		5.37E-08		4.37E-08
DESVIO PADRÃO GERAL		8.19E-10		6.43E-10		1.04E-08		7.29E-09

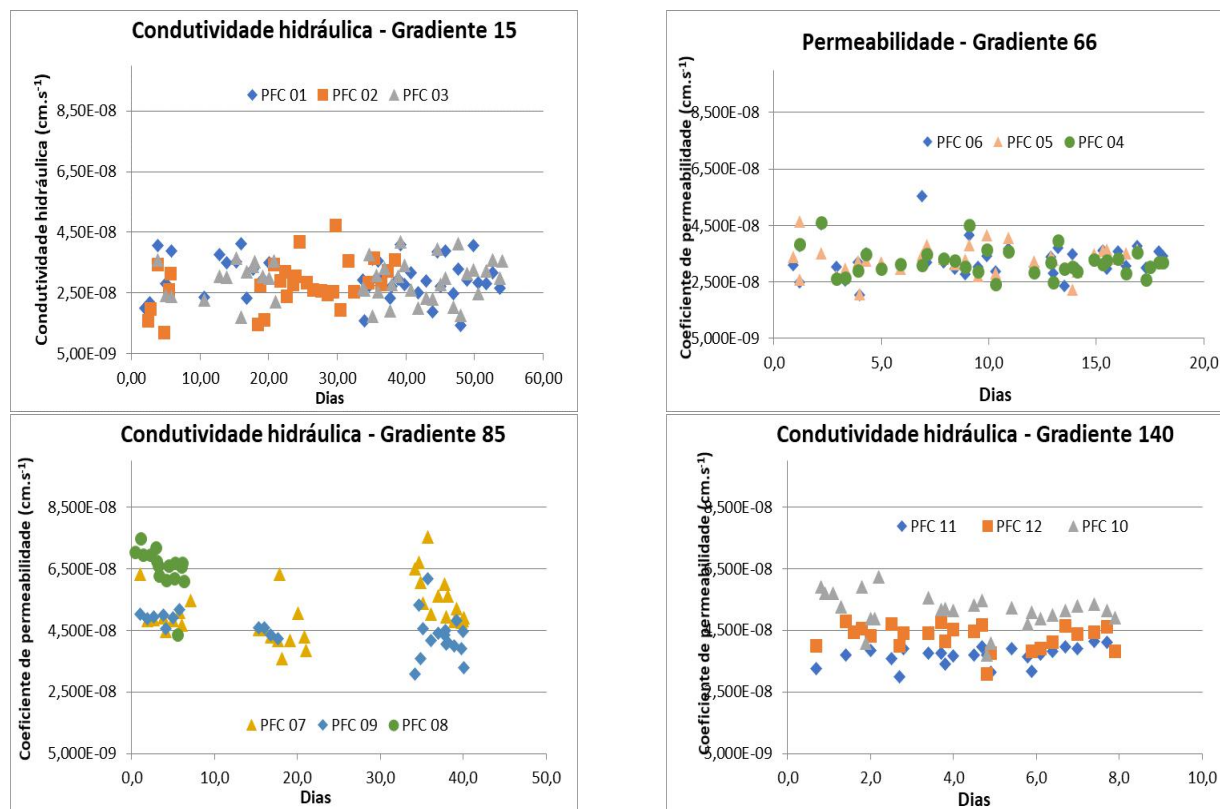


Figura 4. Resultados de permeabilidade.

Pode-se notar que não houve variação significativa na permeabilidade com o aumento do gradiente. Os valores apresentados estão limitados numa faixa que vai desde 3.10^{-8} a $5,4.10^{-8} \text{ cm.s}^{-1}$.

3.3 Ensaios com o cone penetrométrico quase estático

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios com o cone penetrométrico em forma de gráficos de resistência em função da profundidade de penetração para cada gradiente. Na Tabela 3 está a resistência à penetração na profundidade de 40 mm. Na Figura 5 são apresentadas as curvas tensão versus profundidade de penetração do ensaio de penetração.

Tabela 3. Resistência à penetração na profundidade de 40 mm para o gradiente hidráulico 15

	Corpo de Prova	PFC 01	PFC 02	PFC 03	PFC 06	PFC 05	PFC 04	PFC 07	PFC 09	PFC 08	PFC 10	PFC 11	PFC 12
		Gradiente 15			Gradiente 66			Gradiente 85			Gradiente 140		
Resistência (MPa)	Sentido do Fluxo	3,20	3,05	3,00	3,00	3,37	3,80	2,75	4,04	3,13	3,25	3,49	3,71
	Sentido Contrário ao Fluxo	2,95	3,85	3,24	3,48	3,37	3,50	3,05	4,07	2,75	3,52	3,64	3,80

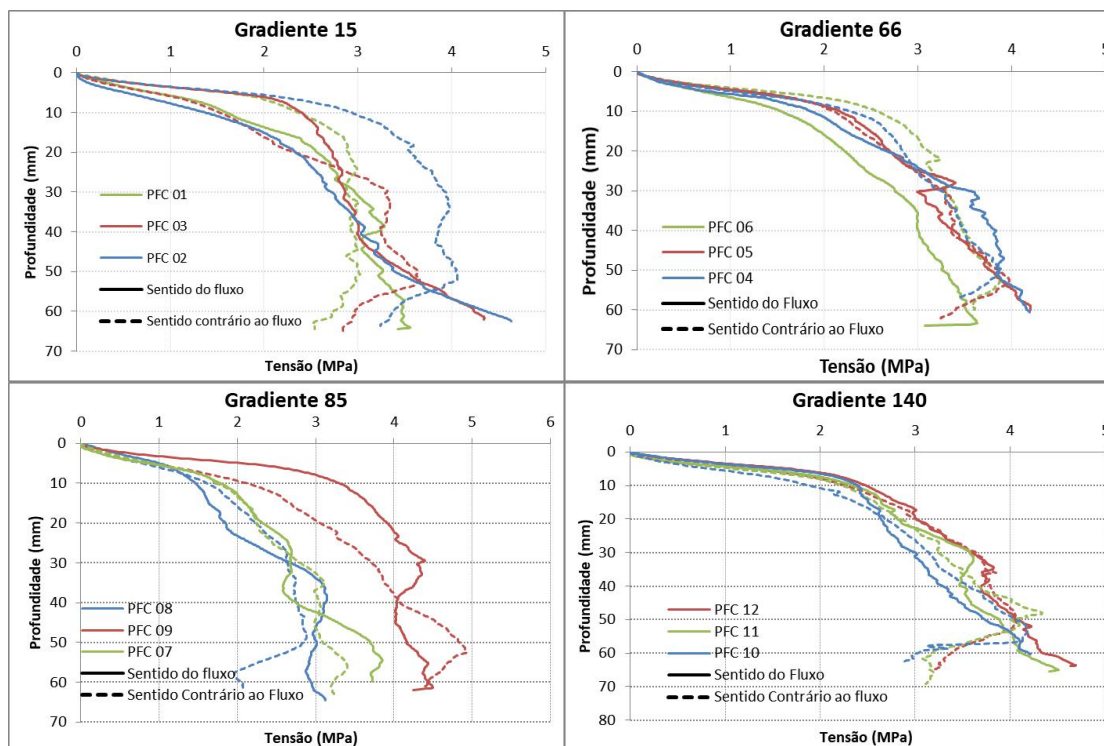


Figura 5. Curvas tensão *versus* profundidade de penetração do ensaio de penetração.

Com base nos dados apresentados na Figura 5 e na Tabela 3, sumarizado em valores médios na Figura 6 pode-se perceber que não houveram variações significativas entre a resistência na entrada e na saída do fluxo.

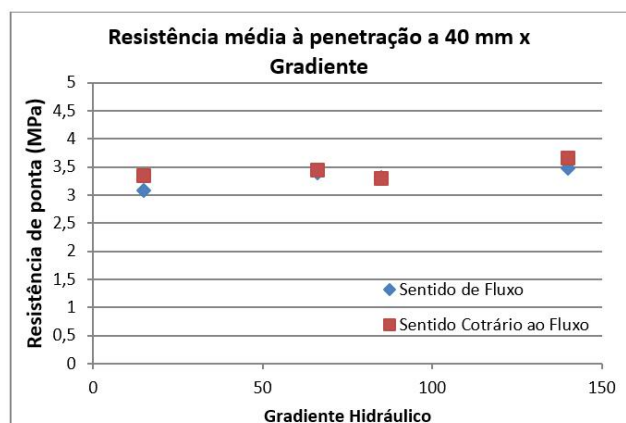


Figura 6. Resistência média à penetração a 40 mm em função do gradiente.

3 Conclusão

Com base nos resultados dos ensaios de permeabilidade e de resistência mecânica obtidos no presente trabalho, para fins práticos de engenharia pode-se concluir que a variação do gradiente hidráulico de 15 a 140 não produziu mudanças estruturais significativas no solo compactado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, G. P. M. Capacidade de atenuação do solo de fundo da lagoa anaeróbia da ETE de Passo Fundo/RS. 2005. 102 f. Dissertação. (Mestre em Engenharia). Faculdade de Engenharia e Arquitetura de Passo Fundo, 2005.

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
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 4874: Standard test method for leaching solid material in a column apparatus. Philadelphia, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: método de ensaio. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1986 a. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - determinação do limite de liquidez: método de ensaio. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1984 a. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e solos. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1995. 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica: método de ensaio. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1984b. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo - determinação do limite de plasticidade: método de ensaio. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1984c. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo - análise granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1984 d. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo - ensaio de compactação: método de ensaio. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 1986b. 10 p.
- BASSO, J. B. Transporte e retenção de K^+ , Cu^{+2} e Cl^- em uma mistura compactada de solos lateríticos para uso em barreiras selantes: procedimento de homogeneização da mistura e adaptações em equipamento de percolação em colunas. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003. 168 p.
- BOFF, F. E. Avaliação do comportamento de uma mistura compactada de solos lateríticos frente a soluções de Cu^{+2} , k^+ e Cl^- em colunas de percolação. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999. 180p.
- CANESCHI, F. P. Estudos geoambientais em solos modificados quimicamente. Viçosa-MG, Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Tese de doutorado, 2012, 117 p.
- DALLA RIVA, R. D. Efeito das Propriedades Físicas dos grãos e Agente de Cimentação na estruturação da fração areia de solos arenosos. Viçosa-MG, Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Tese de doutorado, 2010, 157 p.
- FRANCISS, F. O. Hidráulica de meios permeáveis: escoamento em meios porosos. São Paulo: USP, 1980, 169p.
- LEITE, A. L. Migração de íons inorgânicos em alguns solos tropicais, com ênfase nos processos de sorção e difusão molecular. 2001. 254 f. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.
- PACHECO E SILVA, D. Influência da contaminação por cloreto de cobre na resistência ao cisalhamento de solos utilizados em liners. 2005. 136 f. Dissertação. (Mestre em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2005.
- ROJAS J. W. J., CONSOLI N. C., HEINECK K. S. Aplicação da Técnica de Encapsulamento em um Solo Contaminado com Borra Oleosa Ácida. REA – Revista de estudos ambientais v.9, n.2, p. 6-15, jul./dez. 2007.
- YONG, R. N. Geoenvironmental engineering: contaminated soils, pollutant fate and mitigation. Boca Raton, London, New York, Washington, D. C.: CRC Press, 2001. ISBN: 0-8493-8289-0.