

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



Ascensão Capilar de Solo Fino Usando Modelo Reduzido

Jair de Jesús Arrieta Baldovino

Doutorando, LABGEO-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, yaderbal@hotmail.com

Ronaldo Luis dos Santos Izzo

Professor, LABGEO-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, izzo@utfpr.edu.br

RESUMO: O objetivo do artigo é analisar o comportamento capilar de um solo fino de origem sedimentar em modelo reduzido em laboratório. Os resultados demonstraram que a velocidade de ascensão da água pelos capilares do solo aumentou quando o solo foi compactado com um peso específico seco maior. A expansão do solo começou-se manifestar após a água capilar ter alcançado em média 1/3 da altura total. À medida que o tempo transcorreu, o coeficiente de permeabilidade diminuiu em todos os casos desde 0,0005 cm/s até 0,0003 cm/s. Encontrou-se que a entrada do ar foi localizada a 25 cm de altura e que a sucção matricial no solo registrou valores de 600-800 kPa para graus de saturação entre 90%-100%. Foi verificado que a curva de altura de ascensão vs tempo está influenciada principalmente pela porosidade de moldagem, coeficiente de permeabilidade em estado saturado e altura de entrada do ar.

PALAVRAS-CHAVE: Ascensão Capilar, Sucção Matricial, Solos Finos, Modelo Reduzido, Papel Filtro.

ABSTRACT: The objective of the article is to analyze the capillary rise of a fine soil of sedimentary origin in a scale model in laboratory. The results showed that the velocity of water rising through the capillaries of soil increased when the soil was compacted with a higher dry unit weight. The expansion of soil started to manifest after the capillary water reached an average of 1/3 of the total height. Over time, the coefficient of permeability decreased in all cases from 0.0005 cm/s to 0.0003 cm/s. It was found that the air intake was located at 25 cm in height and that the matric suction in the soil registered values of 600-800 kPa for saturation degrees between 90%-100%. It was verified that the rise height vs. time curve is mainly influenced by the molding porosity, saturated state permeability coefficient and air entry height.

KEYWORDS: Capillary Rise, Matric Suction, Fine Soils, Scale Model, Filter Paper.

1 Introdução

A capilaridade da água no solo devido à tensão superficial é um fenômeno comum na natureza. Este fenômeno refere-se à água que existe em uma elevação superior ao nível da água subterrânea ou ao nível do lençol freático. O fenômeno da ascensão capilar está associado à sucção matricial, componente da sucção total, e é diferente para diferentes processos de umedecimento e secagem em função das variações no tamanho do poro capilar. Modelos matemáticos tem sido desenvolvido para estimar tanto a altura quanto o tempo de ascensão em solos principalmente de granulometria grossa. Assim, estudos experimentais em solos finos são necessários para um maior entendimento do fenômeno.

Diversos estudos de ascensão capilar têm sido realizados usando tubos abertos. Baldovino et al. (2017) estudaram a ascensão capilar de uma areia uniforme. Os autores identificaram que a areia apresenta duas zonas após a finalização do ensaio: zona saturada e zona não saturada. Além disso, para a areia estudada, o ponto de entrada de ar foi encontrado a 1/3 da altura máxima. Baldovino et al. (2018a, 2018b) moldaram um areia fina em diferentes porosidades para estudar o comportamento capilar e assim poder estimar a altura máxima de ascensão usando modelos matemáticos. Os autores encontraram que as soluções analíticas de ascensão capilar podem ser empregadas em areias e sua utilização na engenharia geotécnica, bem como, em solos para agricultura. Izzo et al. (2018) usaram modelos analíticos para estimar a curva de ascensão capilar de um silte sedimentar compactado em uma coluna de 2m. Os autores concluíram que comparando as soluções analíticas com os resultados obtidos em laboratório, pode-se dizer que a solução proposta por Terzaghi (1943) tem um melhor ajuste, sendo a porosidade e o coeficiente de permeabilidade saturada os principais parâmetros de controle da curva de ascensão capilar. Mesmo hajam estudos em tubos abertos, não se tem estudos em modelos



reduzidos com grandes volumes de solo. Por isso, em este artigo é abordado o comportamento capilar de um solo fino quando compactado em três diferentes porosidades.

2 Programa Experimental

A caracterização do solo e os procedimentos dos ensaios de ascensão capilar são detalhados embaixo.

2.1 Solo

Foi usado um solo siltoso da Formação Guabirotuba (Curitiba/Brasil) para a realização dos ensaios de ascensão capilar. O solo foi caracterizado previamente nos estudos de Baldovino et al. (2020a, 2020b, 2020c). As propriedades físicas do solo são apresentadas na Tabela 1. Foi usada a fluorescência de Raios-x (FRX) para determinar a composição química do solo. O solo é formado principalmente por sílica (48,78% em peso) e alumina (44,51% em peso). O solo é classificado como um silte de alta plasticidade (MH) e têm 5% de argila, 60% de silte e 35% de areia.

Tabela 1. Propriedades físicas do solo

Propriedades	Valor	Norma seguida
Limite de liquides, %	50,82	NBR 6459
Limite de plasticidade, %	35,96	NBR 7180
Índice de plasticidade, %	14,86	
Densidade real dos grãos	2,62	ASTM 854-14
Areia grossa (0,6 mm < diâmetro < 2 mm), %	5	NBR 6502
Areia média (0,2 mm < diâmetro < 0,6 mm), %	12	NBR 6502
Areia fina (0,06 mm < diâmetro < 0,2 mm), %	18	NBR 6502
Silte (0,002 mm < diâmetro < 0,06 mm), %	60	NBR 6502
Argila (diâmetro < 0,002 mm), %	5	NBR 6502
Diâmetro efetivo (D_{10}), mm	0,003	
Diâmetro médio (D_{50}), mm	0,038	
Coefficiente de uniformidade (C_u)	12,67	
Coefficiente de curvatura (C_c)	0,88	
Classificação (SUCS)	MH	ASTM 2487-11
Cor	Amarelo	
Tensão de Pré-consolidação, kPa	300	ASTM D2435
Coefficiente de consolidação, cm^2/s	0,02	ASTM D2435
Ângulo de atrito, graus	26	ASTM D3080
Coesão, kPa	23	ASTM D3080

2.2 Ensaios de Ascensão Capilar

Foi compactado o solo originário de Formação Guabirotuba de Curitiba/BR em uma caixa de acrílico transparente com dimensões de 30x30 e 40cm de altura. Foram compactadas camadas a cada 5 cm de solo siltoso sobre uma fina camada de areia média para permitir a entrada de água ao sistema. Foram instaladas 2 entradas de água na caixa na parte inferior e foram colocados 2 papeis filtro Wathmann a cada 4 cm de altura para medir a sucção matricial (ASTM D5298-16) após a finalização da ascensão capilar. O sistema de entrada de água esteve conectado a um sistema externo que mantivesse o nível de água constante com um reservatório graduado em litros. Foram instalados relógios comparadores na parte superior do solo na caixa para registrar a expansão devido a entrada de água no sistema. Durante o ensaio foi registrada altura de ascensão capilar pelo tempo nas 4 faces da caixa de acrílico.

No total foram realizados 3 ensaios: Caixa A, B e C. Em cada ensaio o solo foi compactado com uma densidade seca (ρ_d) de moldagem diferente para estudar os efeitos no comportamento capilar. A caixa A foi

compactada com $\rho_d=1,057 \text{ g/cm}^3$, a Caixa B com densidade seca de $1,138 \text{ g/cm}^3$ e a Caixa C com $1,040 \text{ g/cm}^3$. A Caixa A e B foram compactadas com teor de umidade 0% enquanto a Caixa C foi compactada com 5% de umidade.

3 Resultados e Discussões

Na Figura 1 são apresentadas imagens das caixas A-C durante o ensaio de ascensão capilar. Foi marcada a altura de ascensão em cada uma das 4 faces das caixas junto com o tempo. No início de cada ensaio, a água começou ascender de forma radial e depois o comportamento foi totalmente vertical devido a que a areia no fundo da caixa ajudou a normalizar a ascensão. Isto pode ser visto claramente nas Figuras 2, 3 e 4. Nos dois casos onde o solo foi compactado sem teor de umidade, a ascensão radial deixou de se manifestar após os 25 cm de altura enquanto na Caixa C, compactada com 5% de umidade, o comportamento radial desapareceu após os 15 cm. Neste pequeno intervalo de altura e tempo, presume-se que a alteração do conteúdo de água na zona de umidificação seja muito pequena em comparação com a alteração do conteúdo de água devido ao avanço da zona de umedecimento como visto por Li et al. (2009). Além disso, as condições de contorno na frente da zona de umedecimento podem ser consideradas inalteradas para pequenos intervalos de tempo.

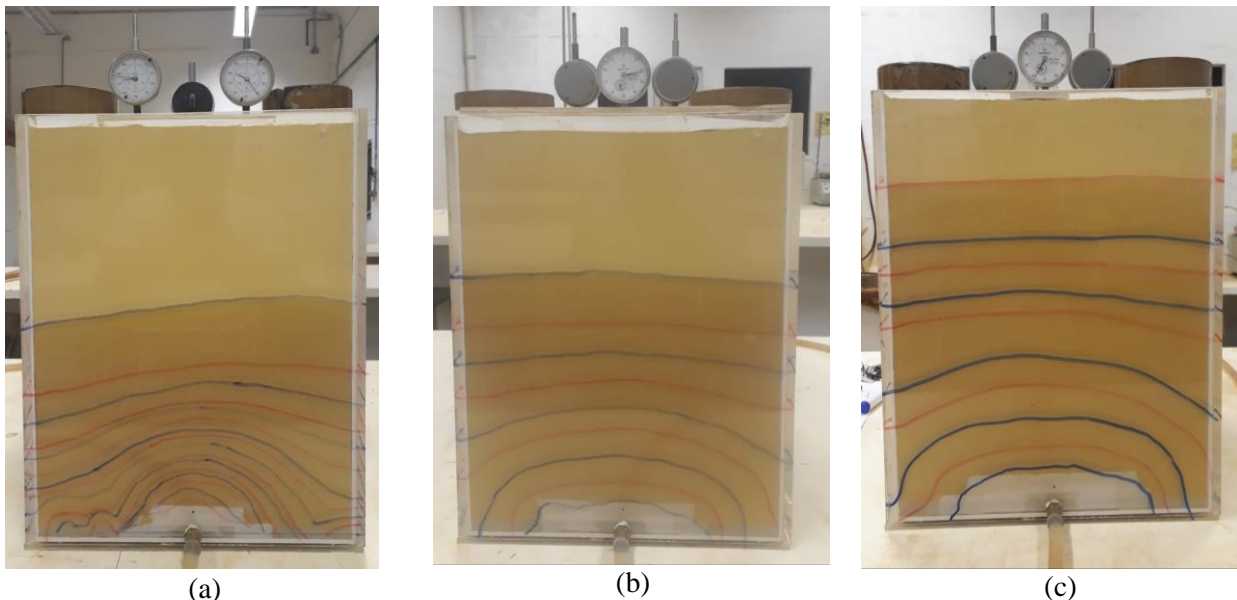


Figura 1. Comportamento capilar do solo a través do tempo. (a) Caixa A (b) Caixa B (c) Caixa C

Na Figura 5 são apresentados os perfis das três caixas, apresentando a altura de ascensão pelo tempo e saturação média pela profundidade da caixa. Houve um aumento no tempo de ascensão quando o solo foi compactado com uma densidade seca maior. Isto se deve à baixa permeabilidade do solo, o que aumenta a sucção e a retenção da água nos vazios como demonstrado na Figura 5b onde é obvio que o solo compactado na Caixa B foi capaz de reter maior quantidade de água. No caso da saturação do solo, é observado na Figura 5b que existe uma zona com maior saturação após os 25 cm de altura. Essa zona é aproximadamente 1/3 da altura total como encontrado em solos arenosos estudados por Baldovino et al. (2017, 2018a, 2018b) e em solos siltosos estudados por Izzo et al. (2018).

A Figura 6 exhibe os resultados da velocidade de ascensão da água pelo tempo em dias. Nas faces onde se encontra a entrada de ar (1 e 3), e o frente de umedecimento foi de maneira radial, a velocidade começou maior em relação às faces onde não havia entrada de água (2 e 4). A velocidade nas entradas e faces 1 e 3 começou diminuir até se normalizar com as faces 2 e 4 como também pode ser observado nas Figuras 2-4. No final de cada ensaio nas caixas, a velocidade se normalizou em $0,0003 \text{ cm/s}$, $0,0004 \text{ cm/s}$ e $0,0005 \text{ cm/s}$ para as caixas A, B, e C, respectivamente.

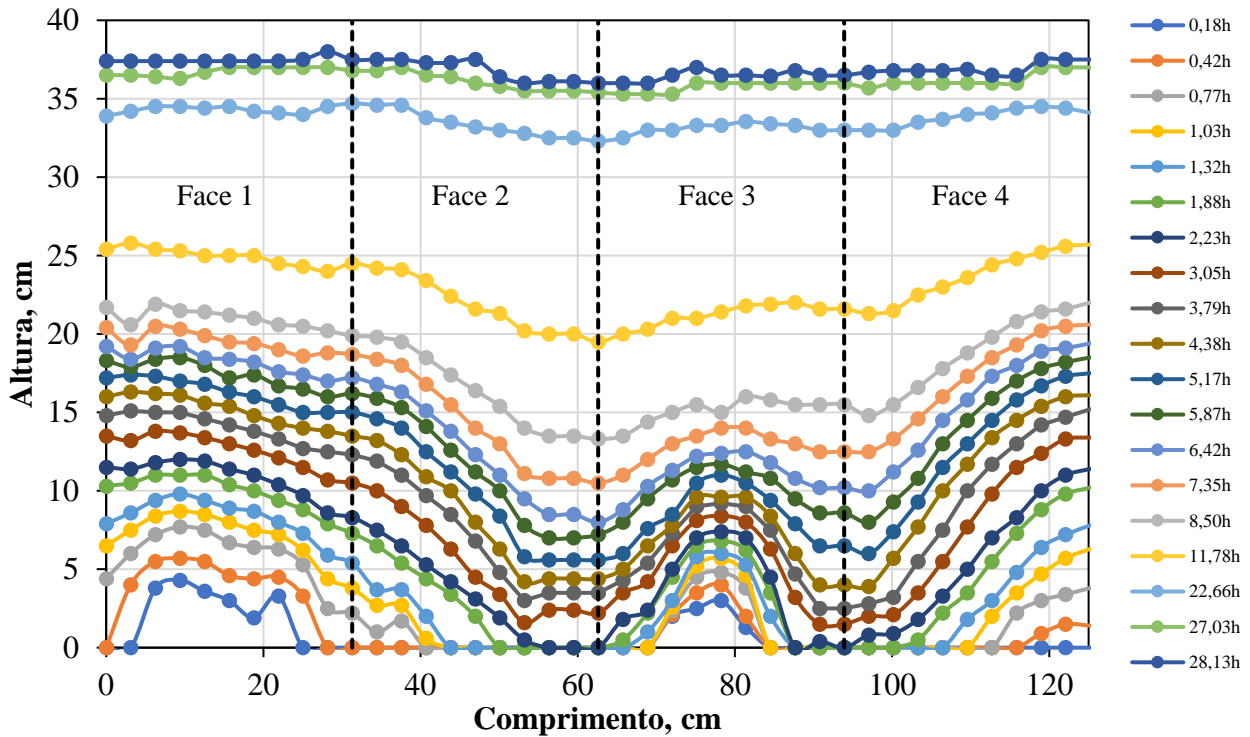


Figura 2. Linhas de ascensão capilar da água ao longo do tempo para a caixa A e as faces 1-4

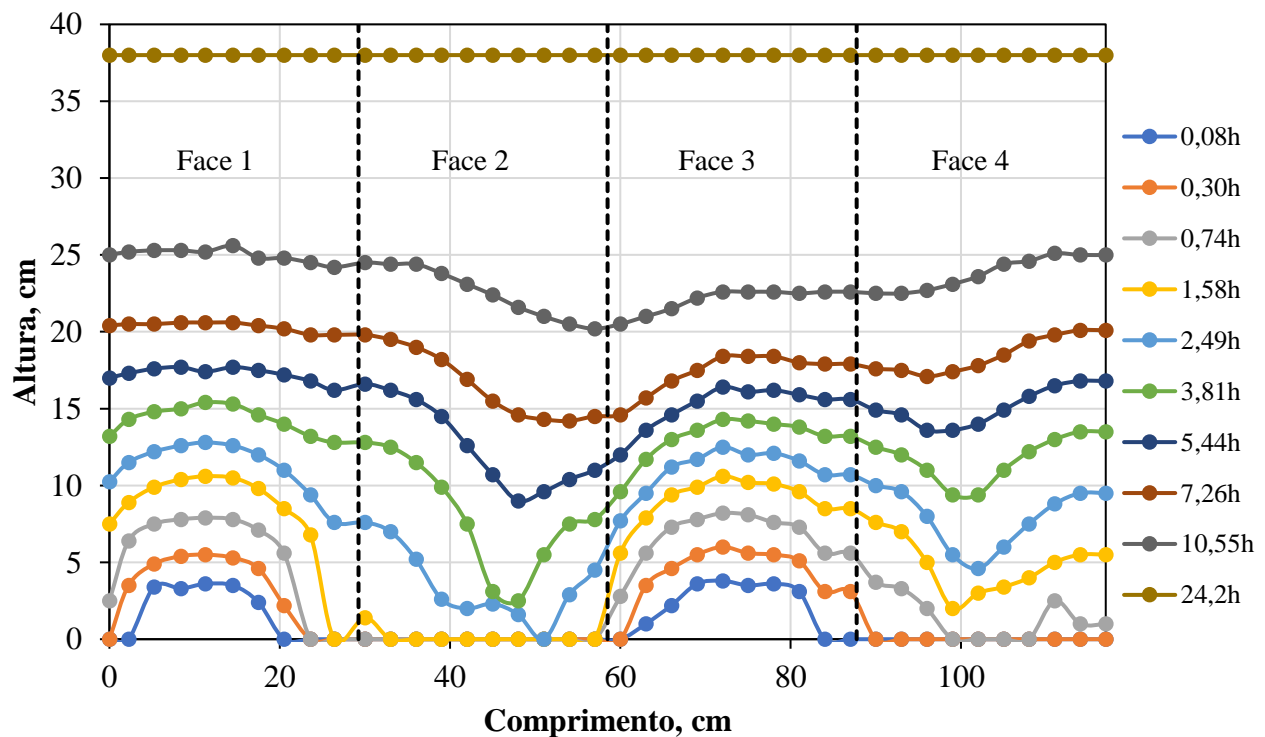


Figura 3. Linhas de ascensão capilar da água ao longo do tempo para a caixa B e faces 1-4

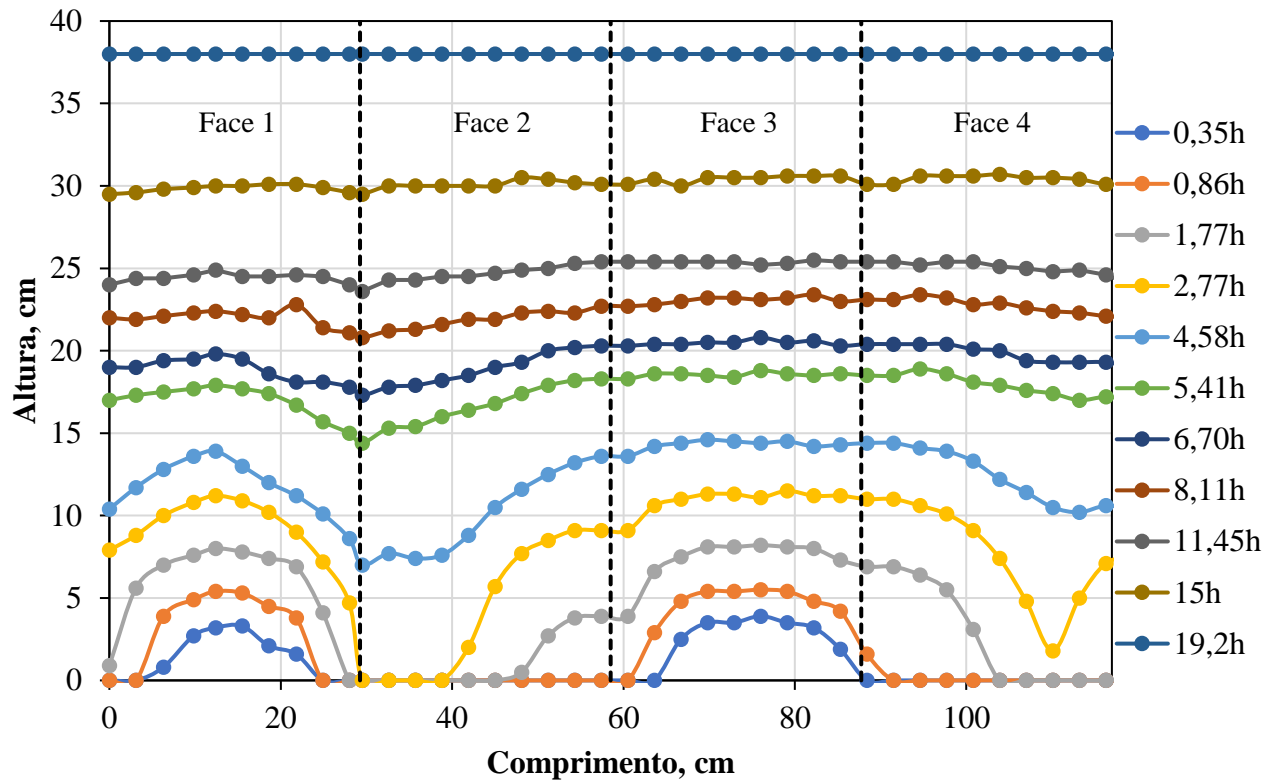


Figura 4. Linhas de ascensão capilar da água ao longo do tempo para a caixa C e faces 1-4

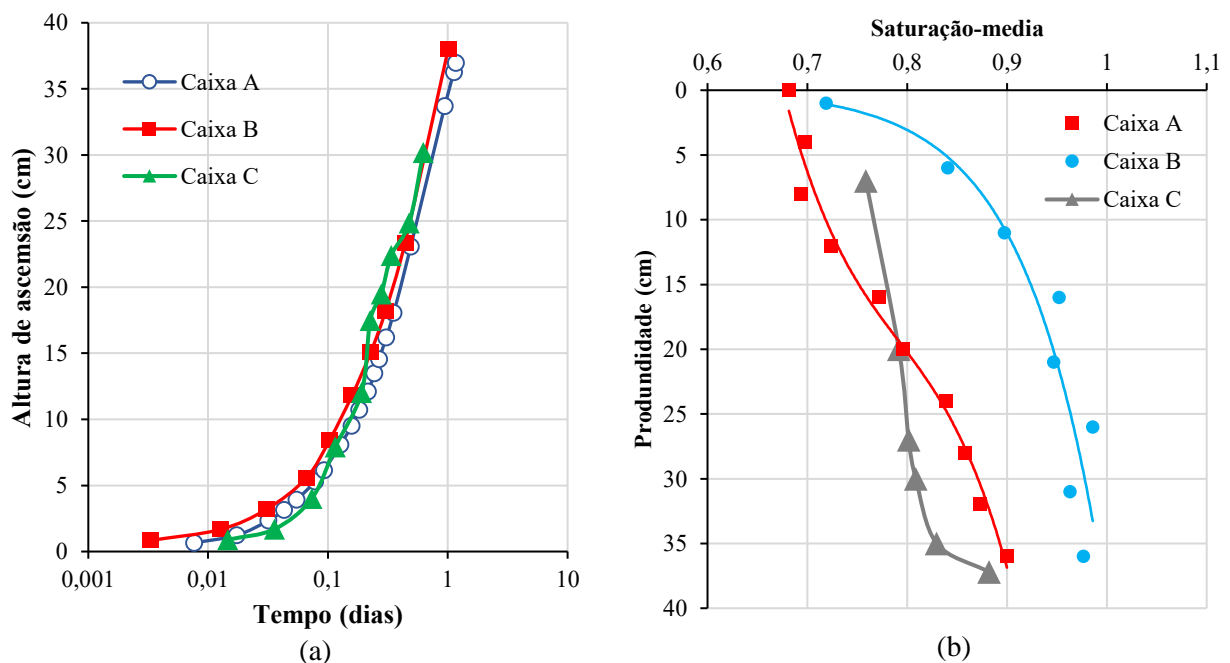


Figura 5. (a) Influência do tempo na altura de ascensão capilar nas caixas A-B-C. (b) Saturação vs altura de ascensão capilar nas caixas A-B-C

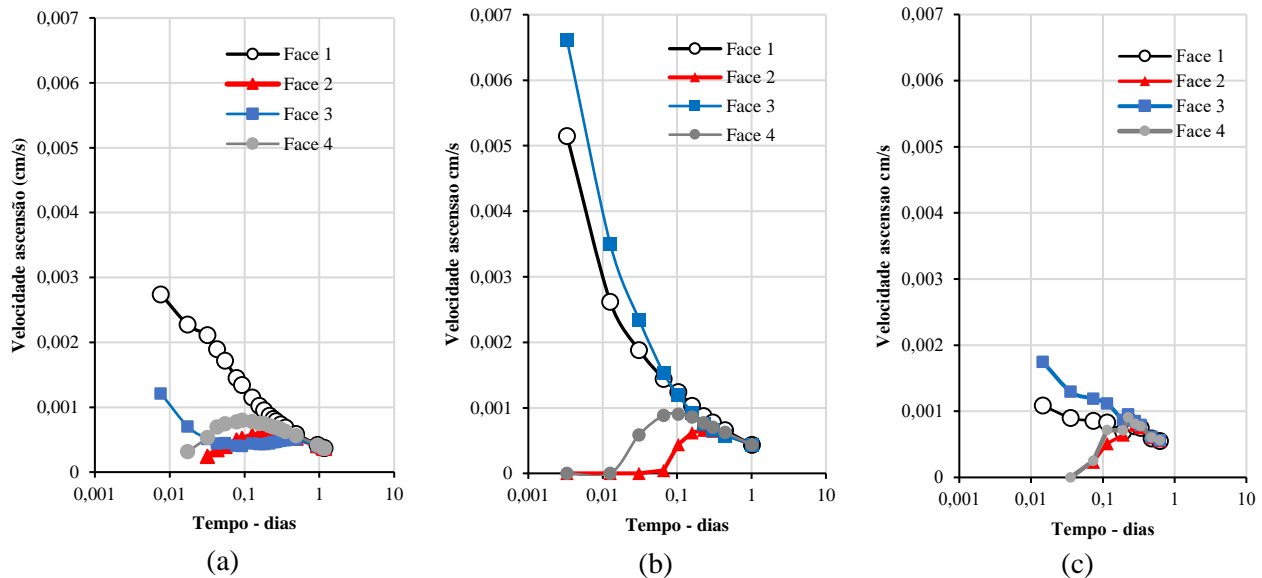


Figura 6. Velocidade de ascensão capilar pelo tempo. (a) Caixa A (b) Caixa B (c) Caixa C

Após a finalização de cada ensaio em cada caixa, foram retiradas os papéis filtros previamente instalados para medir a sucção matricial. Assim, na Figura 7a são apresentados os valores de sucção que alcançou cada coluna de solo. Os maiores valores de sucção foram registrados após os 15 cm de altura. Como mostrado na Figura 5a, a Caixa A, compactada com menor densidade seca obteve menores graus de saturação enquanto a Caixa C foi compactada com uma densidade similar, mas com 5% de conteúdo de água nos vazios o que viabilizou maior saturação após os 15 cm de profundidade. Com isto, demonstrasse, que a sucção final obtida esteve correlacionada com os valores de grau de saturação e compactação como relatado por Li et al. (2009) e Baldovino et al. (2019b). As maiores sucções registradas foram desde 680 kPa na Caixa B até 820 kPa na Caixa A.

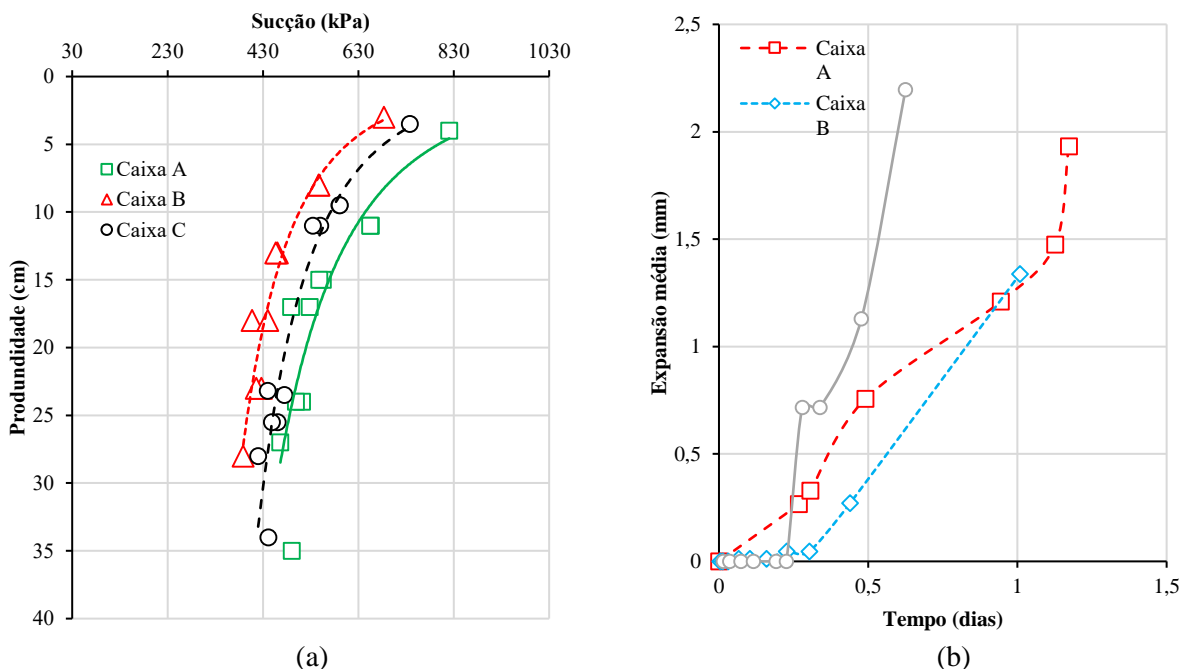


Figura 7. (a) Sucção matricial pela profundidade medida nas caixas A-B-C. (b) Expansão média medida devido à entrada de água nas caixas A-B-C



Na Figura 7b é apresentado o registro da expansão do solo devido a entrada de água no sistema. Após 6h de ensaio, em todas as Caixas, a expansão começou se manifestar em menos de 1 mm. A Caixa C foi a que mais apresentou maior expansão (2,20 mm) em um tempo curto de 0,6 dias quando acabou a ascensão capilar. Por outra parte, a caixa A e B apresentaram expansão média de 1,9 mm e 1,3 mm, respectivamente.

4 Conclusões

O modelo reduzido proposto foi eficaz para registrar a influência da altura de ascensão capilar nos valores de sucção matricial do solo além de registrar o tempo de ascensão capilar para qualquer grau de compactação estabelecido. O método de avanço frontal de umedecimento é um método econômico e eficiente para medir a condutividade hidráulica não saturada para solos finos. Assim, o solo pode registrar valores altos e baixos de condutividade hidráulica e sucção matricial dependendo da porosidade inicial.

Foi encontrada uma zona quase saturada no perfil do solo. Aproximadamente em 1/3 da altura total é saturada como relatado em estudos prévios. A sucção matricial registrou maiores valores quando o solo foi compactado com maior densidade seca. Os valores variaram dependendo da profundidade alcançando valores de 600-800 kPa para graus de saturação de 90-100%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro dado pela CAPES, CNPq e Fundação Araucária do Paraná.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). Rochas e solos. NBR 6502. Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). Solo — Determinação do limite de plasticidade. NBR 7180: Rio de Janeiro, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). Solo-Determinação do limite de liquidez. NBR 6459. Rio de Janeiro, Brasil.
- American Society for Testing and Materials (2011). ASTM D 2487 - 11 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM International, West Conshohocken, Pa*, D5521-5, 1–5.
- American Society for Testing and Materials (2014). ASTM D 854 - 14 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer 1. *ASTM International, West Conshohocken, Pa*.
- American Society for Testing and Materials (2016). ASTM D5298-16 Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. *ASTM International, West Conshohocken, Pa*.
- American Society for Testing and Materials (2011) D2435/D2435M-1. One-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. *ASTM Int West Conshohocken, Pa*.
- American Society for Testing and Materials (2011) ASTM D3080-11 standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. *ASTM Int West, Conshohocken, Pa*
- Baldovino, J.A., Batista, E., Cardoso, A., Mazzarollo, J. e Izzo, R. (2017). Análise da ascensão capilar de um solo arenoso. Anais do Simpósio da Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro-Oeste, Brasil, p. 556-562.
- Baldovino, J.A., Batista, E., Izzo, R. e Rose, J. (2018a). Influência da porosidade e do coeficiente de permeabilidade saturado na ascensão capilar de um solo arenoso. Anais do 16CNG - 16º Congresso Nacional de Geotecnia | 6as Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia. Ponta Delgada, Portugal.
- Baldovino, J.A., Moreira, E., Rissardi, J., e Izzo, R. (2018b). Análise da ascensão capilar de uma areia em diferentes porosidades. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Salvador, Brasil.
- Baldovino, J.A., Batista, E., e Izzo, R. (2019a). Fundamentos de Ascensão Capilar em Solos não Saturados: Teoria e Ensaios de Laboratório. Anais do Simpósio da Prática de Engenharia Geotécnica na Região

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



Centro-Oeste, Brasil.

- Baldovino, J. D. J. A., Moreira, E. B., dos Santos Izzo, R. L., da Silva, É. R., de Almeida, J. L., Pereira, M. D., Alcalde, M., Millan-Paramo, C. (2019b). Fundamentos de Ascensão Capilar em Solos não Saturados/Fundamentals of Capillary Ascension in Unsaturated Soils. *Brazilian Journal of Development*, 5(12), 30894-30911.
- Baldovino, J. D. J. A., dos Santos Izzo, R. L., Feltrim, F., & da Silva, É. R. (2020a) Experimental Study on Guabirota's Soil Stabilization Using Extreme Molding Conditions. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-17.
- Baldovino, J. D. J. A., Izzo, R. L. D. S., Pereira, M. D., Rocha, E. V. D. G., Rose, J. L., & Bordignon, V. R. (2020b). Equations controlling tensile and compressive strength ratio of sedimentary soil–cement mixtures under optimal compaction conditions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(1), 04019320.
- Baldovino, J. D. J. A., Izzo, R. L. D. S., Da Silva, E.R., & Rose, J. L., (2020c). Sustainable use of recycled-glass powder in soil stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), 04020080.
- Das, B., e Sobhan, K. (2018). Principles of Geotechnical Engineering 9th Ed. *Cengage Learning*, Boston.
- Izzo, R., Baldovino, J., Moreira, E., Teixeira, W., Silva, E., Andrade, V.C., São Marcos, H. N., Nakashima, C., e Rose, J. (2018) Analysis of Capillary Rise in a Sedimentary Soil. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, Brasil.
- Lane, K. S., and Washburn, S. E. (1946). Capillary tests by capillarimeter and by soil filled tubes. *Proc. Highway Research Board*, 26, 460–473.
- Li, X., Zhang, L. M., & Fredlund, D. G. (2009). Wetting front advancing column test for measuring unsaturated hydraulic conductivity. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(12), 1431-1445.
- Lu, N., & Likos, W. J. (2004). Rate of capillary rise in soil. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 130(6), 646-650.
- Terzaghi, K., (1943). Theoretical soil mechanics. John Wiley and Sons, New York.