



COMPORTAMENTO CAPILAR EM SILTES SEDIMENTARES USANDO MODELO REDUZIDO E ALTAS CARGAS DE SUCCÃO

CAPILLARY RISE IN SEDIMENTARY SILTS USING SCALE MODEL AND HIGH SUCTION HEADS

Jair de Jesus Arrieta Baldovino¹; Ronaldo Izzo¹

Artigo recebido em: 07/12/2020 e aceito para publicação em: 03/02/2021.

DOI: <http://doi.org/10.14295/holos.v21i2.12437>

Resumo: Estudos de ascensão capilar em solos de granulometria fina são necessários para melhor compreensão de suas propriedades hidráulicas e não saturadas. Dois siltes sedimentares amarelo (A) e cinza (B) foram submetidos a ascensão capilar com cargas de sucção de 2 m usando tubos. Adicionalmente, o solo amarelo também foi submetido a ascensão capilar em modelo reduzido usando uma caixa de acrílico. Para os ensaios em tubos, os resultados evidenciaram que a água capilar foi capaz de saturar a coluna de ambos os solos até os 70 cm de altura, onde foi encontrado o ponto de entrada do ar. A água tardou 41 dias em alcançar os 200 cm de altura no solo A e 65 dias no solo B, enquanto, aproximadamente 1,6 kg de água entraram em ambos solos devido à carga de sucção. O coeficiente de permeabilidade medido (kc) durante o ensaio capilar passou de 0,0001 cm/s (solo A) e de 0,00008 cm/s (solo B) na altura de entrada de ar até 0,00002 cm/s aos 2 m de altura. A sucção matricial registrou valores maiores a 500 kPa na fase não saturada dos solos. Enquanto ao modelo reduzido para o solo amarelo, compactado em 3 densidades diferentes, 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. À medida que o tempo transcorreu, o kc diminuiu em todas as densidades desde 0,0005 cm/s até 0,0003 cm/s. A sucção matricial no solo registrou valores de 600-800 kPa para graus de saturação entre 90%-100%. Foi verificado, para os ensaios em tubo e na caixa, que a curva de altura de ascensão pelo 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. Siltes sedimentares. Papel filtro.

Abstract: Capillary rise studies in fine soils are necessary to better understand its hydraulic properties. Two sedimentary silts yellow (A) and gray (B) were subjected to capillary rise with suction head of 2 m. Additionally, the yellow soil was also subjected to capillary rise in a reduced model using an acrylic box. For testing tubes, the results showed that the capillary water was able to saturate the column of both soils up to 70 cm in height, where the air entry point was found. The water took 41 days to reach 200 cm in soil A and 65 days in soil B, while approximately 1.6 kg of water entered both soils due to the suction head. The measured permeability coefficient (kc) varies from 0.0001 cm/s (soil A) and 0.00008 cm/s (soil B) at the height of the air entry to 0.00002 cm/s at 2 m height. The matric suction registered values greater than 500 kPa in the unsaturated phase of the soils. As for the reduced model for yellow soil, compacted in 3 different densities, the results showed that the velocity of water rising through the

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, PR E-mails: yaderbal@hotmail.com, izzo@utfpr.edu.br

capillaries of soil increased when the soil was compacted with a higher dry unit weight. Over time, the coefficient of permeability decreased in all cases from 0.0005 cm/s to 0.0003 cm/s. 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. Sedimentary silt. 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 (LI; ZHANG; FREDLUND, 2009; NING; WILLIAN.J, 2004).

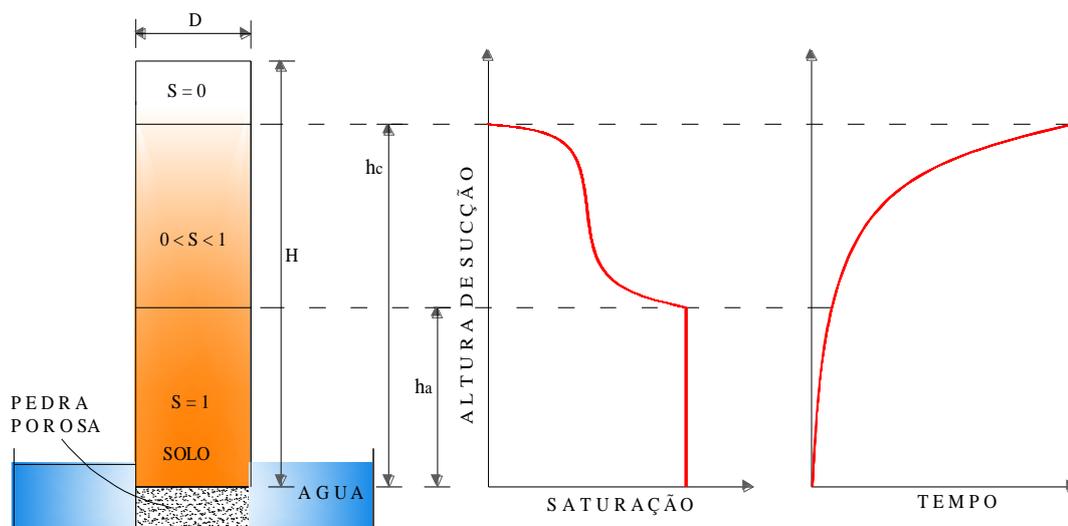
Diversos estudos de ascensão capilar têm sido realizados usando tubos abertos. Baldovino *et al.* (2017) estudaram a ascensão capilar de uma areia uniforme. Os autores identificaram que a areia apresenta duas zonas após a finalização do ensaio: zona saturada e zona não saturada. Além disso, para a areia estudada, o ponto de entrada de ar foi encontrado a 1/3 da altura máxima. Baldovino *et al.* (2018a, 2018b) moldaram uma 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. 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.

Estudos de comportamento capilar em solos de granulometria fina são necessários devido ao alto grau de sucção que estes solos possuem (NING; WILLIAN.J, 2004) . Na literatura se relatam o comportamento capilar de solos mais

arenosos já que estes têm alturas de ascensão menores que os solos finos, e, que podem tardar até anos em alcançar sua máxima altura de ascensão capilar (e.g. Baldovino *et al.*, 2017, 2018a, 2018b). Assim, é importante conduzir diversos ensaios experimentais em solos finos como os siltes sedimentares para identificar as principais variáveis que influenciam no comportamento capilar, principalmente aquelas que dependem da retenção da água dentro do solo como a sucção matricial.

Observa-se na Figura 1, o modelo conceitual para a ascensão capilar em solos, definindo o fenômeno como uma relação direta entre a sucção e o grau de saturação, isto é, a ascensão capilar está diretamente relacionada à curva característica de sucção do solo (BALDOVINO; BATISTA; IZZO, 2019; BALDOVINO *et al.*, 2019). Quando se coloca uma coluna de solo seco ou semisseco em contato com água (Figura 1), a água começa a ascender rapidamente. Contudo, a velocidade de ascensão da água diminui pela entrada de ar e aumento da sucção matricial. Ao final de um ensaio de ascensão capilar, observam-se 3 fases no interior do solo: uma fase na qual a saturação é 100%, com uma altura correspondente de saturação (S) chamada h_a (também chamada altura de entrada de ar), uma segunda fase que começa no ponto em que há entrada de ar (h_a), onde o solo se encontra em uma saturação entre 0 e 100% (é chamada $h_c - h_a$, onde a altura h_c corresponde a altura máxima de ascensão capilar), e por último, no final da coluna de solo, a água capilar não penetra, ficando na saturação inicial do solo quando iniciado o ensaio.

Figura 1 - Comportamento capilar de uma coluna de solo em contato com a água



Fonte: (BALDOVINO; BATISTA; IZZO, 2019; BALDOVINO *et al.*, 2019)

Mesmo hajam estudos em tubos abertos, não se tem estudos em modelos reduzidos com grandes volumes de solo. Estudos experimentais em solos finos são necessários para um maior entendimento do fenômeno. Por isso, em este artigo é abordado o comportamento capilar de um solo fino quando compactado em três diferentes porosidades. Além disso, o comportamento capilar também é estudado em dois solos finos usando altas cargas de sucção.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

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

2.1 Materiais

Dois solos sedimentares, A e B, originários da Formação Guabirotuba em Curitiba (Brasil) foram usados na presente pesquisa. Na Figura 2 são exibidas a coloratura de ambos os solos, um de cor amarelo e outro de cor cinza.

Figura 2 - Cor dos solos A e B



Os solos foram coletados de forma manual em um talude rodoviário a 2 m de profundidade, na zona sudeste da cidade de Curitiba, no Município de São José dos Pinhais. Após a coleta, os solos foram submetidos a ensaios de limite de liquidez (ABNT, 2016a), limite de plasticidade (ABNT, 2016b), densidade real dos grãos (ASTM, 2014) e granulometria por peneiramento (ASTM, 2017) e a laser. Os resultados destes ensaios de caracterização dos dois solos são apresentados na Tabela 1. O solo A apresenta menor densidade real dos grãos (2,62) que o solo B

(2,83). O solo A foi caracterizado previamente nos estudos prévios (BALDOVINO *et al.*, 2020a, 2020b, 2020c).

Tabela 1 - Propriedades físicas dos solos sedimentares A e B

Propriedades	Solo A	Solo B
Limite de liquides, %	50,82	44,74
Limite de plasticidade, %	35,96	26,43
Índice de plasticidade, %	14,86	18,31
Densidade real dos grãos, Gs	2,62	2,83
*Areia grossa (0,6 mm < diâmetro < 2 mm), %	5	0
*Areia média (0,2 mm < diâmetro < 0,6 mm), %	12	15
*Areia fina (0,06 mm < diâmetro < 0,2 mm), %	18	25
*Silte (0,002 mm < diâmetro < 0,06 mm), %	60	60
*Argila (diâmetro < 0,002 mm), %	5	0
Diâmetro efetivo (D_{10}), mm	0,003	0,01
Diâmetro médio (D_{50}), mm	0,038	0,04
Coefficiente de uniformidade (C_u)	12,67	5,5
Coefficiente de curvatura (C_c)	0,88	1,05
Classificação (SUCS)	MH	ML
Cor	Amarelo	Cinza

*De acordo à NBR 6502 (ABNT, 1995)

Na Figura 3 pode ser visto a morfologia das partículas dos siltes A e B. Nota-se a presença de caulinita e de partícula planares, muito característico dos solos finos da Formação Guabirotuba (PEREIRA, 2004). A composição química quantitativa total das amostras de solo foi pesquisada por fluorescência de raios-X (FRX). Na Tabela 2 são mostrados os resultados da composição química das amostras de solo usando FRX. Foram encontrados principalmente SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

Figura 3 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos solos A e B

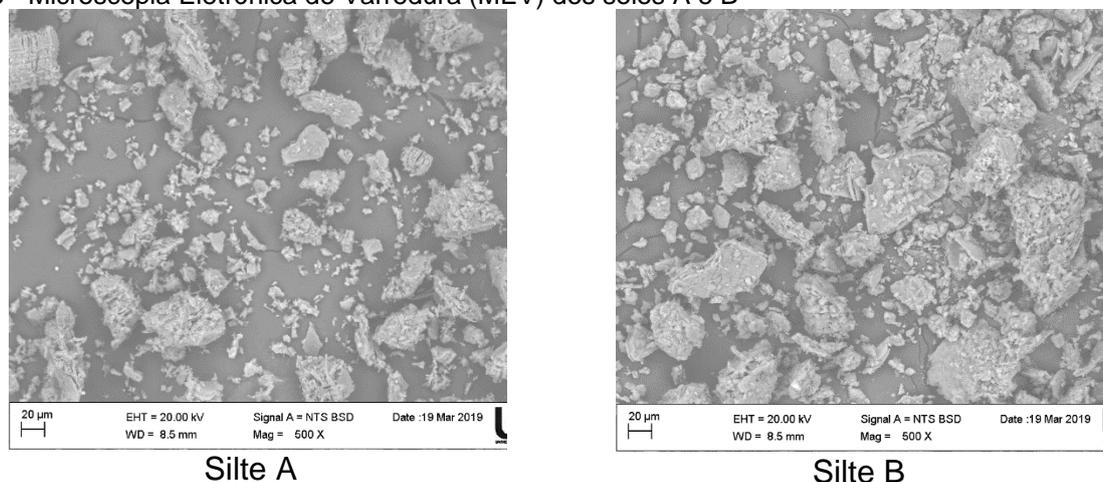


Tabela 2 - Composição química dos Solos A e Solo B

Composto	Concentração por peso (%)	
	Solo A	Solo B
SiO ₂	48,78	49,82
Al ₂ O ₃	44,51	43,40
Fe ₂ O ₃	0,61	0,12
K ₂ O	0,84	0,29
TiO ₂	0,92	0,52
SO ₃	4,12	4,82
*LOI	0,22	1,03

*Perda ao fogo

2.2 Ensaio de ascensão capilar em caixa

Foi compactado o solo amarelo 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 fina (com $G_s = 2,688$) para permitir a entrada de água ao sistema. Foram instaladas 2 entradas de água na caixa na parte inferior e foram colocados 2 papéis filtro Wathmann a cada 4 cm de altura para medir a sucção matricial (ASTM D5298-16, 2016) 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.

2.3 Ensaio de ascensão capilar em tubos

Os solos foram secados totalmente em estufa a 100°C e destorroados a mão. Os solos foram compactados em camadas de 4 cm dentro de um tubo de secção circular em acrílico transparente de 5 cm de diâmetro, 4 mm de espessura e 2 m de altura. Foi usado um soquete de aço de secção circular de 4,97 cm de diâmetro como

compactador. A quantidade de solo inserida dentro dos 4 cm de altura mediante o uso de 10 golpes com o soquete desde uma altura de 30 cm foi registrada para calcular a densidade seca máxima conseguida com essa energia de compactação ($\sim 152 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$) e assim não danificar o tubo de acrílico. Deste modo, para o Solo A foi usada uma densidade seca padrão de $1,038 \text{ g}/\text{cm}^3$ e para o Solo B uma densidade seca aparente padrão de $1,264 \text{ g}/\text{cm}^3$.

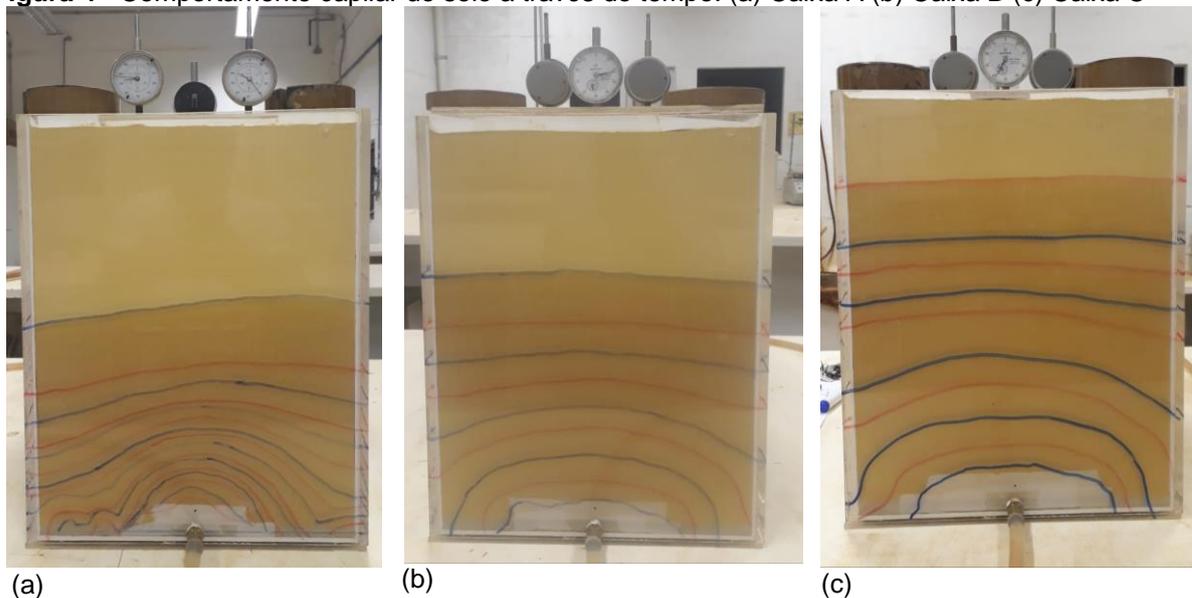
Após compactar cada solo dentro dos 2 m de altura no tubo, este foi colocado verticalmente sobre um papel filtro e uma pedra porosa previamente saturada e imersa em água com nível constante. Foi registrada a altura de ascensão da água a través do solo pelo tempo. Foi registrado também o peso do sistema tubo+solo antes e após o ensaio de capilaridade. Após o ensaio, foram retiradas amostras de solo a cada 4 cm para medir o teor de umidade pela altura. Por outra parte, foram realizados ensaios de sucção matricial usando a técnica do papel filtro segundo a ASTM D5298-16, para isto foi empregado o papel filtro watchman 42.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaio em modelo reduzido

Na Figura 4 são apresentadas imagens das caixas A-C durante o ensaio de ascensão capilar usando o solo amarelo. Foi marcada a altura de ascensão em cada uma das 4 faces das caixas junto com o tempo.

Figura 4 - Comportamento capilar do solo a través do tempo. (a) Caixa A (b) Caixa B (c) Caixa C



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 5, 6 e 7. Nos dois casos onde o solo foi compactado seco, 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; ZHANG; FREDLUND, 2009).

Além disso, as condições de contorno na frente da zona de umedecimento podem ser consideradas inalteradas para pequenos intervalos de tempo.

Figura 5 - Linhas de ascensão capilar da água ao longo do tempo para a caixa A e as faces 1-4

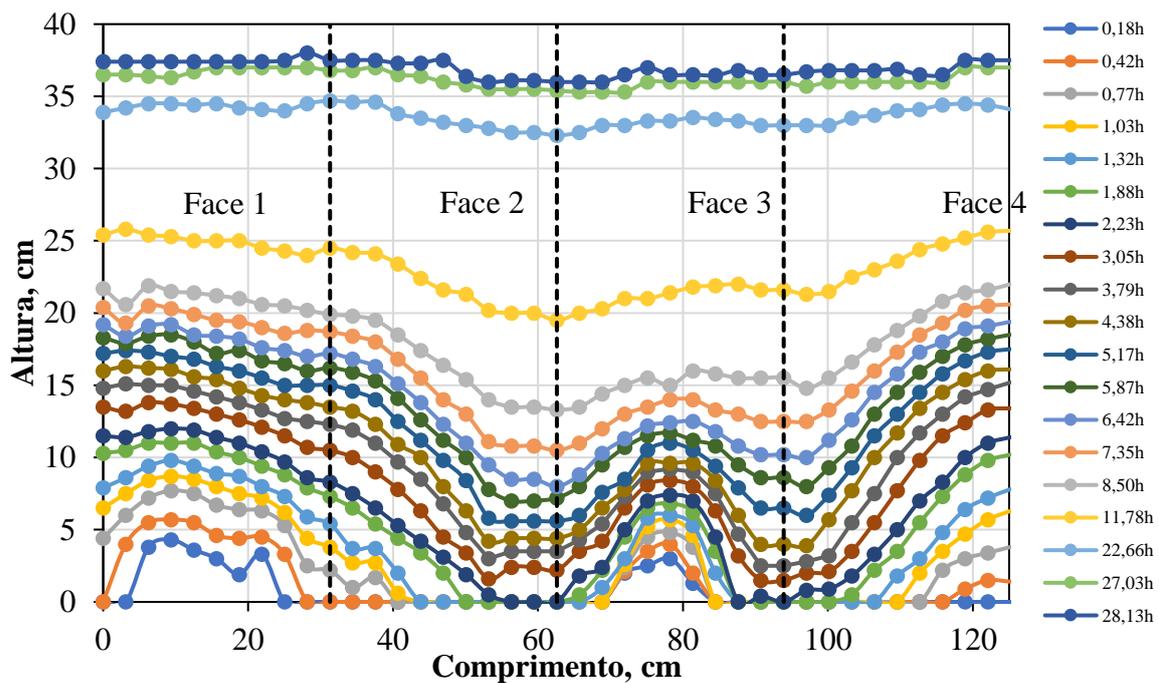


Figura 6 -Linhas de ascensão capilar da água ao longo do tempo para a caixa B e faces 1-4

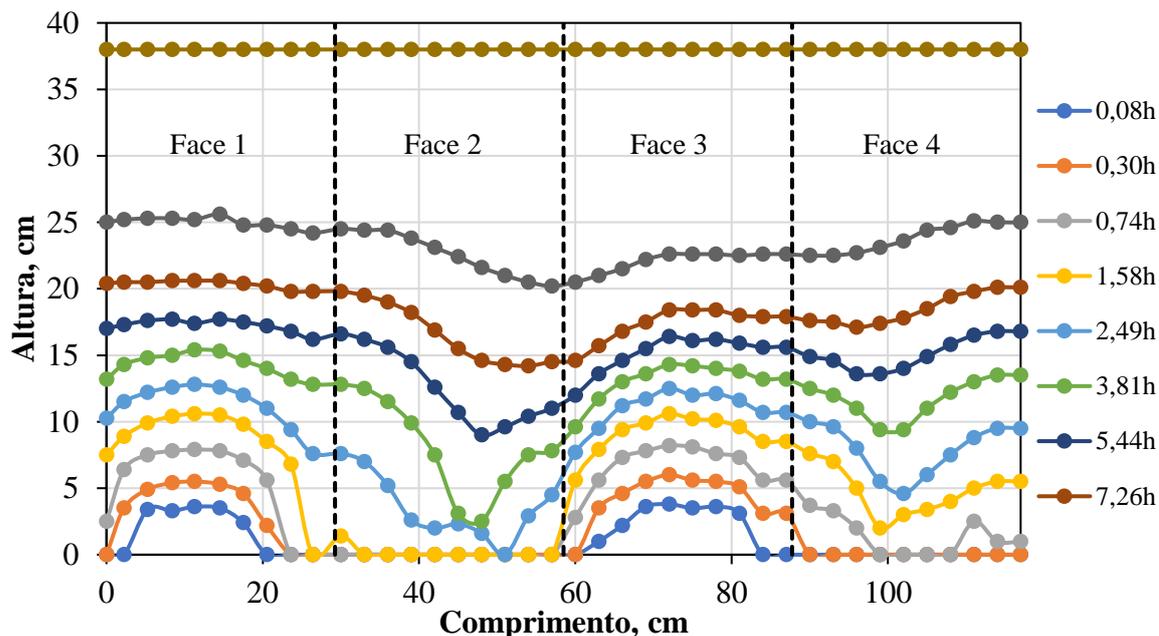
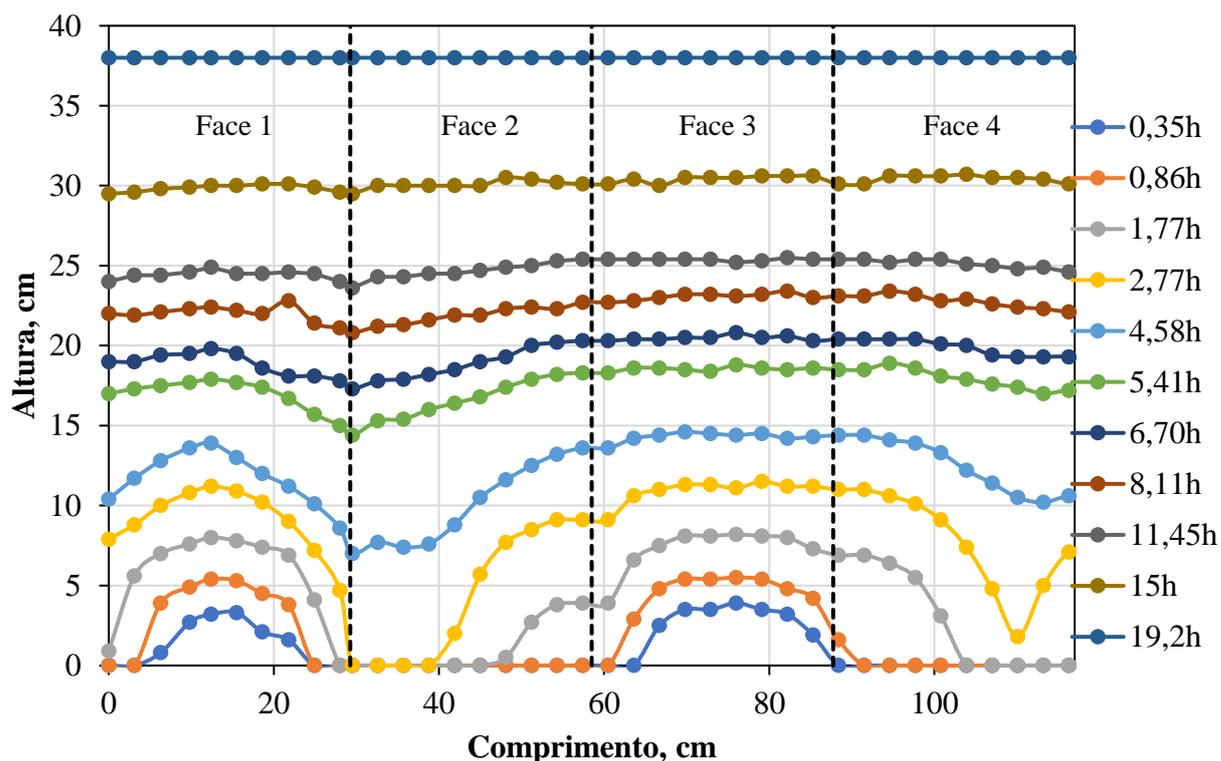


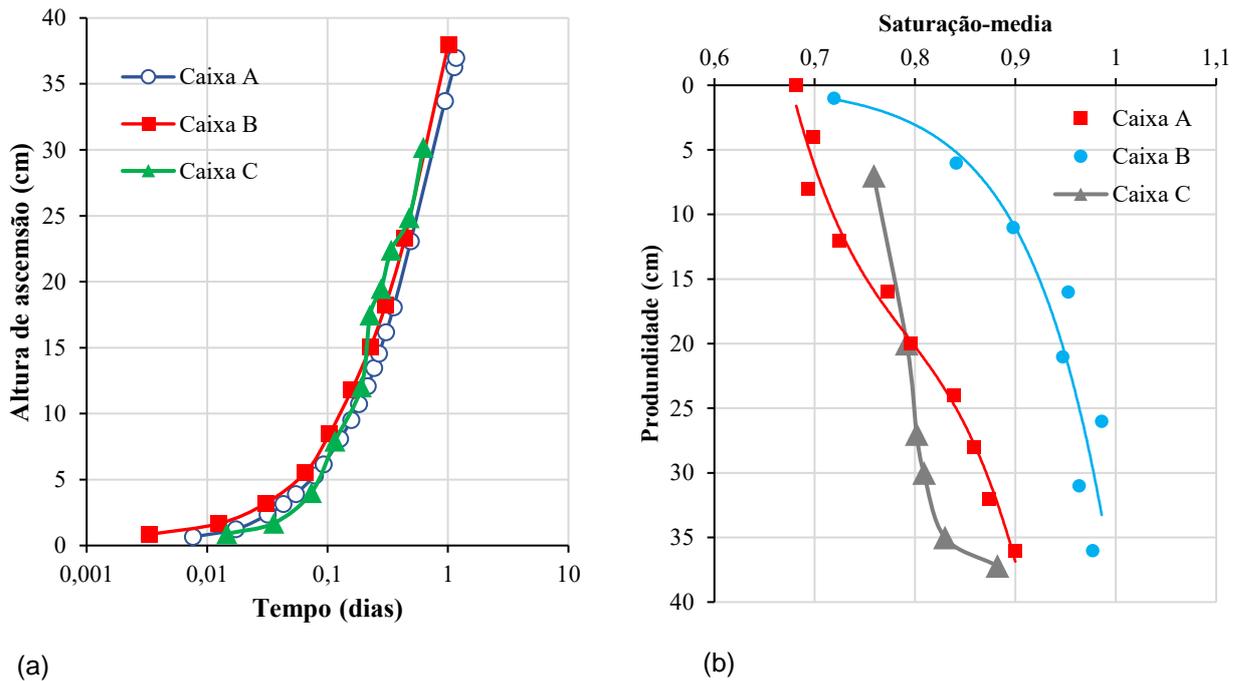
Figura 7 - Linhas de ascensão capilar da água ao longo do tempo para a caixa C e faces 1-4



São apresentados na Figura 8 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 8b onde é obvio que o

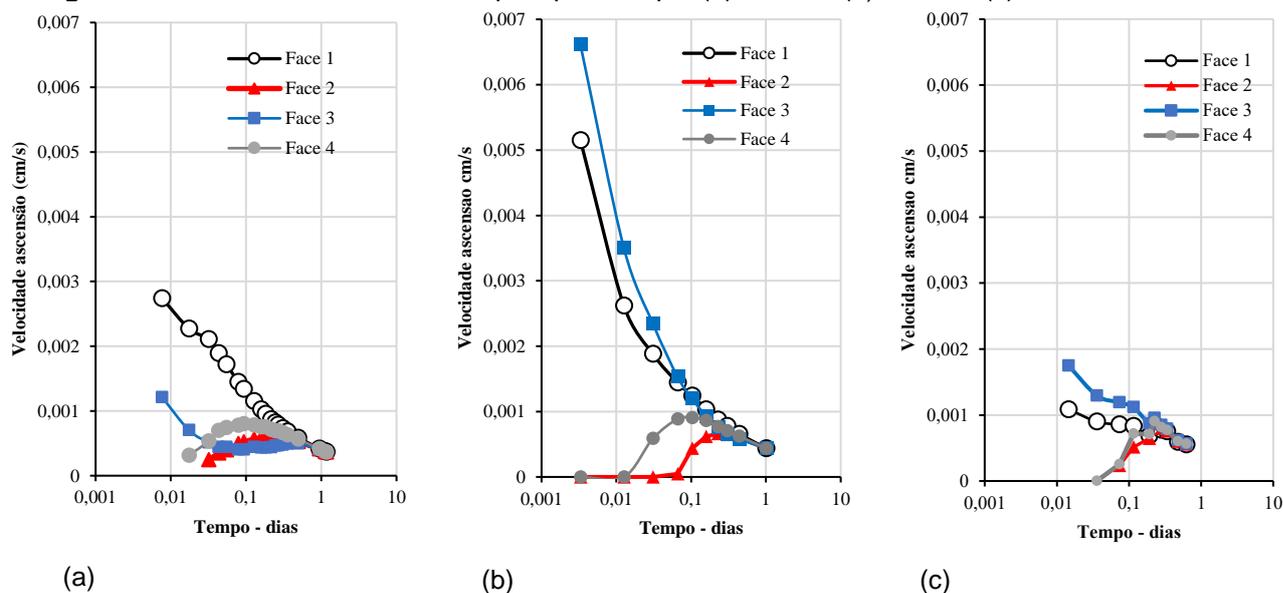
solo compactado na Caixa B foi capaz de reter maior quantidade de água. No caso da saturação do solo, é observado na Figura 8b que existe uma zona com maior saturação após os 25 cm de altura. Essa zona é aproximadamente 1/3 da altura total como encontrado em solos arenosos estudados por Baldovino *et al.* (2017, 2018a, 2018b) e em solos siltsos estudados por Izzo *et al.* (2018)

Figura 8 - (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



São exibidos na Figura 9 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 cm/s, 0,0004 cm/s e 0,0005 cm/s para as caixas A, B, e C, respectivamente.

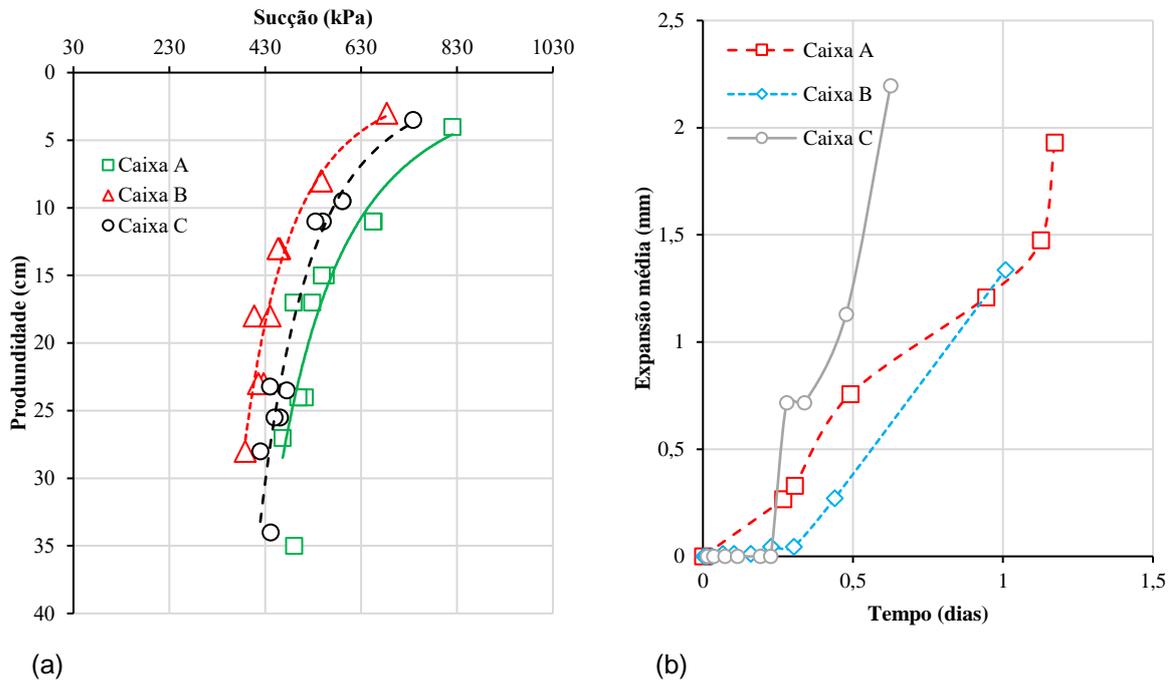
Figura 9 - Velocidade de ascensão capilar pelo tempo. (a) Caixa A (b) Caixa B (c) Caixa C



Após a finalização de cada ensaio em cada caixa, foram retiradas os papeis filtros previamente instalados para medir a sucção matricial. Assim, na Figura 10a 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, Zhang e Fredlund (2009) e Baldovino *et al.* (2019). As maiores sucções registradas foram desde 680 kPa na Caixa B até 820 kPa na Caixa A.

Na Figura 10b 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.

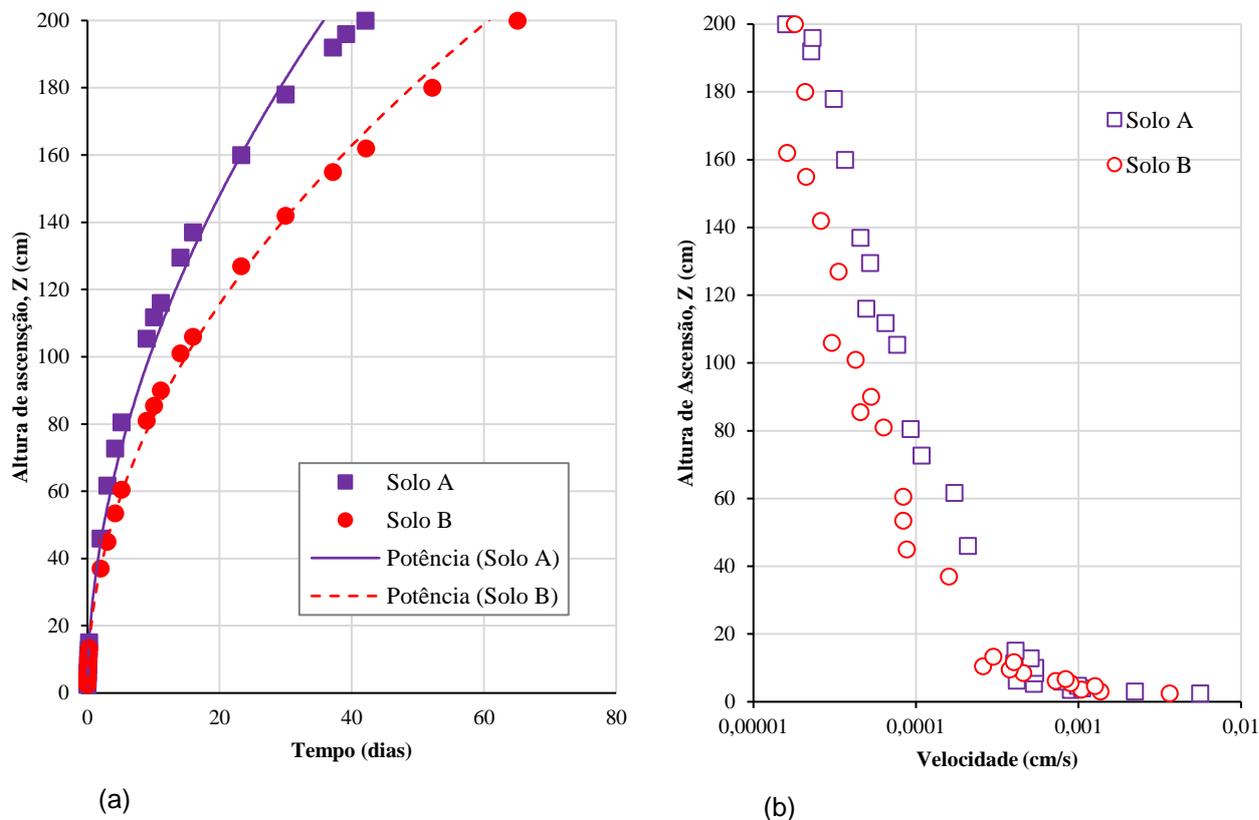
Figura 10 - (a) Sucção matricial pela profundidade medida nas caixas A-B-C. (b) Expansão média medida devido à entrada de água nas caixas A-B-C



3.2 Ensaio usando alta carga de sucção

A altura de ascensão capilar Z pelo tempo e pela velocidade é apresentada na Figura 11. Nota-se um aumento da ascensão capilar em ambos solos após o primeiro contato da água com a coluna. A velocidade da ascensão nos primeiros 20 cm em ambos solos é menor que $0,0001 \text{ cm/s}$ e se dá nas primeiras 12 h do ensaio. Após 10 dias de ensaio, o solo A alcança uma altura de 1 m enquanto o solo B alcança os 80 cm, o que significa que o solo A tem um coeficiente de permeabilidade maior que o solo B devido à baixa sucção matricial como pode ser visto na Figura 11b. No final do ensaio de ascensão, a permeabilidade dos solos chega na ordem dos $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$. A condutividade hidráulica (saturada e não saturada) dos solos depende de vários fatores: da viscosidade da água, da distribuição do tamanho dos poros, da distribuição do tamanho dos grãos, do índice de vazios, da rugosidade das partículas minerais e do grau de saturação do solo. A condutividade hidráulica de solos não saturados é menor em relação aos solos saturados e aumenta rapidamente com o grau de saturação. Para solos siltosos o valor da condutividade hidráulica (k) varia de $0,001$ – $0,00001 \text{ cm/s}$ em condições saturadas (DAS, 2019). Assim, os valores experimentais de k mostrados na Figura 11b correspondem a essa faixa.

Figura 11 - (a) Altura da água capilar a través do tempo. (b) Velocidade da água capilar a través da altura da coluna dos solos



Como é mostrado na Figura 11a, a tendência dos pontos experimentais é de aumentar potencialmente ao longo do tempo. A Equação 1 e Equação 2 controlam a altura capilar Z pelo tempo t (em dias) para o solo A e o solo B respectivamente:

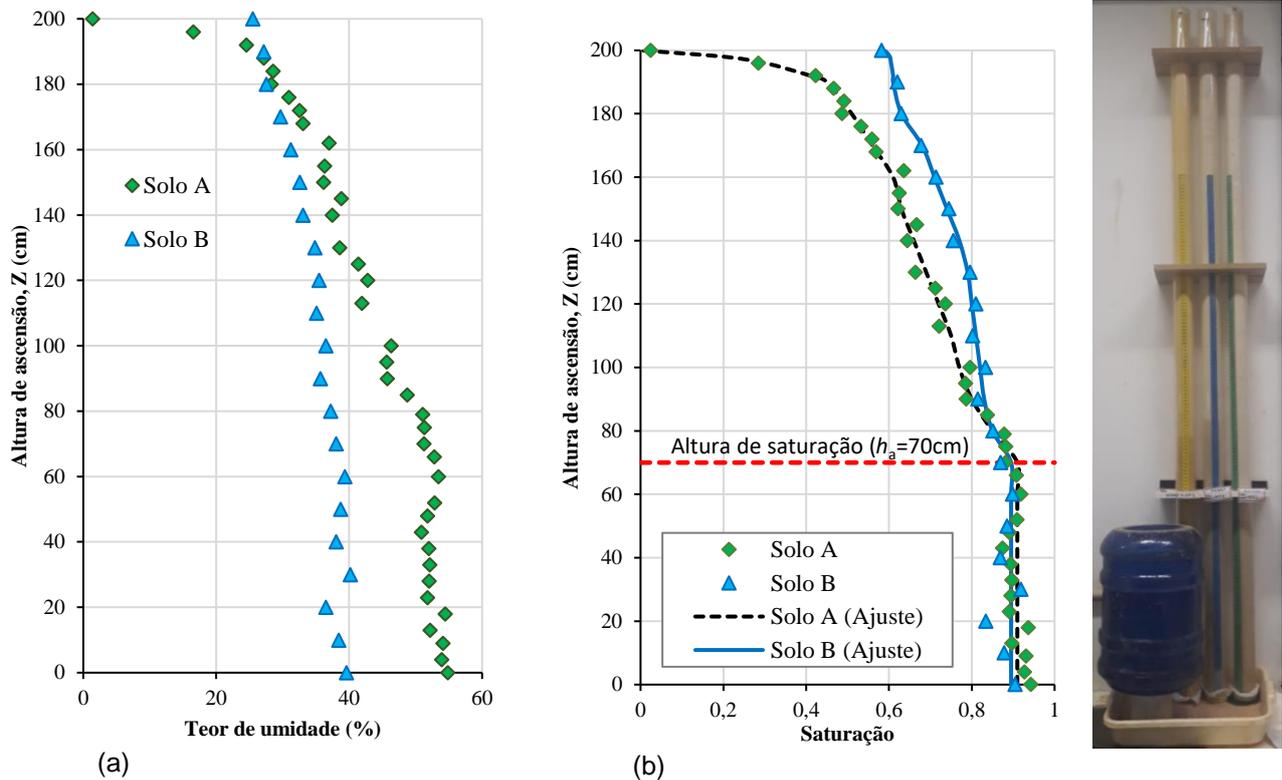
$$Z = 31,244t^{0,5192} \quad (R^2 = 0,99) \quad (1)$$

$$Z = 26,386t^{0,4933} \quad (R^2 = 0,99) \quad (2)$$

É mostrado na Figura 12a e Figura 12b a variação da altura de ascensão capilar com o teor de umidade e saturação, respectivamente. Nas Figuras 11a-b se pode ver que a água satura ambos siltes até 70 cm ($h_a=70$ cm). Esse valor se converte na altura h_a . O parâmetro $\alpha=1/h_a$ de Ning e Willian (2004) pode ser calculado como $\alpha=1/70=0,014$ cm⁻¹. O parâmetro é definido como a taxa de redução da condutividade hidráulica com a diminuição da frente de sucção, e é proporcional à distribuição de tamanho de poros. Tanto silte A e o silte B não conseguiram a saturação de 100%,

mas chegaram a graus de saturação maiores a 90%. Graus de saturação similares foram alcançados para outro tipo de solos (BALDOVINO *et al.*, 2017; LI; ZHANG; FREDLUND, 2009).

Figura 12 - (a) Teor de umidade final na coluna do solo A e B. (b) Grau de saturação final na coluna do solo A e B



Quando finalizado o ensaio de ascensão capilar, o solo A chegou com frente de saturação igual a 5% enquanto o solo B chegou com frente de saturação igual a 60%. Devido a que o solo B tem um coeficiente k_c menor que o solo A, este conseguiu manter alta saturação à medida que a água capilar ascendeu a través dos poros. O sistema solo+tubo acrílico antes e após o ensaio de capilaridade foi pesado. No solo A entraram 1630 g de água e no solo B 1610 g. O solo A foi compactado com uma densidade menor e o solo B com uma maior, supõe-se que devido à menor porosidade no solo A este teria alcançado maior peso de água nos vazios, mas nota-se na Figura 4b que após a altura h_a , o solo B acumulou maior grau de saturação em referência ao solo A, e, este fato teria proporcionado ao solo B compensar a falta de porosidade, mas pelo evento de ter menores vazios propiciou maior retenção da água capilar. Assim, a quantidade de água retida por ambos siltes foi quase igual.

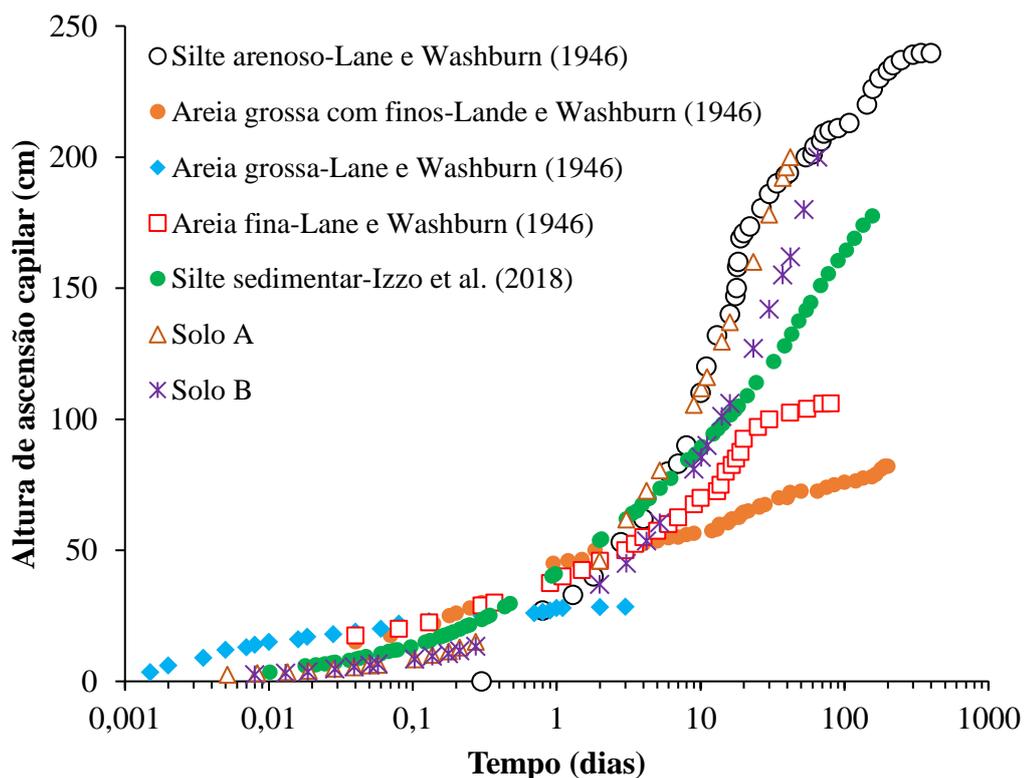
Também foi medida a sucção matricial após a finalização do ensaio usando a

técnica do papel filtro. Foram retiradas amostras de solos a 10 cm e a 190 cm em cada tubo. O Solo A registrou sucção de 553 kPa em 190 cm e 15 kPa na altura de 10 cm. O solo B registrou sucção de 582 kPa e 22 kPa em 190 cm e 10 cm, respectivamente. Assim, demonstra-se que o solo não foi saturado totalmente até os 70 cm e que após essa altura tanto a permeabilidade e saturação diminuiram.

3.3 Comparação dos Resultados com a Literatura

Na Figura 13 são comparados o comportamento capilar de vários solos reportados na literatura.

Figura 13 - Ascensão capilar de vários tipos de solos reportados na literatura comparados com o solo A e B



Na Figura 13 são apresentadas as curvas de ascensão capilar dos solos estudados nos anos 40 por Lane e Washburn (1946) e um silte da Formação Guabirota, de cor amarelada, estudado por Izzo *et al.* (2018). Para solos de granulometria mais fina, a máxima altura foi medida após 100 dias de ensaio, mas no caso dos solos A e B, a máxima altura foi limitada pelos tubos em acrílico em 2 m. A maior porcentagem de água retida nos solos da Figura 13 é exibida após o primeiro

dia e menos que 100 dias. Se dá um ponto de inflexão na curva $Z \times$ tempo nos primeiros 2 dias enquanto a velocidade da água é maior também durante esse mesmo período.

4 CONCLUSÕES

O modelo reduzido em caixa de acrílico proposto foi eficaz para registrar a influência da altura de ascensão capilar nos valores de sucção matricial do solo amarelo 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 esse tipo de solos finos. Assim, o solo pode registrar valores altos e baixos de condutividade hidráulica e sucção matricial dependendo da porosidade inicial. Além disso, foi encontrada uma zona quase saturada no perfil do solo. Aproximadamente 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 a 800 kPa para graus de saturação de 90 a 100%.

A ascensão capilar em solos sedimentares com alta carga de sucção pode ser estudada a través de ensaios em tubos abertos com pequeno diâmetro e alturas de 2 m. Os dois solos sedimentares estudados neste artigo apresentaram semelhanças na quantidade de água capilar retida (1,6 kg) durante o ensaio enquanto a duração de ascensão foi maior no solo *B* com 65 dias no total devido à baixa permeabilidade que este apresentava. O solo *A* chegou com frente de saturação igual a 5% após 2 m de ascensão enquanto o solo *B* chegou com frente de saturação igual a 60%. Os ensaios de teor de umidade e sucção matricial ao longo da coluna de ambos solos demonstraram que existe uma altura onde o solo é saturado até 90% e outra altura onde o grau de saturação vai diminuindo conforme a altura de sucção também diminui. Finalmente, a comparação da curva de ascensão dos solos *A* e *B* com outros solos da literatura demonstram que o comportamento capilar depende de vários fatores, incluindo principalmente o tipo de solo, granulometria e porosidade.

5 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), com os apoios financeiros do CNPq, da CAPES-Código de Financiamento 001 e da Fundação Araucária do Paraná. Os autores querem agradecer ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR pelo suporte na realização dos ensaios MEV.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

ASTM. **ASTM D854**: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM. **ASTM D 2487 - 11** Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM Standard Guide, p. 1–5, 2017. <https://doi.org/10.1520/D2487-11>

ASTM D5298-16. **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**. Astm International, [S. l.], 2016.

BALDOVINO, JA *et al.* Análise da ascensão capilar de um solo arenoso. *In*: SIMPÓSIO DA PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO-OESTE, 2017. [Anais...]. p. 556–562, 2017.

BALDOVINO, JA *et al.* Influência da porosidade e do coeficiente de permeabilidade saturado na ascensão capilar de um solo arenoso. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 16., 2018. JORNADAS LUSO-ESPANHOLAS DE GEOTECNIA, 6., 2018. [Anais...]. Ponta Delgada, Portugal, 2018a.

BALDOVINO, JA *et al.* Análise da ascensão capilar de uma areia em diferentes porosidades. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018. [Anais...]. Salvador, BA, 2018b.

BALDOVINO, JA; BATISTA, E.; IZZO, R. Fundamentos de Ascensão Capilar em Solos não Saturados: Teoria e Ensaio de Laboratório. *In*: SIMPÓSIO DA PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO-OESTE, 2019. [Anais...]. 2019.

BALDOVINO, Jair de Jesús *et al.* Sustainable use of recycled-glass powder in soil stabilization. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 5, p. 04020080, 2020 a. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003081](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003081)

BALDOVINO, Jair de Jesús Arrieta *et al.* Fundamentos de Ascensão Capilar em Solos não Saturados. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 12, p. 30894–30911, 2019. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n12-197>

BALDOVINO, Jair de Jesús Arrieta *et al.* Equations Controlling Tensile and Compressive Strength Ratio of Sedimentary Soil–Cement Mixtures under Optimal Compaction Conditions. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 1, p. 04019320, 2020 b. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002973](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002973)

BALDOVINO, Jair de Jesús Arrieta *et al.* Experimental Study on Guabirotuba's Soil Stabilization Using Extreme Molding Conditions. **Geotechnical and Geological Engineering**, p. 1–17, 2020c. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01171-x>

DAS, Braja M. **Advanced Soil Mechanics**. [S. l.: s. n.]. E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781351215183>

IZZO, R. *et al.* Analysis of Capillary Rise in a Sedimentary Soil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19, 2018. [Anais...]. Salvador, Brasil, 2018.

LANE, KS; WASHBURN, SE. Capillary tests by capillarimeter and by soil filled tubes. **Proc. Highway Research Board**, v. 26, p. 460–473, 1946.

LI, X.; ZHANG, L.; FREDLUND, D. G. Wetting front advancing column test for measuring unsaturated hydraulic conductivity. **Canadian Geotechnical Journal**, 2009. <https://doi.org/10.1139/T09-072>

NING, Lu.; WILLIAN.J, Likos. Rate of Capillary Rise in Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004.

PEREIRA, Eliana Martins. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. 2004. - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. <https://doi.org/10.11606/T.18.2004.tde-09052006-144706>

TERZAGHI, Karl. **Theoretical Soil Mechanics**. E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780470172766>