

Fundamentos de Ascensão Capilar em Solos não Saturados**Fundamentals of Capillary Ascension in Unsaturated Soils**

DOI:10.34117/bjdv5n12-197

Recebimento dos originais: 07/11/2019

Aceitação para publicação: 13/12/2019

Jair de Jesús Arrieta Baldovino

Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
yaderbal@hotmail.com

Eclesielter Batista Moreira

Doutorando em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil
eclesielter_ebm@hotmail.com

Ronaldo Luis dos Santos Izzo

Professor do Departamento de Construção Civil (DACOC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
izzo@utfpr.edu.br

Érico Rafael da Silva

Mestrando em Engenharia Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
herico.rafael@gmail.com

Jessica Leindorf de Almeida

Mestranda em Engenharia Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
jessica.leindorf@hotmail.com

Mirian Dayane Pereira

Mestranda em Engenharia Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
jessica.leindorf@hotmail.com

Monigleicia Alcalde Orioli

Doutoranda em Engenharia Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
monigleicia@hotmail.com

Carlos Millan-Paramo

Professor do Departamento de Ingeniería Civil da Universidad de Sucre, Sincelejo, Colômbia.
Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
carlos.millan@unisucre.edu.co

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma síntese analítica do fenômeno de ascensão capilar em solos com base em estudos de modelos matemáticos, soluções analíticas e ensaios laboratoriais. As soluções analíticas são baseadas, principalmente, na estimativa da máxima altura de ascensão capilar (h_c), na altura da zona de saturação (h_a) e no tempo de ascensão capilar, assim como na influência da porosidade do solo (η), no tamanho das partículas do solo, no coeficiente de

permeabilidade saturado (k_s) e não saturado (k) e no ângulo de contato (α) entre as fases sólido-líquido. Por isso, serão esses os parâmetros analisados nesse trabalho. Os resultados demonstram que as soluções analíticas de ascensão capilar podem ser empregadas em areias, argilas, limos e britas.

Palavras-chave: Ascensão capilar, saturação, porosidade, modelos matemáticos.

ABSTRACT

This paper aims to present an analytical synthesis of the phenomenon of capillary rise in soils based on studies of mathematical models, analytical solutions and laboratory tests. The analytical solutions are based mainly on the estimation of the maximum capillary rise height (h_c), the saturation zone height (h_a) and the capillary rise time, as well as the influence of soil porosity (η), the size soil particles, saturated (k_s) and unsaturated (k) permeability coefficient and contact angle (α) between solid-liquid phases. Therefore, these will be the parameters analyzed in this work. The results demonstrate that analytical solutions of capillary rise can be employed in sands, clays, silts and gravels.

Keywords: Capillary rise, saturation, porosity, mathematical models.

1 INTRODUÇÃO

A capilaridade da água no solo devido à tensão superficial é um fenômeno comum na natureza. A ação capilar no solo pode, por exemplo, conduzir a seiva nas plantas e trazer lixiviados de volta à superfície do solo. Este fenômeno refere-se à água que existe em uma elevação superior ao nível da água subterrânea ou ao nível do lençol freático (Izzo et al. 2018). 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 (Lu e Likos, 2004b). Segundo Baldovino (2018) a sucção matricial em solos de granulometria fina afeta algumas propriedades como a resistência mecânica. Para Baldovino et al. (2019a) e Baldovino e Izzo (2019) quando a saturação é elevada em solos finos a influência da sucção matricial sobre a resistência mecânica se vê reduzida.

A capilaridade é um fenômeno importante que pode melhorar as características do solo embaixo das edificações, assim como criar danos ao concreto e ao aço quando contém íons erosivos. Segundo Saberian *et al.* (2017), devido à ação capilar da água em solos de granulometria fina, a penetração da água em um concreto de cal (usado em estabilização de solos) tem efeitos negativos porque reduz a resistência do concreto de cal e das fundações.

Nos últimos anos, várias pesquisas foram feitas sobre a estimativa da ascensão capilar em solos, principalmente, para evitar a desertificação, considerada um processo de modificação ambiental ou climático que leva à formação de uma paisagem árida ou de um deserto propriamente dito. (Liu *et al.* 2014). A estimativa e cálculo exato do aumento capilar é importante para formular estratégias ambientais, como evitar a deterioração dos solos e para o aproveitamento da água como fonte subterrânea para a irrigação das plantas. A ascensão capilar pode ser empregada para se

correlacionar com outras propriedades dos solos como o coeficiente de permeabilidade saturado e não saturado, infiltração, ângulo de contato entre fases sólido-líquido e sucção matricial. Diferentes autores correlacionaram modelos matemáticos com experimentos laboratoriais para estudar e criar equações de estimativa do comportamento capilar em solos. Assim, esse trabalho tem como objetivo apresentar uma síntese analítica e uma discussão do fenômeno de ascensão capilar em solos, baseada em estudos de modelos matemáticos, soluções analíticas e ensaios laboratoriais desenvolvidos por Terzaghi (1943), Lane et al. (1946), Peck et al. (1974), Kumar e Malik (1990), Lu e Likos (2004a) e Liu et al. (2014).

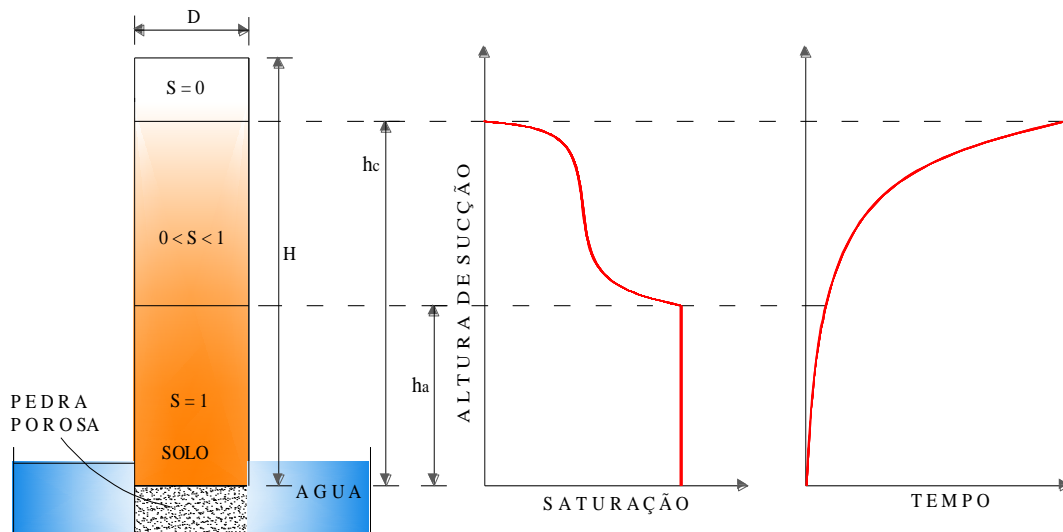


Figura 1. Comportamento capilar de uma coluna de solo em contato com a água (Baldovino et al., 2019b)

2 SOLUÇÕES E MODELOS ANALÍTICOS PARA ESTIMATIVA DA ASCENSÃO CAPILAR EM SOLOS

2.1 MODELO DE TERZAGHI (1943)

Terzaghi (1943) desenvolveu o cálculo do tempo de ascensão capilar em solos baseado na lei de Darcy, e em função da altura de uma coluna de solo na condutividade hidráulica saturada. 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. Quando se coloca uma coluna de solo seco ou semi-seco 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.

No seu estudo, Terzaghi assumiu duas hipóteses: que a lei de Darcy para solo saturado também é aplicável para o solo insaturado, e que o gradiente hidráulico (i), responsável pela ascensão capilar, pode ser descrito da seguinte forma (Equação 1):

$$i = \frac{h_c - z}{z} \quad (1)$$

Onde h_c é a altura máxima de ascensão capilar e z é a altura de água acima do nível da água. Aplicando-se a lei de Darcy na Equação 1 e derivando-a em função da velocidade de saturação, tem-se (Equação 2):

$$\eta \frac{dz}{dt} = k_s \frac{(h_c - z)}{z} \quad (2)$$

Onde η é a porosidade do solo; dt e dz são as diferenças do tempo e de altura, respectivamente e k_s é o coeficiente de permeabilidade do solo saturado. Considerando a condição de contorno z igual a zero, quando t também é zero, a solução da Equação 2 resulta em (equação 3):

$$t = \frac{\eta h_c}{k_s} \left(\ln \frac{h_c}{h_c - z} - \frac{z}{h_c} \right) \quad (3)$$

Lane *et al.* (1946) usaram a Equação 3 de Terzaghi para estudar o comportamento capilar de diferentes solos concluindo que os dados experimentais do tempo de ascensão capilar eram maiores que os calculados.

2.2 MODELO DE LANE ET AL (1946)

Lane *et al.* (1946) realizaram ensaios de ascensão capilar em tubos abertos usando solos não coesivos como britas com presença de argila. Os autores relacionaram os valores experimentais com os valores preditos pela equação de Terzaghi (1943). Os resultados indicam que a máxima altura de ascensão capilar, em mm, é dada pela Equação 4:

$$h_c(\text{mm}) = -990 \ln D_{10} - 1540 \quad (4)$$

Onde D_{10} é o diâmetro efetivo dos grãos do solo e varia desde 0.006 mm até 0.2 mm.

2.3 MODELO DE PECK ET AL (1974)

Peck *et al.* (1974) propuseram uma relação empírica para calcular a máxima altura de ascensão capilar tendo como variáveis os vazios do solo, o diâmetro efetivo D_{10} e uma constante C (equação 5):

$$h_c(\text{mm}) = \frac{C}{eD_{10}} \quad (5)$$

Onde C é uma constante que varia entre 10 e 50 mm^2 dependendo das impurezas da superfície e da forma do grão. Conclui-se pela Equação 5 que a altura de ascensão capilar aumenta quando os vazios no solo são menores e quando os diâmetros dos grãos do solo também são menores.

2.4 MODELO DE KUMAR E MALIK (1990)

Kumar e Malik (1990) calcularam uma relação entre a altura de entrada de ar e a altura de ascensão máxima da água com a seguinte expressão (equação 6):

$$h_c(\text{cm}) = h_a + 134,84 - 5,15 \sqrt{r} \quad (6)$$

Onde h_c é a altura máxima de ascensão capilar calculada em cm; h_a é altura de entrada de ar, em cm, e r é o raio equivalente dos poros, em micrometros (μm). A Equação 6 indica que quanto mais grossa é a granulometria do solo, a diferença entre h_c e h_a diminui.

2.5 MODELO DE LU E LIKOS (2004)

Lu e Likos (2004) desenvolveram uma solução do tempo de ascensão capilar baseada na equação de Terzaghi (1943). Os autores consideraram o coeficiente de permeabilidade como não linear a partir do ponto em que o solo deixa de ser saturado e entra na zona de umedecimento. O coeficiente de permeabilidade não linear (k) foi descrito por Gardner (1958) como uma função dependente do k_s (coeficiente de permeabilidade saturado), da altura de sucção (h) e da taxa de diminuição da condutividade hidráulica com a diminuição da frente de sucção (α) (Equação 7).

$$k = k_s \exp(-\alpha h) \quad (7)$$

O parâmetro α é proporcional à distribuição de tamanho de poros, é definido como o inverso da altura de saturação (h_a), ou altura de entrada de ar ($\alpha = 1/h_a$), e está entre 1 cm^{-1} até $0,001 \text{ cm}^{-1}$. Considerando as Equações 2 e 7, a equação da ascensão capilar definida por Lu e Likos (2004) é (Equação 8):

$$\frac{dz}{dt} = \frac{k_s}{\eta} \exp(-\alpha h) \frac{h_c}{h_c - z} \quad (8)$$

A solução da Equação 8 é a proposta para a determinação do tempo de ascensão capilar (Equação 9).

$$t = \frac{\eta}{k_s} \sum_{j=0}^{m=\infty} \frac{\alpha^j}{j!} \left(h_c^{j+1} \ln \frac{h_c}{h_c - z} - \sum_{s=0}^j \frac{h_c^s z^{j+1-s}}{j+1-s} \right) \quad (9)$$

Se na Equação 9 a linearidade for considerada, então m será zero, e a equação se transforma na Equação 3. Entretanto, se a não linearidade for considerada, m é igual a 10 para uma variada gama de solos.

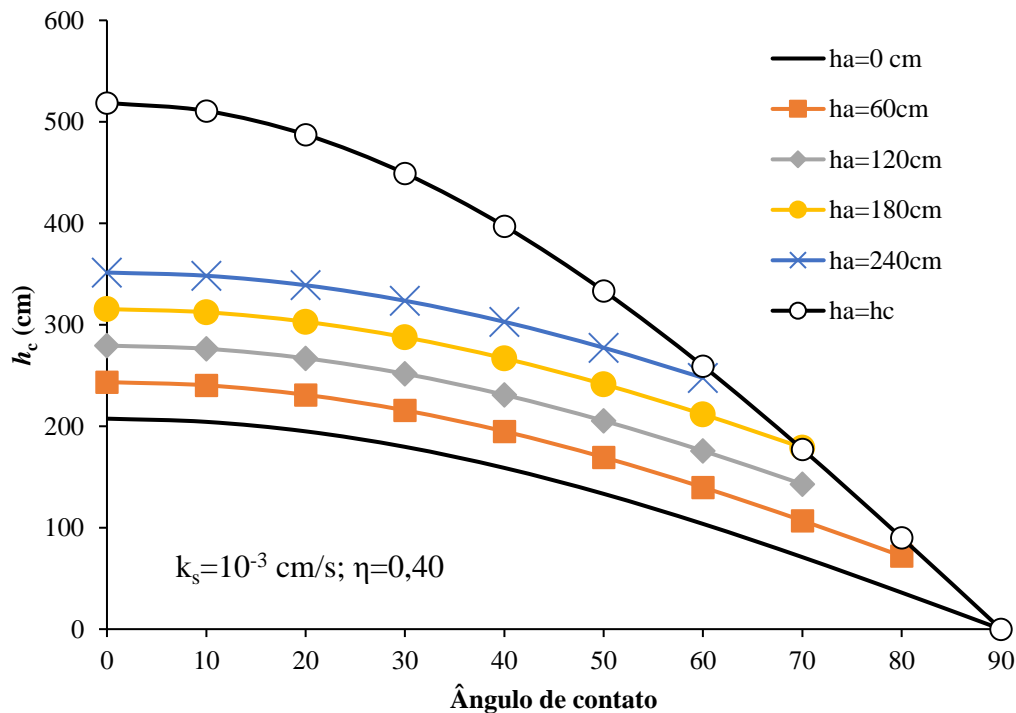


Figura 2. Variação da altura de ascensão capilar h_c para diferentes ângulos de contato, alturas de saturação do solo, porosidade de 40% e $k_s=10^{-3}$ cm/s (adaptado de Liu *et al.* 2014).

2.6 MODELO DE LIU ET AL (2014)

Liu *et al.* (2014) desenvolveram uma solução analítica para calcular de uma maneira fácil e rápida a máxima altura de ascensão capilar (h_c) em solos (principalmente arenosos). A solução foi comparada com uma serie de ensaios de ascensão capilar de vários tipos de solos em tubos abertos. O coeficiente de permeabilidade não saturado (k) foi considerado em função do coeficiente de permeabilidade saturado (k_s) e da altura de ascensão capilar:

$$k=k_s f(z) \quad (10)$$

Onde z é a altura de água acima do nível da água (altura negativa de água) e f é o modelo matemático proposto. Se substituirmos a Equação 10 na Equação 1, tem-se (Equação 11):

$$\frac{dz}{dt} = \frac{k_s f(z) (h_c - z)}{\eta z} \quad (11)$$

Liu *et al.* (2014) resolveram a Equação 11 considerando o fluxo de água no solo e supondo que: o fluido é incompressível e newtoniano, o fluxo é laminar através de um tubo, cujo comprimento é maior que o diâmetro, a aceleração no fluido é nula. Usando a lei de Poiseuille, a solução analítica para a Equação 11 foi (equação 12):

$$h_c = \frac{\sigma \eta}{\sqrt{2n\rho_\omega g k_s}} \cos\alpha + (1-\eta)h_a \quad (12)$$

Onde h_c e h_a são, altura máxima de ascensão capilar e altura de entrada de ar, respectivamente, σ é tensão superficial da água, α é o ângulo de contato da fase água-solo, ρ_ω é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade e n é a viscosidade da água. O valor de $\sigma/\sqrt{2n\rho_\omega g}$ pode ser calculado como $0,164 \text{ (m}^{3/2} \text{ s}^{-1/2}\text{)}$ a uma temperatura de 20°C .

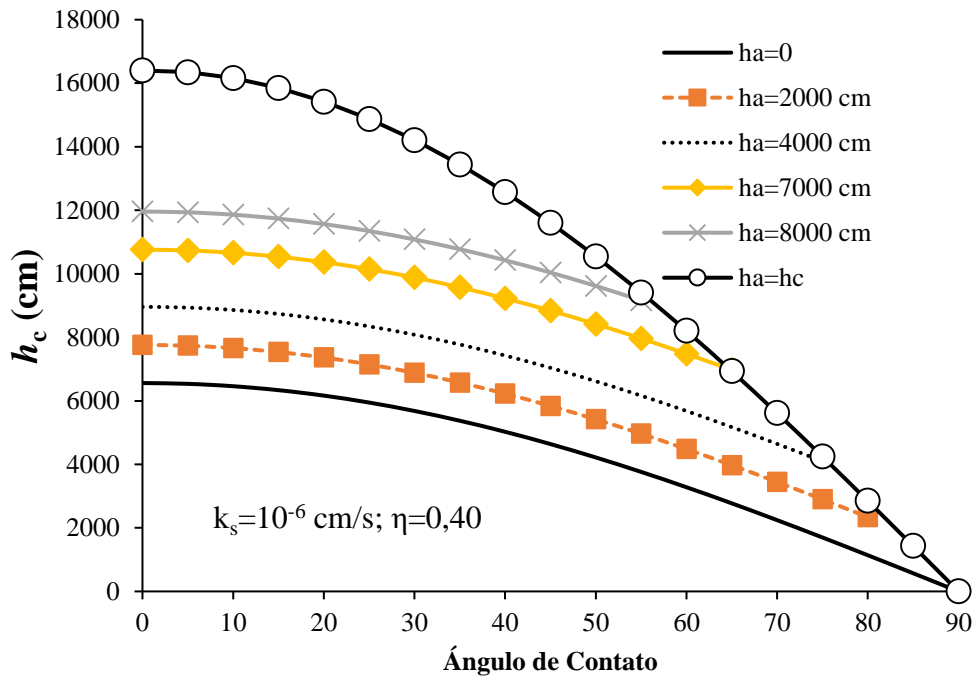


Figura 3. Variação da altura de ascensão capilar h_c para diferentes ângulos de contacto, alturas de saturação do solo, porosidade de 40% e $k_s=10^{-6}$ cm/s (adaptado de Liu *et al.* 2014).

Verifica-se na Figura 2 a altura máxima de ascensão capilar (h_c) que pode alcançar uma coluna de solo para um coeficiente permeabilidade saturado (k_s) de 10^{-3} cm/s, porosidade de 40%, alturas de entrada de ar, ou alturas de saturação, de 0, 60, 120, 180 e 240 cm e $h_c=h_a$ (aplicando a Equação 12).

O valor de $k_s=10^{-3}$ cm/s é típico de solos arenosos e solos arenosos-siltosos, assim as curvas apresentadas na Figura 2 são aproximações da altura máxima de ascensão capilar que poderiam alcançar esse tipo de solos. O valor de ângulo de contato da fase líquido-sólido para diferentes tipos de solo pode variar desde 40° até 80° e, segundo Lu e Likos (2004), a relação h_c/h_a pode variar até 5. Assim, para os valores mostrados na Figura 2, a altura ascensão capilar h_c pode variar desde 200 cm até 520 cm, aproximadamente. Além disso, h_c aumenta para quando o ângulo de contato diminui, e quando h_a aumenta.

Observa-se na Figura 3 a variação da altura de ascensão capilar (h_c) para diferentes valores de h_a e ângulos de contato. O valor do coeficiente de permeabilidade saturado se mantém constante a 10^{-6} cm/s, e porosidade de 40%.

O valor de $k_s=10^{-6}$ cm/s é típico de solos siltosos e solos argilosos, assim as curvas apresentadas na Figura 3 são aproximações da altura máxima de ascensão capilar que poderiam alcançar esse tipo de solos. Assim, segundo a Figura 3, um solo para esses valores de porosidade e permeabilidade pode alcançar valores de h_c desde 60 m até 160 m de altura.

A Figura 4 apresenta a variação da relação entre a altura máxima de ascensão capilar (h_c) e a altura de saturação (h_a) dependendo de porosidades, de 40% e 50%, e coeficientes de permeabilidade

saturado, de 10^{-3} cm/s e 10^{-4} cm/s, mostrando, assim, diferentes valores para h_c/h_a que aumentam se diminui o ângulo de contato. Lu e Likos (2004) reportaram uma relação máxima h_c/h_a é de 5, mas na Figura 4 se pode observar variações maiores que 5.

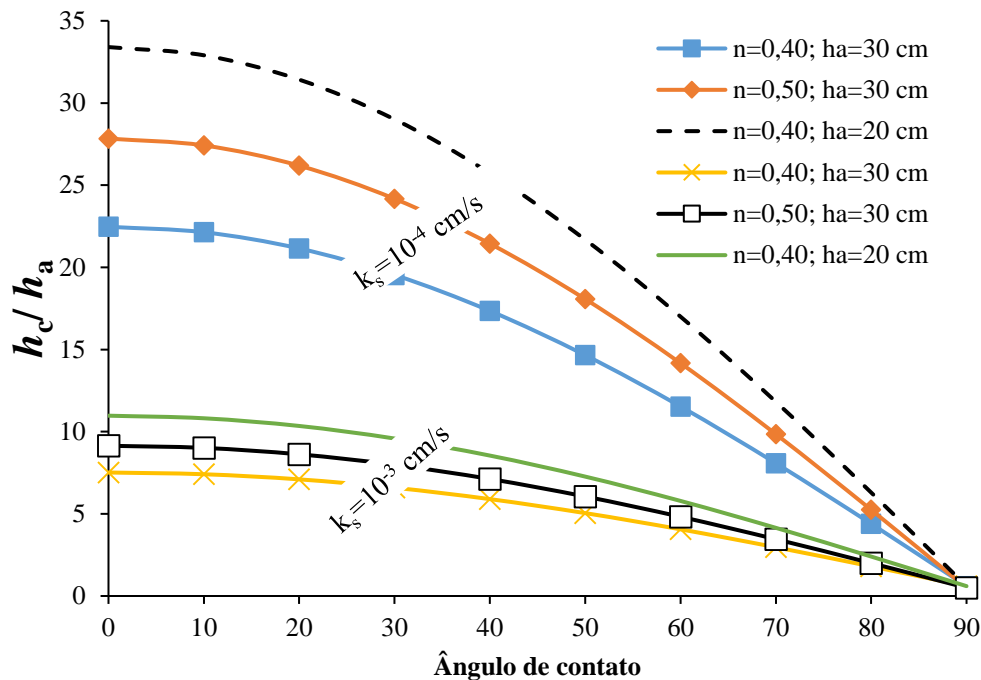


Figura 4. Variação da relação h_c/h_a para diferentes ângulos de contato, porosidades e coeficientes de permeabilidade (adaptado de Liu *et al.*, 2014).

A metodologia de Liu *et al.* (2014) é uma solução clara e simples para calcular a altura máxima de ascensão capilar usando parâmetros e propriedades do solo que podem ser obtidas facilmente no laboratório (ângulo de contato, peso específico seco aparente do solo, massa específica dos grãos, coeficiente de permeabilidade saturado e altura de entra de ar). Além disso, Liu *et al.* (2014) obtiveram um ajuste de 79% na aplicação da Equação 12 em valores experimentais de ascensão capilar de solos de outros autores.

3 DADOS EXPERIMENTAIS DE ASCENSÃO CAPILAR EM SOLOS

Diferentes autores trabalharam com diferentes tipos de solos para estudar seu comportamento capilar, para isso, usaram tubos de vidro ou de acrílico transparente para medir, principalmente, a altura de ascensão da água com o tempo. Uns dos primeiros autores que trabalharam com esse tipo de ensaio foi Lane *et al.* (1946). Lu e Likos (2004) reportaram os 4 tipos de solos usados nos ensaios de ascensão capilar por Lane *et al.* (1946). Os 4 tipos de solos são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos solos utilizados por Lane et al. (1946)

Solo	Tipo	k_s (cm/s)	h_c (cm)	h_a (cm)	Porosidade
1	Silte arenoso	$6,2 \times 10^{-5}$	239,6	175	0,40
2	Areia grossa com presença de finos	$1,1 \times 10^{-4}$	82,0	42	0,20
3	Areia grossa mal graduada	$1,6 \times 10^{-2}$	28,4	-	0,30
4	Areia fina mal graduada	$4,6 \times 10^{-4}$	106,0	-	0,31

Fonte: Adaptado de Lu e Likos (2004)

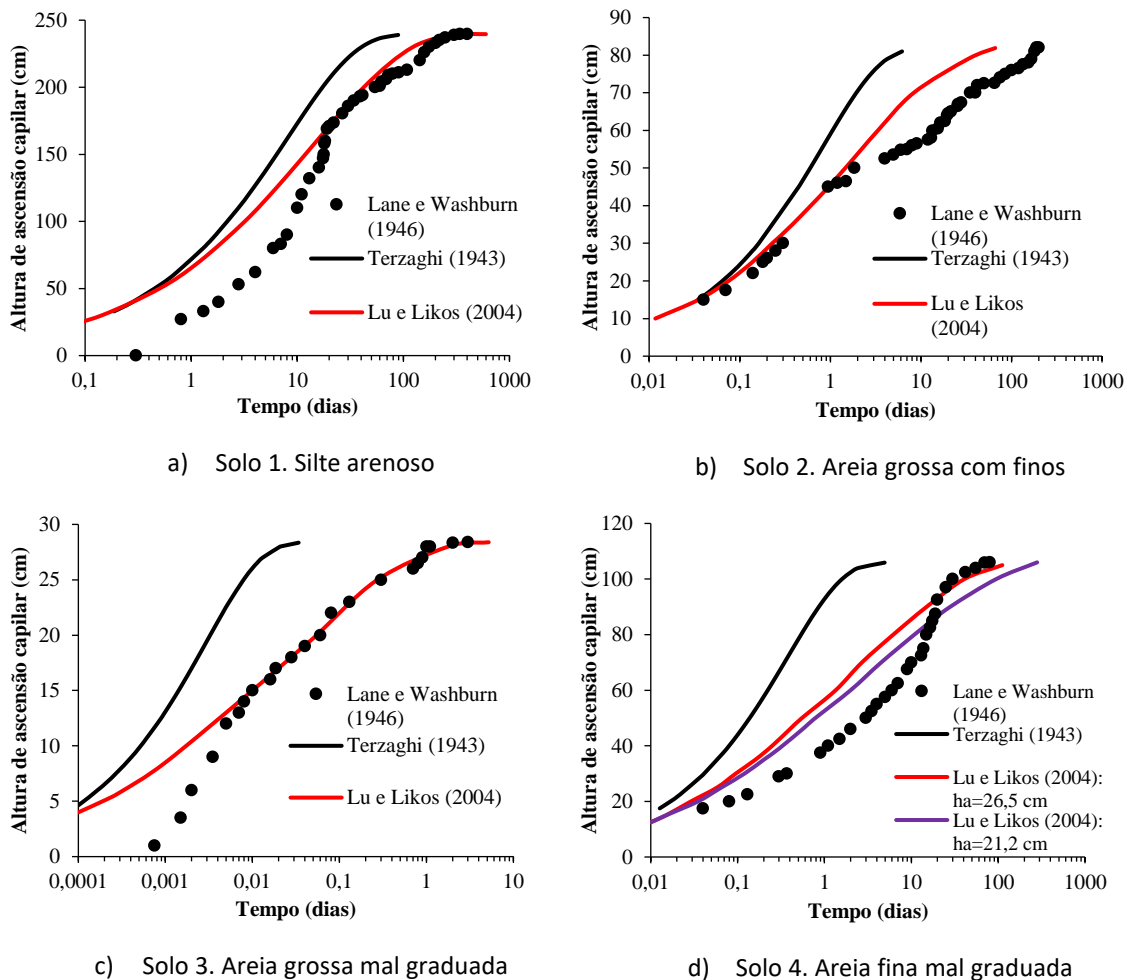


Figura 5. (Adaptado Lu e Likos, 2004). Solos estudados por Lane *et al.*, (1946) comparados com as soluções analíticas de Terzaghi (1943) e Lu e Likos (2004).

Lu e Likos (2004) analisou os valores experimentais do tempo de ascensão capilar observados por Lane *et al.* (1946) comparados com a solução analítica e modelo de Terzaghi (1943) como apresentado na Figura 5. O cálculo do tempo de ascensão capilar com a Equação (3) pode ser obtido sem o valor da altura de entrada do ar, assim, para os 4 tipos de solo (Tabela 1) a curva de Terzaghi (1943) pode ser traçada, mas para os solos 3 e 4, Lu e Likos (2004) encontraram o valor de ah_c que melhor se ajustassem aos pontos experimentais. O valor encontrado para o solo 3 foi de $ah_c=5$ e para

o solo 4 o valor oscila entre 4 e 5. Quer dizer que, segundo Lu e Likos (2004), o valor teórico de h_a está entre a quarta ou a quinta parte da altura máxima de ascensão. Na Figura 6 são apresentados os valores experimentais de ascensão capilar de 6 solos usados por Malik *et al.* (1984) comparados com os modelos de Terzaghi e Lu e Likos. Nota-se que a curva teórica de Terzaghi para todos os solos apresentados na Figura 6 tem melhor ajuste com os pontos experimentais de ascensão capilar comparada com a curva de ascensão de Lu e Likos. Os 6 tipos de solos estudados são arenosos, portanto, apresentam valores de permeabilidade baixos os quais estão reportados na Tabela 1. A areia de Rewalwas teve a maior altura de ascensão, assim como areia de Bhiwani (entre 35 e 40 cm).

Li *et al.* (2009) estudaram a ascensão capilar de 5 solos para determinar a curva característica de sucção (sucção matricial) baseados no fenômeno capilar. Na Figura 7 é apresentado o comportamento capilar de 5 tipos de solo: GW, SM, SC, ML e CL (ver também a Tabela 2). Todos os solos foram colocados em um tubo de acrílico de 1000 mm de altura. Pode-se ver que os solos mais finos (SC e ML) tiveram uma altura de ascensão capilar maior, os solos com granulometria mais grossa, como o GW-GM, só alcançaram uma altura, aproximada, de 10 cm de ascensão capilar. Os solos estudados por Li *et al.* (2009) foram limitados pela altura do tubo de acrílico (1000 mm) e, assim, também foi limitado o tempo de ascensão capilar.

Na Tabela 2, os 35 tipos de solos usados em ensaios de ascensão capilar por diferentes autores são observados. É apresentado na Tabela 2 o nome do solo usado, sua classificação, coeficiente de permeabilidade saturado, em cm/s, ângulo de contato entre a fase sólido-líquida, porosidade, altura de entrada do ar e os valores experimentais e calculados da altura máxima de ascensão capilar. Vários dos dados dos solos na Tabela 2 foram usados por Liu *et al.* (2014) para determinar o grau de aceitação da Equação 12. É mostrada na Figura 8 uma comparação entre os valores teóricos da altura máxima de ascensão capilar, aplicando a Equação 12, com os valores experimentais dos solos do Tabela 2. Com os resultados experimentais dos solos, se obtém um ajuste de 83%, valor este aproximado ao reportado por Liu *et al.* (2014), que foi de 79%.

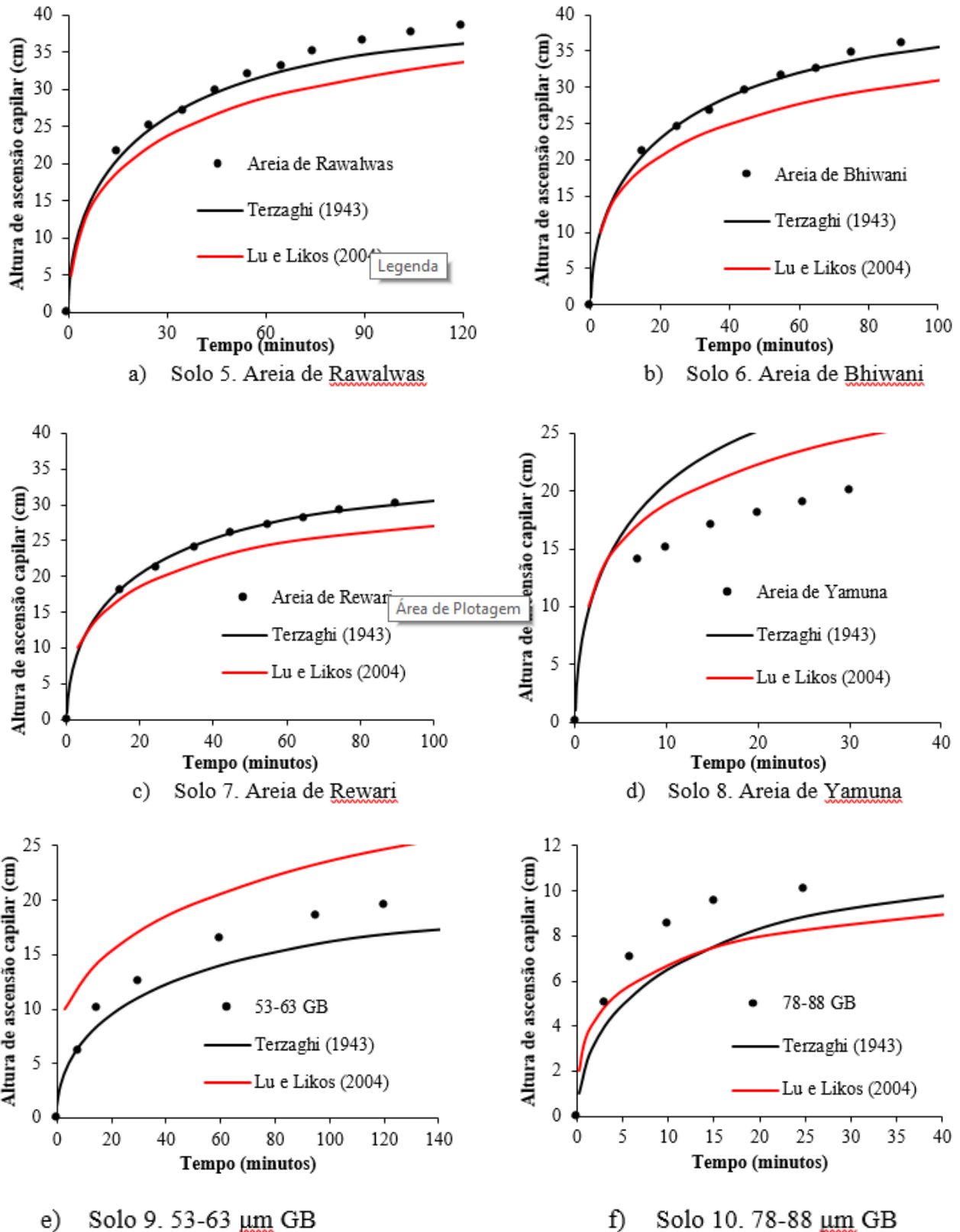


Figura 6. Solos estudados por Malik *et al.* (1984) comparados com as soluções analíticas de Terzaghi (1943) e Lu e Likos (2004).

Os valores dos ângulos de contato para os solos reportados na Tabela 2 aumenta quando o tipo de solo é argila ou silte, ou seja, de granulometria mais fina, e diminui quando o solo é arenoso,

ou seja, de granulometria grossa. A relação entre altura de entrada de ar e a máxima altura de ascensão capilar dos solos reportados (h_c/h_a) varia desde $h_c/h_a=1,3$ até $h_c/h_a=8,7$ mostrando, assim, uma variação ampla dessa relação. A altura de entrada de ar é determinada não somente pelo tipo de solo em si, mas também pelo peso específico, grau de compactação, temperatura da água, umidade do solo e dos tamanhos dos vazios. O uso do coeficiente de permeabilidade não saturado para prever o tempo de ascensão capilar (Figura 6) representa um melhor ajuste para os solos reportados. Da mesma forma, se obtém resultados com ajustes satisfatórios se se usar o ângulo de contato para prever o comportamento capilar nos solos.

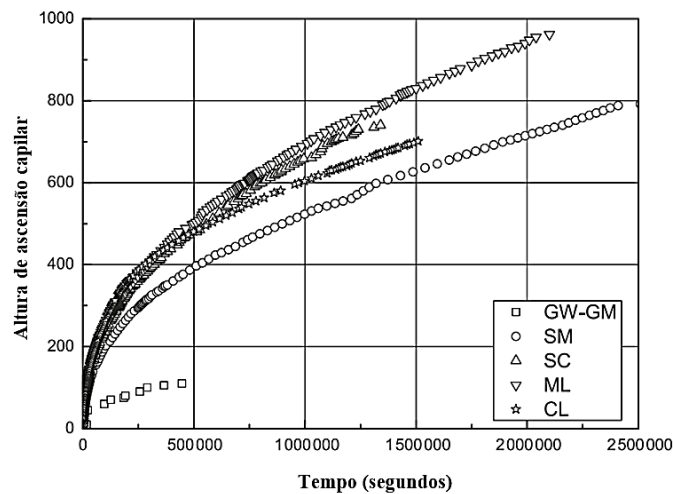


Figura 7. Comportamento capilar dos solos estudados por Li *et al.* (2009).

A Figura 9 apresenta os ensaios de ascensão capilar realizados com uma areia fina de Curitiba/Brasil reportados por Baldovino *et al.* (2017; 2018a, 2018b). Os resultados dos ensaios de caracterização da areia foram: $G_s=2,688 \text{ g/cm}^3$, $k_s=2,959 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ para uma porosidade $\eta=38\%$; $G_s=2,688 \text{ g/cm}^3$, $k_s=1,53 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ para $\eta=40\%$ e $G_s=2,688 \text{ g/cm}^3$, $k_s=1,286 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ para $\eta=46\%$. Esses resultados foram inseridos na Equação 3 e Equação 9 para obter a curva de ascensão capilar teórica do solo, de acordo com a teoria de Terzaghi e de Lu e Likos.

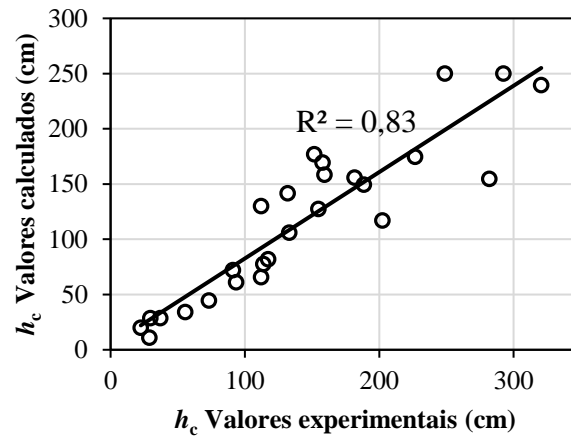


Figura 8. Comparação dos valores teóricos e valores experimentais usando a Equação 12.

Depois de realizado o ensaio de ascensão no tubo (para a areia fina de Curitiba), foi retirado o solo a cada 3-5 cm para determinar o teor de umidade, o grau de saturação e traçar os gráficos de h_c dependentes destes. Foi encontrado que, a água satura a areia até 18 cm ($h_a=18$ cm) para $\eta=38\%$, 17 cm ($h_a=17$ cm) com $\eta=40\%$ e satura a areia de $\eta=46\%$ com 15 cm ($h_a=15$ cm). Com a finalidade de calcular a curva de ascensão teórica de Lu e Likos precisa-se calcular o parâmetro $\alpha=1/h_a$. Assim, $\alpha=1/15=0,066$ para 46%, $\alpha=1/17=0,0588$ para 40% e finalmente $\alpha=1/18=0,0556$. Nota-se na Figura 9 que a solução de Lu e Likos considera o coeficiente de permeabilidade não saturado depois da altura h_a , visto que a curva proposta por eles teve um melhor ajuste em relação aos pontos experimentais ($R^2=0,97$ a $R^2=0,74$). O melhor comportamento dos pontos com a curva teórica deu-se na porosidade de 40%, seguido pela porosidade de 38% e finalmente pela porosidade de 46%. Devido à baixa sucção matricial que os solos granulares oferecem a ascensão se espera que a ascensão máxima em solos arenosos seja menor em relação aos solos finos (Moreira et al. 2019).

Tabela 2. Valores de ascensão capilar em solos: teóricos e calculados

Nº	Solo	Classificação	k_s (10^{-3} cm/s)	α (°)	η	h_a (cm)	h_c exp (cm)	h_c cal (cm) Equação 12
1	k-7	Areia	1,5	53,3	0,408	15	130	112,1
2	Ludas	Areia	4,5	50	0,484	29,1	72,1	91,1
3	53-63 GB	-	1,12	72,5	0,4	24,1	44,6	73,4
4	74-88 GB	-	2,92	76,1	0,4	13	28,4	37,0
5	105-125 GB	-	10	74,9	0,4	9	19,9	22,5
6	Rawalwas	Areia	4,4	35,9	0,45	43,2	77,5	113,9
7	Bhiwani	Areia	4	35,9	0,41	44,2	65,6	112,2

8	Rewari	Areia	4,3	48,7	0,45	35,2	60,9	93,6
9	Yamuna	Areia	8,89	52,5	0,4	22,2	34,1	55,7
10	Rewari	Areia argilosa	0,92	60	0,489	50,5	169,4	158,0
11	Tohana	Areia argilosa	0,54	57,3	0,48	37,4	117	202,5
12	Hissar	Areia argilosa	0,55	59,3	0,473	37,5	149,4	188,6
13	Rewari	Argila arenosa	0,74	65,8	0,491	59,7	176,8	151,7
14	Barwala	Argila arenosa	0,26	73,7	0,484	41,2	158,4	159,4
15	Rohtak	Argila arenosa	0,12	77,9	0,502	48,7	155,7	181,8
16	Hissar	Argila arenosa	0,11	74,9	0,498	47,7	174,5	226,8
17	Karnal	Marga	0,084	74,3	0,57	38,4	250*	292,5
18	Sonepat	Argila arenosa com magra	0,1	74,3	0,526	32,8	250*	249,0
19	Pehowa	Argila arenosa com magra	0,094	73,1	0,515	59,6	154,6	282,1
20	Hansi	Argila mole	0,15	79,1	0,56	29,6	127,5	154,8
21	Ambala	Argila siltosa mole	0,05	84,8	0,599	15	141,5	131,9
27	Tipo 2	Areia grossa mal graduada	16	50*	0,31	5,68	28,4	29,8
28	Tipo 4	Areia fina mal graduada	0,46	60*	0,31	21,2	106	133,1
29	Tipo 5	Areia grossa com finos	0,11	75*	0,21	41	82	117,4
30	Tipo 6	Silte arenoso	0,062	75*	0,4	175	239,6	320,6
31	GW-GM	Brita bem graduada com silte	10	60*	0,33	2,75	11**	28,9
32	SM	Areia siltosa com brita	0,1	60*	0,31	20	80**	268,0
33	SC	Areia argilosa com brita	0,001	60*	0,39	17,5	70**	3208,7
34	ML	Silte arenoso	0,0004	60*	0,45	18,5	74**	5844,6
35	CL	Argila magra com areia	0,0001	60*	0,5	23,75	95**	12977,2

* Valores estimados em comparação com os resultados de outro tipo de solos.

**Dados observados que foram limitados pela altura do tubo usado para o ensaio de ascensão capilar.

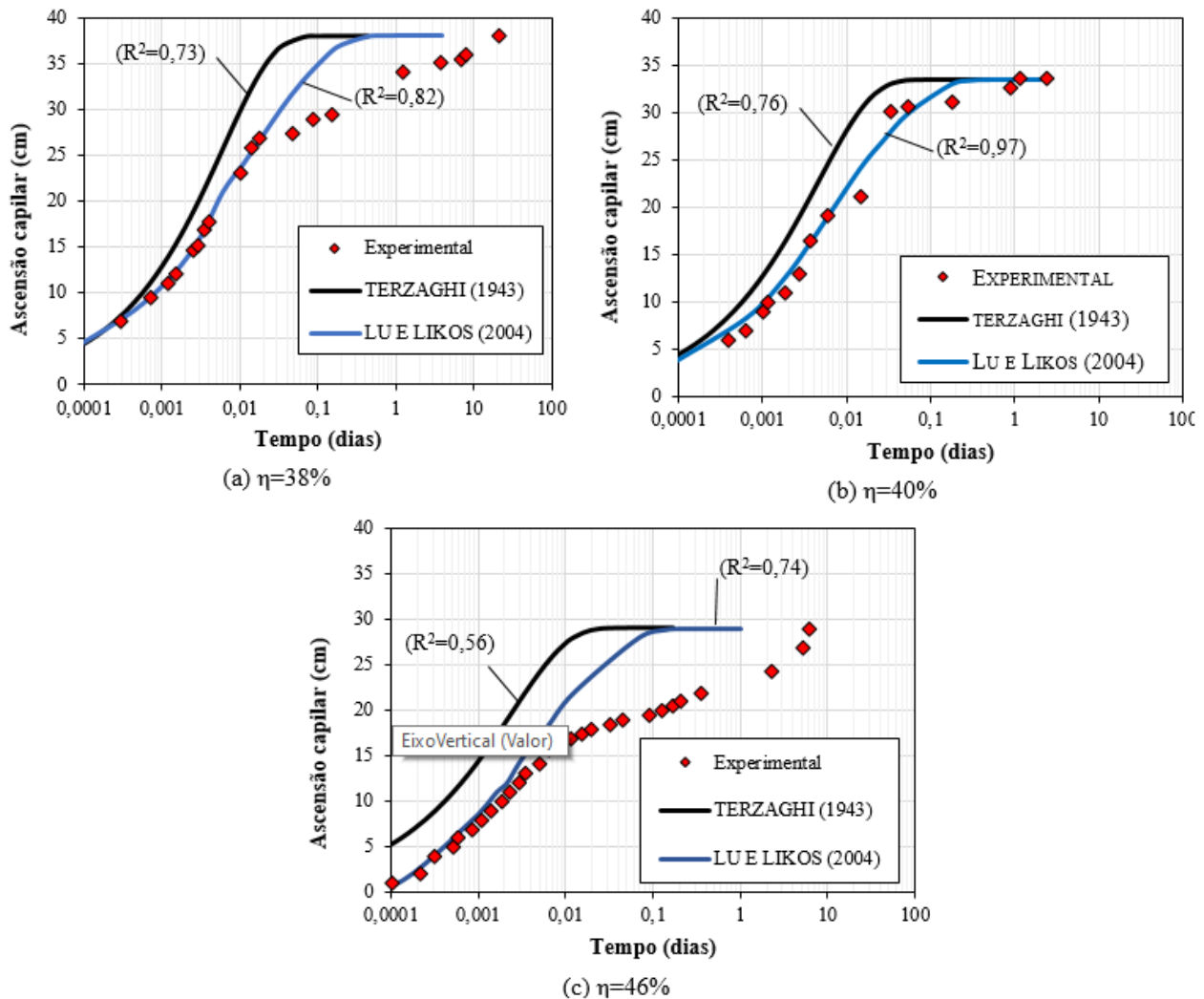


Figura 9. Comparação entre os dados experimentais, solução de Terzaghi e solução de Lu e Likos (Baldovino *et al.* 2017, 2018a, 2018b).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Das discussões e análises apresentados no presente trabalho se pode concluir que:

- A curva teórica de Lu e Likos (2004) e a solução de Liu *et al.* (2014) usadas no presente trabalho tiveram melhor ajuste aos pontos experimentais da ascensão capilar dos solos analisados;
- As soluções analíticas de ascensão capilar podem ser empregadas em areias, argilas, limos e britas. Sendo que, as mais aceitas, por serem mais fidedignas, são as de Terzaghi (1943), Lu e Likos (2004) e Liu *et al.* (2014);
- Equações como as dos modelos de Terzaghi (1943), Lu e Likos (2004) e Liu *et al.* (2014) podem ser empregadas para estimar a ascensão da água capilar desde que os parâmetros para fazer os cálculos possam ser facilmente obtidos em laboratório.

- As Equações dos outros modelos têm parâmetros que são difíceis de serem obtidos, como o raio dos poros do solo e o parâmetro C, que depende das impurezas da superfície e da forma do grão. Liu et. al. (2014) não recomendam usá-las, visto que não têm uma boa precisão.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à UTFPR, CNPq, CAPES e à Fundação Araucária do Paraná pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 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. D. J. A. (2018). *Comportamento mecânico de um solo siltoso da formação geológica Guabirotuba tratado com cal em diferentes tempos de cura*. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- 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., Batista, 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. D. J. A., Izzo, R. L. D. S., Pereira, M. D., Rocha, E. V. D. G., Rose, J. L., e Bordignon, V. R. (2019a). *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.A., Batista, E., e Izzo, R. (2019b). *Fundamentos de Ascensão Capilar em Solos não Saturados: Teoria e Ensaio de Laboratório*. Anais do Simpósio da Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro-Oeste, Brasil.
- Baldovino, J. A., e Izzo, R. L. (2019). *Relação porosidade/cimento como parâmetro de control na estabilização de um solo siltoso*. In Colloquium Exactarum. ISSN: 2178-8332 (Vol. 11, No. 1, pp. 89-100).

- Gardner, W.R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table, *Soil Sci.* Vol. 85, p. 228–232.
- Izzo, R., Baldovino, J.A., Moreira, E., Teixeira, W., Silva, E., Andrade, V., São Marcos, H., Nakashima, C., Rose, J. (2018). *Analysis of capillary rise in a sedimentary soil*. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2018, 2018, Salvador, Brasil.
- Kumar, S. e Malik, R. (1990). Verification of quick capillary rise approach for determining pore geometrical characteristics in soils of varying texture, *Soil Sci.* Vol. 150 (6), p. 883–888.
- Lane, K., Washburn, D. e Krynine, D. (1946). Capillarity tests by capillarimeter and by soil filled tubes, *Highway Research Board Proceedings.* Vol. 26, p. 460-473.
- Li, X., Zhang, L. M. e Fredlund, D. G. (2009). Wetting front advancing column test for measuring unsaturated hydraulic conductivity, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46(12), p. 1431-1445.
- Liu, Q., Yasufuku, N., Miao, J., e Ren, J. (2014). An approach for quick estimation of maximum height of capillary rise, *Soils and Foundations*, Vol. 54(6), p. 1241-1245.
- Lu, N. e Likos, W.J. (2004a). Rate of capillary rise in soils, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* Vol. 130, p. 646 650.
- Lu, N. e Likos, W. J. (2004b). *Unsaturated soil mechanics*. Jhon Wiley & Sons Inc, New Jersey.
- Malik, R., Kumar, S. e Dahiya, I. (1984). An approach to quick determination of some water transmission characteristics of porous media, *Soil Sci.* Vol. 137 (6), p. 395–400.
- Malik, R., Kumar, S. e Malik, R. (1989). Maximal capillary rise flux as a function of height from the water table, *Soil Sci.* Vol. 148 (5), p. 322–326.
- Moreira, E. B., Baldovino, J. D. J. A., Izzo, R. L., e Rose, J. L (2019). Impact of Sustainable Granular Materials on the Behavior Sedimentary Silt for Road Application. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01025-6>
- Peck, R.B., Hanson, W.E. e Thornburn, T.H. (1974). *Foundation Engineering*. Wiley, New York.
- Saberian, M., Jahandari, S., Li, J. e Zivari, F. (2017). Effect of curing, capillary action, and groundwater level increment on geotechnical properties of lime concrete: Experimental and prediction studies, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Vol. 9 (4), p. 638-647.
- Terzaghi, K., (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wiley and Sons, New York.