

# Efeito do Tipo de Radiação na Simulação Numérica da Interação Solo-Atmosfera de uma Areia Argilosa Não Saturada em Clima Tropical

Caio Henrique Buranello dos Santos

Discente de doutorado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, Brasil, caio.buranello@unesp.br

Michael Andrade Maedo

Professor, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Brasil, michael.maedo@ufu.br

Caio Gorla Nogueira

Professor, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, Brasil, caio.nogueira@unesp.br

Roger Augusto Rodrigues

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

**RESUMO:** em solos não saturados, que são comuns em regiões de nítida sazonalidade, há uma flutuação do conteúdo de água, que ocorre pela infiltração e evaporação da água. Esses eventos têm relação com fenômenos meteorológicos e atmosféricos e têm ganhado relevância em um período marcado pela ocorrência de eventos extremos (períodos de muita ou pouca precipitação e ondas de calor intenso, por exemplo). Mudanças do conteúdo de água são associadas a mudanças da sucção que afetam o comportamento dos solos. Dessa maneira, o estudo da variação da sucção no solo associada à variação sazonal das variáveis atmosféricas é imprescindível, especialmente em locais de clima tropical, isso porque falhas em obras geotécnicas podem ocasionar perdas humanas e prejuízos materiais. Este trabalho trata da modelagem termo-hidráulica da sucção em um solo não saturado em clima tropical, visando à elaboração de um protocolo de modelagem para estudos da interação solo-atmosfera. Foi utilizado o programa de elementos finitos CODE\_BRIGHT e nele foram inseridos tanto dados térmicos e hidráulicos do solo simulado quanto variáveis meteorológicas oriundas da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Nas simulações, foram consideradas duas abordagens para a definição da radiação líquida: uma considerando um tratamento de dados de radiação de onda curta obtidos por estação meteorológica e outra considerando uma rotina interna do CODE\_BRIGHT para cálculo desse tipo de radiação. Esses resultados foram comparados entre si e também contrastados com medidas em campo da sucção, as quais foram obtidas por tensiômetros e sensores de matriz granular. Os resultados simulados se mostraram condizentes com as medições da sucção em campo. Entretanto, a simulação considerando o cálculo da radiação por rotina interna do CODE\_BRIGHT gerou resultados mais próximos às medições em campo.

**PALAVRAS-CHAVE:** solos não saturados, sucção, interação solo-atmosfera, radiação, modelagem termo-hidráulica.

**ABSTRACT:** In regions characterized by clear seasonal changes, unsaturated soils experience fluctuations in water content due to water infiltration and evaporation. These fluctuations are closely tied to meteorological and atmospheric phenomena, gaining particular significance during periods marked by extreme weather events such as heavy precipitation or intense heat waves. The variations in water content directly impact soil behavior through changes in suction. Therefore, understanding the seasonal variation of atmospheric variables and its correlation with soil suction is crucial, particularly in tropical climates, where geotechnical failures can lead to significant human and material losses. This work focuses on developing a thermo-hydraulic model to analyze suction in unsaturated soil within a tropical climate, aiming to establish a modeling protocol for investigating soil-atmosphere interactions. The finite element program CODE\_BRIGHT was used and both thermal and hydraulic data from the simulated soil and meteorological variables from the meteorological station of the National Institute of Meteorology were considered. Two approaches were employed to define

net radiation: one using shortwave radiation data obtained from the meteorological station, and other adopting an internal routine within CODE\_BRIGHT for calculating this radiation. The simulated results were then compared with each other and validated against field measurements of suction obtained through tensiometers and granular matrix sensors. The findings indicated a consistency between the simulated results and field measurements of suction. Notably, simulations incorporating radiation calculated by CODE\_BRIGHT's internal routine showed a closer resemblance to field measurements, suggesting its efficacy in modeling soil-atmosphere interactions.

**KEYWORDS:** unsaturated soils, suction, soil-atmosphere interactions, radiation, thermo-hydraulic model.

## 1 INTRODUÇÃO

O comportamento de solos não saturados e o desempenho de diversas obras de engenharia são influenciados pela interação entre o solo e a atmosfera (BLIGHT, 1997). Nesse contexto, entra em cena a ocorrência de mudanças climáticas, as quais podem afetar a magnitude e frequência da precipitação, evapotranspiração e o conteúdo de água no solo. Com isso, há influência nas condições de fluxo que ocorrem através do solo (STRAUCH et al., 2015).

Como o conteúdo de água no solo tem relação com a sucção (a partir da curva de retenção), a variação da umidade do solo pode causar variação na sucção e, dessa maneira, na resistência do solo. Como confirmam Toll et al. (2011) e Ruge et al. (2016), a sucção pode provocar mudanças nas propriedades mecânicas e hidráulicas do solo.

Outro aspecto a ser considerado é que a sucção e mudanças no conteúdo de água no solo sofrem variações anuais e sazonais (BLIGHT, 1997, 2003; CUI et al., 2005). Assim, nos períodos mais secos do ano, o aumento da sucção ocorre com a redução da umidade do solo (BICALHO; BOUSSAFIR; CUI, 2018). Portanto, o estudo da variação sazonal da sucção é importante especialmente em climas com estações de seca e chuva bem definidas, como é o caso do clima tropical brasileiro.

Nesse cenário, a sucção no solo é uma variável de interesse, pois sua variação, que pode ocorrer em função da variação sazonal das variáveis atmosféricas, pode afetar o desempenho de obras de engenharia. Segundo Rahardjo e Satyanaga (2020), a redução da resistência ao cisalhamento do solo, em decorrência das variações da sucção, pode levar a falhas geotécnicas e, por conseguinte, a perdas de vidas humanas.

Assim, esse trabalho tem como objetivo simular numericamente a variação da sucção para um solo não saturado em clima tropical da cidade de Bauru (SP). Nas simulações, foram consideradas diferentes abordagens para a definição da radiação solar, que é uma das variáveis atmosféricas que afeta as condições de fluxo no solo e, portanto, a própria sucção. Nesse contexto, a validação de um protocolo de simulação para solos não saturados em clima tropical é essencial para a previsão da sucção com base em dados atmosféricos que variam no tempo.

## 2 FORMULAÇÃO

Para as simulações numéricas, foi usado o programa de elementos finitos CODE\_BRIGHT, cuja formulação foi apresentada inicialmente por Olivella et al. (1994) e cujos detalhes da implementação podem ser encontrados em Olivella et al. (1996).

### 2.1 Equações de balanço

Para o fenômeno em questão, tem-se um acoplamento termo-hidráulico e, dessa maneira, são apresentadas as equações de balanço de massa de água (equação 1) e de balanço de energia interna (equação 2).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_t^w S_t \phi + \theta_g^w S_g \phi) + \nabla \cdot (\mathbf{j}_t^w + \mathbf{j}_g^w) = f^w \quad (1)$$

em que  $\theta_l^w$  e  $\theta_g^w$  são as massas volumétricas de água nas fases líquida e gasosa, respectivamente;  $S_l$  e  $S_g$  são as saturações nas fases líquida e gasosa, respectivamente;  $\phi$  é a porosidade do meio;  $\nabla \cdot (\bullet)$  é o operador divergente de  $(\bullet)$ ;  $\mathbf{j}_l^w$  e  $\mathbf{j}_g^w$  são, respectivamente, os fluxos totais de massas de água nas fases líquida e gasosa e  $f^w$  é a fonte externa de água.

$$\frac{\partial}{\partial t} [E_s \rho_s (1 - \phi) + E_l \rho_l S_l \phi + E_g \rho_g S_g \phi] + \nabla \cdot (\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{Es} + \mathbf{j}_{El} + \mathbf{j}_{Eg}) = f^E \quad (2)$$

em que  $E_s$ ,  $E_l$  e  $E_g$  são as energias internas das fases sólida, líquida e gasosa por unidade de massa da respectiva fase (energias específicas de cada fase);  $\rho_s$ ,  $\rho_l$  e  $\rho_g$  são as densidades do sólido, líquido e gás, respectivamente;  $\mathbf{i}_c$  é o fluxo de energia por condução;  $\mathbf{j}_{Es}$ ,  $\mathbf{j}_{El}$  e  $\mathbf{j}_{Eg}$  são, respectivamente, os fluxos advectivos de energia das fases sólida, líquida e gasosa;  $f^E$  é o dissipador ou fonte de energia interna.

## 2.1 Equações constitutivas e restrições de equilíbrio

Além das equações de balanço, são necessárias uma série de equações constitutivas e restrições de equilíbrio. As principais equações constitutivas consideradas são: Lei de Darcy, Lei de Fick, Lei de Fourier e curva de retenção. As restrições de equilíbrio são a Lei de Henry e a Lei Psicrométrica. Essas equações são apresentadas em Olivella et al. (1996), sendo que, para a da curva de retenção, os autores consideram o modelo de van Genuchten (1980) com a restrição de Mualem e, assim, é considerado apenas um parâmetro para a definição da forma (ajuste) da curva de retenção. Entretanto, nesse trabalho foi considerada a formulação de van Genuchten (1980) com dois parâmetros para a definição da forma da curva de retenção, o que é apresentado na equação (3). Além disso, na definição da parte térmica, considerou-se que a condutividade térmica ( $\lambda$ ) é função das condutividades térmicas do meio poroso seco ( $\lambda_{dry}$ ) e saturado com água ( $\lambda_{sat}$ ) e tem uma relação linear com a raiz quadrada do grau de saturação do líquido, conforme equação (4).

$$S_l = S_{rl} + \underbrace{\left[ 1 + \left( \frac{P_g - P_l}{P_0 \frac{\sigma^*}{\sigma_0}} \right)^\eta \right]^{-\lambda^*}}_{S_e} (S_{ls} - S_{rl}) \quad (3)$$

em que  $S_e$ ,  $S_{rl}$  e  $S_{ls}$  são as saturações efetiva, residual e máxima, respectivamente;  $\lambda^*$  e  $\eta$  são parâmetros de ajuste da curva de retenção;  $P_g - P_l$  é a diferença entre as pressões no gás e no líquido, o que corresponde à sucção no solo;  $P_0$  é uma medida de pressão a uma certa temperatura e  $\sigma_0$  é a tensão superficial na temperatura em que  $P_0$  foi medida.

$$\lambda = \lambda_{sat} \sqrt{S_l} + \lambda_{dry} (1 - \sqrt{S_l}) \quad (4)$$

## 2.2 Condição de contorno atmosférica

A condição de contorno atmosférica (condição de contorno de fluxo) é escrita em função das variáveis de estado do problema (pressões no líquido, gás e temperatura) ou a partir de variáveis dependentes e também

considerando dados meteorológicos que variam no tempo. As equações do fluxo de ar, água e energia (atmosféricos) são vistas nas equações (5), (6) e (7), respectivamente.

$$j_a = (1 - \omega_g^w) \gamma_g (P_g - P_{ga}) \quad (5)$$

em que  $j_a$  é o fluxo de ar;  $\omega_g^w$  é a fração mássica de água na fase gasosa;  $\gamma_g$  é o coeficiente de vazamento do gás;  $P_g$  é a pressão no gás e  $P_{ga}$  é a pressão atmosférica (dado do radar meteorológico).

$$j_w = k_{rain} P + k_{evap} E + j_g^w + j_{sr} \quad (6)$$

em  $j_w$  é o fluxo de água;  $P$  é a precipitação;  $E$  é a evaporação;  $j_g^w$  é o fluxo advectivo de vapor na fase gasosa;  $j_{sr}$  é o escoamento superficial;  $k_{rain}$  e  $k_{evap}$  são coeficientes utilizados para desabilitar, respectivamente, os termos da precipitação e evaporação da equação do fluxo de água.

$$j_e = k_{rad} R_n + H_s + H_c \quad (7)$$

em  $j_e$  é o fluxo total de energia;  $R_n$  é a radiação líquida, dada pela equação (8);  $H_s$  e  $H_c$  são, respectivamente, os fluxos de calor sensível e latente e  $k_{rad}$  é o coeficiente utilizado para desabilitar a radiação líquida da equação do fluxo total de energia.

$$R_n = (1 - A_l) R_m + R_a - \varepsilon \sigma T^4 \quad (8)$$

em que  $A_l$  é o albedo do solo;  $R_m$  é a radiação solar;  $R_a$  é a radiação de onda longa;  $\varepsilon$  é a emissividade;  $\sigma$  é a constante de Stefan–Boltzman;  $T$  é a temperatura da superfície.

Na equação (8),  $R_m$  corresponde à radiação de onda curta obtida pelo radar meteorológico. Entretanto, essa variável também pode ser calculada por uma rotina interna do CODE\_BRIGHT, podendo ser função das variáveis: latitude, duração da noite, mergulho, rumo e tempo quando começa o outono. Assim, este trabalho irá comparar o resultado da sucção simulada por essas duas considerações de radiação e verificar qual das duas opções gera resultados de sucção mais condizentes com a situação de campo.

### 2.3 Simulações numéricas

A simulação numérica da sucção foi realizada para uma coluna de solo de 5 m de largura por 30 m de altura para um período de dois anos. Os dados atmosféricos foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em intervalos horários, mas, para as simulações, foram considerados dados diários dessas variáveis. Assim, os dados nos intervalos de interesse (de um em um dia) foram determinados a partir de um valor médio dos valores das variáveis atmosféricas (dadas em valores horários) para realizar as simulações. Exceção ocorre para a pressão no gás, cujo valor foi mantido constante e igual a 0,1 MPa, e para a precipitação, em que foi considerado o valor acumulado em 24 horas.

Por fim, a malha de elementos finitos considerada é formada por elementos retangulares e é densificada na superfície, uma vez que a interação solo-atmosfera tem mais influência nas proximidades com a superfície do terreno. Para definir a malha mais otimizada para as simulações, foi feito um teste de convergência de malha. Para tanto, foi necessário comparar os resultados simulados da sucção ao longo do tempo para uma mesma profundidade, considerando um tipo de malha de elementos finitos com diferentes níveis de discretização, sendo feitas comparações para profundidades em que há leituras da sucção em campo pelos sensores de matriz granular.

Inicialmente, verificou-se que o número de divisões da malha na vertical não influencia significativamente nos resultados, o que é de se esperar, uma vez que o fluxo é unidirecional nos casos simulados. Assim, manteve-se constante (e igual a 3) o número de divisões na vertical e variou-se o número de divisões na horizontal, sempre mantendo a malha mais densificada na superfície. Ao aumentar o número de divisões na horizontal e verificar visualmente num gráfico de sucção ao longo do tempo que são similares os resultados simulados entre uma malha com mais divisões na horizontal e outra com menos, considerou-se que a malha mais otimizada é aquela com menos divisões.

### 2.1.1 Parâmetros do solo

O solo simulado nessa pesquisa é localizado no campo experimental da Faculdade de Engenharia da UNESP de Bauru-SP, correspondendo a uma areia fina argilosa vermelha com índice de vazios diminuindo com a profundidade. Nesse solo, há uma separação de horizontes laterítico e não laterítico entre 13 m e 14 m de profundidade (GIACHETI, COELHO E CARVALHO, 1998). Ademais, não foi encontrado o nível d'água até 30 m de profundidade (ROCHA, 2018).

Para as simulações numéricas, considerou-se como dados para a curva de retenção:  $P_0 = 5,136 \times 10^{-3}$  MPa,  $\lambda^* = 1,516$ ,  $S_{rl} = 0,2487$ ,  $S_{ls} = 1,000$  e  $\eta = 1,261$ . Estes dados foram obtidos ajustando matematicamente, pela equação (3), pares de sucção e umidade do solo determinados por Saab (2016). Além disso, como outro dado hidráulico, considerou-se  $k = 1 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>, sendo que  $k$  é a permeabilidade intrínseca determinada com base em Yacoub et al. (2022). Quanto aos dados térmicos, considerou-se que  $\lambda_{dry} = 0,3$  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> e  $\lambda_{sat} = 2,2$  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, sendo esses dados para um solo arenoso com 40% de porosidade conforme Shuttleworth (2012).

Salienta-se que os parâmetros da condição de contorno atmosférica e demais parâmetros necessários para as simulações foram determinados com base em dados atmosféricos e nas características do meio. Mais detalhes podem ser encontrados em Santos (2023).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações numéricas foram feitas para os anos de 2016 e 2017, anos em que há leituras da sucção por sensores de matriz granular e tensiômetros instalados no campo experimental da UNESP de Bauru. Os sensores de matriz granular e os tensiômetros têm uma limitação de leitura da sucção respectivamente de 200 kPa e 85 kPa.

A pressão no líquido foi determinada numericamente e, assim, determinou-se a sucção para as mesmas profundidades em que há leitura dos sensores. Nas simulações, foram consideradas duas abordagens para a definição da radiação de onda curta. A primeira é a determinação dessa variável por rotina interna do CODE\_BRIGHT. Já a segunda consiste na determinação da radiação solar a partir do tratamento dos dados horários obtidos do radar meteorológico, sendo que os valores tratados (por um valor médio nos intervalos de interesse) são inseridos no programa para as simulações.

Resultados da sucção ao longo do tempo para as profundidades de 0,4 m, 3 m e 5 m são apresentados, respectivamente, nas Figuras 1, 2 e 3. Salienta-se que, nessas figuras, a simulação com a primeira consideração de radiação (uso da rotina interna do CODE\_BRIGHT) está referenciada como “Simulação 1”. Analogamente, a simulação feita com a segunda consideração de radiação (uso de dados do radar meteorológico) está referenciada como “Simulação 2”.

### Profundidade: 0,4 m

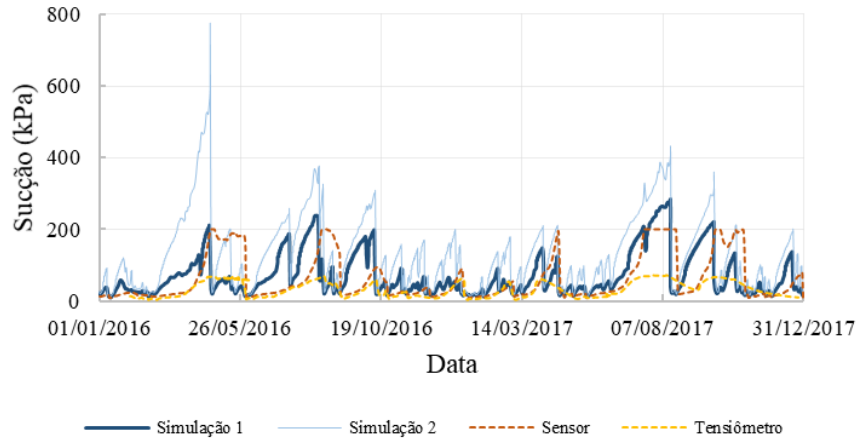


Figura 1. Sucção para a profundidade de 0,4 m.

### Profundidade: 3 m

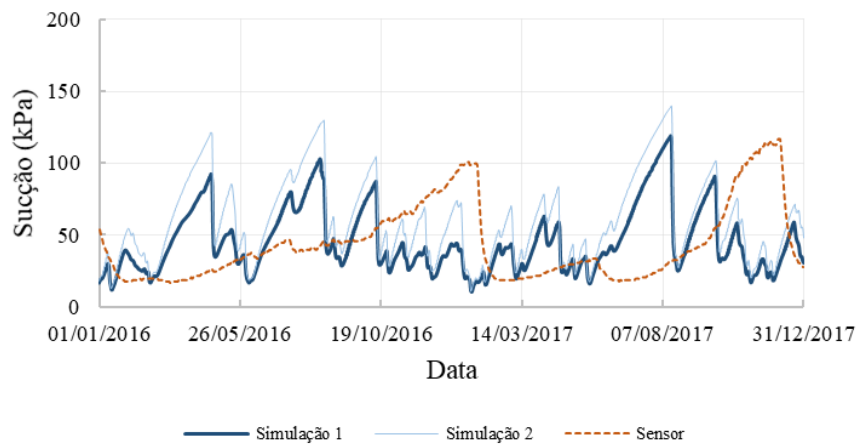


Figura 2. Sucção para a profundidade de 3 m.

### Profundidade: 5 m

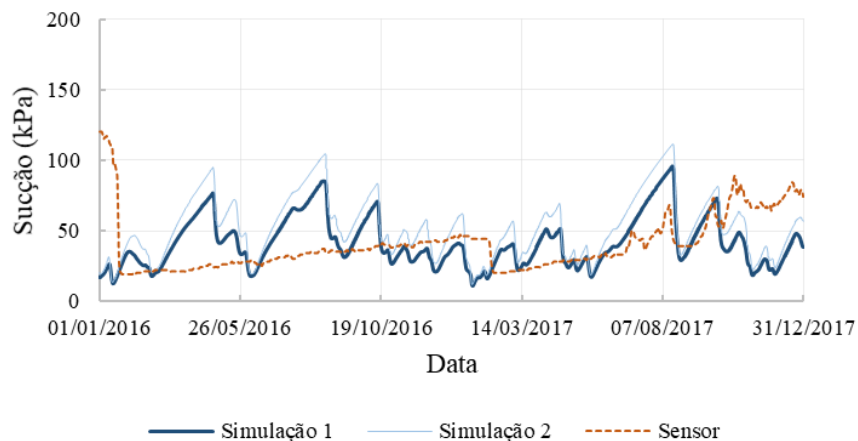


Figura 3. Sucção para a profundidade de 5 m.

Apesar da limitação na medida da sucção pelos tensiômetros, observa-se que, até a faixa de 85 kPa, os valores medidos apresentam tendência de comportamento parecida com a curva obtida pelo sensor de matriz granular. Quanto às curvas simuladas, observa-se que ambas as considerações de radiação solar geram curvas com mesma tendência. Entretanto, para as profundidades mais rasas, onde a influência atmosférica é maior, tendem a ser maiores os valores de sucção simulada considerando os dados do radar meteorológico para a definição da radiação de onda curta. Com o aumento da profundidade, as curvas simuladas por ambas as considerações de radiação tendem a ficar mais próximas (com mesma magnitude de valores). Nesse aspecto, observa-se que as maiores variações da sucção ocorrem na proximidade da superfície.

Para a comparação dos resultados (resultados simulados e medidos em campo), é importante considerar a faixa de valores em que a sucção é medida em campo pelos sensores de matriz granular e pelos tensiômetros. Valores acima dos limites não são lidos pelos equipamentos e, dessa maneira, não se sabe o real valor da sucção, o que impossibilita a comparação como os valores simulados numericamente.

Observando-se as Figuras 1, 2 e 3, nota-se que ambos os métodos de consideração da radiação solar geram resultados condizentes com as medições em campo da sucção. Entretanto, melhores resultados são obtidos quando a radiação solar é calculada por rotina interna do CODE\_BRIGHT.

#### 4 CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou um estudo comparativo entre respostas obtidas via simulação numérica e dados de campo para sucção em uma areia fina argilosa em clima tropical. A condição de contorno solo-atmosfera foi escrita a partir de dados meteorológicos que variam em função do tempo. Nas simulações numéricas foram consideradas duas abordagens para a definição da radiação solar: i) a primeira considerou essa radiação por meio de uma rotina interna do CODE\_BRIGHT; ii) a segunda abordagem consistiu no uso de dados horários de radiação de onda curta provenientes de um radar meteorológico. Por fim, os principais resultados obtidos foram:

- O protocolo de modelagem numérica da interação solo-atmosfera, com cálculo da sucção conforme apresentado, mostrou-se eficaz para os casos e profundidades analisados. Os resultados das simulações numéricas foram capazes de representar as tendências gerais das curvas de campo, com boa concordância com as medidas de sucção dos tensiômetros e sensores de matriz granular. Isso indica que a construção do modelo termohidráulico é consistente, podendo ser estendido para estudos mais aprofundados sobre o tema;
- As variações da sucção observadas foram maiores nas proximidades com a superfície, onde o solo interage mais com a atmosfera do que nas cotas mais profundas, onde a interação com a atmosfera é menor. Esse comportamento também foi representado com as simulações numéricas;
- As curvas simuladas numericamente apresentaram boa concordância com as curvas de campo, com maior aproximação (mesma magnitude dos resultados) nas maiores profundidades;
- A consideração da radiação solar calculada por rotina interna do CODE\_BRIGHT gera resultados de sucção mais condizentes com as medições em campo.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bicalho, K. V., Boussafir, Y., Cui, Y. -J. (2018) Performance of an instrumented embankment constructed with lime-treated silty clay during four-years in the Northeast of France. *Transportation Geotechnics*, 17, p. 100–116.
- Blight, G. E. (1997) Interactions between the atmosphere and the Earth. *Géotechnique*, 47 (4), p. 715–767.
- Blight, G. E. (2003) The vadose zone soil-water balance and transpiration rates of vegetation. *Géotechnique*, 53 (1), p. 55–64.

- Cui, Y. J. et al. (2005) Field simulation of in situ water content and temperature changes due to ground-atmospheric interactions. *Géotechnique*, 55 (7), p. 557–567.
- Giacheti, H. L., Coelho, V., Carvalho, D. (1998) Caracterização geotécnica de dois perfis de solos tropicais com base em ensaios de laboratório. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, Brasília/DF, *Anais...*, v. 1. p. 195-202.
- Olivella, S. et al. (1994) Nonisothermal Multiphase Flow of Brine and Gas Through Saline Media. *Transport in Porous Media*, 15, p. 271–293.
- Olivella, S. et al. (1996) Numerical formulation for a simulator (CODE\_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. *Engineering Computations*, 13 (7), p. 87–112.
- Rahardjo, H., Satyanaga, A. (2020) Unsaturated soil mechanics for sustainable urban development. In: 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 14/10/2019 – 18/10/2019, Taipei, Taiwan, *Proceedings...*
- Rocha, B. P. (2018) *Caracterização Geotécnica de Solos Tropicais Não Saturados por meio de Ensaios de Campo*. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 242p.
- Ruge, J. C. et al. (2016) Implications of the atmosphere-soil interaction for the design of earth retaining structures. In: 3rd European Conference on Unsaturated Soils, Paris, 2016. *Proceedings...*, EDP Sciences - E3S Web of conferences. v. 9, 12002.
- Saab, A. L. (2016) *Influência da sucção nos parâmetros de compressibilidade de um solo não saturado*. 2016. 125p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru.
- Santos, C. H. B. (2023) *Estudo numérico do efeito da interação solo-atmosfera sobre a variação sazonal da sucção em clima tropical*. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru.
- Shuttleworth, W. J. (2012) *Terrestrial Hydrometeorology*. John Wiley & Sons.
- Strauch, A. M. et al. (2015) Climate driven changes to rainfall and streamflow patterns in a model tropical island hydrological system. *Journal of Hydrology*, 523, p. 160-169.
- Toll, D. G. et al. (2011) Soil suction monitoring for landslides and slopes. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 44, p. 23–33.
- van Genuchten, M. T. (1980) A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, p. 892–898.
- Yacoub, J. D. et al. (2022) Estudo da Condutividade Hidráulica de um Perfil de Solo Arenoso Empregando um Permeâmetro de Parede Flexível. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. *Anais eletrônicos...* Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/papers/estudo-da-condutividade-hidraulica-de-um-perfil-de-solo-arenoso-por-meio-de-ensaios-de-campo-e-laboratorio>>. Acesso em: 28 jul. 2022.