



Simulação Numérica e Física de Radier Assente em Solo Colapsível Submetido a Inundação

Saul Oliveira da Silva

Mestrando em Geotecnia, UnB - Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil,
saul.alagoas@gmail.com

Juan Félix Rodriguez Rebolledo

Professor Adjunto, UnB - Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, jrodriguezr72@unb.br

Belaniza Gaspar Santos Neta

Doutoranda em Geotecnia, UnB - Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil,
belanizagsn@gmail.com

André Luís Brasil Cavalcante

Professor Associado, UnB - Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, abrasil@unb.br

RESUMO: Os solos colapsíveis são aqueles que sofrem uma diminuição considerável de volume ao serem expostos a um aumento de umidade, mesmo sem o acréscimo de tensões externas. A simulação numérica e experimental deste fenômeno para o entendimento do comportamento de fundações superficiais e profundas é relativamente complexa, já que envolve fenômenos relacionados a solos não-saturados e fluxo transiente. Diante disso, este estudo tem como objetivo apresentar a simulação numérica do processo de inundação de um solo colapsível do Distrito Federal (Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Brasília), onde foi construído um modelo físico de referência formado por um radier e um sistema de drenos verticais. A simulação foi realizada utilizando o Método dos Elementos Finitos no software Plaxis, com a implementação do modelo hidráulico de Costa e Cavalcante, proposto em 2021. Após comparar os resultados da análise numérica com os que foram obtidos em campo, observou-se que o modelo usado conseguiu reproduzir de maneira apropriada o processo de inundação realizado, de tal forma que pode ser utilizado também para simular numericamente, juntamente com um modelo mecânico adequado, o próprio fenômeno do colapso e o comportamento de sistemas de fundação mais complexos em tal situação.

PALAVRAS-CHAVE: Inundação, Radier, Método dos Elementos Finitos, Solos Colapsíveis.

ABSTRACT: Collapsible soils are those that suffer a considerable reduction in volume when exposed to an increase in water content, even without the addition of external loading. Numerical and experimental simulation of this phenomenon to understand the behavior of shallow and deep foundations is relatively complex, since it involves phenomena related to unsaturated soils and transient flow. In view of this, this study aims to present the numerical simulation of the flooding process of a collapsible soil in the Distrito Federal (Experimental Geotechnical Field of the University of Brasília), where was built a physical reference model consisting of a raft and a system of vertical drains. The simulation was carried out using the Finite Element Method in the Plaxis software, with the implementation of the Costa and Cavalcante hydraulic model, proposed in 2021. After comparing the results of the numerical analysis with those obtained in the field, it was observed that the model used managed to properly reproduce the flooding process carried

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



out, in such a way that it can also be used to simulate numerically, together with an adequate mechanical model, the phenomenon of collapse and the behavior of more complex foundation systems in such a situation.

KEYWORDS: Flooding, raft, finite element method, collapsible soils.

1 Introdução

A mecânica dos solos se desenvolveu, desde o início, direcionando suas análises ao estudo de solos em condição totalmente seca ou totalmente saturada, no entanto, esses são apenas casos particulares em que o material pode se encontrar, de modo que normalmente o solo está em condição não-saturada (VILAR, 2004).

Dentre os fenômenos abordados pela mecânica dos solos não saturados está o colapso do solo, que consiste em uma significativa redução de volume com a diminuição da sucção, provocada pelo aumento do teor de umidade. Solos com tal característica podem ser encontrados em alguns locais do Brasil, como é o caso do Distrito Federal (LEÓN *et al.*, 2020), onde foi realizada a presente pesquisa.

Este trabalho faz parte de um projeto envolvendo a Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) e o Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (PPGG), no qual são realizadas simulações físicas e numéricas do colapso do solo devido ao carregamento e inundação utilizando dois modelos de radiers, um reforçado com inclusões rígidas e um modelo de referência (sem inclusões).

Apesar de ter sido realizada a simulação física do colapso do solo devido à inundação e ao carregamento de ambos os modelos, no presente trabalho será abordado apenas o processo de inundação do modelo de referência, de tal forma que os resultados obtidos na simulação numérica serão fundamentais em análises envolvendo também o modelo com as inclusões rígidas.

De acordo com Gomes (2020), o método mais adequado para realizar tal processo de inundação é por meio da utilização de drenos verticais, devido à inviabilidade de serem construídas cavas no modelo reforçado, dessa forma, tal foi a técnica utilizada para inundar o subsolo. Ademais, próximo à entrada do tubo alimentador do sistema de inundação, decidiu-se colocar um medidor de vazão, instrumento capaz de registrar a vazão instantânea que entra na tubulação e o volume total utilizado no processo, dados necessários para realizar a modelagem numérica da inundação.

Em vista disso, este artigo busca apresentar a simulação numérica e física do processo de inundação de um solo colapsível do Distrito Federal, onde foi construído um modelo de referência de radier com sistema de inundação por drenos, utilizando o modelo hidráulico de Costa e Cavalcante (2021) para simular o fluxo de água no solo.

2 Metodologia

Para realizar a simulação numérica do processo de inundação do subsolo colapsível foi utilizado o Método dos Elementos Finitos (MEF) com o software Plaxis 2D. O modelo numérico foi elaborado para representar de maneira aproximada o sistema de inundação construído juntamente com um radier no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade de Brasília (CEG-UnB), localizado na Asa Norte, em Brasília.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



O radier foi construído com diâmetro de 3 m, espessura de 30 cm e f_{ck} de 25 MPa, nele foi instalado o sistema de inundação, com a presença de 12 drenos (tubos de PVC circulares com 5 cm de diâmetro) que descem até o final da camada colapsível (3,5 m abaixo do nível do terreno) e realizam, através de furos em suas paredes, a inundação do subsolo. A Figura 1 apresenta o corte da fundação, bem como a disposição dos drenos na projeção do radier, de modo que a Figura 2 mostra o radier antes da concretagem, onde é possível ver a parte superior do sistema de inundação.

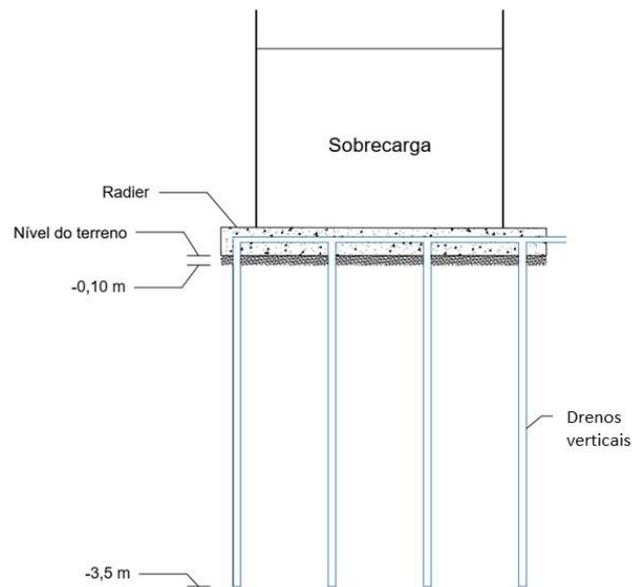


Figura 1. Sistema de inundação para o modelo físico de referência.



Figura 2. Modelo físico de referência antes da concretagem do radier.

Na modelagem numérica, a estratigrafia do local foi resumida a duas camadas: uma camada colapsível até a profundidade de 3,5 m e uma camada de solo residual laterítico estendida até 12

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



m abaixo do nível do terreno. A Figura 3 apresenta a malha do modelo representado de maneira axissimétrica.

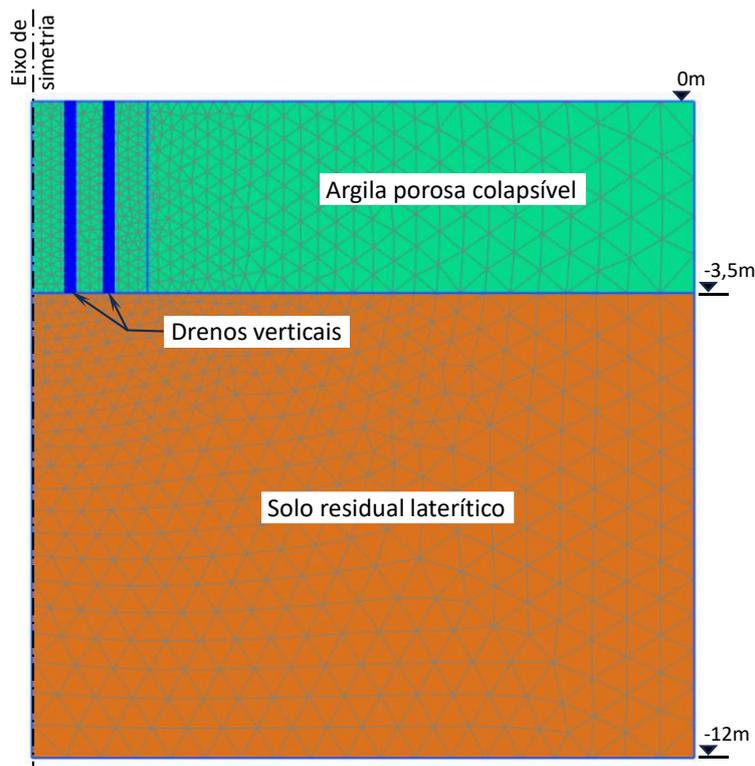


Figura 3. Representação da malha do modelo axissimétrico.

Nota-se que, tratando como axissimétrico, o sistema de inundação foi modelado no MEF como “duas paredes de inundação”, representadas no software através dos elementos chamados de *infiltration well*. A parede com raio menor envolve geometricamente os quatro drenos internos, enquanto que a parede com raio maior engloba os outros oito drenos. O raio da primeira parede é de 0,7 m, correspondente à distância de cada um dos quatro drenos internos até o centro do radier, enquanto que o raio da segunda parede vale 1,4 m, que é a distância dos drenos externos para o centro da fundação superficial. Essa proposta de representação no sistema axissimétrico é apresentada em planta na Figura 4.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



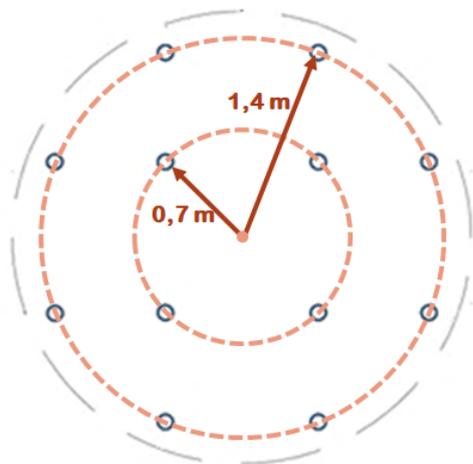


Figura 4. Representação em planta da proposta de inundação axissimétrica.

Os parâmetros mecânicos do solo do Campo Experimental foram obtidos previamente por Guimarães (2002), enquanto que a determinação dos coeficientes de permeabilidade horizontal e vertical foi realizada a partir de dois ensaios seguindo o procedimento da USBR 7300-89 (DOI, 1989), de modo que, a partir do valor médio de condutividade hidráulica calculado nesse procedimento, foi feita uma análise paramétrica para se obter a curva vazão *versus* tempo mais próxima aos pontos do ensaio, considerando uma razão entre a permeabilidade horizontal e vertical maior que um.

A Figura 5 apresenta a curva vazão *versus* tempo obtida como resultado da análise paramétrica em comparação com os conjuntos de dados provenientes dos dois ensaios de permeabilidade executados.

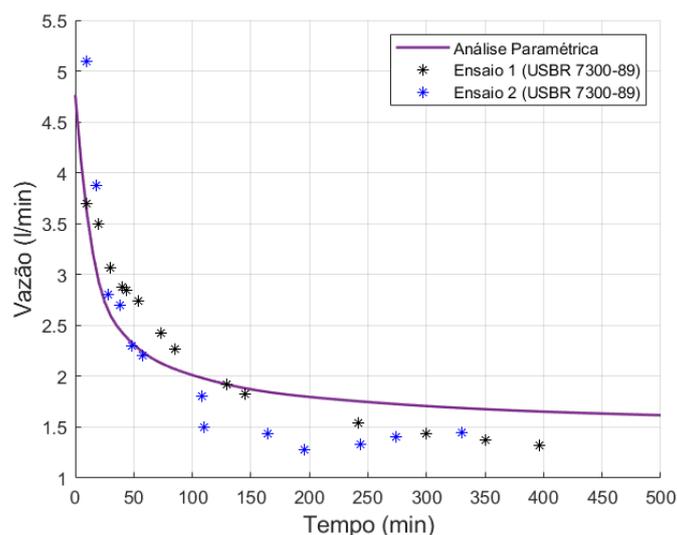


Figura 5. Curva vazão *versus* tempo obtida da análise paramétrica.

Da mesma forma, para determinar as cargas hidráulicas como condições de fluxo iniciais também foi realizada uma análise paramétrica, mas dessa vez tendo como referência o perfil de umidade do local em uma época próxima à simulação física.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



2.1 Modelo hidráulico

Para determinar a curva característica e a função k , importantes funções para a análise do fluxo de água no solo em condição não saturada, foi utilizada a proposição de Costa e Cavalcante (2021). Tal modelo é proveniente das equações de Cavalcante e Zornberg (2017) e consiste na representação bimodal da curva de retenção de água no solo (Equação 1) e da função k (Equação 2), formuladas a partir de superposição linear.

$$\theta(|\psi|) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [\lambda \cdot \exp(-\delta_1 |\psi|) + (1 - \lambda) \cdot \exp(-\delta_2 |\psi|)] \quad (1)$$

$$k(|\psi|) = k_s [\lambda \cdot \exp(-\delta_1 |\psi|) + (1 - \lambda) \cdot \exp(-\delta_2 |\psi|)] \quad (2)$$

θ_s , θ_r e k_s são valores fixos, correspondentes ao teor de umidade volumétrica saturado, residual e à condutividade hidráulica saturada, respectivamente. Os dois primeiros foram obtidos de Silva (2022) e a permeabilidade saturada foi o valor proveniente da análise paramétrica nas direções horizontal e vertical.

λ , δ_1 e δ_2 são parâmetros do modelo e que, assim como no modelo hidráulico de Cavalcante e Zornberg (2017), apresentam também significado físico. Esses parâmetros foram ajustados de acordo com as curvas características de Silva (2022), de modo que a partir de sua determinação foi possível plotar a curva característica e a função k para o subsolo estudado, como é apresentado na Figura 6.

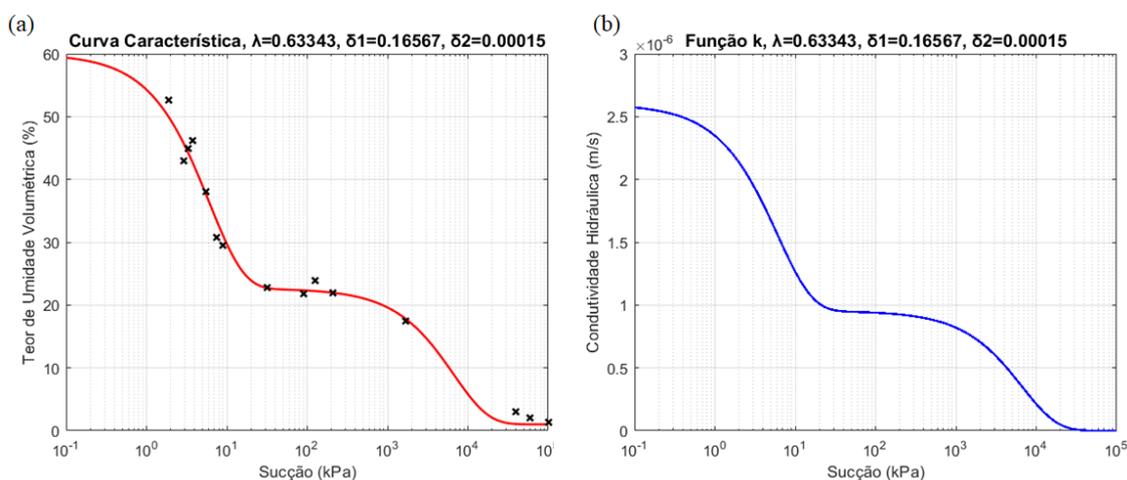


Figura 6. (a) curva característica do solo (b) função k do solo.

Na Figura 6-a estão plotados os pontos dos ensaios de Silva (2022) para se ter uma noção do quão próxima foi a curva ajustada pelo modelo, de modo que, tendo os parâmetros do modelo hidráulico e o valor da condutividade hidráulica saturada proveniente da análise paramétrica, foi construída também a função k (Figura 6-b).

Uma vez definidos os parâmetros do solo e as condições hidráulicas, foi realizada a simulação numérica do processo de inundação com os valores de vazão registrados na simulação física divididos em cinco intervalos, visto a impossibilidade de inserir nos *Infiltration Wells* uma

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



curva contínua de vazão *versus* tempo. A curva registrada na simulação física e as cinco etapas representativas utilizadas estão ilustradas na Figura 7.

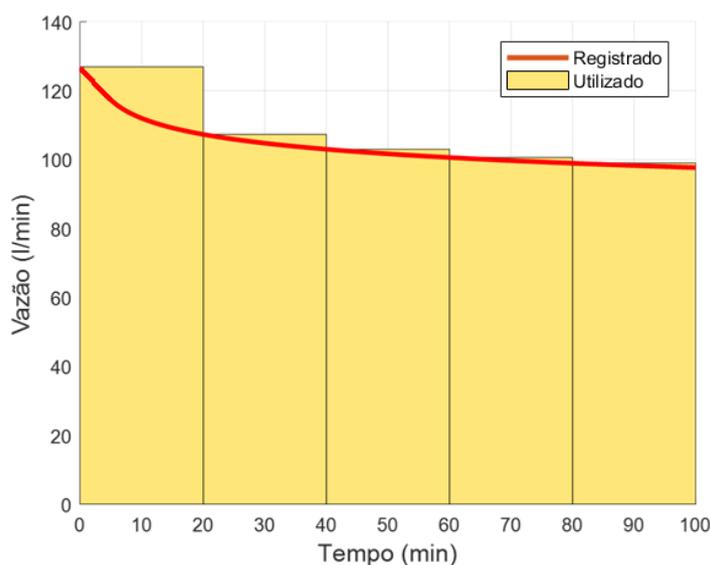


Figura 7. Variação da vazão registrada e utilizada.

Observa-se que a vazão diminui com o tempo, devido à saturação do solo, iniciando com um valor máximo de 126,9 l/min e finalizando com uma vazão estabelecida de 99 l/min. Ademais, por meio do medidor de vazão instalado, foi registrado, além dos valores de vazão instantânea, o volume total infiltrado, de 20812,25 litros, condizente com o obtido na aproximação utilizada.

3 Resultados e discussões

Seguindo a metodologia descrita foi realizada a simulação numérica do processo de inundação do subsolo considerando os tempos e vazões apresentados na Figura 7, bem como o modelo de Costa e Cavalcante (2021) e as condições iniciais de carga hidráulica e permeabilidade obtidas e apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições iniciais obtidas das análises paramétricas.

Parâmetro	Valor	Unidade
Coefficiente de permeabilidade horizontal	$9,14 \cdot 10^{-7}$	m/s
Coefficiente de permeabilidade vertical	$2,29 \cdot 10^{-7}$	m/s
Carga hidráulica máxima	-12,145	m
Carga hidráulica mínima	-21,296	m

Tendo realizada a simulação numérica do processo de inundação do subsolo, foi obtido, logo após o fim dos 100 minutos de inundação, o bulbo de saturação apresentado na Figura 8.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



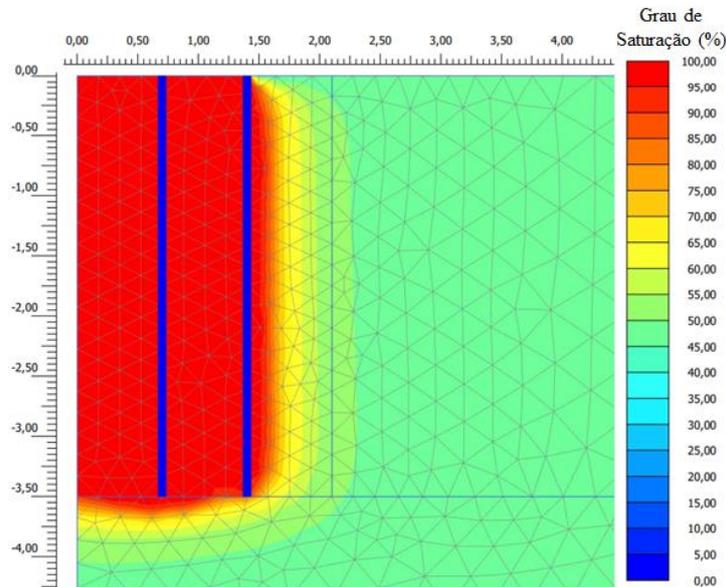


Figura 8. Bulbo de saturação obtido numericamente ao final do processo de inundação.

Observa-se que, ao final do processo de inundação, foi obtido da simulação numérica uma zona totalmente saturada compreendida em um bulbo de raio igual a quase 1,6 m. Tal valor foi observado de maneira semelhante em campo no modelo físico, onde foi notada uma surgência de água em uma região superior a 10 cm da borda do radier, que tem raio 1,5 m, ou seja, uma zona saturada com raio de pouco mais de 1,6 m, como ilustrado na Figura 9.



Figura 9. Zona de inundação observada na simulação física.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





A partir desse resultado, verifica-se que a metodologia utilizada, ainda que simplificada, conseguiu reproduzir de maneira apropriada o que foi observado na simulação física envolvendo o processo de inundação do subsolo.

Pode-se, portanto, utilizar tal metodologia para a simulação do colapso do subsolo, juntamente com os modelos constitutivos que consigam simular o comportamento mecânico da argila porosa, visto que para analisar corretamente o fenômeno do colapso é necessário considerar corretamente o fluxo e a deformabilidade do meio.

4 Conclusões

Em vista do que foi obtido da simulação numérica, verifica-se, a partir da comparação com o modelo físico realizado no Campo Experimental da Geotecnia-UnB, que o modelo de Costa e Cavalcante (2021), bem como a metodologia utilizada para obtenção das condições iniciais e dos parâmetros necessários, apresentou uma boa assertividade em reproduzir o fluxo de água no substrato submetido ao processo de inundação por meio dos drenos.

Conclui-se ainda que, tendo conseguido reproduzir bem a inundação do subsolo, o modelo pode ser utilizado também como componente para simular o processo de colapso do solo juntamente com um modelo mecânico adequado, como o Barcelona Basic Model (ALONSO, GENS, JOSA, 1990).

Usando dita metodologia, em trabalhos futuros serão realizadas simulações físicas e numéricas envolvendo sistemas de fundações mais complexos submetidos a processos de inundação e colapso.

AGRADECIMENTOS

À FAPDF, pelo financiamento da simulação física realizada no Campo Experimental da Geotecnia-UnB.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, pelas condições fornecidas para realização do presente trabalho.

À CAPES pelo incentivo financeiro proporcionado aos autores do presente trabalho, possibilitando assim também o bom êxito na realização da pesquisa.

Ao grupo de pesquisa GeoFluxo, pelo devido suporte em determinados momentos da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso, E. E., Gens, A., Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*, 40(3): 405-430.

Cavalcante, A. L. B., Zornberg, J. G. (2017). Efficient Approach to Solving Transient Unsaturated Flow Problems. I: Analytical Solutions. *International Journal of Geomechanics*, 7(7): 4017013.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



- Costa, M. B. A., Cavalcante A. L. B. (2021). Bimodal Soil–Water Retention Curve and k-Function Model Using Linear Superposition. *International Journal of Geomechanics*, 21(7): 04021116.
- Guimarães, R. C. (2002). *Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo de desempenho de estacas escavadas*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183 p.
- León, R. F. P., Rebolledo, J. F. R., Carvalho, J. C., Monteiro, F. F. (2020). Estudo das tensões sob radier assente em solo colapsível reforçado com inclusões rígidas. *Geotecnia*, 150, p. 63-86.
- Silva, F. C. (2022). *Estimativa de curvas características de solos tropicais brasileiros via métodos indiretos*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM 372A/22, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 256 p.
- United States Department of the Interior (DOI). USBR 7300-89: *Performing field permeability testing by the well permeameter method*. Denver, Estados Unidos, 1989.
- Vilar, O. M. (2004). Prefácio. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 5, São Carlos, 2004. *Proceedings...* São Paulo: ABMS, pp. V.

