



Previsão da Capacidade de Carga por meio de métodos semiempíricos em solos potencialmente colapsíveis

Angelo Dotto Ragagnin Prior

Discente do curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,
angelodrprior@hotmail.com

Dêreck Hummel Becher

Discente do curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil,
dereckhecher@gmail.com

Patricia Rodrigues Falcão

Doutoranda no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFSM, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, falcão.rodrigues.patricia@gmail.com

Paula Taiane Pascoal

Doutoranda no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFSM, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, paulatpascoal@gmail.com

Magnos Baroni

Professor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, magnos.baroni@gmail.com

RESUMO: O presente artigo buscou avaliar a perda da capacidade de suporte de estacas escavadas devido a inundação do solo. No estudo, foi utilizada uma estaca com três metros de comprimento e trinta centímetros de diâmetro, executada em Cruz Alta (RS). Foram avaliadas sondagens do tipo *Standart Penetration Test*, sendo uma conduzida em condições naturais e outra sob inundação do terreno. O acréscimo na saturação do solo resultou em uma redução superior a 50% no índice de resistência à penetração. Por conseguinte, os métodos semiempíricos já consagrados na engenharia de fundações são diretamente correlacionados com esse índice. Em outras palavras, em um solo colapsível, ao considerar uma sondagem realizada em período seco, pode ocorrer o subdimensionamento da fundação. No presente trabalho, por exemplo, o Método de Décourt-Quaresma majorou a capacidade da estaca em quase 15%. A inundação do subsolo pode reduzir as propriedades de resistência do material, acarretando diversas patologias nas edificações. Além disso, a perda de capacidade de carga calculada por provas de carga estática com inundação situou-se na faixa de 33%, fato que comprova a importância da realização desse ensaio, tanto na condição natural quanto na condição inundada.

PALAVRAS-CHAVE: Colapsibilidade, redução da resistência, prova de carga estática.

ABSTRACT: The present article aimed to assess the loss of bearing capacity of piles due to flooding. In the study, a bored pile with a length of three meters and a diameter of thirty centimeters was used, executed in Cruz Alta (RS). Standard Penetration Test (SPT) soundings were evaluated, with one conducted under natural conditions and another under flooded terrain conditions. The increase in soil saturation resulted in a reduction of over 50% in the penetration resistance index. Consequently, the well-established semi-empirical methods in foundation engineering are directly correlated with this index. In other words, in collapsible soil, when considering a sounding conducted during a dry period, there can be an underestimation of the

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



Realização:



Avenida Rebouças, 353, Sala 74 A
Cerqueira César, São Paulo/SP, 05401-900
Telefone: (11) 3052-1284
E-mail: abef@abef.org.br

Organização:



Avenida T-9, 2310 - Ed. Inove Intelligent Place
Sala B701, Jardim América, Goiânia/GO, 74255-220
E-mail: secretaria@qeeventos.com.br
Site: www.qeeventos.com.br

foundation's capacity. In the current work, for instance, the Décourt-Quaresma Method increased the pile capacity by almost 15%. Subsoil flooding can diminish the material's strength properties, leading to various pathologies in buildings. Furthermore, the loss of load-carrying capacity calculated through static load tests with flooding was situated in the range of 33%, a fact that underscores the importance of conducting this test both in natural and flooded conditions.

KEYWORDS: Collapsibility, strength reduction, static load proof.

1 Introdução

Conforme Burton, Sheng e Airey (2020) existem poucas informações sobre a mudança de volume e resistência ao cisalhamento de solos não saturados, particularmente, no estado triaxial de tensões. Nessa perspectiva, os solos não saturados de caráter colapsível demonstram-se como relevantes objetos de estudos hodiernos. Nesses solos, a água preenche parcialmente os vazios, fato que gera uma parcela de resistência devido às pressões negativas ou sucções do material. No entanto, à medida em que a umidade se altera com o decorrer das variações climáticas, a capacidade de suporte do solo também varia (FALCÃO, 2021). Dado este cenário, entender o comportamento de estacas neste tipo de solo tem se tornado o motivo de diversas pesquisas de campo, modelos físicos e numéricos (LIU; VANAPALLI, 2021).

Com o objetivo de fomentar os estudos em campo, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) disponibiliza duas normativas que auxiliam na realização de provas de carga em fundações profundas. A primeira, a NBR 16903 (ABNT, 2020), demonstra a metodologia para a execução de provas de carga estática, e a segunda, a NBR 6122 (ABNT, 2022), especifica o número de ensaios a serem realizados. No entanto, estas normas não retratam o comportamento típico dos solos não saturados e tropicais. Na falta de indicações, o mais prudente é identificar a pior situação em que esses solos podem se encontrar e efetuar ensaios nestas circunstâncias, visto que, os parâmetros obtidos serão utilizados, posteriormente, para o dimensionamento da obra.

Dessa forma, segundo Falcão et al. (2023), a inundação do solo está intrinsecamente ligada à redução da sucção e, portanto, é um dos principais fatores da compressão volumétrica decorrente do colapso. Logo, o pior contexto para os solos colapsíveis será a condição em que são inundados. Realizar ensaios como *Standart Penetration Test* (SPT) e provas de carga estática de carregamento lento (PCE), nesta conjuntura, é importante para a concepção da obra. De modo a complementar, Rasi et al. (2019) também evidenciaram tal fenômeno. Ao relatar as causas do colapso em fundações de edificações industriais, os autores verificaram que o subsolo foi infiltrado por águas residuais do processo de fabricação de biodiesel, o que induziu o aparecimento de patologias nas fundações.

Diante do exposto, com o objetivo de estudar o comportamento de um solo com indícios de colapsibilidade, foram executados ensaios SPT e de PCE, tanto na condição natural quanto na condição inundada. Além disso, foram estimadas as capacidades de carga da estaca a partir dos métodos semiempíricos de Décourt-Quaresma (1978) e Aoki-Velloso (1975), em conjunto com os coeficientes apresentados por Velloso e Lopes (2010) para o primeiro, e dos sugeridos por Laprovitera (1998), Benegas (1993) e Monteiro (1997) para o segundo. Assim, foi possível comparar os dados medidos em campo na condição natural e inundada entre si, além de confrontá-los com os estimados pelos métodos semiempíricos.

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



2 Materiais e Métodos

2.1 Caracterização do estudo de caso

O presente estudo foi realizado na cidade de Cruz Alta, no estado do Rio Grande do Sul. Esta localidade está situada no Noroeste Rio-Grandense, sob latitude 28°36'19" S e longitude 53°36'23" W. A caracterização física e classificação do solo pela metodologia Miniatura Compactado Tropical (MCT) foram realizadas a uma profundidade de 2 metros e podem ser observadas na Tabela 1. Em suma, o material refere-se a uma argila silto-arenosa plástica, com comportamento laterítico (LG').

Tabela 1. Caracterização física.

Propriedades geotécnicas	Cruz Alta
% pedregulho (> 2,0 mm)	0,0
% areia (0,6 – 0,2 mm)	16,0
% silte (2,0 µm – 0,06 mm)	22,0
% argila (< 2,0 µm)	63,0
Limite de Liquidez (%)	48,0
Limite de Plasticidade (%)	30,0
Índice de Plasticidade (%)	18,0
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	27,9
Classificação MCT	LG'

Com o objetivo de inferir a respeito do potencial colapsível do solo (PC), foi realizado o ensaio de adensamento oedométrico simples. Cabe mencionar que, no ensaio em questão, carregou-se a amostra até uma tensão de interesse (T_{vi}), neste caso 200 kPa, e após o equilíbrio das variações volumétricas, realizou-se o processo de inundação. Segundo Milititsky *et al.* (2015), o anel de confinamento induz a uma variação unidirecional, já que se assume o diâmetro do anel como constante, logo, a variabilidade volumétrica é expressa apenas em função da altura da amostra. De acordo com Jennings e Knight (1975), sob uma tensão de 200 kPa, quando o PC se situa na faixa de 1 a 5%, o problema é moderado. Se o PC estiver entre 5 e 10%, torna-se problemático. Entre 10 e 20%, a situação se altera para grave, e será muito grave em ocasiões em que for maior que 20%. Por outro lado, segundo Vargas (1978), se o PC é maior que 2%, o solo já é considerado colapsível, independentemente do nível de tensão atuante. Logo, foram utilizadas tais bibliografias para verificar a colapsibilidade do solo em questão.

2.2 Execução do ensaio de provas de carga estática

Diante da possibilidade deste solo ser colapsível, uma das alternativas para a quantificação do recalque devido à colapsibilidade é o ensaio de prova de carga estática. As PCEs foram realizadas com estágios de carregamento lento, em que, à medida que os recalques se estabilizavam, maiores níveis de tensões foram adicionados. Estas foram interrompidas quando a estaca não apresentava deslocamentos maiores que 5% durante 20 minutos. Nesse sentido, foram executados dois ensaios de prova de carga, sendo um na condição natural e o outro sob inundação. Para isso, as estacas de reação possuíam 6,00 m de comprimento e diâmetro de 0,30 m, enquanto

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



a estaca submetida à compressão possuía 3,00 m de comprimento e 0,30 m de diâmetro. O ensaio sob inundação foi realizado um ano após o ensaio na condi o natural, na mesma estaca. Com o intuito de obter essa condi o de inunda o, foram empregados quatro furos preenchidos com areia e submetidos a uma vazão constante em um período de 96 horas. Esses furos possuíam comprimentos de 3,00 m e diâmetros de 5,00 cm.

3 Resultados

Foram executadas duas sondagens SPT, sendo uma na condi o natural e outra com circula o de água, conforme ilustrado na Figura 1 (a). O material foi classificado como uma argila siltosa de consistência muito mole a m dia nos primeiros 3,00 metros. Não foi observado nível d'água durante o ensaio, confirmando a condi o não saturada do solo.

Pode-se observar que o N_{SPT} reduziu em todas as profundidades diante da inunda o do solo, ao chegar, em algumas regiões, com decréscimos maiores que 50%. Tal comportamento   relevante, uma vez que, as normas ainda não consideram as propriedades e características complexas dos solos não saturados (CAMAPUM; GITIRANA, 2021). Tendo em vista que em obras de pequeno e médio porte realiza-se comumente apenas ensaios SPT e estima-se as capacidades de carga das funda es a partir destes, compreender o comportamento do solo   de suma importância. Entretanto, se dimensionadas as edifica es mediante as capacidades de carga do ensaio SPT na condi o natural, haverá um expressivo decréscimo de sua capacidade de suporte em campo, ao passo que, a satura o no solo pode ocorrer devido eventos climáticos ou do homem, fato que propiciar  o surgimento de patologias, recalques, trincas ou até mesmo o colapso.

Na Figura 1 (b) estão apresentados os resultados do ensaio de adensamento oedométrico simples. Esses resultados demonstraram que o solo apresentou um potencial de colapso para a tensão vertical de 200 kPa, de 9,80%. De acordo com Jennings e Knight (1975), o solo   classificado como problemático, uma vez que se concentra na faixa entre 5% e 10%. Para Vargas (1978), o solo   classificado como colapsível, ou seja, a influência da água   imprescindível para a descri o de seu comportamento.

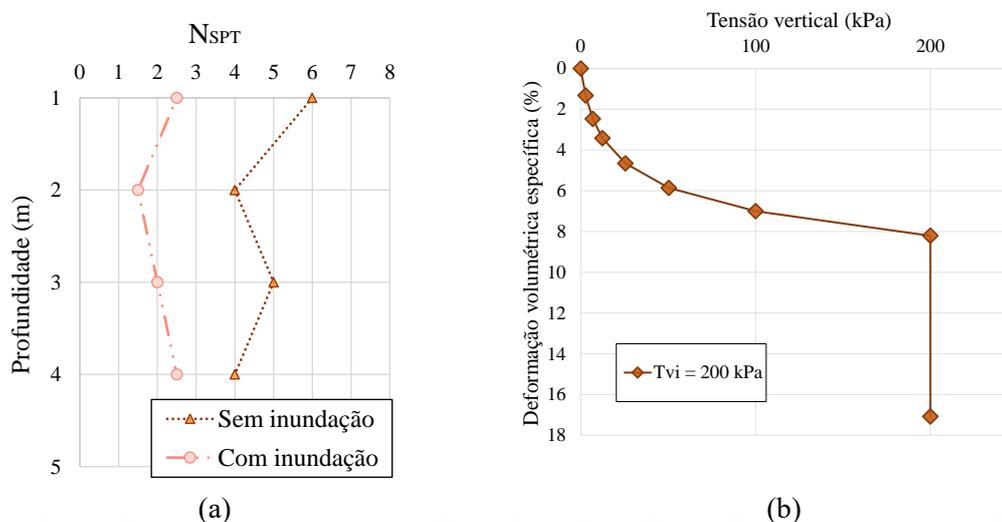


Figura 1. Resultados: (a) Ensaio SPT; (b) ensaio de adensamento oedométrico simples.

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



Diante da importância de compreender o comportamento do solo, a Figura 2 demonstra os resultados encontrados para o ensaio de prova de carga estática. Um indicativo da colapsibilidade do solo é o decaimento brusco da curva com inundação após o carregamento de 70 kN; ou seja, a partir deste valor, as partículas do material se reestruturam, causando um recalque significativo, conforme demonstrado na Figura 2 (a).

Na condição sem inundação, o recalque aconteceu, porém de forma mais suave ao longo da aplicação da carga. Conforme a Figura 2 (b), as capacidades atingidas foram de 120 kN para a condição sem inundação e 80 kN para a condição com inundação. Dessa forma, verifica-se que a capacidade da estaca diminui cerca de 33% com a adição de água no sistema. Cintra, Aoki e Albiero (2011) explicam este comportamento, pois evidenciam que os solos colapsíveis, em baixas condições de umidade, possuem boa capacidade de carga. No entanto, quando submetidos a inundação, a sucção presente reduz rapidamente e o solo se reorganiza. Esta premissa corrobora com os dados já analisados no artigo, como a caracterização do solo como colapsível e a redução brusca do N_{SPT} . Além disso, é importante relatar que em nenhuma das curvas houve um retorno elástico da PCE mediante o descarregamento, indicando que as estacas atingiram o limite resistivo. Ademais, o recalque atingido é de grande magnitude, sendo este de 5 cm. Esse valor poderá gerar severas patologias na estrutura.

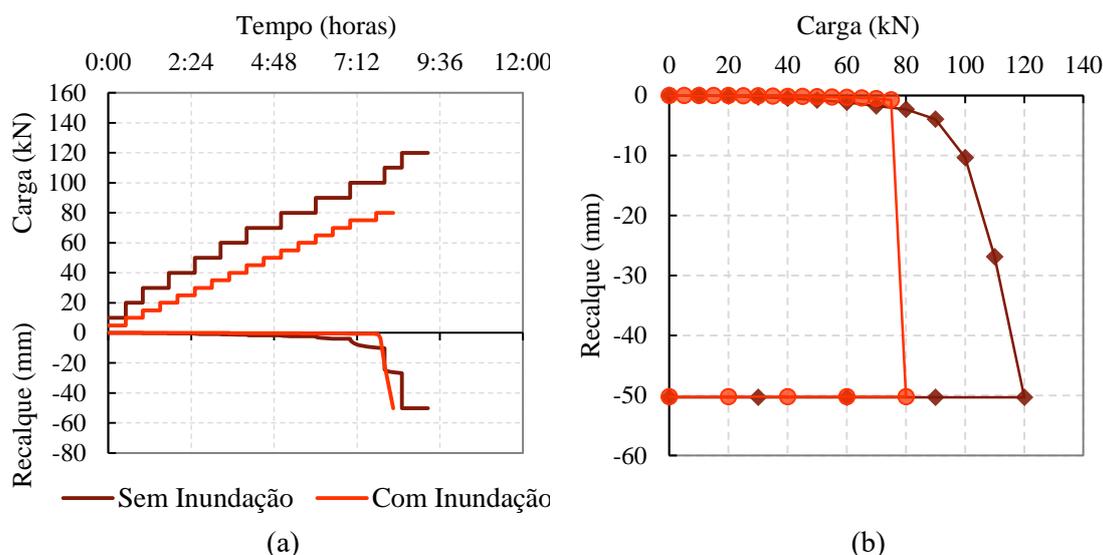


Figura 2. Resultados provas de carga estática. (a) recalque pelo tempo; (b) carga pelo recalque.

Ao analisar os resultados previstos para os métodos semiempíricos, o Método de Aoki-Velloso propiciou uma capacidade de carga de 54,70 kN, e o Método de Décourt-Quaresma evidenciou um valor de 91,56 kN, ambos para a condição natural. Além disso, ao utilizar os valores de N_{SPT} na condição inundada, obteve-se para o Método de Aoki-Velloso um valor de 22,27 kN e para Décourt-Quaresma uma capacidade de suporte de 52,12 kN, conforme demonstra a Figura 3. Diante deste conjunto de resultados, é necessário evidenciar que as cargas estimadas pelos métodos semiempíricos, tanto para a condição natural quanto para a inundada, foram menores do que as medidas pelas PCEs nas mesmas condições de umidade. Desse modo, pode-se entender que ao subestimar a capacidade de carga das estacas, os métodos trazem consigo o risco de superdimensionamento da obra, uma vez que será necessário utilizar materiais e metodologias que compensem essa redução.

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



Em contrapartida, como pode-se perceber na Figura 3 (a), o método Método de Décourt-Quaresma calculado pelo N_{SPT} na condição natural aumenta a capacidade de carga em comparação com a carga medida pela PCE sob inundação. Nessa perspectiva, pode-se entender que este método semiempírico calculado na condição natural, majorou a capacidade real da estaca sob inundação em 14,45%. Isso pode levar a subdimensionamento da estrutura, e consequentemente, a problemas na edificação. Além disso, dentre os dois métodos, aquele que melhor representou a PCE na condição natural foi o de Décourt-Quaresma. Entretanto, o Método de Aoki-Velloso mostrou-se mais conservador e, por isso, mais adequado para solos com alto grau de colapsibilidade.

Adicionalmente, por meio da Figura 3 (b), foi analisado quanto de resistência de ponta e de atrito lateral cada método considerou. Dessa forma, percebeu-se que o Método de Aoki-Velloso atribuiu uma parcela maior da resistência total à ponta da estaca, enquanto o Método de Décourt-Quaresma direcionou uma parte maior dessa capacidade para o atrito lateral.

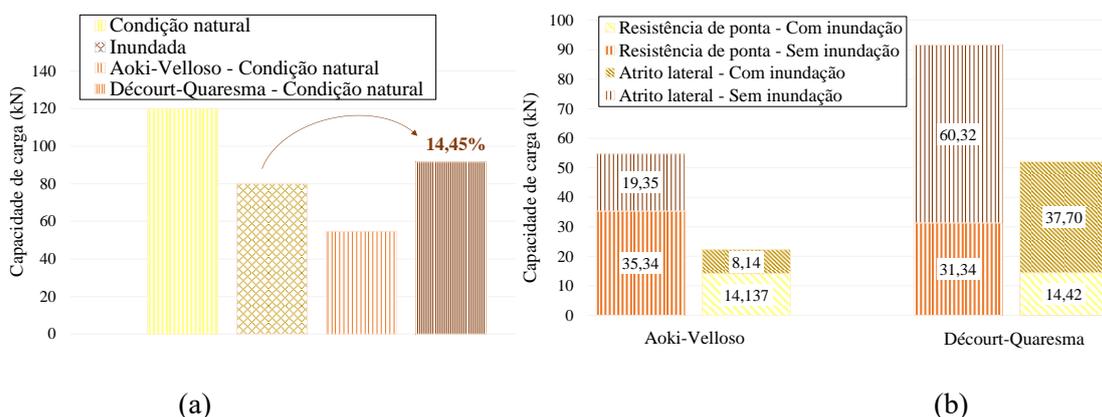


Figura 3. Comparação entre as cargas medidas e estimadas e parcelas das resistências estimadas.

4 Considerações finais

O presente artigo teve como objetivo verificar a perda da capacidade de suporte de um solo da cidade de Cruz Alta, no Rio Grande do Sul. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização física e classificação do solo, adensamento oedométrico, SPT e PCEs tanto na condição natural e quanto na inundada, além de estimativas da capacidade de carga através dos métodos semiempíricos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma.

Nesse contexto, a partir do potencial de colapso, o solo da região foi classificado como colapsível, e seu grau de colapsibilidade foi identificado como problemático. Em união a isso, o valor do N_{SPT} foi diminuído ao passo que se adicionou a inundação no sistema, atingindo em algumas profundidades mais de 50% de decréscimos. Similarmente ao ensaio SPT, nos ensaios de prova de carga estática, os valores encontrados para as capacidades de carga máximas medidas decresceram em 33% quando a água foi introduzida no sistema. Todas estas evidências, tanto as laboratoriais quanto de campo, destacam a urgência de detectar a colapsibilidade dos solos não saturados e a realização de PCEs na condição inundada.

Quanto aos métodos semiempíricos, observou-se que eles subestimam a capacidade de carga da estaca, o que está associado ao risco de superdimensionamento do projeto de fundações e gastos excessivos na obra. No entanto, ao comparar a capacidade de carga estimada, através do

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





Método de Décourt-Quaresma, pelo N_{SPT} na condição natural com as medidas pela PCE na condição inundada, percebe-se que o método majorou a capacidade de suporte da fundação. Tal análise contribui diretamente para as estimativas realizadas em solos colapsíveis, pois se os valores de N_{SPT} na condição natural forem usados para o cálculo, as capacidades podem ser superestimadas, o que, provavelmente, levará a futuros recalques, patologias ou até mesmo ao colapso da estrutura. Portanto, mostra-se indispensável a realização de ensaios na condição inundada e a utilização de seus parâmetros, nesta situação, para a estimativa das capacidades de suporte.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) pela bolsa de estudos do primeiro autor, ao Fundo de Incentivo à Extensão (FIEEX) pela bolsa de estudos do segundo autor, a Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos dos demais autores, a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pelo suporte para o desenvolvimento das pesquisas e a empresa Masutti Pré-Moldados pela realização das estacas e sondagens do campo experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solo – Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Benegas, H. Q. (1993). *Previsões para a curva carga-recalque de estacas a partir do SPT*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE, 93 p.
- Burton, G.J., Sheng, D., Airey D. W. (2020). Critical state behaviour of an unsaturated high-plasticity clay. *Geotechnique*, 70 (2), p. 161-172.
- Camapum de Carvalho, J., Gitirana Jr, G. F. N. (2021). Unsaturated soils in the context of tropical soils. *Soils and Rocks*, 44 (3), p. 25.
- Cintra, J. C. A., Aoki, N., Albiero, J. H. (2011). *Fundações diretas*, Oficina de textos, São Paulo, SP, BR, 136 p.
- Falcão, P. R. (2021). *Avaliação do impacto da inundação na resistência e deformabilidade de um solo laterítico e colapsível: estudo experimental e numérico*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria / UFSM, 229 p.
- Falcão, P. R., Baroni, M., Masutti, G. C., Pinheiro, J. B. P., Fagundes, D. F. (2023). Assessment of the impact of inundation on the strength of a lateritic and collapsible soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, p. 13.

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



sefe 10

- Jenning, J. K., Knight, K. (1975). The additional settlement of foundation due to collapse of sandy subsoils on wetting. *Proceeding of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*.
- Laprovitera, H. (1988). *Reavaliação de método semiempírico de previsão de capacidade de carga de estacas a partir de banco de dados*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE, 213 p.
- Liu, Y., Vanapalli, S. K. (2021). Mechanical behaviour of a floating model pile in unsaturated expansive soil associated with water infiltration: laboratory investigations and numerical simulations. *Soil and Foundation*, 61 (4), p. 929-943.
- Milititsky, J., Consoli, N. C., Schnaid, F. (2015). *Patologia das Fundações*, Oficina de textos, São Paulo, SP, BR, 256 p.
- Monteiro, P. F. (1997). *Capacidade de Carga de estacas – Método de Aoki e Velloso*. Relatório interno de Estacas Franki Ltda.
- Rasi, J. R., Aguiar, M. F. P., Veríssimo, S. F., Mendes, G. C. M., Prado, S. C. (2019). Análise das causas de colapso do subsolo e soluções adotadas em fundações de edifício industrial. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA – SEFE, 9, 2019, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABEF. p. 9.
- Vargas, M. (1978). *Introdução à Mecânica dos Solos*, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 509 p.
- Velloso, D. A., Lopes, F. R. (2010). *Fundações*, Oficina de Textos, São Paulo, SP, BR, 568 p.

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

