



Análise Numérica da Influência do Teor de Umidade do Solo na Capacidade de Carga de Estaca Escavada com Trado Mecânico, Sem Fluido Estabilizante em Solo Colapsível.

Luan Alcides de Araújo Maran

Discente, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, E-mail: pg403864@uem.br

Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis

Docente, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, E-mail: jhcreis@uem.br

Antônio Belincanta

Docente, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, E-mail: abelincanta@uem.br

Nelcí Helena Maia Gutierrez

Docente, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, E-mail: nhmgutierrez@uem.br

RESUMO: As estacas escavadas com trado mecânico de pequeno diâmetro, sem fluido estabilizante, são largamente utilizadas em obras de pequeno e médio porte na região de Maringá-PR, sendo executadas em camadas de solo residual evoluído de basalto. Essa camada se constitui de um material classificado como argila siltosa, porosa, laterítica, não saturada e colapsível, cujo comportamento é normalmente comprometido quando do aumento do seu teor de umidade. Embora esse comportamento venha sendo estudado por alguns pesquisadores, ainda há uma série de dúvidas quanto ao mecanismo que se desenvolve na interação solo-estaca para essa condição. Assim, este trabalho apresenta os resultados de simulação numérica, via Método dos Elementos Finitos (MEF), usando o software PLAXIS, considerando duas provas de carga em estacas com diâmetro nominal de 25 cm e comprimentos de 4 m e 6 m, executadas sem fluido estabilizante no Campo Experimental de Geotecnia da Universidade Estadual de Maringá (UEM) quando submetidas a diferentes teores de umidade do solo. Os resultados mostraram que o aumento do teor de umidade provocou uma redução da capacidade de carga das estacas em até 25%.

PALAVRAS-CHAVE: Teor de umidade, capacidade de carga, estaca escavada, solo colapsível.

ABSTRACT: The small-diameter mechanically drilled piles, without stabilizing fluid, are widely employed in small and medium-sized construction projects in the Maringá-PR region. These are executed in layers of evolved residual basalt soil. This layer consists of a material classified as silty clay, porous, lateritic, unsaturated, and collapsible, with its behavior typically compromised with an increase in moisture content. Although this behavior has been studied by several researchers, there are still numerous uncertainties regarding the mechanism that unfolds in the soil-pile interaction under this condition. Therefore, this study presents the outcomes of numerical simulation using the Finite Element Method (FEM), employing the PLAXIS software. Two load tests were considered, involving piles with a nominal diameter of 25 cm and lengths of 4 m and 6 m. These tests were conducted without stabilizing fluid at the Experimental Geotechnical Field of the State University of Maringá (UEM), while subjecting the piles to varying soil moisture levels. The results demonstrated that an increase in moisture content led to a reduction in pile load-bearing capacity of up to 25%.

KEYWORDS: Moisture content, load-bearing capacity, excavated pile, collapsible soil.

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



1 INTRODUÇÃO

A análise numérica da interação solo-estrutura via método dos elementos finitos (MEF) tem se apresentado como uma alternativa prática e de baixo custo para simular o comportamento do solo frente à diversas situações. Dessa forma, é possível alterar as propriedades do solo e da fundação para se obter resultados de capacidade de carga com valores satisfatórios.

A capacidade de carga ou carga de ruptura de uma estaca é a máxima resistência mobilizada na eminência de ruptura, podendo ser atingida pelo colapso do elemento estrutural ou do solo que o envolve e lhe dá suporte, ou por ambos. Logo, é o menor valor entre as resistências do material que compõe o elemento estrutural, e do maciço de solos que, geralmente, é o elo mais fraco desse binômio (ALONSO, 2011).

Os principais parâmetros que determinam os valores de resistência ao cisalhamento do solo são a adesão e o atrito. Nos métodos clássicos a adesão é o parâmetro considerado em função do intercepto de coesão, enquanto o atrito é definido em função do ângulo de atrito interno do solo.

Na Mecânica dos Solos Não Saturados a resistência ao cisalhamento é definida em função da sucção matricial ou do estado de sucção matricial que o solo se encontra. Assim sendo, a sucção de um solo depende das relações estabelecidas entre ar e água e influenciam diretamente nos parâmetros de adsorção e de capilaridade, principalmente em solos finos.

Os solos residuais evoluídos de basalto são exemplos de solos finos em que a sucção matricial, condicionada pelo teor de umidade, exerce influência na sua capacidade de carga. A relação entre sucção e teor de umidade é definida como curva de retenção de água do solo, ou também denominada de curva característica do solo (WILLIAMS, 1982).

Na cidade de Maringá-PR, devido ao fato de o solo típico apresentar espessura considerável, ser normalmente estável durante a perfuração e com presença de lençol freático relativamente profundo, a maioria das fundações das obras de pequeno e médio porte são do tipo estacas escavadas, executadas com trado mecânico, sem fluido estabilizante.

Assim, o presente trabalho objetiva verificar numericamente a influência do teor de umidade do solo na capacidade de carga de estacas escavadas com trado mecânico, sem fluido estabilizante, com o intuito de melhor compreender o comportamento desse solo colapsível frente às solicitações para esse tipo de fundação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A análise numérica da interação solo-estrutura, via método dos elementos finitos (MEF), com o uso do software PLAXIS foi efetuada considerando-se os resultados de duas provas de carga em estacas escavadas com trado mecânico, executadas sem fluido estabilizante e ensaiadas por Almada (2016), e os resultados experimentais de laboratório obtidos por Oliveira (2019) para o mesmo perfil de solo, nas condições de umidade natural e inundado.

2.1 Solo Local

O solo argiloso tropical residual de basalto, típico da região Norte do Paraná, apresenta uma estrutura porosa e metaestável. Esse solo em condições não saturadas possui uma parcela de coesão aparente dependente da umidade, ocasionada pela sucção matricial. A inundação deste tipo de solo provoca uma redução da sucção, podendo anular a coesão aparente, reduzindo significativamente a sua resistência ao cisalhamento. Considerando-se o aumento do umedecimento simultâneo à aplicação de uma tensão suficiente para causar instabilidade na

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





estrutura do solo, pode ocorrer o fenômeno do colapso estrutural (GUTIERREZ, 2005).

Nesta análise foram utilizados os parâmetros obtidos por Oliveira (2019) e Gutierrez (2005) para um perfil de solo tropical residual evoluído de basalto, colapsível, de textura argilo-siltosa e coloração marrom-avermelhada, cujas amostras foram retiradas do Campo Experimental de Geotecnia/UEM, localizado na cidade de Maringá, região norte do estado do Paraná (Figura 1).

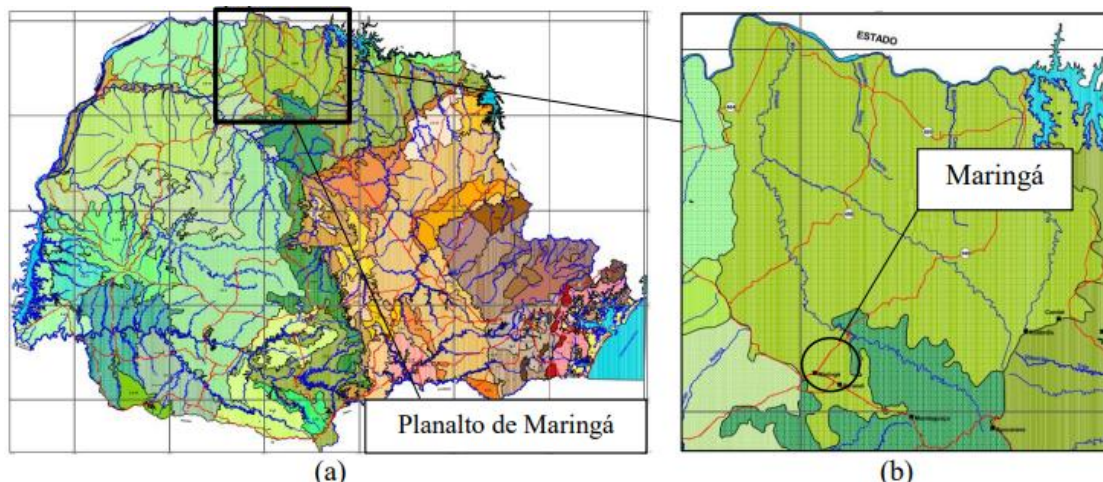


Figura 1. Mapa Geomorfológico do Estado do Paraná: (a) indicação do Planalto de Maringá; (b) localização do município de Maringá inserido no Planalto. Fonte: SANTOS *et al.*, 2006.

O perfil de solo, os valores em média do índice de resistência à penetração (N) obtidos nos ensaios SPT e os respectivos teores de umidade do solo são apresentados na Figura 2.

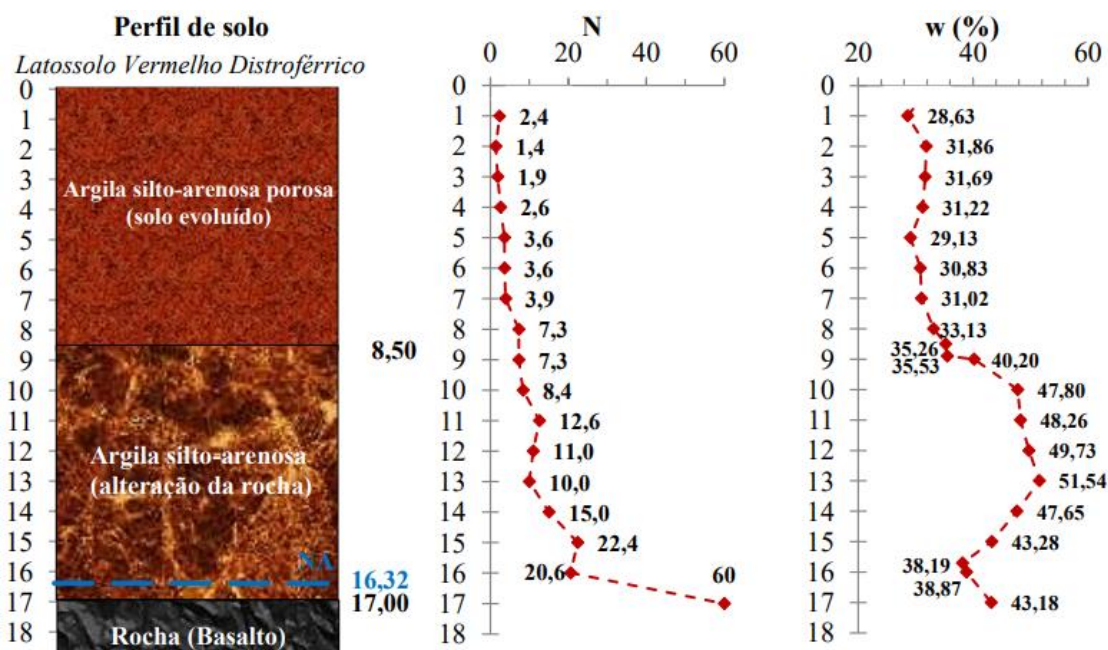


Figura 2. Perfil do solo, valores de N do SPT e dos teores de umidade para cada profundidade do perfil. Fonte: OLIVEIRA, 2019.

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



A Tabela 1 reúne os valores dos índices físicos, intercepto de coesão efetiva (c'), ângulo de atrito efetivo (ϕ'), Módulo Edométrico (E_{oed}), coeficiente de Poisson (ν) e Módulo de Young secante (E_{sec}) para o perfil de solo, nas condições de umidade natural e inundado.

Tabela 1. Parâmetros do solo estudado nas condições de umidade natural e inundado.
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2019 e GUTIERREZ, 2005.

Prof. (m)	ρ (g/cm ³)	w (%)	S_r (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E_{oed} (MPa)	ν	E_{sec} (MPa)
2	1,350	30,8	48,2	19	31	19,83	0,325	13,62
	1,633	64,1	100,0	22	27	3,30	0,353	2,03
3	1,414	31,2	52,1	22	30	18,80	0,333	12,55
	1,723	60,0	100,0	19	29	3,76	0,340	2,44
4	1,434	30,8	52,9	14	32	17,60	0,320	12,30
	1,736	58,4	100,0	7	30	9,41	0,333	6,28
5	1,468	29,6	53,4	34	31	16,90	0,325	11,61
	1,760	55,4	100,0	15	30	9,06	0,333	6,05
6	1,459	30,6	54,1	27	30	18,02	0,333	12,03
	1,750	56,7	100,0	22	26	8,87	0,360	5,28
7	1,532	30,0	57,8	47	28	17,36	0,346	11,01
	1,790	52,1	100,0	12	30	3,48	0,333	2,32

Os índices físicos do solo foram calculados considerando os corpos de prova talhados para os ensaios de cisalhamento direto e edométricos efetuados por Oliveira (2019). O coeficiente de Poisson (ν) foi obtido por meio da Equação 1, em função do ângulo de atrito interno efetivo. Com os módulos edométricos (E_{oed}) determinados por meio das curvas de compressão dos ensaios edométricos duplos, foram obtidos os valores do Módulo de Young (E_{sec}) pela Equação 2.

$$\frac{\nu}{1-\nu} = k_0 = 1 - \sin \phi' \quad (1)$$

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E_{sec}}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2)$$

2.2 Estaca Escavada com Trado Mecânico, sem Fluido Estabilizante

As estacas ensaiadas por Almada (2016) foram executadas seguindo-se as recomendações da ABNT NBR 6122. Na Figura 3 podem ser observados os trabalhos de perfuração das estacas escavadas sem o uso de fluido estabilizante, no Campo Experimental de Geotecnia da UEM.

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





Figura 3. Perfuração de estaca escavada sem fluido estabilizante. Fonte: ALMADA, 2016.

Conforme prescrito pela ABNT NBR 6122:2022, o processo executivo de uma estaca escavada com trado mecânico, sem fluido estabilizante é dado pela escavação do terreno com trado curto mecanizado, acoplado a uma haste até atingir a profundidade especificada em projeto. E, ainda, quando solicitado, o fundo da perfuração deve ser apiloado com soquete, pois o trado desse tipo de estaca normalmente não realiza a limpeza adequada.

Pelo fato de a perfuração com trado mecânico deixar o solo solto junto à extremidade inferior da estaca (base), o contato direto do concreto com o solo natural fica comprometido. Portanto, na estimativa da capacidade de carga para este tipo de estaca, é recomendável não se considerar a parcela da resistência de ponta.

2.3 Ensaio da Prova de Carga Estática

Foi realizado por Almada (2016) prova de carga estática do tipo rápido, conforme ABNT NBR 12.131:2006, no Campo Experimental de Geotecnia da UEM, em uma estaca com diâmetro efetivo de 26 cm e comprimento de 4 metros, designada como estaca E303.

Os parâmetros dos solo correspondentes à época da realização da prova de carga aplicada em cada estágio e do respectivo recalque observado (leitura após 10 minutos da aplicação da carga) são apresentados nas Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente.

Tabela 2. Parâmetros do solo no qual foi realizado a prova de carga na estaca E303.

Fonte: Adaptado de ALMADA, 2016 e GUTIERREZ, 2005.

Prof. (m)	P (g/cm ³)	w (%)	S_r (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E_{oed} (MPa)	ν	E_{sec} (MPa)
Até 5 m	1,085	33,6	56,7	22	31	14,2	0,325	9,8

Tabela 3. Recalque em função da carga aplicada na estaca E303, com fuste de 4 m, diâmetro efetivo de 26 cm e carregamento estático do tipo rápido. Fonte: Adaptado de ALMADA, 2016.

Estágio de carga (kN)	0	15	30	45	60	75	90	105	120
Recalque (mm)	0,00	0,04	0,18	0,70	1,59	2,94	5,33	9,30	27,50

De forma análoga, Almada (2016) realizou, também, prova de carga estática do tipo rápido na estaca E301, com diâmetro efetivo de 26 cm e fuste de 6 metros, estando o solo com teor de umidade médio de 31,2%.

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



Os parâmetros do solo e os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente.

Tabela 4. Parâmetros do solo no qual foi realizado a prova de carga da estaca E303.

Fonte: Adaptado de ALMADA, 2016 e GUTIERREZ, 2005.

Prof. (m)	P (g/cm ³)	w (%)	S_r (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E_{oed} (MPa)	ν	E_{sec} (MPa)
Até 7 m	1,451	31,2	54,3	22	31	18,0	0,330	12,0

Tabela 5. Recalque em função da carga aplicada na estaca E301, com fuste de 6 m, diâmetro efetivo de 26 cm e carregamento estático do tipo rápido. Fonte: Adaptado de ALMADA, 2016.

Estágio de carga (kN)	0	30	60	90	120	150	180	210	220
Recalque (mm)	0,00	0,09	0,34	0,87	1,71	3,07	5,52	13,21	20,54

2.4 Modelagem Numérica

Para modelar uma estaca isolada em compressão axial há que se considerar um modelo axissimétrico (modelando somente metade da seção). Este tipo de modelo é utilizado sempre que se pretende modelar estruturas circulares com seção transversal radial uniforme e carregamentos que se verifiquem em torno do eixo central (eixo y), onde a deformação e o estado de tensão são assumidos como sendo idênticos em qualquer direção radial (VIEIRA, 2013).

Para simulação da estaca é utilizado o modelo elástico linear e a interface estaca-solo é dada pelo atrito e o esforço normal entre as partes envolvidas. Atenta-se ao comportamento das interfaces solo-estrutura, introduzindo elementos de interface para simular a possibilidade de deslocamentos relativos entre o solo e a estaca. Essas interfaces são controladas por um “fator de espessura virtual”, as quais são atribuídas às propriedades. Tanto a interface quanto os demais elementos são discretizados na geração da malha de elementos finitos, que é realizada de forma automática pelo Plaxis®, sendo utilizados elementos triangulares de 15 nós na discretização, conforme visualizado na Figura 4.

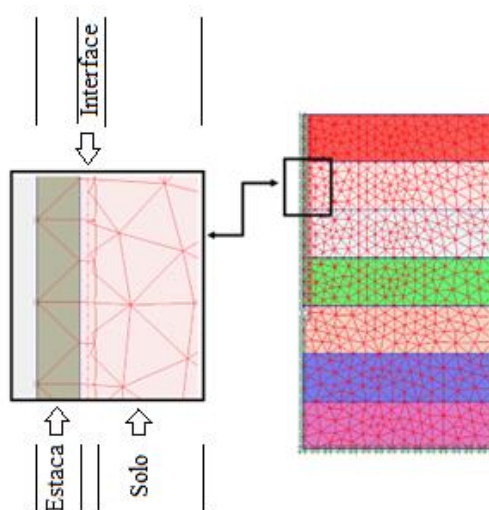


Figura 4. Discretização da interface estaca-solo e malha de elementos finitos do modelo.

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



A simulação foi realizada com condições de contorno de dimensões 4 m de largura por 7 m de profundidade. Os parâmetros do solo foram adotados e distribuídos por camadas de metro em metro, conforme apresentado na Tabela 1. As interfaces foram modeladas com espessura virtual de 0,1 m e com as propriedades entre 0,8 e 1,0 vez a propriedade do solo. As dimensões das estacas foram atribuídas em conformidade com o executado em campo por Almada (2016). A carga aplicada foi distribuída uniformemente na superfície da estaca.

Cada estágio de carregamento tem como produto um recalque da estaca. Ao plotar em um gráfico o carregamento no eixo das abscissas e o recalque no eixo das ordenadas tem-se a denominada curva “carga x recalque”. Nesta curva é possível observar e avaliar o comportamento da estaca no solo conforme os níveis de carga até a sua ruptura (momento em que ocorre cisalhamento ao longo de uma superfície de ruptura, promovendo o deslizamento da estaca sobre uma zona de apoio do solo que permanece fixa).

3 RESULTADOS OBTIDOS

Efetuada os cálculos das etapas de carregamento, os recalques obtidos por meio dos modelos foram utilizados para gerar as curvas carga-recalque, permitindo comparar com aqueles obtidos nos ensaios de campo.

Na Tabela 6 e na Figura 5 são apresentados os resultados obtidos nas simulações numéricas e no ensaio de campo realizado por Almada (2016) para a estaca E303.

Tabela 6. Recalques obtidos nas simulações numéricas e ensaio de campo para a estaca E303.

Carga (kN)	0	15	35	55	75	90	100	110	115
Ensaio de campo (mm)	0	0,04	0,28	1,27	2,94	5,33	7,80	11,6	14,87
Plaxis (mm)	0	0,60	1,50	2,55	3,98	5,99	9,86	15,12	17,82

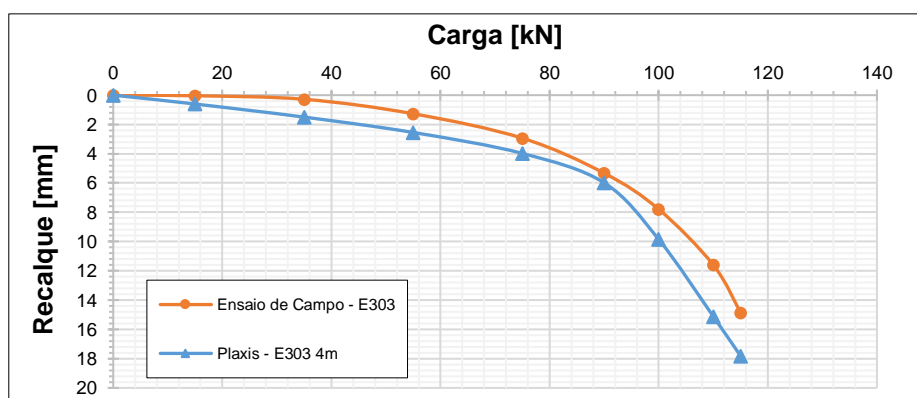


Figura 5. Curva Carga x Recalque do ensaio de campo e da simulação numérica para a estaca E303 com profundidade de 4 m.

Após adequar os parâmetros da interface utilizando os dados do solo e a prova de carga realizada por Almada (2016), foram efetuadas as simulações para a estaca E303. Foram considerados os dados do solo constantes na Tabela 1, para uma condição de teor de umidade em torno de 31% e, também, na condição saturada, no qual o teor de umidade estava em torno de 60%. Na Tabela 7 e na Figura 6 são apresentados os recalques obtidos na simulação numérica.

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



Tabela 7. Recalques obtidos nas simulações numéricas para diferentes teores de umidade - E303

Carga (kN)	0	15	35	55	75	90	100	110
Recalque (mm) - $w \approx 31\%$	0	0,44	1,06	1,71	2,49	3,93	8,51	13,89
Recalque (mm) - $w \approx 60\%$	0	1,96	4,78	8,43	12,96	18,12	27,57	-

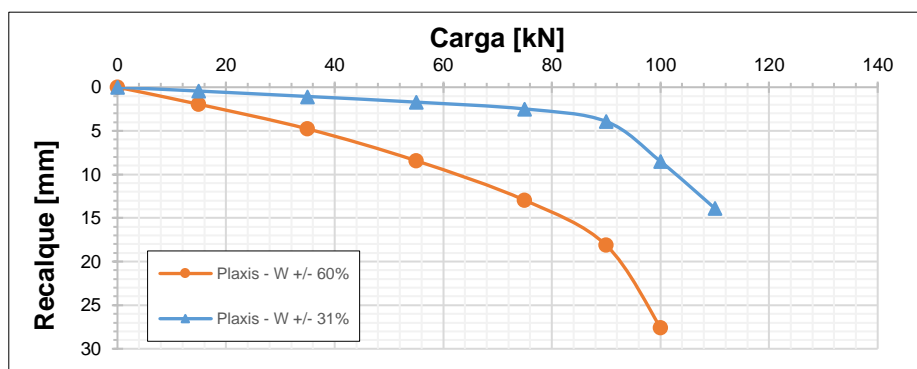


Figura 6. Resultados obtidos na simulação numérica para a estaca E303, com 4 metros de comprimento, considerando diferentes teores de umidade do solo.

Na Tabela 8 e na Figura 7 são apresentados os resultados obtidos nas simulações numéricas e no ensaio de campo realizado por Almada (2016) para a estaca E301, com fuste de 6 metros.

Tabela 8. Recalques obtidos nas simulações numéricas e ensaio de campo da estaca E301.

Carga (kN)	0	15	35	55	75	115	145	160	185	200	210
Ensaio de campo (mm)	0	0,02	0,11	0,26	0,52	1,59	2,79	3,74	6,19	9,30	13,21
Plaxis (mm)	0	0,32	0,75	1,20	1,66	2,73	3,73	4,58	8,52	13,51	x

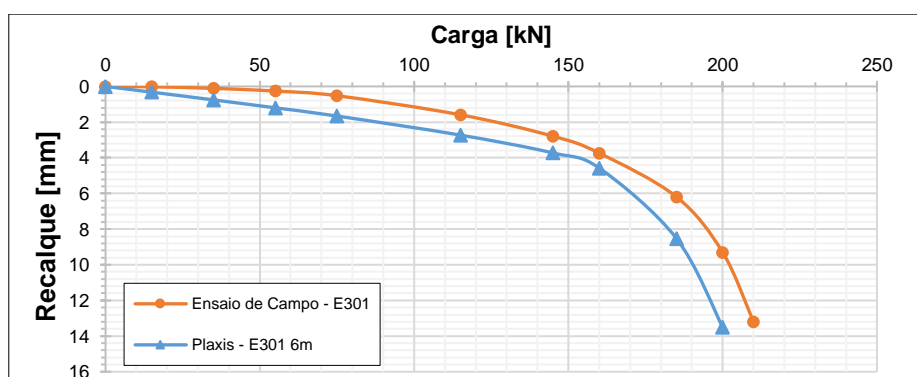


Figura 7. Curva Carga x Recalque obtida no ensaio de campo e na simulação numérica para a estaca E301, com profundidade de 6 m.

Após adequar os parâmetros da interface utilizando os dados do solo e a prova de carga de Almada (2016), foram realizadas as simulações para a estaca E301. Foram considerados os dados do solo mostrados na Tabela 1, para uma condição de teor de umidade em torno de 31% e, também, na condição saturada, no qual o teor de umidade estava em torno de 60%. Na Tabela 9

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



e a Figura 8 são apresentados os recalques obtidos na simulação numérica.

Tabela 9. Recalques obtidos nas simulações numéricas para diferentes teores de umidade - E301

Carga (kN)	0	15	35	55	75	115	145	160	185
Recalque (mm) - $w \approx 31\%$	0	0,30	0,71	1,12	1,54	2,44	3,18	3,97	9,39
Recalque (mm) - $w \approx 60\%$	0	1,63	3,04	4,65	6,67	12,32	22,62	65,65	-

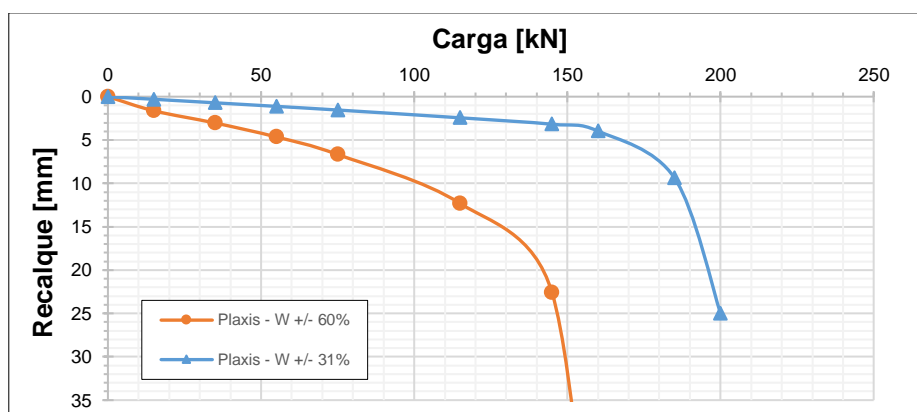


Figura 8. Resultados obtidos na simulação numérica para a estaca E301, com 6 metros de comprimento, considerando diferentes teores de umidade do solo.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos numericamente apresentaram boa aproximação com os resultados experimentais, demonstrando assim a capacidade do software PLAXIS 2D em simular de forma aproximada o ensaio de prova de carga. A realização de uma análise numérica de carregamentos em estaca pode ser uma alternativa rápida, eficaz e de baixo custo para estimar recalques de forma preliminar. Da mesma forma, o modelo de Mohr-Coulomb utilizado para os solos se mostraram satisfatórios para simular o carregamento de uma estaca isolada.

Conforme aferição do modelo numérico com o ensaio de prova de carga estática, obteve-se para a estaca E303, com o solo no teor de umidade médio de 31%, uma carga de ruptura em torno de 110 kN. Quando a simulação foi reproduzida com o solo saturado, correspondente à um teor de umidade médio de 60%, obteve-se uma carga de ruptura de ordem muito próxima, porém, a estaca com o solo saturado se comportou com recalque de 3 a 4 vezes maior do que na condição de umidade anterior (não saturada). No entanto, para a estaca E301, a carga de ruptura inicialmente de 200 kN reduziu para 150 kN com a elevação do teor de umidade do solo, o que corresponde à uma redução de 25%. Observa-se também aumento considerável no recalque da estaca ao longo do carregamento comparado à condição não saturada.

Vale observar que os parâmetros do solo utilizados na simulação numérica, considerando uma condição de solo saturado, o que corresponde à um teor de umidade em torno de 60%, é uma condição que dificilmente ocorrerá em campo, tendo em vista que a existência de macroporos conduz à uma permeabilidade elevada para esse solo argiloso. Possivelmente, o grau de saturação não deve ultrapassar 80%.

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



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U. R. (2011). *Previsão e controle das fundações*. 2. ed. São Paulo: Blucher.
- Almada, Jorge Luis Augusto et al. (2016). *Capacidade de carga de estacas escavadas com trado mecânico, sem fluido estabilizante, em solo típico da cidade de Maringá-Pr*. In: Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte-MG.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Gutierrez, N. H. M. (2005). *Influência dos aspectos estruturais no colapso de solos do Norte do Paraná*. 325 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.
- Oliveira, Andressa. (2019). *Resistência e compressibilidade de solo argiloso tropical residual evoluído de basalto*. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Geotecnia, Universidade Estadual do Paraná, Maringá-PR.
- Santos, L. J. C. ET AL. (2006). *Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná*. Revista Brasileira de Geomorfologia. n. 2, p. 03-12.
- Silva, A. R. C. (2022). *Modelagem Computacional via MEF da Interação Solo-Estrutura de Sistemas Eólicos*. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- Vieira, A. R. R. (2013). *Avaliação da capacidade resistente última de estacas em compressão usando análises em tensão/deformação*. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Williams, P.J. (1982). *The surface of the Earth: An Introduction to Geotechnical Science*. Longman: New York.

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

