

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/351

Simulação de prova de carga em placa em solo não saturado considerando o efeito da sucção

Lucas Pereira Cavalcante

Engenheiro civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, lucaspengenharia@gmail.com

Francisco Chagas da Silva Filho

Engenheiro civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, fchagas@ufc.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma simulação de ensaio de prova de carga com e sem saturação do solo visando compreender e quantificar a influência que a sucção pode apresentar em aspectos de resistência à ruptura. Para isso, foi utilizada prova de carga realizada no Campus Experimental de Geotecnia e Fundações da Universidade Federal do Ceará (CEGEF – UFC). Com os dados fornecidos, foi desenvolvida extrapolação da curva carga x recalque para obtenção da carga de ruptura. A simulação computacional foi desenvolvida adotando os dados de campo e modelada no programa Phase2. Foram realizadas modelagens para simular a situação não saturada de campo e com estimativa de saturação para conferir a influência que os parâmetros de sucção proporciona ao aspecto de resistência do solo. Os resultados mostraram uma redução do fator de redução de resistência do solo de 1,67 para 0,96 representando redução de 42,5%. Ademais, foi constatado maior plastificação do material na condição de saturação da modelagem. Portanto, conclui-se que a sucção é capaz de garantir a uma prova de carga concebida em ambiente de condição não saturada maior resistência, e consequentemente maior fator de segurança, quando comparado a um mesmo caso considerando uma saturação do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de carga, Sucção, Solo não-saturado, Simulação.

ABSTRACT: This work presents a load test simulation with and without soil saturation seeking to understand and quantify the influence that suction can have on aspects of breaking load. For this, load test result from Geotechnical and Foundations Experimental Campus of Federal University of Ceará (CEGEF – UFC) was used. With the provided data, an extrapolation of the load x settlement curve was developed to obtain the breaking load. The computational simulation was developed using the field data and modelled in Phase2 program. Modelling was carried out to simulate the unsaturated field situation and with saturation evaluation to check the influence that the suction parameters provide to soil resistance aspect. The results show a reduction in strength resistance factor of the soil from 1,67 to 0,96 representing a reduction of 42,5%. In addition, greater material plastification was found in the unsaturated condition modelling. Therefore, it's concluded that suction is capable to guarantee greater resistance to a load test developed in an unsaturated environment, and consequently greater factor of safety, when compared to a same case considering soil saturation.

KEYWORDS: Load Test, Suction, Unsaturated Soil, Simulation.

1 INTRODUÇÃO

Em projetos de fundações, é comum e correto que sejam realizados estudos de resistência e de recalques admissíveis, independente do porte da obra. Nesse contexto, os ensaios de campo de prova de carga são comumente aplicados para dimensionamento de fundações. Por ser mais comum o emprego de soluções de fundações superficiais, por consequência tem-se que o ensaio de prova de carga em placa é um dos mais desenvolvidos atualmente.

Tal ensaio de campo é uma das melhores opções de se estimar a capacidade de carga de fundações superficiais, valendo lembrar que a mesma também pode ser estimada por formulações e métodos semi-empíricos de acordo com o tipo de solo. No entanto, cabe ressaltar que a conferência por meio do ensaio de

placa não é a mais adequada em todas as situações, pois a prova de carga foi desenvolvida para solos saturados ou completamente secos, casos estes pouco comuns na rotina geotécnica em muitos locais do País.

As principais informações de projetos de fundações superficiais, como cota de assentamento e dimensões das sapatas, dependem da avaliação tanto das cargas como do subsolo. Almeida (2018) reforça que ao se executar provas de carga em placa diretamente no solo, os resultados serão bastante influenciados pela condição não saturada em que se encontra o perfil de solo. Tal influência ocorre devido as variações no estado de tensões efetivas do solo conforme a sua variação de sucção, influenciando, principalmente, na rigidez/deforabilidade do solo e na resistência ao cisalhamento.

Dessa forma, considerando o efeito da sucção no processo, para a determinação da capacidade de carga de uma fundação superficial há a necessidade do entendimento do comportamento da sucção ao longo da profundidade do subsolo estudado.

Tendo em vista que os solos na regiões tropicais, como no Estado do Ceará, apresentam condições parcialmente saturadas, é mais adequado que sejam realizados estudos dos principais parâmetros do solo, assim como de recalques, para uma adequada compreensão do real comportamento do solo em sua condição *in situ*. Estima-se que tanto os parâmetros de deforabilidade como o recalque apresentado serão mais favoráveis a segurança, acarretando em projetos mais viáveis e econômicos.

Chapra e Canale (2018) realçam que desde o fim da década de 1940, com o advento e a maior disponibilidade da computação, é bastante comum se aplicar abordagens de modelagens computacionais para simular e solucionar problemas de engenharia. Nesse ponto, também é possível simular o efeito da sucção em ensaios de provas de carga com a utilização de softwares específicos para isso.

Este trabalho busca apresentar uma simulação do efeito de sucção em resultados previamente coletados de prova de carga e conferir a diferença entre os resultados obtidos.

2 ESTUDO DE CASO

2.1 Geologia da Região Metropolitana de Fortaleza

A geologia da cidade de Fortaleza é composta principalmente por 3 feições geológicas, sendo elas as dunas (tanto edafizadas como móveis), formação barreiras e embasamento cristalino. Miranda (2005) especifica que o cristalino se deriva de rochas do Complexo Nordestino, e que as formações barreiras são compostas de sedimentos terciários, em sua maioria argilosos. Em todas as feições, cursos d'água fluviais cortam e fluem de tal maneira que desenvolvem depósitos de sedimentos ao redor. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático da formação da Região Metropolitana de Fortaleza.

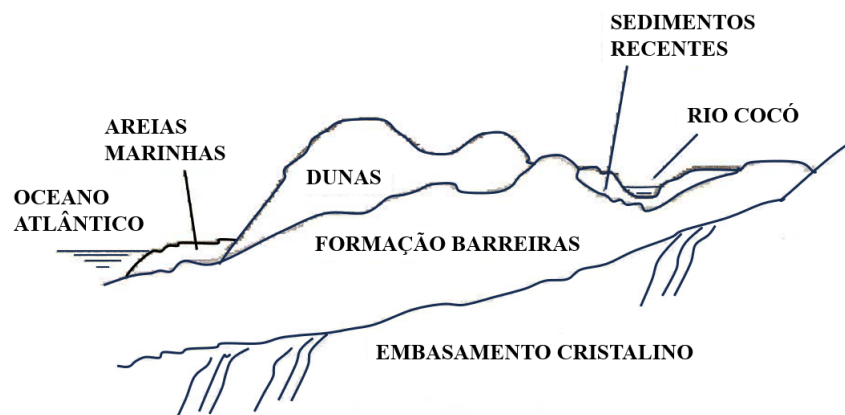


Figura 1. Subsolo de Fortaleza, corte na direção Norte-Sul (Adaptado de MIRANDA, 2005).

Miranda (2005) também cita que as rochas do embasamento cristalino são predominantemente cristalinas (metamórficas e ígneas) com predominância de gnaiss constituídos principalmente de quartzo, feldspato e mica. Quanto à formação barreiras, o mesmo autor ressalta que ela se estende em faixas variáveis pela capital, com extensões de até 30 metros, acompanhando a linha da costa, com predominância de argilas e

arenitos. No tocante às dunas, se apresentam tanto edafizadas como móveis, com predominância de areia fina a média.

2.2 Sondagem a Percussão

A sondagem a percussão SPT realizada no Campo Experimental de Geotecnia e Fundações da Universidade Federal do Ceará (CEGEF – UFC) foi previamente apresentada por Almeida (2018) em sua dissertação, sendo realizada até profundidade aproximada de 7,5 metros. Cabe salientar que o mesmo ensaio também já foi abordado no VIII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, em 2015.

De acordo com o resultado, o subsolo do terreno é predominantemente areno-siltoso, característico da Formação Barreiras da geologia local. Em suma, o terreno é areno-siltoso até 1,40 metros e medianamente compacto, na camada posterior, entre 1,40 metros e 7,45 metros, o solo foi classificado como silte arenoso, variando sua compactação de medianamente compacto a fofo. O nível da água foi obtido com 7,35 metros de profundidade. Os valores do N_{SPT} variaram de 12 a 18 golpes até 4,45 metros, e entre 4,45 metros e 7,45 metros os mesmos variaram de 3,4 até 5,7. A Figura 2 permite conferir os resultados da sondagem.

PROF. (m) DE ATÉ	GOLPES P/15 cm			Nspt	GOLPES P/30 cm			PROF (m) 0,00	DESCRIÇÃO
	1ª	2ª	3ª		2ª + 3ª				
					10	20	30		
0.20 0.65	4	8	7	15					Areia fina siltosa, cor cinza, medianamente compacta
1.00 1.45	5	5	7	12				1,40	Silte arenoso, cor amarelo, medianamente compacto
2.00 2.45	6	8	7	15				3,00	
3.00 3.45	7	9	9	18					
4.00 4.45	7	9	9	18					Silte arenoso, cor amarelo com pigmentação vermelha, pouco compacta a medianamente compacto
5.00 5.45	2	3	2,7	5,7				6,00	
6.00 6.45	1	1,9	1,5	3,4					
7.00 7.45	1,9	1,8	1,7	3,5				7,51	Silte arenoso, cor variegado, fofo

Figura 2. Sondagem a percussão realizada no local estudado (ALMEIDA, 2018).

2.3 Provas de Carga Estática

Os ensaios, sujeitos de análise do atual trabalho, foram realizado previamente e publicado conforme as pesquisas de Almeida (2018), realizado no Campo Experimental de Geotecnia e Fundações da Universidade Federal do Ceará (CEGEF – UFC). A prova de carga foi realizada em placa de metal de diâmetro de 30cm, sendo selecionado após uma análise da carga de reação disponível para conseguir a maior tensão possível.

Quanto aos carregamentos, foram realizados 10 estágios de carregamento e 4 de descarregamento, todos aplicados de forma rápida. As leituras de deformação foram feitas através de dois extensômetros, nos instantes de tempo 0, 1, 2, e 5 minutos para todos os estágios, seguindo em acordo com as recomendações da norma NBR 6489 (2019), exceto para o último estágio de carregamento, onde as leituras foram realizadas nos tempos 0, 1, 2, 5, 8, 15, 30 e 60 minutos. A Tabela 1 apresenta os resultados das aferições finais de cada estágio.

Tabela 1. Determinação das cargas de cada estágio (adaptado de ALMEIDA, 2018).

Estágio	Pressão (kPa)	Carga (kgf)	Deslocamento (mm)
1	52	372	0,205
2	103	743	0,435
3	124	892	0,700
4	165	1189	1,145
5	206	1486	1,745
6	248	1784	2,535
7	289	2081	3,227
8	330	2378	4,530
9	371	2676	5,480
10	392	2825	8,235
11	309	2230	8,235
12	206	1486	8,165
13	103	743	7,433
14	0	0	7,227

Conforme a tabela, observa-se que o ensaio foi determinado para estimativas de deslocamentos para carregamentos de até 400 kPa, sendo este certamente um valor distante à tensão admissível do solo ensaiado. O maior valor de deslocamento foi registrado em valor próximo a 8 mm, com recalque residual de 7,3 mm. Com os resultados, foi possível desenvolver a curva de carga x recalque do ensaio de placa, como pode ser visto abaixo pela Figura 3.

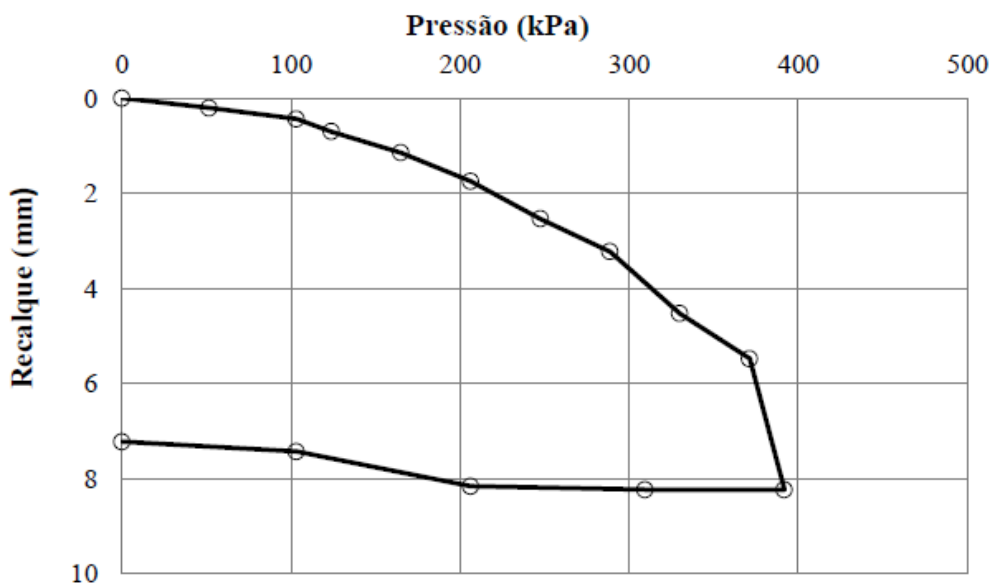


Figura 3. Curva de carga x recalque desenvolvida (ALMEIDA, 2018).

Para estudo da influência da sucção, há a necessidade de se estimar a carga de ruptura para a prova de carga apresentada. Dessa forma, há a necessidade de se extrapolar a curva de carga-recalque dos resultados do ensaio de campo fornecido. Dentre os métodos existentes para obtenção da carga de ruptura, foi selecionada a metodologia da extrapolação de Van der Veen (1953). Tal método propõe que o comportamento de carga-recalque de uma fundação apresenta crescimento exponencial.

Vale ressaltar que esse método, no meio técnico brasileiro, é considerado o mais aplicado para previsão da carga de ruptura, utilizando resultados de provas de carga para cálculo da estimativa da capacidade de carga de estacas.

Para o caso em questão, Almeida (2018) obteve, por meio do melhor ajuste na extrapolação da curva tensão x recalque, uma tensão de 480 kPa, que é considerada então a tensão de ruptura pelo método. A Figura

4 apresenta a extrapolação da curva de carga x recalque do ensaio adotando a extrapolação de Van der Veen (1953).

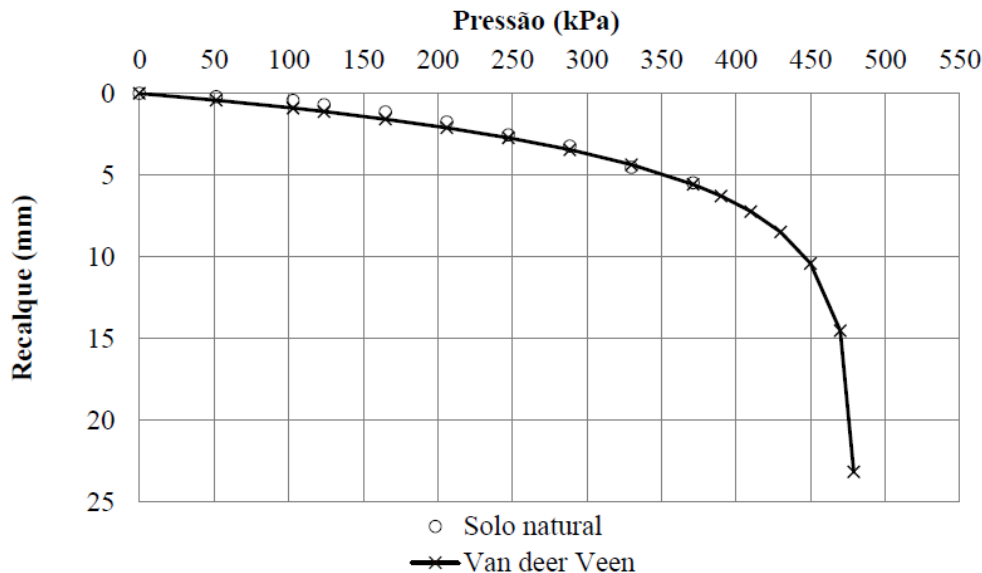


Figura 4. Extrapolação da curva de carga x recalque para obtenção da carga de ruptura (ALMEIDA, 2018).

3 METODOLOGIA

Para a simulação de prova de carga, foi desenvolvida uma modelagem numérica por meio do software Phase2, visando analisar o comportamento das tensões e deformações do solo de acordo com a aplicação da carga de ruptura proposta pela extrapolação da prova de carga, com aplicação de fator de redução da resistência para compreender melhor o comportamento de carga de ruptura nas condições saturada e não saturada.

Em primeiro momento, foi realizada modelagem numérica para simular o efeito e resultado de campo, com posterior readequação da modelagem para se obter resultados em condições saturadas, a fim de verificar a contribuição da sucção por meio da modelagem.

De acordo com Soriano (2003), estruturas de meios contínuos são muito complexas para ser analisadas de forma exata e, por isso, são adotadas hipóteses simplificadoras para garantir maior compreensão do problema e seus resultados.

Como hipóteses simplificadoras deste trabalho, é dita que o problema pode ser tratado como em um estado axissimétrico de tensões e deformações, o solo apresenta parâmetros e estratigrafia similares aos obtidos em ensaios prévios, as condições de contorno foram definidas com deslocamentos controlados nas extremidades. A carga aplicada foi a estimada para ruptura, sendo de 480 kPa. Além disso, foi estipulada uma condição de poropressão nula na interface do nível freático, para simular o efeito de sucção.

Os parâmetros geotécnicos foram estipulados conforme correlações com o N_{SPT} médio da camada de solo, sendo calculados conforme as fórmulas mais adequadas para cada tipo de solo. A seguir, a Tabela 2 apresenta os parâmetros calculados e suas formas de obtenção.

Quanto à obtenção dos parâmetros, Godoy (1972, apud CINTRA et. al., 2011) sugere valores de peso específico para solos arenosos de 16 a 20 kN/m³ para solos arenosos com certa umidade, sem atingir saturação, de acordo com sua compactação. Devido a suas características granulométricas de areias siltosas, foi estipulado que os solos seriam não coesivos. O coeficiente de Poisson, conforme sugestões de Teixeira e Godoy (1996, apud CINTRA et. al., 2011), em casos areno-siltosos pode ser considerado como 0,4.

Para o ângulo de atrito, foi adotada a formulação de Godoy (1983, apud CINTRA et. al., 2011), apresentada na Equação 1. Enquanto que Bowles (2001) recomenda para areias siltosas a expressão para cálculo do módulo de elasticidade/Young apresentada na Equação 2.

$$\varphi' = 28 + 0,4 \cdot N_{SPT} \quad (1)$$

$$E = 300 \cdot (N_{SPT} + 6) \quad (2)$$

Por fim, acerca do parâmetro ϕ^b que, segundo Fredlund et. al. (1978), é o principal parâmetro que indica a razão do aumento da resistência em função da sucção, foi padronizado como sendo a metade do ângulo de atrito do solo, conforme recomendado, em viés prático, por GeoStudio (2021). Logo em seguida, os resultados obtidos para os parâmetros após aplicar o N_{SPT} médio são expostos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos adotados.

Camada	Compacidade	N_{SPT}	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (kPa)	ν	ϕ^b (°)
Areia fina siltosa	Média	12	18	0	32,8	5.400	0,4	16,4
Silte arenoso	Média	13	18	0	33,2	5.700	0,4	16,6
Silte arenoso	Média	18	18	0	35,2	7.200	0,4	17,6
Silte arenoso	Fofa	3	17	0	29,2	2.700	0,4	14,6

4 RESULTADOS

Com os dados para a modelagem, foi realizado inicialmente a simulação considerando o incremento de resistência com a sucção. A modelagem se desenvolveu e demonstrou que para o carregamento aplicado para a ruptura, o solo ainda apresentou plastificação em diversos pontos e deslocamentos consideráveis, apresentados a seguir na Figura 6.

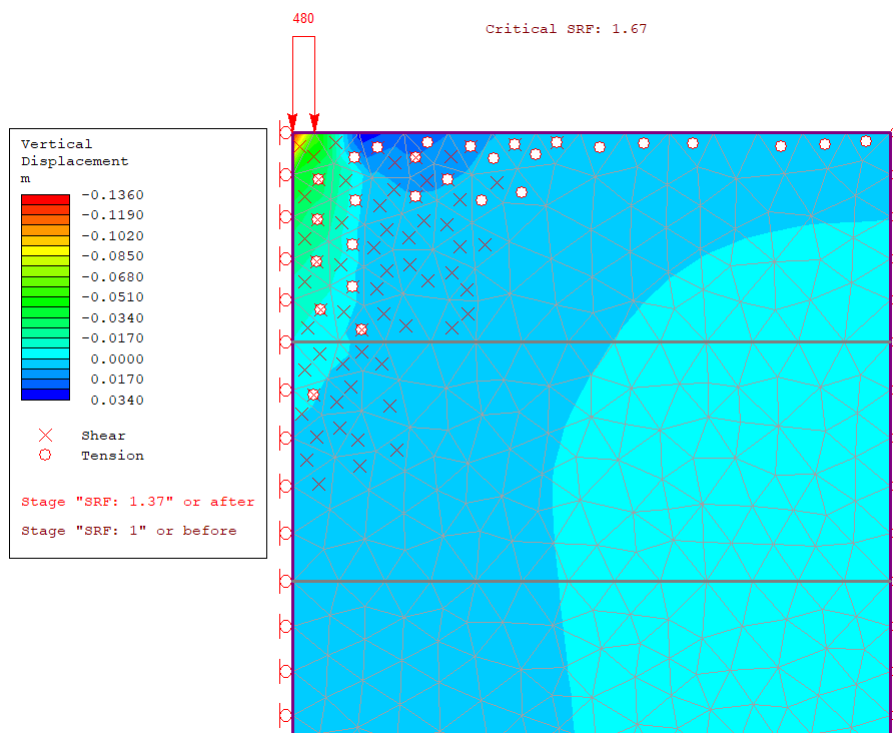


Figura 6. Resultado para a modelagem não saturada

A primeira modelagem mostra que ocorre a plastificação do solo em determinados pontos, estes representados pelo "X", assim como apresenta maiores deslocamentos apenas nos nós da superfície do solo, com valor máximo estimado em aproximadamente 13 cm. Vale detalhar que o fator de redução de resistência (SRF) crítico encontrado foi de 1,67 que demonstra que o resultado de carga de ruptura pela extrapolação de Van der Veen (1953) não apresenta convergência com a carga de ruptura da modelagem. Dessa forma, garante-se que para a carga da extrapolação, a estaca ainda apresentará fator de segurança de 1,67.

Em seguida, foram desconsiderados os parâmetros ϕ^b das camadas de solo, sendo anulados para esse segundo cálculo computacional, além de estipular poropressão neutra na superfície, e computada novamente a modelagem para analisar as variações em alguns parâmetros, como o deslocamento, de acordo com a ausência do efeito coesivo aparente. A Figura 7 explicita o resultado da modelagem em condição saturada.

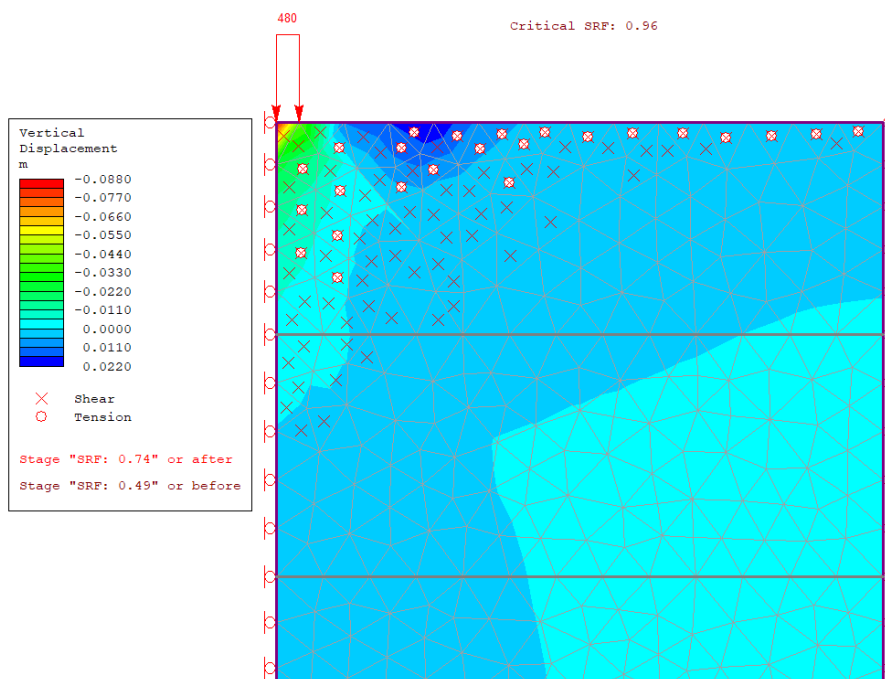
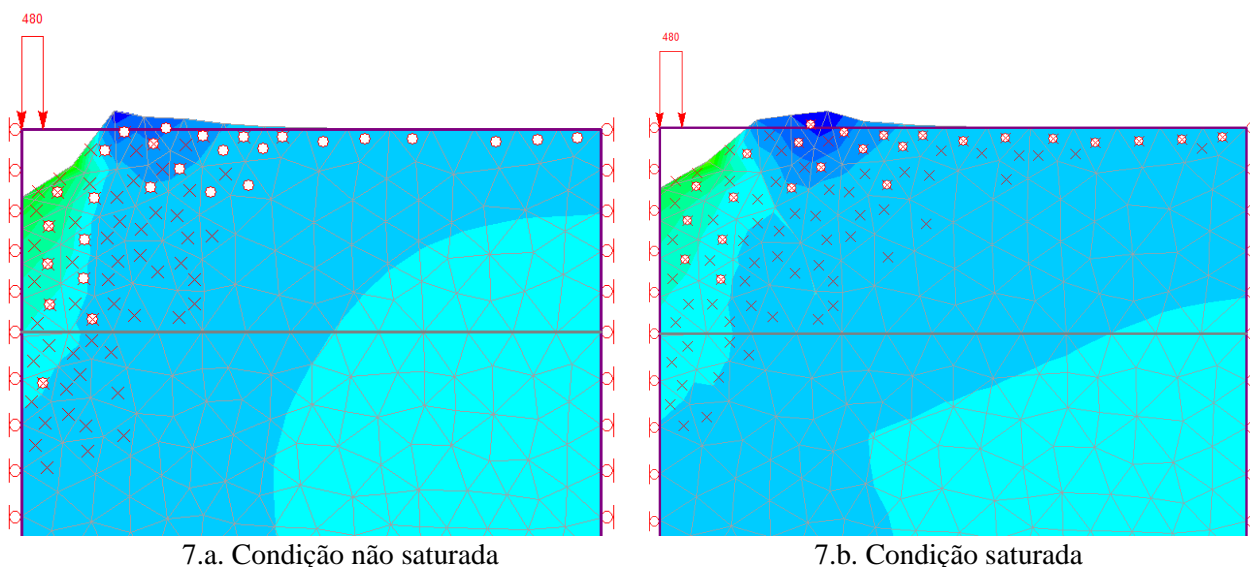


Figura 7. Resultado para a modelagem saturada

Quando se avalia a condição saturada, observa-se que ocorre deslocamento máximo de 8,8 cm e que o fator de redução de resistência crítico obtido foi de 0,96. Para este caso, confere-se que o fator de redução de carga atingiu valor menor que 1,00 o que informa que em uma condição de saturação, o solo não apresenta segurança aceitável.

Comparando ambos os resultados, confere-se que a condição saturada apresenta maior plastificação, com mais pontos, representados em “X”, apresentando ruptura, que pode ser observado na redução do fator de redução de resistência quando comparado ao primeiro caso apresentado. Quanto ao fator de redução de resistência, foi constatado que a condição não saturada apresentou resultado de 1,67 que foi reajustado para 0,96 após a saturação da modelagem. Essa redução de 0,71 apresenta variação percentual de estimados 42,5% na redução da resistência.

Ademais, apesar de apresentar menor valor absoluto de deslocamento vertical, a condição saturada demonstra maiores distribuições de deslocamentos, demonstrando ruptura mais generalizada. A Figura 7 permite observar o comportamento de deslocamentos nas condições não saturada (7.a) e saturada (7.b).



7.a. Condição não saturada

7.b. Condição saturada

Figura 7. Malhas deformadas de deslocamentos em diferentes condições

A figura acima nos permite visualizar e confirmar, por meio da malha deformada, que o processo de ruptura é bem mais atenuado na condição saturada, haja vista que neste caso não há contribuição da sucção como parcela de resistência aparentemente coesiva.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo, observou-se que a prova de carga apresentou estimativa de carga de ruptura de 480 kPa, e que as modelagens realizadas com esse valor aplicado apresentaram fatores de redução de resistência de 1,68 para o caso de campo (não saturado) e 0,96 para a condição saturada. Tal redução já demonstra o que se era esperado, que a sucção é capaz de atribuir maior resistência e segurança para a obra. Além disso, pode-se conferir que a plastificação é mais acentuada e observada em condição saturada, com maiores regiões de plastificação.

Para o caso trabalhado, foi visto que a extrapolação de Van der Veen (1953) pode não representar com fidelidade a estimativa de carga de ruptura, haja vista que a estimativa era de que o fator de redução de resistência, para a simulação de campo, fosse o mais próximo do valor de 1,00 ao invés de ser maior esse valor esperado. No entanto, isso pode mostrar que a extrapolação pode não ter sido a mais confiável para o caso de campo (não saturado), assim como pode não ter sido desenvolvida a modelagem com o parâmetro adequado pelo programa.

Em conclusão, esse trabalho permitiu observar que a sucção é capaz de promover alterações drásticas em reduções de resistência, observados na situação em questão uma redução de 42,5% da sua resistência. Dessa forma, uma prova de carga concebida em ambiente de condição não saturada apresenta maior resistência, e conseqüentemente maior fator de segurança, quando comparado a um mesmo caso considerando uma saturação do solo.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (DEHA – UFC), e aos colaboradores e pesquisadores que forneceram o suporte necessário para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. M. da R. (2018). *Avaliação de métodos de estimativa da capacidade de carga de fundações diretas em solos não saturados*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará / UFC, 146p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6489: *Solo – Prova de carga estática em fundação direta*. Rio de Janeiro.
- Bowles, J.E. (2001). *Foundation Analysis and Design*. 5th Edition, New York: McGraw-Hill. 1241 p.
- Cintra, J. C. A.; Aoki, N.; Albiero, J. H. (2011). *Fundações diretas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos. 139 p.
- Chapra, S. C.; Canale, R. P. (2018). *Métodos numéricos para engenharia*. 7ª Ed (tradução). McGraw-Hill Educations. New York.
- Fredlund, D. G.; Morgenstern, N. R.; Widger, R. S. (1978). The shear strength of unsaturated soil. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 15. p. 313-321.
- GeoStudio (2021). *Stability Modeling with GeoStudio*. Geo-Slope International Ltd. 254 p.
- Miranda, A. N. de. (2005). *Geotecnia no Nordeste*. 2. ed. Recife: Editora Universitária UFPE. v. 1. 543 p.
- Soriano, H. L. (2003). *Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas*. Editora da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo.
- Van der Veen, C. (1953). *Bearing capacity of a pile*. In: International conference soil mechanics foundation engineering, 3., 1953, Zurich. Proceedings... Zurich, v. 2.