

Variação na capacidade de carga de elementos de fundação direta considerando a não saturação de um solo coluvionar do município de Belo Horizonte

Saulo Rezende Vilela

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, saulovilela@gmail.com

Lúcio Flávio de Souza Villar

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, lvillar@etg.ufmg.br

Antônio Ananias de Mendonça

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, aanias@ufmg.br

Gustavo Ferreira Simões

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, gustavo@etg.ufmg.br

Ricardo L. Utsch de Freitas Pinto

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, utsch@demec.ufmg.br

Guilherme de Souza Papini

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, papini@demec.ufmg.br

RESUMO: Este trabalho avalia as variações na capacidade de carga de um solo coluvionar (areno-siltoso) do município do Belo Horizonte, Minas Gerais, para elementos de fundação direta – tubulões e sapatas/blocos – frente a diferentes condições de saturação do solo. Como era de se esperar, de acordo com os resultados dos testes em laboratório, pois não houve medidas *in loco* que confirmassem estas reduções na capacidade de carga, os elementos de fundação direta podem sofrer reduções nas suas capacidades de carga devido a saturação do material. Para o material estudado, observa-se uma redução de praticamente 30% na capacidade de carga dos tubulões e quase 46% para uma sapata/bloco da condição de não saturação para a condição de total saturação. Também foi possível observar o quanto em capacidade de carga os elementos podem ganhar em longos períodos de seca, quando o grau de saturação do solo tende para valores inferiores a 50%. Os resultados, desta forma, demonstram quão importante pode ser analisar as capacidades de carga de elementos de fundações nas condições de não saturação no desenvolvimento de projetos que abarquem solos não saturados.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações, solos não saturados, capacidade de carga.

1 INTRODUÇÃO

Para auxiliar na redução dos custos e aprimorar a engenharia, indicar meios de otimizar projetos em solos não saturados pode trazer ganhos, principalmente em estruturas temporárias. De acordo com Marinho (2005), compreender a

diferença do comportamento dos solos quando totalmente saturados ou secos reside não somente no fato de se ter grande parte dos solos variando entre estes dois estados, mas também a uma necessidade de compreender fenômenos que eram, até pouco tempo, desconsiderados nos projetos e análises de engenharia.

Terzaghi (1943) define ruptura de uma fundação como sendo um carregamento suficientemente grande para causar recalques incessantes sem acréscimos de carga, ou mesmo recalques pequenos, porém nocivos a estrutura.

Segundo Velloso et al. (1998), se a carga aplicada cresce gradualmente se observa, geralmente, para pequenos valores, que o solo se comporta de forma exclusivamente elástica. A medida que a carga cresce, o solo se plastifica atingindo o colapso.

2 CAPACIDADE DE CARGA DE FUNDAÇÕES

2.1 Método de Terzaghi (1943)

Conforme Alonso (1983), o método teórico de Terzaghi (1943) é o mais utilizado na determinação da capacidade de carga dado a sua generalidade e conservadorismo.

Terzaghi (1943) define a capacidade de carga para a ruptura generalizada e localizada segundo o exposto nas Equações 1 e 2, respectivamente

$$\sigma_R = cN_c S_c + qN_q S_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma S_\gamma \quad (1)$$

$$\sigma_R = \frac{2}{3} c N'_c S_c + q N'_q S_q + \frac{1}{2} \gamma B N'_\gamma S_\gamma \quad (2)$$

Em que σ_R é a tensão de ruptura ou capacidade de carga estática; c é o intercepto coesivo do solo fundado; N_c , N_q , N_γ , N'_c , N'_q , e N'_γ são os fatores adimensionais que dependem do ângulo de atrito interno do solo (ϕ'); S_c , S_q e S_γ são os fatores de forma do elemento de fundação; q é a tensão efetiva vertical na cota de apoio da fundação (σ'_v)¹; B é a largura, lado ou diâmetro da fundação, a depender da geometria; e γ é o peso específico do material de apoio da fundação.

Os fatores “N” e “S”, com seus respectivos índices e subíndices, são adimensionais e estão

ligados ao ângulo de atrito interno do material (ϕ') e aos aspectos da forma da fundação (B), respectivamente. Segundo Terzaghi & Peck (1948), os fatores “N” podem ser definidos conforme ábaco apresentado na Figura 1 e os fatores de forma “S” possuem os valores apresentados na Tabela 1.

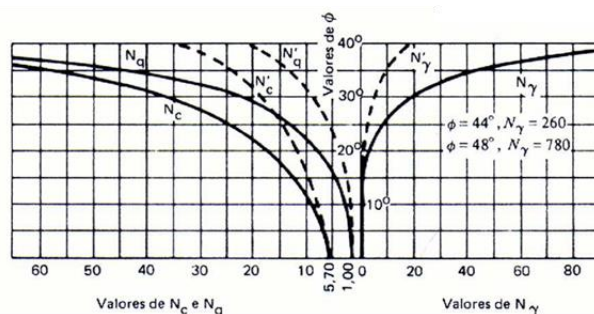


Figura 1. Ábaco com os fatores “N” para determinação da capacidade de carga (TERZAGHI & PECK, 1948).

Tabela 1. Fatores de forma para determinação da capacidade de carga (Adaptado TERZAGHI & PECK, 1948).

Forma da fundação	Coeficientes de forma		
	S_c	S_q	S_γ
Corrida	1,0	1,0	1,0
Quadrada	1,3	1,0	0,8
Circular	1,3	1,0	0,6
Retangular	1,1	1,0	0,9

Segundo Bowles (1996), um comparativo das diversas metodologias propostas, para a determinação da capacidade de carga dos solos, levaram-no a concluir que a solução de Terzaghi (1943) tem sido a preferida pelos técnicos da área por possuir aplicabilidade para solos predominantemente finos e granulares, alcançando, em geral, resultados conservadores.

3 SOLOS NÃO SATURADOS

3.1 Considerações Iniciais

Fredlund & Rahardjo (1993) apontam que a engenharia geotécnica frequentemente assume que o solo está seco ou totalmente saturado em grande parte de suas avaliações. Na realidade, estes dois estados são apenas duas condições extremas de um solo não saturado.

Segundo Costa (1999) e Vianna (2005), a sucção é um fator que deve ser considerado nas

¹ Conforme Princípios de Tensão Efetiva postulado por Terzaghi: $\sigma'_v = \sum \gamma_i h_i - u$. Em que σ'_v é a tensão vertical efetiva; γ é o peso específico do solo na profundidade h ; e u é a poro pressão.

análises da capacidade de carga em solos não-saturados. Seus estudos demonstram que quanto maior a sucção, maior a capacidade de carga de um elemento de fundação.

Para Fredlund & Rahardjo (1993), os solos estão frequentemente sujeitos a variações no grau de saturação, o que os levam a apresentarem elevados valores de sucção matricial nas regiões em que há presença da água líquida e gasosa.

3.2 Sucção e a Resistência ao Cisalhamento dos Solos não Saturados

Fredlund & Rahardjo (1993) indicam que a matriz de sucção (ψ_m) pode alterar o parâmetro designado como intercepto coesivo “c” da equação de resistência ao cisalhamento proposta por Coulomb (1776)². A relação de alteração é expressa conforme apresentada na Equação 3.

$$c = c' + \psi_m \tan \phi^b \quad (3)$$

Em que c é o intercepto coesivo aparente, considerando a sucção; c' é o intercepto coesivo efetivo; ψ_m é a matriz de sucção; e Φ^b é a taxa de variação na resistência ao cisalhamento devido à sucção matricial.

Conforme proposto por Fredlund & Rahardjo (1993), a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb, originária da equação de resistência proposta por Coulomb (1776), requer, no caso dos solos não saturados, um eixo adicional para representar a sucção mátrica na condição não saturada, Figura 2.

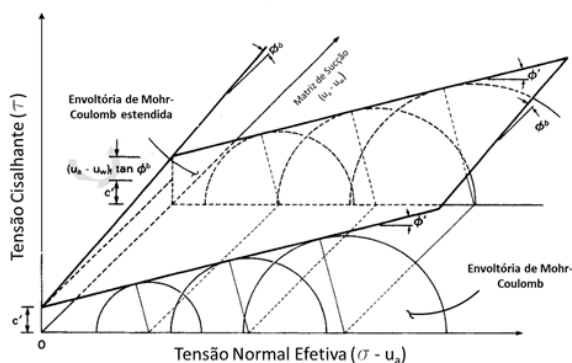


Figura 2. Envoltória de resistência de solos não saturados (Adaptado FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

² $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$. Equação que descreve a envoltória de resistência, proposta por Coulomb (1776).

Vilar (2006) apresenta um modelo capaz de prever as variações dos parâmetros de resistência de um solo, não saturado, com base nos seus parâmetros de resistências para as condições saturadas e de umidade higroscópica. O modelo é capaz de varrer toda gama de parâmetros com base apenas nos parâmetros de resistência do solo para as duas condições citadas e a curva característica do material.

A determinação deste arcabouço de parâmetros, para diferentes graus de saturação, pode ser útil quando se dispõe de ferramentas computacionais capazes de avaliar com critério e agilidade as possíveis interferências destas alterações em uma análise geotécnica.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Elementos de Fundação Avaliados

A fundação explorada neste artigo é a de um aerogerador de pequeno porte, composta por três tubulões de diâmetro nominal de 0,85 m, base alargada de 1,40 m, assentados a 5,50 m de profundidade. Sobrepondo estes tubulões há ainda um bloco de coroamento com altura de 1,35 m. A Figura 3 ilustra, em perfil, o descrito para os elementos de fundação.

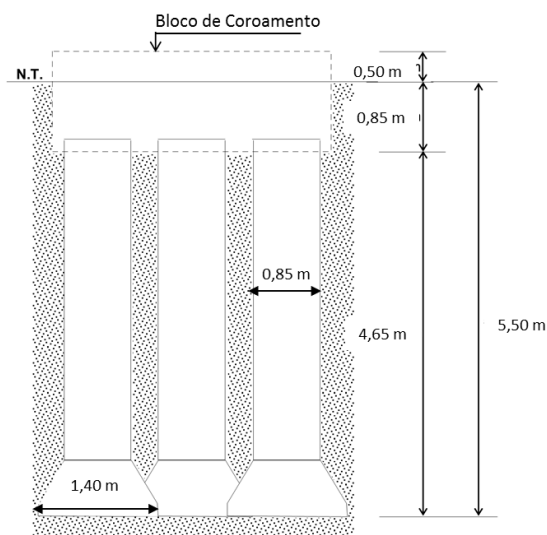


Figura 3. Perfil dos Tubulões e Bloco de Coroamento.

Os tubulões foram projetados com espaçamento entre eixos de 2,10 m formando um ângulo de 60° entre si. O bloco de coroamento possui geometria triangular com

vértices achatados conforme Figura 4.

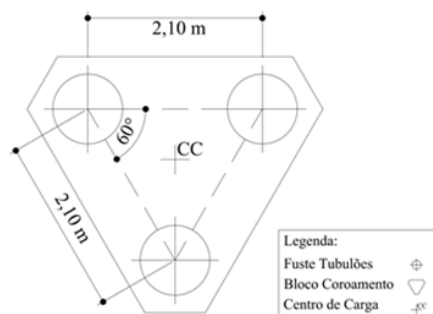


Figura 4. Planta dos Tubulões e Bloco de Coroamento.

4.2 Definição dos Parâmetros de Resistência para as Condições Saturadas e Não Saturadas

Os parâmetros de resistência do material foram definidos por meio de ensaios de cisalhamento direto (CD). Parte dos ensaios de cisalhamento direto foram realizados em consonância com a norma americana ASTM (2003) – D3080 *Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions* – e outra parte seguiu a mesma norma excluindo, no entanto, a fase de inundação. Este último ensaio foi conduzido com as amostras seca ao ar, umidade higroscópica ($w=2,30\%$), de forma a possibilitar a definição dos parâmetros de resistência na condição não saturada conforme proposta de Vilar (2006).

Os corpos de prova (CPs) foram talhados de tarugos extraídos dos blocos, chegando à geometria reta, com 100 mm de lado e 20 mm de altura. As tensões normais estabelecidas e aplicadas para cada estágio de cisalhamento foram de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa por retratarem as tensões experimentadas pelo material com a implantação da fundação. Nos ensaios com as amostras inundadas observou-se um período de 24 horas para adensamento em cada carregamento aplicado. A velocidade de cisalhamento adotada foi de 0,20 mm/min, possibilitando a drenagem da amostra durante a etapa de cisalhamento. Os ensaios foram conduzidos até deformações próximas de 13% dada a limitação do equipamento disponível.

4.3 Previsão da Capacidade de Carga dos Tubulões e Bloco

Com os resultados dos ensaios de resistência – cisalhamento direto (saturado e umidade higroscópica) e curva característica do material pela técnica do papel filtro – calculou-se a influência da umidade (saturação) na capacidade de carga dos tubulões e bloco de coroamento, simulando como um elemento de fundação direta, sapata/bloco, sem a consideração dos tubulões abaixo. A influência da saturação foi considerada pela variação nos parâmetros de resistência da envoltória de Mohr-Coulomb conforme teorização de Vilar (2006).

O método para a determinação da capacidade de carga foi o apresentado por Terzaghi (1943) uma vez que, segundo Bowles (1996), este método possui aplicabilidade para solos predominantemente finos e granulares sendo ainda hoje amplamente utilizado pelos geotécnicos. O principal fato que justifica a sua utilização, ainda hoje, advém de que as premissas consideradas pelos autores continuam a ser válidas dentro dos conceitos da mecânica dos solos que se conhece ainda hoje.

O cálculo da variação na capacidade de carga (tensão admissível) considerou fator de segurança (FS) igual a 3,00 dada as recomendações apresentadas pela literatura e normas técnicas vigentes. Avaliou-se a condição de ruptura localizada, visto que o elemento fundado, aerogerador de pequeno porte, está assentado em material de baixa consistência conforme informações das investigações geotécnicas de campo realizadas na área.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Parâmetros de Resistência nas Condições Saturadas e Não Saturadas

Os parâmetros de resistência alcançados para as duas condições, inundado e umidade higroscópica são os apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de Resistência Inundado e Umidade Higroscópica.

Tipo de Ensaio	Parâmetros de Resistência de Mohr Coulomb	
	c' (kPa)	ϕ' (°)
CD (Inundado)	2,10	36,97
CD (Higroscópica)	26,02	36,91

Analizando os parâmetros de resistência que descrevem a envoltória de resistência deste solo, observa-se que o intercepto coesivo sofreu alteração para as diferentes condições de saturação e o ângulo de atrito praticamente não. O intercepto coesivo apresentou ganho de treze vezes (13x) da condição inundada para a condição de umidade higroscópica. O ângulo de atrito interno do material, entretanto, não sofreu alterações. Segundo Fredlund et al. (1978), ensaios realizados em solos com diferentes graus de saturação já demonstravam que este comportamento poderia ser esperado.

5.1 Capacidade de Carga dos Tubulões

A capacidade de carga dos tubulões variou segundo a saturação tal como sugere a Figura 5, em que é apresentada a variação na capacidade de um tubulão frente a alterações na saturação e consequentemente nos parâmetros de resistência do material avaliado.

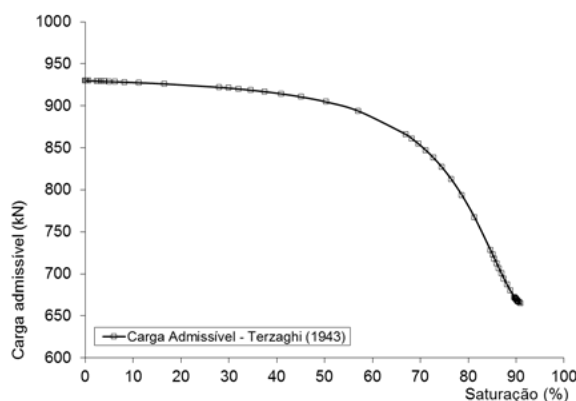


Figura 5. Variação na capacidade de carga de um tubulão com a saturação.

Como era de esperar, o elemento de fundação sofreu redução na sua capacidade de carga mediante saturação. Para o material estudado, observa-se, para os extremos do problema – com base nos parâmetros de resistência apresentados na Tabela 3 – uma

variação na capacidade de carga de 930,20 kN na condição seca para 665,10 kN na condição inundada. Esta variação representa redução de praticamente 30% na capacidade de carga do elemento. É possível averiguar, no entanto, que o tubulão possui capacidade de carga praticamente estável para saturações entre 0% e 50%.

Ressalta-se que as análises apresentadas desconsideraram a possível influência do atrito lateral no ganho em capacidade de carga dos elementos.

5.2 Capacidade de Carga do Bloco de Coroamento

Assim como para o tubulão, avaliou-se a redução da capacidade de carga do bloco de coroamento, simulado como uma sapata/bloco sem a consideração da existência dos tubulões abaixo. Avaliou esta hipótese de forma a identificar qual poderia ser a influência da saturação em um elemento de fundação superficial único, caso de sapatas e blocos.

Dada a geometria triangular simétrica do bloco, considerou-se, para esta hipótese de cálculo, um bloco quadrado com mesma área de influência do elemento implantado em campo.

A capacidade de carga do bloco de coroamento variou segundo a Figura 6.

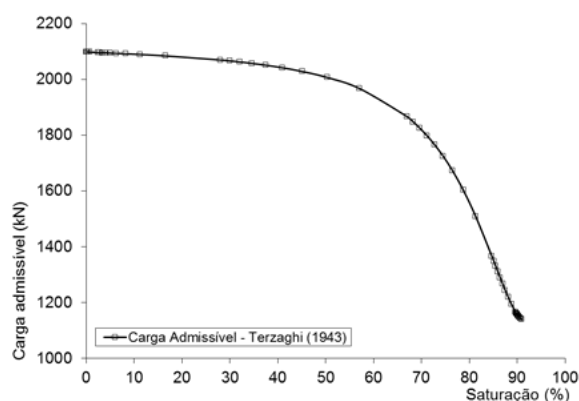


Figura 6. Variação na capacidade de carga do bloco de coroamento com a saturação.

Assim como para o tubulão, o bloco também sofreu redução na sua capacidade de carga pela saturação. Para o material estudado, e nas condições avaliadas, observa-se uma variação

na capacidade de carga do bloco de coroamento de 2099,14 kN na condição seca para 1140,34 kN na condição inundada. Esta variação representa uma redução de quase 46% na capacidade de carga do elemento.

A variação explicitada para as duas condições mais extremas – material inundado e na umidade higroscópica – foi maior para o elemento superficial do que para o profundo (tubulão). Esta maior variação para o elemento superficial decorre de que a componente que considera a tensão geostática atuante na base do elemento avaliado – “q” apresentada na Equação 2 – é menor para o bloco, tendo assim menos influência na capacidade de suporte do solo na profundidade avaliada. Para valores de saturação entre 50% e 0%, o bloco apresentou algum ganho na capacidade de suporte, porém pode ser considerada uma capacidade de carga praticamente constante.

Conforme relatado por Costa (1999) e Vianna (2005), a sucção é um fator que interfere na capacidade de carga de elementos de fundação implantados em solo não saturados. Assim como em seus estudos, este solo também demonstra que a sucção possui influência na sua capacidade de carga. No entanto, observa-se um valor limite, a partir do qual ganhos de sucção já não alteram, de forma significativa, as capacidades de carga dos elementos. Esta relação de alteração certamente depende da curva característica do material, assim como das variações observadas nos parâmetros de resistência para as condições de inundação e umidade higroscópica.

6 CONCLUSÃO

Os estudos demonstraram que os elementos de fundação podem sofrer reduções nas suas capacidades de carga devido a saturação do material. Para o tubulão, tendo a base no material estudado, pode ocorrer redução de praticamente 30% da condição seca para a inundada. Para o bloco de coroamento, considerado como sapata/bloco desconsiderando os tubulões existente em profundidade, houve uma redução de quase 46% na capacidade de carga. Isto demonstra, de

forma explícita, que a saturação no material estudado interfere na capacidade de carga de elementos de fundação direta. Observou-se também, para períodos mais secos, que os elementos possuem capacidades de carga maiores, porém estáveis a partir de um determinado valor de sucção.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG pelo apoio e incentivo na participação do Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia no projeto intitulado: "Projeto de Construção e Testes de um Aerogerador de Pequeno Porte Reconfigurável" desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Aeroespacial da UFMG e financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) sob nº de processo 555652/2010-6.

REFERÊNCIAS

- Alonso, U. R. (1983). *Exercícios de Fundações*. Ed. Edgard Blücher; 210 p.
- ASTM (2003). *D3080 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*, USA, 7p.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design*. 5th ed. New York. 1175 p.
- Costa, Y. D. J. (1999). *Estudo do comportamento de solo não saturado através de provas de carga em placa*. São Carlos, 138 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Coulomb, C.A. (1776), *Essai sur une application des regles de Maximus et Minimis a quelques Problemes de Statique, relatifs a l'Architecture*, Memoires de Mathematique et de Physique, Presentes a l'Academie Royale des Sciences, par divers Savans, et lus dans ses Assemblies, Paris, Vol. 7 (volume for 1773 Published in 1776). (in French)
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Marinho, F. A. M. (2005). *Os solos não saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados*. Texto apresentado a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o concurso de Livre-docência na especialidade “Geomecânica” do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, 201 p.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. London:

- Chapman and Hall, 510 p.
- Terzaghi, K.; Peck, R. B. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 1st Edition, John Wiley and Sons, New York, 566 p.
- Velloso, D. de A.; Maria, P. E. L. de S.; Lopes, F. de R. (1998). *Princípios e Modelos Básicos de Análise*. In: Hachich, W.; Falconi, F. F.; Saes, J. L.; Frota, R. G. Q.; Carvalho, C. S.; Niyama, S. *Fundações Teoria e Prática*. Ed. Pini, 2ª ed., p. 163-196.
- Vianna, A. P. F. (2005). *Influência da dimensão e da sucção matricial no comportamento de fundações superficiais assentes em solo arenoso não saturado*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 170p.
- Vilar, O. M. (2006). *A simplified procedure to estimate the shear strength envelope of unsaturated soils*. Canada, 8 p. 1088-1095.