

Comportamento de sapata assente em solo tropical em diferentes condições de compactidade e saturação

Eduardo Augusto dos Santos Oliveira

Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil,
eng.santosoliveira@outlook.com

Jean Rodrigo Garcia

Professor Doutor, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, jean.garcia@ufu.br

RESUMO: O comportamento de sapatas assentes em solo tropical é influenciado pelo histórico de tensões e sucção presente no solo sob a fundação. Provas de carga em sapatas circulares com diâmetro de 1,00 m foram realizadas em condições de solo inundado com e sem pré-carregamento, além de testes com o solo em condição de umidade natural. Os resultados foram comparados com um modelo semi-empírico de previsão de carga-recalque proposto para descrever o comportamento de fundações rasas considerando o pré-adensamento, parâmetros de resistência do solo e a sucção matricial. Com isso, as previsões de carga e tipo de ruptura podem ser melhor descritos e um modelo de previsão mais assertivo pode ser utilizado para o projeto de fundações.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação rasa, sapata circular, solo colapsível, prova de carga estática, comportamento carga-recalque, modelo de previsão.

ABSTRACT: The behavior of footings on tropical soil is affected by the stress history and suction present in the soil beneath the foundation. Loading tests on circular footings with a 1.00 m diameter were carried out in conditions of flooded soil with and without pre-loading, as well as tests on soil under natural moisture conditions. The results were compared with a semi-empirical load-settlement prediction model proposed to describe the behavior of shallow foundations considering preloading, soil resistance parameters and matric suction. As a result, the predictions of load and type of rupture can be better described and a more assertive prediction model can be used for foundation design.

KEYWORDS: Shallow foundation, circular footing, collapsible soil, static loading test, load-settlement behavior, prediction model.

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros modelos de previsão do comportamento de uma fundação direta basearam-se majoritariamente sobre modelos elásticos, em que os parâmetros eram deduzidos para aplicação da Teoria da Elasticidade, formulações que podem ser encontradas em Poulos e Davis (1974). Posteriormente, as formulações que incorporassem dados obtidos com ensaios de campo e sondagens permitiram descrever com maior significância o comportamento carga-recalque previsto para a fundação bem como as condições de rigidez inicial e colapso, fenômenos conhecidos para fundações assentes em solos tropicais.

Tendo em vista a natureza do solo tropical presente em grande parte do país, somada a um conjunto de fatores de períodos de estiagem ou chuvas, e nível d'água profundo, um cenário favorável se desenvolve para a camada superficial do terreno estar submetida à condição não-saturada. A camada superficial, por sua vez, é onde as principais fundações diretas, tais como sapatas e radiers, estão assentadas e tem sua rigidez e resistência afetada pela sucção matricial e pelo histórico de tensões aplicadas ao solo.

Com os resultados de provas de carga estática sapata circular em condições de solo natural e inundado, foi possível analisar o emprego de modelos semiempíricos que permitam interpretar o comportamento da fundação para recalques suficiente para a identificação de sua carga de ruptura.

1.1 Previsão semiempírica do comportamento de sapata



A previsão da curva carga-recalque de sapatas apresentada por Décourt (1999) permite que se descreva o comportamento da fundação por meio da dimensão da fundação e do cálculo da tensão de referência que pode ser correlacionado ao parâmetro N_{72} obtido com o ensaio SPT.

$$\log\left(\frac{q}{q_r}\right) = C \left(1 + \log\left(\frac{s}{B_{eq}}\right) \right) \quad (1)$$

onde B_{eq} é a dimensão equivalente ao comprimento de uma sapata quadrada; C é um parâmetro de compressibilidade proposto pelo autor do método com o valor de 0,426 com uma variação aceitável de + ou - 10%; q_r é a tensão de referência; q é a tensão aplicada pela fundação; s é o recalque calculado.

A equação 1 pode ser rescrita de forma a expressar o recalque da fundação em função da tensão q aplicada:

$$s(q) = \frac{B_{eq}}{10} \left(\frac{q}{q_r} \right)^{\frac{1}{C}} \quad (2)$$

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização geotécnica do campo experimental

Com a realização do ensaio SPT, identificou-se que o solo do Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Universidade Federal de Uberlândia (CEMSF-UFU) é composto por um material areno-siltoso marrom e a existência de um nível de água profundo em relação à superfície do terreno, conforme perfil apresentado na Figura 1, o que leva ao surgimento do fenômeno de capilaridade provocado pela condição não-saturada em que o material se encontra durante o período de estiagem.

Fonte: Santos Oliveira (2022)

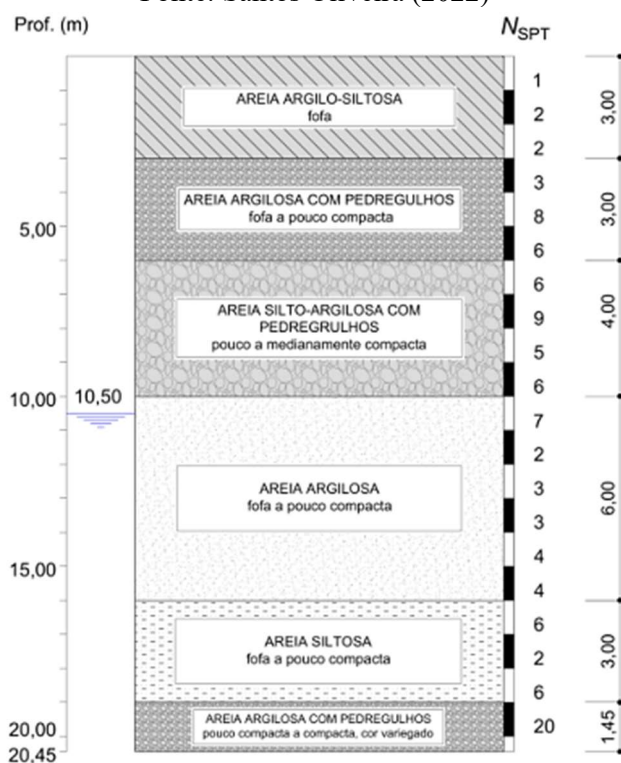


Figura 1. Perfil geotécnico do campo experimental CEMS-UFU.

Próximo ao local de realização das provas de carga foram retirados blocos para a realização de ensaios de caracterização, de adensamento unidimensional e cisalhamento direto, a fim de determinar a composição granulométrica e parâmetros de deformabilidade e resistência do material sob condição natural e inundada.

As provas de carga em fundação direta foram conduzidas conforme as normativas dadas pela ABNT NBR 6489:2019 por Santos Oliveira (2022), contando com um ensaio em condição natural e, em seguida sobre a mesma sapata circular com diâmetro $\varnothing = 1,00$ m, 1 ensaio em condição inundada, contando com o pré-carregamento aplicado no primeiro ensaio. No mesmo campo experimental, foi conduzida uma prova de carga por Pereira (2025) em sapata circular com diâmetro $\varnothing = 1,00$ m em solo pré-inundado, sem ter sido pré-carregado anteriormente por outra ação.

2.2 Proposta atualizada de Décourt (1999)

Uma proposta para a Equação 2 foi descrita e demonstrada em Oliveira e Garcia (2025)

$$s(q) = \frac{B_{eq}}{10} \left(\frac{q}{q_r + \left(\alpha u_w \tan \phi'_{peak} N_{\gamma(\phi'_{peak})} \right)} \right)^{\frac{RSA(u_w=0,e)}{0.426}} \quad (3)$$

onde q_r é a tensão de referência; $RSA(u_w = 0, e)$ é a razão entre a maior tensão vertical efetiva já aplicada à camada de solo e a tensão de cedência determinada com o adensamento unidimensional inundado para o mesmo índice de vazios; α = fator dependente da sucção matricial presente no solo, dado por Khalili e Khabbaz (1998); u_w é a sucção do solo; N_{γ} é o fator de carga dado por Terzaghi e Peck (1963).

Analisando a equação 3 é possível identificar os termos relacionados à geometria da fundação ($B_{eq}/10$), que conduzirá à tensão para a qual o recalque da fundação representa 10% de sua dimensão equivalente; o termo chamado X que trata do acréscimo de tensão devido à sucção presente no solo sob a fundação; e o termo Y que modifica a rigidez da fundação em função do histórico de tensões do solo sob a fundação.

Desta forma a equação 3 pode ser simplificada em:

$$s(q) = \frac{B_{eq}}{10} \left(\frac{q}{q_r + X} \right)^Y \quad (4)$$

Onde:

$$X = \alpha u_w \cdot \tan \phi'_{pico} \cdot N_{\gamma(\phi'_{pico})}$$

$$Y = RSA(u_w = 0, e)/0,426$$

Para exemplificar a influência do parâmetro Y sobre o recalque da sapata, apresenta-se na Figura 2 valores de Y variando-se a razão de sobreadensamento (RSA) para a condição de sucção nula do solo.

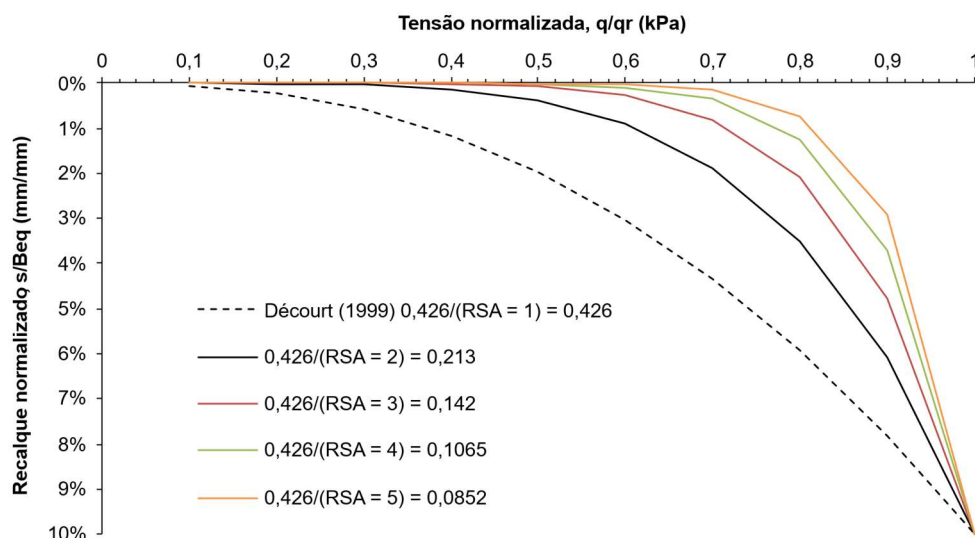


Figura 2. Influência do histórico de tensões sobre a curva carga-recalque conforme a equação modificada de Décourt.

3 RESULTADOS

Com os ensaios de laboratórios foram obtidos os valores para ângulo de atrito, sucção matricial presente no solo natural e razão de sobreadensamento. Assim, foi possível determinar os parâmetros na Tabela 1 a serem aplicados às equações propostas por Terzaghi and Peck (1963), Khalili & Khabbaz (1998) e Briaud (2013) conforme processo exposto por Oliveira e Garcia (2025).

Tabela 1. Parâmetros do solo sob a fundação obtidos por ensaios de laboratório.

Condição do solo	$q_r = 90 \times N_{72}$ (kPa)	u_w (kPa)	$RSA_{(u_w=0,e)}$ (-)	B_{eq} (m ²)	ϕ'_{pico} (°)	N_γ (-)	α (-)	$\alpha u_w \tan \phi'_{pico} N_\gamma(\phi'_{pico})$ (kPa)
Natural	90	30	2	0.89	21	6.2	0.45	32
Inundado	90	0	4	0.89	21	6.2	0.45	0
Inundado	60	0	1	0.89	21	6.2	0.45	0

A proposta modificada é apresentada nas Figuras 3 e 4 para as provas de carga realizadas por Oliveira (2022). Nota-se que o modelo semi-empírico é capaz de descrever o comportamento da fundação ensaiada para recalques de 3% a 6%, o que supera o valor de 25 mm comumente adotado para a definição de cargas de ruptura.

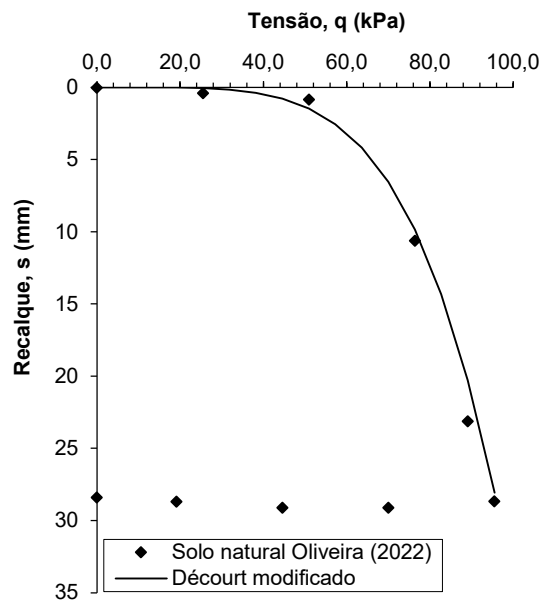


Figura 3. Curva carga-recalque prevista solo natural conforme modelo de Décourt modificado.

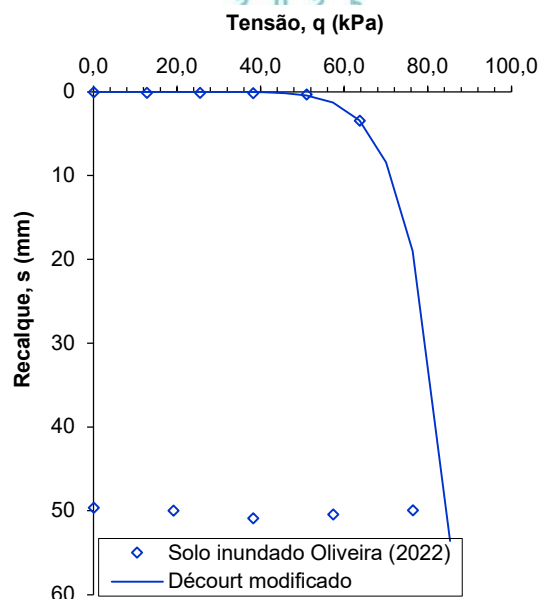


Figura 4. Curva carga-recalque prevista solo inundado com carregamento prévio conforme modelo Décourt modificado.

Na Figura 5, o modelo de Décourt modificado foi empregado para a previsão de comportamento da fundação sem carregamento prévio (RSA, assente em terreno previamente inundado, contudo percebeu-se que a adoção do valor de 60 kPa para a tensão de referência (q_r) permitiu uma melhor aproximação em relação aos pontos obtidos experimentalmente. O ajuste realizado pode ter ligação com a dispersão inerente apresentada pelo ensaio SPT realizado em camadas fofas superficiais.

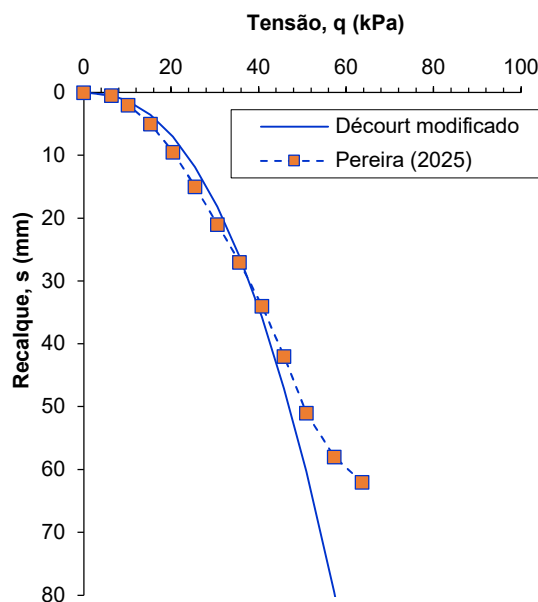


Figura 5. Curva carga-recalque estimada para solo inundado sem carregamento prévio.

4 CONCLUSÕES

Pelo exposto com as análises dos resultados e sua discussão foi possível pontuar as seguintes conclusões:

- a proposta modificada de Décourt permite incorporar parâmetros de sucção matricial e histórico de tensões para a previsão do comportamento de sapatas;



- o modelo modificado de Décourt permite explicar o ganho de rigidez inicial da fundação em função da sucção e carregamento prévio;
- em condições inundadas, o modelo modificado permitiu estimar o comportamento plástico previsto para solos fofos em condição sucção matricial nula e sem carregamento prévio. O modelo semi-empírico também permite descrever o fenômeno da colapsibilidade, conhecido para solos fofos tropicais;
- a estimativa do valor de tensão de referência q_r em função do N_{SPT} ainda pode ser melhorada para refinar a variação que valores baixos para solos fofos possuem sobre o parâmetro q_r .

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); à Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6489 de 09/2019 - *Solo - Prova de carga estática em fundação direta*. Rio de Janeiro: [S.n.].

Briaud, Jean-Louis. *Geotechnical Engineering*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

Décourt, Luciano. Behavior of Foundations Under Working Load Conditions. In: Foz do Iguaçu: ABMS, 1999.

Khalili, N.; Khabbaz, M. H. A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils. *Géotechnique*, v. 48, n. 5, p. 681–687, out. 1998.

Oliveira, Eduardo Augusto dos Santos; Garcia, Jean Rodrigo. Numerical and experimental analysis of shallow foundations on tropical climate soil using Mohr-Coulomb cap model. *Soils and Rocks*, v. 48, n. 2, p. e2025004724, 6 mar. 2025.

Pereira, Bárbara. *Análise experimental e numérica do comportamento de radier estaqueado isolado pré-carregado sob condição inundada*. [S.l.]: Universidade Federal de Uberlândia, 3 fev. 2025.

Poulos, Harry G.; Davis, E. H. *Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*. New York: Willey, 1974.

Santos Oliveira, Eduardo Augusto dos. *Análise experimental e numérica do comportamento de sapata estaqueada em solo tropical*. [S.l.]: Universidade Federal de Uberlândia, 8 ago. 2022.

Terzaghi, K.; Peck, R. B. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: John Wiley & Sons, 1963.