



## Influência da velocidade de carregamento na capacidade de carga de fundações superficiais em modelo físico

Ricardo Daniel Caballero  
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, ricardocaballero23@gmail.com

Eclesielter Batista Moreira  
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, eclesielter\_ebm@hotmail.com

Daniel de Andrade Faria  
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, danieldeafaria@gmail.com

Lucas Festugato  
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, lucas@ufrgs.br

Nilo Cesar Consoli  
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, consoli@ufrgs.br

**RESUMO:** Ensaios em modelo reduzido são procedimentos habitualmente empregados para a observação do comportamento de elementos de fundação. Uma das vantagens da utilização deste procedimento é a possibilidade de controle das variáveis que intervêm no problema estudado, permitindo assim o estudo paramétrico do problema. No estudo de fundações superficiais comumente é avaliada a influência de diferentes variáveis na capacidade de carga, como a densidade relativa do solo, as dimensões da fundação e a velocidade de carregamento. Desta forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar a influência da velocidade de carregamento na capacidade de carga de fundações superficiais assentes em areias limpas uniformes de baixa densidade relativa ( $D_r$ ). Para isso, foi utilizado um modelo físico em escala reduzida composto por um tanque circular ( $d = 70$  cm e  $h = 70$  cm) preenchido com areia através do método de pluviação. Utilizou-se como fundação superficial uma sapata circular de alumínio ( $D = 8$  cm e  $H = 5$  cm). O carregamento estático foi realizado através de um atuador que permitiu a aplicação de deslocamento controlado, sendo utilizadas 3 velocidades diferentes (0,10; 0,12 e 0,15 mm/min). Os resultados mostraram que a velocidade de carregamento estático tem pouca influência na capacidade de carga de fundações superficiais circulares assentes em um solo arenoso seco de baixa densidade relativa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelo reduzido, Velocidade de carregamento, Fundações superficiais, Carregamento estático.

### 1 INTRODUÇÃO

O estudo das fundações superficiais através de modelos reduzidos vem sendo utilizado por vários pesquisadores há muito tempo

(BOWELS, 1986; KENNY e ANDRAWES, 1997; MEYERHOF, 1974). A vantagem apresentada por esta ferramenta é o controle que pousa sobre as variáveis que influenciam o comportamento das fundações, como a



densidade relativa de solos granulares ( $D_r$ ), a geometria e tamanho da fundação, a velocidade de carregamento, entre outras. Com isso, é possível realizar um estudo paramétrico do problema que permite identificar quais são os parâmetros que mais influenciam o comportamento de uma fundação em particular.

Nesta pesquisa foi feito um estudo que permitiu identificar a influência da velocidade de carregamento na capacidade de carga de fundações circulares assentes num solo arenoso seco de base plana carregada verticalmente a velocidade constante. O estudo foi realizado através de um modelo físico em escala reduzida de fundação circular constituído por um tanque de solos preenchido com areia fina uniforme seca, de forma que sua densidade relativa seja baixa e homogênea. Para isto foi empregado o método de pluviação ao ar utilizado por Foppa *et al.* (2018), o qual demonstrou bons resultados. O carregamento foi feito por um motor servo-controlado, que permitia a aplicação de um carregamento vertical a velocidade constante. As leituras de carga e recalques foram obtidas através de um sistema de aquisição de dados.

## 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em duas etapas. Primeiramente, realizou-se a caracterização física dos materiais. Na segunda etapa, foram efetuados os ensaios em modelo reduzido de fundações superficiais circulares de base plana assentes num solo arenoso seco de base plana carregados verticalmente a velocidade constante.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Solo

O solo utilizado é uma areia quartzosa fina

uniforme, isenta de matéria orgânica, proveniente da região do município de Osório/RS. As propriedades do solo se encontram na Tabela 1 e a curva granulométrica do solo é apresentada na Figura 1. Segundo a ASTM (2017), o solo é classificado como uma areia mal graduada (SP). Esta areia foi escolhida pela disponibilidade e fácil manuseio.

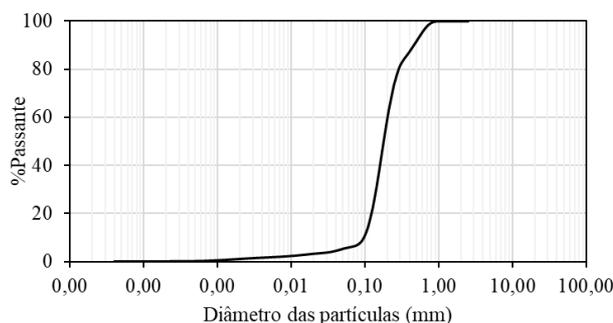


Figura 1. Curva granulométrica da areia

Tabela 1. Propriedades físicas do solo.

PROPIEDADES	VALORES
Densidade Real dos Grãos ( $G$ )	2,61
% Pedregulho ( $d > 2$ mm)	0,0%
% de Areia Grossa ( $0,6 < d < 2$ mm)	0,0%
% de Areia Média ( $0,2 < d < 0,6$ mm)	52,0%
% de Areia Fina ( $0,06 < d < 0,2$ mm)	43,4%
% de Siltes ( $0,002 < d < 0,06$ mm)	3,5%
% de Argila ( $d < 0,002$ mm)	1,1%
Diâmetro Efetivo ( $D_{10}$ ) mm	0,11
Diâmetro ( $D_{30}$ ) mm	0,16
Diâmetro ( $D_{50}$ ) mm	0,21
Diâmetro ( $D_{60}$ ) mm	0,23
Coefficiente de Uniformidade ( $C_u$ )	2,13
Coefficiente de Curvatura ( $C_c$ )	1,04
Índice de Vazios Mínimo ( $e_{min}$ )	0,54
Índice de Vazios Máximo ( $e_{máx}$ )	0,81

### 3.2 Caracterização física do solo

Os ensaios de granulometria foram realizados com um equipamento que utiliza a difração de um feixe de laser passando através de uma



amostra e uma câmera fotográfica para medição do tamanho das partículas (CILAS 1180 – Particle Size Analyser), com capacidade de detecção entre 0,00004 mm a 2,5 mm. Os índices de vazios máximo e mínimo foram determinados seguindo a metodologia prescrita nas normas NBR 12004 (ABNT, 1990) e NBR 12051 (ABNT, 1991), respectivamente. Foram realizadas medições do teor de umidade para determinação da umidade higroscópica da amostra de solo e para verificação dos parâmetros de moldagem de todas as amostras utilizadas nos testes de caracterização e provas de carga. O procedimento de ensaio seguiu o descrito na norma NBR 6457 (ABNT, 1986).

### 3.3 Ensaios em modelo reduzido

Para a execução das provas de carga em modelo reduzido, foi empregado um conjunto de equipamentos composto por uma estrutura metálica de suporte e reação, um tanque de solo, um sistema para aplicação de carga, sensores para medição de deslocamentos e um sistema de aquisição de dados (FIGURA 2). O tanque utilizado foi projetado e construído nesta pesquisa, sendo os demais componentes do sistema os mesmos utilizados por Foppa *et al.* (2018). O Sistema de aplicação de carga consiste em um atuador elétrico linear que conta com um motor servo-controlado e tem capacidade de até 10 kN. A carga é aplicada a uma velocidade constante no centro do modelo reduzido através de um pino com contato rotulado de forma a permitir a livre rotação do modelo e evitar a transmissão de esforços transversais para a célula de carga. A capacidade da célula de carga utilizada nas provas de carga foi de 5 kN, com uma resolução de 0,0025 kN. Os deslocamentos foram medidos com dois LVDTs com curso de 50 mm e resolução de 0,01 mm fixados ao tanque através de um suporte ajustável. O controle do atuador e a aquisição de dados foram feitos através de um modelo de placa PCI baseado em

microprocessador DAS 1602/16 e uma rotina desenvolvida no software LabVIEW.

O tanque foi projetado em aço inox, buscando-se assim uma estrutura de paredes rígidas e baixo atrito. As paredes e o fundo do tanque foram construídos com uma espessura de 2 mm, fornecendo assim uma rigidez suficiente para suportar as cargas para o qual será submetido. O tanque possui medidas internas de 0,70 m x 0,70 m (altura x diâmetro).

O modelo de sapata circular apresenta 80 mm de diâmetro (D), e 50 mm de espessura e foi confeccionado em alumínio. Um pedaço de lixa foi colado sob a base da fundação para fornecer rugosidade.

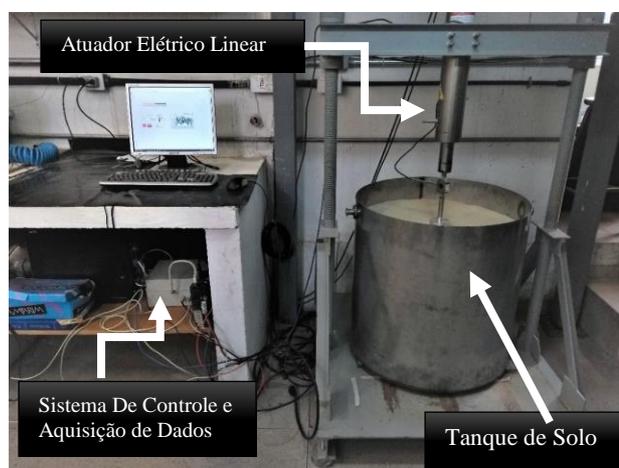


Figura 2. Visão geral do conjunto de equipamentos para a realização de ensaios em modelo reduzido

Com a intenção de obter um solo em estado fofo, foi utilizada para o enchimento do tanque de solos a técnica da pluviação ao ar, que consiste em verter areia seca através de uma abertura, a uma determinada altura, para obtenção de uma amostra homogênea em termos de densidade relativa. Esta técnica tem sido utilizada quando se necessita homogeneidade e repetibilidade em amostras de solos arenosos (FOPPA *et al.*, 2018). Foi construída uma estrutura que contém na parte superior um reservatório circular para areia. A base do reservatório foi perfurada, formando uma malha de furos de 19 mm de diâmetro com distribuição circular (FIGURA 3). Sob o fundo



do reservatório havia uma placa deslizante que permitia a queda livre das partículas através dos furos. Na face inferior da base do reservatório foi colocada uma malha de 2,6 mm de abertura para melhorar a dispersão do solo na queda.



Figura 3. Pluviador

Após o enchimento do reservatório, a placa deslizante era removida manualmente, permitindo que as partículas do solo caíssem no tanque. O tanque de solo foi preenchido em três camadas de 0,18 m de altura cada, até atingir 0,54 m de altura. Após a deposição de cada camada, cerca de 10 mm foram raspados a partir do topo, usando uma régua de metal, para nivelamento. Para a segunda camada, não foi necessário elevar o pluviador. Já para a terceira camada, foi necessário elevar o pluviador 0,08 m para atender a densidade relativa ( $D_r$ ) definida, resultando em uma altura total de queda de 1,08 m.

Para a aferição da densidade relativa foram utilizados moldes Proctor posicionados na base

de cada camada. A  $D_r$  média obtida foi de 27% ( $e_{mean} = 0,74$ ;  $\gamma_{mean} = 15 \text{ kN/m}^3$ ) com um coeficiente de variação do 8%. Com base na repetibilidade obtida nos ensaios de prova de carga em modelo reduzido, o processo de enchimento do tanque foi considerado satisfatório.

#### 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Foram realizados 4 ensaios, sendo um com 0,1 mm/min, dois com 0,12 mm/min e um com 0,15 mm/min. Para a definição da capacidade de carga foi utilizado o critério de Vesic (1963), onde a capacidade de carga se define como o ponto da curva tensão *versus* recalque a partir do qual a inclinação se iguala a zero ou a um valor mínimo constante. A Figura 4 e a Tabela 2 apresentam os resultados dos ensaios realizados em areia natural seca.

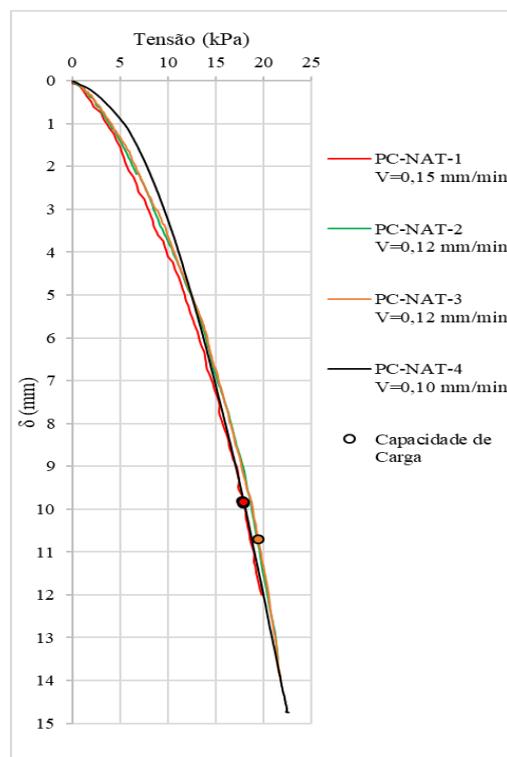


Figura 4: Resultados dos ensaios em modelo reduzido.

Analisando os resultados obtidos dos ensaios realizados a uma velocidade de 0,12 mm/min



(PC-NAT-2 e PC-NAT-3), pode-se observar uma boa concordância entre as curvas tensão *versus* recalque e as capacidades de carga definidas, concluindo-se que há uma boa repetibilidade dos resultados.

Com relação ao efeito da velocidade de carregamento, não foi observada uma tendência clara, dado que não se percebeu um aumento ou diminuição significativos da capacidade de carga com a variação da velocidade de carregamento entre 0,10 e 0,15 mm/min.

Tabela 2: capacidades de carga para areia seca - Dr = 27% (critério de VESIC, 1963)

ENSAIO	Qu (kPa)	VELOCIDADE DE CARREGAMENTO (mm/min)	$\delta_u$ (mm)	$\delta/D$ (%)
PC-NAT-1	17,9	0,15	9,8	12,3
PC-NAT-2	19,2	0,12	10,5	13,2
PC-NAT-3	19,4	0,12	10,7	13,3
PC-NAT-4	18,0	0,10	9,9	12,4

A Figura 5 expõe o comportamento dos ensaios realizados. Verifica-se que, à medida que o carregamento é aplicado, a fundação penetra verticalmente no solo. Visualmente não se observaram a formação de superfícies de ruptura, levantamento da superfície do solo junto às bordas ou rotação da fundação.

Nas curvas tensão *versus* recalque, verifica-se que há um aumento contínuo da tensão com o aumento dos recalques. Com base nisto e nas fotografias mostradas na Figura 5, pode-se concluir que o tipo de ruptura apresentado foi puncionamento, conforme previsto por Vesic (1963) para areias no estado fofo.



(a)  $\delta = 1,1$  mm (1,4% D) e (b)  $\delta = 5,9$  mm (7,4% D)

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho se pode realçar as seguintes conclusões:

- O método de pluviação ao ar utilizado para o enchimento do tanque de solos se mostrou eficaz para a obtenção de amostras homogêneas em termos de densidade relativa. Os equipamentos empregados para a realização dos ensaios se mostraram adequados para o estudo realizado, podendo ser utilizados para estudos similares.

- Os ensaios em modelo reduzido de fundação circular carregado verticalmente a velocidade constante assentes num solo arenoso seco com densidade relativa de 27% apresentaram ruptura tipo puncionamento, para as quais as curvas tensão *versus* recalque mostraram um aumento contínuo da tensão com o aumento dos recalques.

- Com relação ao efeito da velocidade de carregamento não se percebeu aumento ou redução significativa da capacidade de carga



com a variação da velocidade de carregamento entre 0,10 e 0,15 mm/min.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao apoio da CAPES e do CNPq.

## REFERÊNCIAS

- ASTM – American Society for Testing and Materials. D2487-11: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). 2017.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457: Solo – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- \_\_\_\_\_. NBR 12004: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 1990.
- \_\_\_\_\_. NBR 12051: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 1991.
- BOWELS, J. E. *Foundation Analysis and Design*. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha Ltd, 1986.
- FOPPA, D.; SACCO, R. L.; CONSOLI, N. C. Bearing capacity of footings on an artificially cemented layer above weak foundation soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, p. 1–16, 2018.
- KENNY, M. J.; ANDRAWES, K. Z. The bearing capacity of footings on a sand layer overlying soft clay. *Géotechnique*, v. 47, n. 2, p. 339–345, 1997.
- MEYERHOF, G. G. Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlaying Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 11, n. 2, p. 223–229, 1974.
- VESIC, A. B. *Bearing Capacity of Deep Foundations in Sand*. 1963.