



Fundações circulares apoiadas em camadas melhoradas de solo-cimento

Eclesielter Batista Moreira
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, Brasil, eclesielter_ebm@hotmail.com

Guilherme de Araújo Rochedo
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, Brasil, rochedogui@gmail.com

Renato Dutra Luza
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, Brasil, rdutraluza23@gmail.com

Paulo Henrique Maschio
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, Brasil, paulomaschio00@gmail.com

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

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

RESUMO: Na construção de edificações nem sempre o solo presente no terreno tem boa capacidade de suporte e baixa deformabilidade para o emprego de fundações superficiais, fazendo-se necessária a mudança do tipo de fundação e aumentando o custo da obra. O uso de camadas reforçadas de solo-cimento para suportar fundações superficiais é uma opção viável em solos de baixa capacidade de carga e tem sido estudada em diversas pesquisas. Assim, o presente estudo pretende avaliar a influência de uma camada de solo melhorado sobre o comportamento carga-deslocamento de uma base de aço circular apoiada sobre camadas circulares de solo-cimento, tendo como parâmetro de controle $\eta/C_{iv} = 17$, baseado na pesquisa de Consoli et al., (2007), Foppa et al., (2018) e Caballero (2019). O solo sobre o qual a camada foi construída é um solo residual coesivo friccional de baixa resistência. Assim, testes de carga estática foram realizados em placas (diâmetro de 300 mm) apoiadas sob o solo sem camada melhorada e em camadas reforçadas com areia de Osório e cimento CPV - ARI. Os resultados mostraram que houve ganho significativo na capacidade de suporte e redução da deformabilidade no ensaio realizado com a camada melhorada, além de que a camada resistiu aos esforços do ensaio, tendo como ruptura o puncionamento do solo subjacente.

PALAVRAS-CHAVE: Camada melhorada, Ensaio de placa, Solo-cimento.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, com a expansão dos centros urbanos, é cada vez mais comum a construção de conjuntos habitacionais populares, canteiros

de obras, bases de tanques/silos, entre outros, em regiões onde o solo não apresenta capacidade de suporte suficiente para as cargas de projeto em fundações superficiais. Por causa disso, outras alternativas como substituição do



solo (raramente utilizada atualmente, por questões ambientais), utilização de fundações profundas, entre outras, são empregadas, o que não é compatível financeiramente com o porte das obras supracitadas. Nos últimos anos, pesquisas tem sido desenvolvidas visando o melhoramento desses solos inadequados para uso de fundações superficiais (FOPPA, 2016; SALES, 1998; THOMÉ, 1999; THOMÉ et al., 2003; VENDRUSCOLO, 1996).

Na literatura há diversas metodologias para cálculo da capacidade de carga de fundações superficiais apoiadas em solos estratificados, onde a camada superior é mais resistente (TERZAGHI, 1948; MEYERHOF, 1974; MEYERHOF e HANNA, 1978). O primeiro a desenvolver uma metodologia de cálculo de capacidade de carga em sistema de dupla camada sendo a superior cimentada foi Thomé (1999). No entanto, os estudos supracitados consideram a camada superior contínua ou suficientemente superior às dimensões da fundação, não analisando a extensão lateral do reforço, apenas a espessura. Foppa *et al.*, (2018) e Caballero (2019) apresentaram uma nova metodologia de previsão da capacidade de carga de fundações superficiais assentes em solo reforçado com solo-cimento tendo em consideração tanto a espessura como a extensão lateral da camada reforçada, sendo ambos os trabalhos desenvolvidos em modelos reduzidos. Foppa *et al.*, (2018) desenvolveu particularmente para o caso de fundação superficial contínua, sob carregamento vertical centrado, sustentado por uma camada de reforço em solo-cimento sobre solos arenosos e Caballero (2019) a capacidade de carga de fundações superficiais circulares assentes em camada de reforço em solo-cimento também circulares.

Desta forma, este trabalho visa contribuir com esses estudos através de ensaios de placa de diâmetro $D=45$ cm em campo onde foi empregada camada melhorada de solo-cimento circular - com $D_r = 45$ cm e $H_r = 30$ cm - com

as relações $H/D = 1,00$, $Tr=7,5$ cm e $H_r/Tr=0,25$. (ver Figura 1).

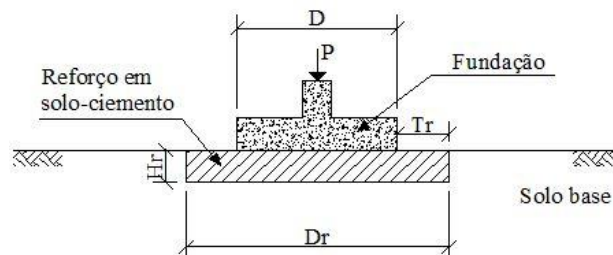


Figura 1: Esquema da prova de carga em campo.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em duas etapas. Primeiramente, foi realizada a caracterização física dos materiais. Na segunda etapa se efetuaram os ensaios em campo no solo natural e na camada melhorada circular de base plana assente num solo coesivo-friccional de base plana carregados verticalmente sob tensão constante.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

O solo utilizado para a mistura solo-cimento é uma areia quartzosa fina uniforme isenta de matéria orgânica, obtida do Município de Osório no sul do Brasil.

3.1.2 Cimento

O cimento utilizado neste trabalho é o cimento CPV – ARI, que foi escolhido devido ao seu ganho de resistência acelerado, onde aos 7 dias tem cerca de 80% da sua resistência obtidas aos 28 dias de cura.

3.1.3 Água



A água empregada tanto para a moldagem de corpos de prova quanto para os ensaios de caracterização do solo foi destilada conforme as especificações das normas.

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterização física dos materiais

Os ensaios de granulometria da areia de Osório foram realizados segundo a norma ASTM (2006). O ensaio de granulometria do cimento CPV-ARI foi realizado 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 ensaios de densidade real dos grãos da areia e do cimento foram realizados conforme preconizado pela norma ASTM D854 (2014).

A determinação dos índices de vazios máximo e mínimo foi realizada seguindo a metodologia prescrita nas normas NBR 12004 (ABNT,1990) e NBR 12051 (ABNT, 1991), respectivamente.

3.2.2 Dosagem das misturas, escavação das cavas de campo e moldagem das camadas melhoradas

Levando em consideração as pesquisas precursoras deste trabalho sobre reforço de solos com misturas solo-cimento, definiu-se para o presente estudo o teor de cimento de 5% em relação à massa seca da areia utilizada. A cava foi escavada em campo mantendo a verticalidade das paredes laterais e horizontalidade do fundo da cava e do topo da camada melhorada de forma a manter a geometria da camada melhorada (ver Figura 2).

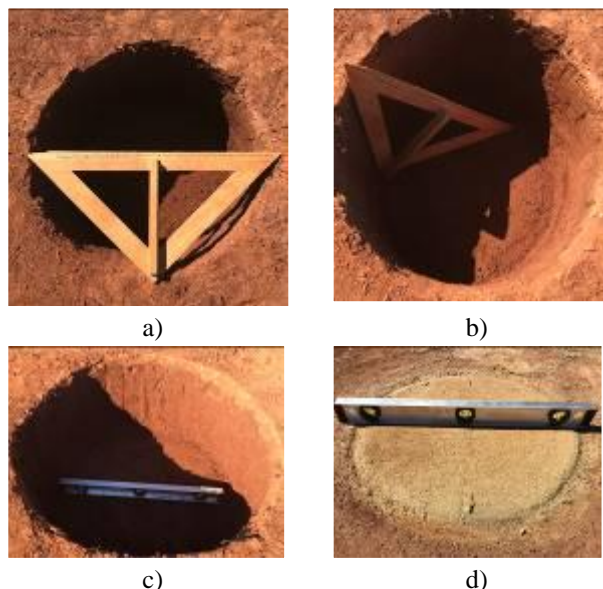


Figura 2: Aferição da cava com $D_r=45$ cm e $H_r= 30$ cm (a) Diâmetro do refoço (D_r); (b) Altura e verticalidade do refoço (H_r); (c) Horizontalidade do refoço e (d) Horizontalidade do topo da camada melhorada.

A verificação da horizontalidade, do diâmetro e da verticalidade da cava foram feitas em 4 linhas diferentes, conforme Figura 3.



Figura 3: Linhas para aferição.

Após a aferição da geometria das cavas, foi realizada a mistura da areia e cimento em betoneira e, após homogeneização da mistura, a água era adicionada (11% em relação à massa seca da mistura). O método de dosagem seguiu os parâmetros reportados por pesquisas anteriores, tendo como base o parâmetro de controle η/C_{iv} (Consoli et al., 2007, Foppa et al., 2018 e Caballero, 2019), de forma que o η/C_{iv}



de campo fosse igual à 17.

Com a mistura pronta e homogênea, dividiu-se em três porções para melhorar a compactação da mistura na cava, de forma que a camada de reforço foi compactada de 10 em 10 cm, para manter o peso específico seco máximo e, por conseguinte, o parâmetro η/C_{iv} pré-determinado. Para verificação do parâmetro supracitado foi colocado um recipiente de volume conhecido após a compactação de cada camada (ver Figura 4).

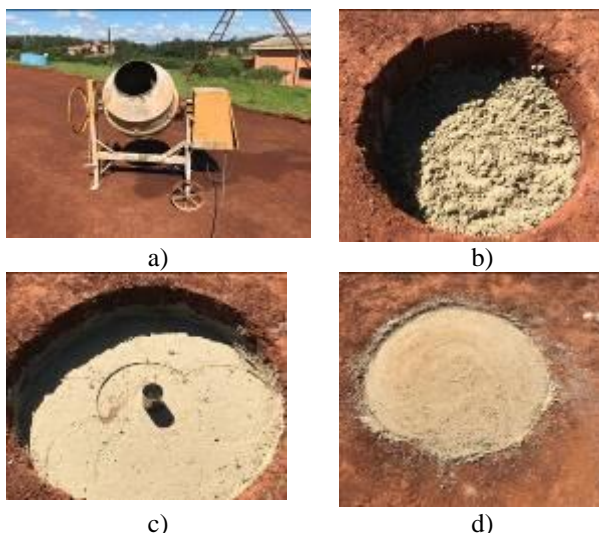


Figura 4: Execução da camada melhorada com solo-cimento $D_r=45$ cm e $H_r=30$ cm (a) Mistura em betoneira; (b) Colocação e compactação da 1ª camada – 10 cm; (c) Verificação da massa específica seca máxima e $\eta/C_{iv}=17$; e (d) Camada finalizada.

3.2.3 Ensaios de placa

Os ensaios de placa foram realizados conforme preconiza a norma NBR 6489 (ABNT, 1984). Foram feitos ensaios de placa no solo (sem reforço) e no solo reforçado com cimento. O pórtico de reação montado tem capacidade para 20 tf (Figura 5).



Figura 5: Pórtico de reação com capacidade de 20 tf.

Foi escavado ao longo do perímetro da camada de reforço e em sua profundidade (30 cm) para eliminar a parcela referente ao atrito lateral entre a camada de solo-cimento e o solo natural, de forma a obter apenas o resultado proveniente à área de solo-cimento. O ensaio foi realizado aos 28 dias de cura da camada melhorada. A placa empregada no ensaio foi de 30 cm de diâmetro (Ver Figura 6).



Figura 6: Execução do ensaio de placa na camada



melhorada com solo-cimento Dr=45 cm – sem atrito lateral.

4 RESULTADOS

Após 28 dias da execução da camada em campo foram realizados o ensaio de placa no solo natural e no reforço em solo-cimento. A Figura 7 apresenta os resultados dos dois ensaios (carga *versus* recalque).

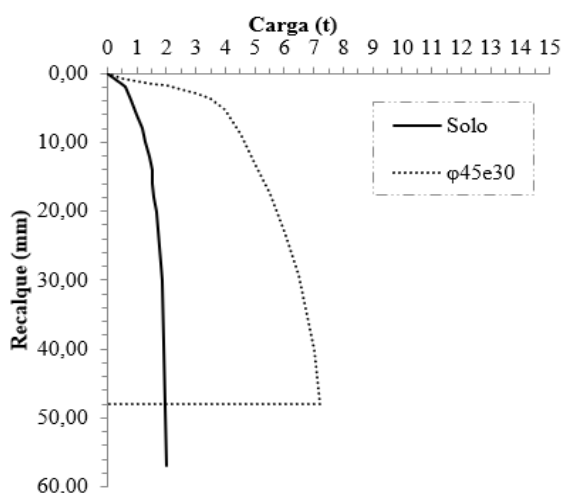


Figura 7: Carga *versus* Recalque.

Observa-se que o ensaio de placa realizado no solo apresentou uma capacidade de carga de 1,0 tf com apreciáveis deformações, tendo como característica uma ruptura por punção do solo, e o ensaio realizado no reforço teve um acréscimo de 275% em relação ao solo, ou seja, apresentou uma capacidade de carga de 3,75 tf, exibindo também uma ruptura por punção.

A Figura 8 apresenta os resultados em tensão *versus* recalque dos 2 ensaios.

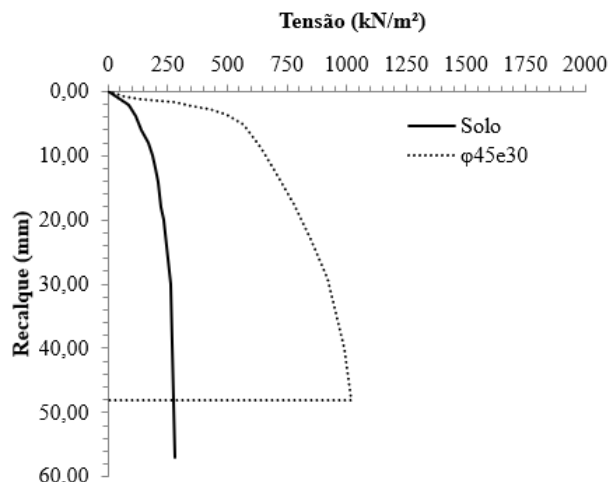


Figura 8: Tensão *versus* Recalque

Adotando o critério de ruptura da norma NBR 6122 (ABNT, 2010), onde a tensão admissível é igual à tensão com um recalque de 25mm, é possível determinar matematicamente a Tensão admissível (σ_{adm}) através dos gráficos, sendo $\sigma_{adm}=250$ kPa para o solo e 875 kPa para a camada melhorada de solo-cimento. Com os resultados da Figura 6, divide-se os valores de carga pela área da placa obtendo a tensão no ensaio. A Figura 9 mostra a tensão *versus* o recalque relativo à área da placa.

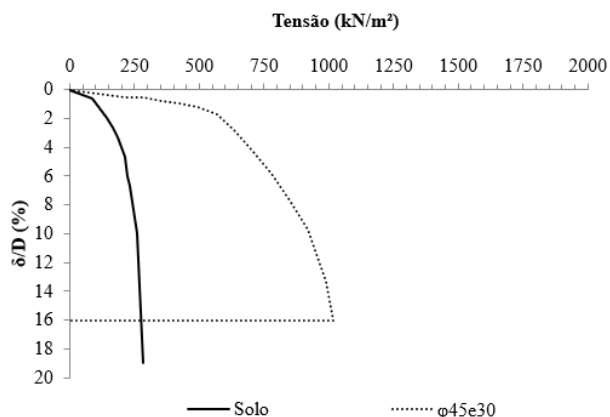


Figura 9: Tensão *versus* Recalque relativo

O recalque relativo é calculado como a relação do recalque pelo diâmetro da placa. A Figura 10 apresenta os resultados em tensão equivalente *versus* recalque relativo.

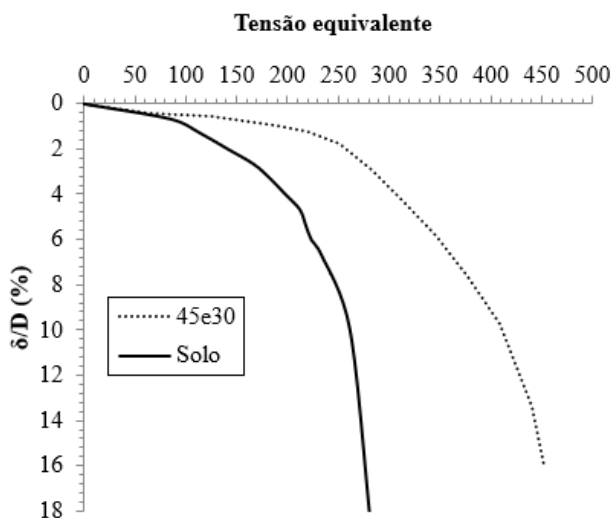


Figura 10: Tensão equivalente versus Recalque

A tensão é calculada como a carga obtida no ensaio pela área da placa. No entanto, como o ensaio com reforço teve sua ruptura pelo puncionamento do solo, ou seja, a camada não rompeu, pode-se dividir então pela área da camada melhorada, obtendo assim a tensão equivalente (à área da camada). Berardi e Lancellotta (1991) analisaram o comportamento de mais de 200 fundações superficiais e descobriram que os deslocamentos máximos nas pressões de trabalho eram geralmente da ordem de 1%. Consoli et al. (2009) usou o critério δ/D de 3% usado aqui para definir a pressão máxima ou limite é três vezes o valor de δ/D observado por Berardi e Lancellotta (1991) à pressão de trabalho. Valores de $p/p3\%$ podem então ser plotados em relação ao recalque relativo δ/D (CONSOLI *et al.*, 2009). Desta forma, a Figura 11 apresenta valores de $p/p3\%$ em relação ao recalque relativo δ/D .

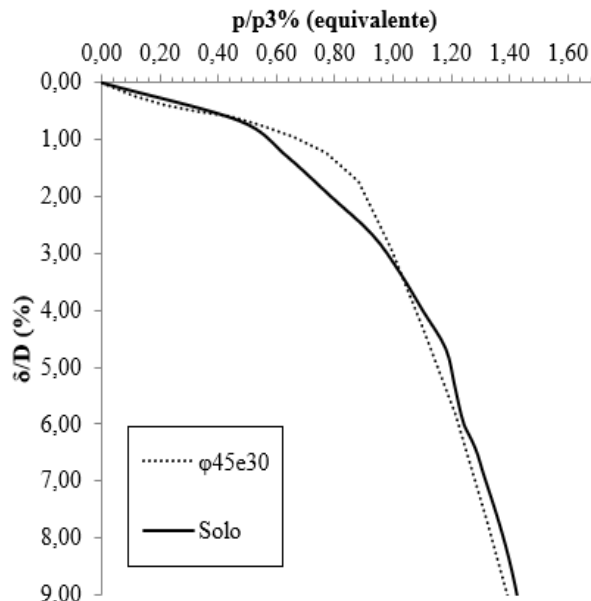


Figura 11: Tensão (3%) versus Recalque relativo

Precebe-se que há um comportamento similar entres as curvas. Isso sugere que em função dos 2 ensaios terem comportamentos semelhantes, ou seja, ruptura por puncionamento, a normalização dos ensaios tem o mesmo comportamento, pois não há a influencia da área da placa e/ou camada melhorada que se comporta como se fosse um elemento rígido puncionando o solo.

5 CONCLUSÕES

De acordo com o tipo de solo onde este trabalho foi desenvolvido, tipo de cimento usado (CPV-ARI) e o tempo de cura de 28 dias da camada melhorada as seguintes conclusões são abordadas:

- Assim como reportado por Consoli et al. (2009), a resposta global de fundações superficiais colocadas em solo residual fraco pode ser significativamente melhorada através da construção de uma camada superior de solo cimentado compactado.
- A camada melhorada com $Dr = 45$ cm e $Hr = 30$ cm e as relações $H/D = 1,00$, $Tr = 7,5$ cm e



$H_r/T_r = 0,25$ se comportou da mesma forma que em modelo reduzido, conforme reportado por Caballero (2019).

• O melhoramento de solo com misturas solo-cimento com as relações $H/D = 1,00$ e $H_r/T_r = 0,25$ apresentou como uma boa forma de melhorar/aumentar a capacidade de carga de solo coesivo-friccional fraco, como é o caso do solo deste estudo.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- ABNT - NBR 12004: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 1990.
- ABNT - NBR 12051: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 1991.
- ABNT.NBR 6489: Prova de carga direta sobre terreno de fundação. Rio de Janeiro, 1984.
- ASTM D854 – 14: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. 2014
- Berardi, R., and Lancellotta, R. (1991) Stiffness of granular soil from field performance. *Geotechnique*, 41(1), 149–157.
- Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., and Heineck, K. S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 133(2), 197-205.
- Consoli, N. C.; Dalla Rosa, F.; Fonini, A. Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, v. 135, n. 12, p. 1846-1856, 2009.
- Caballero, R. D. Desenvolvimento de uma metodologia de projeto de fundações superficiais circulares assentes sobre camada de solo-cimento. 2019. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 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.

Sales, L. F. P. Estudo do comportamento de fundações. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Thomé, A. Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Vendruscolo, M. A. Análise numérica e experimental do comportamento de fundações superficiais assentes em solo melhorado. p. 141, 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul