

Análise Numérica do Comportamento de Unidades de Radier Estaqueado Isolado com Variação do Comprimento de Estaca

Marcos Rodrigo Lopes Campos

Mestrando em Engenharia Civil, Uberlândia, UFU, Brasil, marcos.lopes@ufu.br

Alisson Filmiano Andrade Lopes

Mestre em Engenharia Civil, Uberlândia, UFU, Brasil, alisson.lopes@ufu.br

Jean Rodrigo Garcia

Professor, Uberlândia, UFU, Brasil, jean.garcia@ufu.br

RESUMO: Neste artigo, analisa-se o comportamento de unidades de radier estaqueado isolado, compostas por sapatas circulares de 1 m de diâmetro e 0,20 m de espessura, contendo uma estaca de 0,25 m de diâmetro e comprimentos de 4, 5 e 6 m. As estacas foram analisadas em um meio isotrópico, representando o solo laterítico não-saturado com características colapsíveis. As análises numéricas foram conduzidas em um modelo axissimétrico de elementos finitos, utilizando o programa RS2 da Rocscience. Os modelos numéricos desenvolvidos permitiram simular o comportamento das fundações e avaliar mais precisamente os mecanismos de transferência e distribuição de carga, bem como o atrito lateral das estacas. O compartilhamento de carga entre os radiers (sapatas) e as estacas indica um aumento na transferência de carga com o aumento do comprimento das estacas, além de uma redução na contribuição do elemento superficial na capacidade de carga da fundação. Esta redução pode ser influenciada pelo bulbo de tensões gerado pelo elemento superficial devido ao contato radier-solo. A capacidade de carga das estacas foi afetada pelo bulbo de tensões gerado pelo contato entre o radier e o solo, resultando em uma diminuição do atrito lateral na área da estaca envolvida pelo bulbo. Portanto, o uso de uma sapata com uma estaca é uma opção prática; no entanto, são necessários estudos de viabilidade técnica e econômica, considerando as condições geotécnicas específicas.

PALAVRAS-CHAVE: Radier Estaqueado, Sapata com Estaca, Modelagem Numérica, Fundações em Solos Colapsíveis.

ABSTRACT: In this article, the behavior of single pile raft units is analyzed, consisting of circular footings with a diameter of 1 meter and a thickness of 0.20 meters, containing a pile with a diameter of 0.25 meters and lengths of 4, 5, and 6 meters. The piles were analyzed in an isotropic medium, representing unsaturated lateritic soil with collapsible characteristics. Numerical analyses were conducted in an axisymmetric finite element model using the RS2 program from Rocscience. The developed numerical models allowed simulating the behavior of foundations and better assessing the load transfer mechanisms, distribution, and skin friction of the piles. The load sharing between the raft footings and the piles indicates an increase in load transfer with the increase in pile length and a decrease in the contribution of the surface element to the foundation bearing capacity. This reduction may be influenced by the stress bulb generated by the surface element due to the raft-soil contact. The bearing capacity of the piles was influenced by the stress bulb generated by the contact between the raft and the soil, resulting in a decrease in skin friction around the pile involved in the bulb. Therefore, the use of a footing with a pile is a practical option; however, technical and economic feasibility studies are required, taking into account specific geotechnical conditions.

KEYWORDS: Piled Raft, Piled Footing, Numerical Modeling, Foundations on Collapsible Soils.

1 INTRODUÇÃO

O comportamento de fundações em estacas pode sofrer influências devido ao contato do radier (sapata ou bloco) com o solo; no entanto, nos modelos tradicionais de cálculo de fundações em estacas, o contato bloco-solo acaba sendo negligenciado. Dessa forma, os projetos convencionais em estacas acabam por desconsiderar a contribuição desse contato na capacidade de carga da fundação como um todo. Estudos sobre

a contribuição do elemento superficial tem demonstrado que a consideração do contato radier-solo pode melhorar o desempenho carga e recalque da fundação.

As fundações em radier estaqueado têm se tornando cada vez mais comuns nas construções, seja como uma solução para a redução de recalques ou para melhoria da capacidade de carga do elemento superficial. Os estudos que envolvem esse modelo de fundação iniciaram-se com Zeevaert (1957), Kishida e Meyerhof (1965), Poulos (1968) e outros autores, analisando a contribuição do radier como redutor de recalques ou na capacidade de carga da estaca ou grupo de estacas (Garcia, 2015). Os primeiros casos relatados no Brasil que consideraram a contribuição do elemento superficial para a fundação foram à estaca “T” do engenheiro Luciano Decourt, e a “Estapata” do Engenheiro Eduardo Cerqueira do Val. Além dos estudos pioneiros, diversos autores vêm realizando estudos do comportamento desse modelo de fundações, como Akinmusuru (1973, 1980); Butterfield; Banerjee (1971); Clancy; Randolph (1993); Deb *et al.* (2022); Fattah; Al-Tameemi; Mustafa Yousif (2013); Garcia (2015); Garcia; Albuquerque (2019); Garcia; Albuquerque; Freitas Neto (2014); Hussein; Karim; Shlash (2020); Katzenbach; Choudhury (2001); Kuwabara (1989); Mokhberi; Rafieeian (2019); Oliveira (2022); Azevedo; Garcia (2023); Poulos (2001) e Sales (2000).

Além de investigar a contribuição do elemento superficial, este trabalho tem como propósito examinar o bulbo de tensões gerado devido à interação entre o radier (sapata ou bloco) e o solo. Sabe-se que a formação do bulbo de tensões ou deslocamento pode causar diminuição no atrito lateral da estaca, conseqüentemente, como já observado por Ottaviani (1975), Sales (2000), Viggiani; Mandolini; Russo (2007), Park; Lee (2015), Garcia (2015), Oliveira; Justino; Garcia (2022), Oliveira (2022) e Lopes (2023). Também é importante analisar a influência do comprimento da estaca em relação ao diâmetro do radier, pois esse é um fator que interfere diretamente na capacidade de carga do conjunto. Isto pois à medida que a resistência lateral aumenta, maior é a transferência de carga ao longo do comprimento da estaca, o que, por sua vez, aumentará a contribuição da estaca na capacidade de carga e na redução dos recalques da fundação, conforme observado por diversos autores, como Garcia (2015), Oliveira; Justino; Garcia (2022), Oliveira (2022) e Lopes (2023).

O conceito de radier estaqueado pressupõe que os elementos que há compõem desempenham cooperação entre si, conforme sugerido por Mandolini et al. (2013). O modelo em questão difere do modelo de grupo de estacas devido à consideração da contribuição do contato entre o radier e o solo para a capacidade de carga e a redução de recalques. No dimensionamento de um grupo de estacas, considera-se que as estacas suportam toda a carga, desconsiderando o contato radier-solo, levando em conta apenas o contato entre as estacas. Além disso, o radier é tratado como rígido. Por outro lado, no dimensionamento do radier estaqueado, o conjunto é considerado rígido, e o contato radier e o solo é levado em conta, considerando diferentes tipos de interações, tais como estaca-estaca, solo-estaca, estaca-solo, bloco-solo (Garcia; Albuquerque; Freitas Neto, 2014). A

apresenta os tipos de interações que afetam o comportamento do radier.

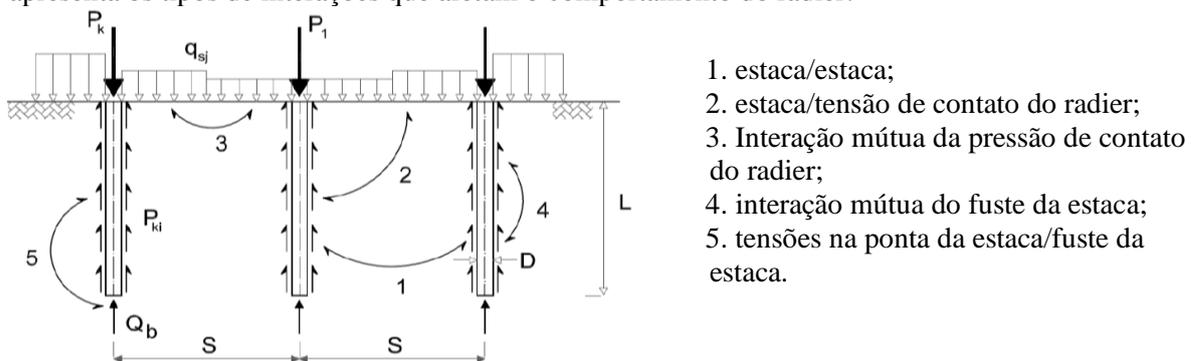


Figura 1. Diferentes interações que afetam o comportamento de fundações em radier estaqueado. (ELMOSSALAMY e FRANKE, 1997, *apud* Garcia, Albuquerque e Freitas Neto, 2014)

As dimensões do radier influenciam diretamente na magnitude do bulbo de tensões gerado devido ao contato radier e o solo, o que, por sua vez, afeta o comportamento das estacas, que sofrem influência do bulbo ao longo do seu fuste Figura 2. Segundo Viggiani; Mandolini; Russo (2007), quando a relação (D/L) for menor que 1, o radier analisado pode ser classificado no grupo de pequenos radiers, quando for maior que 1, será classificado no grupo de grandes radiers.

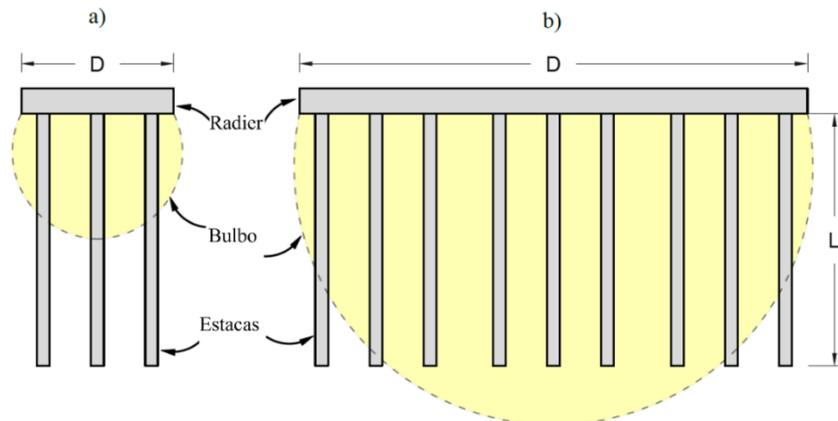


Figura 2. Abrangência do bulbo de tensões para pequenos e grandes radiers estaqueados (Adaptado de Viggiani; Mandolini; Russo, 2007 *apud* Lopes, 2023)

2 METODOLOGIA

Neste estudo, foram realizadas análises numéricas de fundações compostas por três unidades de radier estaqueado isolado, conforme terminologia adotada por Clancy; Randolph (1993). Cada unidade de fundação é composta por uma sapata com uma única estaca. Para conduzir as análises numéricas, utilizamos dados previamente validados por meio de investigações experimentais realizadas e certificadas por Lopes (2023), que serviram de base para as análises das três unidades de fundação. O autor conduziu ensaios de prova de carga em uma unidade de radier estaqueado isolado, que consistia de uma sapata circular com 1 m de diâmetro e uma estaca de 0,25 m de diâmetro e 5 m de comprimento.

Com base nos dados validados, procedemos à modelagem numérica das sapatas circulares com 1 m de diâmetro e 0,20 m de espessura, contendo uma estaca de 0,25 m de diâmetro e comprimentos de 4, 5 e 6 m (Figura 3).

As análises foram conduzidas utilizando modelos axissimétricos em elementos finitos, os quais foram modelados no *software* RS2 da Rocscience. Esses modelos foram validados com base em resultados obtidos em provas de carga realizadas no Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, situado no Triângulo Mineiro.

2.1 Parâmetros do solo e do concreto

Os parâmetros de resistência do solo e do concreto empregados neste estudo, conforme descritos na Tabela 1, foram selecionados com base nos resultados obtidos e divulgados por Oliveira (2022) e Lopes (2023) em suas pesquisas experimentais e numéricas respectivas. Esses estudos foram conduzidos no Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Universidade Federal de Uberlândia, situado no campus Santa Mônica, em Uberlândia, MG.

Tabela 1. Parâmetros do solo e do concreto

| Material | Regiões | γ [kN/m ³] | c [kPa] | ϕ [°] | P_p [kPa] | λ -k [-] | E [MPa] | ν [-] |
|-----------------------------|---------|----------------------------------|--------------|---------------|----------------|---------------------|------------|--------------|
| <i>Mohr-Coulomb com Cap</i> | | | | | | | | |
| Areia argilo-siltosa | 1 | 16 | 9 | 23 | 60 | 0,09 | 12 | 0,35 |
| Areia silto-argilosa | 2 | 16 | 10 | 30 | 80 | 0,11 | 19,8 | 0,35 |
| Solo amolgado* | 3 | 16 | 1 | 20 | - | - | 0,5 | 0,05 |
| Concreto | 4 | 25 | 513 | 35 | - | - | 23,5 | 0,2 |

* solo sob a ponta da estaca, remanescente do processo de perfuração com trado.

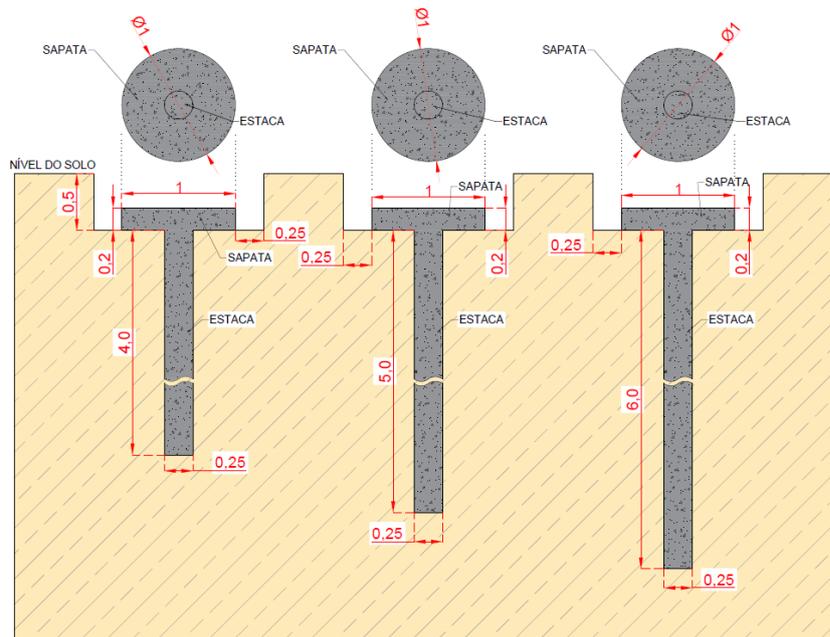


Figura 3. Geometria dos protótipos de fundações analisados.

2.2 Modelagem

A modelagem pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) teve como objetivo simular o comportamento das fundações observadas no campo (Figura 4). Para que o modelo numérico seja validado de acordo com as condições reais encontradas em campo, foi necessário avaliar as informações obtidas por meio das investigações geotécnicas no local realizadas por Oliveira (2022) e Lopes (2023) a fim de converter esses dados em parâmetros que calibrarão a ferramenta computacional.

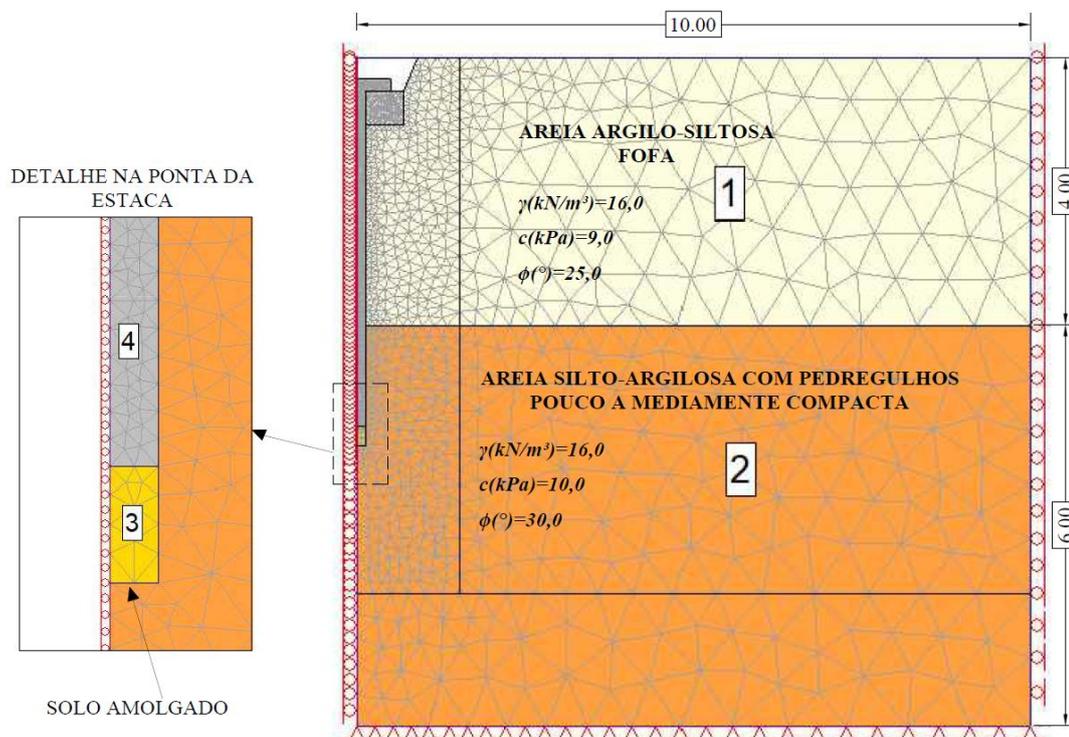


Figura 4. Dimensões do modelo e detalhes da malha de elementos finitos

O modelo utilizado para o processamento das fundações foi o de *Mohr-Coulomb* com *Cap*, por ser um dos modelos que melhor representa o comportamento de ruptura do solo, sendo uma extensão do modelo elástico-rígido-plástico de *Mohr-Coulomb*. Os elementos da malha 2D adotados neste estudo são do tipo triangular de 6 nós, com 3 nós localizados no centro de cada vértice. A convergência do modelo foi avaliada em relação ao número de graus de liberdade. Tanto a densidade da malha quanto a discretização do contorno do modelo influenciam a quantidade de graus de liberdade. Portanto, todos os modelos foram submetidos a testes de convergência para determinar a precisão necessária a ser utilizada nas análises. Em média, cada modelo possui 2509 elementos e 5186 nós.

Neste estudo, foi utilizado o *software* RS2, desenvolvido pela Rocscience, para conduzir as análises. O RS2 emprega o método dos elementos finitos e é composto por três fases de processamento, cada uma com programas específicos para suas respectivas etapas da simulação numérica: RS *Modeler* (pré-processamento), RS *Compute* (processamento) e RS *Interpret* (pós-processamento). O modelo em questão foi representado em 2D devido à geometria das fundações, o que permitiu a construção de um modelo axissimétrico, facilitando sua criação e processamento por meio do Método dos Elementos Finitos em 2D.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 5, são apresentadas as curvas de carga vs recalque obtidas pelo método dos elementos finitos para cada uma das unidades de radier estaqueado isolado (REI) contendo uma estaca de 0,25 m de diâmetro e comprimentos de 4, 5 e 6 m. Observa-se que, com o aumento do comprimento da estaca, há um aumento na capacidade de carga e no recalque admissível. Nota-se que, ao aumentar o comprimento da estaca de 4 para 5 metros, houve um ganho de 16% na capacidade de carga com um aumento de 10% no recalque admissível. Enquanto ao aumentar o comprimento de 5 para 6 metros, houve um ganho de 33% na capacidade de carga, com um aumento de 38% no recalque admissível (Tabela 2).

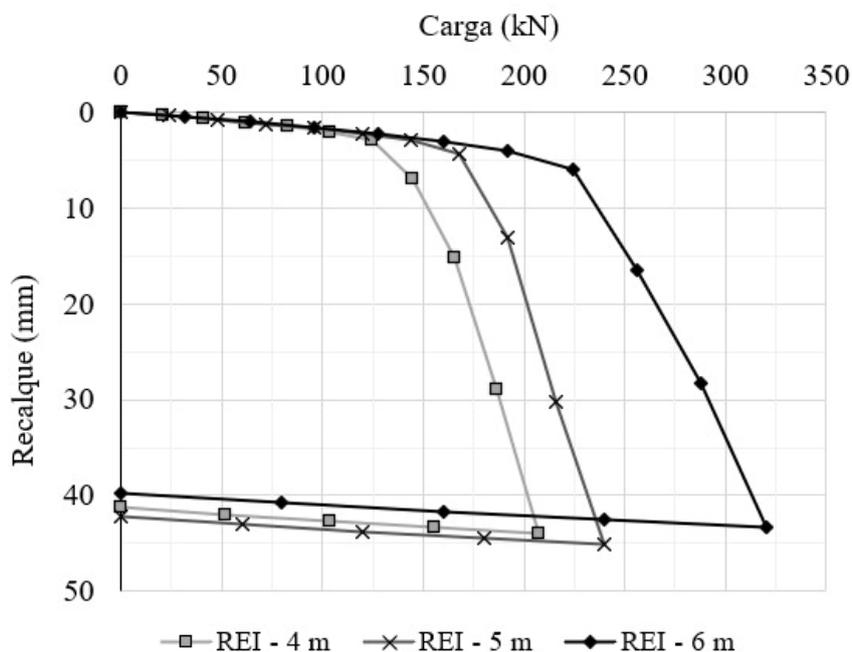


Figura 5. Curva carga vs recalque das fundações em unidades de radier estaqueado isolado.

Verifica-se que estacas mais longas exercem uma maior influência no comportamento carga versus recalque da fundação (Figura 7). Entretanto, o bulbo de tensões gerado pela sapata provoca um acréscimo nas tensões e no recalque no solo na região do bulbo de tensões, o que tende a reduzir o atrito lateral e provocar um maior recalque na fundação (Figura 6). Apesar do aumento na capacidade de carga, verifica-se que a rigidez das fundações não apresentou variação significativa. Dessa forma, quanto maior a carga, maior o recalque para a carga admissível nesse tipo de fundação e condições estudadas.

O atrito lateral ao longo do fuste das estacas das fundações estudadas foi obtido através da determinação das cargas medidas a cada 30 cm do topo até a ponta da estaca, divididas pela respectiva área lateral do fuste compreendida nesse intervalo (Figura 6).

Tabela 2. Capacidade de carga máxima, última, admissível e rigidez das fundações estudadas.

| Fundação ensaiada | $Q_{m\acute{a}x}$ | Q_{ult_25mm} | Q_{adm} | s_{adm} | K |
|-------------------|-------------------|-----------------|-----------|-----------|---------|
| | [kN] | [kN] | [kN] | [mm] | [kN/mm] |
| REI - L4m | 207 | 180 | 90 | 1,73 | 52 |
| REI - L5m | 240 | 209 | 104 | 1,91 | 54 |
| REI - L6m | 320 | 279 | 140 | 2,63 | 53 |

Legenda: $Q_{m\acute{a}x}$ - carga máxima de ensaio; Q_{ult_25mm} - carga última para 25 mm de recalque; Q_{adm} - carga admissível para Fator de Segurança igual a 2; s_{adm} - recalque para a carga admissível.

O compartilhamento de carga entre os radiers (sapatas) e as estacas indica um aumento na transferência de carga com o aumento do comprimento das estacas e uma redução na contribuição do elemento superficial (radier/sapata). Essa redução pode ser influenciada pelo bulbo de tensões gerado pelo elemento superficial devido ao contato radier-solo (Figura 7).

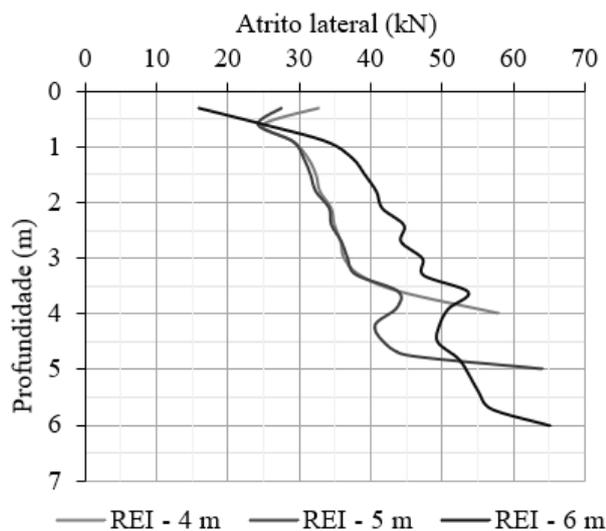


Figura 6. Atrito lateral ao longo do fuste das estacas das fundações estudadas.

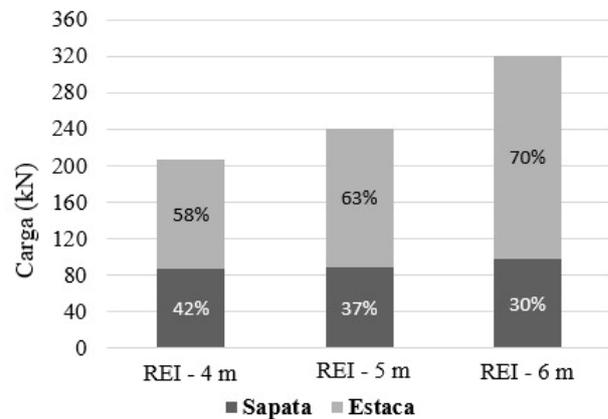


Figura 7. Compartilhamento de carga nas fundações estudadas.

4 CONCLUSÃO

Os resultados e análises desta pesquisa permitiram identificar as seguintes conclusões:

O aumento no comprimento da estaca resultou em uma absorção de carga mais significativa pela estaca, ocasionando uma redução subsequente na carga suportada pelo radier.

Foi observado um considerável aumento na capacidade de carga das fundações com o incremento no comprimento das estacas. Houve um aumento de aproximadamente 55% na capacidade de carga do REI de 6 m em relação ao REI de 4 m.

A capacidade de carga das estacas foi influenciada pelo bulbo de tensões gerado pelo contato entre o radier e o solo, resultando na diminuição do atrito lateral na área da estaca envolvida pelo bulbo.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG APQ-00335-21), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ 404634/2021-4) e à Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

REFERÊNCIAS

- Akinmusuru JO (1973) In, he influence of a pile cap on bearing capacity of piles Sand. Dissertação de Mestrado, University of Zaria Nigéria
- Akinmusuru JO (1980) Interaction of piles and cap in piled footing. *J Geotech Eng Div* 106:1263–1268
- Butterfield R, Banerjee PK (1971) The Problem of Pile Group–Pile Cap Interaction. *Géotechnique* 21:135–142. <https://doi.org/10.1680/geot.1971.21.2.135>
- Clancy P, Randolph MF (1993) An approximate analysis procedure for piled raft foundations. *Int J Numer Anal Methods Geomech* 17:849–869. <https://doi.org/10.1002/nag.1610171203>
- Deb P, Debnath B, Reang RB, Pal SK (2022) Structural analysis of piled raft foundation in soft soil: An experimental simulation and parametric study with numerical method. *Ocean Eng* 261:112139. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2022.112139>
- dos Santos Oliveira EA, Garcia JR (2023) An analysis of static loading tests on short bored pile in tropical soil. *Arab J Geosci* 16:299. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11399-w>
- Fattah MY, Al-Tameemi S, Mustafa Yousif (2013) Bearing Capacity of Pile Group and Piled Raft Foundations on Sandy Soil. *J Eng Dev* 17:64–96
- França AG, Rodrigo GJ (2023) Influence of Pile Cap–Ground Contact Geometry on the Behavior of Piled Foundations. *Arab J Sci Eng*. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08091-2>
- Garcia JR (2015) Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP. Universidade Estadual de Campinas
- Garcia JR, Albuquerque PJR de (2019) Analysis of the contribution of the block-soil contact in piled foundations. *Lat Am J Solids Struct* 16:1–22. <https://doi.org/10.1590/1679-78255565>
- Garcia JR, Albuquerque PJR de, Neto O de F (2014) Avaliação do Efeito de Contato em Fundações Estaqueadas Assente em Solo Argiloso e Arenoso. XVII Congr Bras Mecânica dos Solos e Eng 1:
- Hussein HH, Karim HH, Shlash KT (2020) Analysis of piled raft foundation in sandy soil using full scale models. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 737:012102. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012102>
- Katzenbach R, Choudhury D (2001) Recommendations for the design and construction of piled rafts. *Proc fifteenth Int Conf Soil Mech Geotech Eng* 1–3:
- Kishida H, Meyerhof GG (1965) Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sands. *7 th Int CSMFE* 11:
- Kuwabara F (1989) An Elastic Analysis for Piled Raft Foundations in a Homogeneous Soil. *Soils Found* 29:82–92. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.29.82>
- Lopes AFA (2023) Análise experimental e numérica de radier estaqueado isolado com uma estaca em solo tropical na condição in situ. UFU
- Mandolini A, Di Laora R, Mascarucci Y (2013) Rational design of piled raft. In: *Procedia Engineering*
- Mokhberi M, Rafieeian SA (2019) The piled-raft behavior installed in unsaturated collapsible soils. *Arab J Geosci* 12:49. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4177-z>
- Oliveira EA dos S (2022) Análise experimental e numérica do comportamento de sapata estaqueada em solo

tropical. FEVIV

- Oliveira EA dos S, Justino MO, Garcia JR (2022) Numerical analysis of piled rafts with short bored piles. Rev IBRACON Estruturas e Mater 15:. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952022000400008>
- Ottaviani M (1975) Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups. Géotechnique 25:159–174. <https://doi.org/10.1680/geot.1975.25.2.159>
- Park D, Lee J (2015) Comparative Analysis of Various Interaction Effects for Piled Rafts in Sands Using Centrifuge Tests. J Geotech Geoenvironmental Eng 141:. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001183](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001183)
- Poulos HG (2001) Pile raft foundations: Desig and applications. Géotechnique 51 2:95–113
- Poulos HG (1968) Analysis of the settlement of piles groups. Géotechnique 18:449–471
- Sales MM (2000) ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE SAPATAS ESTAQUEADAS. G.TD/0002A
- Viggiani C, Mandolini A, Russo G (2007) Piles and Pile Groups. In: Applied Soil Mechanics. In: Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons I (ed) Applied Soil Mechanics. Wiley, pp 286–331
- Zeevaert L (1957) Compensated Friction-pile Foundation to Reduce the Seulement of Buildings on the Highly Compressible Volcanic Clay of Mexico City. 4 th ICSMFE 2: