



Análise numérica de radier estaqueado isolado com uma estaca em solo tropical

Alisson Filmiano Andrade Lopes

MSc. Eng., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, alisson.lopes@ufu.br

Jean Rodrigo Garcia

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

RESUMO: Analisa-se neste artigo, o comportamento de fundações submetidas à compressão axial por meio de um modelo numérico simulando provas de carga estática realizadas em protótipos de estaca isolada e radier estaqueado isolado com uma estaca. Desta forma, objetivou-se analisar os benefícios da combinação dos dois tipos de fundação (superficial e profunda) proporciona em construções na região de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, onde o subsolo é predominantemente composto por areia silto-argilosa. Para isso, foram simuladas numericamente duas estacas escavadas com 5 m de comprimento e 0,25 m de diâmetro, sendo uma isolada e outra coroada por uma sapata de 1 m de diâmetro e 0,20 m de altura. A partir das análises numéricas, foi possível avaliar a distribuição de carga entre a estaca e a sapata, bem como comparar a transferência de carga axial ao longo do comprimento de ambas as estacas. Com base nos resultados, constatou-se que o radier estaqueado apresentou um ganho de aproximadamente 7% na capacidade de carga em relação à estaca isolada, mesmo em solo de baixa capacidade de suporte. Observou-se também que a estaca sob a sapata funciona como elemento que limita o deslocamento, aumenta a capacidade de carga e reduz o recalque do elemento superficial.

PALAVRAS-CHAVE: radier estaqueado isolado, análise numérica, capacidade de carga

ABSTRACT: This article analyzes the behavior of foundations subjected to axial compression through a numerical model simulating static load tests conducted on prototypes of single piles and single pile raft with a footing. The objective was to assess the benefits that the combination of these two types of foundation (shallow and deep) provides in constructions in the region of Uberlândia, Minas Gerais, Brazil, where the subsoil is predominantly composed of sandy-silty clay. To achieve this, two bored piles with a length of 5 m and a diameter of 0.25 m were numerically simulated, one being single and the other cap with a 1 m diameter and 0.20 m height footing. Through the numerical analyses, it was possible to evaluate the load distribution between the pile and the footing, as well as to compare the axial load transfer along the length of both piles. Based on the results, it was observed that the piled raft showed an increase of approximately 7% in load capacity compared to the single pile, even in low-support capacity soil. Additionally, it was noted that the pile beneath the footing acts as an element that limits displacement, increases load capacity, and reduces the settlement of the shallow foundation.

KEYWORDS: single pile raft, numerical analysis, load capacity

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





1 Introdução

Na região do Triângulo Mineiro, onde a cidade de Uberlândia está situada, as construções populares são preponderantemente executadas em fundações em estacas escavadas ou radier isolado. Nesta região há uma camada de solo laterítico, composta por areia argilo-siltosa porosa, de baixa capacidade suporte e suscetível a deformações significativas, mas não existem dados técnico-científicos para subsidiar o projeto de “radier estaqueado isolado”. Essa condição, é interessante para avaliar o comportamento diferencial de radier estaqueado, um tipo colaborativo de fundação, usando os conceitos de radier estaqueado isolado, pois essa técnica inicialmente aumenta a capacidade de carga do sistema, reduz o comprimento das estacas em relação ao projeto convencional em bloco estaqueado e uniformiza os recalques.

A terminologia radier estaqueado isolado é usado por Clancy e Randolph (1993) em seu artigo An Approximate Analysis Procedure For Piled Raft Foundations para designar uma unidade obtida da divisão de um radier estaqueado.

Burland et al. (1977) e Randolph (1994) propuseram o uso de estacas para restringir o deslocamento do elemento superficial, aumentando, assim, a capacidade de carga da fundação. Essa técnica tem sido utilizada em edificações onde o solo apresenta propriedades razoáveis de suporte para fundações rasas e onde são esperados recalques totais e diferenciais significativos.

De acordo com Oliveira; Justino e Garcia (2022), a inclusão de estacas no radier reduz o recalque e aumenta a rigidez geral. Os autores observaram que esses efeitos são amplificados em estacas com maiores razões de esbeltez (L/d). Como é considerada uma fundação híbrida, ela gera um mecanismo complexo de compartilhamento de carga entre o radier e a estaca (Halder e Manna, 2021) que é modificado de acordo com os efeitos das variadas interações entre os elementos (EL-MOSSALLAMY; FRANKE, 1997).

Portanto, nesta pesquisa, foram utilizadas análises numéricas axissimétrica em elementos finitos 2D por meio do software RS2 da Rocscience, calibradas e validadas por ensaios experimentais de campo, para uma melhor compreensão das interações que ocorrem em fundação rasa e profunda de forma cooperativa.

Assim, o objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento de fundações, submetidas à compressão axial, executadas a partir de estacas e sapatas isoladas e radier estaqueado (sapata e estaca engastada), em solo tropical de Uberlândia situado na região do Triângulo Mineiro. Além disso, verificar a capacidade de carga das fundações por meio de análise numérica, a influência da interação do radier na distribuição de carga e atrito lateral na estaca, a influência da estaca para o radier; os percentuais de carga total a serem transferido ao solo pelo elemento horizontal (radier) e vertical (estaca) do radier estaqueado isolado, assim como determinar o coeficiente de compartilhamento de carga (α_{pr}).

Os resultados dos ensaios foram apresentados e discutidas de forma ampla, a fim de uma melhor compreensão do mecanismo de compartilhamento de carga assim como as diferentes interações entre os elementos do radier estaqueado isolado.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



2 Fundamento teórico

2.1 Interações entre os elementos do radier estaqueado

De acordo com El-Mossallamy e Franke (1997), existem várias interações que governam o comportamento de um radier estaqueado, como, por exemplo as condições do subsolo, os parâmetros de projetos, como as dimensões da fundação além da disposição e espaçamento das estacas, e outros fatores que podem afetar o comportamento dessa fundação.

Conforme pode ser observado na Figura 1, as interações ocorrem das seguintes formas: 1. Estaca/estaca; 2. Estaca/pressão de contato do radier; 3. Interação mútua da pressão de contato do radier; 4. Interação mútua do fuste da estaca; 5. Tensões na ponta da estaca/fuste da estaca

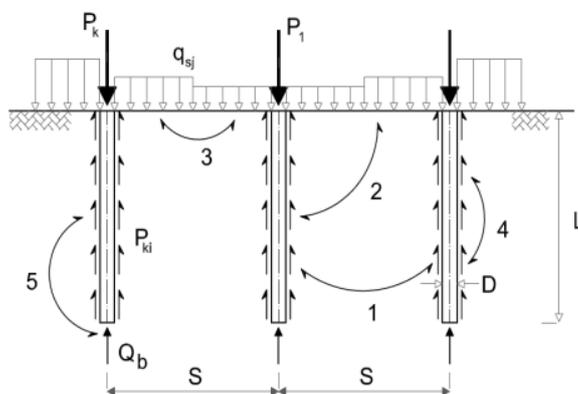


Figura 1 . Variadas interações do radier estaqueado (adaptado de El-mossallamy e Franke, 1997)

Segundo Viggiani et al. (2012), a largura do radier exerce influência na região do bulbo entre o radier e o solo, que depende da relação entre o diâmetro do elemento da fundação superficial e comprimento da estaca (D/L). Quando essa relação é menor que 1, os autores consideram que se trata de pequenos radiers (Figura 2a), e quando é maior do que 1 são definidos como grandes (Figura 2b).

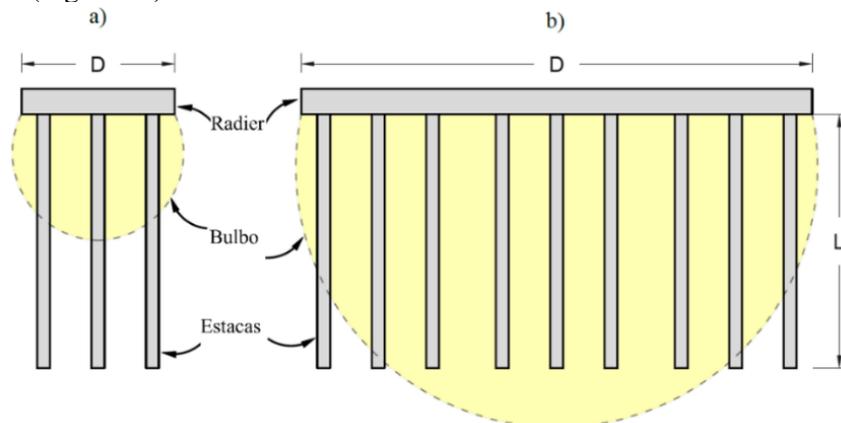


Figura 2. Pequenos (a) e grandes radiers estaqueados (b)

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



2.2 Compartilhamento de carga

A carga distribuída tanto no radier quanto nos componentes da estaca resultantes deste sistema de transferência pode ser caracterizado usando um coeficiente α_{pr} proposto por Mandolini (2003) conforme (1).

$$\alpha_{pr} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{pile,i}}{Q_{PR}} \quad (1)$$

Onde: Q_{PR} é a carga total aplicada no radier estaqueado; $Q_{pile,i}$ é a carga absorvida pelas estacas.

Dessa forma, $\alpha_{pr} = 0$ representa uma fundação rasa sem estacas, ao passo que $\alpha_{pr} = 1$ representa um grupo de estacas, em que o topo não tem contato com o solo. Já valores para α_{pr} entre 0 e 1, representa um radier estaqueado (Figura 3).

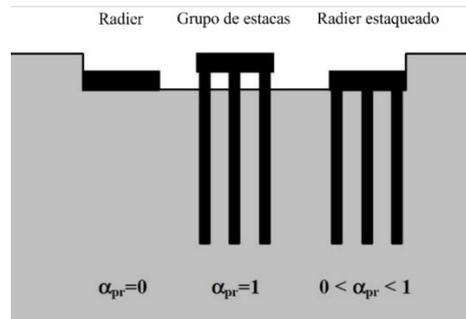


Figura 3. Representação da taxa de compartilhamento de carga.

3 Protótipos das Fundações analisadas numericamente

Na Figura 4, verificam-se as fundações analisadas numericamente, sendo elas a sapata isolada (SI), estaca isolada (EI) e radier estaqueado isolado (REI).

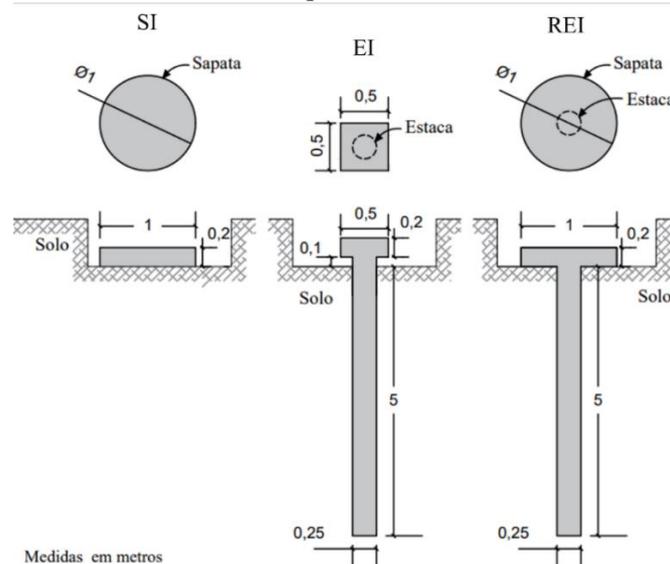


Figura 4. Fundações analisadas numericamente

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



3.1 Modelagem numérica

A modelagem utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo simular o comportamento dos protótipos de fundações. Para garantir que os modelos numéricos representem adequadamente essas fundações, é necessário avaliar as informações obtidas nas investigações geotécnicas de campo e transformar esses dados em parâmetros utilizados pela ferramenta computacional. Nesse estudo, o software RS2 da Rocscience foi utilizado para construir os modelos, o qual emprega o MEF para resolver os problemas geotécnicos. No presente estudo, os elementos da malha utilizados são do tipo plano triangular com 6 nós em um modelo axissimétrico. Um teste de refinamento foi realizado para eliminar a influência da malha nos resultados. No final, a malha do problema foi composta por 1.726 elementos e 3.599 nós, utilizando refinamento comum em elementos finitos. Os parâmetros do solo utilizados no modelo numérico foram obtidos através de investigação geotécnica, dentre elas o ensaio N_{SPT} conforme Tabela 1, além de retroanálise. Já os parâmetros do concreto foram determinados de acordo com Ardiaca (2009). Os parâmetros assim obtidos estão demonstrados na Tabela 2.

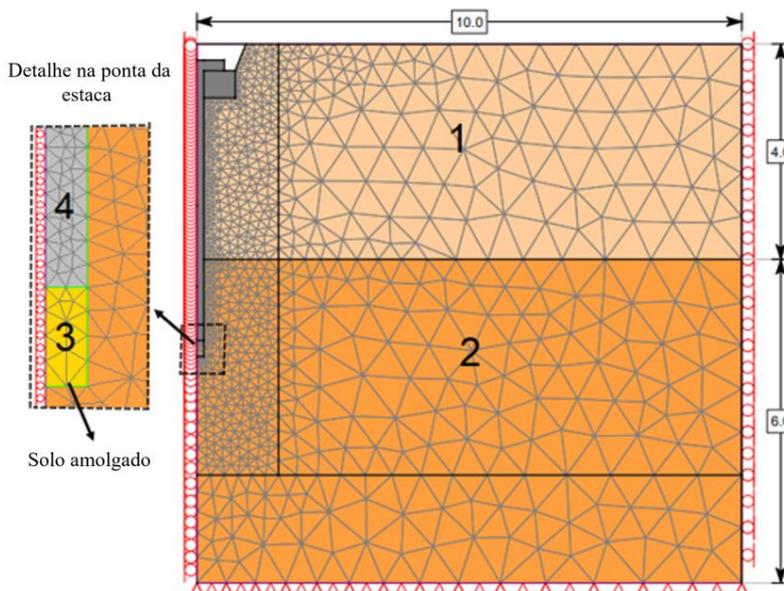
Tabela 1. Perfil geotécnico do campo experimental.

Material	Profundidade [m]	γ [kN/m ³]	N_{72} [golpes]
Areia argilo-siltosa	0,0-1,0	16	2
	1,0-2,0		2
	2,0-3,0		2
Areia argilosa com pedregulhos	3,0-4,0	16	3
	4,0-5,0		8
	5,0-6,0		6

Tabela 2. Parâmetros dos materiais para o modelo numérico.

Material	Regiões	γ [kN/m ³]	c [kPa]	ϕ [°]	P_p [kPa]	λ -k [-]	E [MPa]	ν [-]
Mohr-Coulomb with Cap								
Solo	1	16	9	23	60	0,12	12	0,35
	2	16	10	30	80	0,11	19,8	0,35
Solo Amolgado	3	15	1	21	-	-	0,5	0,01
Mohr-Coulomb								
Concreto	4	25	513	35	-	-	19600	0,2

Para uma representação mais precisa do radier estaqueado isolado (REI), o modelo numérico foi dividido em 4 regiões, cada uma representando materiais diferentes (Figura 5). O mesmo critério foi seguido para as análises da sapata isolada (SI) e estaca isolada (EI).



Medidas em metros

Figura 5. Modelo numérico e malha em elementos finitos subdivididos em regiões.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



4 Resultados e Discussão

Nessa etapa, são apresentados os resultados das curvas carga vs recalque das análises numéricas da sapata isolada (SI), estaca isolada (EI) e radier estaqueado isolado (REI). Além disso, serão apresentados os resultados do atrito lateral unitário ao longo da estaca isolada e da estaca do radier estaqueado isolado (E_REI), transferência de carga, bulbo de deslocamento sob a sapata do radier estaqueado isolado e compartilhamento de carga entre os elementos deste. Para se alcançar o critério proposto por Décourt (1993), em que resulte num recalque de 10 % do diâmetro nominal da estaca que equivale a 25 mm de deslocamento, realizou-se a extrapolação das curvas carga vs recalque, utilizando o método de extrapolação proposto por Décourt (1996), conforme apresentado na Figura 6.

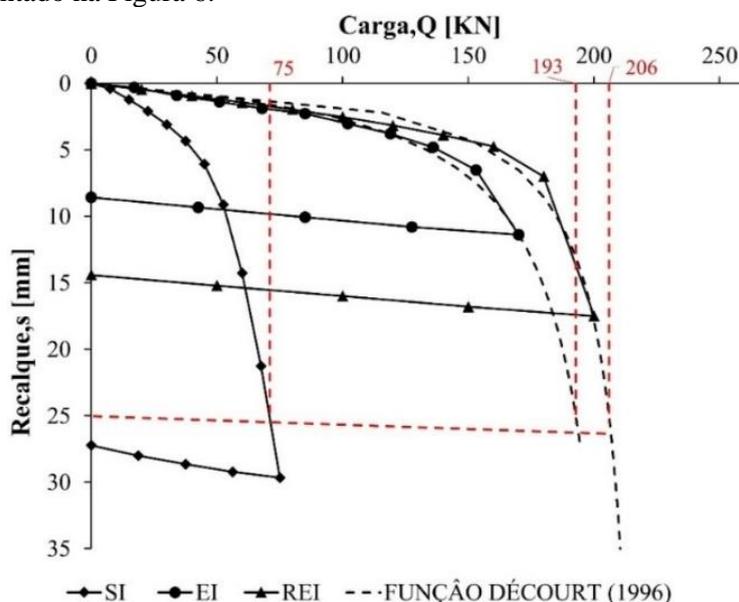


Figura 6. Curvas carga vs recalque obtidas numericamente.

4.1 Transferência de carga e atrito lateral na estaca isolada (EI)

A transferência de carga ao longo do comprimento da estaca é composta por três curvas numéricas, correspondendo aos estágios de carregamento de 10, 80 e 170 kN (Figura 7). Essas curvas fornecem informações sobre como a carga é transferida ao longo da estaca para os respectivos estágios de carregamento. Para isso, determinou-se a carga no topo (0 m), meio (4,1 m) e ponta da estaca (5 m), para um melhor detalhamento da transferência de carga nas duas camadas do solo (região 1 e 2) o qual demonstraram por meio da tabela 1 (perfil geotécnico do campo experimental), que houve um ganho de resistência do solo da região 1 para a 2. O mesmo procedimento foi realizado para a estaca do radier estaqueado isolado (E_REI).

Ademais, analisou-se também o atrito lateral unitário da estaca isolada (EI) ao longo de seu comprimento. Os valores de carga axial foram obtidos a partir do modelo numérico simulado em intervalos de 30 a 40 cm. Essa abordagem permitiu uma maior variação do atrito lateral ao longo do fuste da estaca no modelo numérico, capturando melhor o comportamento real do sistema (Figura 8).

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



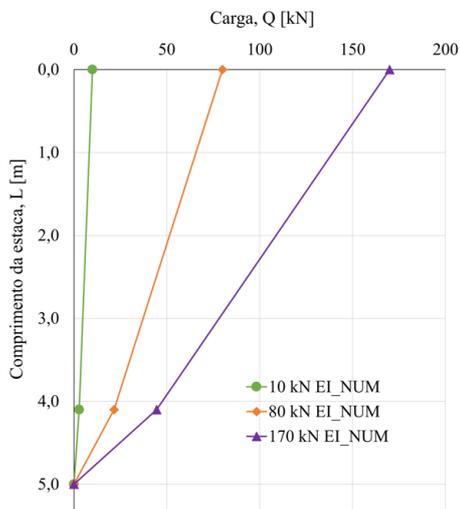


Figura 7. Transferência de carga da EI

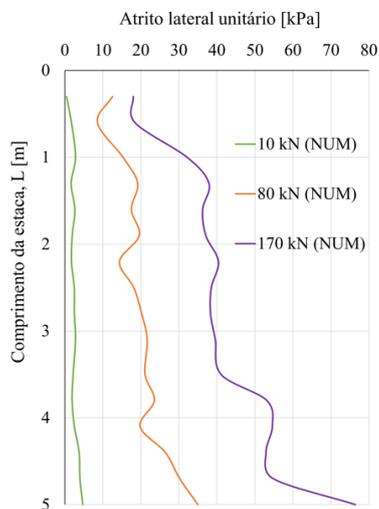


Figura 8. Atrito lateral unitário da EI

4.2 Bulbo de tensões e transferência de carga no radier estaqueado isolado

Na Figura 9, são apresentados os resultados obtidos após o processamento da análise numérica para a fundação em radier estaqueado isolado (REI). Nesses resultados, são mostrados os deslocamentos causados pelas cargas aplicadas, correspondendo a 10 %, 50 % e 100 % da carga total. Os deslocamentos medidos no topo do radier e mesmo local de aplicação da carga são de 0,46 mm, 2,52 mm e 17,5 mm, respectivamente. Esses valores indicam a magnitude dos deslocamentos resultantes da carga aplicada em diferentes proporções, fornecendo uma medida do comportamento dessa fundação sob essas condições de carga.

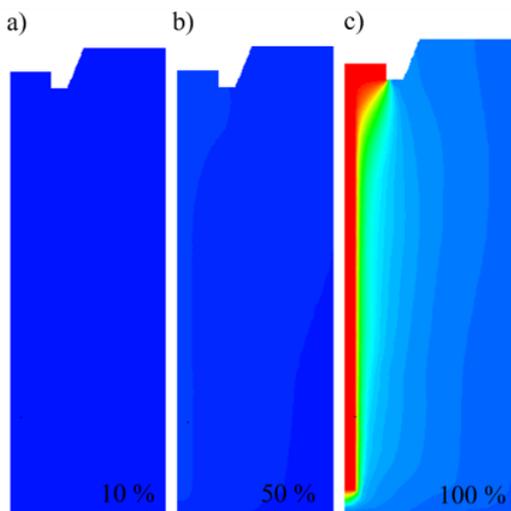


Figura 9. Deslocamento no radier estaqueado isolado para 10 %, 50 % e 100 %.

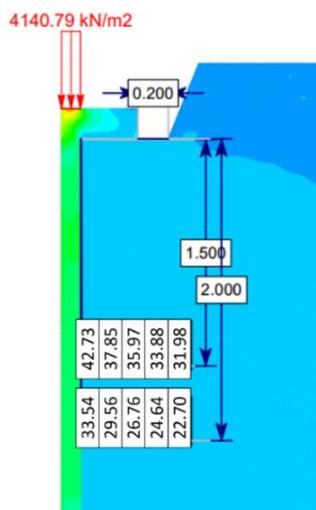


Figura 10. Acréscimos de tensões observado na Profundidade de 1,5 a 2,0 m do bulbo de tensões.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





Observa-se que, mesmo com a presença da estaca, ocorreu a formação de um bulbo de deslocamento no solo sob a sapata. Por meio do modelo numérico determinou-se a tensão pela média de cinco pontos na profundidade de 1,5 e 2,0 metros (Figura 10). Constatou-se um acréscimo de tensão no solo devido à carga aplicada pela área líquida da sapata nesses níveis de profundidade é de aproximadamente 13% e 10% respectivamente. Demonstrado que o bulbo teve um alcance de 1,5 a 2 vezes o diâmetro da sapata (B). Esses resultados demonstram a influência da fundação na redistribuição de tensões e deslocamentos no solo.

4.2 Transferência de carga e atrito lateral na estaca do radier estaqueado isolado

Na Figura 11, são apresentadas as curvas de transferência de carga ao longo do comprimento da estaca do radier estaqueado isolado (E_REI) obtidas numericamente para três estágios de carregamento em 10 %, 50 % e 100 % da carga aplicada no topo da fundação. Esses resultados demonstram que o atrito lateral da estaca sofre influência das tensões de compressão exercidas pela sapata na camada de solo, reduzindo a sua intensidade próximo ao topo comparada com o atrito lateral próximo a ponta (Figura 12).

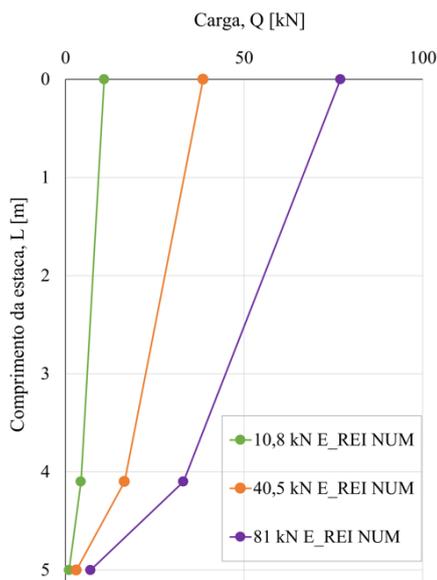


Figura 11. Transferência de carga da E_REI.

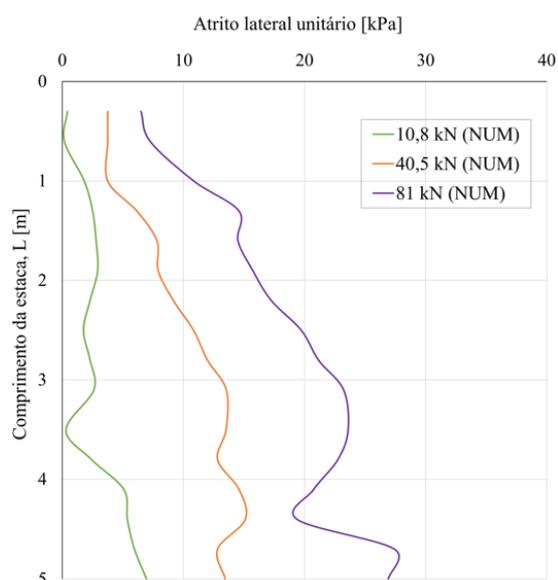


Figura 12. Atrito lateral unitário da E_REI.

Observa-se que, até a profundidade correspondente ao bulbo de deslocamento (1,5 a 2 vezes o diâmetro da sapata), o atrito lateral no fuste da estaca é baixo. Isso ocorre devido ao fato de que a porção da estaca inserida dentro do bulbo de deslocamento afunda junto com o solo e a sapata da fundação em radier estaqueado isolado. Essa parte da estrutura (sapata, parte da estaca e solo) se movimenta como um bloco, resultando em um atrito lateral significativamente menor em comparação ao atrito médio abaixo da profundidade de 1,5 vezes o diâmetro da sapata. À medida que nos afastamos da influência do campo de deformação imposto ao solo pela sapata, a estaca passa a apresentar um atrito lateral mais próximo do esperado, seguindo as condições normais de atrito com o solo ao seu redor.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



4.3 Compartilhamento de carga entre os elementos do radier estaqueado isolado

O compartilhamento de carga entre os elementos do radier estaqueado isolado, ou seja, a sapata e à estaca, para 10 %, 50 % e 100 % da carga aplicada, pode ser verificado na Figura 13. Nessa figura, é apresentada a porcentagem de carga absorvida por cada elemento até o último estágio de carregamento, que foi de 200 kN. Destaca-se que o recalque máximo observado nesse estágio foi de 17,5 mm. Esses dados fornecem informações sobre a distribuição da carga entre a sapata e à estaca, evidenciando a capacidade de suporte de carga de cada elemento da fundação.

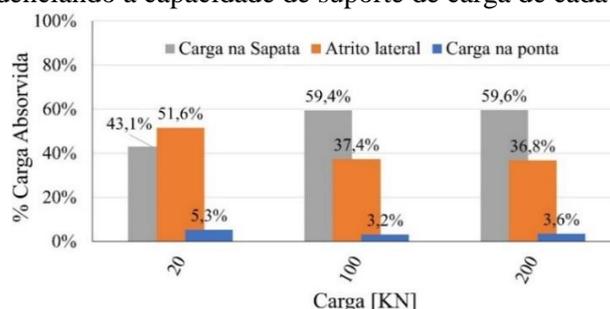


Figura 13. Compartilhamento de carga entre a sapata e à estaca do radier estaqueado isolado.

5 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, avaliou-se o comportamento de radier estaqueado isolado e seus elementos isolados, submetidos à compressão axial, assentes em solo tropical sob condições de umidade *in situ*. Com base nos resultados e análises deste artigo, as seguintes conclusões podem ser apontadas:

O radier estaqueado isolado apresentou um aumento na capacidade de carga de aproximadamente 7% em relação à estaca isolada (EI).

Ao analisar separadamente os resultados dos elementos do radier com uma estaca, observou-se que a porção da estaca compreendida dentro do bulbo de deslocamento (1,5 a 2,0 vezes o diâmetro da sapata) funciona em conjunto com a sapata como uma estrutura monolítica, resultando em um aumento da rigidez da estrutura e contribuindo para o aumento da capacidade de carga e redução do recalque. A sapata do sistema absorveu 60 % do carregamento total aplicado na fundação, enquanto a estaca absorveu 40 %, resultando em um fator de interação estaca-sapata (α_{pr}) igual a 0,40. Comparando a estaca isolada com a estaca do radier estaqueado isolado, à estaca isolada (EI) apresentou um melhor comportamento na relação carga versus recalque em comparação com a estaca do radier estaqueado isolado. Isso indica que a sapata em contato com o solo modifica o comportamento da estaca, resultando em uma redução de sua rigidez;

A estaca engastada ao elemento superficial (sapata), utilizando a abordagem de controle de recalque, tem se mostrado uma opção viável. Isso permite economia e mantém a segurança estrutural da fundação. Portanto, essa técnica pode ser empregada em construções com fundações em radiers apoiados diretamente em solos de baixa resistência, onde têm sido observadas diversas patologias.

Os modelos numéricos desenvolvidos com a ferramenta computacional possibilitaram a simulação do comportamento das fundações e uma melhor avaliação dos mecanismos de transferência, distribuição de carga e atrito lateral das estacas.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) [código de financiamento 001]; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG-APQ-00335-21) e pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARDIACA, Dusko Hadzijanev. Mohr-Coulomb parameters for modelling of concrete structures. **Plaxis Bulletin**, [s. l.], n. Spring, p. 12–15, 2009.
- BURLAND, J. B.; BROMS, B. B.; MELLO, V. F. B. **Behaviour of foundations and structures Proc. 9th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. V.2ed. Tokio: [s. n.], 1977.
- CLANCY, P.; RANDOLPH, M. F. An approximate analysis procedure for piled raft foundations. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, [s. l.], v. 17, n. 12, p. 849–869, 1993.
- DÉCOURT, L. A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez. **Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - SEFE III**, São Paulo: ABEF/ABMS, v. 1, p. 215–224, 1996.
- DÉCOURT, L. Prediction of load settlement relationships for foundations on the Basis of the SPT-T. *In:* , 1993. **Ciclo de Conferencias Internacionales Leonardo Zeevaert**. [S. l.: s. n.], 1993. p. 87–104.
- EL-MOSSALLAMY AND FRANKE. Piled Rafts-Numerical Modelling to Simulate the Behaviour of Piled Raft Foundations. **ARCADIS**, [s. l.], 1997.
- HALDER, Prasun; MANNA, Bappaditya. A New Model for the Prediction of Load Sharing in Piled Raft System—An Experimental Investigation. **Arabian Journal for Science and Engineering**, [s. l.], v. 46, n. 11, p. 10667–10680, 2021.
- MANDOLINI, Alessandro. Design of piled raft foundations : practice and development. *In:* , 2003. **BAP IV, International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles**. [S. l.: s. n.], 2003. p. 59–80.
- OLIVEIRA, Eduardo Augusto dos Santos; JUSTINO, Marcos Oliveira; GARCIA, Jean Rodrigo. Numerical analysis of piled rafts with short bored piles. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 15, n. 4, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000400008>.
- RANDOLPH, M F. Design Methods for pile groups and pile rafts. *In:* , 1994, New Delhi. **XIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. New Delhi: ISSMGE, 1994. p. 61–82.
- VIGGIANI, Carlo; MANDOLINI, Alessandro; RUSSO, Gianpiero. Piles and Pile Groups. *In:* APPLIED SOIL MECHANICS. 1. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. p. 286–331. *E-book*. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470168097.ch8>.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

