

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Análise Numérica Axissimétrica e Analítica de Infraestruturas em Radier Estaqueado Composto por Nove Estacas

Lucas Bellini Machado
Graduando, UFU, Uberlândia, Brasil, lucasbellini27@gmail.com

Gabriela França Azevedo
Mestranda, UFU, Uberlândia, Brasil, gabrielaazevedotn@hotmail.com

Jean Rodrigo Garcia
Professor, UFU, Uberlândia, Brasil, jean.garcia@ufu.br

RESUMO: A utilização de infraestruturas em radier estaqueado têm sido amplamente utilizadas em projetos com grandes dimensões verticais. Este trabalho busca avaliar a relação entre o comprimento e espaçamento das estacas com o recalque e a capacidade de carga em uma infraestrutura em radier estaqueado estabelecendo a curva carga-recalque e comparando os diferentes métodos de previsão de recalques. Os casos foram analisados por meio de ferramentas numéricas e modelos analíticos: métodos do pilar equivalente e radier equivalente. Para tal, a análise consistiu em casos de fundações estaqueadas compostas por 9 estacas (3 x 3), com 5, 10 e 15 m de comprimento, diâmetro constante de 0,3 m e espaçamento entre estacas (s/d) de 3, 3,5, 4 e 4,5 metros. Foram obtidas as curvas carga-recalque através da solicitação da estrutura em estágios de carga para deslocamentos máximos entre 50 a 60 mm em solo homogêneo com características arenosas e utilizado o método de rigidez de Decourt (1996) para a obtenção da carga de ruptura convencional ($R_{ult,10\%}$), critério adotado para comparar todos os modelos de predição de recalques. O aumento das variáveis, comprimento e espaçamento entre centros de estacas, promovem reduções nos recalques em todos os métodos. Além disso, os métodos tendem a convergir nos valores de carga de ruptura convencional com o aumento do comprimento da estaca e o aumento do comprimento é mais significativo na capacidade de suporte das estruturas em relação ao aumento do afastamento entre estacas para os limites adotados.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação estaqueada, Recalque, Estacas, Método dos elementos finitos.

ABSTRACT: The use of infrastructures in piled raft has been widely used in projects with large vertical dimensions. This work search to evaluate the relation between the length and spacing of the piles with the settlement and the load capacity in this type of foundation establishing the load-settlement curve and comparing the different methods of forecasting settlements. The cases were analyzed using numerical tools and analytical models, equivalent pier and equivalent raft methods. For this, the analysis consisted of cases of pile foundations composed of 9 piles (3 x 3), with 5,10 and 15 m in length, constant diameter of 0.3 m and (s/d) ratio of 3, 3,5, 4 and 4,5 meters. The load-settlement curves were obtained by requesting the structure in load stages for maximum displacements between 50 to 60 mm in homogeneous soil with sandy characteristics and using the Decourt (1996) stiffness method to obtain the conventional braking load ($R_{ult,10\%}$), criterion adopted to compare all settlement prediction models. The increase in variables, length and spacing between pile centers, promote reductions in settlement for all methods. In addition, the methods tend to converge in the values of conventional breaking load with the increase of the pile length and the length increase is more significant in the support capacity than the increase in the spacing between piles for the adopted limits.

KEYWORDS: Raft foundation, Settlement, Foundation, Piles, Finite Element Method.

1. Introdução

O emprego de fundações em radier estaqueado tem sido amplamente utilizado em infraestruturas de projetos com grandes dimensões verticais. Por meio da sua aplicação, tornou-se possível uma maior



verticalização das estruturas, atingindo alturas superiores a 300 m. Atualmente, a verticalização é um processo essencial devido ao crescimento populacional e avanço da ocupação em grandes centros urbanos. Portanto, o uso de radier estaqueado torna-se cada vez mais recorrente para se alcançar maiores alturas, possibilitando o aumento da taxa de ocupação destas construções.

A introdução de estacas na fundação em radier tem como objetivo principal a redução de deslocamentos verticais do solo para um valor aceitável (Randolph, 1983) através da transmissão de parte das cargas para camadas de solo mais resistentes e, portanto, criando um sistema de infraestrutura com maior capacidade de suporte. Sua principal característica é o compartilhamento das cargas pela estrutura mista da qual este tipo de fundação é constituído, sendo parte das cargas resistida pelo radier e parte pela resistência do grupo de estacas.

O sistema de fundação misto promove interação entre o radier, grupo de estacas e solo para o sustendo de cargas verticais, forças horizontais e momentos oriundos da superestrutura (Janda *et al.*, 2009). O atrito lateral e resistência de ponta das estacas em conjunto com o aumento da área de contato, que reduz as tensões transmitidas ao solo pela superestrutura através do radier, promovem em conjunto grandes reduções nos deslocamentos verticais.

O dimensionamento de um sistema de fundação estaqueada comumente é feito assumindo que todas as cargas são suportadas pelo conjunto de estacas, sendo desprezada a contribuição da capacidade portante do radier (El-Garhy *et al.* 2013). Este critério promove estimativas conservadoras para os valores de recalque, promovendo maior estabilidade para a infraestrutura e redução de possíveis impactos na fundação provenientes de fatores imprevisíveis. Em contrapartida, tornam as estruturas mais onerosas do que o necessário.

A estimativa dos recalques para um conjunto de estacas pode ser obtida por meio de cálculos analíticos, método do pilar equivalente (Poulos e Davis, 1968) e radier equivalente (Poulos e Davis, 1980), ou através de modelos que pelo uso de ferramentas numéricas, como o método de elementos finitos, promovem aproximações melhores da realidade, comumente utilizando *softwares* computacionais.

Diante do exposto, buscou-se avaliar neste trabalho a relação entre o comprimento e espaçamento entre estacas com o recalque e a capacidade de carga em uma fundação em radier estaqueado estabelecendo a curva carga-recalque.

Os resultados obtidos por cada modelo de cálculo foram analisados e comparados, permitindo aferir se a abordagem numérica axissimétrica em malha de elementos finitos se faz condizente com os métodos analíticos empregados para a análise carga-recalque da infraestrutura.

2. Metodologia

Foram analisados os casos de fundações estaqueadas compostas por 9 estacas (3 x 3), variando o comprimento das estacas em 5, 10 e 15 m de comprimento. Foi estabelecido um diâmetro constante de 0,3 m por toda a extensão das estacas, e espaçamento (s/d) de 3 a 4,5 metros em estágios de 0,5 m. As propriedades dos materiais do modelo (Tabela 1) foram definidas como solo homogêneo ao longo da profundidade com características arenosas e a estaca com propriedades padrão de concreto armado, de acordo com Ardiaca (2009).

Tabela 1. Propriedades dos materiais modelados

Material	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ϕ (°)	ν	c' (kPa)
Solo arenoso	18	30	35	0,4	0
Estaca	25	10700	60	0,18	300

γ - peso próprio; E - módulo de elasticidade; ϕ - ângulo de atrito; ν - coeficiente de Poisson; c'- coesão

Os casos foram modelados e analisados numericamente por axissimetria, com o *software RS2* da Rocscience, por meio de uma malha em elementos finitos composto por elementos triangulares de 6 nós, modelo este obtido a partir do método do pilar equivalente, e por meio do método do radier equivalente. A geometria adotada para a análise numérica (Figura 1) foi definida a partir do diâmetro equivalente (d_{eq}) e o comprimento (L) das estacas.

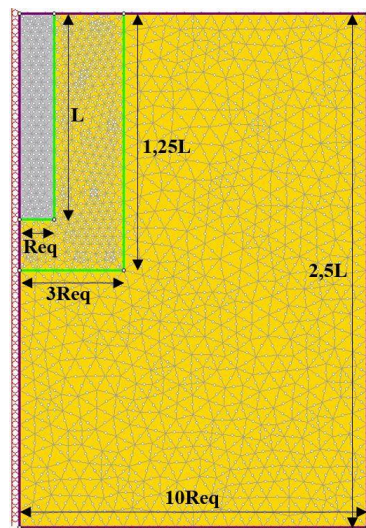


Figura 1. Geometria do modelo de análise numérica

O modelo de análise apresenta o raio equivalente (Req) da estaca singular compatível com o grupo de estacas analisado, após processo de cálculo para a determinação do diâmetro através do método do pilar equivalente. Além disso, foi adicionada uma zona de maior densidade da malha de elementos finitos próxima a estaca equivalente para promover maior eficiência da interação solo-estrutura para a análise axissimétrica e, portanto, resultar em valores de recalque de melhor precisão.

Além das modelagens numéricas foram feitos os cálculos analíticos para os casos, através dos métodos do Pilar Equivalente e Radier Equivalente. Os cálculos foram feitos convertendo o grupo de estacas em estruturas compatíveis, uma forma de compatibilidade geométrica. Através de formulações de recalque para as novas infraestruturas, são calculados os deslocamentos verticais totais e os valores obtidos são lineares com a variação dos valores de carga.

As cargas sobre a estrutura de fundação em estágios possibilitaram obter a curva carga-recalque para o modelo numérico, que simula as deformações plásticas dos materiais para deslocamentos máximos entre 50 e 60 mm. Os cálculos analíticos foram realizados para encontrar valores de deslocamentos verticais dentro dos mesmos limites.

3. Modelos de cálculo

3.1 Método do Radier Equivalente

O recalque obtido através deste modelo de cálculo analítico consiste em considerar um radier equivalente a dois terços do topo da camada mais competente de solo (Figura 2) ou na camada de apoio para as estacas de resistência de ponta. A principal vantagem do modelo de cálculo analítico pela abordagem radier equivalente é devido a viabilidade da consideração das variações da rigidez do solo abaixo do elemento superficial (Randolph, 1994).

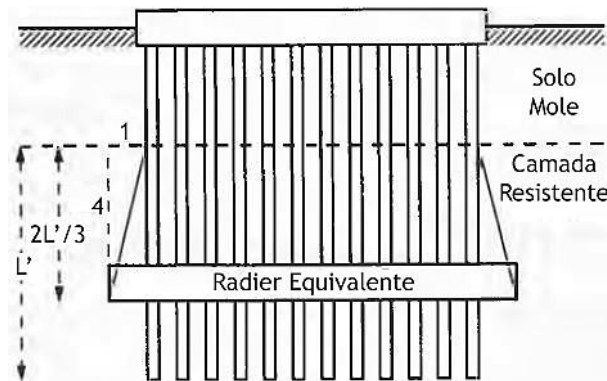


Figura 2. Localização do radier equivalente (Randolph, 1994)

Mediante este método calcula-se a área equivalente, a qual é usada para se definir a largura do correspondente radier (B) e, por conseguinte, utiliza-se a equação do modelo (Equação 1) para o cálculo dos deslocamentos verticais da infraestrutura.

$$S = \frac{qB(1-\nu_{\text{solo}}^2)}{E_{\text{solo}}} I \quad (1)$$

Sendo I o fator de influência (comumente adotado 0,82 para radier rígidos), E_{solo} o módulo de Young da camada em que o radier equivalente está apoiado, ν_{solo} o coeficiente de poisson do solo e q a carga vertical distribuída oriunda da superestrutura que provoca a solicitação da fundação. Os resultados de deslocamentos verticais para esse método promovem valores lineares com a variação da carga q diretamente proporcional.

3.2 Método do Pilar Equivalente

O modelo de cálculo analítico consiste em aproximar o conjunto de estacas em uma grande coluna equivalente de mesmo comprimento, porém diâmetro equivalente calculado através da área da total coberta pelo grupo de estacas (A_g), conforme Equação 2. Assim é necessário determinar o módulo de Young equivalente da coluna (E_{eq}), obtido por meio da Equação 3, e que depende do módulo de elasticidade do solo (E_s) e da estaca (E_p). A área (A_p) é a soma das áreas da seção transversal do grupo de estacas.

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_g} \quad (2)$$

$$E_{eq} = E_s + (E_p - E_s) \left(\frac{A_p}{A_g} \right) \quad (3)$$

O cálculo do recalque após a conversão do grupo em uma grande coluna equivalente pode ser feito através de solução elástica para a resposta de apenas uma estaca, sendo proposta por diversos autores. O cálculo aproximado desenvolvido por Randolph e Wroth (1978), dada pela Equação 4, que utiliza o modelo de Boussinesq para a transmissão das tensões e foi empregado para a resposta dos deslocamentos verticais de uma única estaca.

$$\frac{P_t}{G_\ell r_0 w_t} = \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} + \rho \frac{2\pi}{\zeta} \frac{\tanh \mu \ell}{\mu \ell} \frac{\ell}{r_0}}{1 + \frac{1}{\pi \lambda (1-\nu)\xi} \frac{4\eta}{\mu \ell} \frac{\tanh \mu \ell}{\mu \ell} \frac{\ell}{r_0}} \quad (3)$$

Os detalhes das parcelas presentes na equação citada acima estão em Randolph (1994), sendo P_t a carga resistida pela infraestrutura e w_t o deslocamento vertical.

3.3 Método Numérico

A análise por ferramentas computacionais permitem compreender melhor o comportamento das estruturas através de soluções numéricas e tem tendência a promover valores mais próximos do real comportamento da estrutura. O uso deste tipo de solução para a análise do comportamento da interação estaca-solo é comumente empregado na literatura, que por intermédio do emprego de *softwares* adequados promovem um entendimento do comportamento carga x recalque (Garcia, 2015).

4. Resultados

Foi definido pelo método da rigidez proposto por Decourt (1996) para a determinação da carga de ruptura convencional, que será fator de comparação e apresentação de resultados entre os diferentes modelos de cálculo. O método estipula a carga que promove um deslocamento vertical na ponta da estrutura equivalente de 10% do diâmetro das estacas como a carga de ruptura convencional ($R_{ult,10\%}$), portanto para o caso analisado a carga que promove um recalque de 30 mm no topo da estrutura.

Os deslocamentos finais da modelagem pelo *software* RS2 (Figura 3) foram analisados bidimensionalmente, em um modelo axissimétrico, através da opção de resposta *total displacement*, e os valores finais usados para a elaboração das curvas são provenientes do topo da estaca equivalente. Sendo assim, também é possível encontrar a carga de ruptura convencional pela aplicação do método da rigidez proposto por Decourt (1996).

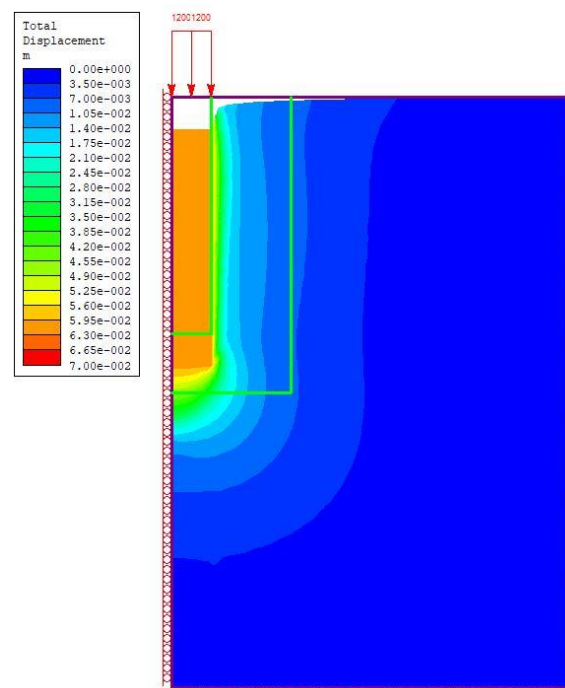


Figura 3. Deslocamentos finais do modelo

O modelo teve deslocamento horizontal travado nas laterais e livre na vertical, sendo completamente indesejável na base. Pode-se observar a tensão solicitante sobre o topo da estaca equivalente, que depois foi convertida em força total para que seja possível a avaliação através de comparação com os cálculos analíticos que utilizam força ao invés de tensão solicitante.

As curvas carga x recalque provenientes dos cálculos numéricos (Figura 4) foram obtidas após carregamento progressivo da estrutura, afim de se encontrar os deslocamentos pré-estipulados para a construção dos gráficos, recalques que se encontrem entre 50 e 60 mm, e após isso é simulado o processo de descarregamento para se obter as deformações plásticas dos materiais modelados. O carregamento foi feito em seis etapas de carregamento e o descarregamento em duas.

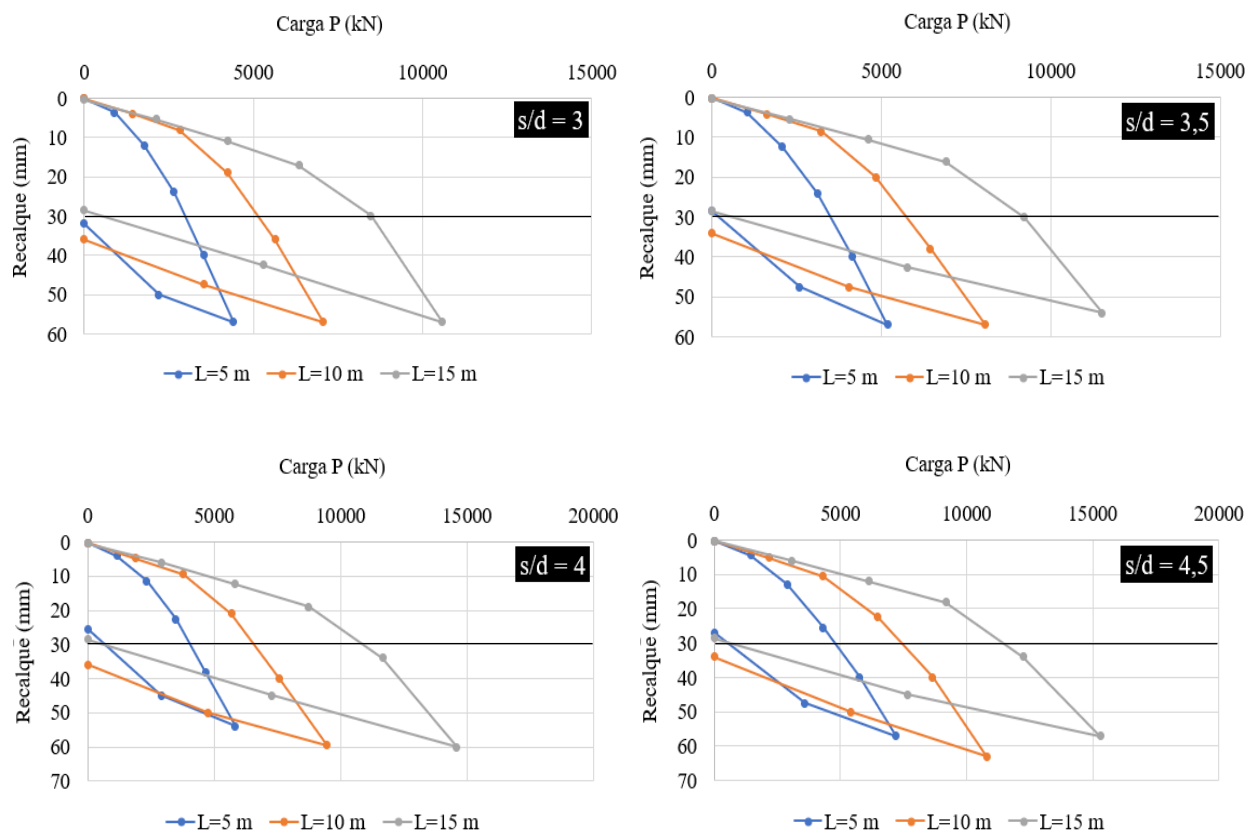


Figura 4. Curvas carga x recalque para cada modelo

As deformações plásticas no sistema analisado têm valores entre 30 mm a 40 mm após o descarregamento, conforme curvas carga-recalque acima. A capacidade de carga das estruturas tem aumento máximo de cerca de 4800 kN para estacas de 15 m de comprimento, com o aumento do espaçamento (s/d) de 3 para 4,5 m, em que ocorreram os maiores ganhos, sendo da ordem de 8100 kN para (s/d) com valor de 4,5 m e aumento do comprimento das estacas de 5 m para 15 m.

Os menores ganhos em capacidade de carga para o aumento da relação (s/d) foram por volta de 2790 kN, ao se comparar as cargas que solicitam os modelos numéricos com comprimento de 5 m e limites mínimo e máximo de fator de afastamento. Em relação ao aumento para o comprimento, o mínimo ganho de força suportada pela estrutura foi de 6170 kN, caso com afastamento entre centros de estacas de 3 diâmetros e comparando os limites de aumento de profundidade de estacas de 5 e 15 m na análise numérica e recalques dentro dos limites de 50 até 60 mm. A tensão máxima suportada nos modelos é de 2400 kN/m², com características de afastamento de 3 vezes o diâmetro e L=15 m, e mínima de 800 kN/m², L=5m e afastamento de 4,5 vezes o diâmetro.

Sendo assim, a partir das curvas carga-recalque foram traçadas linhas horizontais nos valores de deslocamento vertical de 30 mm, o equivalente a 10% do diâmetro do grupo de estacas, e assim sendo encontrada a carga que promove a ruptura convencional em cada método e nos diferentes modelos (Figura 5).

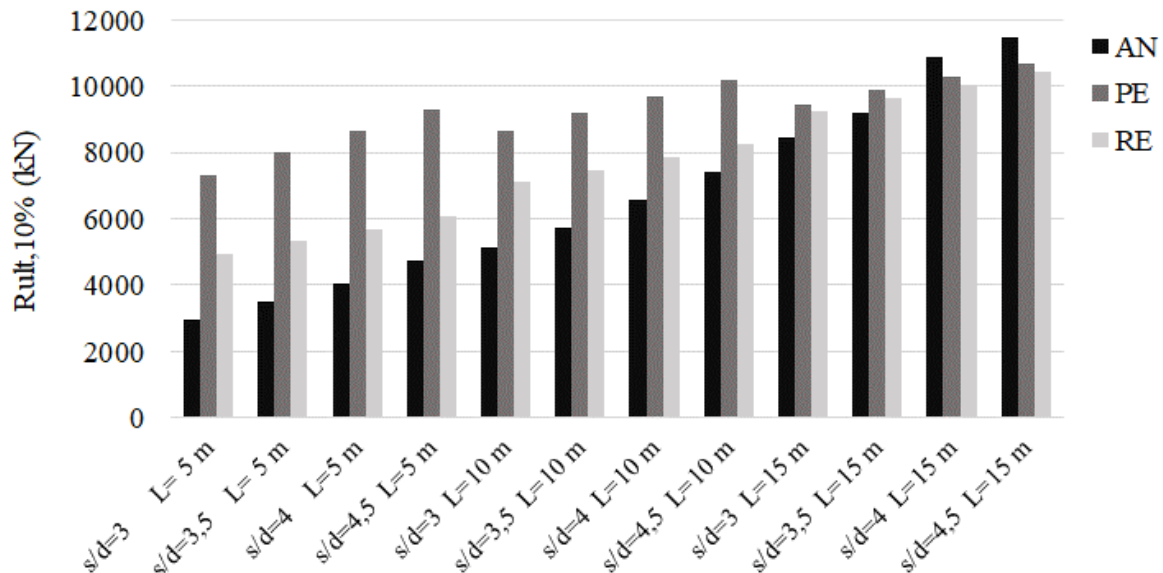


Figura 5. Comparação entre cargas de ruptura convencional
 AN – Análise numérica; PE – Pilar Equivalente; RE – Radier Equivalente

Utilizando o critério de ruptura convencional estabelecido por Decourt (1996) é possível analisar que os cálculos analíticos tendem a aproximar dos resultados de recalque um do outro. Há uma convergência nas retas resultantes oriundas dos métodos do pilar e radier equivalente, com o aumento do comprimento da estaca e, além disso, os métodos de cálculo analítico se tornam muito próximos do modelo numérico axissimétrico utilizado.

5. Conclusões

Os resultados obtidos pelos três métodos propiciaram reduções nos valores de recalque com o maior espaçamento entre estacas e também com o aumento do comprimento das mesmas. Os resultados são provenientes de um aumento da área A_g com o afastamento entre estacas, promovendo uma ampliação do diâmetro do pilar equivalente em até 1 m ao se comparar os dois limites estipulados para (s/d), e pelo aumento do atrito lateral na estaca, sendo que fundação modelada é uma estaca de atrito, pela maior profundidade da base da estaca equivalente.

Verificou-se também, que paracomprimento maiores ou iguais a 10 m, tem-se uma maior efetividade na capacidade de suporte oriunda da resistência das estacas ao ser comparado ao aumento do afastamento nos limites pré-estabelecidos de aumento de comprimento de 5 até 15 m e fatores de afastamento (s/d) de 3, 3,5, 4 e 4,5 metros. Porém, ambas características da estrutura, afastamento entre estacas e profundidade das mesmas, são diretamente proporcionais ao aumento da capacidade portante da estrutura.

Os métodos analisados demonstram equivalência para a predição dos deslocamentos verticais da infraestrutura, quando analisou-se o caso de estacas com 15 m de comprimento. Entretanto, para o menores comprimentos das estacas, o método do pilar equivalente se mostrou mais arrojado em comparação aos outros métodos, sendo menos conservador.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



AGRADECIMENTOS

Agradecimento dos autores do projeto a Universidade Federal de Uberlândia pela compra da licença do *software* utilizado neste trabalho.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Ardiaca, D. H. (2009). Mohr-Coulomb parameters for modelling of concrete structures. *Plaxis Bulletin*, (Spring), 12–15.
- Décourt L. (1996) A ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais - SEFE III. São Paulo: ABEF/ABMS, v. 1, p. 215-224.
- El-Garhy B., Galil A. A., Youssef A., Raia M. A. (2013). Behavior of raft on settlement reducing piles: Experimental model study. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 5, p. 389-399.
- Garcia J. R. (2015) Análise experimental e numérica de radiersestaqueados executados em solo da região de Campinas/SP. Dissertação de Doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp.
- Janda T., Cunha R. P., Kuklik P., Anjos G.M. (2009). Three dimensional finite element analysis and back-analysis of CDA standard pile groups and piled rafts founded on tropical soil. *Soil and Rocks*, v. 32, n. 1, p. 3-18.
- Poulos H. G., Davis E.H. (1968) The settlement behaviour of single axiallyloaded incompressible piles and piers. *Geotechnique* 18(3):351–371.
- Poulos H.G., Davis E.H. (1980) *Pile foundation analysis and design*. Wiley, New York.
- Randolph M. F. (1983) Design of piled raft foundations. *Proc. Int. Symp. on Recent Developments in Laboratory and Field Tests and Analysis of Geotechnical Problems*, Bangkok, pp 525–537
- Randolph M. F. (1994) Design methods for pile groups and piled rafts, vol 5. S.O.A report, 13 ICSMFE, New Delhi, pp 61–82