

Estudo da eficiência de blocos estaqueados em estacas moldada in- loco

Palloma Ribeiro Cuba dos Santos
Unicamp, Campinas, Brasil, pallomar@gmail.com

Danilo Castro Resendo
Unicamp, Campinas, Brasil, daniloborrvalho@gmail.com

Paulo José Rocha de Albuquerque
Unicamp, Campinas, Brasil, pjra@unicamp.br

RESUMO: A Engenharia Geotécnica no Brasil e no mundo é uma ciência que se aprimora pela experiência, pela observação e pela análise do comportamento das obras, assim como suas necessidades. As estacas, construídas em grupos, são cada vez mais importante para atingir as metas de desempenho e atender as cargas de edifícios cada vez mais altos, onde o funcionamento dos blocos sobre as estacas é bem complexo, pois o comportamento do conjunto da estrutura, sua vinculação e a interação solo-estrutura são problemas que agravam o grau de complexidade da análise. As características geométricas dos elementos estruturais de fundações e a disposição no bloco têm implicação direta no desempenho do conjunto. O presente trabalho analisa o comportamento de blocos estaqueados sem contato executados em solo diabásio da região de Campinas/SP, apresentando métodos para análise da eficiência e interação solo-estrutura do grupo de estacas. Buscando a caracterização adequada do comportamento e a eficiência do grupo de estacas, a partir da análise em um programa comparada com métodos de cálculo empíricos. Nas condições propostas, blocos de geometria retangulares, com estacas de 0,3 m de diâmetro e 5,1m de comprimento, a fórmula Converse-Labarre, do programa, apresentou o melhor resultados que as demais formulações utilizadas neste trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência, Espaçamento, Grupo de Estacas, Estaca Moldada *In-loco*.

ABSTRACT: Geotechnical engineering in Brazil and in the world is a science that is improved by experience, observation and analysis of the behavior of the works, as well as their needs. The piles, built in groups, are increasingly important to achieve the performance goals and meet the loads of buildings that are increasingly taller, where the operation of the blocks on the piles is very complex, because the behavior of the structure as a whole, its linkage and the soil-structure interaction are problems that aggravate the degree of complexity of the analysis. The geometric characteristics of the foundations and the arrangement of the piles in the block have a direct implication on the performance of the set. **COLOCAR AS INFORMAÇÕES DAS ESTACAS.** The present work analyze the behavior of piled blocks without contact executed in diabase soil in the region of Campinas / SP, presenting methods to analyze the efficiency and soil-structure interaction of the pile group. Seeking the proper characterization of the behavior and the efficiency of the pile group, based on the GEO5 program compared with empirical calculation methods. Under the proposed conditions, rectangular geometry blocks, with piles of 0.3 m in diameter and 5.1 m in length, the program's Converse-Labarre formula showed the best results than the other formulations used in this work.

KEYWORDS: Efficiency, Spacing, Pile group, In-Place Molded Pile

1 Introdução

As fundações em estacas representam uma contribuição cada vez mais importante para atingir as metas de desempenho e atender as cargas de edifícios cada vez mais altos. À medida que o interesse nessa tecnologia se torna mais importante, os engenheiros são desafiados a planejar e projetar essas estruturas cada vez mais complexas. Assim, as estacas são geralmente construídas em grupos, e as características geométricas das

fundações (bloco/radier estaqueado) e a disposição das estacas no bloco têm implicação direta no desempenho do conjunto.

De acordo com (BEZERRA, 2003), um sistema de fundação é a associação criada pela união dos elementos estruturais e o próprio solo que o envolve. Entretanto, tradicionalmente, as fundações constituídas de estacas coroadas por sapatas ou blocos em que se apoiarão os pilares de um edifício, são considerados nos cálculos das fundações apenas a capacidade de carga das estacas, desprezando a contribuição do elemento estrutural de coroamento.

Segundo Randolph (1994), as características geométricas das fundações (bloco/radier estaqueado) e a disposição das estacas no radier/bloco têm implicação diretamente no desempenho do conjunto. Entretanto, segundo Munhoz (2004), o funcionamento dos blocos sobre as estacas é bem complexo, pois seu comportamento mecânico do conjunto da estrutura (aço/concreto), sua vinculação e a interação solo-estrutura são problemas que agravam o grau de complexidade da análise.

Chan (2006) também ressalta que a análise solo-estrutura de um grupo de estacas representa elevada complexidade, devido ao comportamento de tal efeito ser influenciado pelo: método de instalação da estaca; modo dominante de transferência de carga; natureza do maciço de solo de fundação; geometria tridimensional da configuração do grupo; presença do bloco de coroamento; rigidez relativa do bloco e das estacas e do solo.

Segundo Garcia (2015), na região de Campinas, grande parte das fundações empregadas são estacas escavadas a trado, trabalhando em grupo, como parte integrante de um bloco de coroamento. Essa denominação ocorre devido ao fato de que o bloco de coroamento não tem sua capacidade de carga levada em consideração no dimensionamento geotécnico. Sendo assim, é importante que se conheça o comportamento e as formas de interações que ocorrem neste sistema, objeto de estudo deste trabalho.

O presente trabalho irá analisar o comportamento de blocos estaqueados sem contato simulados no solo diabásio da região de Campinas/SP, com o objetivo principal de apresentar métodos para análise da eficiência do grupo para estacas e caracterizar adequadamente o comportamento do grupo de estacas neste tipo de solo.

2 Grupo de estacas

As estacas frequentemente trabalham em grupo e são caracterizadas pela ligação estrutural no topo, geralmente, por meio de blocos de coroamento, que são elementos maciços de concreto armado que possuem a função de solidarizar as estacas e ajudam a distribuir as cargas da edificação ao solo. (VELLOSO & LOPES, 2012).

Entretanto, os grupos de estacas convencionais são normalmente projetados adotando-se um alto fator de segurança para as estacas, as quais são posicionadas de uma maneira que elas sustentam sozinhas toda a carga da superestrutura, sem considerar a contribuição do bloco de coroamento para a capacidade de carga do sistema. (CUNHA et al., 2004)

Desde meados do século passado, vários autores vêm estudando os grupos de estaca, desenvolvendo métodos de cálculo aproximados e outros mais rigorosos, analisando o comportamento da fundação em bloco estaqueado, capacidade de carga, recalque, eficiência e a interação entre os elementos. Visto a complexidade do tema, todavia há a necessidade de aprofundamento destes estudos.

De acordo com Ponte (2013), para compreender alguns dos fatores que influenciam o comportamento da fundação em questão, uma solução é numa primeira fase, realizar uma análise bidimensional simplificada e numa fase posterior, a modelação do problema tridimensional completo.

2.1 Efeito de o grupo de estaca

A norma brasileira ABNT NBR 6122/2019 descreve o efeito de grupo como o comportamento interativo entre estacas de fundação, que ao transmitirem cargas ao solo. Esse comportamento faz que o recalque obtido por um grupo de estacas seja diferente do recalque de uma estaca isolada que recebe a mesma carga.

Como a ligação do grupo se dá por um bloco de coroamento no topo das estacas, convenientemente espaçadas, em função do tipo de estaca e do solo, gerando o efeito de grupo de estacas, é calculado por fórmulas de eficiência, para capacidade de carga, e taxas de recalque, para análise de deformação e a interação dos bulbos de tensão entre estacas (Figura 1) (SOARES, 2011).

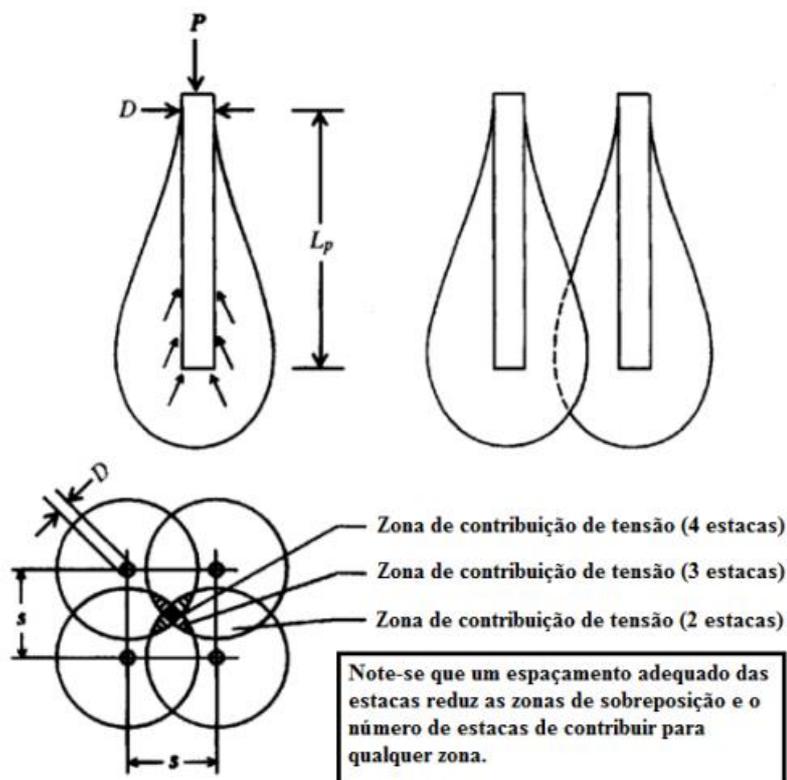


Figura 1. Interação de bulbos de tensão entre estacas de fundação (BOWLES, 1997)

2.1.1. Capacidade de carga do grupo de estacas

Um método simplificado de cálculo de capacidade do grupo de estacas é somar as cargas admissíveis de cada estaca, considerando fator e eficiência do mesmo, conforme Equação 1:

$$Q_{PG} = \eta \cdot \sum Q_{adm} \quad \text{Eq.[1]}$$

onde:

Q_{PG} = capacidade total de carga do grupo;

η = fator de eficiência do grupo

2.1.2 Eficiência do grupo de Estacas

Santana (2008) apresentou em seu trabalho os principais fatores intervenientes no efeito de grupo em estacas, onde destaca-se: número de estacas, geometria do grupo, esbeltez relativa das estacas, coeficiente de Poisson do solo, profundidade relativa, modo de transferência de carga ao solo, efeito de instalação da estaca, compressibilidade relativa estaca-solo.

O ideal seria que as estacas em um grupo fossem espaçadas de tal modo que a capacidade de carga do grupo não fosse inferior à soma da capacidade individual das estacas. Na prática, o espaçamento mínimo de centro a centro entre estacas é de $2,5d$ (onde d é o diâmetro da estaca) e em situações usuais, cerca de 3 a $3,5d$ (BRAJA, 1995).

Feld (1943) propôs um método simplificado, aproximado e empírico, de cálculo da eficiência de grupo, por simplesmente reduzir a capacidade de carga da estaca de $1/16$ para cada estaca adjacente, conforme a Equação 2.

$$e = \frac{n_1 \cdot e_1 + n_2 \cdot e_2 + \dots + n_m \cdot e_m}{n_1 + n_2 + \dots + n_m} = \frac{\sum_1^m n_i \cdot e_i}{\sum_1^m n_i} \quad \text{Eq.[2]}$$

Entretanto, a regra de Feld não leva em consideração o espaçamento entre estacas. Segundo Braja (2011), a eficiência pode ser estimada pela equação de Seiler-Keeney, assim (Equação 3) :

$$\eta_{\varepsilon} = \left[1 - 0,479 \left(\frac{s}{s^2 - 0,093} \right) \left(\frac{n_x + n_y - 2}{n_x + n_y - 1} \right) \right] + \frac{0,3}{n_x + n_y} \quad \text{Eq.[3]}$$

onde:

n_x : número de colunas;

n_y : número de filas;

s: espaçamento entre as estacas (eixo a eixo)

3 Programa utilizado

Neste trabalho foi utilizado o pacote GEO5® que é um conjunto de programas destinados a resolver problemas geotécnicos. Um deste programas: GRUPO DE ESTACAS, analisa com métodos analíticos a capacidade de suporte vertical de um grupo de estacas. Também realiza a análise de verificação para a carga vertical e permitem calcular o recalque, a eficiência e a capacidade de carga máxima do grupo de estacas.

As análises realizadas pelo programa são baseadas em métodos teóricos, empíricos e semiempíricos disponíveis. A resistência final da estaca no software é baseada nos métodos CSN 73 1002, Fellenius, NAVFAC DM 7.2 e Tomlinson. Para o cálculo da eficiência o programa eficiência do grupo de estacas depende unicamente da geometria do grupo de estacas.

O programa fixa para blocos de geometria circular, a instrução técnica UFC 3-220-01, de métodos para uso no planejamento, design e construção de fundações profundas do Corpo de Engenharia dos Exército dos Estados Unidos onde:

- para uma distância axial entre estacas do grupo de: 3d
- para uma distância axial entre estacas do grupo de: 6d

Para blocos de geometria quadrada, foi utilizada a fórmula de Converse-Labarre, expressa pela Equação 5:

$$\eta_{\varepsilon} = 1 - \psi \left[\frac{(n_x - 1)n_y + (n_y - 1)n_x}{90n_x n_y} \right] \quad \text{Eq.[5]}$$

$$\psi = \arctg \frac{d}{s} \quad \text{Eq.[6]}$$

onde:

- n_x - número de estacas na direção x
- n_y - número de estacas na direção y
- ψ - ângulo com tangente, expresso em graus
- s - espaçamento axial entre estacas
- d - diâmetro das estacas

4 Metodologia

Neste projeto foi realizado o estudo do comportamento deste sistema de fundação, interação solo-estrutura e eficiência, assim como pesquisou-se também sobre os métodos de cálculo de eficiência.

Foram realizadas análises analíticas no programa GRUPO DE ESTACAS, onde foram alteradas algumas das suas propriedades (espaçamento entre estacas, espessura da laje, fixando os parâmetros

geotécnicos do solo do Campo Experimental para estudos de Mecânica dos Solos e Fundações da Unicamp,) comparando as soluções obtidas no programa, com o resultado de fórmulas empíricas.

Neste estudo, foi analisado-se blocos estaqueados quadrados com quatro e nove estacas, em que foram variados espaçamentos, multiplicando o espaçamento 3, 4, 5 e 6 pelo diâmetro, devido as limitações do programa, que só permite análises de com espaçamento mínimo 2,5 vezes o diâmetro e máximo 6 vezes o diâmetro. As estacas possuem 5,0 m de comprimento, com diâmetro de 0,3 m.

5 Resultados

Os parâmetros do solo empregados no programa foram obtidos de Gon (2011) e são apresentados na Tabela 1, os valores das propriedades do solo, são peso específico natural (γ_{nat}), coesão (c'), peso específico dos sólidos (γ_s) e porosidade (n). Os parâmetros módulo de Young do solo (E_s) e índice de resistência a penetração do amostrador padrão do ensaio SPT (N_{SPT}) foram determinados por Garcia (2015). O coeficiente de Poisson (ν) foi adotado 0,45.

Tabela 1- Características do solo do Campo Experimental para estudos de Mecânica dos Solos e Fundações da Universidade Estadual de Campinas (adaptado de GON, 2011 e Garcia,2015).

Espessura da camada (m)	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ν	E_s (MPa)	γ_s (kN/m ³)	n (%)	N_{SPT} -MÉDIO golpes	Classificação
2,00	14,2	8	0,45	12,61	30,6	64	3	Argila Silto-arenosa, muito mole a mole, marrom avermelhada
6,00	15,0	25	0,45	11,96	30,4	62	6	Areia siltosa, fofa a pouco compactada, marrom avermelhada
1,00	15,2	-	0,45	-	29,5	63	20	Silte areno-argiloso, mediamente compactado, marrom variegado

Neste estudo, foram selecionados os blocos estaqueados com quatro (4) e nove (9) estacas. A forma circular não foi analisada neste trabalho pois é adotado o valor 0,7 no programa. Foram variados os espaçamentos, multiplicando o espaçamento 3, 4, 5 e 6 pelo diâmetro. A Figura 2, apresenta imagens da simulação no programa.

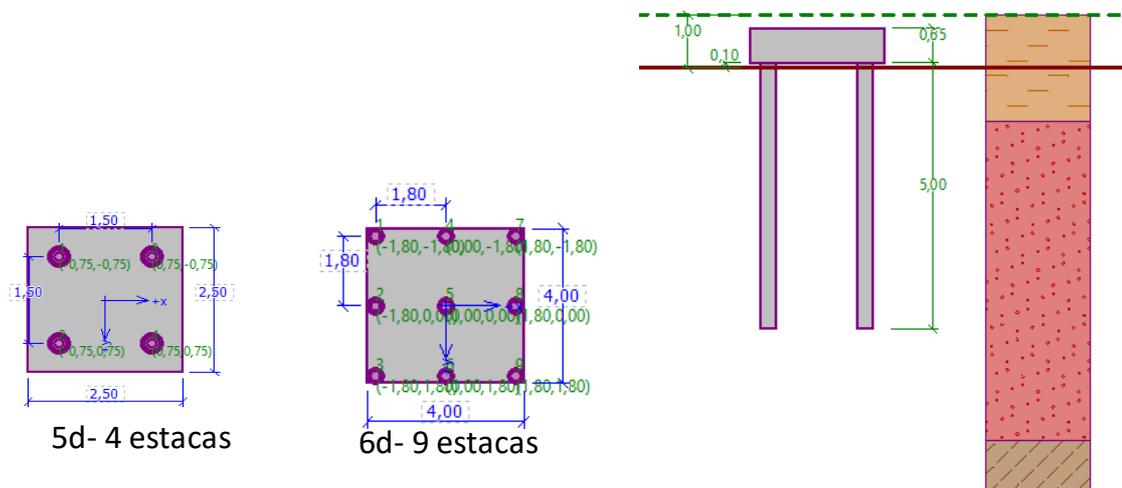


Figura 2. Ilustração dos blocos simulados no programa

As estacas possuem 5,0 m de comprimento, com diâmetro de 0,3 m. No programa, foi adotado a análise de solo não coesivo (condições drenadas), visto suas características físicas e sua classificação (silte e areia). No perfil apresenta os resultados obtidos da eficiência dos grupos de estacas. A figura 3 apresenta o gráfico com o comportamento da eficiência do bloco de quatro (4) estacas com a alteração dos espaçamentos no programa, comparando com equação de Seiler-Keeney e com o método de Feld, que não considera o espaçamento entre estacas ($\eta = 0,813$).

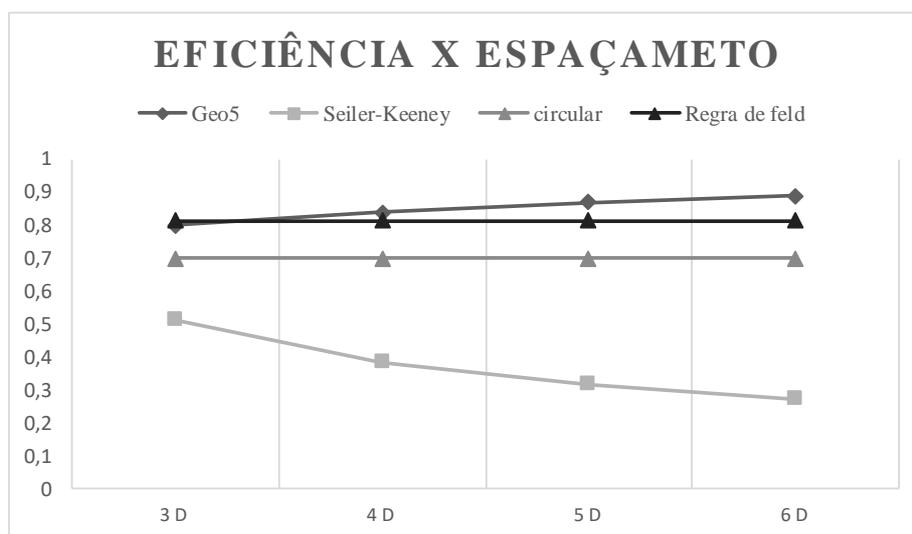


Figura 3. Gráfico Eficiência vs Espaçamento- Bloco com 4 estacas.

A figura 4 apresenta o gráfico com o comportamento da eficiência do bloco de nove (9) estacas com a alteração dos espaçamentos no programa, comparando com equação de Seiler-Keeney e com o método de Feld, que não considera o espaçamento entre estacas ($\eta = 0,72$).

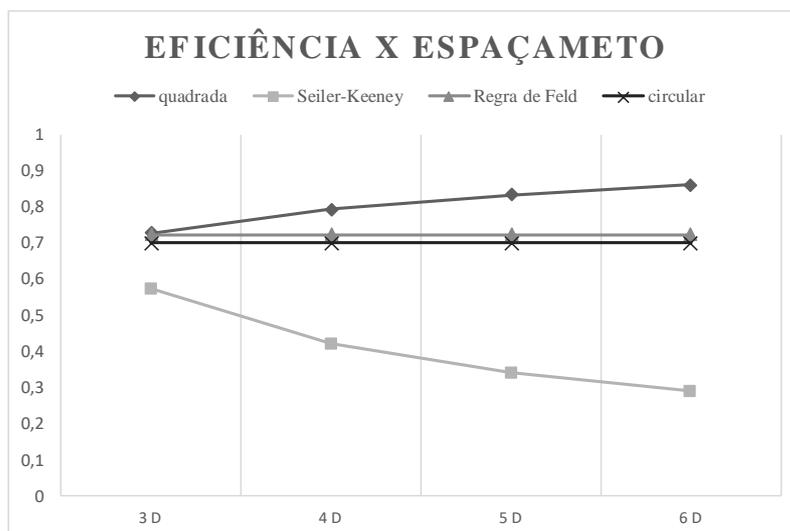


Figura 4. Gráfico Carga vs Espaçamento- Bloco com 9 estacas.

Os valores de eficiência obtidos, são para bloco quadrado de quatro estacas: 3d= 0,8 e para 6d=0,89 e para bloco quadrado de nove estacas: 3d=0,73 e para 6d= 0,86. A figura 5 apresenta o gráfico da comparação da eficiência dos blocos de quatro (4) e nove (9) estacas com a alteração dos espaçamento obtidas no programa.

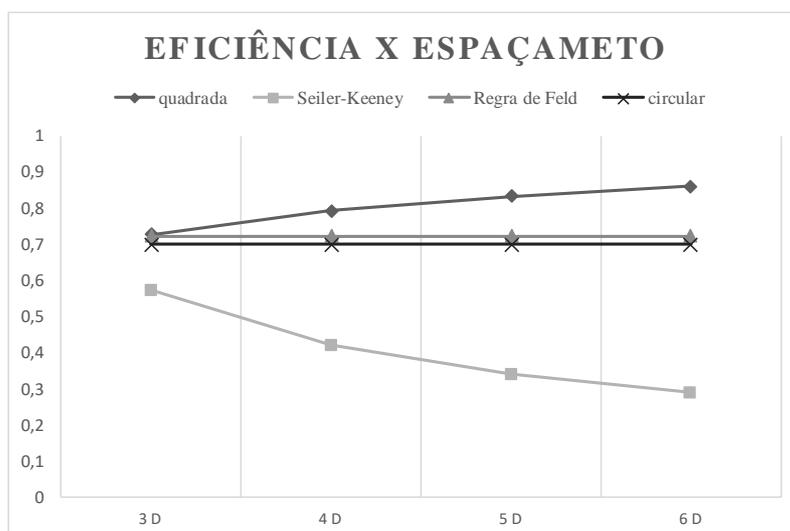


Figura 5. Gráfico Carga vs Espaçamento- Comparação da eficiência dos blocos de quatro (4) e nove (9) estacas obtidas no programa.

5 Discussões e Conclusões

Para o presente trabalho foram analisadas a eficiência de grupos de quatro e nove estacas, variando o espaçamento, simulados no perfil de solo do Campo Experimental da Unicamp. A eficiência foi calculada com fórmulas empíricas e pelo programa Geo5.

A eficiência foi calculada com fórmulas empíricas e no programa Geo5. Analisando os resultados de eficiência, conforme recomendado Velloso e Lopes e limitações do programa adotado, o espaçamento variou de 3 a 6 vezes o diâmetro da mesma,.

Nas condições propostas, de comprimento de estaca e geometrias, a fórmula Converse-Labarre, do programa para grupos de estacas retangulares, apresentou os melhores resultados, pois com o aumento do espaçamento, é esperado aumento na eficiência do grupo, visto que se diminui a interação de bulbos de tensão

entre estacas, destacando-se então este método de cálculo aos demais apresentados. Assim como, quanto maior o número de estacas menor a eficiência, pois aumenta a interação entre as estacas.

Os valores de eficiência obtidos no programa, conforme verificado foi obtido pelo método Converse-Labarre, para bloco quadrado de 4 estacas: $3d=0,8$ e para $6d=0,89$ e para bloco quadrado de 9 estacas: $3d=0,73$ e para $6d=0,86$. Para as estacas circulares o valor de eficiência obtido pra os grupos de 4 estacas e 9 estacas foi 0,7.

O cálculo obtido no GEO5 subestima a capacidade de carga de grupos de estacas comparado aos métodos Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma, logo foram descartadas neste trabalho.. Recomenda-se para continuidade do estudo a utilização de outros programas, considerando os demais fatores influenciadores na eficiência do grupo de estacas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). NBR 6122-*Projeto e execução de fundações* (pp. 1–18). pp. 1–18.
- BEZERRA, J. E. (2003). *Estudo do Comportamento de Fundações em Radier Estaqueado: Conceitos e Aplicações*. 2003, 193 p. Dissertação de Mestrado, Publicação nº G.DM-104/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF.
- BOWLES, J. E. (1997) *Foundation Analyses and Design*. 5. Ed. Nova Iorque: McGraw-Hill.
- BRAJA, D. M. (2011) *Principles of Foundation Engineering*. 7. Ed. CENGAGE Learning. 815 p.
- BRAJA, D. M. (1995) *Principles of Foundation Engineering*. 3. Ed. Editora PWS Publishing Company.
- CHAN, S.H. (2006). *Negative skin friction on piles in consolidating ground*. M.Phil. thesis, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong.
- CUNHA, R.P., POULOS, H.G. e SMALL, J.C. (2001). *Investigation of design alternatives for a piled raft case history*. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 127, n.8, p. 635-641.
- GARCIA, J. R. (2015). *Estaqueados Executados Em Solo Da Região De Campinas / Sp*. Dissertação de Doutorado Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. SP
- GON, F. S. (2011). *Caracterização geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo de diabásio da região de Campinas/SP / Dissertação de Mestrado Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. SP.*
- MUNHOZ, F. S. (2004). *Análise do comportamento de blocos de concreto armado sobre estacas submetidos à ação de força centrada*. Acessado em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-12072006-103303/pt-br.php>
- PONTES, V. E. G. (2013). *Análise do Comportamento de Ensoleiramento sobre Estacas*. Dissertação de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Geotecnia da Universidade de Coimbra- Faculdade de Ciências e Tecnologia- Portugal.
- RANDOLPH, M. F. (1994). Design methods for pile groups and piled rafts. XIII ICSMFE, New Delhi 5, 61±82.
- SANTANA, C. M. (2008) Comparação entre metodologias de análise de efeito de grupo de estacas. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 160p.
- SOARES, W. C. (2011). *Radier Estaqueado com Estacas Hollow Auger em Solo Arenoso*. 340.
- VELLOSO, D.A.; LOPES, F. R. (2012). *Fundações* (2a, Vol. 1). São Paulo: Oficina de Textos.