

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
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Análise Numérica Tridimensional do Efeito de Grupo Generalizado em Blocos de Estacas do Tipo Hélice Contínua Monitorada

Lorena da Silva Leite

Estudante de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Brasil, lorenaleite@pq.uenf.br

Paulo César de Almeida Maia

Professor Associado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Brasil, maia@uenf.br

Aldo Durand Farfán

Professor Associado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Brasil, aldo@uenf.br

RESUMO: Os mecanismos de interação relacionados ao efeito de grupo entre estacas e entre blocos de estacas influenciam significativamente no processo de interação solo-estrutura. Esta interação causa a superposição de tensões e, em geral, faz com que o recalque do grupo de estacas seja diferente do recalque de uma estaca isolada. O objetivo do presente trabalho é avaliar os mecanismos de interação solo-estrutura de edifícios com fundações em estacas do tipo hélice contínua monitorada (EHC) em maciço de solo estratificado, com presença de camada de solo mole intermediária. Portanto, é analisado, particularmente, o efeito de grupo entre estacas de um mesmo bloco e o efeito de grupo entre todos os blocos da fundação de um caso de obra instrumentado por meio de modelagem numérica, considerando o efeito da camada de solo mole. Os resultados mostram o significativo efeito de grupo nos deslocamentos, evidenciando o acréscimo no recalque devido à sobreposição dos bulbos de tensão das estacas e blocos vizinhos.

PALAVRAS-CHAVE: Efeito de Grupo, Estaca Hélice Contínua Monitorada, Método dos Elementos Finitos, Fundação profunda, Interação Solo-Estaca.

ABSTRACT: The interaction mechanisms related to the group effect between piles and between pile groups significantly influence the soil-structure interaction process. This interaction causes the superposition of stresses and, in general, makes the pile group settlement different from the settlement of an isolated pile. The objective of the present paper is to evaluate the soil-structure interaction mechanisms of buildings with foundations of monitored continuous flight auger piles (CFA) in a stratified soil mass, with the presence of an intermediate soft soil layer. Hence, it is particularly analyzed the group effect between piles of a group and the group effect between all pile groups from a foundation of a study case instrumented by means of numerical modeling, considering the effect of the soft soil layer. The results show the significant group effect on displacements, showing the increase in settlement due to the overlapping of the tension bulbs of the piles and neighboring pile groups.

KEYWORDS: Group Effect, Continuous Flight Auger Pile, Finite Element Method, Deep Foundation, Soil-Pile Interaction.

1 Introdução

A interação solo-estrutura é responsável pela redistribuição dos esforços, por meio do reequilíbrio estrutural, que ocorre com a evolução da construção. O estudo dos processos da interação solo-estrutura é importante para a previsão do comportamento da estrutura durante a sequência construtiva. Os mecanismos de interação relacionados ao efeito de grupo entre estacas e entre blocos de estaca influenciam significativamente no processo de interação solo-estrutura, mais especificamente, no processo de interação estaca-solo. Esta



interação causa a superposição de tensões e, em geral, faz com que o recalque do grupo de estacas seja diferente do recalque de uma estaca isolada.

O efeito de grupo, definido pela NBR 6122 (ABNT, 2019) como o processo de interação dos diversos elementos que constituem uma fundação ao transmitirem ao solo as cargas que lhes são aplicadas, causa a superposição de tensões e faz com que o recalque do grupo seja, em geral, diferente do recalque do elemento isolado. Velloso e Lopes (2010) definem o efeito de grupo como a diferença percebida na capacidade de carga e recalque medidos em um grupo de estacas, ligadas por um bloco de coroamento, e em uma estaca isolada, devido à interação que ocorre através do solo.

Nas últimas décadas diversas pesquisas, com diferentes metodologias, se dedicaram à análise do efeito de grupo entre estacas de um mesmo bloco (Poulos e Mattes, 1971; Randolph e Wroth, 1979; Poulos e Davis, 1980; Poulos e Randolph, 1983; Randolph, 1994; Guo e Randolph, 1999; Poulos, 2006; Sheil e McCabe, 2012; Guo, 2013; Randolph e Reul, 2019; entre outros). Porém, a análise do efeito de grupo generalizado, ou seja, o efeito de grupo entre todos os blocos de estacas da fundação, é, geralmente, desconsiderada. Isso se deve, em geral, ao esforço computacional exigido para a análise de toda a fundação. Sendo assim, as análises numéricas do efeito de grupo em estacas costumam se restringir a grupos de estacas relativamente pequenos (Randolph, 1994). Porém, com o desenvolvimento da tecnologia, a utilização do método dos elementos finitos se torna mais eficiente e possibilita a resolução de problemas mais complexos, como, por exemplo, a análise de problemas envolvendo maciço estratificado, com maior quantidade de estacas e blocos de estacas, possibilitando a análise mais representativa do desempenho de toda a edificação e do efeito de grupo generalizado.

Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar, por meio de modelagem numérica tridimensional, os mecanismos de interação solo-estrutura de edifício com fundação em estacas do tipo hélice contínua monitorada em maciço de solo estratificado, com presença de camada de solo mole intermediária. É analisado, particularmente, o efeito de grupo entre estacas de um mesmo bloco e o efeito de grupo entre todos os blocos da fundação de um caso de obra instrumentado. Avalia-se ainda o efeito da camada de solo mole.

2 Estudo de Caso

O caso de obra é constituído por um edifício residencial com 19 pavimentos com estrutura aporticada em concreto armado e alvenarias de vedação em material cerâmico e está localizado na cidade de Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil. O edifício é constituído por 3 andares de garagem que ocupam toda a área do terreno o corpo do prédio é constituído por 14 pavimentos tipo e uma cobertura, além da caixa d'água, ocupando a área central do edifício.

A região onde se localiza o caso de obra é marcada pela presença de formação de planícies de origem fluviomarinhas e tabuleiros de bacias sedimentares cenozóicas, caracterizada por superfícies sub-horizontais constituídas de depósitos arenosos ou arenoargilosos a argilosos bem selecionados, apresentando gradientes extremamente suaves e convergentes em direção aos cursos d'água (Lazaretti *et al.*, 2017).

A parte elevada do município apresenta solos provenientes do intemperismo das rochas pré-cambrianas (gnaisses e granitos) e dos sedimentos terciários da Formação Barreiras (Costa *et al.*, 2008).

A investigação e caracterização do perfil do terreno foi realizada por meio de 8 furos de sondagem à percussão.

A fundação é em estacas do tipo hélice contínua monitorada, com estacas de diâmetros de 500mm, sob o corpo principal do edifício, e de 400mm, sob a extensão da área da garagem. Todas as estacas possuem o comprimento de 18m, armadas nos primeiros 4 metros. Sendo, portanto, assentadas em uma camada de argila siltosa com areia, que apresenta alto valor de N_{SPT} , com valor médio de N_{60} de aproximadamente 58.

As estacas consideradas no modelo numérico são as estacas localizadas sob o corpo do edifício e são divididas, conforme o nível de carregamento, em estacas periféricas, intermediárias e centrais.

A Figura 1 apresenta o projeto de estaqueamento, a localização das estacas instrumentadas, a divisão das estacas em periféricas, intermediárias e centrais e a localização dos furos de sondagem.

Foram identificadas na sondagem as seguintes camadas de solo: argila siltosa amarela de 3,7 a 6,4 metros de profundidade, areia argilosa de 11,3 a 13,7 m, argila turfosa cinza escura de 11,3 a 13,7 m e argila siltosa cinza claro dura impenetrável de 19,5 a 20,5 m, conforme apresentado na Figura 2.

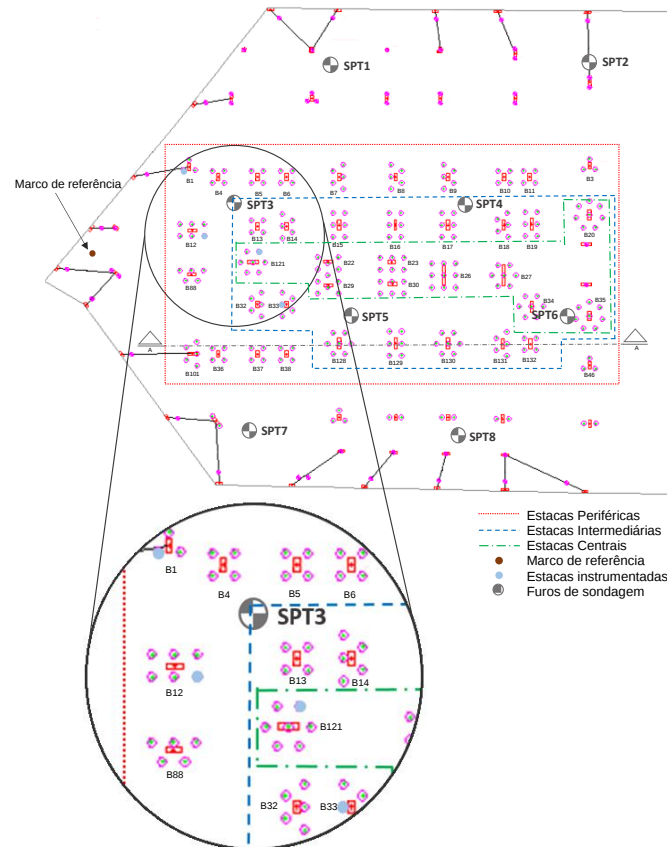


Figura 1. Projeto de estaqueamento e locação das estacas instrumentadas e furos de sondagem.

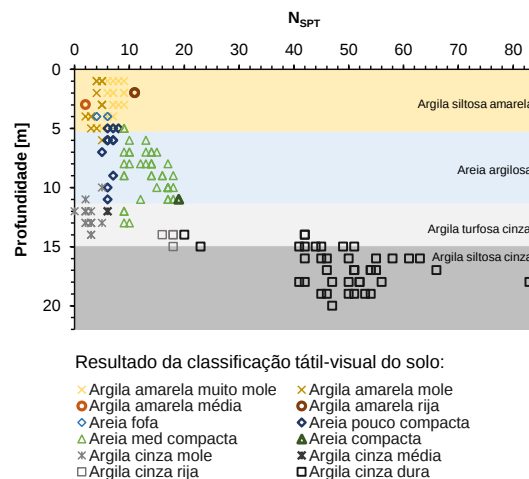


Figura 2. Perfil simplificado do solo e variação de N_{SPT} com a profundidade.

O monitoramento da obra, desde as primeiras etapas da construção, foi realizado por Waked (2017) e Prellwitz (2016). Waked (2017) fez o monitoramento do deslocamento relativo ao bloco de 4 estacas, por meio de *telltales* e *strais gauges*, e Prellwitz (2016) fez o monitoramento dos recalque de todos os pilares do edifício, por meio de um sistema de monitoramento baseado no princípio dos vasos comunicantes e aquisição de dados por meio de fotogrametria.

3 Modelagem Numérica

A análise da interação solo-estrutura do caso de obra foi realizada a partir da modelagem numérica tridimensional por meio de software com base em método dos elementos finitos, Plaxis 3D.



Os parâmetros das estacas e blocos foram determinados em ensaios de laboratório por Maia *et al.* (2019) e em ensaio de campo por Waked (2017) e os parâmetros do maciço de solo foram validados a partir de retroanálise paramétrica em um modelo tridimensional a partir de correlações com o N_{SPT} obtido no local e com base em valores de parâmetros sugeridos por autores como Décourt (1995), Marangon (2018), Ortigão (2007), Godoy (1972) e Bowles (1997). A validação dos parâmetros das camadas de solo é apresentada em Leite (2021). Os parâmetros utilizados na modelagem numérica são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros das estacas, blocos e camadas de solo.

	Modelo const.	$\gamma^{(a)}$ [kN/m ³]	$E^{(b)}$ [Gpa]	$\nu^{(c)}$	$R_p \max^{(d)}$ [kN]	$R_{lat} \max^{(e)}$ [kN]	$c^{(f)}$ [kPa]	$w^{(g)}$ [m/dia]
Estaca	LE	20,69	14,8	0,11	800	1.400	-	-
Bloco	LE	20,69	148	0,11	-	-	-	-
Argila amarela	LE	17	0,023	0,3	-	-	-	0,01
Areia	LE	20	0,048	0,4	-	-	-	1
Argila cinza mole	MC	13	0,010	0,4	-	-	25	0,01
Argila cinza dura	LE	20	0,138	0,4	-	-	-	0,01

(a) Peso específico obtido para estaca e bloco a partir de Maia *et al.* (2019) e para as camadas de solo a partir de Godoy (1972);

(b) Módulo de elasticidade obtido para estaca e bloco a partir de Maia *et al.* (2019) e para as camadas de solo a partir das correlações de Décourt (1995);

(c) Valores de coeficiente de Poisson, obtidos para estaca e bloco a partir de Maia *et al.* (2019) e para as camadas de solo conforme sugeridos por Marangon (2018);

(d) Resistência de ponta máxima obtida por Waked (2017);

(e) Resistência lateral máxima obtida por Waked (2017);

(f) Valor de coesão, conforme sugerido por Marangon (2018);

(g) Valores de permeabilidade sugeridos por Ortigão (2007).

O modelo numérico desenvolvido é apresentado na Figura 3. A malha de elementos finitos é formada por elementos tetraédricos de 10 nós e possui grau de refinamento médio. O modelo constitutivo utilizado para representar os elementos de estacas e blocos foi o Linear Elástico (LE), para a camada de argila mole foi utilizado o modelo linear elástico perfeitamente plástico, chamado de modelo de Mohr Coulomb (MC), e para as demais camadas de solo também foi utilizado o modelo LE.

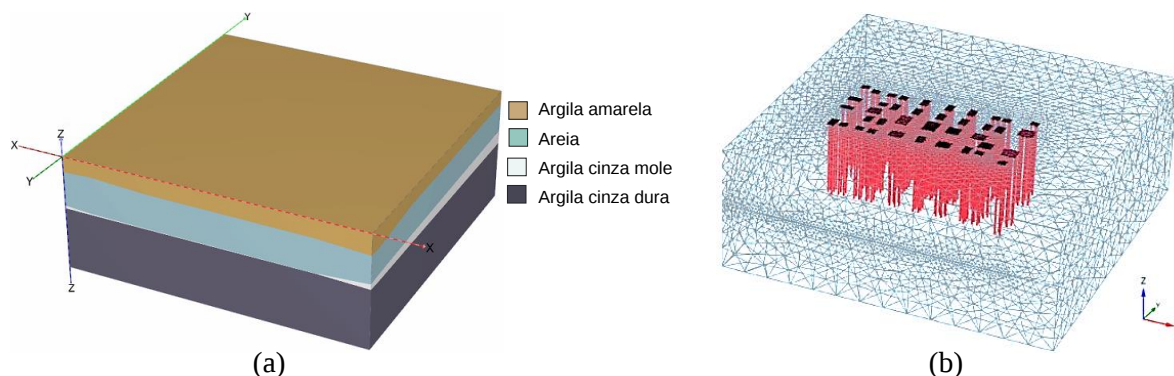


Figura 3. Modelo numérico (a) do maciço de fundação e (b) das estacas e blocos.

A modelagem foi realizada em diversas etapas, a fim de se avaliar o efeito da interação entre os blocos. Foi simulado inicialmente um modelo com uma estaca isolada, seguida de um modelo com um bloco isolado e a seguir foram introduzidos a cada modelo os blocos localizados a um raio n vezes a maior dimensão (B) do bloco considerado inicialmente. Esse processo de avaliação, aumentando o raio simulado no modelo numérico, foi realizado 9 vezes, sendo 3 iniciando com blocos periféricos (B1, B6, B12), 3 com blocos intermediários (B15, B33, B129) e 3 com blocos centrais (B20, B23/30, B27). A localização desses blocos está ilustrada na Figura 4a. A divisão dos blocos de acordo com a distância ao centro do bloco B129 é apresentada na Figura 4b.

Todos os modelos numéricos foram configurados com e sem a camada de solo mole, para a análise da influência desta camada no efeito de grupo. A camada de argila mole foi substituída pela camada de maior resistência, argila cinza dura, nos modelos sem solo mole.

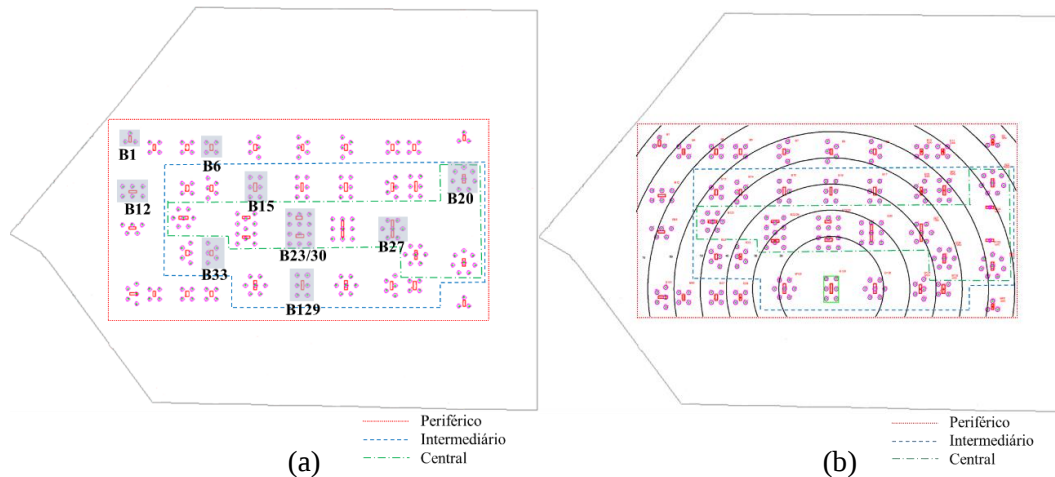


Figura 4. Planta do projeto de fundação com (a) localização dos blocos analisados e (b) divisão dos blocos de acordo com a distância ao centro de B129.

4 Resultados e Análises

Os resultados da simulação numérica, apresentando a massa de solo mobilizada, com isocurvas de recalque, dos modelos com a estaca isolada B129c, com o bloco isolado B129 e com os blocos localizados a uma distância de 2B, 3B, 4B, 5B, 6B, 7B, 8B e 9B do bloco inicialmente analisado é apresentado na Figura 5. O corte AA, apresentado na Figura 4, passa pelo centro da estaca isolada E129c e é feito no plano XZ. A localização do corte AA na planta é identificado na Figura 1. Esses resultados foram obtidos a partir dos modelos com maciço com camada de solo mole. A Figura 6 apresenta os resultados da mesma sequência de testes, porém, sem a camada de solo mole.

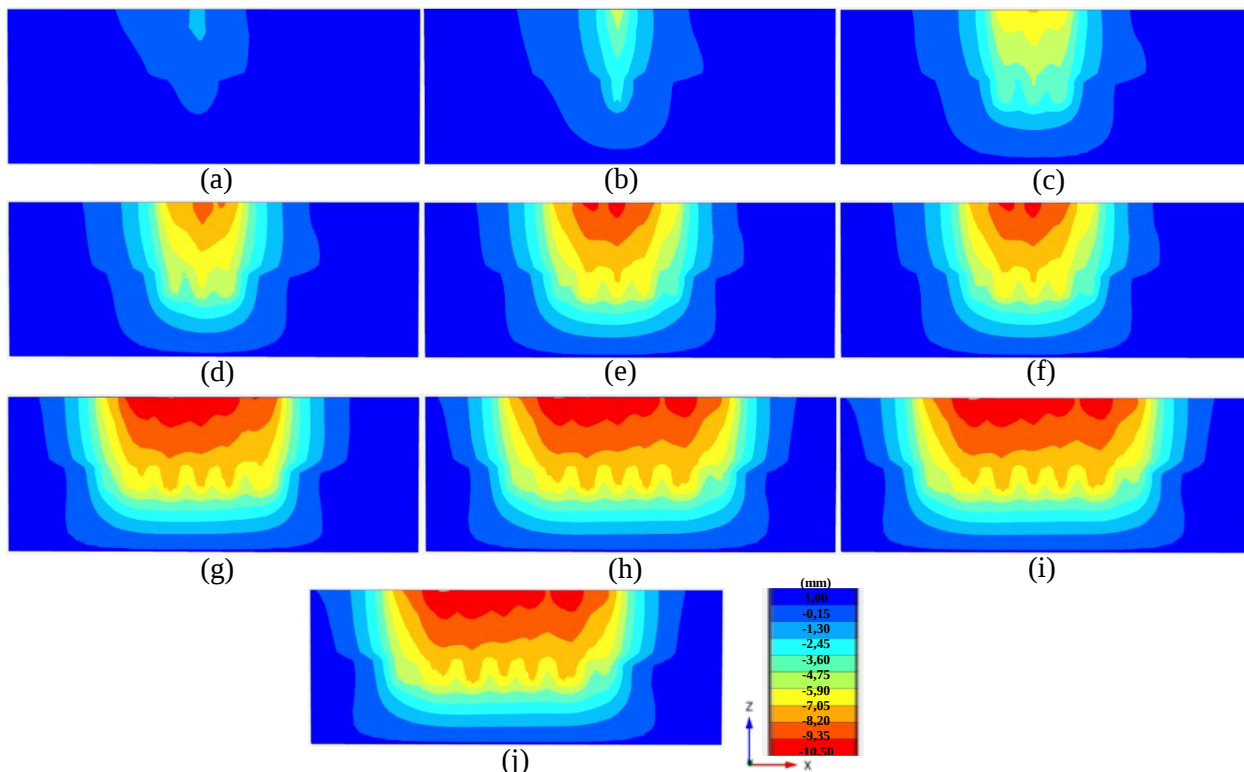


Figura 5. Corte AA no plano XZ com massa de solo mobilizada nos modelos com solo mole com (a) E129c, (b) B129, e blocos localizados a uma distância de (c) 2B, (d) 3B, (e) 4B, (f) 5B, (g) 6B, (h) 7B, (i) 8B e (j) 9B.

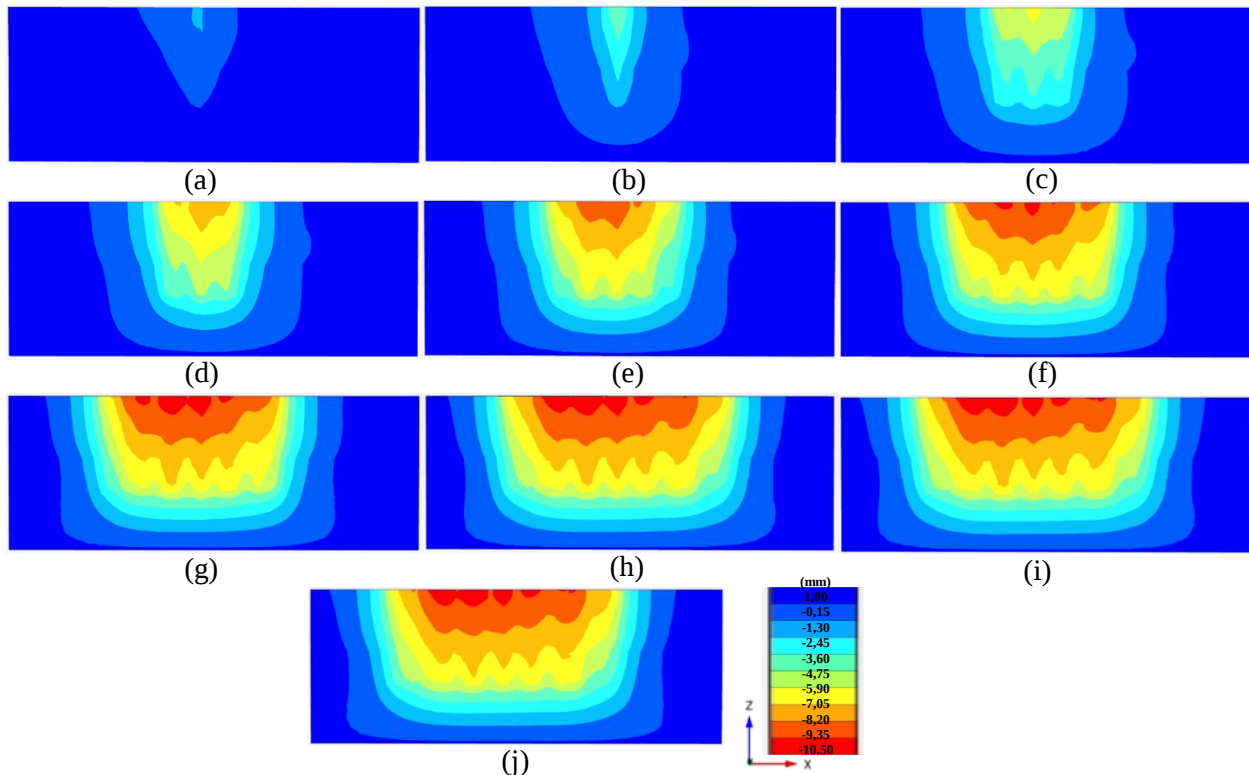


Figura 6. Corte AA no plano XZ com massa de solo mobilizada nos modelos sem solo mole com (a) E129c, (b) B129, e blocos localizados a uma distância de (c) 2B, (d) 3B, (e) 4B, (f) 5B, (g) 6B, (h) 7B, (i) 8B e (j) 9B.

A comparação entre os modelos com e sem solo mole evidenciam a diferença no comportamento do maciço causada pela camada de argila cinza mole. Nos modelos com solo mole há uma alteração no padrão de deslocamento vertical do solo na profundidade da camada de argila cinza mole, onde há o aumento do volume de solo deslocado, apresentando uma redução brusca da região deslocada na profundidade da camada de argila dura, localizada logo abaixo da camada de argila mole. Além disso, o nível de recalque nos modelos numéricos com solo mole foi maior que nos modelos sem solo mole.

Os resultados mostram o significativo efeito de grupo nos deslocamentos, evidenciando o acréscimo no recalque devido à sobreposição dos bulbos de tensão das estacas e blocos vizinhos. Foi observado que esse efeito ocorre para blocos localizados até um raio médio de cinco vezes a maior dimensão do bloco, se tornando relativamente sem importância para maiores distâncias. Este efeito pode ser observado na Figura 7, que apresenta as curvas da relação entre o raio de influência (B) e a razão do recalque do bloco no modelo com determinado raio de influência e o recalque do bloco no modelo com a obra completa (ρ_{IB}/ρ_{OC}). Não foi observado efeito significativo da presença das camadas de solo mole no maciço na análise do efeito de grupo entre blocos de estacas.

Diversos autores analisam o espaçamento necessário para eliminar o efeito de grupo entre estacas. Pressley e Poulos (1986) apontam que para um grupo de estacas carregadas verticalmente o espaçamento de 8 vezes o diâmetro (D) da estaca resulta em mecanismo de ruptura característico de estaca isolada, ou seja, sem efeito de grupo. A CGS (1992), em um manual de engenharia de fundação, também analisa o efeito do espaçamento de estacas e afirma que geralmente a interação de grupo não precisa ser considerada quando o espaçamento entre as estacas é maior que 8D. Khari *et al.* (2013) observaram que, para a razão de espaçamento de centro a centro entre as estacas e o diâmetro (S/D) maior que 6, a interação entre estacas e os efeitos de grupo são eliminados, considerando grupos de estacas carregadas lateralmente em maciço de areia. Patrocínio (2018) observou-se que as estacas trabalham isoladamente em um grupo a partir de S/D igual a 5. Souri *et al.* (2020) observaram, para estacas instaladas em maciço de argila, que o efeito de grupo na capacidade de carga lateral poderia ser negligenciado para espaçamentos maiores que 5D. Porém, nenhuma dessas pesquisas analisam o efeito de grupo entre blocos de estacas.

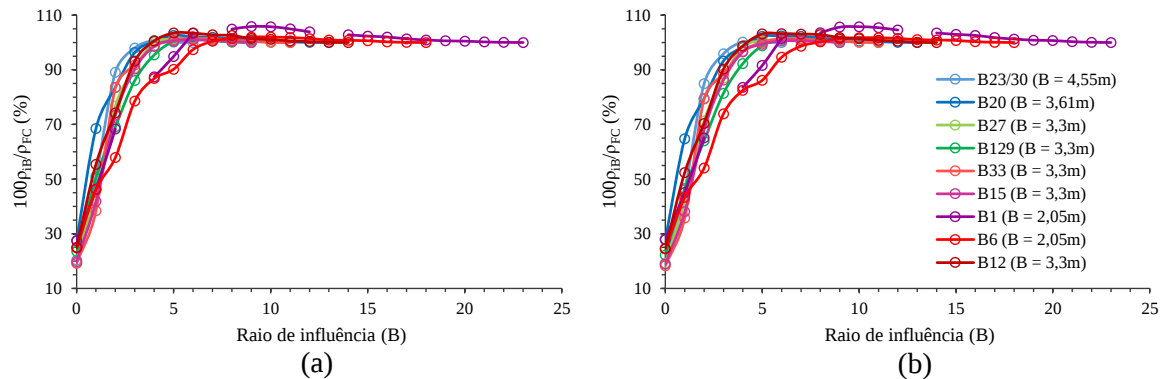


Figura 7. Relação do percentual de recalque com o raio de influência (a) com solo mole e (b) sem solo mole.

Contudo, percebe-se que o raio de influência do efeito de grupo entre blocos de estacas é da mesma ordem do raio de influência observado para o efeito de grupo entre estacas de um mesmo bloco. Sendo assim, entende-se que é possível comparar o efeito de grupo entre blocos ao efeito de grupo entre estacas de um mesmo bloco. Entende-se, portanto, que os blocos se comportam de forma análoga às estacas, influenciando os blocos vizinhos ao sobrepor os bulbos de tensão, causando acréscimo no recalque dos blocos adjacentes.

Ressalta-se que o recalque observado em cada bloco no modelo simulando a fundação completa foi até aproximadamente 5 vezes maior que o recalque obtido nos modelos com as estacas isoladas e até aproximadamente 3 vezes maior que o recalque obtido nos modelos com os blocos isolados.

4 Conclusão

Foi analisado na presente pesquisa o efeito de grupo entre estacas e entre blocos de estacas a partir da modelagem numérica tridimensional, por meio de software com base no método dos elementos finitos. Demonstrou-se que o efeito de grupo entre blocos de estaca é significativo no comportamento do edifício.

Observou-se nos modelos numéricos, que o efeito de grupo entre blocos é semelhante ao efeito de grupo entre estacas de um bloco. Isso, devido à influência nos blocos vizinhos, ao sobrepor os bulbos de tensão, resultando em um acréscimo no recalque dos blocos adjacentes. Isso se mostrou, no entanto, negligenciável para blocos localizados a uma distância maior que 5 vezes a maior dimensão do bloco.

O efeito de grupo generalizado, no modelo com a fundação completa, aumentou o recalque em até 3 vezes, com relação ao recalque do bloco isolado, e até 5 vezes, com relação ao recalque da estaca isolada.

A presença da camada de solo mole gerou o deslocamento vertical de um volume maior de solo e causou maiores níveis de recalques, porém, não apresentou influência significativa no efeito de grupo entre blocos de estacas.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pela CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Os autores agradecem aos pesquisadores que forneceram os dados referentes ao caso de obra analisados, Me. Lucas Waked e Ma. Marta Prellwitz e às pesquisadoras que colaboraram com o desenvolvimento desta pesquisa, Ma. Géssica Marquezini e engenheira Nathani Zampirolli.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation analysis and design* (5th ed.). The McGraw-Hill Companies, Inc. International Edition.
- CGS. (1992). *Canadian Foundation Engineering Manual* (3rd ed.). Ottawa: Canadian Geotechnical Society.



- Costa, A. N., Polivanov, H., & Alves, M. G. (2008). *Mapeamento Geológico-Geotécnico Preliminar, utilizando Geoprocessamento, no município de Campos dos Goytacazes*. Rio de Janeiro: Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ.
- Décourt, L. (1995). Prediction of load-settlement relationships for foundations on the basis of the SPT-T. *Ciclo de Conferências Internacionais*.
- Godoy, N. S. (1972). *Fundações*. Notas de aula: curso de graduação. Escola de Engenharia de São Carlos - USP.
- Guo, W. D. (2013). *Theory and Practice of Pile Foundations*. Boca Raton: CRC Press.
- Guo, W. D., & Randolph, M. F. (1999). An efficient approach for settlement prediction of pile groups. *Géotechnique*, 49(2), 161-179.
- Khari, M., Kassim, K. A., & Adnan, A. (2013). An experimental study on pile spacing effects under lateral loading in sand. *The Scientific World Journal*, 2013.
- Lazaretti, A. F., Pinho, D., Dantas, M. E., & Pôssa, J. T. (2017). *Carta geomorfológica: município de Campos dos Goytacazes*. Rio de Janeiro: CPRM.
- Leite, L. S. (2021). Dissertação de Mestrado. *Análise numérica tridimensional do efeito de grupo entre estacas e entre blocos em fundação do tipo hélice contínua monitorada em maciço com presença de solo mole*, 172p. Campos dos Goytacazes, RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF.
- Maia, P. C., Waked, L. V., & Prellwitz, M. F. (2019). Estimativa do módulo de elasticidade do concreto de estacas hélice contínua. *Geotecnia*(147), 27-40.
- Marangon, M. (2018). *Geotecnia de fundações*. UFJF - Departamento de Transporte e Geotecnia.
- Ortigão, J. A. (2007). *Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos* (3ª ed.). Terratek.
- Patrocínio, G. M. (2018). Trabalho de Conclusão de Curso. *Análise paramétrica de grupos de estacas helicoidais à tração*, 20. Natal, RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN.
- Poulos, H. G., & Randolph, M. F. (1983). Pile group analysis: a study of two methods. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3), 355-372.
- Poulos, H. G. (2006). Pile Group Settlement Estimation - Research To Practice. *Foundation Analysis and Design: Innovative Methods*, 1-22.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*. Sydney: T. William Lambe et al.
- Poulos, H. G., & Mattes, N. S. (1971). Settlement and Load Distribution Analysis of Pile Groups. *Australian Geomechanics Journal*, 18-28.
- Prellwitz, M. F. (02 de ago de 2016). Projeto de Tese. *Aplicação de monitoramento de recalque para estimativa de parâmetro de interação solo-estrutura*. Campos dos Goytacazes, RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF.
- Pressley, J. S., & Poulos, H. G. (1986). Finite element analysis of mechanisms of pile group behaviour. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 10, 212-221.
- Randolph, M. F. (1994). Design methods for pile groups and piled rafts. *XIII ICSMFE*, pp. 61-82.
- Randolph, M. F., & Reul, O. (2019). Practical approaches for design of pile groups and piled rafts. *4th Bolivian International Conference on Deep Foundations*.
- Randolph, M. F., & Wroth, C. P. (1979). An analysis of the vertical deformation of pile groups. *Géotechnique*, 29(4), 423-439.
- Sheil, B., & McCabe, B. A. (28-30 de june de 2012). Predictions of friction pile group response using embedded piles in PLAXIS. *The 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Souri, A., Abu-Farsakh, M. Y., & Voyiadjis, G. Z. (2020). Evaluating the effect of pile spacing and configuration on the lateral resistance of pile groups. *Marine Georesources & Geotechnology*, 1-13.
- Velloso, D. A., & Lopes, F. R. (2010). *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas*. São Paulo: Oficina de texto.
- Waked, L. V. (2017). Dissertação de Mestrado. *Transferência de carga de estacas hélice contínua monitorada em maciço sedimentar durante a construção de um edifício*, 110p. Campos dos Goytacazes, RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF.