

Análise numérica de estacas carregadas horizontalmente reforçadas com blocos de solo-cimento inseridos no topo

Numerical analysis of horizontally loaded piles reinforced with soil-cement blocks inserted on top

Análisis numérico de pilotes cargados horizontales reforzados con bloques de suelo-cemento

insertos en la parte superior

Recebido: 27/09/2022 | Revisado: 09/10/2022 | Aceitado: 11/10/2022 | Publicado: 15/10/2022

Rodolfo Hernandes Bonan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5944-2602>

Universidade Estadual de Maringá, Brasil

E-mail: rodolfobonan@hotmail.com

Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6196-2607>

Universidade Estadual de Maringá, Brasil

E-mail: jeselay@hotmail.com

Resumo

De modo a entender melhor a influência de reforços no solo com o uso de solo melhorado. Foi realizado um estudo numérico sobre a influência da inserção de blocos de solo-cimento como reforço no topo de estacas carregadas horizontalmente, usando modelos 3D em elementos finitos, avaliando o efeito de diferentes dimensões de reforços no solo local. Os modelos simulados foram calibrados a partir dos resultados de provas de carga estática realizadas em estacas do tipo escavada de concreto armado, com e sem a utilização do reforço em solo-cimento instalado no topo. Os modelos numéricos foram construídos no software Simulia™ Abaqus® v.6.13. O comportamento constitutivo do concreto e do solo-cimento foi considerado como Concrete Damaged Plasticity (CDP) e o solo foi considerado com o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. Foram então simuladas computacionalmente diferentes dimensões do reforço em relação ao diâmetro da estaca, identificando sua influência na curva carga deslocamento. Como resultado, o reforço de bloco de solo-cimento melhora o desempenho da estaca, reduzindo em até 79,8% os deslocamentos horizontais identificados com o maior reforço analisado.

Palavras-chave: Prova de carga; Reforço de solo; Flexão em estacas.

Abstract

To better understand the influence of soil reinforcements in improved soil. A numerical study was performed on the influence of insertion of soil-cement blocks as reinforcement on the top of horizontally loaded piles, using 3D finite element models, evaluating the effect of different dimensions of reinforcements on the local soil. The simulated models were calibrated from the results of static load tests carried out on bored reinforced concrete piles, with and without the reinforcement of soil-cement block on the surface. Numerical models were built using Simulia™ Abaqus® v.6.13 software. The constitutive behavior of concrete and soil-cement was considered as Concrete Damaged Plasticity (CDP) and the soil was considered with Mohr-Coulomb's constitutive model. Different dimensions of the reinforcement in relation to the diameter of the pile were then computationally simulated, identifying their influence on the load-displacement curve. As a result, the soil-cement block reinforcement improves the performance of the pile, reducing by up to 79.8% the horizontal displacements identified with the largest reinforcement analyzed.

Keywords: Load test; Soil reinforcement; Bending on piles.

Resumen

Con el fin de comprender mejor la influencia de los refuerzos de suelo con uso de suelo mejorado. Se realizó un estudio numérico sobre la influencia de la inserción de bloques de suelo-cemento como refuerzo en la superficie de pilotes cargados horizontalmente, utilizando modelos 3D de elementos finitos, evaluando el efecto de diferentes dimensiones de refuerzos sobre el suelo local. Los modelos simulados fueron calibrados a partir de los resultados de las pruebas de carga estática realizadas en pilotes de hormigón armado excavados, con y sin el uso de refuerzo de suelo-cemento. Los modelos numéricos se construyeron utilizando el software Simulia™ Abaqus® v.6.13. El comportamiento constitutivo del hormigón y del suelo-cemento se consideró como Concrete Damaged Plasticity (CDP) y el suelo se consideró con el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. Luego, se simuló computacionalmente diferentes dimensiones del refuerzo en relación con el diámetro del pilote, identificando su influencia en la curva carga-desplazamiento. Como resultado, el refuerzo de bloques de suelo-cemento mejora el comportamiento del pilote, reduciendo hasta en un 79,8% los desplazamientos horizontales identificados con el mayor refuerzo analizado.

Palabras clave: Prueba de carga; Refuerzo del suelo; Pilote a flexión.

1. Introdução

Em engenharia de fundações, estruturas tais como as linhas de transmissão de alta tensão, plataformas offshore e turbinas eólicas, necessitam de fundações que absorvam os esforços horizontais, atendendo aos requisitos mínimos de segurança previstos na ABNT NBR 6122:19. Para o dimensionamento de fundações profundas submetidas a carregamentos laterais aplicados no topo as fundações devem atender ao estado limite de serviço e ao estado limite último. A verificação do estado limite último requer a definição da capacidade de carga do solo e do elemento estrutural de fundação, o que depende, fundamentalmente, das pressões de contato mobilizadas na interface estaca-solo (Santos, 2008).

A reação mobilizada do solo e os deslocamentos são dependentes entre si, deste modo, a solução do problema de estacas carregadas horizontalmente no topo caracteriza-se como um problema de interação solo-estrutura. Esta análise pode ser realizada utilizando a hipótese de Winkler, que consiste na substituição do solo por molas idênticas e independentes, definidas com diferentes configurações em função das variações que podem ocorrer no maciço de solos ou elemento estrutural (Jorna, 2018).

De modo a otimizar projetos geotécnico de turbinas eólicas offshore por meio de técnicas modernas de análise, o uso de Modelagem por Elementos Finitos (MEF) 3D desempenhou um papel fundamental na redução de tempo e custos de projeto, possibilitando simular com precisão o comportamento de estacas isoladas a partir de dados do Teste de Penetração de Cone (CPT) para calibrar o modelo de solo não linear. (Murphy et al., 2018).

Devido à baixa capacidade de carga do solo no topo de estacas quando solicitadas horizontalmente, torna-se necessário a adoção de medidas para melhoria do desempenho destas estacas (Faro et al., 2015).

Dentre as possibilidades de material para a construção desses reforços no entorno das estacas, comumente se utiliza misturas de solo-cimento, onde se aproveita o próprio solo do local retirado durante o processo de escavação da estaca ou solo escavado em regiões próximas. Apesar de ser uma solução simples e comum, são raros os estudos da eficiência desse método na melhoria na capacidade de carga da estaca, além disso, não existe nenhum procedimento de abordagem consolidada para cálculo e projeto desse tipo de reforço (Martinez, 2018).

Neste contexto, este trabalho visa analisar a influência do reforço de solo-cimento no topo de estacas isoladas quando submetidas a esforços transversais. Comparando resultados prévios ensaiados em campo experimental com simulações por software de elementos finitos 3D.

Deste modo, objetivou-se avaliar a influência da inserção de blocos de solo-cimento como reforço no topo de estacas carregadas horizontalmente usando simulações 3D em elementos finitos, avaliando a distribuição dos deslocamentos, tensões e deslocamentos para o modelo simulado com e sem uso do solo-cimento, comparando então os deslocamentos do topo da estaca carregada horizontalmente para diferentes dimensões de reforço de solo-cimento no topo da estaca.

2. Metodologia

2.1 Classificação de estacas carregadas lateralmente

Estruturas de fundação podem ser classificadas de acordo com sua geometria, origem dos esforços aplicados e tipo de fixação. As estacas carregadas lateralmente podem ser classificadas como estacas ativas, quando submetidas a forças externas que transmitem ao solo os esforços horizontais, e as estacas passivas recebem esforços horizontais originados de movimentações do solo em seu entorno (Nasr, 2014). Para as estacas carregadas lateralmente no topo, os mecanismos de ruptura dependem de fatores geométricos da estaca, devendo-se assim considerar o seu comprimento e a condição de vinculação no topo da estaca (Lu et al., 2012).

Baseado na fixação do topo da estaca, pode-se classifica-la como topo fixo ou topo livre, dependendo se o topo da estaca se comporta como uma extremidade engastado ou não, respectivamente (Jayasree, 2018). De acordo com o

comprimento e diâmetro da estaca, pode-se classifica-la como curta ou longa. Deste modo, as classificações de ruptura são baseadas em sua fixação do topo e dimensões da estrutura (Alonso, 2003).

2.2 Curva carga deslocamento

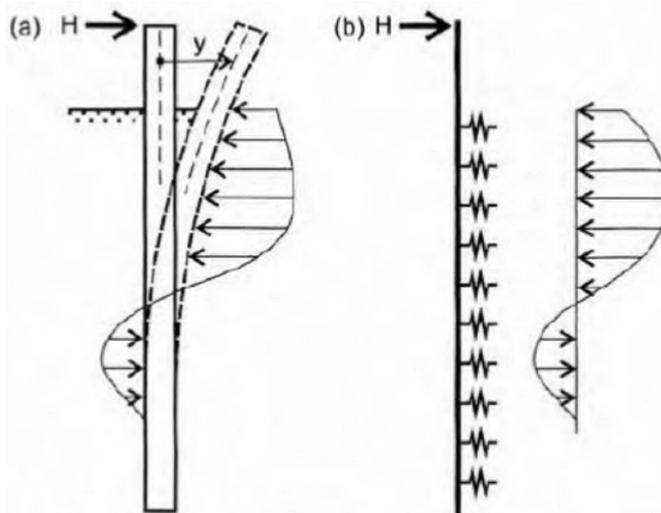
De modo a obter uma representação gráfica do comportamento do material, um corpo de prova é submetido a tensões externas durante um ensaio experimental, podendo sofrer deformação elástica e/ou plástica, dependendo do material e intensidade do carregamento (Hai-Tao et al., 2019). Normalmente, padroniza-se os resultados obtidos, para que se possa analisa-lo posteriormente, por meio de um gráfico com os seus eixos apresentando a carga aplicada e o deslocamento (Duarte, 2015).

Os dados da curva carga deslocamento pode representar graficamente características de uma estrutura e possibilita compara-la com estruturas de diferentes dimensões, formatos, solos ou até realizar a comparação de modelos ensaiados com métodos analíticos existentes e propostos (Sanomia, 2016).

2.3 Teoria da reação horizontal do solo

Para possibilitar a obtenção dos deslocamentos no solo devido à esforços horizontais, os modelos baseados no coeficiente de reação horizontal do solo foram idealizados por Winkler, conforme a Figura 1.

Figura 1. Estaca submetida a uma força horizontal. (a) reação do solo real e (b) solução proposta por Winkler.



Fonte: Velloso & Lopes (2012).

A Hipótese de Winkler, proposta em 1867, simula o comportamento da fundação por meio de uma simplificação do solo. Na hipótese a fundação é tratada como uma viga suportada por uma série de molas idênticas independentes entre si, igualmente espaçadas e com comportamento elástico linear e permite obter os deslocamentos ao longo de todo o comprimento da estrutura (Velloso & Lopes, 2012).

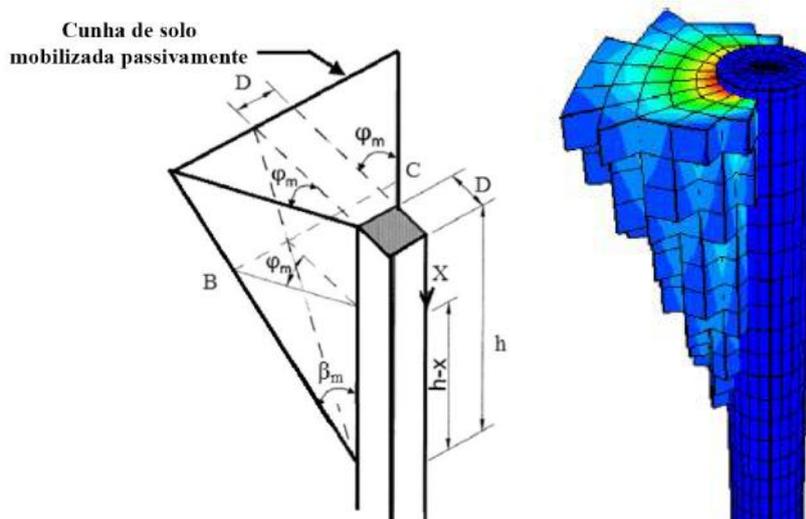
2.4 Modelagens em elementos finitos em 3D

A fim de possibilitar maior flexibilidade na geometria da estrutura e melhor detalhamento das reação solo-estrutura, pode-se empregar investigações numéricas, por meio da modelagem de elementos finitos tridimensionais (3D), que é proposta como uma opção que considera a continuidade solo-estaca (Ong, 2016). Metodologia esta que pode ser validada comparando o comportamento modelado com testes de campo e permite posteriormente, pelo modelo de elementos finitos, obter curvas de

reação solo-estrutura, isolando as tensões em cada elemento definido (Murphy et al., 2018).

A comparação entre o modelo teórico do rompimento de cunha do solo próxima a cabeça de uma estaca carregada lateralmente e modelo de rompimento do solo em uma análise numérica em 3D é apresentado na Figura 2, que proporciona uma boa concordância entre o método proposto e a simulação numérica, ilustrando a viabilidade do método (Y. Yu et al., 2018).

Figura 2. Comparação do modelo teórico e modelo numérico de uma cunha de mobilização em solo uniforme.



Fonte: Heidari et al. (2014); Y. Yu et al. (2018).

2.5 Reforço para estacas em solos coesivos

Em solos argilosos, com o objetivo de realizar um melhoramento do solo, pode-se fazer uso do solo-cimento, que é composto por uma mistura homogênea de material químico cimentício (cimento) e material natural (solo). O produto tem um aumento significativo na resistência ao cisalhamento para atender aos requisitos de resistência de diferentes aplicações, além de apresentar um bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração e boa durabilidade (Fan et al., 2018).

Para entender melhor o mecanismo de desenvolvimento da resistência lateral de estacas isoladas em um solo melhorado com solo-cimento, G. Yu et al. (2019) realizou ensaios com o solo natural e melhorado com a introdução de solo-cimento por Jet Grouting nas proximidades da cabeça da estaca. Os resultados obtidos pela análise computacional de elementos finitos foram então comparados com as estruturas ensaiados em campo para validação, valores estes que apresentaram uma boa conformidade com os valores previamente aferidos, tanto para o solo natural, quanto para o solo melhorado com solo-cimento.

2.6 Abordagem do modelo computacional

Como base deste estudo, fora utilizado um ensaio previamente realizado no campo experimental da Universidade Estadual de Maringá com duas estacas isoladas de concreto idênticas com 25 cm de diâmetro e 8 m de comprimento, carregadas horizontalmente, sendo uma estaca reforçada com solo-cimento em seu topo.

Fora então criado um modelo computacional de elementos finitos em 3D, por meio do software Simulia™ Abaqus® v.6.13, com todas as características dos materiais e geometrias das estruturas, de modo a validar o modelo, comparando os resultados obtidos em campo e computacionalmente. Com o modelo validado, pode-se então analisar a influência do reforço em solo-cimento, variando as suas dimensões, de modo a observar a variação no deslocamento lateral da estrutura quando

carregada horizontalmente.

2.7 Características do solo local

O subsolo da região do campo experimental da Universidade Estadual de Maringá é constituído de solo argiloso tropical típico, possuindo, em locais de alta e média vertente, uma camada superficial de solo evoluído, sendo esse do tipo latossolo vermelho distroférrico, proveniente da alteração do basalto. Os valores de resistência à penetração N do SPT são relativamente baixos na parte superior da camada, comumente nos primeiros 4 ou 5 metros de profundidade, possuindo valores inferiores a 3, chegando em até 1. Já na parte inferior da camada os valores de N do SPT são em torno de 7, chegando até 10, em muitos casos (Belincanta et al., 2000). A resistência das sondagens SPT realizadas no campo experimental da UEM até a profundidade de 17 metros é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Índices N_{SPT} do campo experimental da UEM.

Prof. (m)	N_{spt}				
	SP1	SP3	SP4	SP5	Média
1	2	2	2	2	2,0
2	2	2	2	2	2,0
3	3	2	3	3	2,8
4	4	4	3	3	3,5
5	3	5	4	4	4,0
6	4	5	5	5	4,8
7	5	4	6	5	5,0
8	5	6	6	8	6,3
9	6	7	6	8	6,8

Prof. (m)	N_{spt}				
	SP1	SP3	SP4	SP5	Média
10	11	12	6	7	9,0
11	11	10	8	13	10,5
12	10	11	11	12	11,0
13	12	13	14	15	13,5
14	16	13	12	14	13,8
15	23	9	11	9	13,0
16	19	18	21	-	19,3
17	39	36	31	-	35,3

Fonte: Almada et al. (2019).

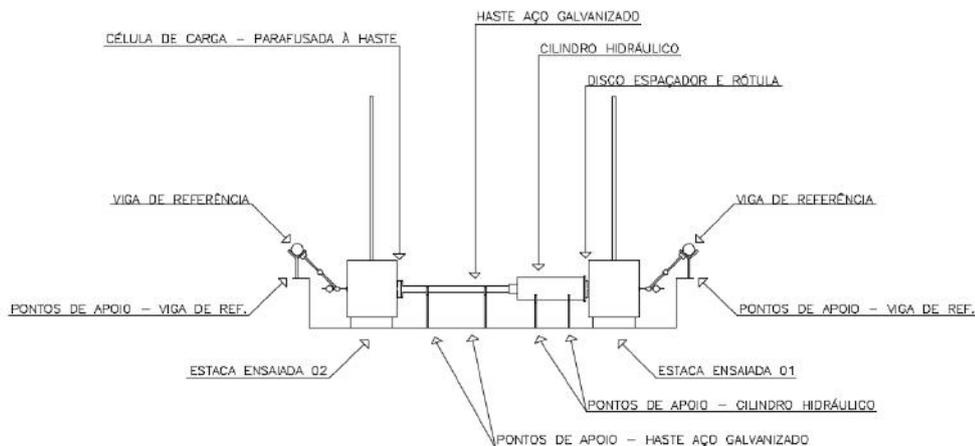
2.8 Características das estacas

As estruturas existentes ensaiadas em campo por Martinez (2018) são duas estacas escavadas por trado mecânico, com 25 cm de diâmetro, 8 metros de comprimento (7.55 metros embutido no solo e 0.45 metro acima do nível do solo), em concreto armado e $f_{ck,28}$ igual a 30 Mpa. Cada estaca com 8 barras longitudinais ϕ 12,5 mm, de aço CA50B, cobrimento de 2,5 cm e módulo de elasticidade ensaiado do concreto E de 31.163 Mpa. Para a aplicação da carga e aferição dos deslocamentos, nos últimos 35 centímetros do topo da estaca fora concretado um bloco de seção quadrada de 30 centímetros de lado, possuindo as mesmas características do concreto da seção circular. Devido ao propósito pelo qual os blocos foram concretados e suas dimensões, as estacas continuam sendo consideradas como de topo livre, pois existe um movimento independente dos blocos (Martinez, 2018).

Em uma das estacas fora executado um reforço para a estaca em solo-cimento na superfície do solo, com dois diâmetros (0,50 m) de altura e quatro diâmetros (1,00 m) nas outras dimensões. Devido à presença do solo-cimento como reforço em uma das estacas, a sua resistência a deflexão quando carregada horizontalmente é maior que a estrutura sem reforço, devido as características do solo melhorado.

As estacas foram ensaiadas, com um macaco hidráulico horizontalmente apoiado no topo de ambas estacas simultaneamente, aplicando assim o mesmo carregamento nas duas estruturas, como demonstrado na Figura 3. O deslocamento na cabeça da estaca fora aferido com a variação de carga com intervalos de 2 kN até a carga final de 24 kN.

Figura 3. Esquema de aplicação de carga horizontal e aferição de deslocamentos.



Fonte: Martinez (2018).

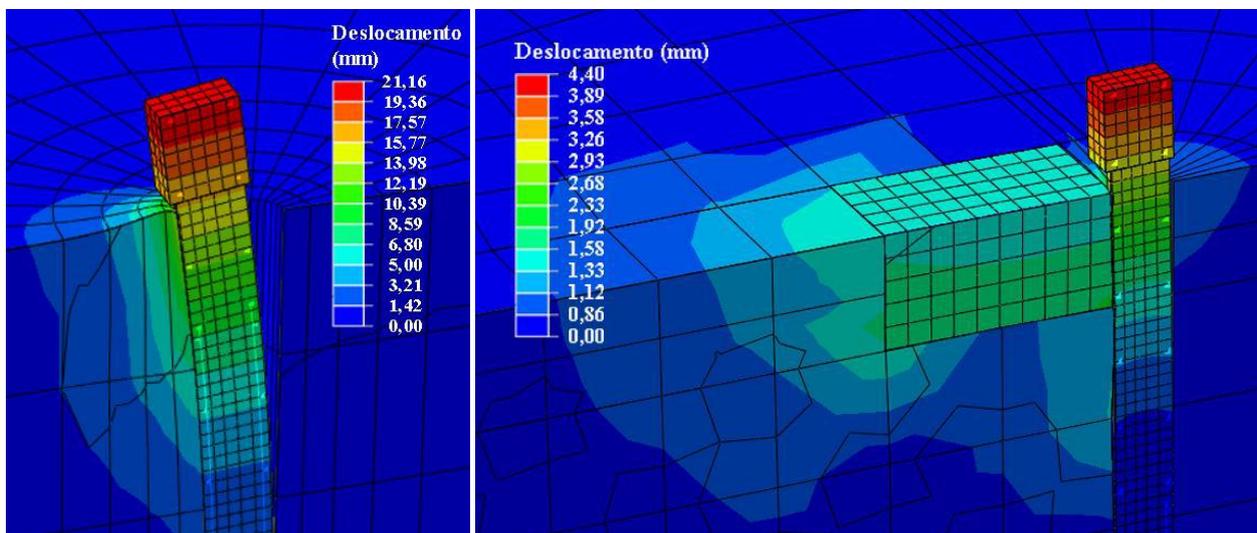
Os resultados do ensaio foram utilizados neste estudo para validar as análises de simulação numérica pelo software Simulia™ Abaqus®, de modo a criar um modelo de comportamento elástico linear pelo método de elementos finitos 3D, possibilitando criar modelos com variação nas dimensões do reforço em solo-cimento.

3. Resultados e Discussão

3.1 Validação do modelo

A validação do modelo foi feita primeiramente para determinação dos parâmetros do modelo CDP para o concreto constituinte da estaca. A Figura 4 demonstra os deslocamentos obtidos na simulação com carregamento de 30 kN aplicado no centro do bloco para o modelo de estaca sem reforço e com o uso de reforço em solo-cimento, onde é possível observar a distribuição de deslocamentos no solo.

Figura 4. Simulação do modelo sem a utilização (esquerda) e com a utilização (direita) de reforço em solo-cimento, escala de deformação em 10 vezes e coloração por deslocamento no eixo da carga aplicada.

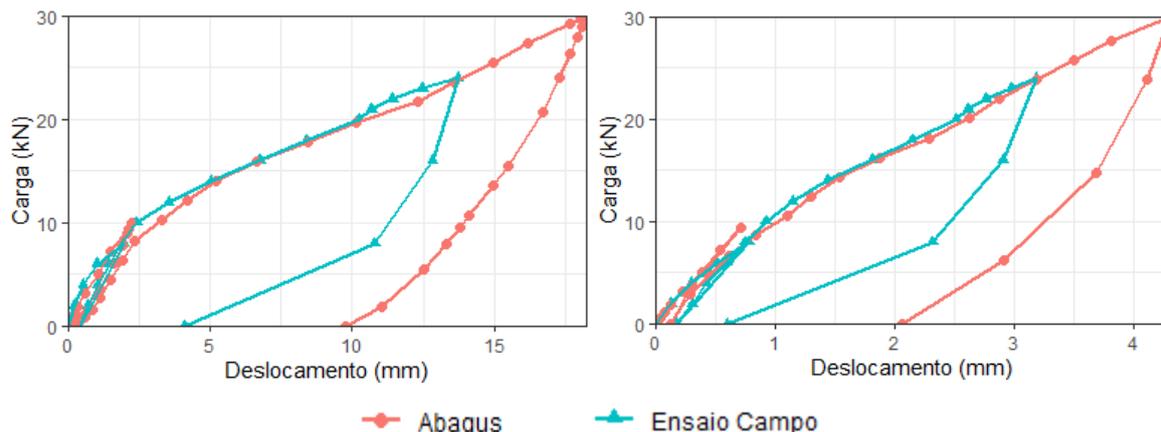


Fonte: Autores.

A estaca com reforço em solo cimento apresentou uma redução no deslocamento máximo de 21,16 mm para 4,40 mm no topo da estaca, uma redução de 79,2 %.

As tensões e deslocamentos puderam ser comparadas com os valores do ensaio em campo, como apresentado na Figura 5.

Figura 5. Comparação da curva carga-recalque de estaca, sem reforço (esquerda) e com reforço (direita) de solo-cimento.



Fonte: Autores.

Observa-se boa representatividade até a carga máxima ensaiada em campo. A carga aplicada de 30 kN foi a máxima resultante em uma simulação completa sem erros, de modo a obter valores de momentos fletores e esforços cortantes em todo o comprimento da estrutura.

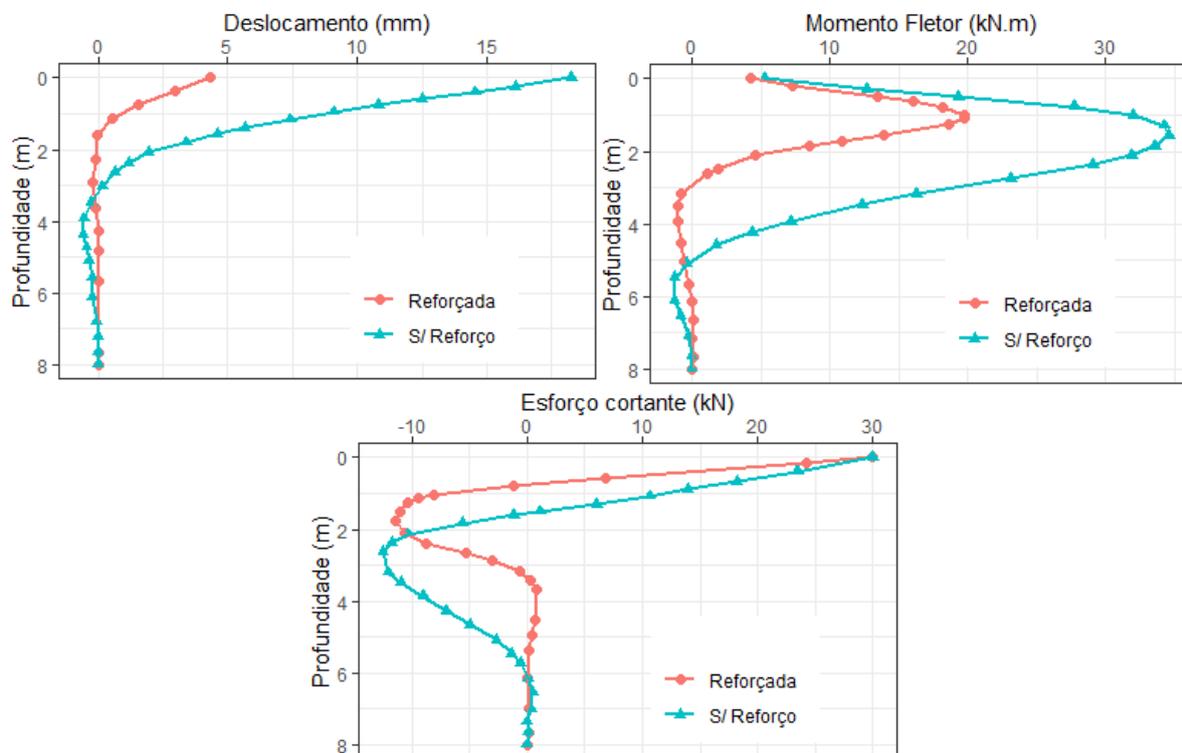
3.2 Análise paramétrica

Com os dois modelos iniciais validados foi possível extrair informações da simulação para análise. Os dados das pressões que a estaca exerce no solo de acordo com o aumento da aplicação de carga na cabeça da estaca foram obtidos.

O solo-cimento resistiu a boa parte do carregamento aplicado e apresentou uma pressão superior em comparação ao solo sem reforço. O solo reforçado também apresentou pressões de grande intensidade para pequenas profundidades somente, tendo para profundidades maiores que 2,20 m pressões na face oposta da estrutura com menor intensidade.

Então fez-se a comparação da estaca em solo reforçado com o solo não reforçado, comparando em todo o seu comprimento o deslocamento máximo no eixo de aplicação de carga, os momentos fletores e esforços cortantes, como retratado na Figura 6.

Figura 6. Comparação de deslocamento no eixo de aplicação da carga e esforços internos de ambas estacas validadas em todo seu comprimento.

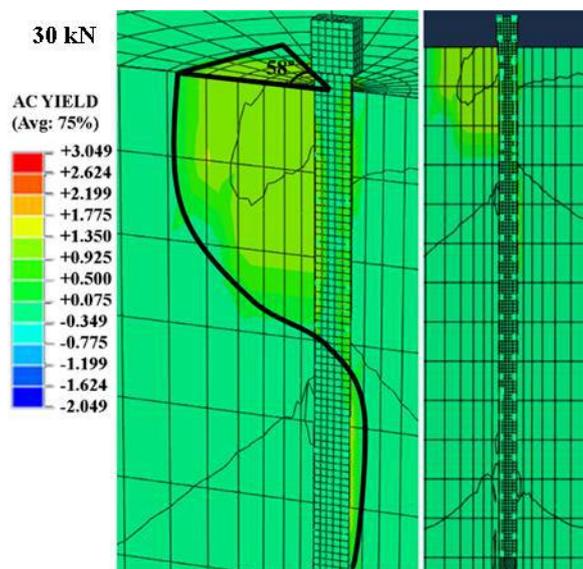


Fonte: Autores.

O deslocamento máximo de 18,26 mm foi reduzido para 4,31 mm, representando uma redução de 76,4 %, reduzindo também deslocamentos na direção oposta para maiores profundidades. O momento fletor máximo observado foi reduzido de 34,57 kN.m para 19,75 kN.m, representando uma redução de 42,9 %. Os esforços cortantes apesar de não sofrerem redução do valor máximo em porcentagens nas proporções observadas no deslocamento e momento fletor, sofrendo redução de apenas 8,8% de -12,5 kN para -11,4 kN, a profundidade em que o pico do esforço cortante faz efeito foi reduzida, de 2,62 m para 1,76 m.

Os campos de escoamento do solo também foram identificados para ambos modelos validados, evidenciado na Figura 7. Para o modelo sem reforço em solo-cimento foi identificado uma cunha de tensão com a maior área solicitada observada até 4 diâmetros de profundidade, para profundidade de 6 diâmetros é observado a transição de escoamento do solo para a face oposta de estrutura e para profundidade de 8 a 10 diâmetros com solicitação em pequena área na face oposta da estaca quando comparado ao solo próximo a superfície. Para o modelo com reforço em solo-cimento não se obteve contorno de escoamento definido para a carga de até 30 kN, devido ao baixo valor de carga para a estrutura.

Figura 7. Contornos de escoamento no solo, deformação plástica, de estaca sem reforços em solo-cimento carregada horizontalmente.

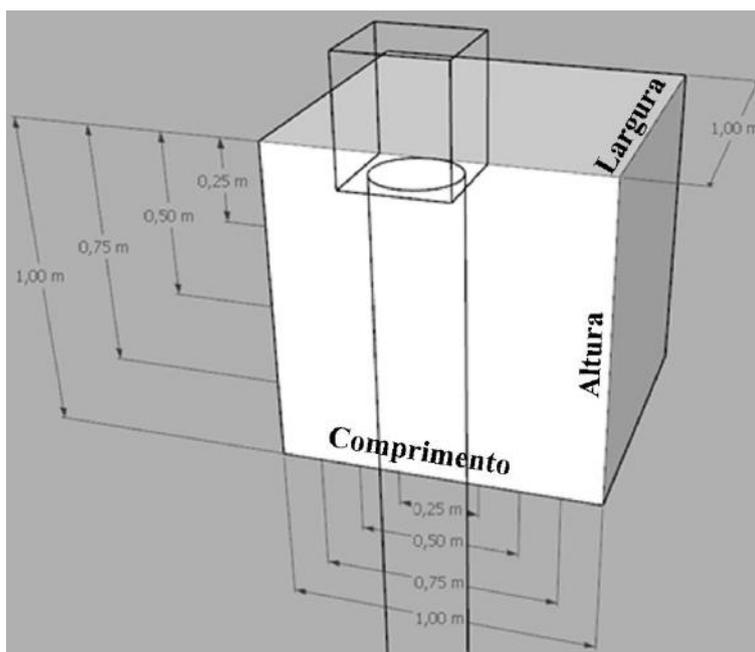


Fonte: Autores.

3.3 Modelos com variação de dimensões de reforço em solo-cimento

Com a validação e resultados dos dois modelos que haviam dados prévios do ensaio em campo pode-se então fazer modelos com diferentes dimensões do reforço em solo-cimento. As dimensões analisadas foram variadas em múltiplos do diâmetro da estaca, variando de 1 a 4 diâmetros na altura (h) e comprimento (b) da face em contato com a estaca (Figura 8), a largura permaneceu fixa em 4 diâmetros.

Figura 8. Dimensões que foram variadas para diferentes análises de reforço em solo-cimento.

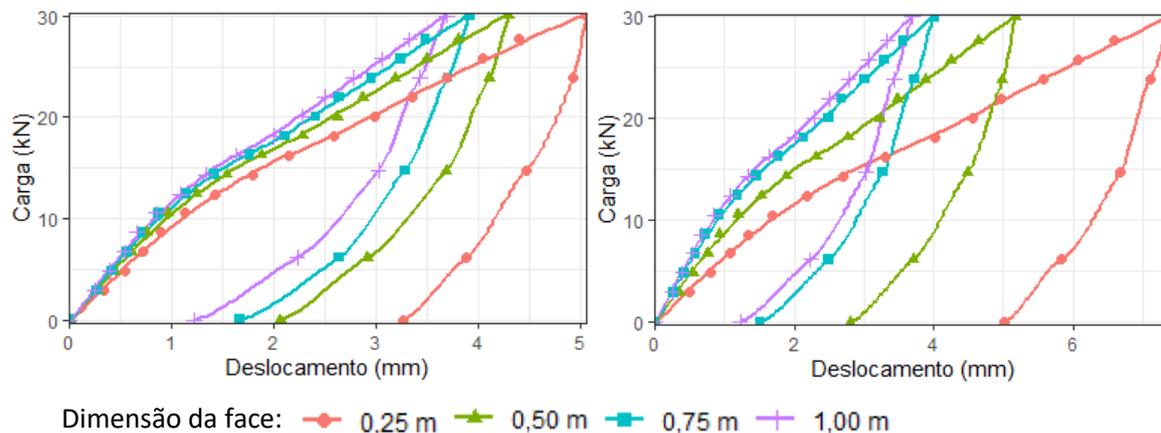


Fonte: Autores.

Como retratado na Figura 9, a variação na altura, h , do reforço em solo-cimento não apresentou grande variação nos

deslocamentos máximos para dimensões maiores que 2 diâmetros. Para o comprimento, b , do reforço, os deslocamentos máximos começam apresentar pequenas variações acima de 3 diâmetros.

Figura 9. Deslocamentos máximos observados com variações de dimensões do reforço em solo-cimento na altura h (esquerda) e no comprimento b (direita) em múltiplos do diâmetro da estaca (0,25 m).



Fonte: Autores.

Quando comparado os deslocamentos, ao reduzir a dimensão h do reforço de 4 diâmetros para 1 diâmetro da estaca houve um aumento de 37,2 % no deslocamento máximo, já quando analisado a redução de 4 diâmetros para somente 1 na dimensão b o aumento de deslocamento máximo foi de 101,3 %, demonstrando uma melhor eficiência no aumento no comprimento b do reforço quando comparado a altura h .

4. Conclusão

A melhoria do terreno natural com a utilização de solo-cimento como reforço resultou em uma redução dos deslocamentos horizontais de até 79,8 %, sendo o comprimento da face de contato solo-estaca a dimensão de maior impacto no desempenho nos deslocamentos quando alterado, dentre as dimensões analisadas neste estudo.

O uso de reforço aprimorou as distribuições de tensões na estaca e no solo e gerou a diminuição da profundidade de solo solicitado e da intensidade de pressões no solo natural.

O deslocamento máximo de 18,26 mm foi reduzido para 4,31 mm nos modelos simulados, representando uma redução de 76,4 %, reduzindo também deslocamentos na direção oposta para maiores profundidades. Para o modelo com 4 diâmetros em todas dimensões do reforço em solo cimento o deslocamento máximo foi de 3,69 mm, uma redução de 79,8 % em comparação ao solo sem reforço.

O maior momento fletor obtido foi reduzido de 34,57 kN.m para 19,75 kN.m, uma redução de 42,9 %.

Os esforços cortantes apesar de não sofrerem redução do valor máximo em porcentagens nas proporções observadas do deslocamento e momento fletor, sendo reduzido de apenas 8,8% de -12,5 kN para -11,4 kN, a profundidade em que o esforço cortante tem efeito máximo foi reduzida em 32,8 %.

A variação na altura, h , do reforço em solo-cimento não apresenta grande variação nos deslocamentos máximos para dimensões maiores que 2 diâmetros. Para o comprimento, b , do reforço, os deslocamentos máximos começam apresentar variações pouco significativas acima de 3 diâmetros.

Quando comparado os deslocamentos, ao reduzir a dimensão h do reforço de 4 diâmetros para 1 diâmetro da estaca houve um aumento de 37,2 % no deslocamento máximo, já quando analisado a redução de 4 diâmetros para somente 1 na

dimensão b o aumento de deslocamento máximo foi de 101,3 %, demonstrando uma melhor eficiência no aumento do comprimento b do reforço quando comparado a altura h .

A simulação computacional pelo método de elementos finitos 3D demonstrou uma solução viável de análise estrutural de modo a facilitar a modelagem de geometrias complexas em formas irregulares, sendo adaptável para atender especificações de precisão, a fim de otimizar dimensionamentos e ter maior liberdade em definição de condições de contorno quando comparado a métodos analíticos.

O uso de reforço demonstrou um aprimoramento nas distribuições de esforços na estaca e no solo, diminuindo os deslocamentos da estrutura.

A melhoria do terreno natural com a utilização de solo-cimento como reforço demonstrou melhor performance geral da estrutura, se demonstrando uma solução que pode ser empregada em estruturas prévias ou futuras como contribuição no desempenho resistente a esforços horizontais.

O presente trabalho comparou o comportamento e eficiência de diferentes reforços de solo-cimento com formatos paralelepípedos posicionados no topo da estaca, o que pode ser ampliado futuramente com o uso de diferentes geometrias do reforço, ampliando e aperfeiçoando ainda mais o estudo de reforço para deslocamentos horizontais.

Referências

- Almada, J. L. A., Marques, V. R., Teixeira, R. S., Reis, J. H. C., Lukiantchuki, J. A., & Belincanta, A. (2019). Avaliação de métodos de uso corrente para estimativa da capacidade de carga de estacas escavadas na cidade de Maringá. *Geotecnica*, 147, 103–116. <https://doi.org/10.24849/j.geot.2019.147.07>
- Alonso, U. R. (2003). *Dimensionamento de Fundações Profundas* (3° reimpre). Blucher.
- Belincanta, A., Ferras, R. L., & Gutierrez, N. H. M. (2000). Uma abordagem geral sobre fundações profundas de uso corrente na região de Maringá. In: *Encontro tecnológico da engenharia civil e arquitetura na Universidade Estadual de Maringá*
- Duarte, R. P. (2015). *Obtenção Simplificada De Curvas Tensão-Deformação Cíclicas A Partir De Ensaios Monótonos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Fluminense. 96p.
- Fan, J., Wang, D., & Qian, D. (2018). Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 791–797. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.004>
- Faro, V. P., Consoli, N. C., Schnaid, F., Thomé, A., & da Silva Lopes, L. (2015). Field Tests on Laterally Loaded Rigid Piles in Cement Treated Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(6), 06015003. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001296](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001296)
- Hai-tao, W., Jiayu, S., Feng, W., Zhiqiang, A., & Tianyun, L. (2019). Experimental study on elastic-plastic seismic response analysis of concrete gravity dam with strain rate effect. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 563–569. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.020>
- Heidari, M., Jahanandish, M., Naggar, H. El, & Ghahramani, A. (2014). Nonlinear cyclic behavior of laterally loaded pile in cohesive soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(2), 129–143. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0099>
- Jayasree, P. K., Arun, K. V., Oormila, R., & Sreelakshmi, H. (2018). Lateral Load Capacity of Piles: A Comparative Study Between Indian Standards and Theoretical Approach. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 99(3), 587–593. <https://doi.org/10.1007/s40030-018-0306-7>
- Jorna, M. M. (2018). *Pile tip deformation caused by obstacles*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Offshore) - Delft University of Technology. 115p.
- Lu, J.-F., Zhang, X., Wan, J.-W., & Cang, N.-R. (2012). The influence of a fixed axial top load on the dynamic response of a single pile. *Computers and Geotechnics*, 39, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.08.010>
- Martinez, L. R. (2018). *Prova de carga transversal em estacas de pequeno diâmetro executadas em solo evoluído de basalto*. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Maringá. 93p.
- Murphy, G., Igoe, D., Doherty, P., & Gavin, K. (2018). 3D FEM approach for laterally loaded monopile design. *Computers and Geotechnics*, 100(April), 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.03.013>
- Nasr, A. M. A. (2014). Experimental and theoretical studies of laterally loaded finned piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(4), 381–393. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0012>
- Ong, Y. H. (2016). Back analysis of laterally loaded pile behavior using Midas/GTS to determine stiffness modulus of pile-soil interface. *15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, ARC 2015: New Innovations and Sustainability, 1279–1284. <https://doi.org/10.3208/jgssp.MYS-07>
- Sanomia, E. H. (2016). *Desenvolvimento de curvas p-y para argilas através do método dos elementos finitos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 139p.

Santos, J. A. (2008). *Fundações por Estacas Acções Horizontais Elementos Teóricos Fundações por Estacas – Acções Horizontais*. Instituto Superior Técnico. <http://www.civil.ist.utl.pt/~jaime/EstacasH.pdf>

Velloso, D. A., & Lopes, F. R. (2012). *Fundações: Critérios de Projeto, Investigação do Subsolo, Fundações Superficiais, Fundações Profundas* (2nd ed.). Oficina de Textos.

Yu, G., Gong, W., Chen, M., Dai, G., & Liu, Y. (2019). Prediction and Analysis of Behaviour of Laterally Loaded Single Piles in Improved Gravel Soil. *International Journal of Civil Engineering*, 17(6), 809–822. <https://doi.org/10.1007/s40999-018-0372-2>

Yu, Y., Sun, H., & Juang, C. H. (2018). A new model for response of laterally loaded piles in soil-rock mixtures. *Computers and Geotechnics*, 104(September), 237–246. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.08.021>