

ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA ESTACA HELICOIDAL SOB CARREGAMENTOS CÍCLICOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO

Maria R. F. Brito¹, Yuri D. J. Costa², Pedro H. Silva³, Carina M. L. Costa⁴

^{1,2,4}Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil
(yuri.costa@ufrn.br)

³Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Canada

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise da resposta de uma estaca helicoidal instalada em areia, sujeita a ciclos de cargas verticais. Um modelo numérico em elementos finitos foi desenvolvido para avaliar o efeito da amplitude e da sequência de carregamento nos deslocamentos verticais permanentes da estaca. Foram realizadas simulações com ciclos unidirecionais de tração e ciclos bidirecionais de tração/compressão ou compressão/tração. Observou-se que amplitudes mais elevadas e carregamentos iniciando em compressão levam o sistema a maiores deslocamentos permanentes.

Palavras-chave: fundação; estaca helicoidal; modelagem numérica; carregamento cíclico

INTRODUÇÃO

As estacas helicoidais constituem elementos estruturais de sistemas de fundação formados por uma haste metálica central equipada com hélices rigidamente fixadas ao longo de seu comprimento. Elas se destacam frente a outros tipos de estacas devido à possibilidade de remoção e reutilização em obras temporárias, à facilidade de transporte para locais de difícil acesso e ao baixo impacto ambiental durante a instalação (Perko, 2009). O avanço da hélice principal na ponta do elemento permite a penetração do solo, enquanto as hélices subsequentes seguem o mesmo percurso, minimizando a perturbação do terreno ao redor (Kulhawy, 1985). Inicialmente empregadas principalmente para resistir a esforços de tração em torres de transmissão e estruturas de telecomunicações, as estacas helicoidais vêm ampliando suas aplicações e, no Brasil, seu uso tornou-se mais frequente a partir dos anos 2000 (Tsuha, 2007).

Dependendo do tipo de estrutura, sistemas de fundação compostos por estacas helicoidais podem ser submetidos a ciclos de carregamento e descarregamento devido a ações de ventos, ondas e tráfego. Dentre os diversos fatores que influenciam a resposta cíclica de sistemas de fundação por estacas, a magnitude da amplitude de carregamento tem se destacado como um parâmetro determinante na transição entre os regimes de deslocamentos permanentes estáveis, metaestáveis e instáveis (Jardine e Standing, 2012; Rimoy et al., 2013; Tsuha et al., 2012). Costa e Costa (2019), por exemplo, conduziram ensaios com estacas helicoidais em areia submetidas a carregamentos cíclicos e observaram que

a resistência da estaca se manteve estável, apesar de uma degradação inicial, mesmo após muitos ciclos de baixa amplitude. Por outro lado, amplitudes elevadas provocaram degradação significativa da resistência devido ao acúmulo progressivo de deformações plásticas. No entanto, a maioria dos estudos envolvendo a resposta cíclica de sistemas de fundação por estacas não considera o efeito da sequência inicial de carregamento (p. ex., compressão-tração ou tração-compressão), a qual pode exercer influência significativa sobre os deslocamentos observados (Galvis-Castro et al., 2019).

Apesar dos avanços recentes na literatura envolvendo sistemas de fundação por estacas submetidos a carregamentos cíclicos, a previsão do comportamento cíclico de estacas helicoidais ainda é complexa, podendo comprometer a integridade e a segurança do sistema de fundação. Dessa forma, este artigo apresenta uma análise numérica da resposta cíclica de uma estaca helicoidal submetida à ciclagem alternada de carregamentos de tração e compressão, em diferentes níveis de intensidade, com ênfase no papel da ordem de aplicação dos carregamentos.

MATERIAL E MÉTODOS

Um modelo numérico tridimensional em elementos finitos de uma estaca helicoidal metálica em areia foi desenvolvido utilizando o software *PLAXIS 3D Foundation* (PLAXIS BV, 2016), o qual emprega o método dos elementos finitos (MEF) na análise de problemas de tensão-deformação em engenharia geotécnica (Brinkgreve e Swolfs, 2007). O modelo (Figura 1) foi idealizado com a estaca helicoidal inserida no centro de um prisma retangular de solo com dimensões de 6 m × 6 m × 8 m. Essas dimensões

foram definidas a partir de uma análise de sensibilidade e foram assumidas como suficientes para minimizar os efeitos de borda, com base em estudos reportados na literatura (Knappett et al., 2016; Rawat e Gupta, 2017). As condições de contorno nas laterais do modelo foram configuradas para permitir deslocamentos verticais e restringir deslocamentos horizontais. Por outro lado, as condições de contorno na base do modelo foram configuradas para restringir os deslocamentos em ambas as direções.

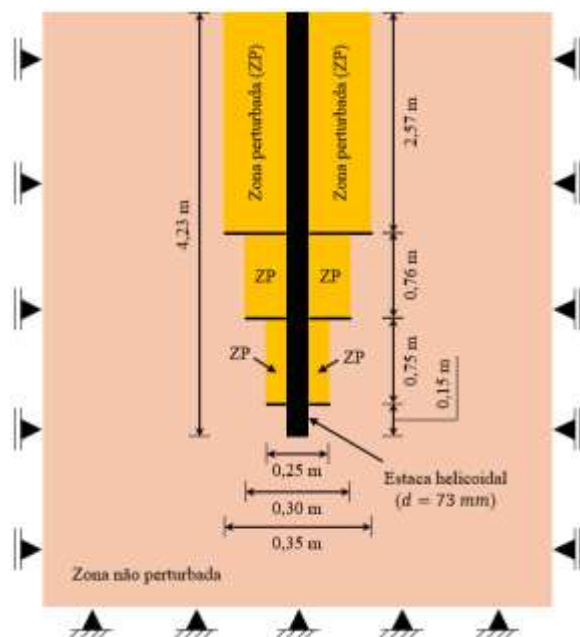


Figura 1. Conceitualização do modelo numérico.

O prisma de solo foi modelado usando elementos sólidos triangulares com 6 nós cada, a partir dos quais foram gerados elementos sólidos tridimensionais prismáticos com 15 nós cada. Zonas de solo perturbado ao redor da estaca foram definidas de modo a considerar a perturbação causada pela instalação da estaca, conforme observado por Costa (2017). Essas zonas são delimitadas pelo diâmetro das hélices que efetivamente cisalham o solo durante a instalação da estaca.

A estaca helicoidal foi modelada usando elementos de casca, com espessura de 12,5 mm, para representar o seu eixo tubular, com diâmetro de 73 mm e comprimento de 4,23 m, enquanto suas três hélices, com diâmetros de 250, 300 e 350 mm, foram modeladas usando elementos de placa com espessura de 12,5 mm. Um elemento de placa adicional, também com espessura de 12,5 mm e diâmetro de 73 mm, foi utilizado no topo da estaca para prevenir o puncionamento do carregamento pontual aplicado.

A interação solo-estrutura foi modelada usando elementos de interface, os quais são elementos criados ao lado de elementos estruturais para simular uma zona fina de material de cisalhamento intenso no

contato entre uma estrutura e o solo circundante (Brinkgreve e Swolfs, 2007). Nessa zona, os parâmetros de resistência do solo são reduzidos por meio de um fator de redução de resistência (R_{inter}), o qual pode variar de 0 a 1, dependendo do tipo de solo e do material do elemento estrutural. Um fator $R_{inter} = 0,54$ foi adotado para os elementos de interface.

O comportamento tensão-deformação da estaca foi representado por uma relação linear-elástica isotrópica. Uma vez que o material da estaca estudada é aço, os parâmetros adotados no modelo foram: peso específico (γ) de 78 kN/m³, módulo de elasticidade (E) de 210 GPa e coeficiente de Poisson (ν) de 0,3, os quais foram definidos de acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2024). O comportamento tensão-deformação do solo foi representado pelo modelo constitutivo *Hardening Soil* (Schanz et al., 1999). As análises foram conduzidas sob condições drenadas, uma vez que o solo estudado é uma areia. A Tabela 1 apresenta os parâmetros adotados no modelo numérico para o solo estudado. Os valores foram definidos com base nos trabalhos de Costa (2017), bem como em uma análise de sensibilidade conduzida durante a validação do modelo numérico, e estão associados a uma tensão confinante de referência (p^{ref}) de 100 kPa, a qual é definida como padrão no software (Brinkgreve e Swolfs, 2007). O coeficiente de potência para a dependência do nível de tensão da rigidez (m) foi adotado igual a 0,5, conforme sugerido por Duncan e Chang (1970), Janbu (1963), Lade e Nelson (1987), e Schanz e Vermeer (1998).

Um conjunto de 7 simulações numéricas foi proposto para avaliar os efeitos da amplitude de carregamento e da sequência de ciclagem na resposta cíclica de estacas helicoidais em areia. Três amplitudes de carregamento cíclico foram selecionadas: 50, 100 e 200 kN, as quais foram cicladas conforme descrito na Tabela 2. As simulações numéricas foram conduzidas considerando um total de 20 ciclos de carregamento, os quais foram aplicados após as seguintes fases de modelagem: (1) cálculo das tensões geostáticas iniciais (solo não perturbado) e (2) ativação da estaca e das zonas perturbadas.

O modelo numérico foi validado comparando-se os resultados previstos de uma simulação uma estaca sujeita a carregamentos de tração com o resultado de uma prova de carga estática (PCE) à tração em campo (Costa, 2017), sob as mesmas condições. A Figura 2 apresenta as curvas carga-deslocamento do modelo numérico e do ensaio de PCE. As curvas mostram que os deslocamentos previstos pelo modelo numérico foram muito próximos daqueles medidos na PCE, o que foi confirmado por meio de um gráfico de dispersão 1:1 (Figura 3). A relação entre os deslocamentos previstos e medidos resultou em um coeficiente de correlação linear de Pearson (r) de

0,9988, o que representa um coeficiente de determinação (r^2) de 0,9975.

Tabela 1. Parâmetros do solo.

Parâmetro	ZNP	ZP
γ (kN/m ³)	16	15
E_{50}^{ref} (MPa)	45	18
E_{oed}^{ref} (MPa)	45	18
E_{ur}^{ref} (MPa)	152	56
ν_{ur} (-)	0,35	0,25
c' (kPa)	5	3
ϕ'_p (°)	35	32
ψ (°)	5	0
K_o (-)	0,43	0,47
R_f (-)	0,9	0,8
R_{inter} (-)	0,54	0,54

Nota: ZNP = zona não perturbada; ZP = zona perturbada; γ = peso específico aparente do solo; E_{50}^{ref} = módulo de Young drenado a 50% da resistência máxima; E_{oed}^{ref} = rigidez tangente para carregamento edométrico primário; E_{ur}^{ref} = módulo de Young para descarregamento/recarregamento; ν_{ur} = coeficiente de Poisson para descarregamento/recarregamento; c' = coesão efetiva; ϕ'_p = ângulo de atrito efetivo de pico; ψ = ângulo de dilatação; K_o = coeficiente de empuxo em repouso; R_f = razão de ruptura; R_{inter} = fator de redução de resistência.

Tabela 2. Características das simulações numéricas.

Simulação	Sequência de ciclagem
S1	0 → -50 kN → 0
S2	0 → -100 kN → 0
S3	0 → -200 kN → 0
S4	0 → -150 kN → 0 → +50 kN → 0
S5	0 → +150 kN → 0 → -50 kN → 0
S6	0 → -50 kN → 0 → +150 kN → 0
S7	0 → +50 kN → 0 → -150 kN → 0

Nota: sinal positivo para compressão e negativo para tração.

De acordo com Salkind (2017), o valor de r avalia a relação entre duas variáveis contínuas, enquanto o valor de r^2 representa a variância em uma variável que pode ser explicada pela variância em outra variável. Nesse caso, o valor de $r = 0,9988$ corresponde a uma relação muito forte (Salkind, 2017) entre as previsões numéricas e as medições de campo. Além disso, o

valor de $r^2 = 0,9975$ significa que 99,75% da variância nas previsões numéricas está associada à variância nas medições de campo. Dessa forma, o modelo proposto e os procedimentos adotados foram considerados apropriados para conduzir as análises subsequentes, dadas as muitas variáveis e a imprecisão envolvidas em todo o processo de modelagem numérica.

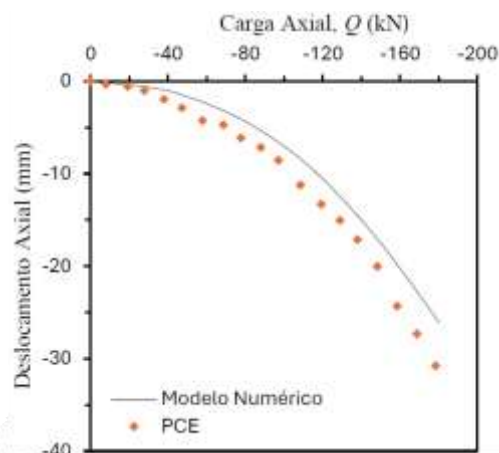


Figura 2. Curvas carga-deslocamento.

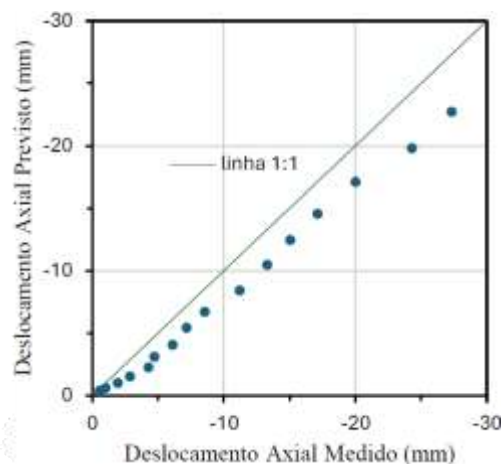


Figura 3. Gráfico de dispersão 1:1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta as curvas carga-deslocamento provenientes das simulações S1 a S3. As curvas mostram que a estaca acumulou deslocamento vertical ao longo dos ciclos de carregamento para todas as amplitudes analisadas. Além disso, os resultados mostram laços de histerese característicos que tendem a se fechar progressivamente com os ciclos, o que implica uma redução no deslocamento incremental. Esse comportamento é consistente com uma degradação inicial da rigidez do solo nas redondezas da estaca, seguida por um rearranjo das partículas nesse mesmo entorno (Costa, 2017; Rimoy et al., 2013), o qual resulta em um acúmulo de deslocamento permanente a uma taxa decrescente nos primeiros

ciclos, seguido por uma tendência de estabilização no deslocamento incremental com os ciclos.

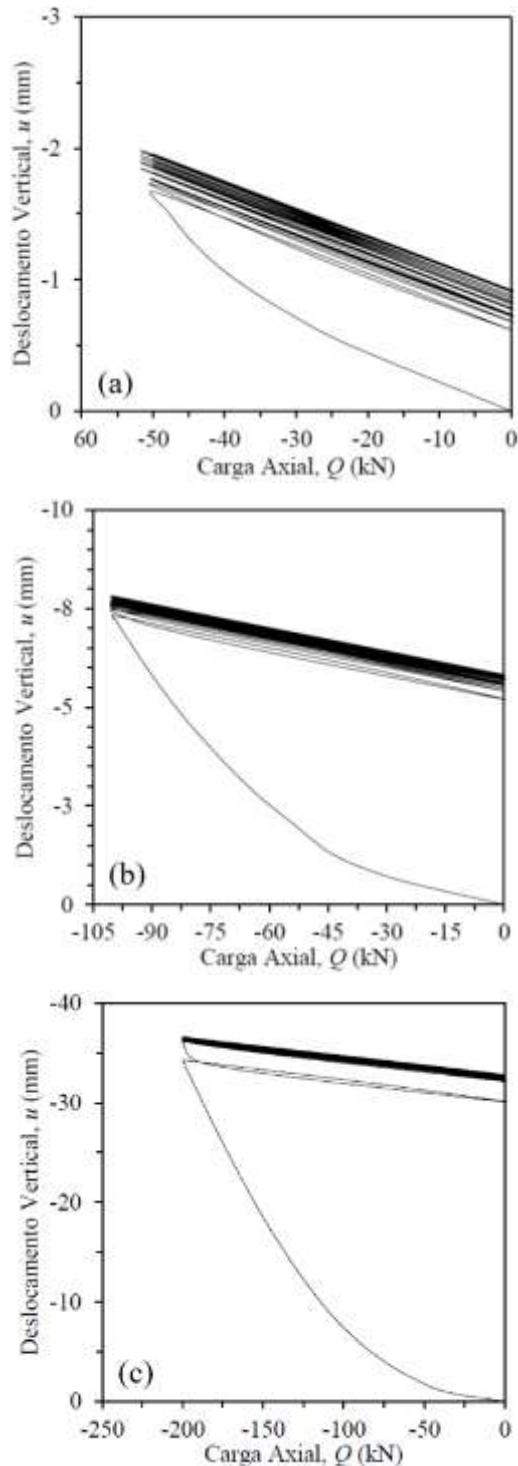


Figura 4. Curvas carga-deslocamento das simulações: (a) S1; (b) S2; (c) S3.

Os resultados também mostram que o deslocamento permanente (up) ao final dos ciclos aumenta com a amplitude, o que indica uma dependência da resposta cíclica da estaca em relação à magnitude do carregamento aplicado. Os valores de up ao final dos

20 ciclos para as amplitudes de 50, 100 e 200 kN foram iguais a 0,92, 5,84 e 32,75 mm, respectivamente, o que indica uma tendência de crescimento não linear de up da estaca ao final dos ciclos com a magnitude do carregamento cíclico aplicado (Figura 5). No entanto, apesar de o deslocamento permanente da estaca ao final dos ciclos aumentar com a magnitude do carregamento cíclico aplicado, o acúmulo total relativo ($\Delta up/up_1$), em que Δup é a diferença entre up do vigésimo ciclos (up_{20}) e up do primeiro ciclo (up_1), foi significativamente maior (48,39%) para a amplitude de 50 kN em comparação com as amplitudes de 100 e 200 kN (12,09% e 8,73%, respectivamente), indicando uma forte redução da razão $\Delta up/up_1$ ao final dos ciclos com a magnitude do carregamento cíclico aplicado (Figura 6).

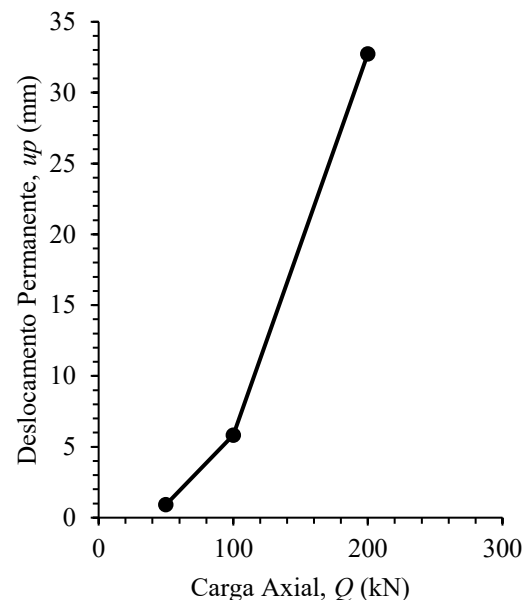


Figura 5. Deslocamento permanente vs carga axial ao final de 20 ciclos.

O comportamento observado de $\Delta up/up_1$ sugere que o efeito da ciclagem em estacas helicoidais sob tração em areias tende a ser maior com cargas axiais de baixa intensidade. Em cargas altas, grande parte da deformação irreversível ocorre logo no primeiro ciclo e depois disso, os ciclos seguintes ainda acrescentam deslocamento, mas proporcionalmente menor. O acréscimo posterior, embora exista e leve a deslocamentos absolutos muito maiores, representa uma fração menor do que já havia ocorrido no início. Já em cargas baixas, o primeiro ciclo produz pouco deslocamento permanente, mas os ciclos seguintes ainda promovem rearranjo progressivo do solo e acomodação da interface, fazendo o crescimento percentual ao longo dos ciclos ser grande.

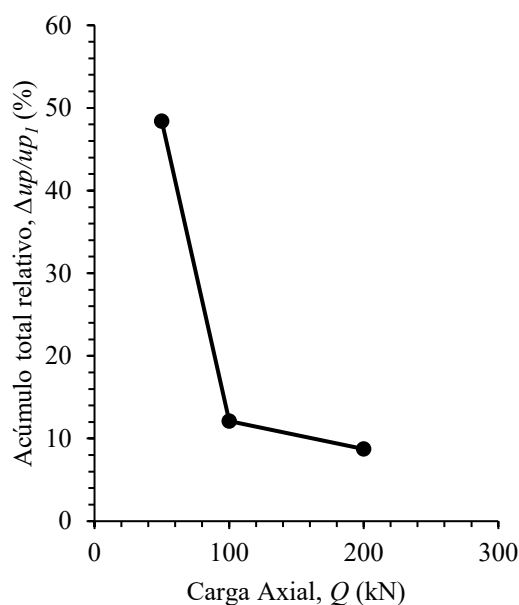


Figura 6. Acúmulo total relativo vs carga axial ao final de 20 ciclos.

A análise e discussão das simulações com carregamento cíclico bidirecional é feita a seguir (simulações S4 a S7). Essa etapa busca avaliar como diferentes sequências de ciclagem influenciam a resposta cíclica de estacas helicoidais. As Figuras 7 e 8 apresentam as curvas carga-deslocamento provenientes das simulações S4 a S7. Os deslocamentos verticais ao longo dos ciclos foram maiores quando se começa com carregamento de compressão (simulações S5 e S7), em comparação com as simulações que começaram com carregamento de tração (simulações S4 e S6), independentemente da magnitude da carga inicial aplicada. Esse comportamento evidencia a importância da sequência inicial de carregamento (compressão-tração ou tração-compressão) na resposta cíclica de sistemas de fundação por estacas, como destacado por (Galvis-Castro et al., 2019).

Quando o ciclo se inicia em compressão e depois se inverte para tração, a estaca mobiliza imediatamente a resistência do material situado abaixo das hélices. A hélice mais profunda se beneficia da resistência do solo natural (menos perturbado), maior do que a do material perturbado entre as hélices e acima delas. A compactação que ocorre no primeiro ciclo ajuda a reduzir os deslocamentos nos ciclos subsequentes. Entretanto, a compressão inicial da estaca alivia o contato acima das hélices, reduzindo a rigidez efetiva dessa região e aumentando o deslocamento necessário para atingir a carga máxima de tração. Assim, deslocamentos adicionais nos ciclos subsequentes ocorrerão a partir de um nível inicial mais elevado.

Por outro lado, iniciar em tração e depois inverter para compressão, mobiliza a resistência do solo acima das hélices. O movimento ascendente da estaca reduz a rigidez do material abaixo das placas. Na fase subsequente, de compressão, há tendência à reversão de parte do deslocamento acumulado durante a etapa de tração, trazendo os deslocamentos nos ciclos seguintes para um nível absoluto mais baixo do que no caso de compressão seguida de tração.

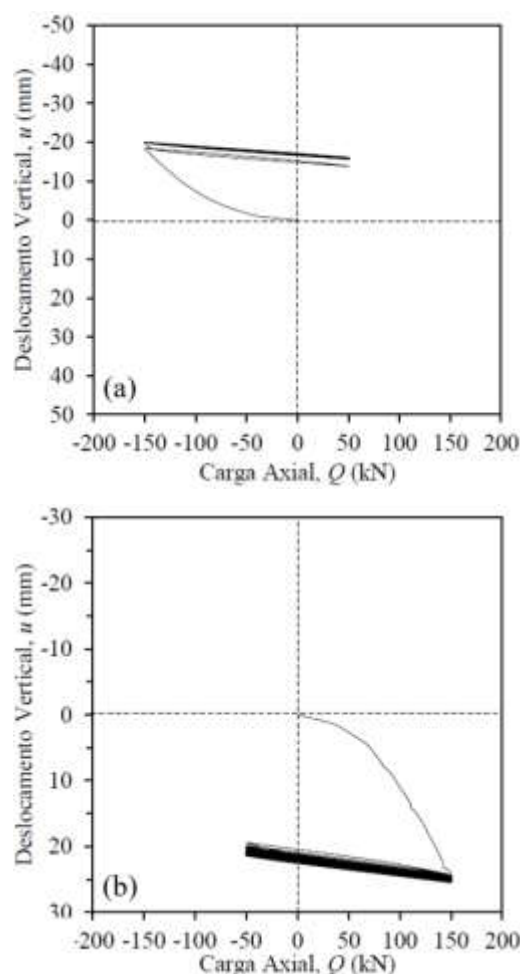


Figura 7. Curvas carga-deslocamento das simulações: (a) S4; (b) S5.

CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar de que maneira a amplitude e a sequência de carregamento cíclico influenciam os deslocamentos verticais permanentes de uma estaca helicoidal instalada em areia. Para isso, foram conduzidas simulações numéricas em elementos finitos considerando diferentes níveis de amplitude e ordens distintas de aplicação dos ciclos, permitindo-se observar o deslocamento acumulado ao longo do carregamento.

Os resultados indicaram que a amplitude dos ciclos e a sequência de carregamentos exercem papel

importante na magnitude dos deslocamentos permanentes da estaca helicoidal. Amplitudes elevadas conduzem a deformações absolutas mais altas, porém com menor variação relativa entre ciclos, sugerindo uma estabilização progressiva decorrente da mobilização repetida da resistência do solo.

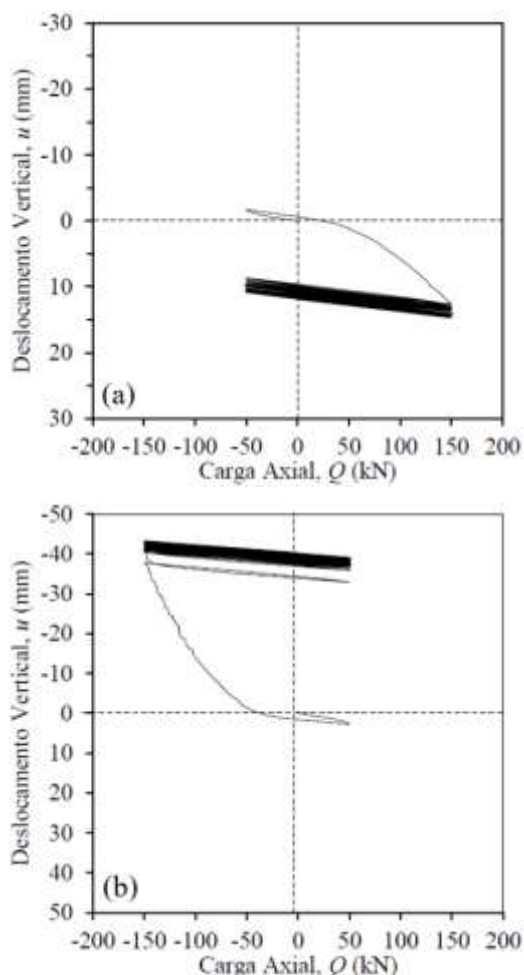


Figura 8. Curvas carga-deslocamento das simulações: (a) S6; (b) S7.

Observou-se também que iniciar a ciclagem por compressão tende a produzir deslocamentos mais pronunciados do que iniciar por tração, resultado atribuído à rigidez do solo acima e abaixo das hélices, em decorrência da instalação da estaca.

Esses achados, embora qualitativos, indicam que a consideração da ordem de carregamento e da intensidade das ações cíclicas pode contribuir para estimativas mais realistas de desempenho em aplicações como fundações de torres, estruturas submetidas a vento e sistemas offshore. No entanto, é importante destacar que, por se tratar de um estudo numérico baseado em um conjunto específico de parâmetros de solo, condições de contorno e geometria da estaca, os resultados aqui apresentados

não devem ser generalizados para todos os cenários de projeto. Assim, apesar de fornecerem tendências claras para o comportamento cíclico, as conclusões obtidas devem ser interpretadas à luz das limitações inerentes ao modelo adotado, indicando a necessidade de estudos experimentais adicionais e análises paramétricas mais amplas para ampliar a aplicabilidade prática dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 8800:2024 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. ABNT, Rio de Janeiro, 2024.
- Brinkgreve, R. B.; Swolfs, W. M. Plaxis 3D Foundation: Reference manual. PLAXIS BV, Delft, 2007.
- Costa, J. P. S. Comportamento à tração de estacas helicoidais em areia submetidas a carregamentos cíclicos estáticos e quase estáticos. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- Costa, J. P. S.; Costa, Y. D. J. Cyclic stability of helical anchors installed in a sedimentary sand deposit. In: Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 16., 2019, Cancún. Geotechnical Engineering in the XXI Century: lessons learned and future challenges. Amsterdam: IOS Press, 2019. p. 928-935.
- Duncan, J. M.; Chang, C. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 96, 1629-1653, 1970.
- Galvis-Castro, A. C.; Tovar-Valencia, R. D.; Salgado, R.; Prezzi, M. Effect of loading direction on the shaft resistance of jacked piles in dense sand. Géotechnique, 69, 16-28, 2019.
- Janbu, N. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. In: European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1963, Wiesbaden. Anais [...]. Wiesbaden: ISSMFE, 1963.
- Jardine, R. J.; Standing, J. R. Field axial cyclic loading experiments on piles driven in sand. Soils and Foundations, 52, 723-737, 2012.
- Knappett, J. A.; Caucis, K.; Brown, M. J.; Jeffrey, J. R.; Bali, J. D. CHD pile performance, part II: Numerical modelling. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 169, 436-454, 2016.
- Kulhawy, F. H. Uplift behavior of shallow soil anchors – An overview. In: Clemence, S. P. (ed.).



- Uplift behavior of anchor foundations in soil. ASCE, New York, 1985.
- Lade, P. V.; Nelson, R. B. Modelling the elastic behaviour of granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 11, 521-542, 1987.
- Perko, H. A. Helical piles: A practical guide to design and installation. John Wiley & Sons, Hoboken, 2009.
- PLAXIS BV. Plaxis 3D Foundation. PLAXIS BV, Delft, 2016.
- Rawat, S.; Gupta, A. S. Numerical modelling of pullout of helical soil nail. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9, 648-658, 2017.
- Rimoy, S. P.; Jardine, R. J.; Standing, J.R. Displacement response to axial cycling of piles driven in sand. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 166, 103-118, 2013.
- Salkind, N. J. Statistics for people who (think they) hate statistics. SAGE, Thousand Oaks, 2017.
- Schanz, T.; Vermeer, P. A. Special issue on pre-failure deformation behaviour of geomaterials. *Géotechnique*, 48, 383-387, 1998.
- Schanz, T.; Vermeer, P. A.; Bonnier, P. G. The hardening soil model: Formulation and verification. In: Brinkgreve, R. B. J. (ed.). *Beyond 2000 in computational geotechnics: Ten years of Plaxis international*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1999.
- Tsuha, C. H. C. Modelo teórico para controle da capacidade de carga à tração de estacas metálicas helicoidais em solo arenoso. 2007. 245 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- Tsuha, C. H. C.; Foray, P. Y.; Jardine, R. J.; Yang, Z. X.; Silva, M.; Rimoy, S. Behaviour of displacement piles in sand under cyclic axial loading. *Soils and Foundations*, 52, 511-522, 2012.