XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/19

Análise Experimental e Numérica de Estacas Submetidas a Carregamentos Cíclicos em Solo Tropical

Yago Machado Pereira de Matos
Pesquisador de Pós-Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, yagompm@gmail.com

Márcio Muniz de Farias
Professor Titular, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, muniz@unb.br

Renato Pinto da Cunha
Professor Titular, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, rpcunha@unb.br

Maurício Martines Sales
Professor Titular, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, sales.mauricio@gmail.com

Renato Resende Angelim
Professor Associado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, tecnoeng@gmail.com

Aleones José da Cruz Junior
Professor Efetivo, Instituto Federal Goiano, Trindade, Brasil, aleones.junior@ifgoiano.edu.br

RESUMO: O presente trabalho apresenta uma análise comparativa entre resultados experimentais e numéricos obtidos a partir de ensaios de prova de carga axiais e transversais cíclicos realizados em estacas-teste executadas no Campo Experimental I do Centro Tecnológico em Engenharia Civil de Furnas, em Aparecida de Goiânia-GO, em Aparecida de Goiânia-GO. A campanha de ensaios buscou analisar a rigidez, a capacidade de carga e o comportamento do sistema estaca-solo sob carregamentos cíclicos. As simulações numéricas dos ensaios admitiram três tipos de materiais constituintes: (i) o concreto para as estacas, (ii) o aço para as armaduras e (iii) o solo para o terreno. Assim, foram assumidos modelos elástico com dano plástico para o concreto, elástico linear para o aço e elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb para o solo. A respeito dos ensaios de prova de carga, ficaram evidenciadas algumas particularidades do comportamento das estacas para o local de estudo, como a variação da rigidez e a tendência de acúmulo de deslocamentos permanentes com o aumento do número de ciclos. Sobre as simulações numéricas, observou-se que a combinação dos modelos de dano plástico para o concreto e de Mohr-Coulomb para o solo deve ser limitada a poucos ciclos e com níveis de carga elevados.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas, Carregamento cíclico, Solos tropicais, Modelagem numérica.

ABSTRACT: This paper presents a comparative analysis between experimental and numerical results obtained from axial and lateral cyclic load tests performed on test piles installed at the Experimental Field I of the Civil Engineering Technological Center of Furnas, located in Aparecida de Goiânia, Goiás, Brazil. The test campaign aimed to investigate stiffness, bearing capacity, and pile-soil system behavior under cyclic loading. The numerical simulations considered three constituent material types: (i) concrete for the piles, (ii) steel for the reinforcement bars, and (iii) soil. Accordingly, an elastic model with plastic damage was adopted for concrete, a linear elastic model for steel, and a linear elastic-perfectly plastic model with the Mohr-Coulomb failure criterion for the soil. Regarding the load tests, specific behavioral features of the piles at the study site were identified, such as stiffness variation and a tendency for permanent displacement accumulation with an increasing number of cycles. As for the numerical simulations, it was observed that the combination of the plastic damage model for concrete and the Mohr-Coulomb model for soil should be limited to a small number of cycles under high load levels.

KEYWORDS: Piles, Cyclic loading, Tropical soils, Numerical modeling.

1 INTRODUÇÃO

As fundações de torres eólicas estão sujeitas a carregamentos cíclicos de elevada magnitude ao longo de toda a sua vida útil, decorrentes tanto da ação dos ventos quanto do peso próprio das pás em rotação. Esses carregamentos, predominantemente de natureza horizontal e com variação periódica de sentido, impõem solicitações complexas ao sistema estaca-solo que diferem substancialmente daquelas consideradas em projetos convencionais de fundações. De acordo com a forma como varia no tempo, um carregamento pode ser classificado como estático ou transiente, sendo os casos especiais de carga transiente as cargas cíclica e dinâmica. Enquanto as acelerações são primordiais em problemas dinâmicos, elas podem ser negligenciadas em alguns problemas cíclicos. Dessa forma, existem problemas dinâmicos que não são cíclicos e problemas cíclicos que não são dinâmicos, a distinção depende essencialmente da influência das acelerações na resposta do sistema (Pastor et al., 2012).

Em meio aos aspectos típicos de carregamentos cíclicos, talvez o mais proeminente em comparação com o comportamento estático seja o acúmulo de deformações na fundação da torre. Para tratar desse acúmulo, usualmente utiliza-se o conceito de variação na rigidez, seja ela secante ou tangente e absoluta ou cíclica. Contudo, Cuéllar (2011) esclarece que, apesar de prático, esse tipo de abordagem pode trazer interpretações controversas caso a terminologia empregada para a rigidez analisada não seja definida de forma adequada. O autor exemplifica que uma estaca carregada lateralmente pode apresentar, simultaneamente, rigidez secante absoluta decrescente e rigidez secante cíclica crescente ao longo dos ciclos, o que evidencia a necessidade de clareza terminológica nas análises. Cuéllar (2011) relata ainda que a rigidez secante absoluta tende a apresentar predisposição para redução ou degradação cíclica, em geral sem um significado físico, ao passo que a rigidez secante cíclica, especificamente para solos granulares em condições drenadas (LeBlanc, 2009), tende a aumentar com a incidência dos ciclos e pode refletir melhor o estado real do solo e da fundação. Evidentemente, esse comportamento está diretamente vinculado às peculiaridades de cada região, as quais podem interferir na resposta da fundação.

Alguns dos principais fatores que podem influenciar o comportamento cíclico de estacas foram listados por Sagaseta et al. (1991), como (i) o acúmulo de poropressão no solo, a magnitude e o tipo de carga cíclica, o número de ciclos e a frequência de aplicação desses ciclos. Outro aspecto relevante é a interface solo-fundação, cujo comportamento pode se modificar durante a aplicação dos ciclos. Um exemplo desse fenômeno pode ser observado na resistência por atrito lateral em fundações por estaca submetidas a carregamentos axiais cíclicos.

No que diz respeito a solos tropicais, poucos estudos abordam ensaios transversais cíclicos em estacas executadas nesses solos. Entre eles, destacam-se os de Menezes et al. (2005), Zammataro (2007) e Silva (2016). Menezes et al. (2005) realizaram ensaios transversais em estacas pré-moldadas de concreto cravadas em solo arenoso de alta porosidade colapsível e verificaram que o primeiro ciclo modificou totalmente o comportamento carga-deslocamento em relação ao segundo ciclo, com redução de quase 40% no coeficiente de reação horizontal. Zammataro (2007) realizou ensaios com dois ciclos de carga transversais em estacas escavada e hélice contínua executadas em solo laterítico de alta porosidade e registrou ligeiro aumento do coeficiente de reação horizontal após o primeiro ciclo, sem, contudo, poder afirmar conclusivamente a influência do carregamento cíclico no comportamento deformacional das estacas. Silva (2016) avaliou o comportamento de estacas metálicas sob esforços horizontais em solo colapsível de diabásio em condições natural e inundada, observando recuperação de 71% dos deslocamentos após o primeiro descarregamento e deslocamento acumulado de 6,18 mm após o segundo carregamento, indicando baixa capacidade de carga horizontal mesmo no estado natural. Esses estudos revelam que o comportamento cíclico lateral de estacas em solos tropicais ainda carece de investigação sistemática, especialmente para número de ciclos mais representativo das condições de operação de torres eólicas.

Diante desse contexto, o objetivo do presente trabalho consiste em realizar uma análise comparativa entre resultados experimentais e numéricos obtidos a partir de ensaios de prova de carga axiais e transversais cíclicos realizados em estacas-teste executadas no campo experimental de Furnas.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente trabalho está inserido em um projeto bem amplo de Eletrobras Furnas cujo foco principal é a montagem e a instrumentação de protótipos eólicos de eixo horizontal para possibilitar a análise do comportamento de estruturas civis de empreendimentos de geração de energia elétrica, em particular nos parques eólicos, com o intuito de subsidiar a prospecção de projetos e estudos de implantação e planos de manutenção.

Os protótipos eólicos foram implantados no Campo Experimental I do Centro Tecnológico em Engenharia Civil de Furnas em Aparecida de Goiânia-GO. O campo experimental de Furnas foi estabelecido em uma área de aproximadamente 1.200 m², localizada próximo ao Laboratório de Aerodinâmica (Bloco 34) da Gerência de Serviços e Suporte Tecnológico (GST.E).

Para viabilizar a implantação dos dois protótipos foi realizada, primeiramente, uma caracterização geológico-geotécnica do terreno com investigações de campo e laboratório. Essa caracterização contemplou, basicamente, sondagens SPT e poços de inspeção para observação *in loco* das camadas e retirada de amostras de solo. Além disso, estacas-teste foram executadas para realização de ensaios de prova de carga.

Para verificar a rigidez, a capacidade de carga e, sobretudo, o comportamento do sistema estaca-solo sob carregamentos cíclicos, uma campanha de ensaios de prova de carga foi realizada em estacas-teste executadas no campo experimental de Furnas. A campana contemplou ensaios estáticos e cíclicos com ciclos axiais e transversais. Os procedimentos adotados nos ensaios seguiram as recomendações da NBR 16903 (ABNT, 2020). Um total de quatro estacas-teste foram ensaiadas (EB, T1, T2 e T3) por meio de um sistema de reação composto por seis estacas (R1 a R6). A disposição e as características desse conjunto de estacas no campo experimental de Furnas estão apresentadas na Figura 1. No presente trabalho, serão analisadas as estacas T1 e T3.

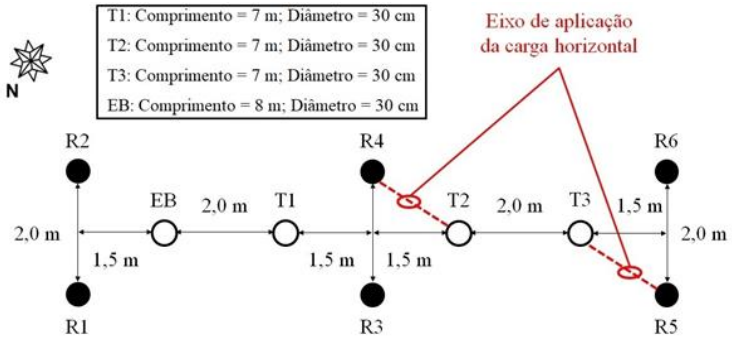


Figura 1. Disposição das estacas-teste no campo experimental de Furnas (Matos, 2024).

As configurações dos ensaios com cargas axiais e transversais estão retratadas na Figura 2. As cargas axiais (Figura 2a) foram aplicadas por meio de um sistema de reação composto por quatro estacas de reação e duas vigas secundárias apoiadas sobre uma viga principal. Essa configuração permitiu empregar o mesmo sistema de reação para ensaiar duas estacas. Nos ensaios com carregamentos transversais (Figura 2b), optou-se por revestir as estacas-teste e as estacas de reação com formas metálicas para viabilizar a soldagem de chapas de contato e, dessa maneira, garantir a adequada transmissão das cargas durante os ensaios. Um perfil metálico foi utilizado para complementar a distância entre as duas estacas.



(a) Carregamentos axiais em T1 e T3



(b) Carregamentos transversais em T3

Figura 2. Detalhes dos sistemas de reação dos ensaios de prova de carga.

As estacas T1 e T3 possuem diâmetros de 30 cm, comprimentos de 7 m e foram escavadas com trado mecânico sem fluido estabilizante. Além disso, estão instrumentadas ao longo do seu comprimento em quatro níveis distintos: 0,5 m; 3,0 m; 5,0 m e 6,5 m. Durante a concretagem das estacas, observou-se que o nível d'água estava próximo de 4 m de profundidade.

A metodologia executiva de cada ensaio foi adotada para avaliar, sobretudo, a influência dos ciclos no comportamento monotônico do sistema estaca-solo. O procedimento de ensaio da estaca-teste T1 correspondeu em (i) aplicar carregamentos de compressão do tipo lento (ABNT, 2020) até estar caracterizada a ruptura nítida, que foi observada para uma carga de 275 kN e um recalque máximo da ordem de 32,4 mm, pouco maior que 10% do diâmetro do seu fuste. Na sequência, (ii) T1 foi submetida a metade da carga de ruptura para início do ensaio cíclico. Foram realizados (iii) dez ciclos de compressão do tipo descarregamento-recarregamento com a carga variando entre 25% e 50% da carga de ruptura. Após os ciclos, (iv) T1 foi carregada novamente até a ruptura e, por fim, (v) completamente descarregada.

Com relação aos ensaios com carga transversal em T3, para a aplicação dos carregamentos cíclicos, o topo da estaca foi arrasado até uma profundidade onde o concreto se mostrou íntegro. Em seguida, um forma metálica foi instalada para que a área de arrasamento das estaca fosse concretada novamente. Para ensaiar a estaca T3, foram (i) aplicados carregamentos de compressão do tipo lento (ABNT, 2020) até atingir a ruptura, a qual foi confirmada para a carga de 304 kN e um recalque máximo medido de 38,8 mm, maior que 10% do diâmetro do seu fuste. Após esse processo, a (ii) carga de ruptura foi reduzida pela metade e mantida constante, visando à execução do ensaio cíclico transversal. Ao todo, foram executados (iii) trinta ciclos com carregamentos na direção horizontal variando de 0 a 44 kN. Depois dos ciclos, (iv) T3 foi carregada novamente à compressão até a ruptura e, por fim, (v) completamente descarregada. Os detalhes da aplicação das cargas nos ensaios de T1 e T3 estão esboçados, respectivamente, nas Figuras 3 e 4 com o tempo fora de escala para destacar os níveis de carregamento de cada etapa.

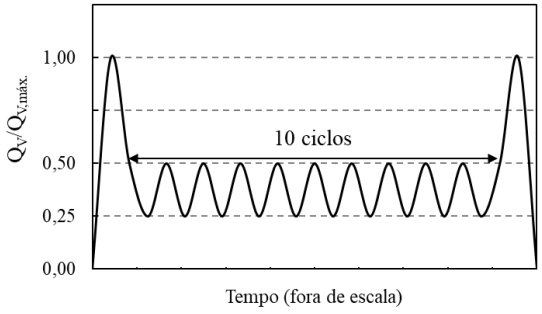
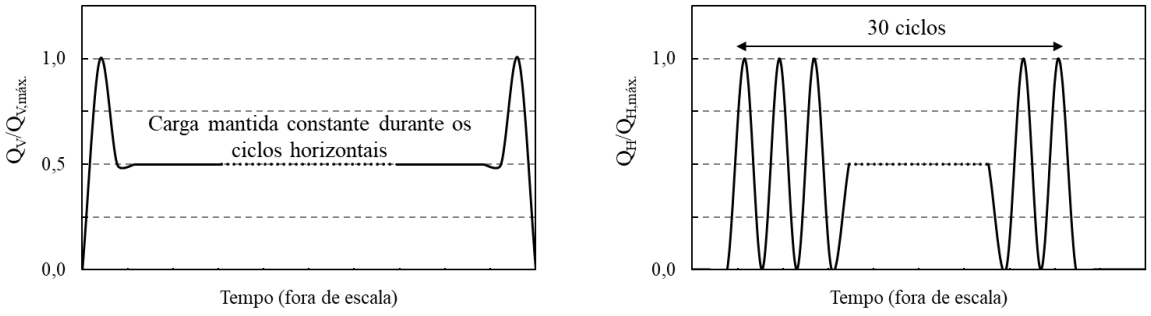


Figura 3. Programa de ensaio para a estaca-teste T1 (Matos, 2024).



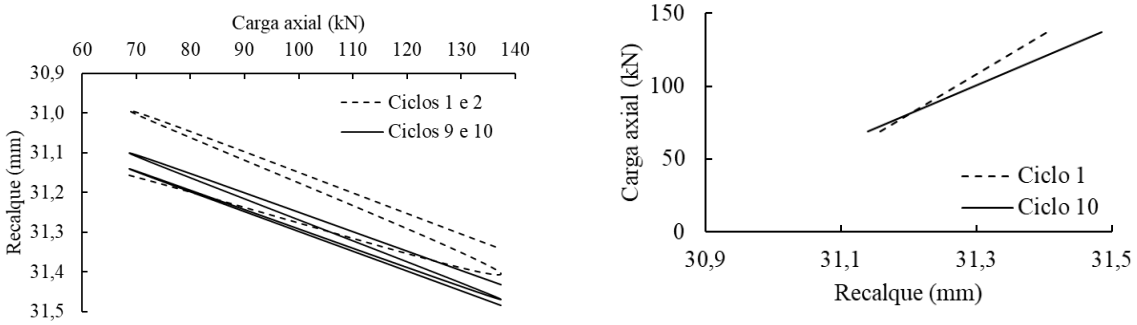
(a) Carga axial de compressão (b) Carga transversal

Figura 4. Programa de ensaio para a estaca-teste T3 (Matos, 2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios com carregamentos cíclicos nas estacas T1 e T3

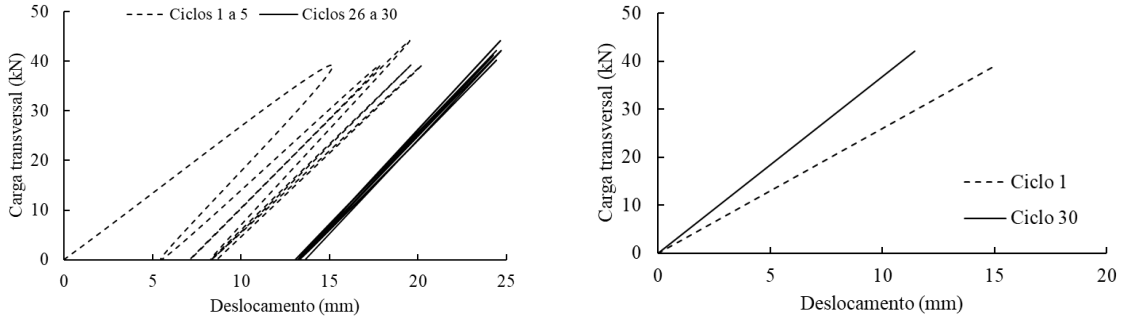
A Figura 5a destaca o comportamento da curva carga-recalque de T1 para os dois primeiros e os dois últimos ciclos do ensaio. O acúmulo de deslocamento verificado após os carregamentos cíclicos foi muito pequeno (< 0,1 mm). A Figura 5b apresenta o comportamento da rigidez secante cíclica de T1 para o primeiro e o último ciclo, confirmando sua redução após aplicação das cargas cíclicas.



(a) Curva carga-recalque (b) Variação da rigidez secante cíclica

Figura 6. Comportamento de T1 durante os ciclos.

A curva carga-deslocamento de T3 para carregamento transversal cíclico encontra-se ilustrada na Figura 6a para os cinco primeiros e os cinco últimos ciclos do ensaio. Os maiores acúmulos de deslocamento ocorreram nos primeiros ciclos e o valor desses acúmulos diminuiu, gradativamente, com a aplicação dos ciclos. Vale mencionar que, durante o ensaio cíclico de T3, não foi possível manter a carga axial constante. Além disso, a carga transversal máxima aplicada também não foi a mesma em alguns ciclos e variou entre 39 e 44 kN. Analisando a Figura 6b, T3 se tornou mais rígida após o ensaio cíclico. Para facilitar a comparação, a reta do último ciclo foi deslocada para a origem.



(a) Curva carga-deslocamento (b) Variação da rigidez secante cíclica

Figura 6. Comportamento de T3 durante os ciclos.

4.2 Simulação numérica dos ensaios de prova de carga cíclicos

A simulação dos ensaios de prova de carga admitiu três tipos de materiais constituintes: (i) o aço para as armaduras, o concreto para as estacas e o solo para o terreno. Durante as análises numéricas, foram assumidos modelos elástico linear para o aço, elástico com dano plástico para o concreto proposto por Lubliner et al. (1989) e elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb para o solo.

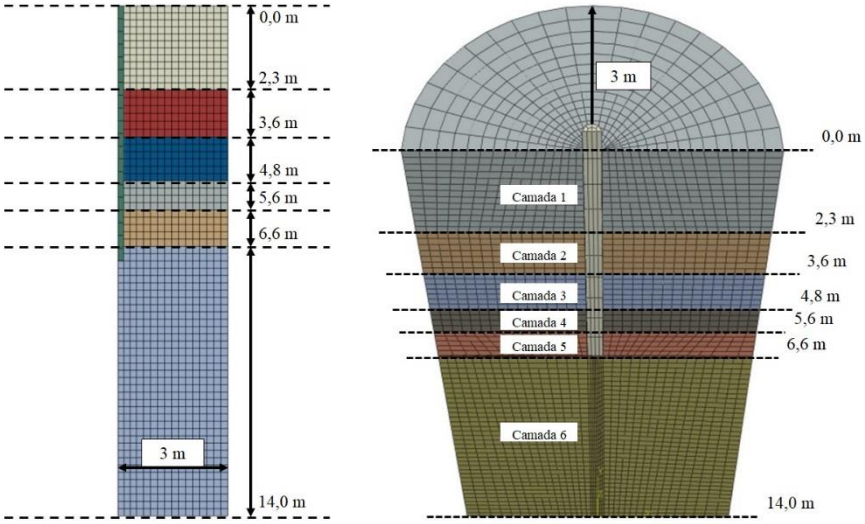
As propriedades do aço consistiram em um módulo de Young (E) de 210 GPa, um coeficiente de Poisson (ν) de 0,3 e um peso específico (γ) igual a 78,5 kN/m³. No que diz respeito ao concreto, seus parâmetros elásticos foram E de 20 GPa, ν de 0,2 e γ de 22 kN/m³. Pela indisponibilidade de resultados experimentais sobre o comportamento do concreto das estacas, os dados do modelo de dano plástico foram estabelecidos segundo o estudo de Jankowiak e Łodygowski (2005). Para o terreno, os parâmetros geotécnicos finais utilizados nas simulações estão presentes na Tabela 1.

Pela particularidade de simetria de cada problema, foi adotado um modelo bidimensional e axissimétrico para o ensaio de T1 (Figura 7a) e um modelo tridimensional e simétrico em relação ao plano que contém o eixo da estaca e a linha de ação da carga transversal para o ensaio de T3 (Figura 7b).

A Figura 8 mostra o resultado da curva carga-recalque da referida prova de carga e sua respectiva simulação numérica pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Ficou evidente que o comportamento previsto não se ajustou bem aos dados experimentais de T1. Apesar de apresentar um valor próximo de deslocamento na carga de ruptura, a rigidez de T1 se mostrou muito superior ao MEF no início do ensaio. Somente em patamares de carga próximos da ruptura, a curva experimental tendeu a convergir para a simulação numérica. A simulação pelo MEF apresentou deslocamentos reversíveis maiores nos estágios de descarregamento. A histerese observada na curva carga-recalque da simulação numérica está relacionada principalmente com a formulação do modelo de dano plástico do concreto. Além disso, praticamente não houve diferença nos deslocamentos previstos entre a primeira e a segunda etapa de aplicação da carga de ruptura, comprovando, possivelmente, a principal limitação de não utilizar um modelo constitutivo para o solo capaz de avaliar os efeitos dos carregamentos cíclicos.

Tabela 1. Parâmetros mecânicos do solo para simulação dos ensaios de prova de carga (Matos, 2024).

Profundidade (m)	E (MPa)	ν	c' (kPa)	ϕ' (°)	ψ (°)	γ_n (kN/m³)
0,0 - 2,3	12	0,3	40	24	6	17,70
2,3 - 3,6	18	0,3	52	28	7	17,90
3,6 - 4,8	16	0,3	32	29	7	17,70
4,8 - 5,6	18	0,3	39	28	7	18,10
5,6 - 6,6	29	0,3	35	27	7	18,15
6,6 - 14,0	29	0,3	33	31	8	18,20



(a) T1 (b) T3

Figura 7. Modelos numéricos para simulação dos ensaios de prova de carga (Matos, 2024).

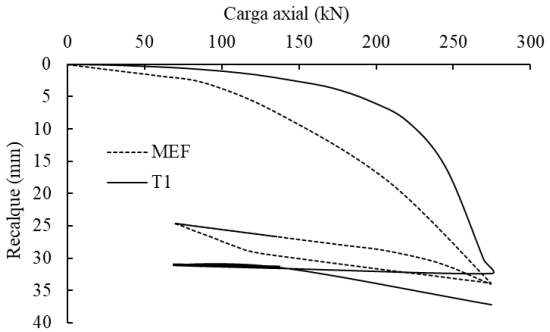
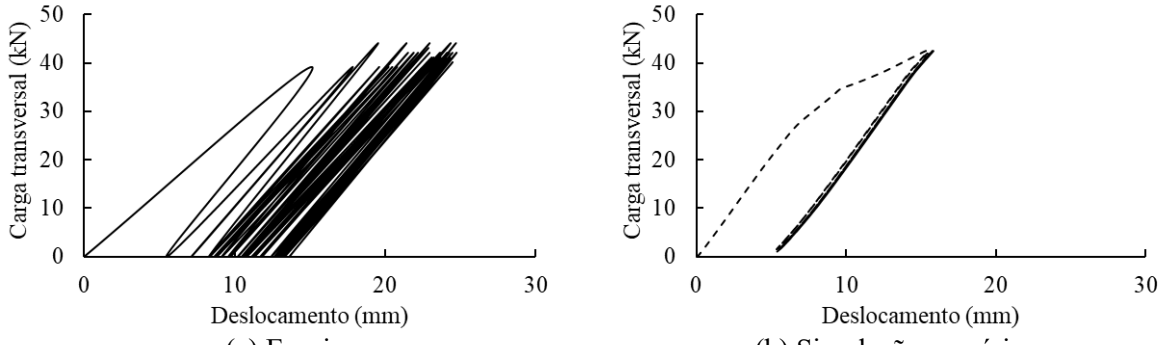


Figura 8. Curva carga-recalque medida e simulada para o ensaio em T1 (Matos, 2024).

Com relação à simulação dos ciclos de carga transversal, os resultados (Figura 9) mostraram que a combinação dos modelos de dano plástico e Mohr-Coulomb não foi suficiente para avaliar o acúmulo de deslocamentos que ocorreu em T3 ao longo dos ciclos. As previsões se aproximaram dos dados experimentais apenas no primeiro ciclo. Porém, gradativamente, a curva real se afasta da simulação pelo MEF.



(a) Ensaio (b) Simulação numérica

Figura 9. Curva carga-deslocamento medida e simulada para o ensaio em T3 (Matos, 2024).

Diferentemente de T1, o ensaio cíclico simulado em T3 envolveu cargas transversais que mobilizaram a resistência à flexão da estaca e foram suficientes para causar alteração na sua rigidez pelo modelo de dano plástico do concreto. Contudo, esse aumento na rigidez ocorreu apenas no primeiro ciclo, tendeu a se estabilizar entre o segundo e o quinto ciclo com pequenas variações e se manteve constante nos ciclos subsequentes. A combinação dos modelos de dano plástico e Mohr-Coulomb foi capaz de simular apenas o

comportamento do elemento estrutural da fundação durante os ciclos. Acredita-se que a inclusão de um modelo constitutivo para o elemento geotécnico da fundação adequado para problemas cíclicos seja primordial para uma previsão mais acurada.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou investigar o comportamento mecânico de duas estacas-teste executadas no campo experimental de Furnas por meio de simulações numéricas e ensaios de prova de carga estáticos e cíclicos axiais e transversais.

Foram observadas algumas particularidades da interação solo-estaca para o local de estudo, como (i) a variação da rigidez secante cíclica; e (ii) a tendência de acúmulo de deslocamentos horizontais permanentes com o aumento do número de ciclos.

Sobre as simulações numéricas dos ensaios de prova de carga, observou-se que o modelo elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb pode ser utilizado para retratar o comportamento monotônico do solo em regime não linear e próximo da ruptura. Além disso, o modelo de dano plástico do concreto se mostrou como uma boa alternativa para modelar as estacas sob carga horizontal. Contudo, a combinação dos modelos de dano plástico para o concreto da fundação e de Mohr-Coulomb para o solo deve ser limitada para poucos ciclos e com nível de carga elevado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). (2020). *NBR 16903: Solo - Prova de carga estática em fundação profunda*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

Cuéllar, P. (2011). *Pile foundations for offshore wind turbines: Numerical and experimental investigations on the behaviour under short-term and long-term cyclic loading*. Ph.D. Thesis, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, 149 p.

Jankowiak, T., Łodygowski, T. (2005). Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, 6: 53-69.

Leblanc, C. (2009). *Design of offshore wind turbine support structures: Selected topics in the field of geotechnical engineering*. Ph.D. Thesis, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 190 p.

Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Oñate, E. (1989). A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 25(3): 299-326.

Matos, Y.M.P. (2024). *Avaliação experimental e numérica do comportamento mecânico de fundações de protótipos eólicos em solo tropical*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 203 p.

Menezes, S.M., Carvalho, D., Albuquerque, P.J.R. (2005). Provas de carga horizontais em estacas pré-moldadas de concreto cravadas em solo de alta porosidade. *Ciência & Engenharia*, 15(2): 77-82.

Pastor, M., Mira, P., Merodo, J.A.F. (2012). Constitutive modelling. In: Prisco, C. di & Wood, D.M. (eds.). *Mechanical behaviour of soils under environmentally induced cyclic loads*, Springer Science & Business Media, Udine, Italy, p. 137–226.

Sagaseta, C., Cuéllar, V., Pastor, M. (1991). Cyclic loading. Deformation of soils and displacements of structures. *10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, AGI, Florence, Italy, 981-999.

Silva, M.B.M. (2016). *Comportamento de estacas metálicas submetidas a esforços horizontais nas condições de umidade natural e inundada do solo*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 124 p.

Zammataro, B.B. (2007). *Comportamento de estaca tipo escavada e hélice contínua submetidas a esforços horizontais*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 187 p.