

Avaliação do Comportamento de Estaca Escavada Submetida a Carregamento Horizontal em Aterro Controlado, Por Meio de Ensaio Dilatométrico

Ricardo Kobayashi Amorim

Engenheiro civil, Damasco Penna, São Paulo, Brasil, ricardo@damascopenna.com.br

Gustavo Prado Guerra

Engenheiro civil, Damasco Penna, São Paulo, Brasil, gustavo.guerra@damascopenna.com.br

Antônio Sérgio De Pietro Damasco Penna

Engenheiro civil, Damasco Penna, São Paulo, Brasil, penna@damascopenna.com.br

Paulo José Rocha Albuquerque

Professor, FEC / UNICAMP, Campinas, Brasil, pjra@unicamp.br

Anderson Diego Dardis de Macedo

Engenheiro civil, Damasco Penna, São Paulo, Brasil, anderson@damascopenna.com.br

RESUMO: Uma estaca escavada de 90 cm de diâmetro executada em área de aterro compactado foi submetida ao ensaio de prova de carga estática horizontal. No interior da estaca, instalou-se inclinômetro para medição de deslocamentos em profundidade da estaca a cada fase de carregamento da prova de carga. O objetivo principal do estudo foi a avaliação do comportamento da estaca carregada lateralmente por meio de análise numérica, na qual foram utilizados parâmetros geotécnicos obtidos por meio de ensaio dilatométrico (DMT), e por métodos teóricos. Inicialmente, determinou-se o coeficiente de reação horizontal do solo η_H , a partir do qual foram definidos os deslocamentos da estaca por meio dos métodos de Miche (1930) e Matlock & Reese (1961). Então, comparou-se os deslocamentos estimados aos deslocamentos medidos pelo inclinômetro para a carga de 272 kN. Obteve-se $\eta_H = 40 \text{ MN/m}^3$, indicando se tratar de um aterro bem compactado. Os deslocamentos estimados pela análise numérica resultaram em comportamento similar aos deslocamentos medidos, porém o método de Miche (1930) apresentou a melhor estimativa. Conclui-se que a compactação de aterros influencia diretamente no resultado da prova de carga horizontal e que os métodos utilizados para previsão dos deslocamentos devem ser calibrados para o solo em questão.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de Carga Estática Horizontal; Coeficiente de Reação Horizontal; Inclinômetro; Aterro Controlado; Ensaio DMT.

ABSTRACT: A 90 cm diameter drilled pile executed in landfill area was submitted to the horizontal static load test. An inclinometer was installed inside the pile to measure its displacements in depth in each loading stage of the test. The main purpose of the study was the evaluation of the pile behavior when laterally loaded, by numerical analysis, using geotechnical parameters resulted from Dilatometer Test (DMT), and theoretical methods. The coefficient of horizontal subgrade reaction (η_H) was initially determined by the methods described in Miche (1930) and Matlock & Reese (1961) in order to define the pile displacements in depth. Then, the estimated displacements were compared to the displacements measured by the inclinometer, when a 272 kN load was applied. The results presented a coefficient $\eta_H = 40 \text{ MN/m}^3$, indicating a well-compacted landfill. The displacements estimated by numerical analysis showed similar behavior to the measured displacements and the method described in Miche (1930) presented the best estimate. It has been concluded that the landfill compaction has direct influence in the result of the horizontal load test and that the methods used to predict the displacements must be calibrated to the soil in analysis.

KEYWORDS: Horizontal Static Load Test; Coefficients of Horizontal Subgrade Reaction; Inclinometer; Controlled Landfill; Dilatometer Test (DMT).

1 Introdução

A atuação de esforços horizontais em elementos de fundação, ainda que bastante recorrente na engenharia civil em obras como contenções, pontes, edifícios de grande porte, galpões, linhas de transmissão, aerogeradores etc., trata-se de um tema pouco estudado e carente de parâmetros geotécnicos representativos à diversidade de solo existentes, em especial os solos brasileiros, o que amplia a complexidade do dimensionamento desses elementos sob a ação de forças horizontais.

A ação concomitante de carregamentos horizontais, cargas verticais e momentos fletores em estacas deve ser bem avaliada para se garantir o adequado dimensionamento dos elementos estruturais, proporcionando economia e segurança à edificação.

Segundo Velloso & Lopes (2010), a ação simultânea de todos os esforços em estacas deve ser analisada através da ótica de três aspectos principais: estabilidade ou segurança à ruptura do solo com relação às tensões transmitidas pela estaca ao solo; deslocamento e rotação do topo da estaca sob a carga de trabalho e sua compatibilidade com a estrutura suportada e dimensionamento estrutural da estaca.

A realização de ensaios geotécnicos de campo e provas de carga para adoção de critérios e parâmetros de projeto que consideram a ação de carregamentos laterais nas fundações ainda é uma ferramenta pouco explorada, criando uma lacuna no conhecimento técnico brasileiro sobre este assunto em específico.

No sentido de proporcionar maior segurança às estruturas, a ABNT NBR 6122 (2019) tornou obrigatória a execução de provas de carga horizontais em obras cujos carregamentos mais frequentes durante a vida útil da estrutura sejam esforços horizontais. Analogamente, esta orientação também é válida para obras em que os esforços de tração são frequentes durante a vida útil da estrutura.

O presente estudo, alinhado às determinações da norma, conduz também a análises complementares dos resultados obtidos na prova de carga horizontal, incrementando as discussões sobre o assunto dentro do cenário geotécnico brasileiro.

2 Objetivos

O objetivo desse estudo é avaliar o comportamento de estaca escavada de grande diâmetro submetida a carregamento horizontal por meio de análise numérica, utilizando-se parâmetros geotécnicos de entrada obtidos do ensaio dilatométrico, e por meio de métodos analíticos que utilizam o conceito de coeficiente de reação horizontal do solo.

Busca-se, portanto, verificar a validade e assertividade dos métodos teóricos e da utilização dos parâmetros obtidos do ensaio DMT para modelagem numérica na avaliação do comportamento em profundidade de estaca escavada submetida a carregamentos laterais.

Adicionalmente, avalia-se também a influência de compactação controlada do aterro que compõe o solo superficial em que a estaca foi executada e a importância da compactação do solo para obtenção de bom desempenho de estacas submetidas a carregamentos horizontais.

3 Estacas Submetidas a Carregamentos Horizontais

O dimensionamento de estacas submetidas a carregamentos horizontais é norteado segundo dois critérios: avaliação da carga última de ruptura do sistema estaca-solo, no qual se adota um fator de segurança adequado contra falha; e a avaliação dos deslocamentos e deformações laterais máximos admissíveis sob a carga de trabalho.

Segundo Mier (2001), a avaliação dos deslocamentos máximos, em geral, resultam em cargas admissíveis inferiores às cargas últimas do sistema estaca-solo, uma vez que estão associados ao desempenho e funcionalidade da estrutura. Assim, projetos de estacas submetidas a carregamentos horizontais são governados pela verificação dos deslocamentos e deformações horizontais máximos admissíveis e esforços internos na estaca.

Um dos modelos mais utilizados na prática para previsão de deslocamentos, deformações, rotações e esforços internos às estacas se baseiam no coeficiente de reação horizontal do solo. Estes modelos foram configurados a partir da Hipótese de Winkler, pela qual o comportamento do solo submetido a carregamentos horizontais é simulado por meio de um conjunto de molas independentes.

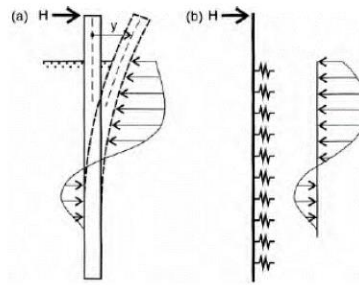


Figura 1. Reação do solo numa estaca submetida a uma carga horizontal: a) situação real; b) modelada pela Hipótese de Winkler (Velloso & Lopes, 2010).

O coeficiente de reação horizontal a uma determinada profundidade é definido pela razão entre a tensão horizontal atuante nessa profundidade e o deslocamento sofrido pelo solo, conforme expressão a seguir.

$$K_h = \frac{\text{tensão horizontal}}{\text{deslocamento}} = \frac{q}{y} \quad [F \cdot L^{-3}] \quad (1)$$

Alonso (1988) comenta que usualmente se emprega o conceito de módulo de reação horizontal, definido como a razão entre a reação aplicada pelo solo (em unidade de força por comprimento da estaca) e o deslocamento:

$$K = \frac{p}{y} \quad [F \cdot L^{-2}] \quad (2)$$

Para realização de estudos de estacas carregadas transversalmente, é necessário prever a variação do módulo de reação horizontal com a profundidade a partir das características de deformabilidade do solo.

Em argilas pré-adensadas (argilas rijas a duras), cuja deformabilidade é aproximadamente independente da profundidade, o módulo de reação horizontal é constante. No caso de solos de comportamento arenoso e de argilas normalmente adensadas (argilas moles), com características de deformação proporcionais à profundidade, admite-se que a variação do módulo de reação horizontal cresce linearmente com a profundidade.

$$K = \eta_H \cdot z \quad (3)$$

Em que η_H é o coeficiente de reação horizontal e z a profundidade.

Neste trabalho, foram empregados dois métodos que se baseiam no conceito do coeficiente de reação horizontal que cresce linearmente com a profundidade: o método de Miche (1930) e o método de Matlock & Reese (1961).

O método de Miche (1930) considera uma estaca longa imersa em meio elástico submetida a carregamento horizontal H aplicada em topo livre, ao nível do terreno, possibilitando a obtenção, ao longo da profundidade da estaca, de diagramas de reação do solo, deslocamento horizontal, momentos fletores e esforços cortantes.

Na figura a seguir, apresentam-se os diagramas para obtenção de deslocamentos e esforços internos à estaca ao longo de sua profundidade, sendo B o diâmetro da estaca, $E.I$ a rigidez flexional da estaca e T a rigidez relativa estaca-solo, determinada pela seguinte expressão:

$$T = \sqrt[5]{\frac{E.I}{\eta_H}} \quad (4)$$

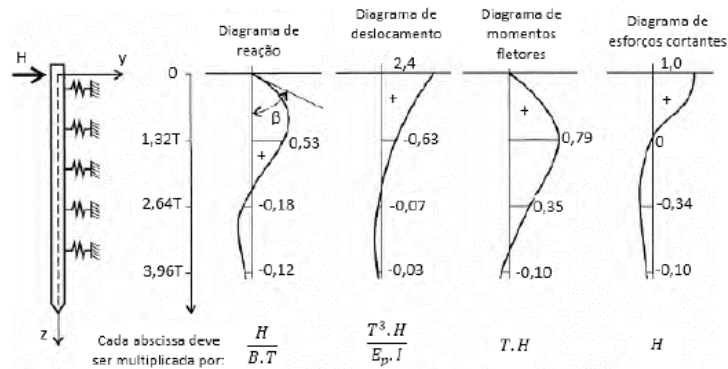


Figura 2. Método de Miche (1930) (Velloso & Lopes, 2010).

O método de Matlock & Reese (1961), assim como o método de Miche (1930), também considera módulo de reação horizontal que varia linearmente com a profundidade e fornece, ao longo da profundidade da estaca, diagramas de reação do solo, deslocamentos horizontais, momento fletor, esforço cortante e rotação. Além da atuação de esforço horizontal, este método também considera a ação de momento fletor no topo da estaca, sendo aplicado o princípio da superposição de efeitos para verificação do comportamento da estaca submetida aos dois esforços.

Para o caso de topo livre e do módulo de reação horizontal que cresce linearmente com a profundidade, Alonso (1989) apresenta a seguinte figura e expressão:

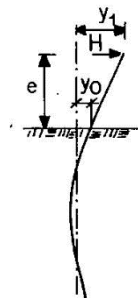


Figura 3 - Estaca com topo livre submetida a força horizontal e momento fletor (Alonso, 1989)

$$y_1 = y_0 + \frac{H}{E.I} (1,623 \cdot e \cdot T^2 + 1,75 \cdot e^2 \cdot T + \frac{e^3}{3}) \quad (5)$$

A determinação do deslocamento ao longo da profundidade da estaca é determinada a partir da seguinte equação, sendo A_y e B_y coeficientes adimensionais e H_0 e M_0 a força horizontal e momento fletor aplicados no topo da estaca.

$$y = A_y \frac{H_0 T^3}{E.I} + B_y \frac{M_0 T^2}{E.I} \quad (6)$$

4 Materiais e Métodos

Neste artigo, analisou-se os resultados de prova de carga estática horizontal executada em uma estaca escavada mecanicamente sem fluido estabilizante com 90 cm de diâmetro e 18,0 m de comprimento. No interior da estaca, foi acoplado tubo-guia para passagem de torpedo de inclinômetro, o qual foi utilizado para registro das deformações da estaca em profundidade em cada uma das fases de carregamento (tipo lento) da prova de carga. A medição dos deslocamentos laterais da estaca foi conduzida por meio de deflectômetros comuns à execução de provas de carga estática, e em profundidade, por meio de um inclinômetro instalado no interior da estaca, em todo seu comprimento.

A estaca ensaiada manteve-se confinada lateralmente durante a execução do ensaio, com exceção da face de aplicação da carga horizontal. Para execução do sistema de montagem da prova de carga, foi necessário

escavar 100 cm a partir da superfície do terreno (e do topo da estaca), sendo que a carga foi aplicada a 35 cm do fundo da escavação.

Realizou-se análise numérica por meio do software PLAXIS 2D, no qual simulou-se a mesma estaca submetida a carregamento horizontal, adotando-se parâmetros geotécnicos de entrada no programa obtidos no ensaio dilatométrico executado próximo à estaca ensaiada. O intuito dessa análise é a verificar o potencial de utilização desse tipo de ensaio para estimar o comportamento de estacas sob ação de carregamentos transversais.

Com os resultados obtidos na prova de carga e por meio das deformações medidas pelo inclinômetro a 50 cm (y_1) e 100 cm (y_0) a partir da cota de topo da estaca, utilizando-se a equação (5), obteve-se um valor de T e seu respectivo η_H , correspondente a cada carga aplicada, possibilitando o traçado de um gráfico de coeficiente de reação horizontal vs deslocamento. Com base no gráfico, determinou-se o coeficiente de reação horizontal do solo e, assim, foram definidos os deslocamentos em profundidade da estaca por meio dos métodos de Miche (1930) e Matlock & Reese (1961).

Os diagramas de deslocamento obtidos são comparados aos deslocamentos medidos pelo inclinômetro para carregamento lateral de 272 kN, correspondente à carga de trabalho da estaca em análise, objetivando validar a aplicação desses métodos ao contexto geotécnico deste estudo de caso.

4.1 Características Gerais da Obra

A estaca submetida ao ensaio de prova de carga horizontal objeto deste artigo compõe a fundação de um dos galpões de condomínio logístico a ser edificado no município de Cajamar-SP. O galpão, com área de aproximadamente 27.000 m², será implantado preponderantemente em região de aterro de espessuras de até 23 m. O condomínio como um todo apresenta expressiva movimentação de terra, gerando cerca de 1.200.000 m³ de volume de corte e 1.000.000 m³ de volume de aterro.

Em vista da vultosa obra de terraplenagem, foi empregado na execução do aterro controle tecnológico de compactação de camadas, tendo como principais critérios o grau de compactação igual ou superior a 98%, desvio do teor de umidade entre -2% e 2% e camadas compactadas com espessura média de 20 cm.

Para obtenção do grau de compactação e desvio do teor de umidade de cada camada compactada em todas as praças de execução do aterro foram executados ensaios de Hilf e ensaios de Proctor Normal em laboratório instalado na obra. O controle da espessura das camadas compactadas foi realizado por meio de acompanhamento topográfico com equipamento RTK de alta precisão.

Complementarmente, foram executados ensaios DMT ao longo do alteamento do aterro para fornecimento de parâmetros geotécnicos de validação da eficiência da compactação e do método empregado para controle tecnológico.

A ação do vento, principal ação variável atuante na estrutura do galpão, contribui significativamente para a transmissão de esforços horizontais, trações e momentos fletores às fundações dos pilares, tornando indispensável o estudo do comportamento das estacas sob o efeito de cargas laterais, o que motivou aos projetistas a execução de provas de carga estática horizontais.

4.2 Prova de Carga Horizontal

Para o sistema de reação da prova de carga horizontal, adotou-se o mesmo tipo e características da estaca ensaiada. A seguir, apresenta-se o sistema de montagem da prova de carga estática horizontal.

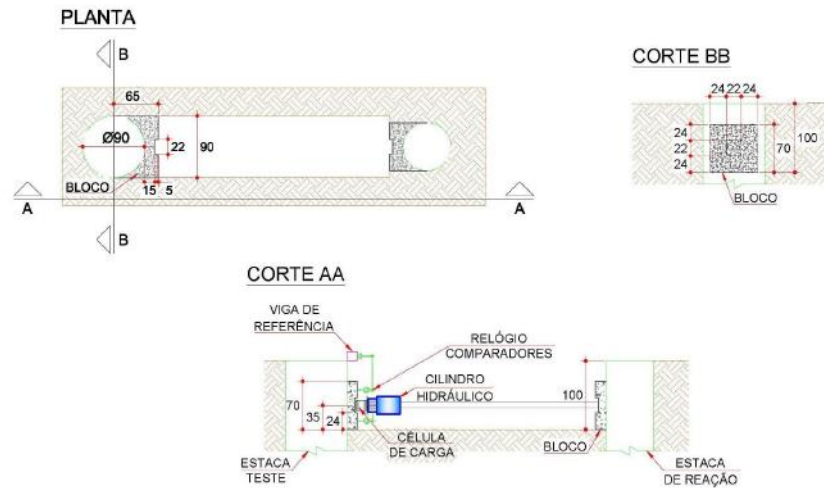


Figura 3. Esquema de montagem da prova de carga horizontal (fonte: GEOPROVA).

4.3 Investigação Geotécnica

Para realização das análises dos resultados das provas de carga e comparação com métodos de avaliação do comportamento de estacas sob carregamentos horizontais, foram utilizados ensaios geotécnicos de campo executados próximos à estaca ensaiada.

A sondagem SPT indicou a estratigrafia do subsolo local e o ensaio DMT forneceu valores do módulo edométrico “M” e do ângulo de atrito, empregados na análise numérica realizada.

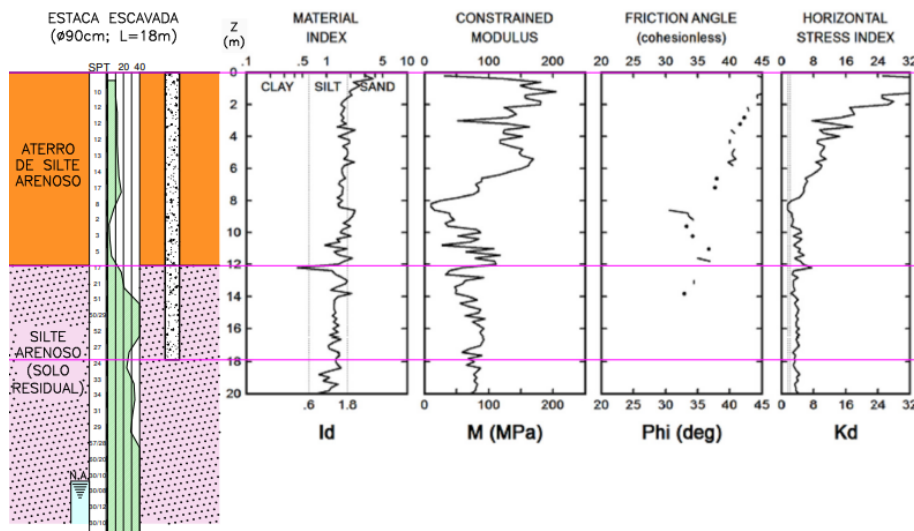


Figura 4. Resultados obtidos de sondagem SPT e ensaio DMT executados próximos à estaca ensaiada.

5 Apresentação e Análise dos Resultados

A prova de carga horizontal foi levada à carga máxima indicada em projeto apresentando deslocamentos muito baixos. Portanto, a determinação do coeficiente de reação horizontal para a estaca em análise só foi possível para um intervalo de deslocamentos de 6,0 mm a 9,50 mm, resultando em um coeficiente de reação horizontal η_H de aproximadamente 40 MN/m³,

Os baixos deslocamentos apresentados pela estaca durante a realização do ensaio, mesmo sob cargas horizontais de até 550 kN indica que o solo superficial apresenta rigidez suficiente para confinar lateralmente a estaca, sinalizando que se trata de um aterro muito bem compactado.

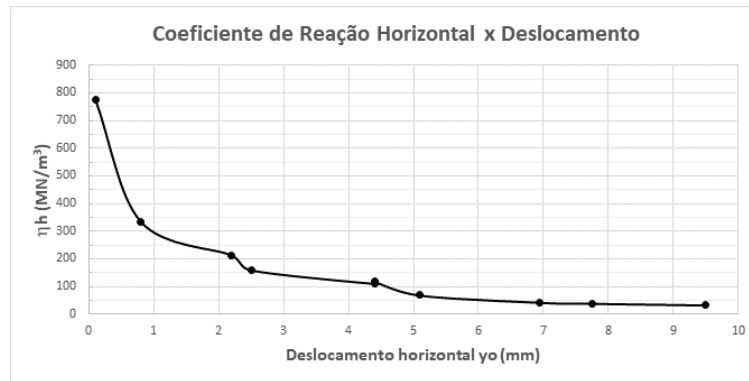


Figura 4. Gráfico para obtenção do coeficiente de reação horizontal.

Outra evidência de que o aterro foi devidamente compactado se refere ao alto valor do módulo edométrico “M” obtido no ensaio DMT, cujo valor médio é da ordem de 153 MPa, em camada superficial de 2,0 m de espessura.

Baseando-se no valor de η_H obtido, analisou-se o comportamento dos deslocamentos da estaca ao longo de sua profundidade sob a ação de 272 kN de carregamento horizontal, correspondendo à sua carga de trabalho. Os deslocamentos estimados pelos métodos de Miche (1930) e Matlock & Reese (1961) foram plotados no gráfico a seguir (figura 5). Neste gráfico, também foram plotados os deslocamentos da estaca em profundidade obtidos por meio do software PLAXIS 2D utilizando-se parâmetros obtidos com o DMT, e os deslocamentos da estaca medidos por meio do inclinômetro interno.

A partir do gráfico da figura 5, observa-se que os deslocamentos estimados no topo da estaca por meio de análise numérica e de métodos teóricos foram menores do que o deslocamento medido. Dentre as estimativas realizadas, o método de Miche (1930) apresentou a melhor previsão com relação a esse aspecto e o método de Matlock & Reese (1961) apresentou a previsão menos assertiva.

Nota-se também que o comportamento das curvas das previsões possui características similares ao da curva medida e convergem entre si aproximadamente aos 6,50 m de profundidade, onde indicam deslocamentos nulos abaixo dessa cota.

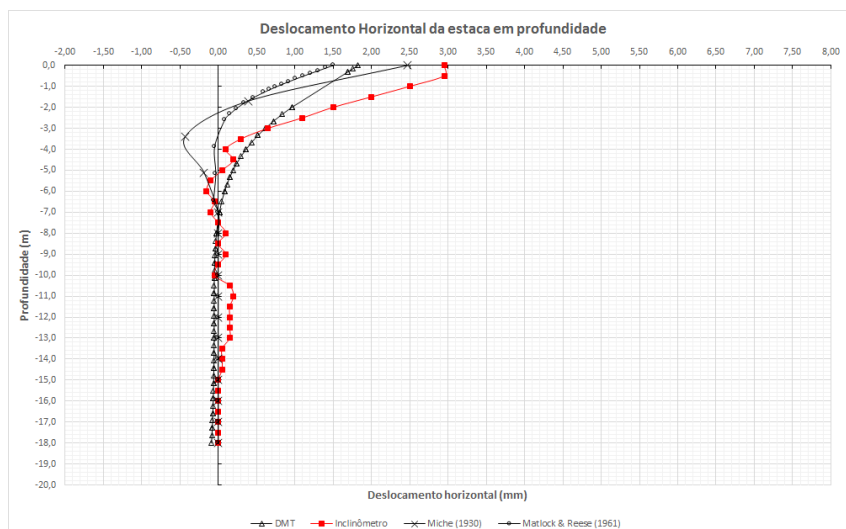


Figura 5. Deslocamentos horizontais em profundidade medidos e estimados da estaca.

É possível constatar também que os maiores deslocamentos medidos ocorrem até os 3,0 m de profundidade, sendo que, nessa profundidade, a redução dos deslocamentos na estaca é da ordem de 70% com relação ao deslocamento do seu topo, evidenciando que a rigidez solo superficial é determinante no desempenho de estacas carregadas lateralmente. A análise numérica calibrada com parâmetros obtidos por meio do ensaio DMT apresentou comportamento similar ao medido, indicando se tratar de uma boa ferramenta

para previsão de deslocamentos em profundidade de estacas carregadas lateralmente, desde que realizadas as devidas ponderações de segurança, uma vez que os deslocamentos previstos foram, em geral, inferiores aos medidos.

É importante frisar que a aplicabilidade dos resultados aqui apresentados se restringem às condições geológico-geotécnicas do local em que a estaca foi executada.

6 Conclusões

Verifica-se que, apesar das previsões apresentaram resultados satisfatórios, mostrando comportamento similar à curva de deslocamentos medidos, os métodos utilizados devem ser ajustados para o tipo de solo em questão, no caso aterro de silte arenoso rigorosamente compactado.

As estimativas de deslocamento no topo da estaca divergiram dos deslocamentos medidos, entretanto, os valores estimados e medidos convergem ao longo da profundidade da estaca, sendo que abaixo dos 6,50 m os deslocamentos são aproximadamente nulos tanto nos valores estimados quanto nos medidos.

A medição de deslocamentos da estaca ao longo de sua profundidade por meio de inclinômetro instalado no interior da estaca apresenta preciosas informações não só para calibração de métodos teóricos conhecidos na bibliografia internacional para sua aplicação aos solos brasileiros, mas também para calibração dos resultados do ensaio DMT visando sua aplicação na previsão de deslocamentos de estacas submetidas a carregamentos horizontais.

O ensaio DMT pode fornecer parâmetros de qualidade para estimativa dos deslocamentos da estaca por análise numérica, o que deverá ser validado por meio da realização de outros ensaios similares em diferentes tipo de solo, para que se possa inferir em ajustes adequados ao método.

Por fim, observa-se que o solo superficial é determinante para o desempenho de estacas submetidas a carregamentos horizontais, sendo que houve redução da ordem de 70% dos deslocamentos da estaca abaixo dos 3,0 m de profundidade e de aproximadamente 100% abaixo dos 6,50 m.

Nesse estudo de caso, verifica-se também que a compactação rigorosamente controlada do aterro superficial pode contribuir para o bom desempenho da estaca ensaiada visto que os deslocamentos resultantes durante o ensaio foram baixos. Contudo, não foi possível qualificar a real parcela de contribuição da compactação nos resultados deste estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais à Damasco Penna Engenharia Geotécnica pela execução e disponibilização dos ensaios de campo e das leituras do inclinômetro utilizados neste estudo e à Geoprova pela execução do ensaio de prova de carga horizontal e a disponibilização do respectivo relatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122. *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro.

Alonso, U. R. (1989). *Dimensionamento de Fundações Profundas*. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 169 p.

Marzola, M. M. (2016). *Análise do Comportamento de Estaca Escavada de Pequeno Diâmetro Submetida a Carregamento Horizontal em Solo Não Saturado*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil / UNICAMP, 224 p.

Mier, J. M. (2001). *Manual de Cimentaciones Profundas*. Capítulo 3: Diseño Geotécnico. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. Mexico D.F. Mexico, 375 p.

Velloso, D. A., Lopes, F. R. (2010) *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas*. São Paulo: Oficina de Textos.

Terzaghi, K. (1955) *Evaluation of coefficients of subgrade reaction*. Géotechnique, London, v.4, no 4, p.297-326.