

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/282

Avaliação da Previsão de Deslocamentos Horizontais em Estacas Escavadas Curtas em Solo Silto-Arenoso

Alexandre Lima Soares e Silva

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, alexandresoaresesilva@gmail.com

Alfran Sampaio Moura

Professor Associado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, alfransampaio@ufc.br

Danton França da Silva

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, dantonfranca@alu.ufc.br

Amanda Darly Brandão Mota França

Universidade de Fortaleza, Fortaleza, Brasil, amandadbmoto@gmail.com

RESUMO: A presente pesquisa busca avaliar a previsão de deslocamento de estacas submetidas a carregamentos horizontais por meio da comparação de diversos métodos disponíveis na literatura, com resultados obtidos de uma prova de carga horizontal realizada em duas estacas executadas em solo silto-arenoso. Foram utilizados os métodos de Miche (1930), Matlock e Reese (1961) e Barber (1953) para a previsão de deslocamentos resultantes da aplicação de carregamentos sucessivos de 10, 20, 30 e 50 kN. Desse modo, foram comparadas as estimativas dos diversos métodos de previsão de deslocamentos laterais através de gráficos, onde foi possível concluir que as previsões de deslocamentos pelos métodos analíticos de Miche (1930), Matlock e Reese (1961) e Barber (1953) apresentaram valores convergentes entre si. Ademais, em comparação aos resultados obtidos do ensaio realizado, as previsões realizadas apresentaram resultados muito superiores (da ordem de 100 vezes) aos obtidos experimentalmente por meio de prova de carga horizontal.

PALAVRAS-CHAVE: Carregamento Lateral, Prova de Carga Horizontal, Previsão de Deslocamentos Horizontais, Estaca Escavada Curta.

ABSTRACT: The present research aims to evaluate the prediction of displacement in piles subjected to horizontal loadings by comparing the accuracy of various methods available in the literature with results obtained from a horizontal load test performed on two piles installed in silty-sandy soil. The methods of Miche (1930), Matlock and Reese (1961), and Barber (1953) were used to predict displacements resulting from successive load applications of 10, 20, 30, and 50 kN. Thus, the estimates of the various methods for predicting lateral displacements were compared through graphs, where it was possible to conclude that the displacement predictions by the analytical methods of Miche (1930), Matlock and Reese (1961), and Barber (1953) showed convergent values. Additionally, compared to the results obtained from the conducted test, the predictions presented much higher results (on the order of 100 times) than those obtained experimentally through the horizontal load test.

KEYWORDS: Lateral Loading, Horizontal Load Test, Prediction of Horizontal Displacements, Short Bored Piles.

1 INTRODUÇÃO

Um projeto convencional de fundações deve atender a três requisitos básicos: o elemento estrutural não deverá romper, o solo não poderá atingir a ruptura e os deslocamentos da estrutura de fundação devem ser inferiores ao deslocamento máximo suportado pela superestrutura. Neste caso, levam-se em consideração apenas carregamentos verticais. Em alguns casos especiais, porém, como em fundações de torres de transmissão, pontes e aerogeradores, deve-se ainda verificar se não haverá ruptura na horizontal e se os deslocamentos horizontais não serão excessivos.

1.1 Objetivo

O objetivo desse artigo é comparar os resultados das previsões de deslocamento horizontal no topo de uma estaca escavada a partir da aplicação de diferentes métodos analíticos com parâmetros obtidos através da realização de ensaios de laboratório e de campo. Para isso, será feito um estudo de caso relativo à execução de estacas escavadas curtas de pequeno diâmetro em perfil de solo silto-arenoso que inclui a realização de uma prova de carga horizontal cujo resultado será comparado com as previsões de deslocamentos no topo obtidas pelos diferentes métodos analíticos.

2 MÉTODOS PARA PREVISÃO DO DESLOCAMENTO HORIZONTAL DE ESTACAS

Os métodos analíticos existentes na literatura que prevêm o deslocamento de estacas carregadas horizontalmente abordam o problema de duas formas distintas: alguns consideram a estaca na condição de trabalho e, neste caso, fornecem previsões aproximadas dos deslocamentos horizontais e dos esforços internos desenvolvidos no elemento; outros consideram a estaca na condição de ruptura ou equilíbrio plástico, fornecendo previsões da carga que levaria à ruptura do solo e/ou da estaca.

O modelo básico utilizado pelos métodos analíticos de previsão dos deslocamentos e esforços internos em estacas submetidas a esforços horizontais é baseado na hipótese de Winkler, segundo a qual o solo solicitado pelo carregamento na estaca pode ser substituído por molas independentes, sendo, neste caso, válida a relação:

$$p = k_h y \quad (1)$$

onde: p = pressão aplicada à estaca (kPa); k_h = coeficiente de reação horizontal do solo (kN/m³); y = deslocamento horizontal (m).

De acordo com o tipo de solo, o coeficiente de reação horizontal (k_h) pode ser constante ou variável com a profundidade. Segundo Terzaghi (1955), para argilas muito sobreadensadas, k_h poderia ser considerado praticamente constante com a profundidade e, no caso de areias e argilas normalmente adensadas, k_h cresceria linearmente com a profundidade, cuja taxa de crescimento é denominada de n_h .

Alguns autores, como Terzaghi (1955) e Davisson (1970), sugerem valores tabelados de k_h e n_h em função do tipo de solo.

Os métodos que solucionam o problema de uma estaca carregada horizontalmente, fornecendo deslocamentos e esforços internos, consideram que a estaca atua como uma viga vertical, portanto, seu comportamento é regido pela equação da viga, ou seja:

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dz^4} = -pd \quad (2)$$

onde: E_p = módulo de elasticidade da estaca (kPa); I_p = momento de inércia da seção da estaca (m⁴); z = profundidade no solo (m); $d^4 y/dz^4$ = derivada de 4º grau de y em relação a z (m⁻³); d = largura ou diâmetro da estaca (m).

Substituindo a primeira equação na segunda, temos:

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dz^4} + k_h y = 0 \quad (3)$$

A Equação 3 pode ser resolvida analiticamente ou através de métodos numéricos. Segundo Poulos e Davis (1980), soluções analíticas são mais convenientes para os casos em que k_h é constante ao longo do comprimento da estaca. Para outros casos de distribuição de k_h , soluções mais convenientes são obtidas pelo método numérico das diferenças finitas (Palmer e Thompson, 1945). Neste caso, na equação anterior, que rege o problema, deve-se inserir o coeficiente de variação de k_h com a profundidade (n_h). Substitui-se, portanto, k_h por ($n_h z/B$) obtendo-se a seguinte equação:

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dz^4} + \frac{n_h}{B} z dy = 0 \quad (4)$$

Hetenyi (1946) propõe equações para determinação do deslocamento horizontal no topo da estaca e momento fletor máximo nos casos em que o coeficiente de reação horizontal (k_h) é constante com a profundidade e o comprimento da estaca (L) é maior que 4 vezes o seu comprimento característico (T):

Para o deslocamento horizontal na superfície do terreno:

$$y_0 = \frac{2H\lambda}{k_h} + \frac{2M\lambda^2}{k_h} \quad (5)$$

Já o momento fletor máximo a uma profundidade aproximada de $0,7/\lambda$ é dado por:

$$M_{m\acute{a}x} = 0,32 \frac{H}{\lambda} + 0,7M \quad (6)$$

onde: H = carga horizontal no topo da estaca; M = momento no topo da estaca.

Sendo que:

$$T = 1/\lambda \quad (7)$$

Por sua vez:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_h B}{4E_p I}} \quad (8)$$

onde: E_p = módulo de elasticidade da estaca (kPa); I = momento de inércia da seção transversal da estaca em relação ao eixo principal ao plano de flexão (m^4).

Miche (1930) foi o primeiro autor a resolver o problema da estaca em solo com um coeficiente de reação horizontal crescendo linearmente com a profundidade propondo as seguintes equações para o deslocamento horizontal no topo da estaca e para o momento fletor máximo (a uma profundidade $1,32 T$):

$$y_0 = 2,40 \frac{T^3 H}{E_p I} \quad (9)$$

$$M_{m\acute{a}x} = 0,79HT \quad (10)$$

Sendo a rigidez relativa estaca-solo ou comprimento característico (T) definido pela seguinte equação:

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I}{n_h}} \quad (11)$$

Matlock e Reese (1961) fornecem uma série de soluções para deflexão, rotação, momento, esforço cortante e pressão ao longo de estacas submetidas a uma força horizontal (H) e a um momento (M) aplicado no topo, considerando o coeficiente de reação horizontal (k_h) variando linearmente com a profundidade. Para estacas longas ($Z_{m\acute{a}x} > 4$), os autores fornecem as equações a seguir para determinação da deflexão (ρ) e momento (M_z) ao longo da estaca.

$$\rho = C_y \frac{HT^3}{E_p I_p} \quad (12)$$

$$M_z = C_m HT \quad (13)$$

onde C_y e C_m são coeficientes de deflexão obtidos graficamente por meio de ábacos, conforme Matlock e Reese (1961), e dados em função do parâmetro de profundidade Z (Equação 14) e diversos valores de $M/(HT)$, onde T é calculado conforme Equação 15.

$$Z = z/T \quad (14)$$

$$T = \left(\frac{E_p I_p}{n_h} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (15)$$

Sendo:

$$Z_{m\acute{a}x} = L/T \quad (16)$$

onde: z = distância abaixo da superfície do terreno; L = comprimento da estaca.

Barber (1953) sugere a seguinte equação para o cálculo do deslocamento horizontal em estacas longas:

$$\rho = \frac{2,4 H}{(n_h)^{\frac{3}{5}} (E_p I_p)^{\frac{2}{5}}} + \frac{1,6 H e}{(n_h)^{\frac{2}{5}} (E_p I_p)^{\frac{3}{5}}} \quad (17)$$

onde: ρ = deslocamento horizontal; H = carga horizontal no topo da estaca; e = distância vertical entre o eixo de aplicação da carga e o nível do solo; E_p = módulo de elasticidade da estaca; I_p = momento de inércia da seção transversal da estaca em relação ao eixo principal ao plano de flexão.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido com base nas seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica acerca dos principais métodos analíticos de previsão de deslocamentos em estacas submetidas a esforços transversais;
- Realização de ensaios de laboratório e de campo para a caracterização geotécnica do solo do local de estudo e obtenção de parâmetros geotécnicos;
- Execução de duas estacas isoladas coroadas com bloco de coroamento;
- Execução de prova de carga horizontal;
- Previsão de deslocamentos horizontais a partir de métodos analíticos consagrados pela literatura;
- Análise e comparação dos deslocamentos obtidos pela prova de carga horizontal com as previsões realizadas.

4 LOCAL DO ESTUDO DE CASO E ENSAIOS REALIZADOS

4.1 Localização

O local de estudo consiste em um campo experimental situado no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará. Neste local foram executadas duas estacas escavadas manualmente com um bloco de coroamento em cada uma delas e submetidas a uma prova de carga horizontal, além disso, foram coletadas amostras de solo para a realização dos ensaios de laboratório e realizado um furo de sondagem à percussão (SPT).

4.2 Estacas executadas

As duas estacas escavadas, submetidas à prova de carga horizontal, possuem seção circular maciça de 10 cm de diâmetro e 1,5 m de comprimento. A armadura de cada estaca é composta por 5 barras de 6,3 mm de diâmetro e estribos de 5 mm a cada 15 cm (Figura 1).

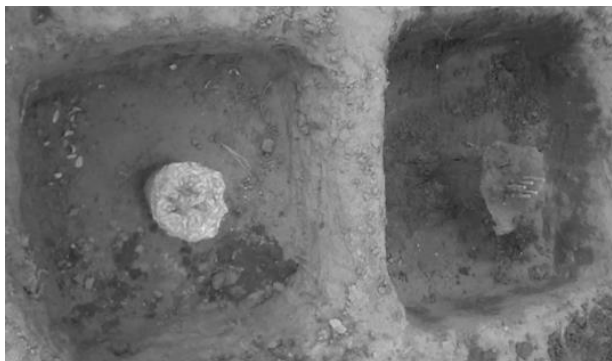


Figura 1. Execução das estacas com bloco de coroamento.

4.3 Ensaios realizados

A caracterização geotécnica da área de estudo foi feita através de ensaios de granulometria (peneiramento e sedimentação) e de índices físicos, a partir de amostras deformadas coletadas a 1,0 m e a 1,5 m de profundidade. Foi realizada ainda uma sondagem à percussão (SPT) até a profundidade de 8,0 m. O detalhamento da execução da prova de carga horizontal e os resultados dos ensaios de laboratório e de campo são apresentados nos subitens posteriores.

4.3.1 Execução da prova de carga horizontal

Os materiais utilizados foram: macaco hidráulico, uma célula de carga, dois extensômetros, pórtico para suporte dos extensômetros, composto de uma viga de alumínio com duas hastes metálicas para apoio no solo, e prolongamentos em forma de discos de ferro.

O macaco hidráulico, juntamente com a célula de carga e os prolongamentos de ferro, foi posicionado entre as duas estacas executadas com as mesmas características (Figura 2). Os extensômetros foram posicionados no mesmo nível de aplicação da carga, na face externa de cada um dos blocos de coroamento. Em seguida foram aplicados 5 estágios de carregamento: 10, 20, 30, 50 e 60 kN e feitas leituras nos dois extensômetros até a estabilização dos deslocamentos.

O deslocamento horizontal de uma estaca, correspondente a cada estágio de carga, foi calculado como a soma das leituras dos dois extensômetros dividido por 2 (média dos deslocamentos horizontais das duas estacas).



Figura 2. Montagem dos equipamentos para execução da prova de carga horizontal.

4.3.2 Apresentação dos resultados dos ensaios de laboratório

A Figura 3 mostra as curvas granulométricas obtidas a partir das amostras 1 e 2 coletadas de 1,0 m a 1,5 m e 1,5 a 2,0 m de profundidade, respectivamente.

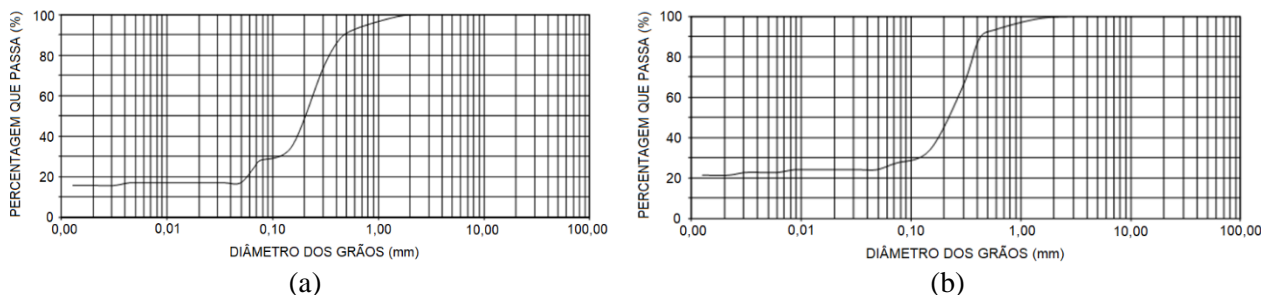


Figura 3. Curva granulométrica: (a) amostra 1; (b) amostra 2.

A Tabela 1, por sua vez, mostra os resultados dos ensaios de granulometria, sedimentação e índices físicos nas duas amostras coletadas.

Tabela 1. Resumo dos ensaios de laboratório da amostra 1 coletada a 1 m de profundidade.

Amostr	Granulometria (% passando)							Limites físicos (%)	
	2"	1"	3/8"	n° 4	n° 10	n° 40	n° 200	LL	IP
1	100	100	100	100	100	87	28	-	-
2	100	100	100	100	100	90	27	-	-

Os ensaios de granulometria mostram que, de acordo com a classificação do SUCS (Sistema Único de Classificação dos Solos), os solos das amostras 1 e 2 são granulares, ou seja, menos de 50% passa na peneira de n° 200, e apresentam uma quantidade considerável de finos (28% no caso da amostra 1 e 27% no caso da amostra 2), porém não apresentam plasticidade.

4.3.3 Apresentação dos resultados dos ensaios de campo

Os ensaios de campo consistiram na realização de uma sondagem à percussão (SPT) e de uma prova de carga horizontal (apenas carregamento), conforme Figura 4.

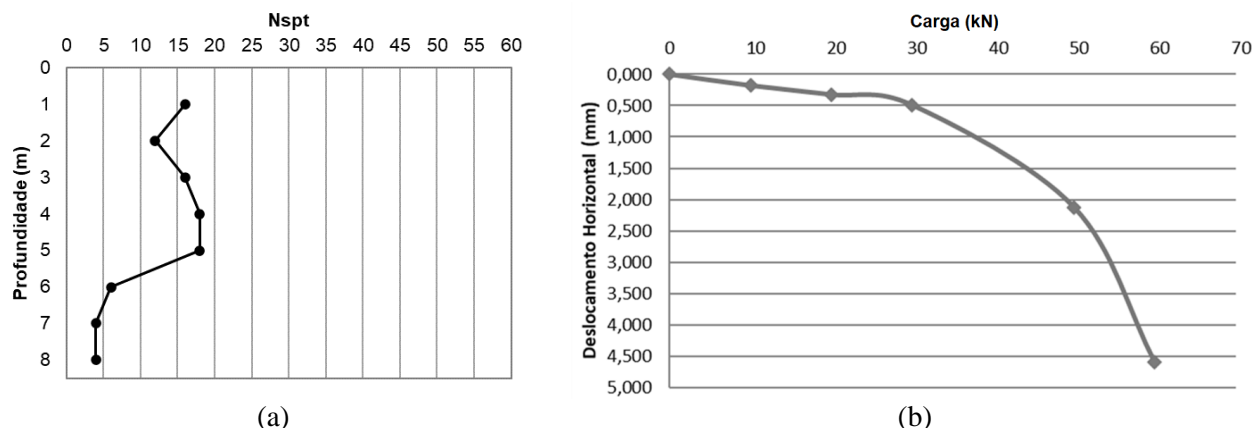


Figura 4. Resultados de ensaios de campo: (a) índice de resistência à penetração (Nspt) com a profundidade; (b) curva carga-deslocamento horizontal.

A sondagem à percussão realizada no campo experimental indicou que o solo do local de estudo é, predominantemente, do tipo silte-arenoso (enquanto pela granulometria apontasse uma areia fina a média) com compactidade variando de fofo a medianamente compacto ao longo de todo o furo.

O perfil da sondagem mostra também que o índice de resistência a penetração (Figura 4a) varia em torno de 15 até a profundidade de 5 m e desta em diante permanece próximo de 5 golpes até a profundidade limite da sondagem (8 m). O nível d'água foi localizado a 7,36 m de profundidade.

Quanto ao resultado da prova de carga horizontal (Figura 4b), o deslocamento horizontal máximo correspondente à máxima carga aplicada (6 tf ou 60 kN) foi de 4,6 mm e, a partir do gráfico da Figura 4b, considerou-se que a ruptura física tem início com a carga horizontal de 4 tf (ou 40 kN), por representar uma área de maior curvatura do gráfico carga-deslocamento. Pode-se, portanto, considerar 2 tf (20 kN) o valor referente a carga de trabalho, adotando um fator de segurança de 2.

5 PREVISÃO DOS DESLOCAMENTOS LATERAIS E COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Previsões dos deslocamentos horizontais das estacas estudadas

Em uma análise inicial, estimou-se o deslocamento horizontal de uma estaca escavada vertical de 10 cm de diâmetro e 1,5 m de comprimento submetida a quatro estágios de carga horizontal em sua extremidade superior (topo da estaca) cujo ponto de aplicação coincide com o nível do terreno (desconsiderou-se o momento gerado pela distância entre o eixo de aplicação da carga, do macaco hidráulico, e o solo).

Pelo gráfico de barras da Figura 5 comparam-se os resultados obtidos das previsões de deslocamento realizadas por diferentes métodos para quatro estágios de carregamento horizontal: 10 kN, 20 kN, 30 kN e 50 kN.

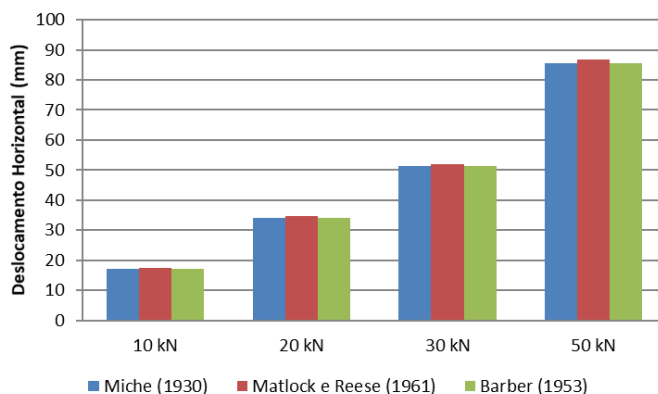


Figura 5. Previsões de deslocamento do topo da estaca.

Observa-se no gráfico que as previsões de deslocamento horizontal pelos métodos de Miche (1930) e Barber (1953) são iguais e muito próximas das previsões pelo método de Matlock e Reese (1961).

5.2 Comparação das previsões dos deslocamentos horizontais com os resultados da prova de carga horizontal

No gráfico da Figura 6 comparam-se os resultados das previsões dos deslocamentos pelos diferentes métodos com os deslocamentos medidos em campo através da realização da prova de carga horizontal. Os estágios de carga considerados foram os mesmos da Figura 5.

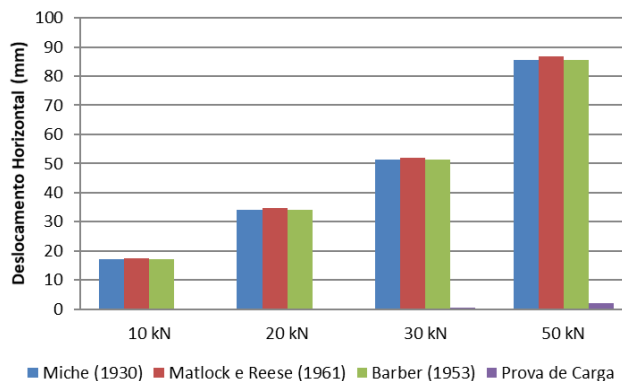


Figura 6. Comparação das previsões de deslocamento do topo da estaca pelos diferentes métodos com os obtidos pela prova de carga horizontal.

Através da Figura 6, observa-se que os três métodos analíticos utilizados apresentaram previsões de deslocamentos horizontais muito discordantes dos deslocamentos obtidos pela prova de carga horizontal para todos os estágios de carga.

Tendo sido adotada uma carga de ruptura física de 40 kN (4 tf), pode-se considerar uma carga de trabalho de 20 kN (2 tf), adotando um fator de segurança de 2. Para esta carga, o valor de deslocamento horizontal obtido pela prova de carga foi 0,32 mm, sendo este valor muito inferior aos valores das previsões pelos três métodos analíticos utilizados (cerca de 100 vezes menor), esta condição pode apontar falhas na definição das características de resistência e deformabilidade da fundação e aplicação do método para estacas pequenas (como as empregadas neste estudo, de 1,50 m de comprimento) e em regiões de clima tropical.

6 CONCLUSÃO

Os métodos de Miche (1930), Matlock e Reese (1961) e Barber (1953) fornecem valores de previsões de deslocamentos muito próximos. Porém, quando comparados com os valores de deslocamentos medidos pela prova de carga horizontal, as previsões realizadas com os três métodos utilizados são muito diferentes (cerca de 100 vezes maior). Dessa forma, observa-se que, a partir das estacas estudadas, as previsões dos deslocamentos horizontais realizadas analiticamente são superestimadas e aumentam na proporção que o carregamento horizontal aplicado também aumenta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Rochabrasil Engenharia pelo seu apoio durante a etapa prática deste trabalho, o POSDEHA pelo incentivo à pesquisa, a CAPES e o CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Davisson, M. T. (1970) Lateral load capacity of piles. *Highway Research Record*, n. 333.
- TERZAGHI, K. (1955) Evaluation of coefficients of subgrade reaction, *Geotechnique*, v. 5, n. 4, p. 297-326.
- HETENYI, M. (1946) *Beams on elastic foundation*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Poulos, H. G.; Davis, E. H. (1980) *Pile foundation analysis and design*. New York: John Wiley & Sons.
- MATLOCK, H.; REESE, L. C. (1961) Foundation analysis of offshore pile supported structures. In: ICSMFE, 5., 1961. *Proceedings...* Paris, p. 91-97.
- MICHE, R. J. (1930) Investigation of piles subject to horizontal forces: application to quay walls. *Journal of the School of Engineering*, n. 4.
- BARBER, E. S. (1953) Discussion to paper by SM Gleser. *ASTM, STP*, v. 154, p. 96-99.