

Coeficiente de Reação Horizontal do Solo de Estacas Cravadas Metálicas em Areia Pura

Arthur Gomes Dantas de Araújo
UFERSA, Angicos/RN, Brasil, arthur.araujo@ufersa.edu.br

Yuri Daniel Jatobá Costa
UFRN, Natal/RN, Brasil, ydjcosta@ct.ufrn.br

Avelino Lourenço da Silva Júnior
Geoquality Geotecnia Ltda, Natal/RN, Brasil, avelino@geoquality.com.br

RESUMO: Um estudo experimental foi realizado para investigar o comportamento de estacas cravadas metálicas submetidas a carregamentos laterais em areia. As estacas foram ensaiadas em duas regiões diferentes no mesmo local, denominados neste trabalho por região A e B. Ambas as regiões eram compostas por um aterro superficial de 3 m de espessura de areia fina, seguido de camadas naturais de areia fina a grossa. Os aterros das regiões A e B diferenciam-se pela densidade relativa com que foram compactados, 45% e 70%, respectivamente. Cada área recebeu dois pares idênticos de estacas metálicas com perfil “H”. Em cada par de estacas foi executada uma prova de carga estática. O coeficiente de reação horizontal do solo, n_h , foi determinado através dos resultados das provas de carga e comparado com valores obtidos a partir de correlações baseadas no índice de resistência à penetração do ensaio SPT (NSPT). Foram obtidos valores de n_h variando entre 17,7 e 22,3 MN/m³ para a região A e entre 54,5 e 103,4 MN/m³ para a região B.

PALAVRAS-CHAVE: Coeficiente de Reação Horizontal, Prova de Carga, Carregamento lateral, Areia.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o uso de estacas como elemento estrutural de fundações tornou-se um dos meios mais tradicionais para distribuir os esforços das estruturas para o solo.

Em diversas situações, além de resistirem aos esforços verticais, as estacas devem resistir também às solicitações horizontais às quais são submetidas. São os casos, por exemplo, de fundações de pontes e edifícios elevados, torres de transmissão de energia elétrica, estruturas “off-shore” e de estruturas de contenção. Essas solicitações horizontais são oriundas do vento, ondas marítimas, empuxos de terra e de esforços de zonas de elevados riscos sísmicos.

No projeto de uma fundação submetida a um carregamento horizontal é importante calcular

os deslocamentos e obter os esforços na estaca, o que engloba um estudo teórico tridimensional de difícil modelagem matemática (Miguel, 1996). Por isso, o surgimento e o uso generalizado de métodos de cálculos baseados em hipóteses simplificadoras, por serem de simples utilização, como é o caso dos métodos da teoria de reação do solo (Cintra, 1981). Esta teoria tem como objetivo principal a idéia de que a reação do solo é proporcional ao deslocamento horizontal, semelhante à hipótese de Winkler para o problema da viga sobre apoio elástico.

Este trabalho tem como objetivo obter e comparar os coeficientes de reação horizontal do solo n_h através das provas de carga estáticas pelo método de Matlock e Reese (1961), e por correlações obtidas através de sondagens SPT

realizadas no local.

2 COEFICIENTE DE REAÇÃO HORIZONTAL DO SOLO

Na literatura técnica, a análise do comportamento de estacas isoladas submetidas a carregamento lateral, ou seja, a previsão dos deslocamentos, rotações e esforços gerados na estaca, tems eguido basicamente quatro linhas de abordagens (Fan e Long, 2005): modelos baseados em equilíbrio limite, modelos elásticos, modelos baseados no método dos elementos finitos e modelos baseados no coeficiente de reação horizontal do solo.

Cada grupo possui suas vantagens e desvantagens. Os modelos baseados no coeficiente de reação horizontal do solo consideram a Hipótese de Winkler, proposta em 1867, a qual trata o problema de uma viga sobre um meio elástico. Pode-se considerar que existe uma proporcionalidade linear entre o carregamento lateral e o deslocamento ocorrido na estaca.

Prakash e Sharma (1990) consideram os métodos pertencentes a este grupo como os mais utilizados na prática de projetos de fundações. Sales et al. (1998) citam em seu trabalho algumas vantagens de se aplicar este método, como a experiência acumulada devido a sua ampla utilização, e a possibilidade dos parâmetros do solo obtidos da relação tensão – deslocamento variarem ao longo do comprimento da estaca. A Figura 1 ilustra a reação do solo atuante em uma estaca sujeita a uma carga lateral H modelada pela hipótese de Winkler.

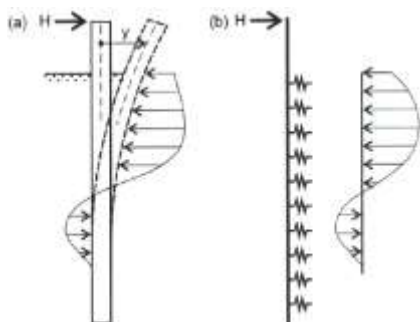


Figura 1. Reação do solo (a) estaca no terreno e (b) problema modelado pela Hipótese de Winkler (Velloso e Lopes, 2010).

A Equação 1 correlaciona a relação entre a tensão horizontal exercida pelo elemento de fundação e o respectivo deslocamento horizontal sofrido.

$$k_h = \frac{\text{tensão horizontal}}{\text{deslocamento horizontal}} = \frac{q}{y} \quad (1)$$

Esta relação foi denominada por Terzaghi (1955) de coeficiente de reação horizontal do solo. No caso de areias ou argilas normalmente adensadas a notação n_h é mais conveniente (Cintra, 1981).

Utilizando a expressão de Matlock e Reese (1961), Alizadeh e Davisson (1970) apresentaram uma relação entre o coeficiente de reação horizontal do solo, n_h , e o deslocamento horizontal da estaca na superfície do solo, y_0 .

$$y_0 = 2,435 \cdot H \cdot \frac{T^3}{EI} + 1,623 \cdot (H \cdot e) \cdot \frac{T^2}{EI} \quad (2)$$

em que:

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}}$$

Na Equação 2, o deslocamento e a carga horizontal são obtidos junto à superfície do terreno. Neste enfoque, Cintra (1981) adequou o procedimento para a carga horizontal aplicada a uma distância vertical “e”, acima da superfície do terreno, no mesmo ponto onde seria realizada a leitura do deslocamento horizontal da estaca, dado por y_t . Cintra (1981) utilizou a proposta de Kocsis (1971), que afirma que o deslocamento horizontal final, y_t , é obtido por três parcelas de deslocamentos, dados pela Equação 3.

$$y_t = y_0 + y_1 + y_2 \quad (3)$$

em que:

y_1 = parcela do deslocamento horizontal devido à rotação, θ_0 , na cabeça da estaca.

y_2 = parcela do deslocamento horizontal devido ao momento gerado pela excentricidade na aplicação do carregamento

A Equação 3 foi adaptada por Miguel (1996) para as situações em que as leituras do deslocamento horizontal são feitas a uma distância e' acima do ponto de aplicação do carregamento (Figura 2).

Nesta configuração, y_0 é o deslocamento horizontal da estaca ao nível do fundo de uma cava. As leituras do deslocamento horizontal são realizadas a uma distância vertical e' acima do ponto de aplicação do carregamento, resultando em mais uma parcela do deslocamento total y_t . Esta nova parcela, dada por y_3 , é obtida derivando-se a parcela, y_2 conforme a Equação 4. O deslocamento horizontal total y_t é dado pela Equação 5.

$$y_t = y_0 + y_1 + y_2 + y_3 \quad (5)$$

4 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO DO LOCAL DA PESQUISA

Como os resultados das sondagens foram interpretados visando à estimativa de parâmetros de comportamento do solo, houve necessidade de corrigir os valores de N_{SPT} .

A parte experimental do presente estudo foi desenvolvida no terreno de uma obra localizado no Bairro de Lagoa Nova da Cidade de Natal – RN.

COBRAMSEG 2016

sistema é função das perdas por atrito e da dinâmica de transmissão de energia do conjunto.

A prática internacional sugere normalizar o valor da resistência à penetração (NSPT) com base no padrão americano de N_{60} , ou seja, a energia liberada da queda do martelo referida a 60% da energia teórica (Schnaid, 2000).

A correção para um valor de penetração de referência, normalizado com base no padrão americano de N_{60} foi feita através de uma relação linear entre a energia empregada e a energia de referência teórica, conforme a Equação 6 (Schmertmann e Palacios, 1979).

$$N_{60} = \frac{N_{SPT} * Energiaaplicada}{0,60} \quad (6)$$

Para tornar possível a correção dos valores de NSPT obtidos nas sondagens realizadas pelas Equipes X e Y, foi necessário proceder à medição de eficiência das duas equipes. As medições de eficiência foram efetuadas através da execução de séries de provas de carga estática sobre o amostrador padrão do ensaio SPT. Maiores detalhes sobre esses ensaios e seus resultados podem ser obtidos em Costa et al. (2012). Foram verificadas eficiências médias iguais a 84% e 74% para as equipes X e Y, respectivamente.

Além da correção da energia de cravação, é recomendável, para ensaios realizados em solos granulares, corrigir o valor de NSPT considerando o nível médio de tensões na profundidade onde o ensaio está sendo executado (Schnaid, 2000). Décourt (1989) recomenda que os valores de N_{60} sejam corrigidos pela Equação 7.

$$(N_{60})_1 = C_N N_{60} \quad (7)$$

em que:

$(N_{60})_1$: valor de referência de resistência à penetração corrigido para uma tensão de referência de 100 kPa;

C_N : correção devida à tensão efetiva na profundidade considerada.

As Figuras 4 e 5 apresentam os perfis típicos do subsolo das Regiões A e B, respectivamente. São apresentados valores médios de $(N_{60})_1$ obtidos a partir das sondagens, além de valores de ângulo de atrito interno (ϕ) e peso específico aparente do solo (γ). Não foi encontrado o nível do lençol freático nas duas regiões em estudo.

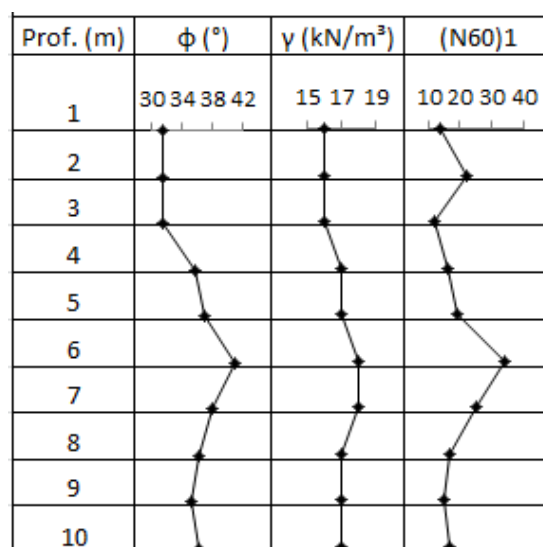


Figura 4. Perfil típico do subsolo da Região A.

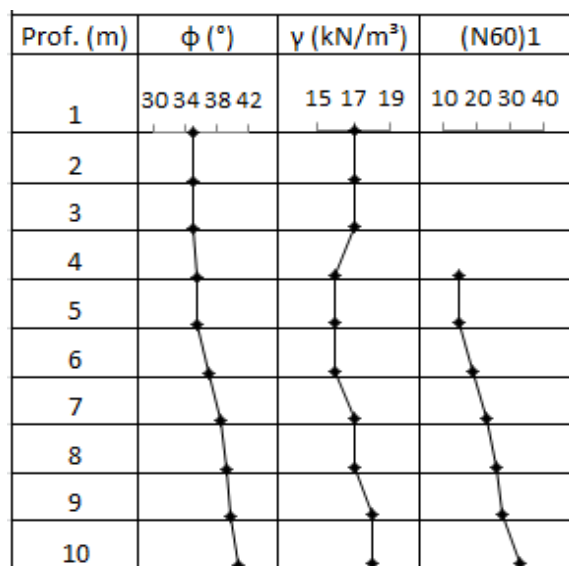


Figura 5. Perfil típico do subsolo da Região B.

5 PROVAS DE CARGA ESTÁTICA

Foram ensaiados quatro pares de estacas em carregamento lateral, sendo dois pares na Região A e outros dois na Região B. Todos os ensaios foram executados de acordo com as premissas da NBR 12131/06. Cada região recebeu dois pares de estacas metálicas

cravadas (pares EM-1 e EM-2; EM-3 e EM-4), cada par com seções transversais distintas.

As estacas metálicas possuíam seção transversal do tipo “H” com dimensões de 315 x 315 mm (EM-1 e EM-2) e 355 x 160 mm (EM-3 e EM-4). Todas as estacas metálicas possuíam comprimento igual a 6 m, sendo 4,5 m enterrados e 1,5 m acima da superfície do terreno.

A Tabela 1 apresenta a sequência e a designação dos ensaios.

Tabela 1. Sequência de execução das provas de carga e designação usada.

Ensaio	Região	Designação	Estacas
1	A	EM12-A	EM1-A e EM2-A
2	A	EM34-A	EM3-A e EM4-A
3	B	EM12-B	EM3-B e EM4-B
4	B	EM34-B	EM1-B e EM2-B

As Figuras 6 e 7 apresentam a configuração esquemática e montagem das provas de carga, respectivamente.

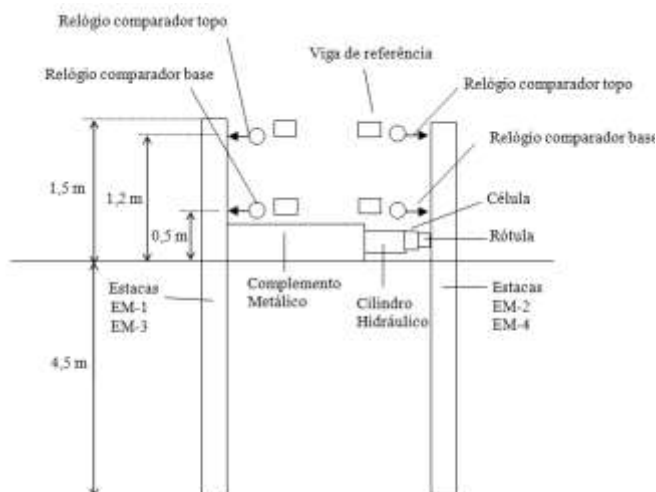


Figura 6. Configuração das provas de carga com carregamento horizontal em estaca metálica.

Todas as provas de carga realizadas foram do tipo QML (quick maintained load), ou seja, com carga mantida constante durante estágios de cinco minutos de duração, sendo as leituras dos deslocamentos horizontais efetuadas a cada minuto (Fellenius, 1975).



Figura 7. Montagem de uma prova de carga horizontal em estacas metálicas.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A variação do coeficiente de reação horizontal (n_h) em função do deslocamento horizontal (y_0) é apresentada na Figura 8. As curvas foram traçadas a partir das Equações 2 a 5, propostas por Matlock e Reese (1961). As curvas foram obtidas apenas para as leituras dos relógios comparadores “base”.

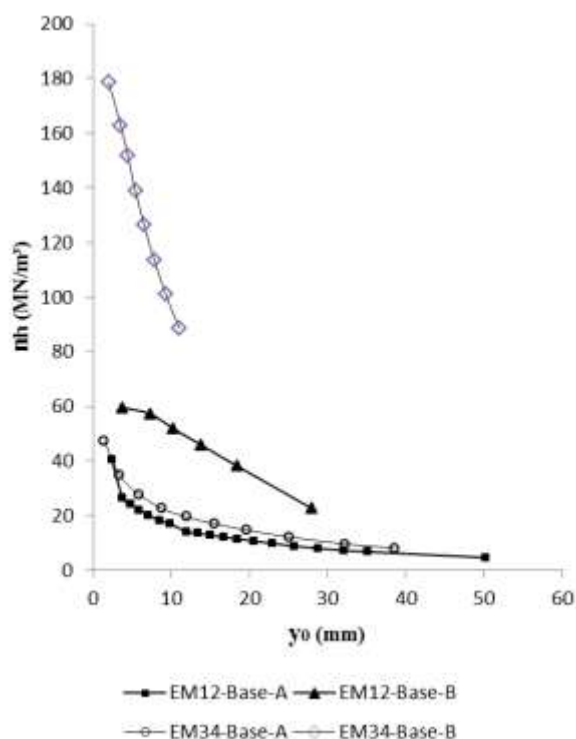


Figura 8. Curvas y_0 versus n_h das estacas metálicas nas Região A e B.

Para a definição do valor do coeficiente de reação horizontal do solo, n_h , é preciso definir

uma faixa de deslocamentos horizontais na superfície, y_0 , para a qual o parâmetro será obtido. É comum convencionar a determinação de n_h em intervalos de deslocamentos horizontais entre 6,0 e 12,0 mm (Miguel, 1996; Carvalho et al., 1996; Miranda Júnior, 2006; Menezes et al., 2004; e Zammataro, 2007). Este intervalo é assumido como representativo dos deslocamentos horizontais observados em estacas carregadas lateralmente.

Analisando-se as curvas $y_0 \times n_h$ apresentadas na Figura 8, observa-se que as curvas das estacas metálicas da Região A têm a mesma conformação obtida por Alizadeh e Davisson (1970), ou seja, que o coeficiente de reação horizontal do solo diminui à medida que os deslocamentos horizontais na superfície aumentam, tendendo a um valor assintótico com o eixo horizontal. Já as curvas referentes às estacas metálicas da Região B, não reproduzem bem esta constatação.

Os valores de n_h foram obtidos para $y_0 = 6$ e 12 mm, deslocamentos que representam os limites inferior e superior da faixa comumente utilizada para a determinação de n_h , como anteriormente mencionado. Em complementação, também foi determinado n_h para o deslocamento médio de 9 mm, sendo este valor considerado como representativo para a estaca correspondente nas análises feitas a seguir. Na Tabela 2, apresentam-se os valores de n_h calculados para cada estaca ensaiada, para as Regiões A e B, respectivamente.

Tabela 2. Valores de n_h (MN/m³) determinados para os deslocamentos horizontais y_0 nas estacas das Regiões A e B.

Região	Estaca	$y_0=6\text{mm}$	$y_0=9\text{mm}$	$y_0=12\text{mm}$
A	EM12-Base	21,9	17,7	14,4
A	EM34-Base	27,4	22,3	19,4
B	EM12-Base	57,4	54,5	49,0
B	EM34-Base	132,5	103,4	-

Entre as Regiões A e B, verifica-se que houve uma diferença significativa dos valores obtidos de n_h . O coeficiente de reação horizontal médio da Região A foi 68% e 78% inferiores aos da Região B, para as estacas metálicas EM12 e EM34, respectivamente.

Essa grande diferença de valores entre as

Regiões A e B se deve ao aterro compactado com maior densidade relativa na Região B, o que confere uma maior resistência lateral. O aterro na Região B foi compactado com $D_r = 70\%$, enquanto que na Região A o aterro foi compactado com $D_r = 45\%$.

Com o uso da Equação 8, foi estimado o valor de n_h através dos resultados NSPT de sondagens de simples reconhecimento, proposto por Décourt (1991). Os valores de resistência a penetração foram corrigidos para (N60)1 e foram determinados a cada metro ao longo do perfil das Regiões A e B. A Figura 9 apresenta a variação de n_h , obtido pelo (N60)1, ao longo da profundidade.

$$n_h = 1,6 \times N_{SPT} \quad (8)$$

A proposta de Décourt (1991) para estimar n_h deve ser usada apenas para estimativas preliminares. É recomendado compará-lo aos valores experimentais de n_h determinados, conforme apresentado na Tabela 3.

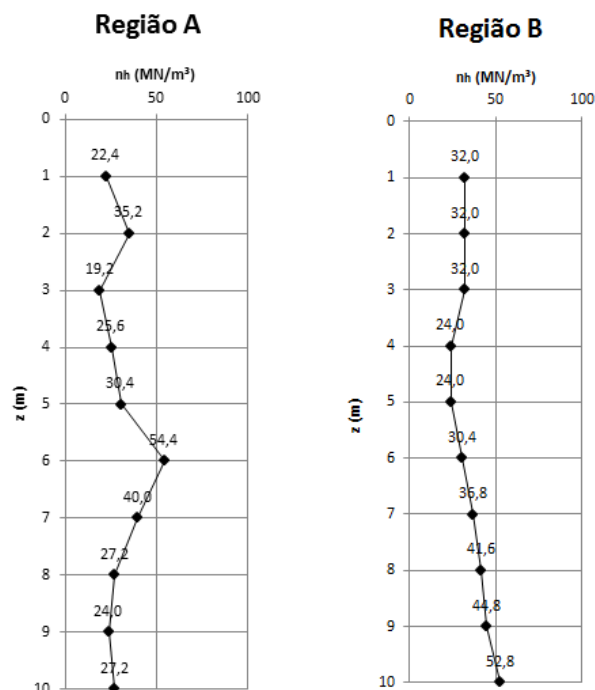


Figura 9. Variação de n_h ao longo do perfil nas Regiões A e B.

Tabela 3. Comparação entre os valores de n_h (MN/m³).

Região	Estaca	Alizadeh e Davisson (1970)	Décourt (1991)
A	EM12-Base	17,7	22,4
A	EM34-Base	22,3	22,4
B	EM12-Base	54,5	32,0
B	EM34-Base	103,4	32,0

Para a Região A, verifica-se que o valor de n_h obtido por Décourt (1991), apresenta resultado bem próximo dos valores obtidos por Alizadeh e Davisson (1970).

A comparação também foi feita para a Região B. O valor de n_h obtido por Décourt (1991) foi aproximadamente 40% e 70% inferiores aos valores de n_h determinados pelo método de Alizadeh e Davisson (1970) para as estacas metálicas EM12 e EM34, respectivamente.

6 CONCLUSÕES

Os valores de n_h foram obtidos para $y_0 = 6$ e 12 mm, deslocamentos que representam os limites inferior e superior da faixa comumente utilizada para a determinação de n_h . Em complementação, também foi determinado n_h para o deslocamento médio de 9 mm, sendo este valor considerado como representativo para a estaca correspondente nas análises.

Foram obtidos valores de n_h variando entre 17,7 e 22,3 MN/m³ para a Região A e entre 54,5 e 103,4 MN/m³ para a Região B.

Entre as Regiões A e B, verifica-se que houve uma diferença significativa dos valores obtidos de n_h . O coeficiente de reação horizontal médio para as estacas metálicas EM12 da Região A foi 68% inferior ao da Região B. Já para as estacas metálicas EM34 a redução do coeficiente de reação horizontal médio da Região A para a Região B foi igual a 78%.

Essa grande diferença de valores entre as Regiões A e B se deve ao aterro compactado com maior densidade relativa na Região B, o que confere uma maior resistência lateral. O aterro na Região B foi compactado com $D_r = 70\%$, enquanto que na Região A o aterro foi compactado com $D_r = 45\%$.

Estimou-se o valor de n_h através dos resultados NSPT de sondagens de simples reconhecimento, proposto por Décourt (1991).

Para a Região A, verifica-se que o valor de n_h obtido por Décourt (1991), foi concordante com os resultados obtidos por Alizadeh e Davisson (1970).

Para a Região B, o valor de n_h obtido por Décourt (1991) foi aproximadamente 40% e 70% inferiores aos valores de n_h determinados

pelo método de Alizadeh e Davisson (1970) para as estacas metálicas EM12 e EM34, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Geoquality Geotecnia Ltda pelo apoio na execução das provas de carga estáticas horizontais.

REFERÊNCIAS

- Alizadeh, M.; Davisson, M. T., (1970) *Lateral Load Tests on Piles*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, Vol. 96, nº5, p. 1583-1604.
- Almeida, M. A. de (2008) *Análise do Comportamento de Estacas Strauss Submetidas a Carregamento Horizontal no Solo da Região de Londrina – PR*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 167p.
- Araújo, A.G.D. (2013) *Provas de Carga Estática com Carregamento Lateral em Estacas Hélice Contínua e Cravadas Metálicas em Areia*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 250p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 12131/2010. *Prova de Carga Estática*. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- Carvalho, B.; Albuquerque, P.J.R.; Claro, A.T.; Ferreira, C.V. (1996) *Análise de Estaca Carregada Transversalmente no Topo, em Solo Residual de Diabásio*. 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais. São Paulo, Vol.1, p.145-154.
- Cintra, J.C.A. (1981) *Uma Análise de Provas de Carga Lateral em Estacas e Comparação com os Métodos da Teoria de Reação Horizontal do Solo*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 150p.
- Costa, Y.D.J.; Costa J.P.S.; Silva Jr, A.L. (2012) *Medidas da Eficiência do Ensaio SPT em Areia Através de Provas de Carga Estática no Amostrador Padrão (PCESPT)*. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Porto de Galinhas, Pernambuco.
- Décourt, L. (1989). *The Standard Penetration Test – State – of – the – Art Report*, Proc., XII ICSMFE, vol. IV, pp. 2405-2416, Rio de Janeiro.
- Décourt, L. (1991) *Load – Deflection Prediction for Laterally Loaded Piles Based on N-SPT Values*. Proceedings of The 4º International Conference on Piling and Deep Foundations, A.A. Balkema, vol.01, p.549-555.
- Fan, C.C.; Long, J.H. (2005) *Assessment of Existing Methods for Predicting Soil Response of The*

- Laterally Loaded Piles in Sand*. Computers and Geotechnics. P.274-289.
- Fellenius, B.H. (1975) *The Load of Piles and New Proof Testing Procedures*. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, v.101,n.GT9, p.855-869.
- Kocsis, P. (1971) *Discussion of Lateral Load Tests on Piles – Arkansas River Project*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, v.97, n° SM6, p. 932-935.
- Matlock, H.; Reese, L.C. (1961) *Foundation Analysis of Offshore Pile Supported Structures*. Proc. 5° International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering. ICSMFE, Paris, France, vol. 2, p. 91-97.
- Menezes, S.M.; Carvalho, D.; Sampaio, F.M.T.; Ribeiro, K.D. (2004) *Determinação do Coeficiente de Reação Horizontal do Solo em Estacas Pré-Moldadas de Concreto Cravadas em Solo de Alta Porosidade*. V SEFE. São Paulo, vol.2, p.507-516.
- Miguel, M.G. (1996) *Execução e Análise de Provas de Carga Horizontal em Estacas em Solo Colapsível*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 168p.
- Miranda Júnior, G. (2006) *Estacas Submetidas a Esforços Horizontais em Solos Colapsíveis do Interior de São Paulo nas Condições Natural, Melhorada e Inundada*. Tese (Doutorado). Campinas/SP, 328p.
- Prakash, S.; Sharma, H. D. (1990) *Pile Foundations in Engineering Practice*. New York: John Wiley e Sons.
- Sales, M.M.; Cunha, R.P.; Farias, M.M (1998) *O Uso do Método das Diferenças Finitas na Análise de Estacas Carregadas Lateralmente*. Congresso Brasileiro de Mecânica do Solo e Engenharia Geotécnica, XI COBRAMSEG, Brasília, Brasil, p. 245-252.
- Schmertmann, J.H.; Palacios, A. (1979). *Energy Dynamics of SPT*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE, v.105, nGT8, p.909-926.
- Schnaid, Fernando (2000). *Ensaio de Campo e Suas Aplicações à Engenharia de Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.
- Terzaghi, K. (1955) *Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction*. Géotechnique, The Institution of Civil Engineers. Londres, v.5, n°4, p. 297-326.
- Velloso, D.A.; Lopes, F.R. (2010) *Fundações: Critérios de Projeto, Investigação do Subsolo, Fundações Superficiais, Fundações Profundas*. São Paulo: Oficina de Textos. 528p.
- Zammataro, Bruno Braz (2007) *Comportamento de Estacas Tipo Escavada e Hélice Contínua Submetidas a Esforços Horizontais*. Dissertação (Mestrado). Unicamp/SP. 187p.