

VERIFICAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS ESCAVADAS DE GRANDE DIÂMETRO ATRAVÉS DE MÉTODOS GEOTÉCNICOS COMPARADOS COM ENSAIOS DE CARREGAMENTO DINÂMICO

Rodrigo Cerqueira Rogério (Universidade Nove de Julho) E-mail: rodrigorogerioudorad@gmail.com

Resumo: A capacidade de carga das estacas escavadas com o uso de fluido estabilizante pode sofrer variações diante da interação solo estrutura além da sua metodologia de execução através do uso de fluido estabilizante com polímero sintético, podendo comprometer sua parcela de resistência lateral devido à formação do cake. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade de carga de estacas de grande diâmetro executadas através de ensaio de carregamento dinâmico (PDA) em solos coesivos na zona Leste de São Paulo, no subsolo local foram realizados ensaios de campo e laboratoriais possibilitando as análises realizadas. Foram realizadas comparações com a carga obtida in loco através da aplicabilidade de fórmulas de previsão da carga de ruptura através dos métodos semi-empíricos mais consagrados na literatura Aoki e Velloso (1975), Decourt (1996) e Teixeira (1996), além das análises pelos métodos de extrapolação da curva carga x recalque Chin (1978), Decourt (1996), Van Der Veen (1953) e Mazurkiewicz (1972). Dos resultados obtidos foi possível confrontar os dados através das análises estatísticas verificando que os métodos de Decourt (1996) e Teixeira (1996) tem previsões satisfatórias, Mazurkiewicz (1972) mostrou ser o mais eficiente, porém para uso do método faz-se necessário uma curva bem caracterizada de ruptura.

Palavras-chave: Estaca escavada de grande diâmetro, Prova de carga dinâmica, Métodos semi-empíricos, Extrapolação curva carga recalque.

VERIFICATION OF LOAD CAPACITY IN EXTENDED DIAMETER STAKES THROUGH GEOTECHNICAL METHODS COMPARED WITH DYNAMIC LOADING TESTS

Abstract: The load capacity of the excavated piles with the use of stabilizing fluid can undergo changes in the soil structure interaction in addition to its execution methodology through the use of stabilizing fluid with synthetic polymer, which may compromise its lateral resistance plot due to cake formation. The present work has the objective of evaluating the load capacity of large diameter cuttings executed through a dynamic load test (PDA) in cohesive soils in the East zone of São Paulo, in the local subsoil, field and laboratory tests were carried out, allowing the analysis carried out. Comparisons were made with the load obtained in loco through the applicability of rupture loading prediction formulas through the most conspicuous semi-empirical methods in the literature Aoki and Velloso (1975), Decourt (1996) and Teixeira (1996), besides the analyzes (1978), Décourt (1996), Van Der Veen (1953) and Mazurkiewicz (1972). From the results obtained it was possible to confront the data through the statistical analysis verifying that the methods of Decourt (1996) and Teixeira (1996) are predicted satisfactory, Mazurkiewicz (1972) was shown to be the most efficient, however for the use of the method it is necessary a well characterized curve of rupture.

Keywords: large diameter excavated pile. dynamic load test. Semi-empirical methods. Extrapolation curve load-bearing

1. Introdução

A construção das grandes obras de infraestrutura e predial nas últimas décadas tem sido um desafio para a engenharia geotécnica, devido a previsão do comportamento carga x recalque e da distribuição de cargas ao longo do fuste de estacas profundas com grande diâmetro. A necessidade de transmissão de elevadas cargas ao solo se traduz na necessidade da compreensão do comportamento de estacas submetidas a carregamentos axiais e dos mecanismos de interação solo-estrutura para melhor entendimento das limitações dos métodos de cálculo para a determinação de sua capacidade de carga.

Como alternativa as escavações onde se necessita de revestimento para manter a integridade do fuste das estacas, a utilização de fluídos estabilizantes possuem a principal função de conferir estabilidade ao furo durante a execução de fundações profundas como paredes diafragma e estacas escavadas de grande diâmetro, principalmente em solos com baixa resistência.

De acordo com Brown et al. (2010) o uso de polímeros tornou-se popular, em comparação com lamas bentoníticas, porque exigem menos processamento antes de serem reutilizados e os custos da eliminação são inferiores além de aspectos ambientais. Os polímeros desenvolvem uma fina membrana nas paredes da escavação, controlando a perda de fluidos, propriedade similar ao “cake” formado pelas lamas bentoníticas.

Estudos realizados por Thasnanipan et al. (2002), O'Neill e Hassan (1994) e Majano et al. (1994), não verificaram alterações na estabilidade das perfurações através de estacas escavadas com polímero, sendo comprovada sua integridade através de provas de carga, demonstrando que o deslocamento medido no topo das estacas foram menores nas escavações onde utilizou-se fluído a base de polímero, além, da capacidade de carga chegar a 1,5 vezes o valor no atrito lateral comparado com estacas executadas com o uso de lama bentonítica.

Segundo Lam et al. (2015) e Brown et al. (2010) os principais riscos associados com o uso de polímeros para estabilização estão relacionados a incompatibilidade com as condições do tipo de solo, água de mistura, danos nas cadeias poliméricas devido a equipamentos de mistura inadequados de baixa rotação, instabilidade do furo devido à pressão insuficiente, inadequado tempo de sedimentação e limpeza.

O objetivo da presente pesquisa consiste em verificar o desempenho de estacas escavadas de grande diâmetro executadas com polímero sintéticos em solos coesivos, através da avaliação das estimativas de métodos semi-empíricos e da extrapolação da curva carga x recalque, comparadas aos resultados obtidos in loco através de provas de carga dinâmica, este conhecimento servirá de referência teórica ao desenvolvimento de banco de dados para previsão de desempenho de estacas de grande diâmetro por meio de métodos de previsão usados na prática de engenharia geotécnica.

O desempenho dos métodos foram realizados através de análises estatísticas dos dados, possibilitando contribuir à melhor estimativa de capacidade de carga e melhor extrapolação da curva carga x recalque, através de um intervalo de confiança das previsões. As estatísticas permitem afastar as incertezas que dificultam a determinação de valores obtidos em projetos em relação aos ensaios geotécnicos, fazendo com que os projetistas recorram a bibliografia com maior embasamento técnico, no objetivo de dimensionar as fundações das obras sem levar as estruturas a superdimensionamentos ou mesmo a erros de projeto.

2. Materiais e Métodos

A proposta para elaboração da pesquisa consiste em avaliar três estacas de grande diâmetro (Figura 1a) executadas em uma obra de infraestrutura localizada na região da Zona Leste da cidade de São Paulo. A análise será realizada através da investigação de campo através de ensaios destinados a

definir a estratigrafia e características do subsolo, e provas de carga dinâmica (PDA) com martelo de 25 tf (Figura 1b). O desempenho das estacas escavadas usando fluído estabilizante por polímero sintético será comparado com os dados obtidos através de métodos de previsão de carga, estabelecendo um banco de dados que permitam o estudo de mecanismos de transferência de carga do fuste para a base.



Figura 1 - (a) Estaca teste ensaiada, (b) Ensaio PDA martelo 25 tf.
Fonte: autor.

2.1 Características Geológicas Geotécnicas

A caracterização geológica geotécnica do local da execução de uma fundação é imprescindível além de conhecer e seguir rigorosamente o seu método construtivo, pois ele define o comportamento carga versus deslocamento, bem como o mecanismo de transferência da carga ao longo da profundidade. A caracterização das unidades geológicas realizadas por Milani et al. (1998), indicam que um terço da geologia do território paulista, é constituído por granitos e as chamadas rochas metamórficas, resultantes de fortes deformações tectônicas que ocorreram ao longo do período geológico de denominação pré-Cambriano, entre estas chamadas rochas metamórficas estão a zona paulista compreende migmatitos, xistos e Gnaisses. A sucessão de rochas analisada está incluída na faixa leste de afloramentos do Grupo Itararé da Bacia do Paraná, centro-leste do Estado de São Paulo. A Figura 2 (a) demonstra os boletins de sondagem Nspt executados na localização das estacas testes. As sondagens do tipo Nspt foram executadas até 28 metros de profundidade, passando por um perfil estratigráfico da cota 0,00 a -6,00 m de argila siltosa, seguido de silte argiloso a -23 m e silte arenoso até - 28 m, sotoposto por solo de alteração e rocha alterada de gnaisses com graus de alteração decrescentes com a profundidade sobrejacentes a rocha sã, conforme testemunhos obtidos pelas sondagens rotativas conforme Figura 2 (b).

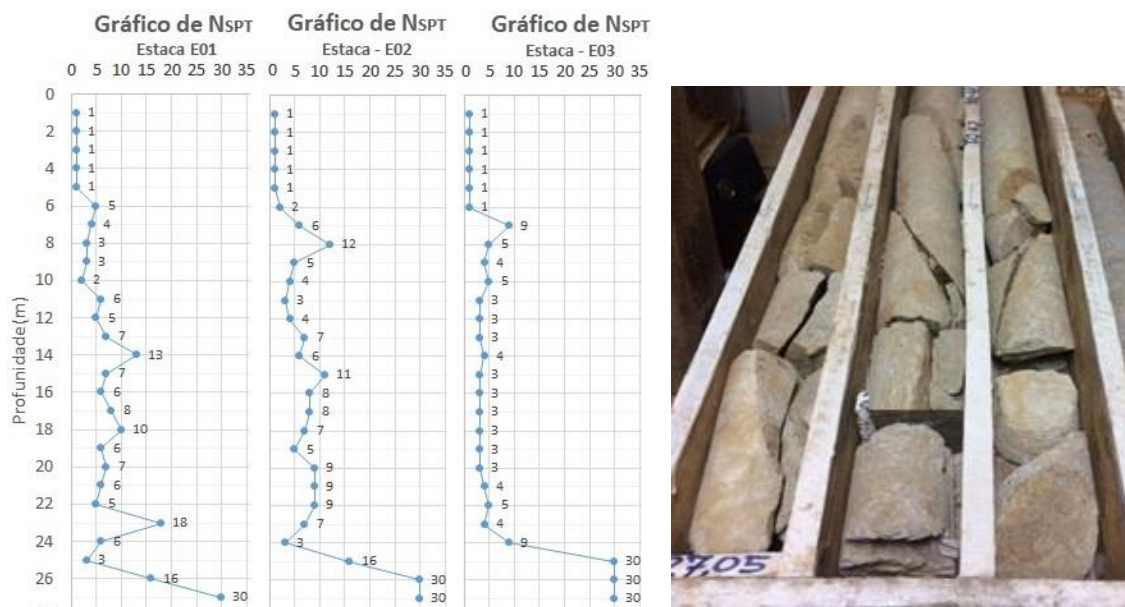


Figura 2 - (a) Sondagem realizadas junto as estacas testes, (b) amostras de rocha testemunhos.
 Fonte: autor.

Após a realização das investigações geológicas foram realizados ensaios laboratoriais visando a caracterização e a determinação dos parâmetros de resistência do solo obtidos através de ensaios de cisalhamento direto. A Tabela 1 representa um resumo das propriedades geotécnicas, obtidas ao longo de toda profundidade amostrada, destacando-se os valores mínimos, máximo e médio dos parâmetros encontrados.

Tabela 1 – Parâmetros geotécnicos do local das estacas testes.

Parâmetros geotécnicos	Unidades	Min.	Máx.	Médio
Índice de vazios	-	0,56	1,40	1,07
Porosidade	%	36,0	58,6	51,5
Peso específico do sólidos	KN/m ³	26,5	29,8	28,3
Grau de saturação	%	42,3	95,8	67,0
Limite de Liquidez	%	17,4	34,5	22,0
Limite de Plasticidade	%	32,7	54,6	41,0
Teor de umidade	%	6,90	35,9	23,5
Peso específico natural	KN/m ³	16,3	21,1	17,9
Ângulo de atrito interno	°	20,0	38,0	29,0
Intercepto de coesão	KPa	17,8	64	33,2

Fonte: autor.

3. Resultados e Discussão

3.1 Previsão da capacidade de carga

O pequeno número de contribuições existentes na literatura relativos a estacas de grande diâmetro, motivaram a utilização dos três métodos semi-empíricos mais consagrados no meio

geotécnico para previsão de capacidade de carga, Aoki-Velloso (1975), Decourt-Quaresma (1978) este modificado por Decourt (1996) e Teixeira (1996), para efeito de comparação dos resultados obtidos nas provas de cargas dinâmicas. A Tabela 2 apresenta os valores encontrados pelos métodos semi-empíricos das parcelas de resistência lateral e de ponta.

Tabela 2 - Resistências de ponta e lateral através dos métodos semi-empíricos

Estação	Método	Resistência de atrito		Resistência de Ponta		Resistência total (tf)
		(tf)	(%)	(tf)	(%)	
E01	Aoki Velloso (1975)	152	16	793	84	945
E02		178	18	792	82	970
E03		174	18	790	82	964
E01	Decourt (1996)	210	32	445	68	655
E02		235	25	688	75	923
E03		203	20	812	80	1015
E01	Teixeira (1996)	228	34	447	66	675
E02		265	28	690	72	955
E03		215	21	814	79	1029

Fonte: autor.

Apesar do método de Decourt e Teixeira (1996) subestimar a carga média de ensaio em 17%, a análise global mostra que para as estimativas o método proposto por Decourt e Teixeira apresentou resultados mais conservadores do que proposto por Aoki e Velloso (1975). A análise da estimativa proposta pelos métodos em relação ao valor medido pela prova de carga dinâmica foram baseadas na porcentagem de erros, calculados conforme a equação 1.

$$\text{Erro (\%)} = \frac{(\text{Estimado} - \text{Medido}) \times 100}{(\text{Medido})}$$

equação 1

A Tabela 3 apresenta os erros para os métodos abordados calculados relativos ao que foi medido nas provas de carga dinâmica. O valor da média dos erros do método proposto por Aoki-Velloso (1975) é o que mais se aproxima dos valores da prova de carga dinâmica, confirmada pela mediana. O desvio padrão, contudo, mostra que o método proposto por Aoki-Velloso (1975) é menos conservador que o método de Decourt e Teixeira (1996). No exame da variância dos erros de estimativa o método proposto por Aoki-Velloso (1975) é o que mais se afasta do resultado esperado. Não há discrepâncias para o desvio padrão e o coeficiente de variação entre os métodos de Decourt e Teixeira, apresentando menor dispersão do que o proposto por Aoki-Velloso, confirmada pela defasagem entre o máximo e o mínimo dos erros apurados.

Tabela 3 – Porcentagem de Erro entre Métodos semi-empíricos e Prova de Carga Dinâmica.

Estação	Erro (%)		
	Decourt (1996)	Aoki Velloso (1975)	Teixeira (1996)
E01	-27,23	4,99	-25,01
E02	-16,09	-11,82	-13,18
E03	-15,39	-19,64	-14,22
Média	-19,57	-8,82	-17,47
Mediana	-16,09	-4,82	-14,22
Variância	44,13	158,36	42,88
Desvio Padrão	6,64	12,58	6,55
Coefficiente de variação	-0,34	-1,43	-0,37

Fonte: autor.

Os métodos aplicados comprovaram que os comportamentos das estacas escavadas com fluido estabilizante trabalham por maior porcentagem de resistência de ponta (Figura 3a), demonstrando que o desempenho dos materiais componentes do estacão, estão relacionados à resistência do solo que fornece suporte a resistência de elemento de fundação.

As estacas de grande diâmetro apresentam baixa contribuição da resistência lateral, quando comparada com os resultados obtidos in loco (Figura 3b). De acordo Velloso e Lopes (2010), após a cravação é esperado uma contribuição em aumentar a resistência lateral com o tempo, aumento este ligado ao fenômeno de migração da água dos poros causada pelo excesso de poro-pressão gerado pela cravação da estaca. Segundo Soderberg (1962) a teoria de adensamento radial dos excessos de poro-pressão causados pela cravação da estaca indica que o tempo de recuperação é proporcional ao quadrado do diâmetro da estaca. Para Vesic (1977) o amolgamento causado pela cravação pode reduzir muito a resistência de argilas sensíveis e culminar em uma recuperação apenas parcial da resistência original, relatando o pesquisador que as recuperações da estaca se estendem além de um mês.

Os métodos de previsão demonstraram a distribuição de sua resistência ao longo do fuste principalmente por resistência de ponta, considerando-se favorável os valores preconizados pelos métodos propostos, apresentando uma previsão de carga coerente com a realidade do perfil geológico, quando a estaca é submetida a esforços até a ruptura. Os métodos de Decourt (1996) e Teixeira (1996) contribuem para as variações de transferência de carga próximo da realidade dos ensaios PDA, apresentando uma boa definição para resistência de ponta em relação a resistência lateral, a Tabela 3 demonstra este comportamento majoritário da resistência de ponta.

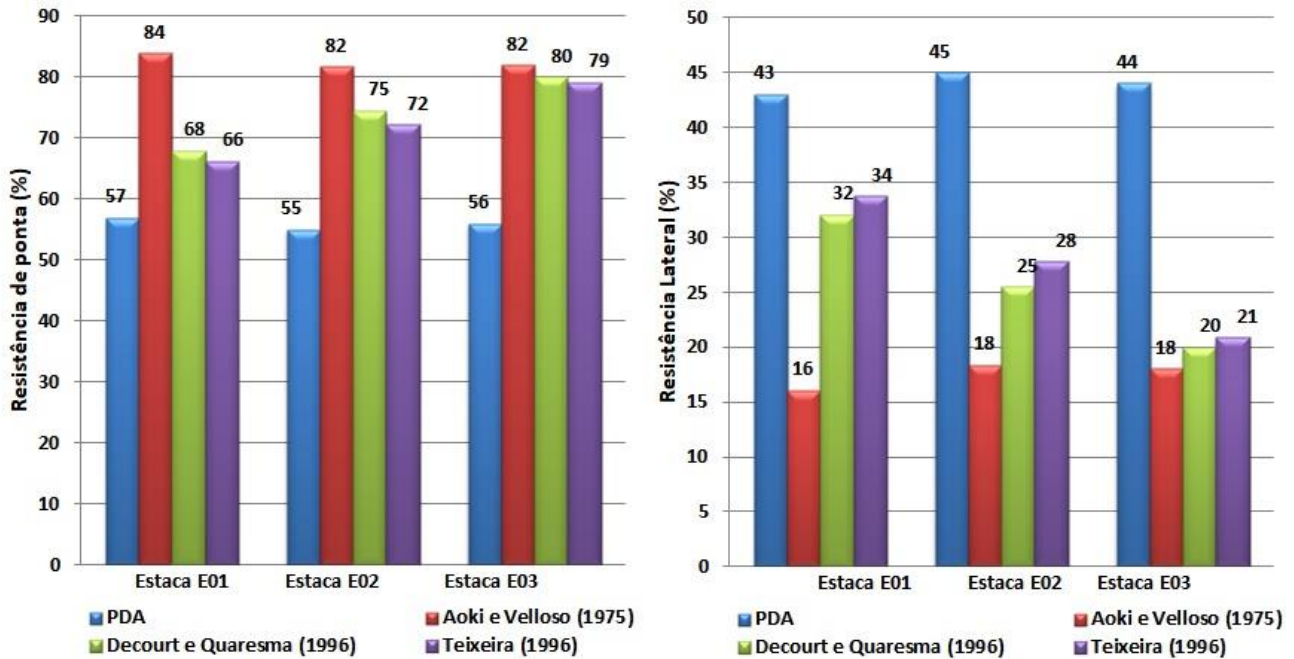


Figura 3 - Comparação das porcentagens das resistências obtidas entre ensaio PDA e métodos de previsão; (a) resistência de ponta, (b) resistência lateral.

Fonte: autor.

3.2 Ensaio Dinâmico x Métodos de extrapolação da curva carga recalque

Para a definição da carga de ruptura dos ensaios, além dos dados de carga máxima obtida em campo pelo ensaio PDA, utilizaram-se para análise do comportamento das estacas de grande diâmetro os métodos de extrapolação da curva carga recalque, métodos baseados nos mesmos princípios, diferindo entre si apenas no tratamento matemático utilizado na extrapolação da curva experimental. O comportamento dos métodos depende do próprio do formato da curva carga-recalque medida in situ. Para análise das curvas obtidas in loco foram utilizados cinco métodos de extrapolação da curva carga x recalque, são eles: Chin (1978), Décourt (1996), Van Der Veen (1953) e Mazurkiewicz (1972). Na Tabela 4 a seguir são apresentados os resultados de carga de ruptura, obtidos através dos métodos propostos.

Tabela 4 - Resultados da extrapolação da prova de carga.

Métodos extrapolação	Previsão carga Estacão (tf)		
	E01	E02	E03
Chin (1978)	1117	1952	1800
Décourt (1996)	1112	1459	1785
Van Der Veen (1953)	940	1460	1365
Mazurkiewicz (1972)	1000	1250	1350

Fonte: autor.

A análise da Tabela 5 teve foco no erro calculado em porcentagem entre a carga estimada diminuída da carga medida e dividida pela carga medida, conforme apresentado na equação 1.

Tabela 6 – Porcentagem de Erro entre Métodos de extrapolação da curva carga x recalque e Prova de Carga Dinâmica.

Estação	Erro carga total (%)			
	Chin (1987)	Décourt (1996)	Van Der Veen (1953)	Mazurkiewicz (1972)
E01	24,10	23,54	4,43	11,10
E02	77,45	32,64	32,73	13,64
E03	50,05	48,80	13,79	12,54
Média	50,53	34,99	16,98	12,42
Mediana	50,05	32,64	13,79	12,54
Variância	711,92	163,65	207,80	1,62
Desvio Padrão	26,68	12,79	14,42	1,27
Coefficiente de variação	0,53	0,37	0,85	0,10

Fonte: autor.

As estimativas propostas pelos métodos ultrapassaram o valor medido pelas prova de carga dinâmica conforme a Tabela 6, os valores estimados dessas estacas apontam para a insegurança da aplicação proposta por alguns métodos de extrapolação. Considerando a análise da Tabela 6 o valor da extrapolação de carga de ruptura proposta pelo método de Mazurkiewicz (1972) é o que mais se aproxima dos valores da prova de carga dinâmica, considerando o valor da média dos erros. A mediana é coerente com a média para as estacas de grande diâmetro avaliadas por Mazurkiewicz, evidenciando a baixa confiabilidade em relação aos outros métodos com a distribuição das estimativas muito acima dos encontrados pelo PDA. A variância é acentuada tanto para Chin (1987), Decourt-Quaresma (1978) quanto para Van Der Veen (1953), confirmando que esses métodos apresentaram resultados longes dos obtidos in loco. O desvio padrão e o coeficiente de variação dos erros apresentam discrepâncias entre os quatro métodos, embora o método de Mazurkiewicz (1972) apresenta menores valores demonstrando que há menor variabilidade a distribuição dos dados, comprovando ser o método mais favorável com os valores obtidos in loco.

Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que ambas as fórmulas superestimaram o valor da carga mobilizada quando comparadas com os resultados do ensaio de carregamento dinâmico pelo método CASE.

Os métodos semi-empíricos do ponto de vista da carga de ruptura apresentaram comportamento conservador na comparação com os resultados do ensaio de carregamento dinâmico, demonstrando eficiência para os métodos de Decourt (1996) e Teixeira (1996) para as estacas escavadas de grande diâmetro, com menores valores de porcentagem de erros em desvio padrão e coeficiente de variação quando comparado com os resultados obtidos pelo método CASE. Pode-se dizer que houve coerência nos resultados obtidos nas instrumentações com os métodos Decourt e Teixeira apresentando resultados coerentes de transferência de carga ao longo do fuste das estacas ensaiadas.

O método de Mazurkiewicz (1972) foi o mais eficiente no aspecto de haver a possibilidade de indicação de carga de ruptura, neste método foi possível analisar todas as provas de carga com os melhores coeficiente de correlação quando comparados com os resultados pelo método CASE, tendo em vista a segurança na utilização do método, refletindo de forma satisfatória o comportamento das curvas carga-deslocamento dos estação em solos coesivos e valores a favor da

segurança.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

BROWN, D. A.; TURNER, J. P.; CASTELLI, R. J. *Drilled Shafts: Construction procedures and lrfd design methods.* Federal Highway Administration. Report n. FHWA-NHI-10-016. Technical report. Washington, 2010.

DECOURT, L. *Estacas.* In: **HACHICH, W. et. al (Eds.)** *Fundações: teoria e prática. 2.ed.* São Paulo : Editora Pini, 1998. p.265-301.

LAM, C, A. JEFFERIS, S.A. *Performance of Bored Piles Constructed Using Polymer Fluids: Lessons from European Experience.* Journal of Performance of Constructed Facilities. 2015.

MAJANO, R. E., O'Neill, M. W., and HASSAN, K. M. Perimeter Load Transfer in Model Drilled Shafts Formed Under Slurry. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 12, pp. 2136-2154. 1994.

MILANI, E. J.; FACCINI, U. F.; SCHERER, C. M. S.; ARAÚJO, L. M.; CUPERTINO, J. A. *Sequences and stratigraphic hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil.* Boletim IG-USP Série Científica n. 29, São Paulo, p. 125-173. 1998.

O'NEILL, M. W.; HASSAN, K. H. *Drilled shafts: Effects of construction on performance and design criteria. Proc., Int. Conf. on Design and Construction of Deep Foundations, U.S. Federal Highway Administration, Washington, D.C., Vol. 1, 137-187.* 1994).

SODERBERG, L. O. *Consolidation theory applied to foundation pile time effects,* Geotechnique, v.12, n. 3, pp. 217-225, 1962.

SMITH, E. A. L. *Pile Driving Analysis by the Wave Equation.* Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v. 86 (Aug), n.SM4, pp. 35-61, 1960.

THASNANIPAN, N., Aye, Z., SUBMANEEWONG, C., TEPARAKSA, W. Performance of Wet-Process Bored Piles Constructed with Polymer-Based Slurry in Bangkok Subsoil. Deep Foundations 2002: pp. 143-157.

VELLOSO, D. A., LOPES, F. R. *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas.* Oficina de Textos, São Paulo, 2010.

VESIC, A. S. *Design of pile foundations, Synthesis of Highway.* Practice 42, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, 1977.