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/COBRAMSEG2026.5/3

Análise Comparativa da Capacidade de Carga em Estacas Hélice Continua por Métodos Semiempíricos e Prova de Carga Estática em Vitória-ES

Mateus Falcão Paulo
Bacharel em Engenharia Civil, Instituto Federal do Espírito Santo – Vitória, Brasil, mateusfa47@gmail.com

Morgana Moreschi
Professora, Instituto Federal do Espírito Santo – Vitória, Brasil, morgana.moreschi@ifes.edu.br

Carla Therezinha Dalvi Borjaille Alledi
Professora, Instituto Federal do Espírito Santo - Vitória, Brasil, borjaille@ifes.edu.br

RESUMO: A estimativa da capacidade de carga de estacas é fundamental para a segurança estrutural e a otimização econômica de projetos de fundações, especialmente em áreas de aterro hidráulico, onde a heterogeneidade estratigráfica pode comprometer as previsões por métodos semiempíricos. Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre resultados de provas de carga estática e estimativas obtidas por métodos semiempíricos aplicados às estacas hélice contínua executadas na região da Enseada do Suá, em Vitória-ES. Foram realizadas cinco provas de carga estática em estacas com diâmetros de 40 e 50 cm e comprimentos entre 20 e 24 m. Como as curvas carga × recalque não apresentaram ruptura nítida, as cargas últimas foram estimadas por extrapolação utilizando o método de Van der Veen (1953) e o método da NBR 6122 (2022). Paralelamente, utilizou-se os métodos de Aoki e Velloso (1975), Laprovitera (1988), Monteiro (1997), Décourt e Quaresma (1996), Alonso (1996) e Antunes e Cabral (1996) para estimativa da capacidade de carga. As cargas definidas através da extrapolação da curva carga x recalque variaram entre 2200 kN e 3300 kN, para as estacas com diâmetros de 40 e 50 cm. Os métodos de Décourt e Quaresma (1996) e Antunes e Cabral (1996) apresentaram as melhores aproximações, com tendência levemente conservadora, enquanto os demais métodos mostraram resultados superiores à prova de carga. Os resultados evidenciam a importância da calibração dos métodos semiempíricos por meio de provas de carga em solos de aterro hidráulico.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas hélice contínua, Prova de carga estática, Métodos semiempíricos, Capacidade de carga, Aterro hidráulico.

ABSTRACT: Estimating the load-bearing capacity of piles is fundamental for structural safety and economic optimization of foundation projects, especially in hydraulic fill areas, where stratigraphic heterogeneity can compromise predictions using semi-empirical methods. This work presents a comparative analysis between the results of static load tests and estimates obtained by semi-empirical methods applied to continuous flight auger piles executed in the Enseada do Suá region, in Vitória-ES. Five static load tests were performed on piles with diameters of 40 and 50 cm and lengths between 20 and 24 m. As the load × settlement curves did not show a clear rupture, the ultimate loads were estimated by extrapolation using the Van der Veen method (1953) and the NBR 6122 method (2022). In parallel, the methods of Aoki and Velloso (1975), Laprovitera (1988), Monteiro (1997), Décourt and Quaresma (1996), Alonso (1996), and Antunes and Cabral (1996) were used to estimate the load-bearing capacity. The loads defined through extrapolation of the load-settlement curve varied between 2200 kN and 3300 kN for piles with diameters of 40 and 50 cm. The methods of Décourt and Quaresma (1996) and Antunes and Cabral (1996) presented the best approximations, with a slightly conservative tendency, while the other methods showed overestimations of different magnitudes. The results highlight the importance of calibrating semi-empirical methods through load tests on hydraulic fill soils.

KEYWORDS: Continuous flight auger piles, Static load test, Semi-empirical methods, Bearing capacity, Hydraulic fill.

1 INTRODUÇÃO

A estaca hélice contínua monitorada destaca-se pelo rápido processo executivo, baixo nível de vibração e boa adaptação a solos heterogêneos e com lençol freático elevado (VELLOSO; LOPES, 2010), características que favorecem sua aplicação em áreas urbanas densamente ocupadas, como a região metropolitana da Grande Vitória-ES. A avaliação da capacidade de carga desse tipo de estaca, por meio de ensaios de prova de carga estática (PCE) e métodos semiempíricos, é fundamental para garantir a confiabilidade dos projetos e a segurança das estruturas (CINTRA; AOKI, 2010).

Na Grande Vitória, a estaca hélice contínua tem sido amplamente utilizada como solução de fundação (ALLEDI *et al.*, 2015), reforçando a necessidade de estudos que comparem métodos de previsão com resultados experimentais obtidos em campo. Este artigo apresenta uma análise integrada entre métodos semiempíricos e provas de carga estática realizadas em obra, contribuindo para o aprimoramento das práticas de dimensionamento de fundações na região.

Este artigo tem como objetivo comparar os resultados obtidos em ensaios de prova de carga estática com as estimativas de capacidade de carga axial fornecidas por seis diferentes métodos semiempíricos aplicados a estacas hélice contínua. A análise é realizada considerando as condições geotécnicas específicas de um aterro hidráulico localizado na cidade de Vitória, Espírito Santo, permitindo verificar a adequação dos métodos estudados a esse tipo de ambiente geotécnico.

2 METODOLOGIA

O estudo de caso refere-se a um edifício residencial localizado na região da Enseada do Suá, em Vitória-ES. A edificação possui aproximadamente 21.500 m² de área construída, distribuída em um subsolo, térreo, pavimentos do 2º ao 6º andar e cobertura, sendo o subsolo implantado a cerca de 3,06 m abaixo do nível da rua. A estrutura é composta por aproximadamente 223 pilares apoiados em fundações profundas do tipo estaca hélice contínua, com diâmetros de 40 cm e 50 cm, totalizando 550 estacas, das quais 142 possuem diâmetro de 40 cm e 408 de 50 cm. As estacas apresentam comprimentos variando entre 10 m e 24 m, definidos de acordo com as condições geotécnicas locais, de modo a garantir a estabilidade e a segurança da edificação.

A Tabela 1 abaixo apresenta as características principais de cada PCE, bem como a respectiva sondagem SPT utilizada como referência:

Tabela 1. Características gerais das estacas ensaiadas (PCE-01 a PCE-05).

Identificação	Diâmetro (cm)	Comprimento (m)	Carga de ensaio (kN)	SP
PCE-01	Ø50	24	2132,0	SPT-203
PCE-02	Ø40	20	1128,0	SPT-205
PCE-03	Ø50	22	2006,0	SPT-209
PCE-04	Ø50	24	2210,0	SPT-214
PCE-05	Ø50	23	2014,0	SPT-213

A investigação geotécnica da obra foi realizada por meio de ensaios de Sondagem a Percussão do tipo S.P.T.; as sondagens realizadas evidenciaram, na porção superficial, a ocorrência de solo predominantemente arenoso com presença de fragmentos de conchas. Em seguida, foi identificada uma fina camada de argila mole, situada em torno de 15 m de profundidade, com valores de N_{SPT} variando entre 1/45 e 4. Abaixo dessa camada, o perfil geotécnico apresenta um material arenoso compacto, com N_{SPT} médio da ordem de 30 e recorrente presença de fragmentos de conchas, estendendo-se até a profundidade final investigada, aproximadamente 24m.

A Figura 1 apresenta o perfil geotécnico representativo da área estudada.

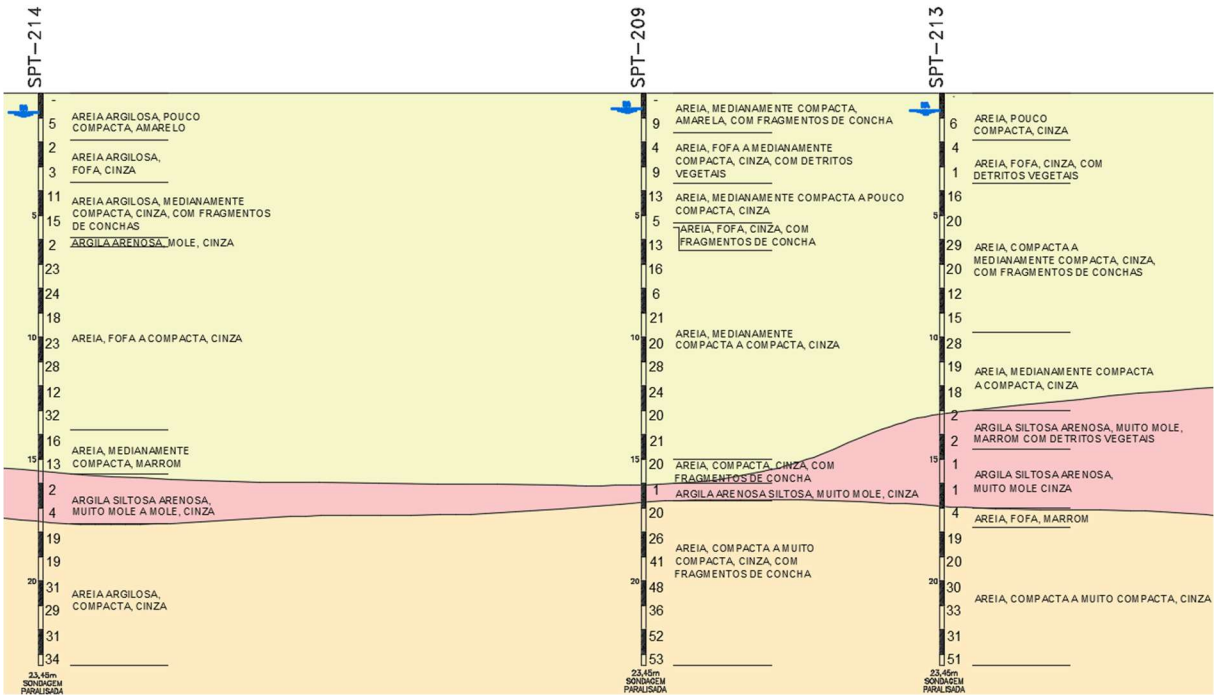


Figura 1. Perfil geotécnico típico do terreno.

O perfil geotécnico apresentado na Figura 1 ilustra três das cinco sondagens de referência utilizadas. Ressalta-se que as sondagens SPT-203 e SPT-205, embora não plotadas graficamente neste corte, apresentam características estratigráficas e índices de resistência análogos às sondagens apresentadas, confirmando a homogeneidade do perfil geotécnico na área de estudo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Extrapolação da Curva Carga x Recalque

Os ensaios de prova de carga estática realizados não atingiram a ruptura física da interface estaca x solo durante o carregamento. Dessa forma, a determinação da carga de ruptura dos ensaios de prova de carga foi obtida por meio de procedimentos de extrapolação da curva carga x recalque. Para esse fim, empregaram-se duas abordagens distintas e complementares: o método de Van der Veen (1953) foi aplicado para a extrapolação da curva carga-recalque, permitindo a estimativa da carga de ruptura última do sistema estaca-solo. Paralelamente, utilizou-se o critério da NBR 6122 para a determinação da ruptura convencional, estabelecendo o limite de recalque admissível.

O ponto de interseção entre a curva resultante da extrapolação pelo método de Van der Veen (1953) e a reta de ruptura definida pela NBR 6122 foi adotado como a carga de ruptura convencional do ensaio. A Figura 2 ilustra os gráficos carga x recalque dos cinco ensaios realizados, incluindo as extrapolações segundo o método de Van der Veen e a reta da norma.

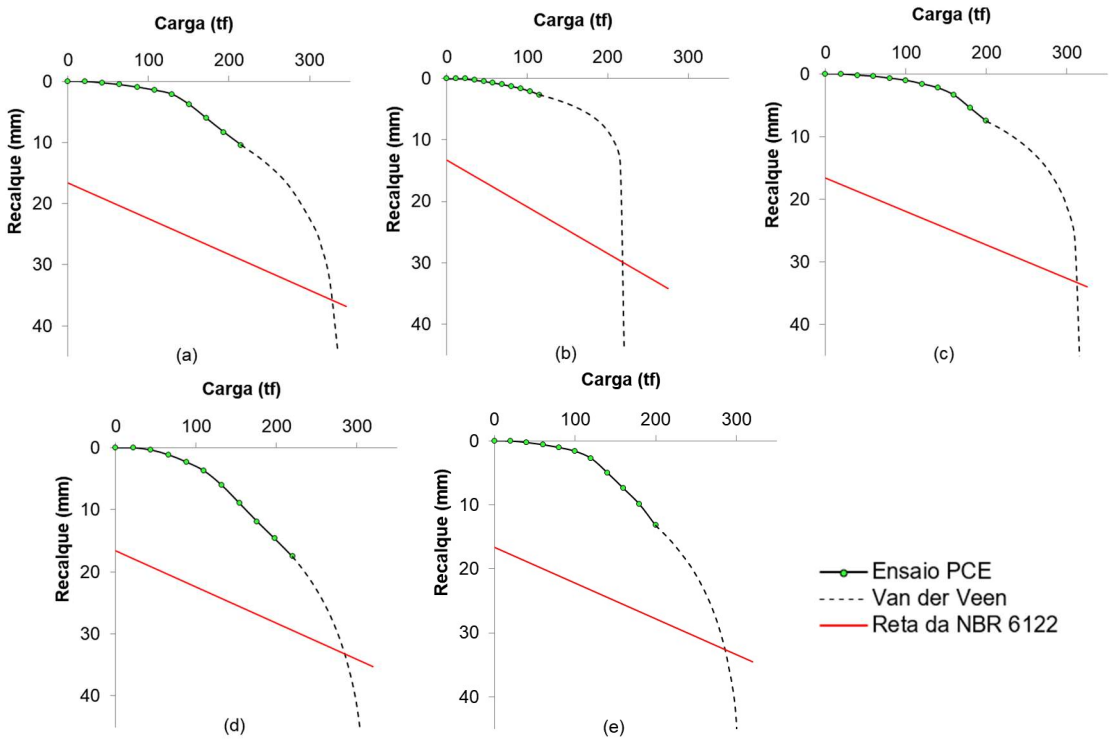


Figura 2. Extrapolação pelo método de Van der Veen e aplicação da NBR: (a) PCE-01; (b) PCE-02; (c) PCE-03; (d) PCE-04; (e) PCE-05.

3.2 Métodos Semiempíricos

Foram aplicados os métodos semiempíricos de Aoki e Velloso (1975), Laprovitera (1988), Monteiro (1997), Décourt e Quaresma (1996), Alonso (1996) e Antunes e Cabral (1996) para cada ensaio de prova de carga, com o objetivo de estimar a capacidade de carga por atrito lateral (P_L), carga de ponta (P_P) e a carga de ruptura (P_R) que é o somatório de P_L e P_P das estacas a partir dos parâmetros obtidos nas sondagens SPT.

Os resultados estimados pelos métodos encontram-se apresentados nas Tabelas 2 a 6, onde são comparados com a carga de ruptura determinada pela extrapolação da curva carga x recalque (P_{PC}) dos respectivos ensaios de prova de carga, permitindo a avaliação do grau de aproximação de cada método em relação ao comportamento observado em campo.

Tabela 2. Carga de ruptura pelos métodos semiempíricos e obtida na prova de carga do Ensaio PCE-01.

Método	Carga (kN)			P_{PC} (kN)	P_R / P_{PC}
	P_L	P_P	P_R		
Aoki e Velloso (1975)	1939,1	2650,7	4589,9	3300,0	1,39
Aoki e Velloso mod. Laprovitera (1988)	1243,3	1590,4	2833,8		0,86
Aoki e Velloso mod. Monteiro (1997)	2259,3	1290,0	3549,3		1,08
Décourt e Quaresma (1978)	2186,0	620,5	2806,5		0,85
Alonso (1996)	238,15	106,52	344,67		1,04
Antunes e Cabral (1996)	1924,6	785,4	2710,0		0,82

Tabela 3. Carga de ruptura pelos métodos semiempíricos e obtida na prova de carga do Ensaio PCE-02.

Método	Carga (kN)			P_{PC} (kN)	P_R / P_{PC}
	P_L (kN)	P_P (kN)	P_R (kN)		
Aoki e Velloso (1975)	1061,7	2261,9	3323,7	2200,0	1,51
Aoki e Velloso mod. Laprovitera (1988)	647,7	1357,2	2004,8		0,91
Aoki e Velloso mod. Monteiro (1997)	1226,7	1100,8	2327,5		1,06
Décourt e Quaresma (1978)	1200,1	497,6	1697,7		0,77
Alonso (1996)	129,32	76,34	205,66		0,93
Antunes e Cabral (1996)	1002,8	502,7	1505,4		0,68

Tabela 4. Carga de ruptura pelos métodos semiempíricos e obtida na prova de carga do Ensaio PCE-03.

Método	Carga (kN)			P_{PC} (kN)	P_R / P_{PC}
	P_L	P_P	P_R		
Aoki e Velloso (1975)	1902,8	4516,0	6418,8	3120,0	2,06
Aoki e Velloso mod. Laprovitera (1988)	1145,0	2709,6	3854,6		1,24
Aoki e Velloso mod. Monteiro (1997)	2194,1	2197,8	4391,9		1,41
Décourt e Quaresma (1978)	2042,0	1225,2	3267,3		1,05
Alonso (1996)	208,99	150,21	359,20		1,15
Antunes e Cabral (1996)	1788,9	785,4	2574,3		0,83

Tabela 5. Carga de ruptura pelos métodos semiempíricos e obtida na prova de carga do Ensaio PCE-04.

Método	Carga (kN)			P_{PC} (kN)	P_R / P_{PC}
	P_L	P_P	P_R		
Aoki e Velloso (1975)	2125,8	2002,8	4128,5	2860,0	1,44
Aoki e Velloso mod. Laprovitera (1988)	1607,3	1769,1	3376,4		1,18
Aoki e Velloso mod. Monteiro (1997)	2177,3	1201,7	3378,9		1,18
Décourt e Quaresma (1978)	2115,3	486,0	2601,3		0,91
Alonso (1996)	230,50	128,12	358,62		1,25
Antunes e Cabral (1996)	1924,6	785,4	2710,0		0,95

Tabela 6. Carga de ruptura pelos métodos semiempíricos e obtida na prova de carga do Ensaio PCE-05.

Método	Carga			P_{PC} (kN)	P_R / P_{PC}
	P_L	P_P	P_R		
Aoki e Velloso (1975)	1480,2	4025,2	5505,4	2880,0	1,91
Aoki e Velloso mod. Laprovitera (1988)	909,5	2415,1	3324,6		1,15
Aoki e Velloso mod. Monteiro (1997)	1712,80	1958,9	3671,8		1,27
Décourt e Quaresma (1978)	1725,30	981,7	2707,0		0,94
Alonso (1996)	180,28	138,92	319,19		1,11
Antunes e Cabral (1996)	1770,40	785,4	2555,8		0,89

3.3 Análise dos Resultados

Os resultados obtidos mostram que os métodos Décourt e Quaresma (1978) e Antunes e Cabral (1996) foram os que apresentaram melhor aproximação às cargas extrapoladas, com comportamento levemente conservador e baixa variabilidade entre os cinco ensaios analisados.

Os métodos Aoki e Velloso modificado por Laprovitera (1988) e Aoki e Velloso modificado por Monteiro (1997) apresentaram resultados intermediários. Aoki e Velloso modificado por Laprovitera (1988) manteve boa proximidade com as cargas de referência, com pequenas superestimações pontuais, enquanto Aoki e Velloso modificado por Monteiro (1997) mostrou valores superiores aos extrapolados, embora três dos cinco ensaios tenham apresentado, no máximo, 20% de diferença.

O método de Alonso (1996) apresentou valores de resistência superiores aos resultados em quatro dos cinco ensaios analisados. Ainda assim, as estimativas permaneceram próximas dos valores obtidos em campo. A maior diferença registrada foi de aproximadamente 25% acima do valor medido. Esse comportamento indica que o método tende a fornecer resultados superestimados.

O método Aoki e Velloso (1975) foi o mais discrepante, apresentando valores de resistência significativamente superiores da capacidade de carga, comportamento também relatado em estudos anteriores. Em todos os métodos avaliados, observou-se predominância marcante da resistência de ponta. A norma exige que o executor garanta a mobilização dessa parcela, caso contrário, apenas a resistência de fuste pode ser considerada no dimensionamento. Quando se considera exclusivamente o atrito lateral, todos os métodos tornam-se conservadores em relação às cargas observadas.

Por fim, destaca-se que os ensaios de prova de carga não foram instrumentados para separar diretamente as parcelas de resistência de fuste e de ponta, o que limita a avaliação individual dessas contribuições. Além disso, o comportamento do aterro hidráulico, por ser um material artificialmente depositado e potencialmente heterogêneo, pode diferir de perfis naturais, influenciando a resposta das estacas e a aplicabilidade dos métodos semiempíricos.

4 CONCLUSÃO

As cinco provas de carga estática analisadas neste estudo de caso não apresentaram ruptura nítida, sendo a carga última estimada por extrapolação das curvas carga x recalque pelo método de Van der Veen (1953) e pela reta da Norma NBR 6122:2022, resultando em valores entre 220 kN e 330 kN.

Entre os métodos semiempíricos avaliados, Antunes e Cabral (1996) e Décourt e Quaresma (1996) apresentaram, de modo geral, melhor concordância com os resultados de campo, destacando-se pela tendência conservadora e maior uniformidade entre os ensaios. Em contrapartida, o método de Aoki e Velloso (1975) apresentou estimativas significativamente superiores à capacidade de carga, alcançando uma razão de P_R/P_{PC} de aproximadamente 2,06 no ensaio PCE-03, isto é, mais que o dobro, evidenciando uma resistência calculada superior àquela observada para as condições estudadas e a necessidade de cautela em sua aplicação sem calibração local.

As modificações propostas por Laprovitera (1988) e Monteiro (1997), bem como o método de Alonso (1996), apresentaram estimativas, em geral, ligeiramente superiores às cargas *in situ*, porém mais ajustadas que o método original de Aoki e Velloso (1975). De forma geral, os resultados evidenciam a importância da validação regional dos métodos semiempíricos e reforçam o papel das provas de carga como instrumento fundamental para a calibração de parâmetros e aumento da confiabilidade no dimensionamento de fundações profundas em solos costeiros.

AGRADECIMENTO

Os pesquisadores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo e à empresa Base Engenharia Geotécnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alledi, C.T.D.B., Minette, E.; Albuquerque, P. J. R.; Polido, U. F. (2015). *Estaca hélice contínua instrumentada: previsão de carga de ruptura por métodos semiempíricos vs. prova de carga.* Geotecnia, n. 135, p. 115-127.

Alonso, U.R. (1996). *Estacas hélice contínua com monitoramento eletrônico: previsão da capacidade de carga através do ensaio SPT-T.* III Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia - SEFE, São Paulo: ABMS. Vol.2, pp.141-151.

Antunes, W R., Cabral, D.A. (1996). *Carga resistente de estacas hélice contínua.* III Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, 2: 105 - 110.

Aoki, N., Velloso, D. (1975). *An aproximate method to estimate the bearing capacity of piles.* V Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires. Vol. 1, pp.367-376.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 12131. *Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro.

Décourt, L., Quaresma, A R. (1978). *Capacidade de carga de estaca a partir de valores de SPT*. In: CBMSEF, 6, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, v. 1, p. 45-53.

Cintra, J., C., A., Aoki, N. (2009). *Fundações por estacas: projeto geotécnico.* 1. ed. São Paulo, SP.

Laprovitera, H. (1988) *Reavaliação de método semi-empírico de previsão da capacidade de carga de estacas a partir de Banco de Dados*. Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro, 1988.

Monteiro, P. F. (1997) *Capacidade de carga de estacas - método Aoki-Velloso*, Relatório interno de Estacas Franki Ltda, 1997.

Van Der Veen, C. (1953). *The Bearing Capacity of a Pile, Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, vol. II.

Velloso, D. A., Lopes, F. R. (2010). Fundações: Volume 2– *Fundações Profundas.* São Paulo: Editora Oficina de Textos.