

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Avaliação de Desempenho de Estacas Escavadas em Ensaios Bidirecionais – Análise de Resultados

Alysson Santos Resende

Engenheiro Civil, Arcos Engenharia de Solos, Belo Horizonte, Brasil, alysson@arcos.eng.br

Yuri Barbosa

Doutorando, Unicamp, Campinas, Brasil, ybarbosa@gmail.com

Nilton Andrade Chaves

Engenheiro Civil, Arcos Engenharia de Solos, Belo Horizonte, Brasil, nilton.chaves@arcos.eng.br

Paulo José Rocha de Albuquerque

Professor Associado, Unicamp, Campinas, Brasil, pjra@unicamp.br

RESUMO: O ensaio bidirecional, prova de carga utilizando células expansivas, é uma metodologia que vem ganhando destaque em âmbito nacional e internacional devido à facilidade de montagem do ensaio pois as células são instaladas durante a execução da estaca, dispensando a construção de um sistema de reação e, consequentemente, resultando em economia de tempo e dinheiro em muitos casos. O objetivo deste artigo foi interpretar os resultados de seis casos de estacas escavadas ensaiadas por meio de prova de carga bidirecional, com foco nas semelhanças de comportamento do segmento de estaca abaixo do nível da célula expansiva (ponta ou “ponta fictícia”) e em seu desempenho, levando em consideração as metodologias executivas empregadas e na identificação de material solto na ponta por meio das curvas carga-recalque, adversidade esta que pode interferir na performance do elemento de fundação. Os resultados das provas de carga mostraram em todos os casos alguma deficiência na ponta da estaca, deslocamento excessivo após o rompimento do atrito lateral do segmento abaixo das células e, em três casos, a total compressão do material solto depositado na ponta, que foi identificada por meio da inclinação das curvas dos trechos inferiores, demonstrando assim a eficácia da aplicação do ensaio bidirecional para o fim proposto.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio bidirecional, células expansivas, estacas escavadas e hélice contínua.

ABSTRACT: The bidirectional test, load test using expansive cells, is a methodology that has been gaining attention nationally and internationally due to the ease of assembly of the test, as the cells are installed during the execution of the pile, eliminating the need to build a reaction system and consequently resulting in savings in time and money in many cases. The objective of this paper was to analyze the results of six cases of bored and CFA piles tested by bidirectional load test, focusing on the similarities in behavior of the pile segment below the level of the expansive cell (tip or "dummy tip") and its performance, taking into account the executive methodologies employed and the identification of loose material at the tip through load-holding curves, an adversity that can interfere with the performance of the foundation element. The results of the load tests showed, in all cases with some deficiency in the tip of the pile, excessive displacement after breaking the lateral friction of the segment below the cells and, in three cases, the total compression of the deposited loose material was identified through the inclination of the curves of the lower sections, demonstrating these ways the effectiveness of the bidirectional test for the proposed purpose.

KEYWORDS: bidirectional load test, expansive cells, bored piles and CFA piles.



1 Introdução

A prova de carga bidirecional teve início na década de 1980, onde as primeiras publicações acerca de sua montagem, procedimento executivo e interpretação de seus resultados apareceram nos trabalhos de Silva (1983, 1986), no Brasil, e de Osterberg (1989), nos EUA. À época, os autores procuraram desenvolver um equipamento capaz de solicitar separadamente as parcelas devido ao atrito lateral e a carga de ponta de uma estaca sem a necessidade de instrumentá-la em profundidade. Desta maneira, foi criado um dispositivo capaz mobilizar o fuste (segmento superior) e a ponta ou “ponta fictícia” (segmento inferior), caso este quando o conjunto se encontra acima do nível da ponta.

De maneira geral, o procedimento do ensaio bidirecional se dá pelo acionamento do conjunto de células expansivas através de um sistema hidráulico localizado à superfície e leituras dos deslocamentos realizadas por meio de *tell-tales* posicionados tanto no topo do conjunto de células, caracterizando a mobilização do fuste, quanto em sua base, configurando a solicitação da ponta ou ponta fictícia, a depender do caso. Assim, como resultado, obtém-se duas curvas carga-deslocamento como se duas estaca tivessem sido ensaiadas simultaneamente. Além disso, o ensaio também possibilita a instalação do conjunto de células em mais do que um nível ao longo da profundidade, sucedendo em maior número de curvas carga-recalque e, conseqüentemente, melhor separação das capacidades de carga do fuste ao longo de múltiplas camadas de solo (ENGLAND, 2003; LEE; PARK, 2008; NIAZI; MAYNE, 2014; WAN; DAI; GONG, 2018). Apesar de usual, a metodologia ainda não é normatizada no Brasil mesmo após quase 40 anos de existência, ficando seu uso a critério do projetista de acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2019).

Quando comparado ao ensaio convencional, a prova de carga bidirecional apresenta uma série de vantagens: separação das parcelas de atrito lateral e resistência de ponta da estaca, principalmente quando o conjunto de células está posicionado próximo à esta (SCHMERTMANN; HAYES, 1997; ENGLAND, 2003); condição de carga zero no topo do trecho superior, permitindo a estimativa da transferência de carga ao longo do fuste ainda que o mesmo não esteja instrumentado; identificação de possíveis cargas residuais na estaca (FELLENIUS, 2021); e, principalmente para estacas de grande diâmetro, economia de tempo e custos pelo fato de não necessitar de um sistema de reação para sua execução (ENGLAND, 2003). Schmertmann e Hayes (1997) e Schmertmann *et al.* (1998) também apontam, como uma das principais vantagens, a possibilidade de usar a prova de carga bidirecional para detectar possíveis falhas provenientes do processo executivo em estacas escavadas como efeitos da rugosidade da parede, concretagem inadequada, uso inadequado de ferramentas de perfuração, etc.

Ao longo de sua existência, diversos trabalhos foram realizados por engenheiros e pesquisadores afim de validarem os resultados do ensaio bidirecional e, como produto final, obter uma curva carga-recalque equivalente àquela encontrada em uma prova de carga convencional (SILVA, 1983; OSTERBERG, 1989; KWON *et al.*, 2005; LEE; PARK, 2008; KIM; MISSION, 2011; DAI; GONG, 2012; MASSAD, 2015). Entretanto, poucos trabalhos focaram unicamente nos resultados diretos da prova de carga bidirecional, principalmente no que diz respeito à sua utilização como meio para detectar possíveis avarias ao longo da estaca. Na bibliografia, tal tema foi tratado apenas por Schmertmann e Hayes (1997) e Schmertmann *et al.* (1998) que, por meio de estudo de casos, apontaram falhas técnicas no procedimento executivo de estacas escavadas com e sem polímero estabilizante e propuseram melhorias em tais processos, garantindo assim melhores resultados tanto para atrito lateral quanto para resistência de ponta dos casos reensaiados além de mostrarem a importância do ensaio bidirecional em fase de pré-projeto. Dessa forma, o presente trabalho tem como principal objetivo demonstrar a interpretação dos resultados de ensaios bidirecionais como meio para identificação de falhas nos processos construtivos de um total de 06 estacas, sendo quatro escavadas com fluido estabilizante, uma escavada sem fluido estabilizante e uma do tipo hélice contínua, sendo este último caso com diâmetro de 40 cm executada em subsolo com presença de material orgânico e, até então, sem histórico na literatura.

2 Metodologia

O posicionamento das células expansivas foi realizado com base na análise dos perfis de solo obtidos através de sondagens de simples reconhecimento (SPT), conforme recomenda a NBR 6484 (ABNT, 2020). Afim de se estabelecer um ponto de equilíbrio entre os segmentos inferior, regido pelo atrito lateral acrescido de sua ponta, e superior, que atua puramente por atrito lateral, os resultados da sondagem foram aplicados em



diversos métodos semi-empíricos para determinação da capacidade de carga em estacas (AOKI; VELLOSO, 1975; DÉCOURT; QUARESMA, 1978; VELLOSO, 1981; ALONSO, 1996; TEIXEIRA, 1996). Assim, as profundidades para instalação da célula de carga (ou conjunto de células) foram determinadas de acordo com as características de cada projeto e a aplicabilidade das metodologias semiempíricas para cada tipo de estaca analisado.

De maneira geral, as características gerais dos seis casos estudados apresentaram grande variabilidade quanto aos seus diâmetros, comprimentos e posicionamentos da célula ou conjunto de células ao longo da profundidade, além do procedimento executivo de cada estaca. Na Tabela 1 são apresentadas tais propriedades de cada caso e, de forma resumida, o perfil de solo onde foram executadas.

Tabela 1. Características gerais para cada caso analisado.

Caso	Estaca	L (m)	$L_{inf}^{[1]}$ (m)	ϕ (m)	Perfil de solo característico
01	Hélice Contínua	9,00	1,25	0,40	Argila orgânica e areia argilosa
02	Escavada com fluido estabilizante	47,80	5,00	1,60	Areia, argila arenosa a siltosa com fragmentos de quartzo, assente em topo rochoso
03	Escavada com fluido estabilizante	18,50	3,50	0,90	Argila arenosa a silte arenoso passando por camada de laterita
04	Escavada com fluido estabilizante	19,60	3,00	0,70	Argila siltosa e argila arenosa
05	Escavada sem fluido estabilizante	22,10	1,00	1,80	Silte arenoso e argiloso, areia siltosa e embutimento de 4,00 m em rocha
06	Escavada com fluido estabilizante	22,30	7,60	1,30	Areia fina marinha

^[1] Comprimento do segmento inferior, distância a partir da ponta referente ao ponto de instalação da célula ou conjunto de células.

3 Resultados e Discussões

Na Tabela 2 são apresentados, resumidamente, os valores encontrados para carga máxima total aplicada e os deslocamentos máximo e residuais tanto para a ponta fictícia quanto para o fuste dos seis casos. Em seguida, na Figura 1 são apresentadas as curvas carga-recalque obtidas dos ensaios analisados, onde os valores de deslocamentos positivos são referentes aos trecho superior da estaca (fuste) e os negativos relacionados ao segmento inferior (ponta fictícia).

Tabela 2. Resumo dos resultados obtidos.

Caso	Carga máxima Aplicada (kN)	Deslocamentos máximos (mm)		Deslocamentos residuais (mm)	
		Ponta fictícia	Fuste	Ponta fictícia	Fuste
01	1220	112,91	3,73	109,69	2,45
02	19625	50,91	5,25	46,93	4,05
03	4023	110,48	1,92	103,84	0,74
04	2249	70,43	0,75	64,39	0,41
05	18586	62,87	0,88	62,23	0,72
06	5424	22,19	47,01	21,06	45,53

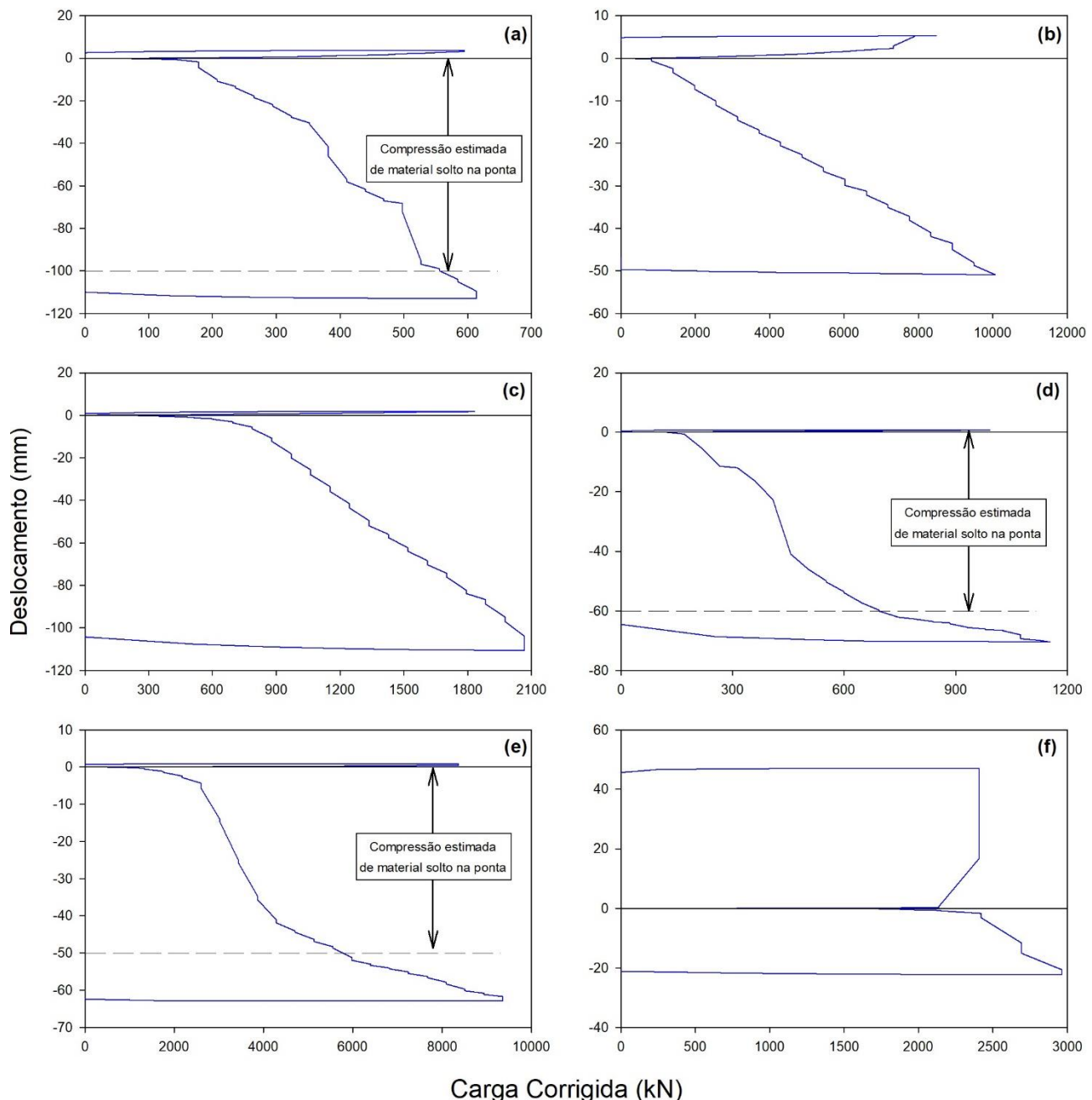


Figura 1. Curvas carga-recalque corrigidas: (a) Caso 01, (b) Caso 02, (c) Caso 03, (d) Caso 04, (e) Caso 05 e (f) Caso 06.

De modo geral, todos os casos apresentaram anormalidades nos trechos inferiores devido à deposição de material solto na ponta, deficiências estas evidenciadas pelos deslocamentos muito superiores quando comparados aos de seus respectivos trechos superiores, da ordem de 1.000 a 10.000% maiores com exceção do último ensaio.

Nos casos 02 e 03, a compressão desse material é demonstrado pela linearidade da curva carga-recalque de ambas as pontas fictícias sem que, necessariamente, tal material tenha sido completamente compactado. Comportamento semelhante foi encontrado no primeiro caso onde a curva apresentou maior instabilidade apesar da aparente linearidade da relação carga-deslocamento, fato este que pode ser atribuído às seguintes possibilidades: (i) menor diâmetro da estaca e/ou (ii) presença de matéria orgânica e de baixa resistência ao longo do fuste. A hipótese de que tal inconsistência possa ser explicada pelo processo executivo pode ser descartada porque, em trabalhos anteriores de estacas do tipo hélice contínua submetidas ao carregamento bidirecional (ENGLAND, 2003; MASSAD, 2015), este desempenho não foi observado. Apesar disso, vale



destacar que há uma ligeira inclinação da curva carga-recalque quando tal carregamento atinge por volta de 520 kN, indicando assim uma quantidade aproximada de 100 mm de material solto em seu interior que se encontrará completamente comprimido para maiores cargas.

Para os casos 04 e 05 pode ser observado uma alteração da curva carga-recalque caracterizada pela redução da taxa de deslocamentos para um mesmo acréscimo de carga, o que indica que o material depositado em seu interior está a ser comprimido, aumentando assim sua rigidez. Por meio das curvas dos trechos interiores, pode-se estimar uma deposição de material da ordem de 60 e 50 mm para os casos 04 e 05, respectivamente. Tal comportamento também foi apontado nos trabalhos de Schmertmann e Hayes (1997) e Schmertmann *et al.* (1998) para o caso de estaca escavada sem fluido estabilizante e, provavelmente, também seria observado para os três primeiros ensaios do presente trabalho se os mesmos fossem carregados além da carga estimada de ruptura, o que também possibilitaria a estimativa da quantidade de material em seus interiores.

Por fim, o caso 06 apresenta um exemplo onde o material solto na ponta começa a ser solicitado logo após a completa mobilização do atrito lateral da ponta fictícia, o que acontece por volta da carga igual a 2300 kN. Entretanto, tal solicitação acontece com maior intensidade até 2700 kN, carga a partir da qual o material disperso se encontra mais compacto e, como consequência, há maior mobilização do segmento superior da estaca, levando-o assim à ruptura. Na Figura 1, este comportamento é evidenciado pela mudança de inclinação da curva carga-recalque por volta de 2700 kN.

CONCLUSÃO

No presente trabalho foram analisados seis ensaios bidirecionais em estacas sob diversas condições de subsolo e diferentes procedimentos executivos (escavada com polímero, escavada sem polímero e hélice contínua) visando a identificação de anormalidades provenientes de sua execução. Por meio das análises das curvas carga-recalque, foi possível identificar a presença de material solto na ponta para todos os casos estudados, demonstrando a eficiência deste tipo de ensaio para tal finalidade quando comparado ao ensaio convencional, caso este em que tal afirmação só seria possível por meio da instrumentação em profundidade através de extensômetros elétricos. Além disso, esta aplicação da prova de carga bidirecional destaca sua importância principalmente na fase de pré-projeto, onde alterações nas características da estaca e no procedimento executivo adotado podem ser proposta de forma a melhorar o desempenho do elemento de fundação.

AGRADECIMENTOS

A equipe da Arcos Engenharia de Solos pelo fornecimento dos dados de ensaio para análise e a CAPES pelo fornecimento da bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U. R. (1996) Estacas hélice contínua com monitoração eletrônica: previsão da capacidade de carga através do ensaio SPT-T. In: 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE, São Paulo. *Anais...* [s.n.]. v. 2, pp. 141-151.
- Aoki, N., Velloso, D. D. A. (1975) An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: 5º Pan-American Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires. *Proceedings...* ISSMGE. v. 1, p. 367-376.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484. *Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Métodos de Ensaio*. Rio de Janeiro.
- Dai, G., Gong, W. (2012) Application of bi-directional static loading test to deep foundations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(3), p. 269-275.



- Décourt, L., Quaresma, A. R. (1978) Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. In: 6º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações – COBRAMSEF, Rio de Janeiro. *Anais... ABMS*. v. 6, p. 45-53.
- England, M. (2003) Bi-directional static load testing-state of the art. In: V International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles – BAP, Gante. *Proceedings...* Millpress. p. 309-131.
- England, M. (2003) World record bi-directional load testing of CFA piles. In: XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, [s.l.]. *Proceedings...* [s.n.]. v. 2, pp. 323-328.
- Fellenius, B. H. (2021) *Basic of foundation design (Eletronic Edition)*. Disponível em: <https://www.fellenius.net/papers/>. Acesso em: 17 nov. 2021.
- Kim, H. J., Mission, J. L. C. (2011) Improved evaluation of equivalent top-down load-displacement curve from a bottom-up pile load test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(6), p. 568-578.
- Kwon, O. S., Choi, Y.; Kwon, O.; Kim, M. M. (2005) Comparison of the bidirectional load test with the top-down load test. *Transportation Research Record*, 1936(1), p. 108-116.
- Lee, J. S., Park, Y. H. (2008) Equivalente pile load-head settlement curve using a bi-directional pile load test. *Computers and Geotechnics*, 35(2), p. 124-133.
- Massad, F. (2015) On the interpretation of the bidirectional static load test. *Soil and Rocks*, 38(3), p. 249-262.
- Silva, P. E. C. A. F. (1983) *Célula expansiva hidrodinâmica: Uma nova maneira de executar provas de carga*, ARCOS, Belo Horizonte, Brasil.
- Silva, P. E. C. A. F. (1986) *Célula expansiva hidrodinâmica: Uma nova maneira de executar provas de carga*. In: 8º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações – COBRAMSEF, Porto Alegre. *Anais... ABMS*. v. 6, p. 223-241.
- Niazi, F. S., Mayne, P. W. (2014) Axial pile response of bidirectional o-cell loading from modified analytical elastic solution and downhole shear wave velocity. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(11), p. 1284-1302.
- Osterberg, J. O. (1989) New device for load testing driven piles and drilled shafts separates friction and end bearing. In: 14th International Conference of Piling and Deep Foundation, Londres. *Proceedings...* CRC Press. p. 421-427.
- Schmertmann, J. H., Hayes, J. A. (1997) The osterberg cell and bored pile testing – a symbiosis. In: 3rd International Geotechnical Engineering Conference, Cairo. *Proceedings...* p. 3-12.
- Schmertmann, J. H., Hayes, J. A.; Molnit, T.; Osterberg, L. O. (1998) O-cell testings case histories demonstrate the importance of bored pile (drilled shaft) construction technique. In: 4th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Missouri. *Proceedings...* University of Missouri. p. 1103-1115.
- Teixeira, A. H. (1996) Projeto e execução de fundações. In: 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE, São Paulo. *Anais...* [s.n.]. v. 3, pp. 33-50.
- Velloso, P. P. C. (1981) Estacas em solo: dados para a estimativa do comprimento. Ciclo de Palestras sobre Estacas Escavadas, Clube de Engenharia, Rio de Janeiro.
- Wan, Z. H., Dai, G. L.; Gong, W. M. (2019) Field study on post-grouting effects of cast-in-place bored piles in extra-thick fine sand layers. *Acta Geotechnica*, 14(5), p. 1357-1377.