



Análise de Ensaios Bidirecionais em Estacas Escavadas na Região Metropolitana de São Paulo

Alexsander Silva Mucheti
Engenheiro Civil, ZF & Engenheiros Associados, São Paulo, Brasil, alex@zfsolos.com.br

Frederico Fernando Falconi
Engenheiro Civil, ZF & Engenheiros Associados, São Paulo, Brasil, fred@zfsolos.com.br

Maíra da Silva Santos
Engenheira Civil, ZF & Engenheiros Associados, São Paulo, Brasil, maira@zfsolos.com.br

Virgínia Lucchesi Maset
Engenheira Civil, ZF & Engenheiros Associados, São Paulo, Brasil, virginia@zfsolos.com.br

Wanderley Fava Junior
Engenheiro Civil, ZF & Engenheiros Associados, São Paulo, Brasil, wanderleyfava@zfsolos.com.br

RESUMO: O objetivo deste trabalho é analisar os resultados de três ensaios bidirecionais realizados em estacas escavadas de grande diâmetro com fluído estabilizante de diâmetro 150 cm, comprimentos de 25,5 a 28,0 m e carga de trabalho de 8.830 kN, executadas na região metropolitana de São Paulo. As células expansivas hidrodinâmicas foram posicionadas a 2,0 e 4,5 m acima da ponta da estaca respectivamente. As estacas foram embutidas em solo com resistência N_{SPT} superiores a 60 golpes. Os ensaios apresentaram deslocamentos distintos principalmente para o trecho abaixo das células (ponta). Para auxílio na interpretação dos resultados do trecho abaixo da célula e, confiabilidade dos resultados, foi aplicado o método da rigidez de Décourt (1996) para estimativa das parcelas de carga de atrito lateral e ponta. Os resultados levam a uma discussão prática, quanto ao dimensionamento das estacas, os níveis de instalação das células e os aspectos executivos.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas escavadas, estação, ensaio bidirecional, célula expansiva, métodos da rigidez.

ABSTRACT: The objective of this paper is to analyze the results of three bi-directional load tests performed on kelly bored piles with a diameter of 150 cm, lengths of 25.5 to 28.0 m and a working load of 8,830 kN, executed in the metropolitan area of São Paulo. The O-cells were installed 2.0 and 4.5 m above the pile toe respectively. The piles were embedded in soil with an N_{SPT} resistance greater than 60 blows. The tests showed distinct displacements mainly for the stretch below the cells (tip). To aid in the interpretation of the results of the section below the cell and the reliability of the results, the stiffness method of Décourt (1996) was applied to estimate the portions of the skin friction and toe load. The results lead to a practical discussion, regarding the design of the piles, the installation levels of the cells and the executive aspects.

KEYWORDS: Kelly piles, bored piles, bi-directional load test, o-cells, rigidity method.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





1 Introdução

De acordo com a NBR 6122/2019 para o desempenho dos elementos de fundação, em casos particulares, em que a carga admissível da estaca é superior a 3.000 kN, fica a critério do projetista a substituição de prova de carga estática por outros ensaios de carga.

Neste contexto o ensaio com célula expansiva hidrodinâmica ou ensaio bidirecional é uma alternativa. O ensaio consiste na instalação de uma ou mais células expansivas (expancells ou O-Cells) junto a ponta da armadura da estaca, que tem comprimento pré estabelecido de maneira a posicionar a célula no fuste da estaca na profundidade planejada. Para a determinar a posição adequada da célula busca-se o equilíbrio entre a resistência ao atrito lateral mais o peso próprio da estaca (trecho acima da célula) contra o atrito lateral mais a resistência de ponta (trecho abaixo da célula).

A metodologia executiva do ensaio carece de normatização no Brasil, entretanto recomenda-se o uso da norma americana ASTM D8169/D8169M (2018) como diretriz para o projeto e execução de ensaios bidirecionais. De maneira geral para calibração dos instrumentos e etapas de execução do ensaio, podem-se adotar os procedimentos da NBR 12131/2020, (Dada, 2019).

Além do conhecimento para o posicionamento ideal da célula é necessária atenção quanto à interpretação dos resultados, principalmente a combinação das duas curvas de deslocamentos obtidas no ensaio (fuste e ponta) com o objetivo de obter uma curva equivalente de uma prova de carga estática.

Segundo Souza Cruz, Lopes e Freitas (2022) o ensaio bidirecional será capaz de indicar a capacidade de carga (na ruptura) da estaca ensaiada se a célula tiver sido posicionada em um nível tal que a capacidade de carga do segmento inferior seja próxima da capacidade de carga do segmento superior. O nível da célula é escolhido a partir da estimativa da capacidade de carga ao longo do fuste e na base da estaca, um exercício nem sempre trivial. Caso a escolha não tenha sido acertada, a capacidade de carga de um segmento se esgota antes do outro, e a prova se encerra, sendo necessária uma extrapolação da curva que terminou precocemente.

A interpretação do ensaio bidirecional pode ser visto de maneira prática em Maset, Falconi e Hachich (2016) que salientam a importância de se contabilizar os deslocamentos devido ao encurtamento elástico da estaca e, em Falconi e Maset (2016) que apresentam a interpretação de oito ensaios bidirecionais contabilizando o recalque elástico.

Resende et al. (2022) analisaram o resultado de ensaios bidirecionais como meio para identificação de falhas nos processos construtivos de um total de seis estacas. Foi identificada a presença de material solto na ponta da estaca em todos os casos estudados, demonstrando-se a eficiência deste ensaio para esta finalidade quando comparado a uma prova de carga estática.

O presente trabalho se propõe a analisar o resultado de três ensaios bidirecionais realizados em estacas escavadas de grande diâmetro com fluido estabilizante de diâmetro 150 cm e comprimentos de 25,5 a 28,0 m. Para a interpretação dos resultados do trecho abaixo da célula, foi aplicado o método da rigidez de Décourt (1996) de estimativa das parcelas da carga de atrito e ponta. Os resultados levam a uma discussão prática, quanto ao dimensionamento das estacas, os níveis de instalação das células expansivas e os aspectos executivos.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



2 Materiais e métodos

2.1 Característica geológica do solo local

De acordo com Negro et al. (2012) o subsolo local pertence às coberturas quarternárias constituídas por depósitos aluvionares de ocorrência generalizada, pois a região corresponde às áreas de deposição do rio Pinheiros e córrego Água Espreada. Esses depósitos são constituídos por argilas ricas em matéria orgânica, de coloração preta ou cinza escuro, moles a muito moles e camadas arenosas, podendo conter matéria orgânica ou cascalho associado, de coloração amarela a cinza escura, fofas a compactas.

De acordo com as sondagens executadas no local o solo apresenta camadas intercaladas de argila e areia, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos solos das sondagens representativas.

Camadas (m)	Cota (m)	Característica
0,0 a 3,0	750,0 a 747,0	Argila silto arenosa
3,0 a 10,0	747,0 a 740,0	Argila siltosa pouco arenosa
10,0 a 16,0	740,0 a 734,0	Areia fina e média pouco argilosa
16,0 a 20,0	734,0 a 730,0	Argila siltosa pouco argilosa
20,0 a 24,0	730,0 a 726,0	Areia fina e média pouco argilosa
24,0 a 34,0	726,0 a 716,0	Argila siltosa pouco arenosa

Nas Figuras 1 a 3 apresenta-se o N_{SPT} ao longo da profundidade das sondagens próximas a cada ensaio bidirecional, onde se ilustra a cota de execução, de arrasamento e ponta das estacas, bem como a cota de instalação da célula expansiva.

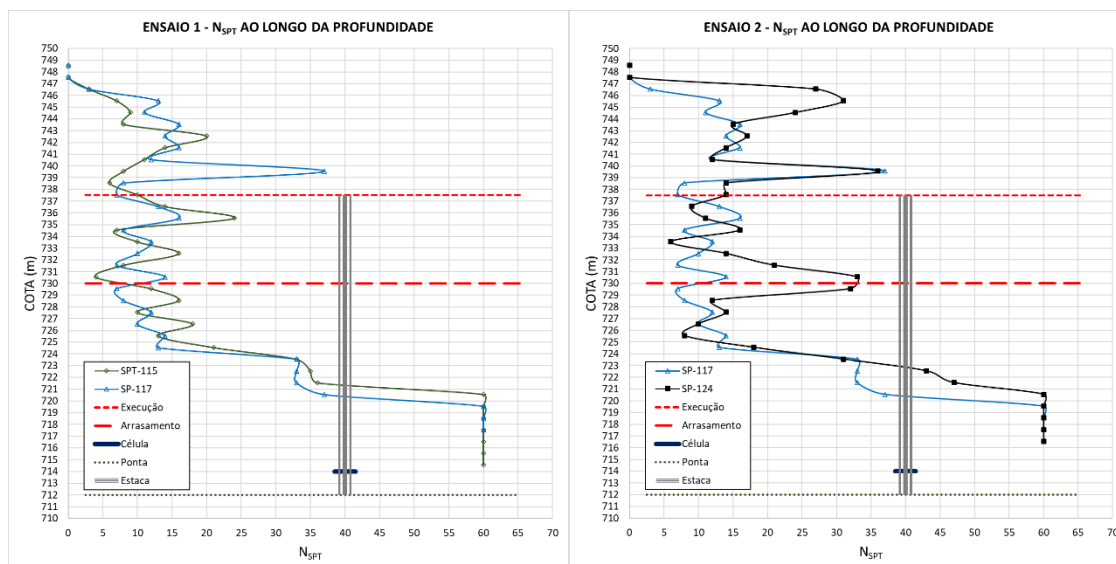


Figura 1 – N_{SPT} x profundidade, Ensaio 1.

Figura 2 – N_{SPT} x profundidade, Ensaio 2.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



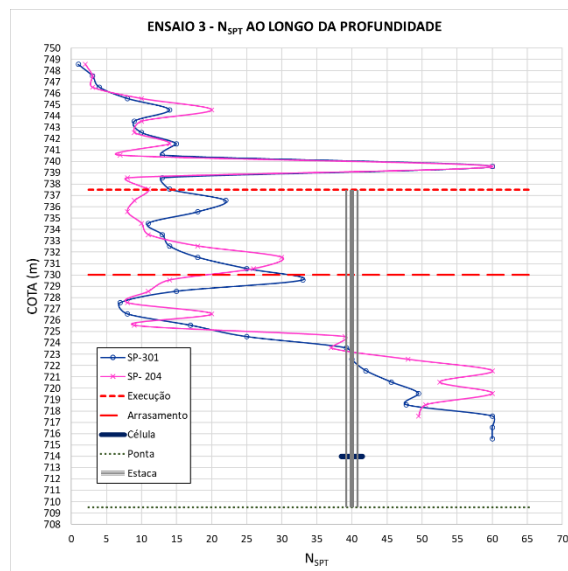


Figura 3 – N_{SPT} x profundidade, Ensaio 3.

2.2 Característica das estacas e posicionamento das células

As estacas executadas foram do tipo escavadas de grande diâmetro com fluido estabilizante, com diâmetro de 150 cm, comprimento de 25,5 (Ensaio 1 e 2) e 28,0 m (Ensaio 3) e carga de trabalho de 8.830 kN.

O posicionamento das células expansivas foi estimado através das análises das sondagens à percussão representativas de cada estaca. Para o esquema de montagem buscou-se o equilíbrio entre a resistência ao atrito lateral do fuste mais o peso próprio do mesmo contra o atrito lateral da ponta mais a resistência de ponta.

Para o cumprimento do cronograma da obra a construtora optou pela execução das estacas aproximadamente 6,0 m acima da cota de escavação final. Neste trecho foi utilizado para o preenchimento do fuste, argamassa (cimento e areia) composta por 120 kg de cimento por metro cúbico, quantidade de cimento mínima exigida pelo fornecedor para que o mesmo pudesse ser bombeado.

Em cada estaca foram instaladas quadro células expansivas, fixadas na ponta da armadura na profundidade estabelecida, Figura 4.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





Figura 4 – Detalhe das células expansivas na ponta da armadura.

Durante a realização dos ensaios os deslocamentos foram medidos através de três telltales guiados por tubos previamente instalados no fuste da estaca. Os deslocamentos do fuste foram medidos através do movimento ascendente da parte superior da estaca e através de um telltale posicionado acima da célula e outro posicionado no topo da estaca. A resistência característica do concreto de 30 MPa foi confirmada previamente à execução dos ensaios.

Os ensaios foram com carregamento rápido, conforme NBR 16903/2020 sendo as cargas transmitidas às células expansivas hidrodinâmicas situadas no interior das estacas.

Foram aplicados estágios iguais e sucessivos de carga, com um total de no mínimo 20 estágios, sendo que cada estágio não foi superior a 10% da carga de trabalho prevista para a estaca. Em cada estágio a carga foi mantida durante 10 minutos, independentemente da estabilização dos deslocamentos.

3 Resultados

O ensaio 1 apresentou um deslocamento excessivo de 141 mm no primeiro estágio de carregamento com 433 kN, limitado pela capacidade de abertura das células expansivas e a não estabilização da carga aplicada, tornando-se o ensaio em termos de comportamento carga *versus* deslocamento inconclusivo, Figura 5. Os ensaios 2 e 3 foram levados até o dobro da carga de trabalho com 17.660 kN.

Verifica-se no ensaio 2 um deslocamento representativo para o trecho abaixo da célula (ponta), da ordem de 153 mm (10% do diâmetro da estaca) e, um deslocamento no topo da estaca de 0,30 mm e no topo da célula de 1,11 mm, estes pouco representativos. Vale salientar que as células expansivas instaladas na estaca possuem uma abertura limitada da ordem de 150 mm, ou seja, no último estágio de carregamento coincidiu com o limite de abertura das células, Figura 6.

No ensaio 3 foi observado o deslocamento de 42 mm para o trecho abaixo da célula (ponta), 0,3 mm no topo da estaca e, no topo da célula de 4,9 mm, que comprovaram o bom desempenho da estaca pelos deslocamentos de pequena magnitude, Figura 7.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Com a constatação dos elevados deslocamentos do trecho abaixo da célula dos ensaios 1 e 2 foi confirmada a característica do solo da ponta das estacas e providenciado um levantamento de todos os dados executivos e histórico das estacas.

Foi constatada uma demora excessiva entre o fim da desarenação e o início da concretagem sem o cuidado necessário de nova limpeza, ocasionando decantação e má qualidade da ponta da estaca.

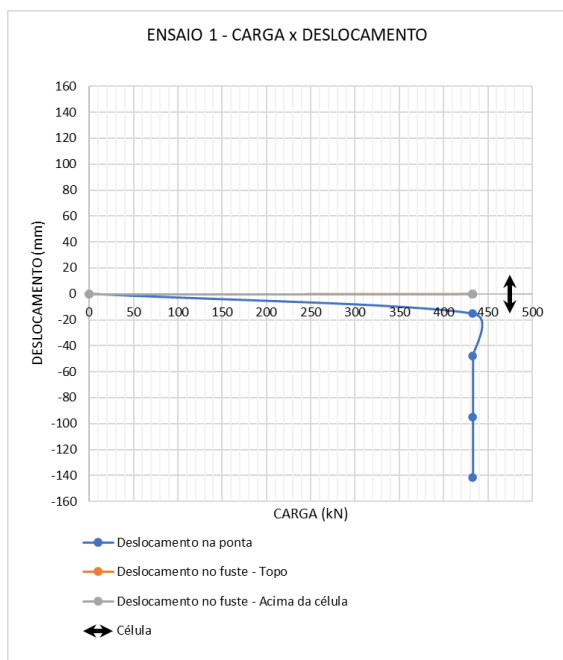


Figura 5 – Ensaio bidirecional 1.

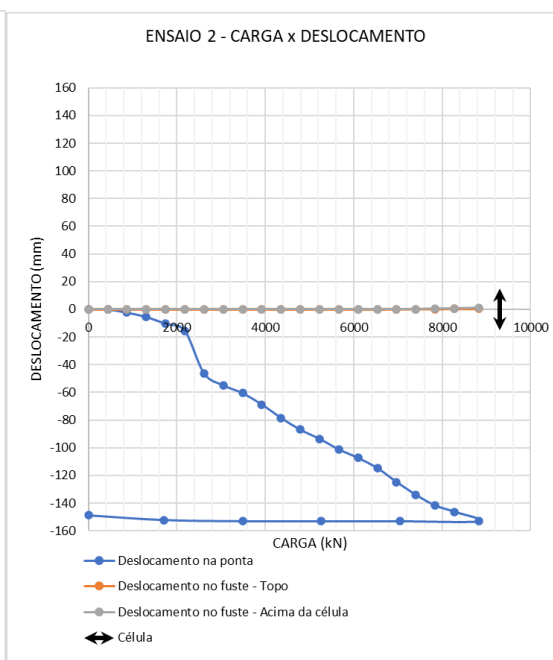


Figura 6 – Ensaio bidirecional 2.

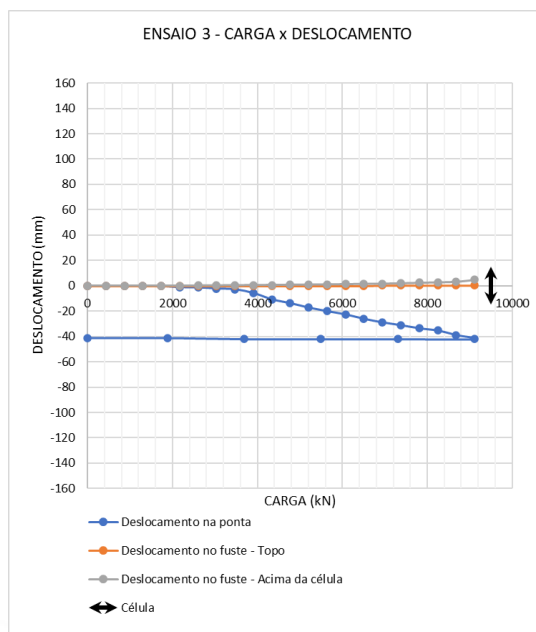


Figura 7 – Ensaio bidirecional 3.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



4 Análise dos resultados

O objetivo da análise é investigar a capacidade de carga da ponta das estacas dos ensaios 2 e 3 com o pouco deslocamento do trecho acima das células.

Inicialmente a escala gráfica dos deslocamentos dos ensaios foi ajustada (ampliada), Figuras 8 e 10. Torna-se possível observar o ponto do carregamento onde ocorre uma mudança significativa da inclinação da curva carga *versus* deslocamento. Este ponto pode ser caracterizado como o esgotamento do atrito lateral do trecho abaixo da célula e se pode “estimar” os valores das parcelas de atrito e ponta.

Para confirmação da observação “direta” feita na curva carga *versus* deslocamento de escala ajustada, foi aplicado o método da rigidez de Décourt (1996), e os resultados são corroborados conforme pode ser visto nas Figuras 9 e 11.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados das estimativas das parcelas de carga de atrito lateral e ponta.

Ensaio	Carga aplicada (kN)	L* (m)	Deslocam. (mm)	Atrito lateral (kN)	Carga na ponta (kN)	Ponta (%)	Tensão na ponta (KPa)
2	8.830	2,0	153	2.178	6.652	75	3.764
3	9.112	4,5	42	3.905	5.207	57	2.946

*L – Posição das células hidrodinâmicas acima da ponta da estaca.

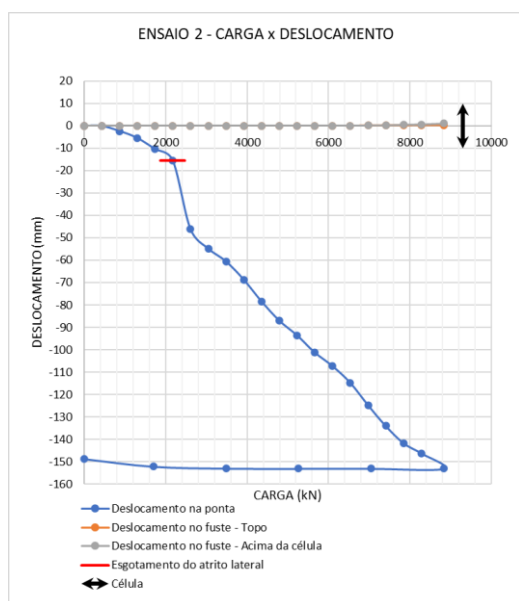


Figura 8 – Carga x deslocamento, ensaio 2.

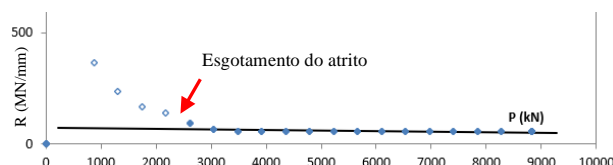


Figura 9 – Método da rigidez, ensaio 2.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



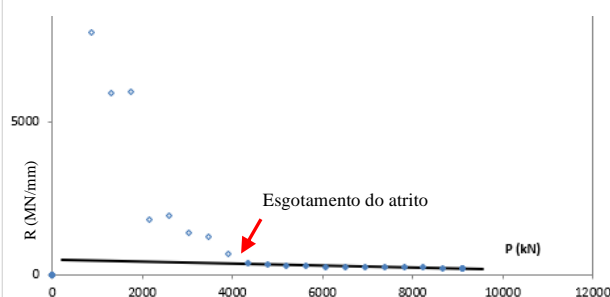
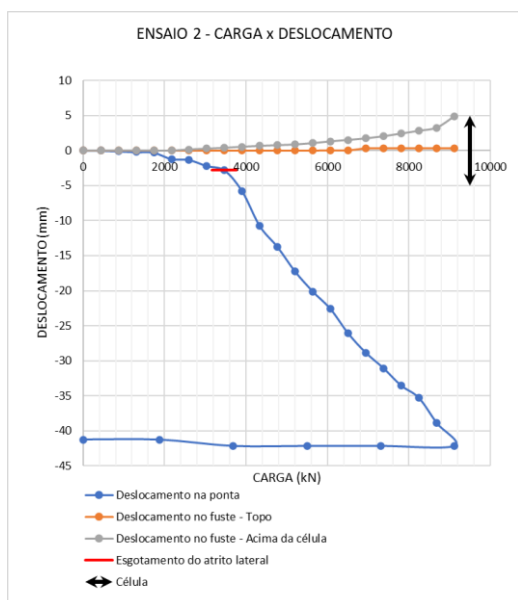


Figura 10 – Carga x deslocamento, ensaio 3.

Figura 11 – Método da rigidez, ensaio 3.

5 Conclusões e discussão

Os ensaios bidirecionais mostram-se eficientes para determinação da capacidade de carga de estacas escavadas de grande diâmetro com fluido estabilizante, devido à facilidade de instalação das células hidrodinâmicas no interior da estaca, a praticidade de realização do ensaio em campo e, principalmente, por possibilitarem a realização de ensaios de elevada capacidade de carga quando comparados às provas de carga estáticas.

Com as confirmações da característica do solo da ponta das estacas, dos dados executivos e, principalmente do histórico dos ensaios 1 e 2, infere-se a falha ao cuidado de limpeza da ponta e ao intervalo entre a desarenação da estaca e início da concretagem, que levaram ao grande deslocamento da ponta.

Os resultados levam a uma conclusão de que se os ensaios tivessem sido realizados em provas de carga estáticas, muito provavelmente não seria possível verificar as magnitudes dos deslocamentos de ponta das estacas, ressaltando-se assim a especificidade deste método, caso a proposta seja a determinação da carga de ponta de uma estaca longa ou com fuste de elevado atrito lateral.

O resultado observado no ensaio 3 demonstra que a posição de instalação das células a 4,5 m acima da ponta da estaca melhor caracterizou o equilíbrio entre os trechos acima e abaixo das células.

Demonstrou-se a importância da adequada escala da curva carga x deslocamento para visualização da mudança de inclinação da curva onde supostamente encontra-se o ponto de esgotamento do atrito lateral. A aplicação do método da rigidez de Décourt (1996) confirmou a

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



hipótese acima e permitiu estimar as contribuições de carga de atrito lateral e ponta, mostrando-se eficiente para separação das parcelas de atrito e ponta.

Os resultados mostraram a importância do controle executivo, em especial a qualidade da limpeza da ponta das estacas para um bom desempenho de capacidade de carga da estaca, indicando a necessidade de um acompanhamento constante durante o andamento dos trabalhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U. R. (1996). *Estacas hélice contínua com monitoramento eletrônico: previsão da capacidade de carga através do ensaio SPT-T*. In: III Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE III, São Paulo. Anais ... ABMS. Vol.2, pp.141-151.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solo – Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2018). D8169/D8169M: *Standard test methods for deep foundations under bi-directional static axial compressive load*. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA. 13p.
- Dada, T. L. (2019). *Ensaio bidirecional em estacas moldadas in loco: técnicas de execução e métodos de interpretação, com aplicação a casos de obras*. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 296p.
- DÉCOURT, L. A (1996). *Ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez*. In: III Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE III. São Paulo. Anais... ABEF e ABMS, v.1, p. 215-224.
- Falconi, F. F.; Maset, V. L. (2016). *Análise prática de resultados de ensaios bidirecionais*. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG. Belo Horizonte - MG. Anais... ABMS.
- Maset, V. L.; Falconi, F. F.; Hachich, W. C. (2016). *Interpretação dos resultados de ensaios bidirecionais*. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG. Belo Horizonte - MG. Anais... ABMS.
- Resende, A. S.; Barbosa, Y.; Chaves, N. A.; Albuquerque, P. J. R. (2022). *Avaliação de desempenho de estacas escavadas em ensaios bidirecionais – Análise de resultados*. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG. Campinas - SP. Anais... ABMS.
- Souza Cruz, F. V. A.; Lopes, F. R.; Freitas, A. C. (2022). *Contribuição à construção de curva carga-recalque equivalente de estacas ensaiadas pelo método bidirecional*. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG. Campinas - SP. Anais... ABMS.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

