



Carga de Ponta em Estacas Escavadas - Análise de Ensaios Bidirecionais com Estacas Apoiadas em Solo

Willian Santos Sousa

Engenheiro Civil, ZF & Engenheiros Associados, São Paulo, Brasil, willian@zfsolos.com.br

Bruno Abrahão de Barros

Engenheiro Civil, ZF & Engenheiros Associados, São Paulo, Brasil, bruno@zfsolos.com.br

Frederico Fernando Falconi

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

Alysson Resende

Engenheiro Civil, Arcos Engenharia de Solos, Minas Gerais, Brasil alysson@arcos.eng.br

RESUMO: O objetivo deste trabalho é analisar os resultados de três ensaios bidirecionais realizados em estacas escavadas com fluido estabilizante de diâmetros 110 e 120 cm, com comprimentos que variam de 29,75 a 31,46 m, executadas na região central de São Paulo. As células expansivas hidrodinâmicas foram posicionadas a 2,00, 3,00 e 5,00 m acima da ponta das estacas. O subsolo local pertence à Formação São Paulo, com camadas intercaladas de areias medianamente compactas e argilas rijas a duras. A ponta das estacas ficou embutida em solo arenoso com resistência N_{SPT} superior a 50 golpes. Os ensaios apresentaram deslocamentos de pequena magnitude tanto para o fuste como para a ponta da estaca. Para a interpretação e confiabilidade dos resultados foi aplicado o método da Rigidez (Décourt, 1996), com intuito de estimar a contribuição das parcelas de carga de atrito lateral e ponta no trecho abaixo das células. Os resultados levam a discussão prática da confirmação de utilização da carga de ponta disponível em solo competente quando seguidas as considerações quanto à limpeza de ponta descritas na ABNT NBR 6122:2019.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas escavadas, ensaio bidirecional, célula expansiva, métodos de extrapolação, limpeza de ponta, carga de ponta.

ABSTRACT: The aim of this study is to analyze the results of three bidirectional tests conducted on bored piles with stabilizing fluid, with diameters of 110 and 120 cm, and lengths ranging from 29.75 to 31.46 m, executed in the central region of São Paulo. The O-Cells were positioned at 2.00, 3.00, and 5.00 m above the toe of the piles. The local subsurface belongs to the São Paulo Formation, with intercalated layers of moderately compact sands and stiff to hard clays. The pile toes were embedded in sandy soil with an NSPT resistance greater than 50 blows. The tests showed small displacements both in the shaft and at the pile toe.

For the interpretation and reliability of the results, the Stiffness Method (Décourt, 1996) was applied, aiming to estimate the contribution of lateral friction and toe load components in the section below the cells. The results lead to a practical discussion about the confirmation of using the available toe load in competent soil when the considerations regarding toe cleaning described in ABNT NBR 6122:2019 are followed.

KEYWORDS: Bored piles, bidirectional test, O-Cell, extrapolation methods, toe cleaning, toe load.

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





1 INTRODUÇÃO

Muito se tem discutido sobre a capacidade de carga de ponta em estacas escavadas de grande diâmetro com fluido estabilizante. A ABNT NBR 6122:2019 em seu item 8.2.1.2 indica que a carga de ponta não precisa ser limitada ao valor de atrito lateral quando a estaca estiver apoiada em solo competente ou em rocha, desde que se observem procedimentos especiais de limpeza. Conflitadamente, seu Anexo J, item J.3.3, restringe esta metodologia de cálculo apenas às estacas cuja ponta está apoiada em rocha.

Para se dirimir esta dúvida foram executados 3 ensaios bidirecionais em estações de uma obra na região central da cidade de São Paulo apoiados em solo competente. O fluido estabilizante utilizado foi a lama bentonítica, a limpeza de ponta foi feita de acordo com o item J.3.2 da norma, porém sem o uso do reciclador, e as células expansivas foram instaladas próximas à ponta das estacas. Os resultados comprovam sobremaneira a possibilidade da adoção de carga de ponta conforme indicado no referido item 8.2.1.2 da norma quando a estaca estiver apoiada em solo competente.

2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ABNT NBR 6122:2019

Em seu item 8.2.1.2, a ABNT NBR 6122:2019 (Projeto e Execução de Fundações) estabelece limites para a carga de ponta das estacas escavadas segundo as seguintes hipóteses:

1. Caso sejam atendidos procedimentos executivos mínimos, “na verificação do ELU a resistência da ponta terá como limite superior o valor da resistência de atrito lateral: $P_p \leq P_l$ e $P_{adm} = (P_p + P_l)/2$ ”, ou seja, no máximo 50% da carga será resistida pela ponta da estaca.
2. Caso o executor não seja capaz de executar sequer estes procedimentos mínimos para garantia da ponta da estaca, a resistência de ponta deverá ser considerada nula ($P_p = 0$) e conseqüentemente $P_{adm} = P_l/2$
3. Por outro lado, para o caso de estacas escavadas com uso de fluido estabilizante, há no Anexo J a descrição dos “procedimentos executivos especiais (além dos mínimos) para garantir o contato entre a estaca e o solo competente ou rocha”, que quando observados permitem a adoção de $P_{adm} = (P_p + P_l)/2$ sem restrições ao P_p calculado.

Ou seja, seria esperado do Anexo J apenas dois procedimentos de limpeza de ponta: um mínimo, que resultaria $P_p \leq P_l$, e um especial, onde o P_p calculado poderia ser adotado sem restrições. Caso nenhum dos procedimentos fosse adotado P_p deveria ser considerado nulo.

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



Ocorre que o Anexo J da mesma norma conflita com o corpo principal do texto:

- O item J.3.1 “Procedimento de limpeza para estacas escavadas com ponta em solo sem consideração de carga na ponta (ver 8.2.1.2 $(P_p + P_l)/2$ com $P_p = 0$)” é correlato com a hipótese 2, que na verdade é a metodologia de cálculo que deveria ser adotada caso não seja executado nenhum procedimento de limpeza. O item é inclusive incoerente, afinal, qual a necessidade de estabelecer procedimentos de garantia de qualidade de ponta para logo em seguida descartá-la e adotar apenas a resistência por atrito lateral?
- O item J.3.2 “Procedimento de limpeza para estacas escavadas com ponta em solo e consideração de carga na ponta (ver 8.2.1.2 $(P_p + P_l)/2$ com $P_p \leq P_l$)” é correlato com a hipótese 1, de procedimentos mínimos, porém especifica a adoção de bombas mais potentes (vazão mínima 120m³/h) e até a passagem da lama por reciclador.
- O item J.3.3 “Procedimento de limpeza para estacas escavadas com **ponta em rocha** e consideração de carga na ponta (ver 8.2.1.2 $(P_p + P_l)/2$ **sem limitação de P_p**)” seria correlato com a hipótese 3, porém esta dizia explicitamente que o procedimento teria validade tanto para solo competente quanto para rocha, enquanto o anexo limita a adoção desta metodologia de cálculo exclusivamente aos casos de ponta em rocha, prevendo inclusive a possibilidade de uso de “ponta helicoidal dotada de bits de tungstênio e/ou vídia, desde que a ferramenta permita a remoção completa do material.”

As principais especificações de cada um dos procedimentos do Anexo J para o uso de lama bentonítica estão apresentadas no quadro a seguir:

Quadro 1. Procedimentos de limpeza de ponta.

	J.3.1 ($P_p = 0$)	J.3.2 ($P_p \leq P_l$)	J.3.3 (P_p s/restrições)
Ferramenta	Caçamba com flap ou fundo duplo rotativo	Caçamba com flap ou fundo duplo rotativo	Ponta helicoidal dotada de bits
Desarenação	1 Ciclone $Q = 80 \text{ m}^3/\text{h}$ $H = 30 \text{ mca}$	1 ou 2 ciclones $Q = 120 \text{ m}^3/\text{h}$ $H = 30 \text{ mca}$ Reciclador com duas peneiras (5 mm e 0,4 mm)	1 ou 2 ciclones $Q = 120 \text{ m}^3/\text{h}$ $H = 30 \text{ mca}$ Reciclador com duas peneiras (5 mm e 0,4 mm)
Procedimento	-	Remoção do material do fundo da estaca pelo tubo tremonha	Remoção do material com a ponta helicoidal. <i>Air Lift</i> opcional.

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



3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O SOLO NA REGIÃO

Os ensaios foram realizados em estacas que compõem a fundação de um edifício multifuncional localizado no espigão central da cidade, mais precisamente no bairro do Pacaembu, em São Paulo - SP.



O subsolo local pertence à Formação São Paulo, com camadas intercaladas de areias medianamente compactas e argilas rijas a duras. Nos primeiros 20,00 m de profundidade o solo é constituído predominantemente de areia argilosa com $N_{SPT} = 16$, com algumas camadas de argila siltoosa de mesmo N_{SPT} . Os próximos 8,00 m são constituídos de areia silto argilosa com N_{SPT} da ordem de 40 e daí em diante de solo com granulometria muito similar e N_{SPT} superior a 50. O nível d'água foi encontrado no nível de execução da sondagem. Nas figuras 1 e 2 a seguir são apresentadas as sondagens mais próximas às estacas ensaiadas. Junto às sondagens estão marcadas as cotas de execução (E), arrasamento (A), instalação da célula expansiva hidrodinâmica (C) e ponta (P).

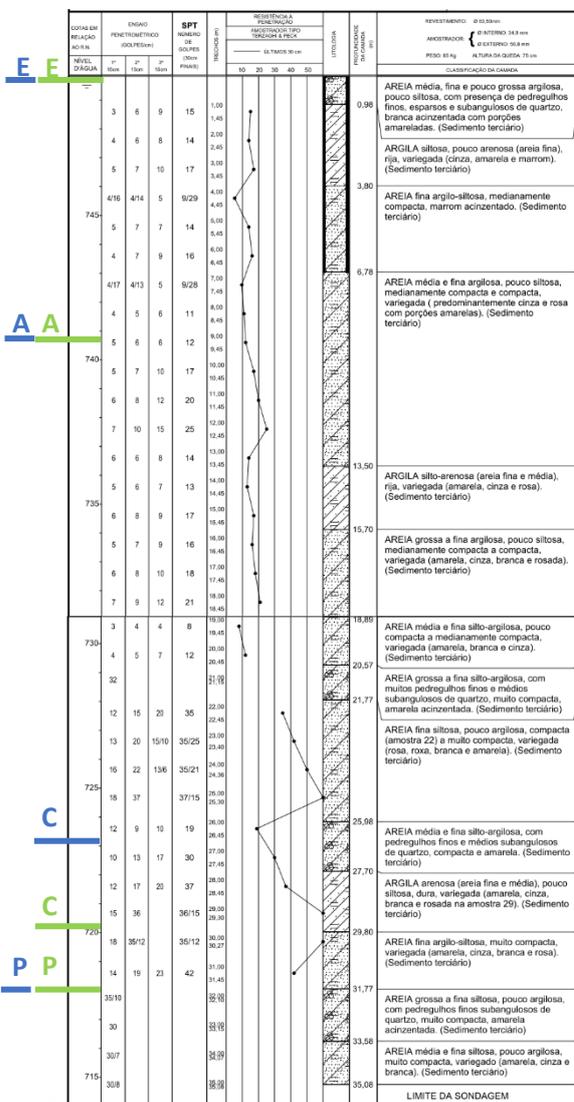


Figura 1. Sondagem representativa, PCE-01 (verde) e PCE-03 (azul).

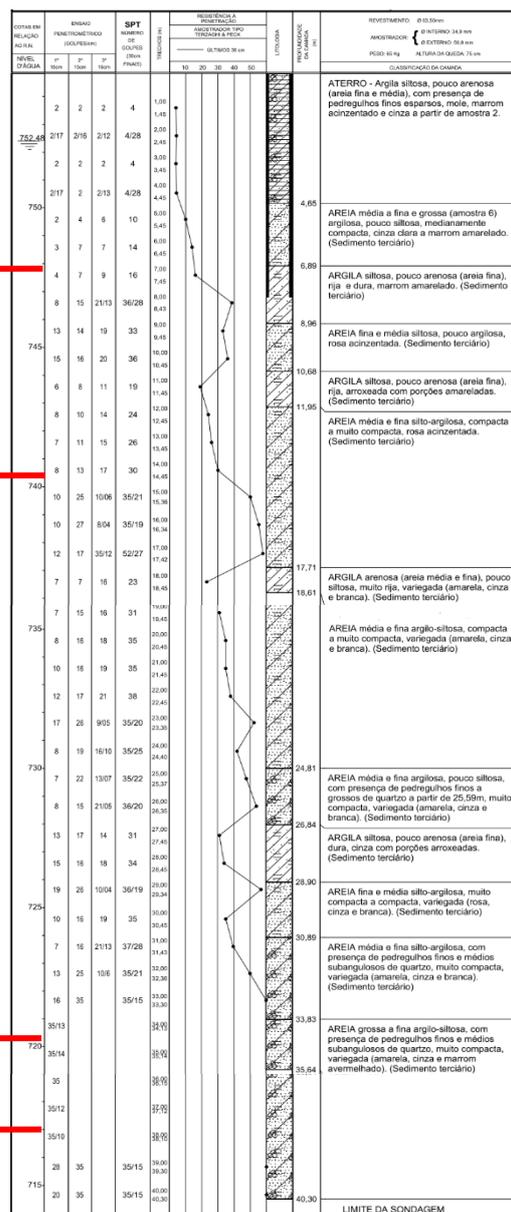


Figura 2. Sondagem representativa, PCE-02 (vermelho).

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



4 ENSAIO BIDIRECIONAL

As provas de carga com células expansivas hidrodinâmicas, ensaios bidirecionais, são ferramentas para avaliação dos deslocamentos das fundações quando submetidas a esforços assim como os demais ensaios para verificação de capacidade de carga: a prova de carga estática e o ensaio de carregamento dinâmico.

Em contrapartida ao ensaio convencional, os macacos hidráulicos especiais, as células expansivas hidrodinâmicas, são equipamentos de sacrifício, pois são concretados no interior da estaca no momento de sua concretagem.

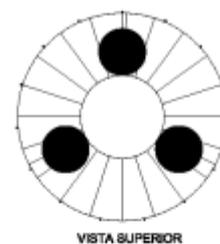
4.1 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

A prova de carga com células expansivas hidrodinâmicas se dá através da instalação destas dentro da estaca, previamente aferidas, no momento de sua execução. O ensaio consiste na expansão das células de forma a provocar deslocamentos a serem medidos no fuste e na ponta da estaca, fazendo com que um reaja contra a outra, solicitando ambos os trechos a compressão verticalmente. Para a definição da profundidade de instalação busca-se o equilíbrio entre as cargas resistentes do fuste (resistência ao atrito lateral mais o peso próprio do trecho acima das células expansivas) e da ponta (atrito lateral do trecho abaixo das células expansivas mais sua resistência de ponta).

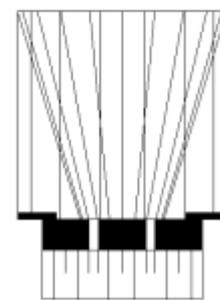
Neste caso específico, por se tratar de estacas escavadas, foram projetados conjuntos de três células simetricamente posicionadas em gaiolas metálicas de diâmetros compatíveis com cada uma das estacas a serem ensaiadas. As gaiolas possuíam espaço circular central para passagem do tubo-tremie de concretagem, conforme pode ser visualizado na Figura 3.

Os deslocamentos da ponta foram medidos através dos *telltale* instalados na base das células expansivas, enquanto os deslocamentos do fuste foram medidos através do movimento ascendente da parte superior da estaca e do *telltale* instalado acima das células. Os deflectômetros utilizados para medição dos deslocamentos apresentam leitura direta com precisão de 0,01 mm.

Os ensaios foram executados através de carregamento rápido, conforme o item 8.2.5, da norma ABNT NBR 16903:2020 em estágios iguais e sucessivos limitados a 10% da carga de trabalho da estaca testada. Em cada estágio a carga foi mantida durante 10 minutos, independentemente da estabilização dos deslocamentos e promoveram-se estágios até se chegar a duas vezes a carga de trabalho.



VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL

Figura 3. Conjunto com três células expansivas hidrodinâmicas.

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



5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação de desempenho das estacas da obra, utilizando ensaios bidirecionais, foi feita em duas fases. A primeira fase ocorreu em fevereiro de 2023 e foi composta pelas PCEs 01 e 02, enquanto a segunda fase ocorreu em março de 2023 e foi composta apenas pela PCE-03.

PCE-01 e PCE-03 foram executadas em estacas de 110 cm de diâmetro com 31,46 e 29,75 m de comprimento respectivamente, enquanto a PCE-02 foi executada em estaca de 120 cm de diâmetro com 30,83 m de comprimento.

A PCE-01 foi solicitada por 20 estágios, chegando até 9.583,20 kN, a PCE-02 foi solicitada por 21 estágios, até 11.390,40 kN e, por fim, a PCE-03 transcorreu por 22 estágios até atingir 10.541,52 kN. Todos os ensaios foram realizados sem que ocorresse a ruptura geotécnica e finalizados após 5 estágios de descarregamento.

A tabela 1 apresenta, resumidamente, os resultados de carga máxima aplicada pelas células e os deslocamentos máximos e residuais para o topo da estaca, ponta e fuste obtidos em cada ensaio.

Tabela 1. Resumo dos resultados obtidos.

Ensaio	Carga Máxima (kN)	Deslocamento Máximo (mm)			Deslocamento Residual (mm)		
		Topo da Estaca	Fuste	Ponta	Topo da Estaca	Fuste	Ponta
PCE-01	4.791,60	1,69	8,66	18,08	1,69	8,56	12,68
PCE-02	5.695,20	1,22	28,22	23,01	1,15	26,26	20,37
PCE-03	5.270,76	10,66	11,42	21,03	8,05	8,53	16,58

A rigor, como as células expansivas não estão instaladas exatamente na ponta das estacas, ainda há contribuição da parcela de carga de atrito lateral no trecho abaixo da célula, onde admitimos que a carga resistente seria toda devida à carga de ponta.

Dentro deste contexto, iremos aplicar o método proposto por Décourt (1996), conhecido como método da rigidez, para descontar a parcela de carga de atrito lateral do resultado do ensaio. O método utiliza a rigidez que é a razão entre a carga aplicada e seu deslocamento. O autor garante ser possível identificar facilmente dois domínios: domínio de atrito lateral e domínio de ponta. No trecho em que a parcela de ponta é dominante, a relação entre carga-rigidez é uma curva, se tornando linear em um gráfico com eixos em escala logarítmica. Já no trecho onde o atrito lateral é predominante, essa relação se torna visivelmente linear. Na sequência são apresentadas as curvas de carga x deslocamento e os gráficos de rigidez de cada ensaio. É importante ressaltar que os valores apresentados nas tabelas e gráficos foram construídos adotando-se a carga aplicada pela célula no fuste e na ponta da estaca, sem nenhum tipo de correção quanto ao peso próprio da estaca.

Os resultados obtidos estão representados nos gráficos das figuras 4 a 9 e na tabela 2.

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



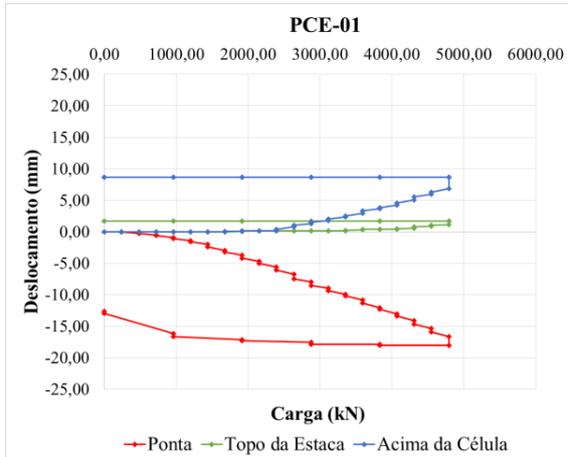


Figura 4. Curva carga-deslocamento ensaio 1.

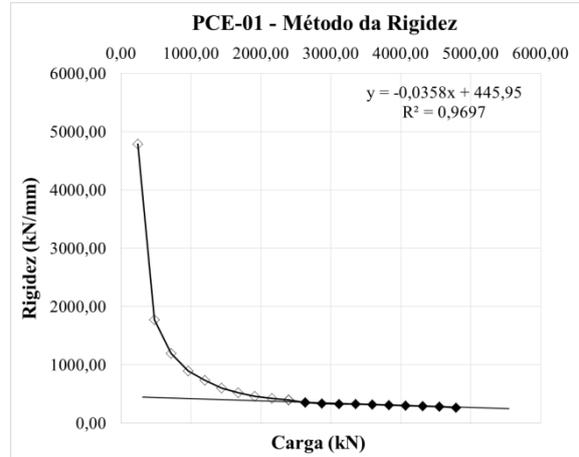


Figura 5. Gráfico de rigidez ensaio 1.

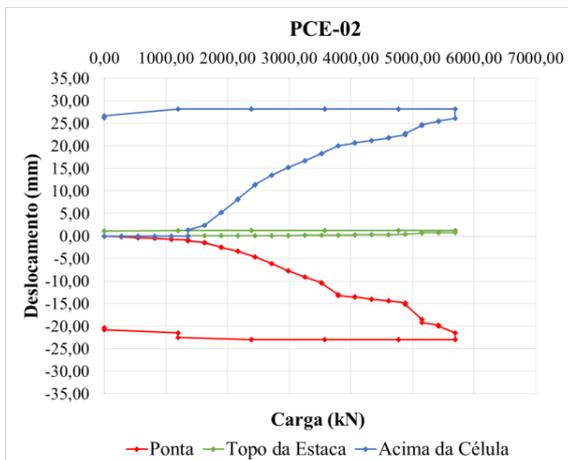


Figura 6. Curva carga-deslocamento ensaio 2.

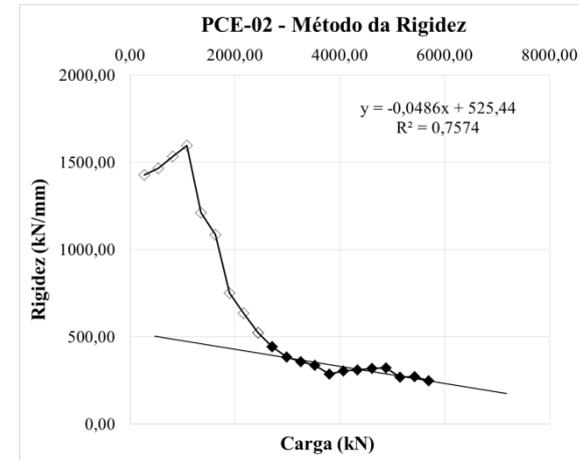


Figura 7. Gráfico de rigidez ensaio 2.

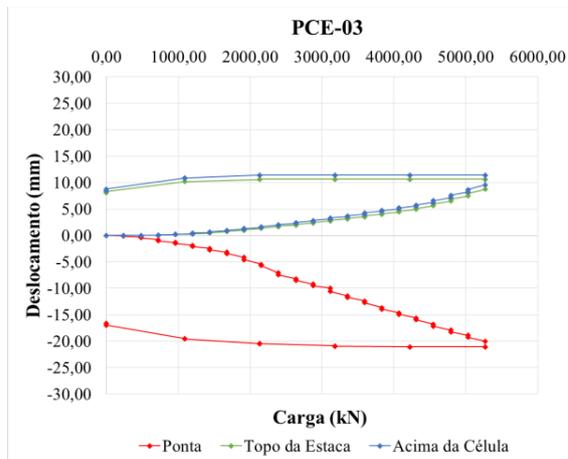


Figura 8. Curva carga-deslocamento ensaio 3.

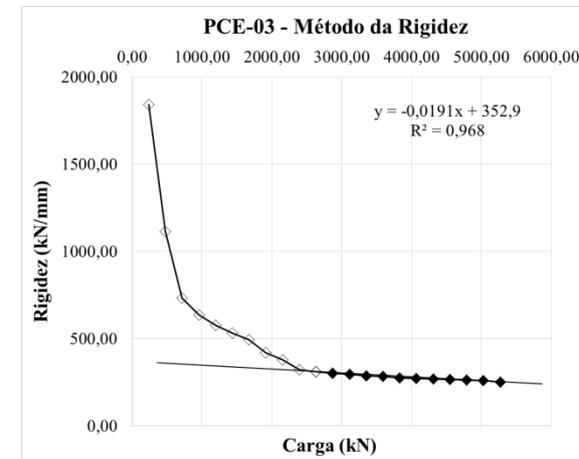


Figura 9. Gráfico de rigidez ensaio 3.

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



Realização:



Avenida Rebouças, 353, Sala 74 A
Cerqueira César, São Paulo/SP, 05401-900
Telefone: (11) 3052-1284
E-mail: abef@abef.org.br

Organização:



Avenida T-9, 2310 - Ed. Inove Intelligent Place
Sala B701, Jardim América, Goiânia/GO, 74255-220
E-mail: secretaria@qeeventos.com.br
Site: www.qeeventos.com.br

Tabela 2. Resultados das estimativas de carga de atrito lateral e ponta no trecho abaixo da célula expansiva.

Ensaio	Carga Máxima (kN)	Atrito Lateral (kN)	Carga de Ponta (kN)	Ponta (%)
PCE-01	4.791,60	2.395,80	2.395,80	50,00
PCE-02	5.695,20	2.440,80	3.254,40	57,14
PCE-03	5.270,76	2.635,38	2.635,38	50,00

Vemos que as provas de carga 1 e 3 tiveram comportamentos praticamente idênticos, com resultados de ponta excelentes. A PCE-2 parece indicar a presença de sujeira na ponta, dados os degraus e mudanças bruscas de inclinação observados na curva carga-deslocamento, ainda assim os deslocamentos medidos na carga máxima de ensaio foram praticamente idênticos aos observados nas provas de carga 1 e 3, com diferença de 5 mm para a primeira e 2 mm para a segunda.

Dado o embutimento da ponta em solo bastante competente, a parcela de carga por atrito lateral no trecho da estaca abaixo das células expansivas não é desprezível, como ficou demonstrado pela análise através do método da rigidez.

Fica claro, no entanto, que a carga de ponta está sendo mobilizada perfeitamente nos ensaios 1 e 3 e que a limpeza resultante no ensaio 2 foi suficiente para que os resíduos remanescentes no fundo da escavação afetassem a qualidade da ponta da estaca de forma desprezível.

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



6 CONCLUSÕES

Como ficou demonstrado pelos ensaios bidirecionais e pela análise das cargas na ponta pelo método da rigidez, o procedimento de limpeza de ponta especificado no item J.3.2 do Anexo J da norma brasileira de fundações (ABNT NBR 6122:2019) foi suficiente para garantir a boa qualidade da ponta das estacas apoiadas em solo competente, mesmo sem o uso do reciclador, sendo seguro contar com a carga de ponta calculada, não sendo necessário restringi-la ao valor da parcela de carga por atrito lateral calculado (procedimento especificado no próprio item J.3.2). O resultado é coerente com a redação do item 8.2.1.2 da norma brasileira de fundações e conflitante com os itens J.3.1 a J.3.3 de seu Anexo J.

Os autores deste artigo acreditam que o espírito inicial da última revisão desta norma seria adotar J.3.1 como procedimento mínimo de limpeza de ponta (consequentemente $R_p \leq R_l$ e $P_{adm} = (R_p + R_l)/2$), J.3.2 como procedimento especial em solo e J.3.3 como procedimento especial em rocha (em ambos os casos P_{adm} seria $(R_p + R_l)/2$ sem limitações ao R_p calculado).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U. E da Silva, P.E.C.A.F. (2000) Curva de ‘recalque equivalente’ do topo de uma estaca hélice contínua ensaiada com célula expansiva hidrodinâmica (EXPANCELL). In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES EPECIAIS E GEOTECNICA – SEFE, 4, 2000, São Paulo. Anais... São Paulo: ABEF e ABMS, v.1, p. 416-425.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solo – Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro
- Da Silva, P.E.C.A.F. (1986) Célula expansiva hidrodinâmica – Uma nova maneira de executar provas de carga. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG, 8, 1986, p. 223-241.
- Décourt, L. (1996) Ruptura de fundações avaliada com base no conceito de rigidez. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES EPECIAIS E GEOTECNICA – SEFE, 3, 1996, São Paulo. Anais... São Paulo: ABEF e ABMS, v.1, p. 215-224.
- Falconi, F. F. E Maset, V. L. (2016) Análise prática de resultados de ensaios bidirecionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG, 18, 2016, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABMS.
- Falconi, F. F. et al. (2016) Fundações Teoria e Análise prática de resultados de ensaios bidirecionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG, 18, 2016, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABMS.
- Maset, V. L.; Falconi, F. F. E Hachich, W. C. (2016). Interpretação dos resultados de ensaios bidirecionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG, 18, 2016, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABMS.

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

