



## Análise e Interpretação de 17 Provas de Carga Estáticas Bidirecionais: caso de estudo no Complexo de Tubarão

Tiago de Jesus Souza

Eng. Geotécnico, Solotechnique, Jundiaí, São Paulo, tiago.souza@solotechnique.com.br

André Querelli

Eng. Geotécnico, Solotechnique, Jundiaí, São Paulo, andre.querelli@solotechnique.com.br

**RESUMO:** O ensaio com Células Expansivas Hidrodinâmicas é um tipo de prova de carga estática em estacas desenvolvido no Brasil por Silva (1983). O americano Osterberg (1989) também é um dos precursores do ensaio, patenteando e divulgando amplamente a técnica internacionalmente. Este artigo apresenta a análise dos resultados de provas de carga com Células Expansivas Hidrodinâmicas (ensaio bidirecional) em 17 estacas do tipo Hélice Contínua Monitorada pertencentes ao Complexo de Tubarão, município de Vitória-ES. Elas foram realizadas instalando-se células expansivas na ponta das estacas e registrando as curvas carga-deslocamento de fuste e ponta. Tais curvas possibilitam separação das contribuições de atrito e resistência de ponta, além de estimar a curva-carga recalque equivalente para carregamentos a partir do topo da estaca. Após análise dos fatores locais, constatou-se que das 17 estacas ensaiadas, 3 requereram avaliação mais detalhada por serem pouco representativa. Suspeita-se que tenham ocorrido problemas durante a execução, como aqueles relacionados à perfuração (ou reperfuração) das estacas. Este estudo ressalta a importância da análise cuidadosa dos resultados das provas de carga com Células Expansivas Hidrodinâmicas, identificando estacas que requerem uma avaliação mais detalhada e propondo abordagens alternativas para obter resultados coerentes e significativos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Prova de Carga Estática Bidirecional, Célula Expansiva Hidrodinâmica, Estacas Hélice Contínua Monitorada.

**ABSTRACT:** The Hydrodynamic Expansive Cells Test is a type of static load test on piles developed in Brazil by Silva (1983). The American engineer Osterberg (1989) is also one of the pioneers of this test, patenting and widely disseminating the technique internationally. This article presents an analysis of the results from load tests using Hydrodynamic Expansive Cells (bidirectional test) on 17 Continuous Flight Auger Piles belonging to the Tubarão Complex, located in the municipality of Vitória-ES. The load tests were conducted by installing expansive cells at the pile tips and recording the load-displacement curves of the shaft and tip. These curves allow for the separation of contributions from lateral friction and tip resistance, as well as estimating the equivalent load-settlement curve for loads applied from the top of the pile. Following a thorough analysis of local factors, it was observed that out of the 17 tested piles, 3 required further assessment due to inconclusive results. It is suspected that issues during execution, such as those related to pile drilling (or re-drilling), might have occurred. This study underscores the importance of a careful analysis of results obtained from load tests using Hydrodynamic Expansive Cells, identifying piles that necessitate more detailed evaluation, and proposing alternative approaches to achieve consistent and meaningful outcomes.

**KEYWORDS:** Bidirectional Static Load Test, Hydrodynamic Expansive Cell, Monitored Continuous Flight Auger Piles.

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



## 1 Introdução

Os ensaios com Células Expansivas Hidrodinâmicas têm se destacado como uma valiosa ferramenta para a realização de provas de carga estática em estacas, permitindo uma análise mais precisa das características de comportamento desses elementos fundamentais em obras de engenharia geotécnica. Neste artigo, apresenta-se a análise dos resultados obtidos a partir de ensaios com Células Expansivas Hidrodinâmicas realizados em 17 estacas do Complexo de Tubarão, Vale Usina 1 e 2, situado na Ponta de Tubarão, município de Vitória, Espírito Santo.

O método do ensaio com Células Expansivas Hidrodinâmicas foi desenvolvido no Brasil por Silva (1983) e ganhou projeção internacional, contando com um dos seus precursores, o americano Osterberg (1989), que patenteou e divulgou o produto, contribuindo para sua disseminação global.

No contexto dos ensaios realizados, é comum a instalação de uma ou mais células expansivas, nas proximidades da extremidade da estaca. Estas células aplicam forças em direções opostas, induzindo um movimento ascendente do fuste e um movimento descendente da ponta, eliminando, assim, a necessidade de sistemas de reação convencionais. As curvas resultantes das relações entre carga e deslocamento permitem a distinção entre as contribuições do atrito lateral e da resistência na ponta real, ou "ponta fictícia". Além disso, essas curvas possibilitam a estimativa da relação carga-recalque equivalente quando a carga é aplicada na extremidade superior da estaca. Salienta-se que o ponto de aplicação de carga representa um equilíbrio entre o atrito lateral da porção superior e inferior da estaca, juntamente com a resistência na ponta, e, na maioria dos casos, está localizado mais próximo da extremidade da estaca.

O artigo se propõe a analisar detalhadamente os resultados obtidos por meio desses ensaios, com foco na compreensão do comportamento das estacas submetidas ao carregamento, visando contribuir para o avanço do conhecimento técnico na área. Serão apresentados os procedimentos executivos dos ensaios, a interpretação dos dados obtidos, bem como a seleção dos métodos utilizados para estimar as curvas de carga recalque equivalente.

### 1.1 Materiais e Métodos

#### 2.1 Local em estudo

O Complexo de Tubarão, abrigando as usinas Vale 1 e Vale 2, situado na região de Ponta de Tubarão, no município de Vitória, Espírito Santo, foi objeto de estudo para a análise dos resultados de ensaios com Células Expansivas Hidrodinâmicas em 17 estacas.

Na Figura 1 pode-se observar o esquema das provas de carga em uma das estacas ensaiadas.

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





(a)



(b)

Figura 1. (a) Vista geral do ensaio, (b) vista geral da Instrumentação.

Neste empreendimento, quatro sondagens estão localizadas próximas as regiões de interesse (SP-01, SP-04, SP09 e SP-11). A SP-01 identifica um perfil estratigráfico homogêneo, composto por argila plástica com areia (de fina a média) ao longo dos 25,45m investigados. Os valores de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) são crescentes da superfície até 9,0m de profundidade e decaem após esta profundidade. Entre 5 e 12m há valores  $N_{SPT}$  superiores a 30 golpes. O nível d'água encontra-se a 12,5m de profundidade. A Figura 2 ilustra a evolução dos valores de  $N_{SPT}$  com a profundidade e o perfil estratigráfico do terreno segundo a prospecção SP-01.

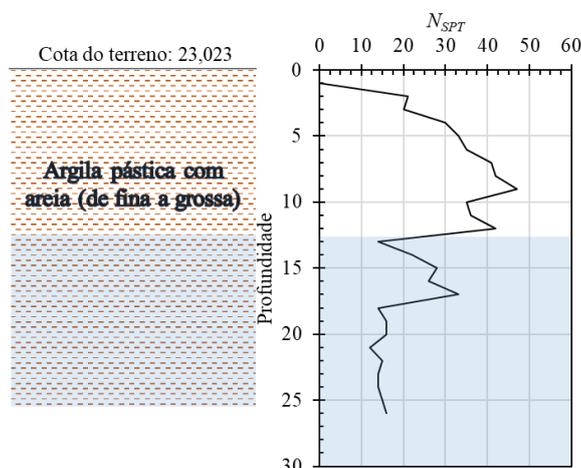


Figura 2. Evolução dos valores de  $N_{SPT}$  com a profundidade e perfil geotécnico da sondagem SP-01.

No caso da sondagem SP-04, o solo encontra-se estratificado em camadas sobrepostas (com aproximadamente 5m de espessura) de argila silto-arenosa e silte argiloso. A camada inicial é composta por argila silte arenosa (4,67m) seguida de uma camada de silte argiloso (4,24m). Na terceira camada (4,96m de espessura) há predominância de um solo argilo-siltoso, seguido de uma outra camada de silte argiloso (4,91m). A partir de 18,8m o solo passa a apresentar um pouco de areia, sendo constituído, até o final da investigação, por um silte argiloso pouco arenoso (6,67m). Nesta sondagem, o nível d'água encontra-se a 8,6m de profundidade. A Figura 3 ilustra a evolução dos valores de  $N_{SPT}$  com a profundidade e o perfil estratigráfico do terreno segundo a prospecção SP-04.

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



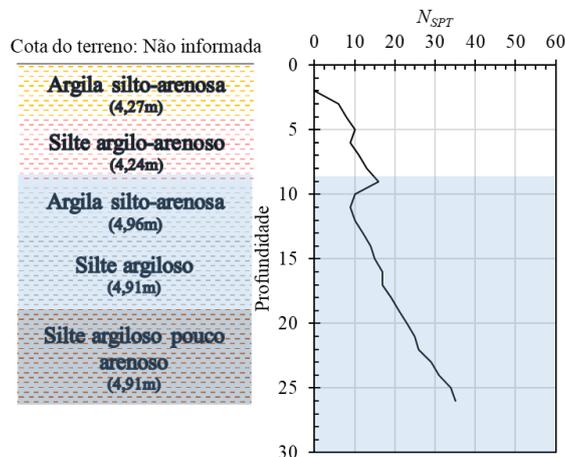


Figura 3. Evolução dos valores de  $N_{SPT}$  com a profundidade e perfil geotécnico da sondagem SP-04.

A sondagem SP-09 indica um solo composto por 4 camadas: i) argila arenosa nos primeiros 2,70m -  $N_{SPT}$  crescentes até atingir 8 golpes; seguida por ii) 10,21 m de argila silto-arenosa com valores de  $N_{SPT}$  entre 10 e 25 golpes; iii) um fino veio de areia (0,9m); e argila arenosa nos 7,2m restantes da investigação, com valores de  $N_{SPT}$  crescentes com a profundidade. A Figura 4 ilustra a evolução dos valores de  $N_{SPT}$  com a profundidade e o perfil estratigráfico do terreno segundo a prospeção SP-09.

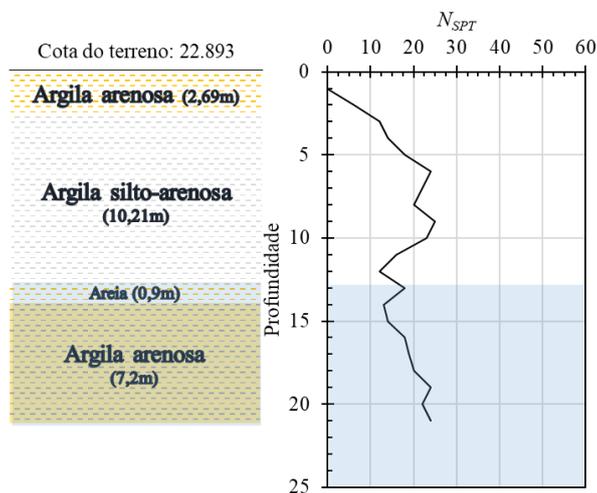


Figura 4 – Evolução dos valores de  $N_{SPT}$  com a profundidade e perfil geotécnico da sondagem SP-09.

Por fim, a sondagem SP-11 indica um solo relativamente heterogêneo composto por argila arenosa em quase toda profundidade investigada. A quebra dessa heterogeneidade corre entre 16 e 19m, onde há predominância de um solo arenoso (pouco argiloso). Quando aos valores de  $N_{SPT}$  nota-se seu crescimento com a profundidade até 16m. Após esta profundidade, há uma brusca

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



redução de resistência a penetração, atingindo valores entre 10 e 20 golpes até o final do trecho investigado. A Figura 5 ilustra a evolução dos valores de  $N_{SPT}$  com a profundidade e o perfil estratigráfico do terreno segundo a prospecção SP-11.

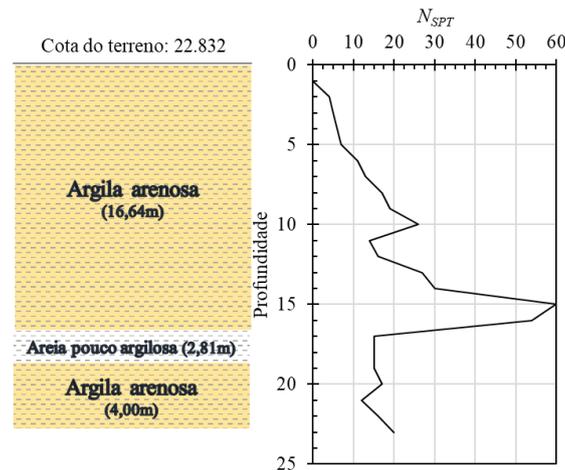


Figura 5 – Evolução dos valores de  $N_{SPT}$  com a profundidade e perfil geotécnico da sondagem SP-11.

Os autores do presente artigo têm uma extensa trajetória de desenvolvimento de numerosos trabalhos e empreendimentos geotécnicos nas proximidades do local deste estudo, o que possibilitou uma avaliação aprofundada da geologia da região. A Figura 6 retrata o registro interno de projetos nos quais participamos como projetistas ou fornecendo consultoria especializada em Geotecnia. O destaque em vermelho mostra a localização específica da obra. Além disso, os triângulos em azul representam as obras realizadas anteriores dos autores em áreas adjacentes.

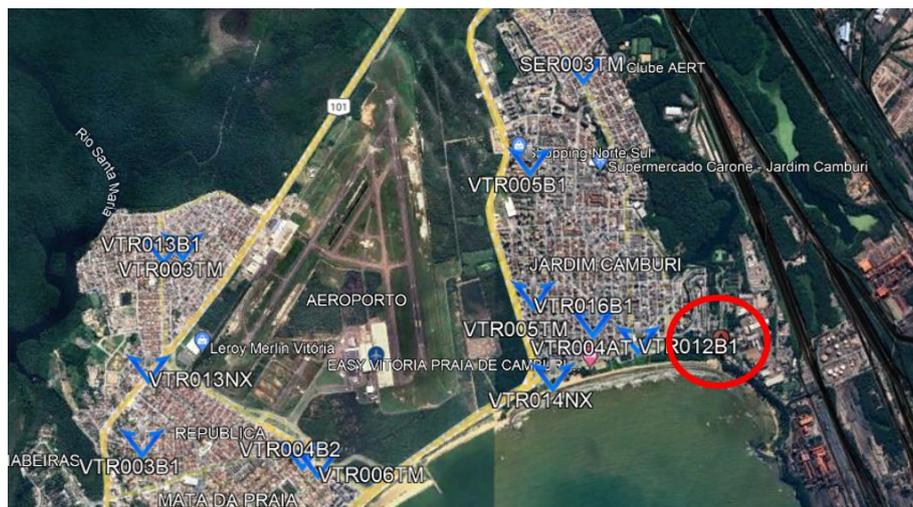


Figura 6. Locais próximos à obra com atuação técnico-profissional dos autores.

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



## 2.2 Ensaios com Células Expansivas Hidrodinâmicas

O ensaio com Células Expansivas Hidrodinâmicas é uma técnica de prova de carga estática em estacas, originada no Brasil por Silva (1983). Osterberg, um pesquisador americano, também é considerado um dos pioneiros desse ensaio, tendo patenteado e divulgado o método, o que lhe rendeu reconhecimento internacional.

Nesse ensaio, uma ou mais células expansivas são instaladas geralmente próximo à ponta da estaca. Essas células exercem pressão ascendente no fuste da estaca e pressão descendente na sua ponta, dispensando a necessidade de sistemas de reação externos. Através da obtenção das curvas de carga-deslocamento do fuste e da ponta da estaca, é possível separar as parcelas de atrito lateral e resistência da ponta real, bem como da "ponta fictícia". Além disso, é possível estimar a curva de carga-recalque equivalente para carregamentos iniciados a partir do topo da estaca.

Para realizar o ensaio, existem diversos métodos disponíveis na literatura para a estimativa dos parâmetros mencionados acima, sendo crucial realizar uma seleção prévia dos métodos que serão utilizados, de acordo com as características específicas do projeto em questão.

A metodologia executiva do ensaio é padronizada nos Estados Unidos (ASTM, 2018); no entanto, ainda não possui uma normatização específica no Brasil. De acordo com a norma brasileira NBR 6122 (ABNT, 2010), em seu item 9.2.2.4, o uso dessa metodologia é aceito a critério do projetista. É importante ressaltar que essa técnica de ensaio estático é considerada válida e é reconhecida pela norma brasileira (NBR 6122/2019).

## 2.3 Ensaios de Prova de Carga Estática Bidirecional

A prova de carga bidirecional é um método de teste empregado para avaliar a capacidade de carga de estacas, isto é, tanto em compressão quanto em tração. Esse procedimento consiste na aplicação simultânea de carga em ambas as extremidades da estaca, possibilitando uma análise detalhada da resistência estrutural e das propriedades do solo envolvido.

## 2.4 Métodos de Extrapolação

Neste estudo, optou-se pelo Método de Chin (1970, 1971), uma vez que, de forma geral, as curvas carga-recalque das estacas apresentaram um comportamento aproximadamente hiperbólico.

O Método de Chin (1970, 1971) baseia-se em um modelo hiperbólico, representado pela Eq. 1 (sendo os símbolos conforme a notação adotada nesta pesquisa).

$$\frac{y_0}{P_0} = C_1 + y_0 C_2 \quad (1)$$

Onde:

- $y_0$  = Recalque no topo da estaca;
- $P_0$  = Carga aplicada no topo da estaca, correspondente ao recalque  $y_0$ ;
- $C_1$  = Intercepto do eixo das ordenadas;
- $C_2$  = Coeficiente angular.

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





Dividindo-se a Eq. 1 por  $y_0$ , observa-se que, no limite, para o recalque tendendo ao "infinito",  $P_{o, rup}$  é o inverso do coeficiente angular  $C_2$ , conforme a Eq. 2:

$$\frac{1}{P_0} = \frac{C_1}{y_0} + C_2 \quad P_{o, rup} = \frac{1}{C_2} \quad (2)$$

Outro método utilizado foi o do Van Der Veen (1953) que constitui-se em uma equação exponencial a qual determina em uma curva assintótica, a carga de ruptura da estaca, apresentada na equação à seguir:

$$Q = Q_{ult} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot \rho}) \quad (3)$$

Sendo  $Q_{ult}$  a carga de ruptura,  $Q$  carga aplicada na estaca em um estágio,  $\rho$  é o deslocamento registrado no respectivo estágio e  $\alpha$  é o coeficiente de forma da curva.

Aoki (1976) observa que a não obrigatoriedade em passar pela origem do sistema de coordenadas pode melhorar a regressão, dessa forma, propõe uma extensão da expressão de Van der Veen (1953). Essa proposta também foi utilizada no trabalho.

### 3 Resultados

O cálculo de extrapolação utilizando os métodos de Chin, Van der Veen e Van der Veen modificado foram aplicados para analisar as provas de carga bidirecionais. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura . De forma geral, ao avaliar a carga nominal, a média situa-se em 118,60 toneladas-força (tf) com um desvio padrão de 53,13. É importante notar que, nessa condição, os valores mínimo e máximo variaram entre 80 tf e 215 tf, respectivamente. Ao analisar o método bidirecional, o valor máximo foi de 433,9 tf, enquanto o mínimo foi de 160,4 tf, com uma média de 234,6 tf e um desvio padrão de 99,59.

Ao avaliar os resultados por meio da extrapolação utilizando o método de Chin, a média situou-se em 316,8 tf e o desvio padrão foi de 112,97. O coeficiente de variação é calculado como a razão entre o desvio padrão e a média. Ao avaliar a carga nominal, esse coeficiente foi de 45%. Para o método bidirecional, foi de 42%, e para a extrapolação, foi de 36%. Em outras palavras, observa-se uma variação significativa nos cálculos, possivelmente relacionada às características do solo, ao processo de execução das estacas e até mesmo ao procedimento do ensaio em si. Pode-se observar que não há correlações entre os resultados pelos métodos de extrapolação de Chin, Van der Veen e Van der Veen modificado por Aoki. Entretanto, na maioria das PCEs foi observado correlações entre o método de Van der Veen e Van der Veen modificado por Aoki.

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



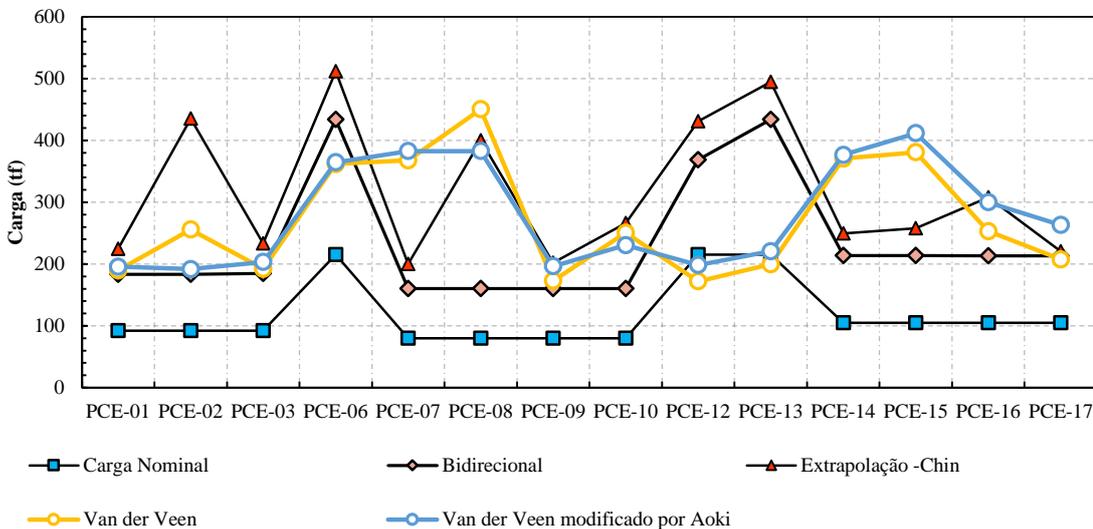


Figura 7 Resultados Compilados.

Na Figura 8, são apresentados os resultados da relação entre a carga nominal e a extrapolação, que constitui um parâmetro de análise crucial. Esta avaliação desempenha um papel significativo, uma vez que fornece insights valiosos sobre o comportamento estrutural das amostras em estudo. De maneira geral, os valores obtidos para essa razão demonstram uma tendência a se posicionar acima do patamar de dois e a se aproximar do valor de cinco, particularmente nas condições PE-02 e PE-08. É pertinente ressaltar que as estimativas da capacidade de carga última, obtidas a partir das provas de carga realizadas, revelam coeficientes de segurança que extrapolam o limiar mínimo preconizado pela norma técnica NBR-6122 (ABNT, 2019).

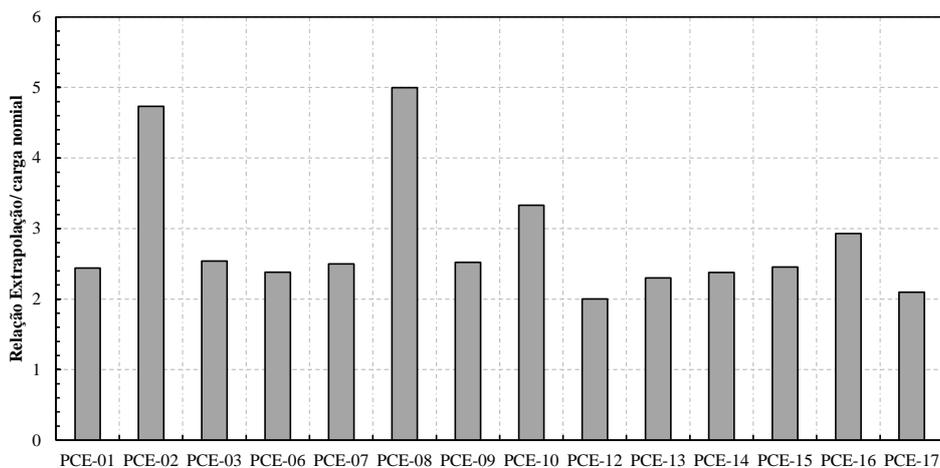


Figura 8. Relação extrapolação e carga nominal.

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





O presente estudo concentra-se na análise de risco e probabilidade de ruína associadas a um conjunto de estacas de diâmetro nominal de 60 cm. No total, foram submetidas a análise 10 estacas, com o objetivo de avaliar a confiabilidade estrutural e a segurança desses elementos fundamentais em aplicações geotécnicas e de engenharia civil. Foram considerados dois parâmetros principais para avaliar o desempenho das estacas: a tensão atuante em cada estaca e a tensão resistente, esta última obtida por meio de ensaios com Células Expansivas Hidrodinâmicas. A combinação dessas variáveis proporciona uma compreensão abrangente das características de carga e resistência das estacas em questão. Os valores fundamentais empregados no processo de análise são apresentados com as seguintes especificações:

- A resistência média das estacas foi estabelecida em 188,80 tf, acompanhada de um desvio padrão de 23,48 tf. Esses dados representam as propriedades intrínsecas das estacas, fornecendo uma base estatística para a variabilidade das resistências individuais.
- Quanto à solicitação, a média alcançou 93,60 tf, acompanhada de um desvio padrão de 10,97 tf. Esses valores se referem às cargas atuantes nas estacas, delineando a gama de forças que podem ser exercidas sobre as estruturas.
- Para a implementação do fator de segurança, um valor de 2,02 foi adotado, enquanto um fator característico de 1,30 foi empregado.

Através da utilização desses parâmetros, foi calculado um índice de confiabilidade de 3,70. Este índice reflete a relação entre a resistência disponível e a solicitação aplicada, tendo em vista as incertezas e a variabilidade dos dados. Além disso, a probabilidade de falha foi calculada e resultado correspondeu a chance de 1 para 8355 de ruptura.

A US Army Corps of Engineers (1997) estabeleceu níveis de aceitabilidade em relação ao índice de confiabilidade. Em suma, um nível de desempenho alto está condicionado a um índice de confiabilidade de de 5,0; o nível Bom está relacionado a 4,0; acima da média corresponde a 3,0; abaixo da média equivale a 2,5; pobre está ligado a 2,0; insatisfatório corresponde a 1,5; e perigoso está associado a 1,0. Posto isto, o valor obtido situa-se entre os limites de 3,0 e 4,0, indicando um nível de desempenho de "acima da média" a "bom".

#### 4 Conclusões

Para os ensaios PCE-01, PCE-02, PCE-03, PCE-06, PCE-07, PC-08, PC-09, PCE-10, PCE-12, PCE-13, PCE-14, PCE-15, PCE-16 e PCE-17, a instalação das Células Expansivas, bem como a realização dos ensaios propriamente ditos, estão em conformidade. Não foram identificadas ocorrências excepcionais durante os ensaios, tais como perturbações nos dispositivos de carga e medição, modificações na superfície do terreno contíguo às estacas e eventuais alterações nos pontos de fixação das referências de leitura.

Em relação aos ensaios E58 (Prova de carga PCE-05), E59 (Prova de carga PCE-11) e E60 (Prova de carga PCE-04), observou-se a ocorrência de problemas executivos. Essas três estacas apresentaram recalques excessivos. No caso das estacas hélice, devido à descida da célula ser realizada após a concretagem, é fundamental que a instalação seja rápida e contínua. Poderá ser necessário o uso de dispositivos adicionais para facilitar a descida da célula, como o dispositivo cônico metálico utilizado por outros autores acoplado na base inferior da expancell, ou para

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



possibilitar o posicionamento da célula abaixo da armação. Além disso, devem ser tomados cuidados executivos adicionais durante a instalação da expancell na estaca.

#### AGRADECIMENTOS

A Solotechnique agradece a Vale pela confiança depositada em nossa Consultoria, Acompanhamento Técnico e responsabilização para a avaliação dos ensaios. Também agradecemos a Arcos Engenharia pela excelente condução dos ensaios.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aoki, N. (1976). Considerações sobre a capacidade de carga de estacas isoladas. Notas de Aula, Universidade Gama Filho.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solo – Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- ASTM (2018). ASTM D8169/D8169M-18. *Standard Test Methods for Deep Foundations Under Bi-Directional Static Axial Compressive Load*. United States.
- CHIN, F., K. Estimation of the Ultimate Load of Piles not carried to Failure. Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, 1970.
- SILVA, P. E. C. A. F. (1983). Célula Expansiva Hidrodinâmica: Uma nova maneira de executar provas de carga. Belo Horizonte. [ARCOS]. 105 pg.
- U. S Army Corps Engineers, Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering, In: Report CECW-EG 20314-1000, Department of the Army, Washington, D.C., 1997.

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

