

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  
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



## Comparação Curvas Carga x Deslocamento – PCE x ECD

Msc. Jean Felix Cabette

Diretor Técnico, Benaton Specialist, São Paulo, SP, Brasil, [jeancabette@benaton.com.br](mailto:jeancabette@benaton.com.br)

Sérgio Murari Ludemann

Diretor Técnico, Ludemann Engenharia São Paulo, SP, Brasil, [sergio@ludemann.com.br](mailto:sergio@ludemann.com.br)

**RESUMO:** Segundo Avelino (2006), com o surgimento dos ensaios de carregamento dinâmico (ECD), o controle de qualidade de fundações profundas desenvolveu-se significativamente devido à facilidade na execução desses ensaios e seu relativo baixo custo. No Brasil, há um predomínio da interpretação dos ensaios dinâmicos através dos métodos CASE e CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*). Este trabalho tem por objetivo apresentar uma comparação entre as curvas carga x deslocamento, obtidas através da análise CAPWAP a partir de um ensaio de carregamento dinâmico (ECD) e de um ensaio de Prova de Carga Estática (PCE). Ambos ensaios realizados numa mesma estaca do tipo hélice contínua com seção circular com 500 mm de diâmetro e carga de trabalho de 1.080 kN, inserida num subsolo composto por uma espessa camada de argila mole, transitando bruscamente para uma camada competente de solo residual de granito. Neste contexto, fazia-se imperativo validar os ensaios dinâmicos (ECD) através da prova de carga estática (PCE). Os resultados obtidos comprovaram a previsão adequada da carga de ruptura e dos deslocamentos estimados na carga de trabalho obtidos nos ensaios ECD, quando comparados com os resultados obtidos na PCE.

**PALAVRAS-CHAVE:** Prova de Carga Estática, Ensaio de Carregamento Dinâmico, Curva Carga x Deslocamento, Estaca Hélice Contínua.

**ABSTRACT:** According to Avelino (2006), with the advent of dynamic load testing (ECD), the quality control of deep foundations has developed significantly due to the ease in carrying out these tests and their relatively low cost. In Brazil, there is a predominance of interpretation of dynamic tests through CASE and CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*) methods. This paper aims to present a comparison between load x displacement curves, obtained through CAPWAP analysis from a dynamic load testing (ECD) and a static load test (PCE). Both tests were carried out on the same continuous Flight Auger Pile with a 500 mm diameter circular section and a workload of 1,080 kN, insert on a thick layer of soft clay passing quickly to a very hard granitic residual soil layer. In this context, it was necessary to validate the dynamic load testing (ECD) through the static load test (PCE). The results obtained proved the adequate forecast of the rupture load and the estimated displacements in the workload obtained in the ECD tests, when compared with the results obtained in the PCE.

**KEYWORDS:** Static Load Test, Dynamic Load Testing, Load x Displacement Curve, Continuous Flight Auger Pile.

### 1 Introdução

Nos diversos segmentos da geotecnia e em especial na área de fundações, o engenheiro se depara com uma série de incertezas. Algumas destas incertezas são inerentes à variabilidade do subsolo local, às condições de carregamento, aos efeitos do tempo, às diferenças nos processos executivos, erros de sondagens etc, fatores que influenciam diretamente a estimativa da capacidade de carga da fundação, seja por ocasião de seu carregamento estático, seja durante ou logo após a execução. Para minimizar estas incertezas a NBR-6122 (2019) prevê o controle de qualidade dos estaqueamentos através de provas de carga estáticas e/ou ensaios dinâmicos. Assim, a comparação entre esses métodos de ensaios pode contribuir decisivamente no controle de qualidade das fundações, fundamental para a segurança das edificações.



## 2 Objetivo

Este artigo visa a comparação das curvas carga x deslocamento entre uma prova de carga estática (PCE) e um ensaio de carregamento dinâmico (ECD), ambos realizados sobre a mesma estaca tipo Hélice Contínua.

## 3 Descrição do Subsolo Local e da Estaca Ensaçada

A estaca utilizada para a realização dos ensaios aqui apresentados era do tipo Hélice Contínua, executada com 500 mm de diâmetro e 19,35 m de comprimento, para uma carga de trabalho de 1.080,0 kN. De acordo com a sondagem mais próxima desta estaca ensaiada (SP-04 – Lenc Engenharia, agosto/2003), a mesma foi inserida num subsolo composto inicialmente por uma camada superficial de aterro constituído por um silte argiloso marrom, de consistência mole a média, com espessura de cerca de 3,5 m, depositado sobre uma camada aluvionar composta por uma argila orgânica siltosa muito mole, cinza escura, com espessura de 4,0 m, sobreposta a uma camada de sedimentos terciários, compostos inicialmente por uma camada de argila siltosa cinza esverdeada de consistência média, com cerca de 1,0 m de espessura, seguida por uma camada de areia média a grossa, pouco siltosa, com pedregulhos finos a médios, amarela, com espessura de 2,0 m, abaixo da qual penetrava-se no solo residual de granito composto por um silte argiloso cinza e amarelo, de consistência rijo a duro, com fragmentos de rocha. O nível d'água do lençol freático encontrava-se a 3,5 m abaixo da superfície.

## 4 Metodologia

O ensaio Dinâmico e a Prova de Carga Estática foram realizados de acordo com as normas brasileiras, sendo que o ensaio de carregamento dinâmico fundamenta-se na teoria da equação da onda, consistindo na aplicação de carregamentos dinâmicos com energias crescentes sobre o topo da estaca, obtendo-se o registro dos sinais das ondas de tensão refletidas e interpretação destes sinais através de um método de cálculo específico segundo a ABNT NBR-13208/2007, com a realização da Análise CAPWAP, que permite estimar a capacidade de carga da estaca versus o seu deslocamento. Já a Prova de Carga Estática tem por objetivo fornecer a curva carga versus deslocamento, cujo ensaio segue as prescrições da ABNT NBR-12131/2006.

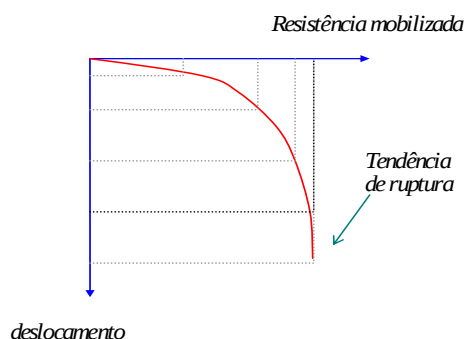


Figura 1 – Curva carga x deslocamento típica

### 4.1. O Ensaio de Carregamento Dinâmico

Resumidamente o ensaio é realizado aplicando-se golpes com energias crescentes de cravação até obtenção da carga de projeto da estaca, majorada do coeficiente de segurança mínimo estabelecido pela NBR-6122/2019, ou alcançar a carga de ruptura do conjunto solo-estaca. Em alguns casos pode ser necessário interromper o ensaio antes de se conhecerem os valores de resistência acima mencionados, quando atingidos níveis de tensões de compressão ou tração que comprometam a integridade do elemento estrutural.

O Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD), segundo a ABNT NBR 13208/2007, tem como objetivo avaliar as cargas mobilizadas na interface solo-estaca, a eficiência do sistema de impacto, as tensões de



compressão e de tração ao longo da estaca, a integridade estrutural e as características dinâmicas do sistema solo-estaca. Este ensaio difere das tradicionais provas de carga estáticas pelo fato do carregamento ser aplicado dinamicamente, através de golpes de um sistema de percussão adequado. A medição é feita através da instalação de sensores no fuste da estaca, em uma seção situada pelo menos duas vezes o diâmetro abaixo do topo da mesma. Os sinais dos sensores são enviados por cabo ao analisador de cravação, que armazena e processa tais sinais, através da Teoria da Equação de Onda aplicada à estaca, com base no modelo idealizado por Smith (1960). Em uma visão mais ampla deste tipo de ensaio, diversos métodos de cálculo e procedimentos computacionais estão envolvidos. O ensaio é baseado na aquisição de dados de força e velocidade da onda de tensão provocados por um golpe. Os sinais advindos da instrumentação são captados e armazenados através de um analisador de cravação, tais como os equipamentos PDA® (*Pile Driving Analyzer*) da PDI (*Pile Dynamics, Inc.*) e o FPDS (*Foundation Pile Diagnostic Systems*) da TNO (*Building and Construction Research Organisation*).

No instante do golpe, o PDA® fornece o valor da resistência mobilizada, calculada pelo método Case, o qual utiliza-se dos valores de força e velocidade no instante de tempo T1 (impacto) e no instante de tempo T2 (retorno do onda de tensão refletida na ponta). O valor de resistência calculado por este método emprega o fator de amortecimento dinâmico do solo ( $J_c$ ) inicialmente introduzido pelo operador sendo, portanto, aproximado. Posteriormente processa-se a análise CAPWAP a qual consiste em um processo iterativo em que objetiva-se, através da introdução de valores aos parâmetros de cálculo, modelar uma curva da onda próxima à medida. Desta análise resulta uma série de informações importantes como a distribuição de resistência ao longo da profundidade, o total de resistência de ponta e atrito lateral, o 'quake' e o fator de amortecimento dinâmico do solo etc.

Para o ensaio dinâmico apresentado neste artigo foi utilizado o equipamento PDA® na obtenção dos sinais de campo, tendo sido realizado inicialmente um cálculo da capacidade de carga através do Método CASE®. Este método consiste em uma solução matemática fechada, baseada em hipóteses simplificadoras, tais como a homogeneidade e uniformidade da estaca e deve ser confirmado por uma análise numérica.

A análise numérica foi executada com o auxílio do programa CAPWAP® (*Case Pile Wave Analysis Program*), através de um processo iterativo baseado na teoria da equação da onda. Neste método, uma curva dependente de parâmetros adotados é ajustada à curva de força medida, permitindo o refino dos dados.

No gráfico da Figura 2 é possível observar os sinais de força e velocidade x tempo, processados pelo PDA®, obtidos neste ensaio.

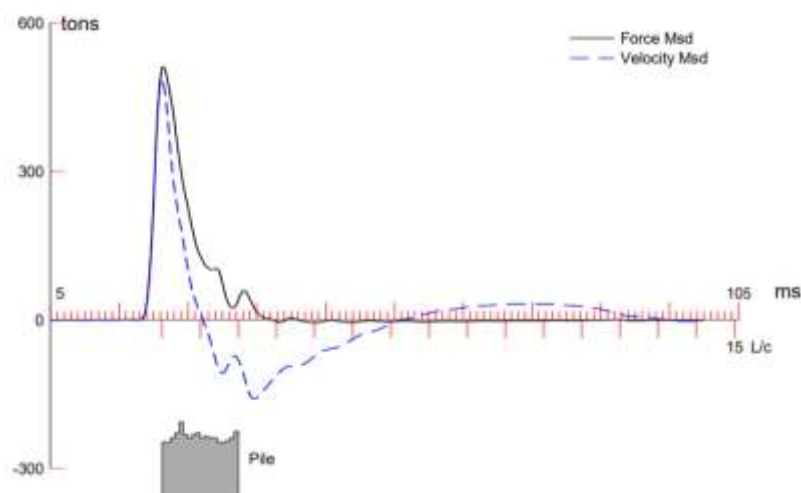


Figura 2 – Gráfico dos sinais de força e velocidade x tempo medidos

O gráfico da Figura 3, mostra a força medida (linha contínua) sobreposta à força calculada pelo programa (linha tracejada). Esse cálculo é feito resolvendo a equação da onda, usando como elementos de contorno a velocidade medida e os modelos da estaca e do solo. A boa coincidência das duas curvas é a comprovação de que os modelos utilizados estão corretos.

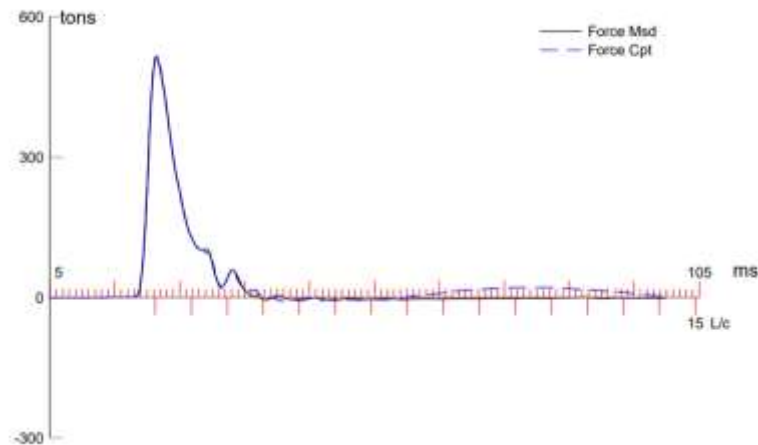


Figura 3 – Força calculada x Força medida

De acordo com o gráfico da Figura 4, é possível observar, na parte superior, a distribuição de resistência estática ao longo do fuste, sob a forma de diagrama de barras. A largura de cada barra equivale ao comprimento de um segmento de solo (usualmente cerca de 2 m), e a escala vertical está em unidades de força por metro linear. A parte inferior do gráfico mostra a força atuante ao longo do fuste da estaca, para uma carga estática no topo igual à capacidade determinada pela análise.

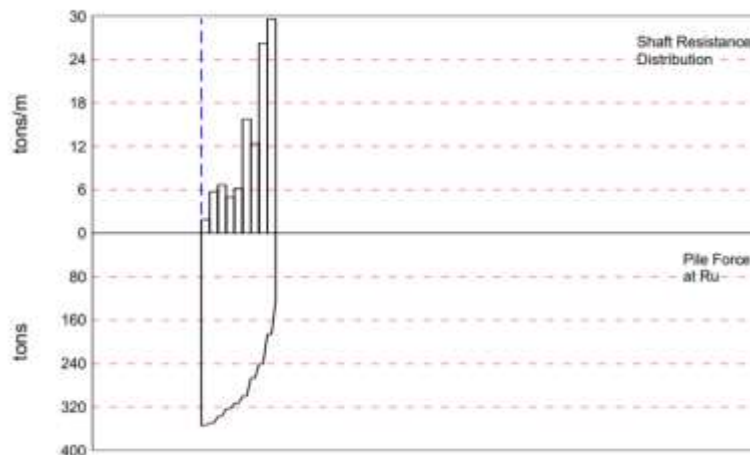


Figura 4 – Distribuição de resistência estática ao longo do fuste da estaca.

Na Figura 5 é possível verificar a curva carga-recalque de uma prova de carga estática simulada pelo programa CAPWAP para este ensaio. A curva contínua refere-se ao comportamento da região onde foram instalados os sensores, e a curva tracejada refere-se ao comportamento da ponta da estaca. Nessa simulação, para cada carga incremental na ponta, o programa calcula a carga e o deslocamento resultante no topo, levando em consideração a elasticidade da estaca e do solo, considerando nula a velocidade de deslocamento da estaca em relação ao solo. Note-se que essa simulação corresponde ao comportamento da estaca no instante do teste. Assim, principalmente para análises referentes a sinais correspondentes ao final de cravação, esse comportamento pode não corresponder ao que a estaca apresentará após um período de repouso.

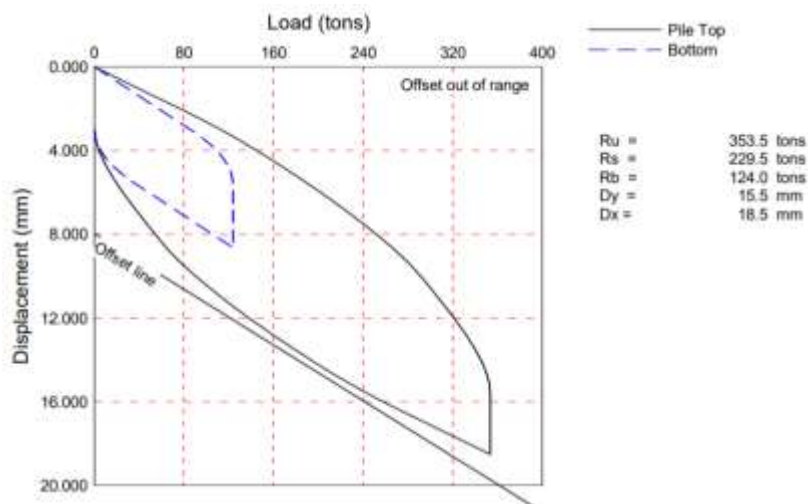


Figura 5 – Curva carga x deslocamento

#### 4.2. A Prova de Carga Estática

Executada de acordo com as prescrições da ABNT NBR-12131/2006, a prova de carga estática consiste em se determinar a capacidade de carga da estaca a ser ensaiada por meio da aplicação de uma carga estática de compressão através de um sistema de reação apoiado em estacas ou tirantes submetidos a esforços de tração, no qual a aplicação da carga, em estágios pré definidos, se dá com o auxílio de um macaco hidráulico. A cada estágio do carregamento, mede-se o deslocamento da estaca no topo do sistema de reação, através da leitura feita em extensômetros mecânicos ou digitais, o que permite traçar a curva carga x deslocamento.

Para a avaliação de desempenho de uma estaca através de uma prova de carga estática, normalmente são aplicados estágios de carregamento até que seja atingida uma carga pelo menos igual a duas vezes a carga de trabalho prevista para a estaca ou até que se observe um deslocamento que caracterize ruptura física da mesma.

No caso em questão, de acordo com o relatório nº TK-1062-REL-001-R00, Teknier (2018), o sistema de reação da prova de carga realizada era composto por quatro tirantes de reação (monobarras INCOTEP 45D) com comprimentos de 20,0 m cada, fixos ao sistema de reação através de duas vigas secundárias, conforme pode ser visto na Figura 6.



Figura 6 – Sistema de reação utilizado para a realização da prova de carga estática (Fonte: relatório nº TK-1062-REL-001-R00, Teknier (2018))



## 5 Resultados e Análises

Foi primeiramente realizada a prova de carga estática (PCE) 55 dias após a execução da estaca, cujos resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1. Na Figura 7, está apresentada a curva carga x deslocamentos obtida no ensaio. Como não houve ruptura física da estaca, na Figura 8 está apresentada a extrapolação da curva carga x deslocamento para obtenção da carga de ruptura utilizando o método de Van der Veen (1953).

Tabela 1 – Dados da Prova de Carga Estática (PCE)

| Carga  | Deslocamento |
|--------|--------------|
| kN     | mm           |
| 0,0    | 0,000        |
| 218,8  | 0,218        |
| 440,1  | 0,758        |
| 670,0  | 1,430        |
| 879,1  | 1,948        |
| 1072,5 | 2,510        |
| 1292,5 | 3,120        |
| 1406,6 | 3,543        |
| 1533,3 | 3,922        |
| 1607,1 | 4,198        |
| 1748,7 | 4,548        |
| 1857,7 | 4,875        |
| 1960,4 | 5,130        |
| 2068,5 | 5,653        |
| 2187,4 | 6,085        |
| 1714,4 | 5,148        |
| 1278,2 | 4,165        |
| 908,0  | 3,253        |
| 471,2  | 2,215        |
| 0,0    | 0,425        |

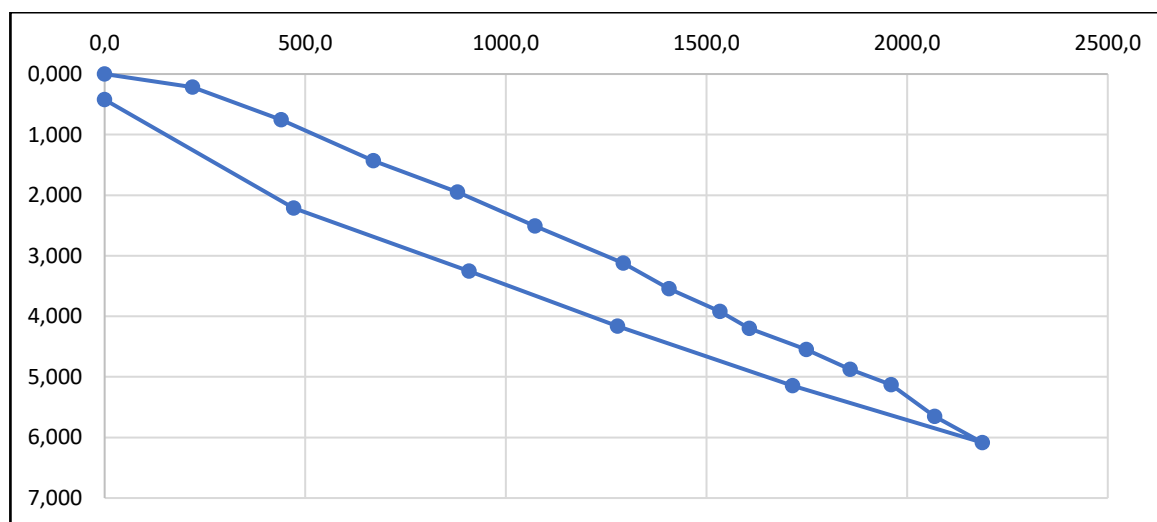


Figura 7 – Curva carga x deslocamento obtida na PCE

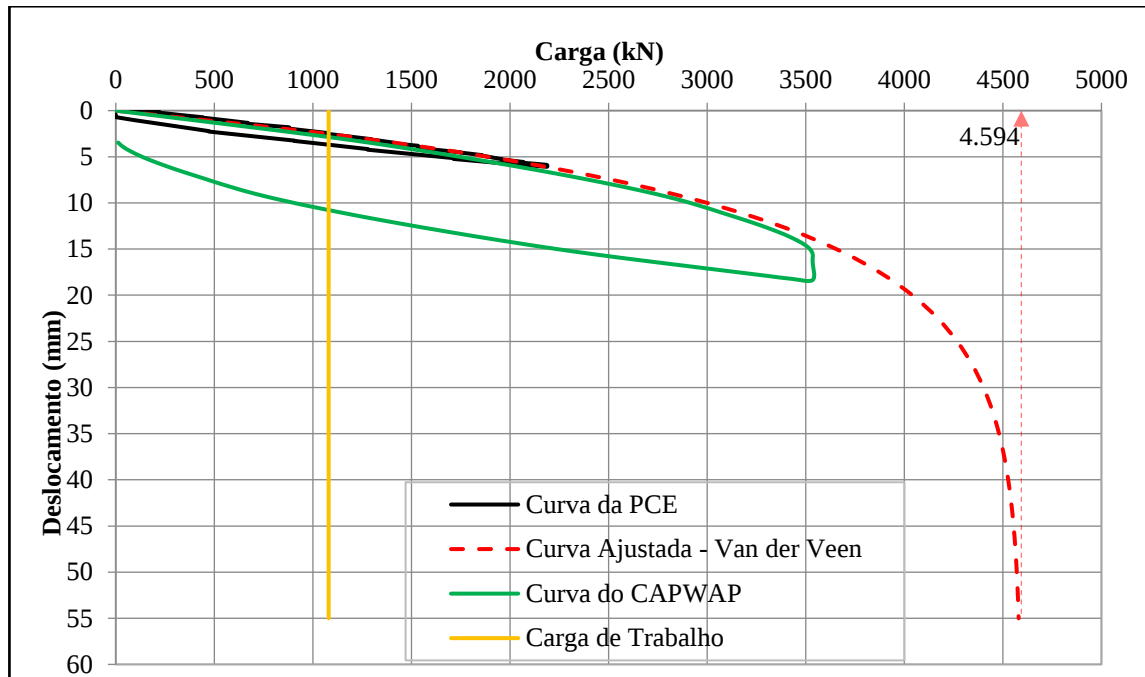


Figura 8 – Extrapolação da curva carga x deslocamento por Van der Veen (1953), PCE e CAPWAP.

Posteriormente, 31 dias após a realização da PCE, foi realizado o ensaio de carregamento dinâmico (ECD) sobre a mesma estaca, utilizando o analisador PDA® com a aplicação do método CAPWAP com intuito de avaliar a diferença entre os ensaios PCE e ECD.

Através da comparação das curvas carga x deslocamento foi observado um desvio máximo entre as curvas de 0,33 mm na carga de trabalho de 1.080 kN. Os principais dados obtidos nestes ensaios estão resumidos na Tabela 2 e na Figura 8.

Tabela 2 – Principais informações sobre os ensaios realizados

|                                                     |                 |
|-----------------------------------------------------|-----------------|
| Tipo de Estaca ensaiada                             | Hélice Contínua |
| Diâmetro da estaca                                  | 500 mm          |
| Carga de Trabalho                                   | 1.080 kN        |
| Data da execução da estaca                          | 28/07/18        |
| Data da realização da Prova de Carga Estática (PCE) | 21/09/18        |
| Set up entre execução e PCE                         | 55 dias         |
| Carga máxima mobilização na PCE                     | 2187 kN         |
| Deslocamento na carga de trabalho                   | 2,53 mm         |
| Deslocamento máximo observado no ensaio             | 6,08 mm         |
| Carga máxima Extrapolada na PCE                     | 4.594 kN        |
| Deslocamento máximo observado na Extrapolação       | 58 mm           |
| Data da realização do Ensaio Dinâmico (ECD)         | 22/10/18        |
| Set up entre execução e ECD                         | 86 dias         |
| Comprimento total da estaca                         | 19,35 m         |
| Comprimento abaixo dos sensores                     | 18,85 m         |
| Comprimento abaixo do solo                          | 18,70 m         |
| Carga máxima mobilização no ECD                     | 3.535 kN        |
| Deslocamento máximo observado                       | 18,35 mm        |
| Deslocamento na carga de trabalho                   | 2,86 mm         |
| Desvio absoluto entre PCE e ECD (Carga de Trabalho) | 0,33 mm         |
| Desvio relativo entre PCE e ECD (Carga de Trabalho) | 13 %            |

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  
 15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



## 6 Conclusão e Comentários Finais

Através da Análise CAPWAP foi possível correlacionar a curva carga x deslocamento do ensaio dinâmico ECD com a curva similar resultante da prova de carga estática PCE, obtendo-se resultados similares, o que confirma o ensaio dinâmico como uma ferramenta eficiente (rápida e segura) para o controle de qualidade de estaqueamentos.

Se analisarmos o desvio absoluto entre a prova de carga estática e o ensaio dinâmico, observa-se o valor de 0,33 mm, o que pode ser considerado um valor aceitável e, com relação ao desvio relativo, observou-se cerca de 13% de diferença a favor da segurança quando utilizado o ensaio dinâmico para análise em relação à prova de carga estática, confirmando mais uma vez ser o ensaio dinâmico uma ferramenta adequada.

## AGRADECIMENTOS

À Benaton Specialist por ceder os dados dos ensaios dinâmicos, à Teknier Engenharia pelos dados da prova da carga estática e à Sabesp por autorizar a publicação destes dados para realização deste estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U.R. (1988) *Previsão e controle de fundações*, Editora Edgar Blucher Ltda, São Paulo.
- Aoki, N. e Velloso, D. A. (1975) *An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles. Proceedings of the 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Buenos Aires, vol. 1.
- Aoki, N. (1985) *Considerações sobre Previsão e Desempenho de alguns tipos de Fundações Profundas sob ação de cargas Verticais*. In: Simpósio Teoria e Prática de Fundações Profundas UFRGS, 1985, Porto Alegre. Anais do, v. I. p. 211-251.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13208, (2007) *Estacas Ensaio de carregamento dinâmico*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6122, (2019) *Projeto e Execução de Fundações*, Rio de Janeiro.
- Avelino, J. D., *Análise de Desempenho de Estacas de Fundação em um Terreno com Presença de Solos Moles*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- Cabette, J. F. (2014), *Análise dos métodos semi empíricos para estimativa da capacidade de carga das estacas pré-fabricadas com base em resultados de ensaios de carregamento dinâmico*, dissertação de M.Sc., POLI/USP, São Paulo, SP, Brasil.
- Cabette, J. F.; Murakami, D. K. (2014) *Ajuste das fórmulas dinâmicas com base em ensaios de carregamento dinâmico para a estimativa da capacidade de carga de estacas pré-fabricadas de concreto*, XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia.
- Pini - ABMS/ABEF (1998), *Fundações Teoria e Prática*.
- Poulos e Davis (1980), *Pile Foundation Analyses and Design Series in Geotechnical Engineering*, John White and Sons, pp. 52-70.
- Smith, E.A.L. (1960), *Pile Driving Analysis by the Wave Equation*, Journal of the Mechanics and Foundations Division. Proc. of American Society Civil Engineering (ASCE), pp. 35-61.
- Teknier Engenharia e Tecnologia (2018), *Relatório de Execução de Prova de Carga Estática TK-1062-REL-001-R00*, pertencente ao arquivo técnico da SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.
- Van der Veen, C. *Bearing Capacity of a Pile*. In: International Conference Soil Mechanics Foundation Engineering, 3., 1953, Zurich. Proceedings... Zurich, 1953. v. 2.