

## Análise Comparativa de Ensaios de Carregamento Dinâmico em Estacas Pré-moldadas e Hélice Contínua em São Paulo

Jean Felix Cabette

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

Daniel Kina Murakami

Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, [daniel.murakami@benaton.com.br](mailto:daniel.murakami@benaton.com.br)

Eduardo Eroico Sobrinho

Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, [diretoria@benaton.com.br](mailto:diretoria@benaton.com.br)

Sérgio Mello

Appogeo Assessoria e Projetos Geotécnicos, São Paulo, Brasil, [sergiomello@appogeo.com.br](mailto:sergiomello@appogeo.com.br)

**RESUMO:** Este artigo técnico apresenta um estudo de caso de uma obra de edificação em São Paulo, SP, com foco na análise comparativa dos resultados de ensaios de carregamento dinâmico (ECD) em estacas pré-moldadas de concreto protendido e estacas Hélice Contínua, e sua correlação com métodos semi-empíricos de estimativa de capacidade de carga. Na mesma obra foram executados esses dois tipos de fundações.

O projeto inicial previa estacas pré-moldadas de seções maiores, que após a otimização do projeto, resultou em estacas pré-moldadas com seção quadrada de 26,5cm e 29,5cm para cargas de 70 tf e 100 tf, respectivamente, e estacas Hélice Contínua com 60cm de diâmetro para cargas de até 140 tf. Os comprimentos executados variaram entre 23 e 30 metros. As sondagens SPT revelaram uma camada de argila mole de 11,0 m de espessura, seguida por areia com N<sub>spt</sub> crescente com a profundidade, atingindo valores de 30 golpes entre 16 e 26 m.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estacas Pré-Moldadas; Estacas Hélice Contínua; Ensaio de Carregamento Dinâmico; Protocolo Benaton; Métodos semi empíricos.

**ABSTRACT:** This technical paper presents a case study of a building construction project in São Paulo, SP, Brazil, focusing on the comparative analysis of dynamic load test (DLT) results on precast prestressed concrete piles and Continuous Flight Auger (CFA) piles, and their correlation with semi-empirical methods for bearing capacity estimation. Both foundation types were implemented on the same construction site.

The initial design specified larger section precast piles, which, following project optimization, resulted in precast piles with square sections of 26.5cm and 29.5cm for working loads of 70 tf and 100 tf, respectively, and CFA piles with a 60cm diameter for working loads up to 140 tf. The installed lengths ranged between 25 and 30 meters. SPT boreholes revealed an 11.0 m thick layer of soft clay, followed by sand with increasing SPT N-values with depth, reaching 30 blows between 16 and 26 m.

**KEYWORDS:** Precast Concrete Piles; Continuous Flight Auger (CFA) ; Dynamic Load Test (DLT); Benaton Protocol; Semi-Empirical Methods.



## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil são muito utilizados os métodos semi-empíricos propostos por Aoki e Velloso em 1975 e modificado em 1985 e por Decourt-Quaresma em 1978 com sua modificação proposta em 1982, para realizar o dimensionamento das fundações. Estes métodos foram desenvolvidos em função dos resultados de ensaios de campo, principalmente sondagens de simples reconhecimento, SPT e, provas de carga executadas em determinados tipos de estacas. Para abranger diferentes tipos de materiais e de estacas, foram propostos coeficientes de ajuste, pelos respectivos autores.

Os resultados calculados utilizando os métodos semi-empíricos supra citados foram comparados a resultados de ensaios de carregamento dinâmico, através das análises CAPWAP, regulamentos pela norma NBR13208 (2007).

O ensaio de carregamento dinâmico (ECD) fundamenta-se na teoria da equação da onda, consistindo na aplicação de carregamentos dinâmicos com energias crescentes sobre o topo da estaca, seguindo o registro dos sinais das ondas de tensão refletidas e interpretação dos mesmos valores através de um método de cálculo específico (NBR13208 (2007) – Ensaios de carregamento dinâmico). No Brasil, há um predomínio praticamente absoluto na utilização da análise CAPWAP, a qual é regulamentada pela (NBR13208), que trata da metodologia empregada para a realização deste ensaio. Devido sua rapidez e baixo custo relativo, aliadas à necessidade de comprovação das cargas de projeto, os ensaios dinâmicos vêm sendo utilizados com bastante frequência em obras de todos os portes.

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 local do solo, às condições de carregamento, aos efeitos do tempo, às diferenças nos processos executivos, erros de sondagens, que influenciam diretamente a estimativa da capacidade de carga da fundação, seja por ocasião de seu carregamento estático, seja durante ou logo após a cravação, (Cabral, 2008).

## 2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é comparar os resultados dos ECDs, realizados em campo, com as estimativas de capacidade de carga obtidas por métodos semi-empíricos, tanto para as estacas pré-moldadas quanto para as estacas Hélice Contínua.

## 3 METODOLOGIA

O presente estudo de caso comparativo investigou a capacidade de carga de estacas pré-moldadas de concreto protendido e estacas Hélice Contínua em uma obra de edificação em São Paulo, SP. A metodologia envolveu a análise de dados de sondagens SPT, a aplicação de métodos semi-empíricos de estimativa de capacidade de carga e a interpretação de ensaios de carregamento dinâmico (ECD) realizados em campo.

Durante a execução das estacas pré-moldadas, adotou-se o Protocolo Benaton para otimizar a cravação e controlar a instalação. A avaliação da capacidade de carga em campo foi realizada através de ECDs, em conformidade com a NBR 13208:2007. Os sinais das ondas de tensão foram interpretados utilizando a análise CAPWAP.

Os resultados das análises CAPWAP foram comparados com as cargas admissíveis estimadas pelos métodos semi-empíricos para ambos os tipos de estaca. Essa comparação permitiu avaliar a correlação e as discrepâncias entre as abordagens de estimativa da capacidade de carga nas condições geotécnicas específicas da obra em São Paulo. O objetivo foi identificar tendências de superestimação ou subestimação dos métodos semi-empíricos em relação aos resultados dos ensaios dinâmicos, fornecendo uma análise prática da sua aplicabilidade no contexto local.



#### 4 CASO DE OBRA

Durante a execução das estacas pré-moldadas, foi adotado o Protocolo Benaton, um procedimento de campo detalhado para otimizar os critérios de cravação e garantir o controle da instalação das estacas, visando atender às cargas de projeto do projeto otimizado.

Através da análise CAPWAP, verificou-se uma carga mobilizada média de 300 tf nas estacas Hélice Contínua, com variação de 256 tf a 350 tf. Nas estacas pré-moldadas, a variação foi de 160 tf a 180 tf (média de 170 tf) para a seção de 26,5x26,5cm, e de 211 tf a 238 tf (média de 224 tf) para a seção de 29,5x29,5cm.

Considerando um fator de segurança global de 2,0 (NBR 6122:2022), as tensões de trabalho resultantes foram:

- Estaca Pré-moldada 26,5x26,5cm: 12,1 MPa
- Estaca Pré-moldada 29,5x29,5cm: 12,9 MPa
- Estaca Hélice Contínua 60cm: 5,3 MPa

A metodologia proposta, com a utilização do Protocolo Benaton, demonstrou-se eficaz no controle de estaqueamento de estacas pré-moldadas de concreto, otimizando o projeto, reduzindo o índice de quebras (0,8% nesta obra, com apenas 1 quebra em 133 estacas executadas) e atendendo às premissas de projeto.

De acordo com as tabelas de 1 a 3 é possível verificar os valores estimados de capacidade de carga das estacas executadas na obra para as quatro sondagens SPT, considerando a carga admissível equivalente a carga de ruptura dividida pelo fator de segurança global igual a 2,0;

Tabela 1. Estimativa da capacidade de carga através de métodos semi-empíricos

| Pré-Moldada - 26,5x26,5cm                                       |                           |                 |                       |                 |                                            |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------------------|
| Estimativa da Capacidade de Carga das estacas a compressão (tf) |                           |                 |                       |                 | Comprimento Estimado por sondagem (metros) |
| Sondagem                                                        | Decourt & Quaresma (1982) |                 | Aoki e Velloso (1975) |                 |                                            |
|                                                                 | Ruptura (tf)              | Admissível (tf) | Ruptura (tf)          | Admissível (tf) |                                            |
| SP-01                                                           | 141                       | 70              | 193                   | 96              | 27                                         |
| SP-02                                                           | 120                       | 60              | 134                   | 67              | 27                                         |
| SP-03                                                           | 151                       | 76              | 171                   | 86              | 23                                         |
| SP-SA1                                                          | 100                       | 50              | 119                   | 59              | 27                                         |
| SP-SA2                                                          | 130                       | 65              | 148                   | 74              | 27                                         |
| Valores Médios                                                  | 129                       | 64              | 153                   | 77              | 26                                         |



Tabela 2. Estimativa da capacidade de carga através de métodos semi-empíricos

| Pré-Moldada - 29,5x29,5cm                                       |                           |                 |                       |                 |                                            |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------------------|
| Estimativa da Capacidade de Carga das estacas a compressão (tf) |                           |                 |                       |                 | Comprimento Estimado por sondagem (metros) |
| Sondagem                                                        | Decourt & Quaresma (1982) |                 | Aoki e Velloso (1975) |                 |                                            |
|                                                                 | Ruptura (tf)              | Admissível (tf) | Ruptura (tf)          | Admissível (tf) |                                            |
| SP-01                                                           | 160                       | 80              | 212                   | 106             | 27                                         |
| SP-02                                                           | 137                       | 68              | 150                   | 75              | 27                                         |
| SP-03                                                           | 178                       | 89              | 196                   | 98              | 23                                         |
| SP-SA1                                                          | 115                       | 57              | 133                   | 66              | 27                                         |
| SP-SA2                                                          | 149                       | 75              | 168                   | 84              | 27                                         |
| Valores Médios                                                  | 148                       | 74              | 172                   | 86              | 26                                         |

Tabela 3. Estimativa da capacidade de carga através de métodos semi-empíricos

| Hélice - D=60cm                                                 |                           |                 |                       |                 |                                                     |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------------------------------|
| Estimativa da Capacidade de Carga das estacas a compressão (tf) |                           |                 |                       |                 | Comprimento<br>Estimado por<br>sondagem<br>(metros) |
| Sondagem                                                        | Decourt & Quaresma (1982) |                 | Aoki e Velloso (1975) |                 |                                                     |
|                                                                 | Ruptura (tf)              | Admissível (tf) | Ruptura (tf)          | Admissível (tf) |                                                     |
| SP-01                                                           | 333                       | 166             | 217                   | 108             | 27                                                  |
| SP-02                                                           | 367                       | 184             | 199                   | 100             | 27                                                  |
| SP-03                                                           | 320                       | 160             | 291                   | 146             | 23                                                  |
| SP-SA1                                                          | 210                       | 105             | 179                   | 89              | 27                                                  |
| SP-SA2                                                          | 268                       | 134             | 238                   | 119             | 27                                                  |
| Valores Médios                                                  | 300                       | 150             | 225                   | 112             | 26                                                  |

De acordo com os resultados dos ensaios de carregamento dinâmicos realizados na obra, realizou-se a comparação entre os métodos semi empíricos, conforme observa-se na tabela 4;



Tabela 4. Diferenças entre métodos semi-empíricos e resultados das análises CAPWAP

| Análise Cargas Admissíveis |                    |                           |        |               |                       |        |               |
|----------------------------|--------------------|---------------------------|--------|---------------|-----------------------|--------|---------------|
| Tipo de Estaca             | Seção (cm)         | Decourt & Quaresma (1982) | CAPWAP | Diferença (%) | Aoki e Velloso (1975) | CAPWAP | Diferença (%) |
| Pré - Moldada              | Quadrada 26,5x26,5 | 64                        | 85     | -24%          | 77                    | 85     | -10%          |
| Pré - Moldada              | Quadrada 29,5x29,5 | 74                        | 112    | -34%          | 86                    | 112    | -23%          |
| Hélice Continua            | Circular 60        | 150                       | 150    | 0%            | 112                   | 150    | -25%          |

De acordo com a tabela 4, observa-se que no caso das estacas pré-moldadas de concreto que o método Decourt & Quaresma subestimou entre 24% e 34% as cargas admissíveis enquanto no método proposto por Aoki e Velloso, ficaram subestimadas entre 10% e 23%. Já na comparação das estacas tipo Hélice Continua o método Decourt & Quaresma teve valor médio idêntico em relação as análises CAPWAP, enquanto no método proposto por Aoki e Velloso, ficaram subestimadas em média 25%.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante ressaltar que os métodos semi-empíricos fornecem uma estimativa da capacidade de carga das estacas, mas não garantem o valor real. Portanto, a realização de ensaios de carregamento é fundamental para comprovar as cargas de ruptura e admissíveis.

No caso de estacas moldadas in loco, a otimização do projeto pode ser limitada pelo tempo necessário entre a execução e o ensaio, período em que o equipamento de fundação geralmente não está mais disponível na obra. Isso pode inviabilizar a economia na obra em caso de superestimação da capacidade de carga pelos métodos ou resultar em custos desnecessários se houver subestimação.

Por outro lado, a utilização de estacas cravadas, como as pré-moldadas de concreto apresentadas neste estudo, oferece a vantagem de permitir a realização de ensaios durante a cravação e em diferentes idades, com o equipamento de cravação ainda presente na obra. Essa flexibilidade possibilita a otimização do projeto de fundação de forma mais precisa para cada obra específica.

Neste estudo de caso, a otimização do projeto de fundação com estacas pré-moldadas foi viabilizada pela experiência prévia da Benaton em obras similares na região, onde se observou que os métodos semi-empíricos tendiam a subestimar a capacidade de carga. Dessa forma, em colaboração com o cliente e a consultoria de solos da Appogeo, o Protocolo Benaton foi adotado para monitorar a cravação das estacas, buscando a máxima carga possível sem comprometer a integridade estrutural, o que foi posteriormente confirmado por ensaios de recravação.

A otimização alcançada com a substituição das estacas circulares pelas quadradas resultou em uma significativa redução da área cheia das estacas: 56% na substituição de estacas de 40cm de diâmetro por estacas de 26,5cm de lado e 44% na substituição de estacas de 50cm de diâmetro por estacas de 29,5cm de lado. Essa redução demonstra o potencial de otimização e economia proporcionado pela combinação de um protocolo de cravação eficiente e a confirmação da capacidade de carga através de ensaios dinâmicos.

## AGRADECIMENTOS



Os autores agradecem a Benaton Specialist pela autorização dos dados necessários para a elaboração deste trabalho, e continuo estímulo a desenvolvimento de pesquisas científicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U.R. (1988) Previsão e controle de fundações, Editora Edgar Blucher Ltda, São Paulo.
- 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.
- 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.; A new dynamic load test concept.; Drivability of piles (1): 1-4, Proc. Discussion Session 14, Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng. (12), Rio de Janeiro, 1989
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13208 (2007) Estacas Ensaio de carregamento dinâmico, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6122 (2022) Projeto e execução de fundações, Rio de Janeiro.
- Cabette, J. F. (2014). Análise dos métodos semi-empíricos utilizados para a estimativa da capacidade de carga de estacas pré-fabricadas com base em resultados de ensaios de carregamento dinâmico. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Cabette, J. F., Murakami, D. K. (2023) Estacas Pré Moldadas de Concreto Cravadas em São Vicente: Procedimentos Executivos e Desafios Superados. Seminário de Fundações Especiais SEFE 10, São Paulo.
- Cabral, E. V., “Contribuição à Confiabilidade de Estacas Cravadas Através de um Estudo de Caso com Aplicação da Teoria Bayesiana”. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2008.
- DÉCOURT, L. e QUARESMA, A. R. Capacidade de Carga de Estacas a partir de Valores de SPT. Anais do 6º COBRAMSEF, Rio de Janeiro, vol.1, p. 45-53, 1978.
- DÉCOURT, L. e QUARESMA, A. R., Como calcular (rapidamente) a capacidade de carga de uma estaca. Revista Construção São Paulo, n1800, Agosto, 1982, Separata.
- Murakami, D. K. (2015). Novo procedimento para a realização de análise capwap no ensaio de carregamento dinâmico em estacas pré-moldadas. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo
- Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2014) Dificuldade de cravação de estacas em solos com quakes elevados. Seminário apresentado em "Workshop - Ensaios de Carregamento Dinâmico e Monitoração de Cravação de Estacas (Pile Driving Analyzer e CAPWAP)", Carmix do Brasil, São Paulo, pp 1-8

