

Verificação da Eficiência de Métodos Semi-Empíricos na Estimativa da Capacidade de Carga Usando Prova de Carga Bidirecional em Estacas Hélice Contínua

Luis Henrique Rambo
Universidade Federal do Amapá, Macapá, Brasil, luis.rambo@unifap.br

Marcos Fábio Porto de Aguiar
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil,
marcosporto@ifce.edu.br

Giullia Carolina de Melo Mendes
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil,
giucmendes@gmail.com

Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, heber@det.ufc.br

RESUMO: O presente trabalho consiste em comparar as previsões de capacidade de carga pelos métodos semi-empíricos de Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Antunes e Cabral (1996) com o resultado obtido em prova de carga com célula expansiva hidrodinâmica para uma estaca do tipo hélice contínua executada na cidade de Curitiba-PR, com 1000 mm de diâmetro. As curvas “carga *versus* deslocamento” das parcelas de ponta e de fuste, foram adaptadas, segundo o método de Silva (1986), para uma única curva “carga *versus* deslocamento”. Ademais, a estimativa que mais se aproximou do resultado da prova de carga foi o de Décourt-Quaresma (1978), e o que mais se distanciou foi pelo método Aoki-Velloso (1975). Vale salientar que, mesmo com uma grande contribuição da ponta, devido ao grande diâmetro, a curva obtida pela prova de carga bidirecional demonstrou resultados compatíveis com as estimativas de capacidade de carga pelos métodos semi-empíricos. Observou-se também que o fator de segurança obtido para a prova de carga em relação a solicitação de carga da estaca foi de 2,0, enquanto que, para todos os métodos, foram encontrados fatores de segurança menores do que 2,0. Assim, nota-se a importância da realização de estudos de comparação entre provas de carga estática tradicionais e provas de carga com a utilização de célula expansiva hidrodinâmica, com o intuito de confirmar os resultados da prova de carga bidirecional.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de Carga Bidirecional, Métodos Semi-empíricos, Estaca Hélice Contínua, Fundações Profundas.

1 INTRODUÇÃO

Os conhecimentos de engenharia geotécnica exercem um importante papel no desenvolvimento da infraestrutura de cidades. Cada vez mais, através de profissionais e pesquisadores, vê-se o aprimoramento de técnicas relacionadas a área. Com o intuito de

avaliar o desempenho de estacas *in loco*, ensaios de prova de carga vem sendo amplamente utilizados. Uma de suas vertentes é o ensaio com célula expansiva hidrodinâmica, também denominado teste bidirecional ou Osterberg Cell (O-Cell). Para tanto, o presente artigo visa comparar determinações de capacidade de carga de estacas hélice contínua

monitoradas por meio de métodos tradicionalmente utilizados no Brasil com ensaios de prova de carga utilizando célula expansiva hidrodinâmica em uma estaca executada em Curitiba-PR, com 1000 mm de diâmetro e 15 metros de profundidade.

2 HÉLICE CONTÍNUA MONITORADA POR COMPUTADOR

A estaca hélice contínua consiste em uma estaca moldada *in loco*, que utiliza, como ferramenta de escavação, um trado contínuo vazado, circundado por hélices. Conforme afirma Paschoalin *et. al* (2008), após atingir a cota de projeto, a haste é retirada do solo ao mesmo tempo em que o concreto é lançado pelo interior do tubo vazado do trado, evitando assim problemas de desconfinamento do solo e garantindo a estabilidade da escavação. Dessa forma, os processos de execução desse tipo de estaca consistem em perfuração, concretagem e inserção da armadura.

Durante a perfuração, deverão ser verificadas as seguintes informações: inclinação do trado nas duas direções, rotação, torque para a introdução do trado, velocidade de avanço e profundidade do trado.

Já no processo de concretagem, os dados que devem ser analisados são: profundidade e pressão do concreto na ponta do trado, volume total e parcial de concreto injetado, sobreconsumo de concreto pontual e total da estaca, velocidade de subida do trado e perfil estimado da estaca.

Enquanto que, no processo de inserção de armadura, deve-se manter sua parte superior devidamente limpa com o intuito de evitar o contato com torrões de argila, outro tipo de solo ou, até mesmo, pedaços de material escavado que possam prejudicar a inserção da armadura ou comprometer a integridade da estaca.

Existem algumas vantagens quanto ao seu processo executivo, como controle e rapidez na execução, ausência de vibrações e ruídos excessivos. Outro fator relevante é o elevado custo-benefício de sua execução, podendo ser

moldada com diâmetros de até 130 centímetros e profundidades de até 35 metros, conforme cada equipamento.

3 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGAS DE ESTACAS

Com o objetivo de relacionar a previsão da capacidade de carga de estacas com o resultado do índice de resistência à penetração (N_{SPT}), muitos pesquisadores brasileiros propuseram métodos que são aplicáveis a essas condições. Dentre eles, estão os métodos propostos por Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) e Antunes e Cabral (1996).

3.1 Aoki-Velloso (1975)

Esse método foi inicialmente proposto correlacionado ao ensaio CPT, mas por sua pouca aplicação no Brasil, foi adaptado posteriormente ao ensaio SPT. É dado pela seguinte expressão:

$$R = \frac{kN_p}{F_1} \cdot A_p + \frac{U}{F_2} \cdot \sum_1^n (\alpha \cdot k \cdot N_L \cdot \Delta L) \quad (1)$$

Em que R é a capacidade de carga, k um coeficiente dependente do tipo de solo, N_p o valor do N_{SPT} na cota de apoio da ponta, F_1 e F_2 são fatores de correção, A_p a área da ponta, U é o perímetro, α o coeficiente dependente do tipo de solo, e N_L valor do N_{SPT} médio referente ao ΔL , que é a altura da camada, por tipo de solo.

3.2 Décourt-Quaresma (1978)

O método proposto por Décourt-Quaresma (1978) inicialmente era aplicável a apenas estacas escavadas ou de deslocamento. Com a continuidade dos estudos do método, o mesmo foi adaptado para outros tipos de estacas, em função dos parâmetros α e β . É dado por:

$$R = \alpha \cdot C \cdot N_p \cdot A_p + \beta \cdot 10 \cdot \left(\frac{N_L}{3} + 1 \right) \cdot U \cdot L \quad (2)$$

Em que R é a capacidade de carga, α e β são coeficientes dependentes do tipo de solo e de estaca, conforme dados tabelados, C o coeficiente característico do solo, N_p valor do N_{SPT} na cota de apoio da ponta e o imediatamente anterior e posterior, A_p é a área da ponta, N_L o valor do N_{SPT} , U o perímetro do fuste, e L é a altura da camada por tipo de solo.

3.3 Antunes e Cabral (1996)

O método proposto por Antunes e Cabral em 1996, é de uso exclusivo para estacas do tipo hélice contínua, e é dado pelas seguintes expressões:

$$Q_{l,ult} = \pi \cdot D \cdot \sum (N \cdot \beta_1) \cdot \Delta L \quad (3)$$

$$Q_{p,ult} = \beta_2 \cdot N_p \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \quad (4)$$

Onde $Q_{l,ult}$ é a resistência lateral, $Q_{p,ult}$ a resistência de ponta, D é o diâmetro do fuste da estaca, N índice de resistência à penetração do ensaio SPT, β_1 e β_2 coeficientes dependentes do tipo de solo, ΔL comprimento da estaca e N_p o valor do N_{SPT} na ponta da estaca.

4 PROVA DE CARGA ESTÁTICA COM CÉLULA EXPANSIVA HIDRODINÂMICA BIDIRECIONAL

Segundo Milititsky (1991), as provas de carga são os melhores ensaios para a determinação do comportamento de fundações profundas sob carga, sendo os únicos realmente confiáveis.

Gonçalves (2008) afirma que a dificuldade natural de se conhecer as propriedades do solo onde as fundações serão executadas, a alteração das condições iniciais ocasionada pela perfuração e o comportamento do conjunto estaca-solo, demonstram a necessidade de utilização destes ensaios. Estas provas de carga podem prover dados para projeto, avaliar as

fundações executadas em uma determinada obra ou, ainda, ajudar no estudo das características de comportamento do conjunto solo-estaca. Assim sendo, o ensaio deve reproduzir as condições de funcionamento real a que a estaca estará submetida para uma melhor previsão de desempenho para projetos.

As provas de carga estáticas, cuja metodologia de ensaio é determinada pela ABNT (2006), destacam-se como um dos ensaios de campo mais importantes usados na engenharia de fundações. A prova de carga estática convencional é um ensaio que se limita a fornecer a distribuição de “carga versus recalque” no topo da estaca. Mas para um melhor entendimento do comportamento da mesma frente aos carregamentos impostos, Gunaratne *et al.* (2006) afirmam que é importante diferenciar as parcelas resistivas de ponta e de atrito suportadas.

Osterberg (1998) desenvolveu um método de ensaio que utiliza uma célula de sacrifício denominada célula de Osterberg, capaz de medir a capacidade de carga da ponta da estaca e de seu fuste separadamente, conforme apresentado na Figura 1. A célula é instalada na armadura da estaca, podendo ser colocada em níveis diferentes do fuste e em várias quantidades. Maset *et al.* (2016) dizem que, depois da concretagem e o período de cura, a célula é acionada e trabalha em duas direções, expandindo-se hidraulicamente para que a parte superior da estaca reaja com a inferior. Quando a célula é acoplada a base, a reação é dada pelo solo sob a ponta da estaca.

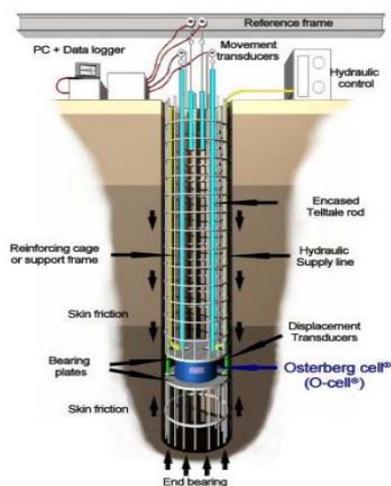


Figura 3. Esquema representativo da célula de Osterberg (FUGRO, 2017).

Segundo Brochero (2014), algumas vantagens da utilização da O-cell podem ser listadas, como a vantagem econômica em relação à prova de carga estática tradicional e a verificação real da capacidade de ponta.

Maset *et al.* (2016), afirmam que, para o correto posicionamento da célula ao longo do comprimento da estaca, busca-se o ponto de equilíbrio entre a resistência ao atrito lateral do fuste mais o peso próprio da estaca acima da célula e o atrito lateral do fuste abaixo da célula mais a resistência de ponta:

$$A l_{shaft} + P P_{shaft} = A l_p + Q_p \quad (5)$$

Em que $A l_{shaft}$ é o atrito lateral do fuste acima da célula; $P P_{shaft}$ representa o peso próprio do fuste acima da célula; $A l_p$ é o atrito lateral abaixo da célula e Q_p representa a resistência de ponta.

Silva (1986) propôs uma metodologia para que os resultados obtidos para fuste e ponta pudessem ser representados por uma única curva “carga x recalque”, como é apresentado para a prova de carga estática tradicional. Então, Silva (1986) sugeriu que fosse realizada uma interpolação dos valores de recalques para ambos os casos e então fossem somadas as cargas aplicadas para um mesmo deslocamento. Dessa forma, os valores obtidos poderiam ser representados em apenas uma curva carga x recalque, denominada curva total.

Contudo, sabe-se que, na maioria dos ensaios de prova de carga estática utilizando célula expansiva, os deslocamentos do “fuste” são medidos por deflectômetros posicionados no topo da estaca e os deslocamentos da “ponta” por tell-tales fixados na base da célula de carga. Esse fato faz com que o encurtamento elástico da parcela da “ponta” da estaca esteja embutido na leitura do tell-tale.

Na literatura, alguns autores propuseram metodologias para introdução desse encurtamento elástico na curva carga-recalque equivalente do ensaio estático convencional, como Alonso e Silva (2000) e Massad (2015). Falconi e Maset (2016) apresentaram uma rotina simples e direta para aplicação em projetos. No presente estudo, optou-se por não considerar o encurtamento elástico da estaca.

5 RESULTADOS

Com a finalidade de comparar as determinações de capacidade de carga obtidas através de métodos tradicionalmente utilizados no Brasil com o resultado obtido na prova de carga estática com célula expansiva hidrodinâmica bidirecional, foram coletados os dados de sondagens do tipo mista e SPT-T, bem como de uma estaca hélice contínua de 15 m de profundidade e 1 m de diâmetro executada na construção de um edifício residencial em Curitiba-PR, Brasil.

Com a realização do ensaio SPT, foram obtidos parâmetros como o N_{SPT} , medição de torque e tipos de solo, para a determinação da capacidade de carga pelos métodos tradicionais como apresentados da Tabela 1.

Tabela 1. Capacidades de carga conforme cada método.

Método Utilizado	Carga Admissível (kN)	
	SM	SPT-T
Aoki-Velloso (1975)	1759,42	3347,07
Décourt-Quaresma (1978)	3826,68	3534,54
Antunes e Cabral (1996)	3279,19	2736,70

Além disso, na estaca hélice contínua, foi realizado prova de carga estática com célula expansiva hidrodinâmica, obtendo assim as

curvas carga x recalque da ponta e do fuste da estaca, conforme Figura 2.

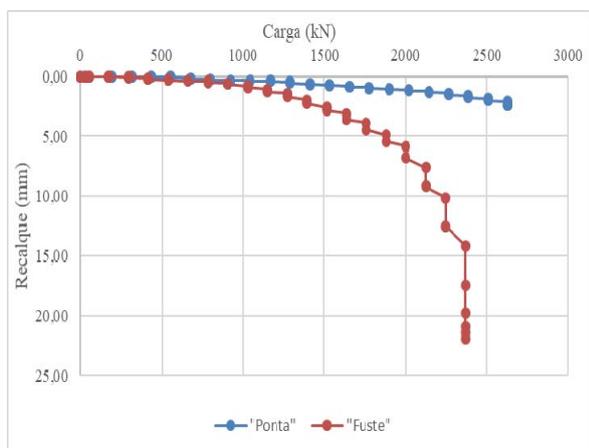


Figura 2. Curva carga-recalque.

Conforme sugerido por Silva (1986), as curvas de ponta e fuste foram adaptadas a uma única curva, denominada curva carga-recalque total sem considerar o encurtamento elástico da estaca, cuja configuração é apresentada na Figura 3.

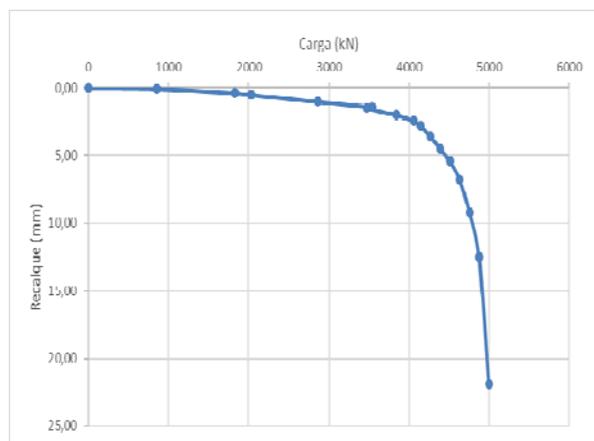


Figura 3. Curva carga-recalque total.

O valor da capacidade de carga fornecido pela prova de carga foi de, aproximadamente, 5023 kN, sendo, aproximadamente, 2370 kN referente ao fuste e 2653 kN referente a ponta. Esse valor, quando comparado com a carga de 2551 kN do pilar P15, fornece um fator de segurança de 2,0 para a estaca analisada. A Tabela 2 apresenta os fatores de segurança obtidos para cada metodologia empregada

Tabela 2. Valores dos fatores de segurança considerando a carga do pilar P15.

Método	Carga (kN)	Fator de Segurança
Prova de Carga Estática (kN)	5023	2,0
Aoki-Velloso (1975)	SM	0,7
	SPT-T	1,3
Décourt-Quaresma (1978)	SM	1,5
	SPT-T	1,4
Antunes e Cabral (1996)	SM	1,3
	SPT-T	1,1

6 CONCLUSÕES

Nesse estudo de caso, o solo apresentava pouca resistência lateral e para a verificação da capacidade das estacas *in loco*, optou-se pela realização de provas de carga com célula expansiva hidrodinâmica, devido a sua rápida execução. A estaca utilizada para esse estudo tinha um diâmetro maior do que os diâmetros utilizados convencionalmente, acarretando, assim, uma contribuição significativa da ponta na resistência total, o que, por norma não pode representar mais do que 20% da capacidade total.

Dessa maneira, com a obtenção da capacidade por meio da prova de carga, pôde-se perceber que, mesmo com uma grande contribuição da ponta, o resultado demonstrou uma boa estimativa de capacidade de carga, quando comparado com os determinados por cada método.

O método que mais se aproximou do resultado da prova de carga foi o de Décourt-Quaresma, e o que mais se distanciou foi o método Aoki-Velloso, para esse estudo de caso. Pôde-se observar também que o fator de segurança obtido para a prova de carga em relação a solicitação de carga da estaca é de 2,0, enquanto que, para todos os métodos, foram encontrados fatores de segurança menores do que 2,0. Sugere-se a realização de estudos de comparação entre provas de carga estática tradicionais e provas de carga com a utilização de célula expansiva hidrodinâmica, afim de confirmar os resultados da prova de carga com célula expansiva hidrodinâmica bidirecional.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa do autor³.

estacas tipo hélice contínua executadas em solo de diabásio. Exacta São Paulo, v.6, n.1, p. 75-82.
Silva, P. H. C. A. F. (1986). *Célula Expansiva Hidrodinâmica: Uma Nova Maneira de Executar Provas de Cargas*. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. COBRAMSEG, Porto Alegre, RS, Brasil.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 12131 (2006). *Estacas – Prova de Carga Estática*.
- Alonso, U., Silva, P.E.C.A.F. (2000). *Curva de “recalque equivalente” do topo de uma estaca hélice contínua ensaiada com célula expansiva hidrodinâmica (EXPANCELL)*, IV SEFE, Vol. 1, p. 416-425.
- Antunes, W.R e Cabral, D.A. (1996). *Capacidade de carga em estacas hélice contínua*. 3º Seminário de Engenharia de Fundações e Geotecnia. São Paulo-SP.
- Aoki, N. e Velloso, D. A. (1975). *An approximate method to estimate the bearing capacity of piles*. Proceedings of Panamerican CSMFE. Buenos Aires, ARG.
- Brochero, J.L.R. (2014). *Caracterização geotécnica do campo experimental da UFRGS em areia*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS.
- Décourt, L., Quaresma, R. (1978). *Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT*. In: Anais do CBMSEF. Rio de Janeiro, RJ.
- Falconi, F.F., Maset, V.L. (2016). *Análise Prática de Resultados de Ensaios Bidirecionais*.
- Fugro Loadtest . (2017). O-cell Technology. Disponível em:
<http://www.loadtest.com/services_int/ocelltechnology.htm>. Acesso: Março, 2018.
- Gonçalves, S.F. (2008). *Estudo do comportamento à compressão de estacas metálicas curtas em solo sedimentar*. Santa Maria: Universidade Federal Santa Maria. 133 p.
- Gunaratne M. et al. (2006). *The foundation engineering handbook*. Taylor & Francis Group.
- Maset, V.L., Falconi, F.F., Hachich, W.C. (2016). *Interpretação dos resultados de ensaios bidirecionais*. In: Anais do COBRAMSEG. Belo Horizonte, MG.
- Massad, F. (2015). *On the Interpretation of the Bidirectional Static Load Test, Soils and Rocks*, São Paulo, Vol. 38, n. 3, p. 249-262.
- Milititsky, J. (1991). *Provas de carga estática*. Sefe II – 2º Seminário de engenharia de fundações especiais.
- Osterberg, J.O. (1998). *The Osterberg load test method for bored and driven piles the first ten years*.
- Paschoalin, J.A.F., Carvalho, D., Albuquerque, P.J. de R., Nogueira, R.C.R. (2008). *Comportamento à tração de*