

# XVI ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

Universidade de Fortaleza  
17 a 20 de outubro de 2016

## Análise da Eficiência de Métodos de Extrapolação de Prova de Carga em Solo Arenoso de Fortaleza

Fernando Feitosa Monteiro <sup>1\*</sup> (PG), Leila Maria Coelho de Carvalho <sup>2</sup>(IC), Yago Machado Pereira de Matos <sup>3</sup> (PG), Marcos Fábio Porto de Aguiar <sup>4</sup>(PQ), Francisco Heber Lacerda de Oliveira <sup>5</sup> (PQ)

*1 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza-CE;*

*2 Programa de Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza, Fortaleza-CE*

*3 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza-CE*

*4 Professor de Graduação em Engenharia Civil, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza-CE*

*5 Professor de Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza, Fortaleza-CE.*

yago\_mpm@hotmail.com

*Palavras-chave: Prova de carga. Solos arenosos. Fundações profundas. Capacidade de carga.*

### Resumo

O presente artigo abrange, através de pesquisa bibliográfica e execução de ensaios de campo, a realização de análise da eficiência de métodos de extrapolação de prova de carga. Para a análise, são utilizados os métodos de Chin-Kondner (1970), Davisson (1972), ABNT (2010) e Van Der Veen (1953). O trabalho tem o objetivo de estimar a capacidade de carga de uma estaca raiz com comprimento de 12 metros de comprimento e 350mm de diâmetro executada na cidade de Fortaleza em um solo predominantemente arenoso. Verificou-se que os métodos da NBR 6122 (2010) e Van der Veen (1956) apontaram discrepâncias de 1,21% e 1,81% respectivamente, sendo as menores diferenças. Já os Métodos de Chin (1970) e Davisson (1972) apresentaram as maiores diferenças, com valores de 30,39% e 10,49%. Assim, percebe-se que o método da NBR 6122 (2010) foi o que apresentou um resultado com maior proximidade ao valor de referência fornecido pela prova de carga realizada no estudo.

### Introdução

#### Prova de Carga Estática em Estaca

Conforme Aoki (1997), a Prova de Carga Estática busca reproduzir a história do carregamento real de uma construção, que se realiza em estágios de carga quase sempre crescentes, ao longo do tempo, visando à avaliação da segurança que a fundação apresenta em relação ao estado último ou de ruptura. No caso de uma construção, a carga é mantida constante ao longo da vida útil da edificação. No Brasil, a ABNT (2006) normaliza a execução do ensaio de prova de carga estática em estacas verticais ou inclinadas, independentemente do processo de execução ou de instalação no terreno. A mesma norma cita que este ensaio visa fornecer elementos para avaliar o comportamento carga versus deslocamento e estimar as características de capacidade de carga das estacas através da aplicação de esforços estáticos crescentes à estaca e registrar os deslocamentos correspondentes.

O carregamento das provas de carga de compressão é feito por um macaco hidráulico reagindo contra um sistema de reação que pode ser composto por: 1) Viga de reação, 2) Barras diwidag, 3) Macaco hidráulico, 4) Extensômetro, 5) Vigas de referência, 6) Bloco de coroamento da estaca, apresentadas na Figura 1.



**Figura 1:** Montagem de prova de Carga Estática

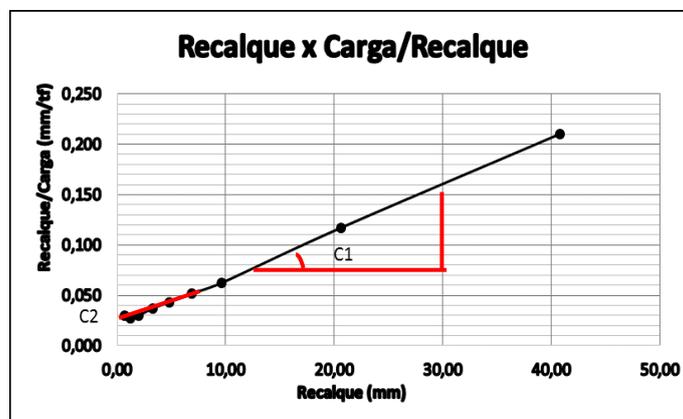
O ensaio de carregamento estático é considerado como o ensaio de campo mais eficiente de verificação de desempenho de uma fundação. Por meio deste ensaio é possível conhecer o comportamento da fundação com aplicação de cargas em níveis crescentes, até atingir a carga limite ou a completa ruptura do sistema estaca-solo. A análise do comportamento da fundação é realizada pela curva carga-recalque resultante do ensaio.

### Métodos de Extrapolação da Curva Carga x Recalque

Inúmeros recursos têm sido oferecidos para analisar a carga de ruptura, com base em resultados de uma prova de carga estática. Caso não venha a acontecer a ruptura na Prova de Carga Estática ou um nível de recalque que defina a ruptura, tenta-se extrapolar por equação matemática, que é adaptada ao trecho que se tem na curva carga-recalque. Em seguida são demonstrados quatro métodos de extrapolação da curva carga x recalque, que são: Chin-Kondner (1970), Davisson (1972), ABNT (2010) e Van Der Veen (1953).

#### Método de Chin-Kondner (1970)

Chin-Kondner (1970) propõe a extrapolação da carga de ruptura para os dois ensaios estáticos de prova de carga (ensaios do tipo lento e rápido). O método consiste na divisão de cada recalque pela devida carga aplicada e aplica-lo no eixo das ordenadas. Por sua vez, no eixo das abscissas, colocam-se os recalques obtidos durante a prova de carga estática. Um exemplo de extrapolação pelo método de Chin-Kondner (1970) é observado na Figura 2.



**Figura 2:** Método de Extrapolação proposto por Chin Kondner

A carga limite última é dada como o inverso da inclinação da linha formada pelos pontos plotados no gráfico, de acordo com as equações abaixo:

$$Q_u = \frac{1}{C_1} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\delta}{C_1 \cdot \delta + C_2} \quad (2)$$

Onde: Q é a carga aplicada (kN);  $Q_u$  a carga limite última (kN);  $C_1$  é a inclinação da linha reta ( $kN^{-1}$ );  $C_2$  é a intersecção com o eixo Y (mm/kN) e  $\delta$  o recalque correspondente à carga aplicada (mm).

### Método de Davisson (1972)

Davisson (1972) propôs um método também conhecido como *Offset Limit*, nele prevê-se que a carga limite é apresentada por uma equação dependente do diâmetro da estaca e que ultrapasse a compressão elástica da estaca em 4mm. A definição do método é exibida na equação abaixo:

$$\rho = \left(4 + \frac{D}{120}\right) + \frac{Q \cdot L}{A \cdot E} \quad (3)$$

Sendo:  $\rho$  o recalque para uma dada carga aplicada (mm); D o diâmetro da estaca (mm); L o comprimento da estaca (mm); Q a carga aplicada (kN); E o módulo de Young da estaca ( $kN/m^2$ ) e A a área da seção transversal da estaca ( $m^2$ ). O método de extrapolação de Davisson (1972) é mostrado na Figura 3

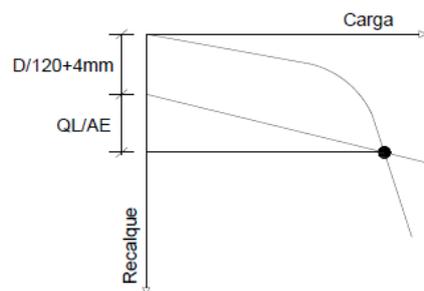


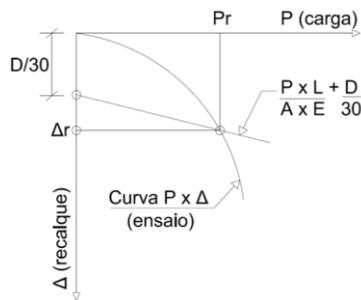
Figura 3: Método de Extrapolação proposto por Davisson

### Método ABNT (2010)

No momento em que a estaca é carregada e apresenta um recalque considerável, porém a curva carga x recalque não apresenta uma carga de ruptura definida, e sim, um aumento constante do recalque com a carga, a ABNT (2010) recomenda que a carga de ruptura pode ser ajustada como aquela que refere-se na curva carga x recalque, assim temos a Figura 4.

$$\rho = \frac{P L}{A E} + \frac{D}{30} \quad (4)$$

Onde:  $\rho$  é o recalque para uma dada carga aplicada (mm); D é o diâmetro da estaca (m); L é o comprimento da estaca (m); P é a carga aplicada (kN); E é o módulo de Young da estaca ( $kN/m^2$ ); A é a área da seção transversal da estaca ( $m^2$ ). A capacidade de carga R dada por uma medida de ruptura padronizada é sempre inferior que a oferecida por um critério de ruptura física, pois a ruptura normalizada refere-se a um recalque finito, enquanto a ruptura física está agregada a um recalque infinito (CINTRA e AOKI, 2010).



**Figura 4:** Método de Extrapolação proposto por Davisson

### Método de Van der Veen (1956)

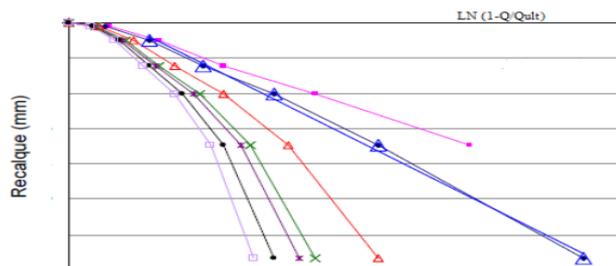
Van der Veen (1956) propõe em seu método que a relação entre a carga e o deslocamento no topo apresente um aspecto exponencial, dado pela equação abaixo:

$$Q = Q_{ul} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot P}) \quad (5)$$

De tal forma que Q é a carga aplicada no topo da estaca;  $Q_{ul}$  é a carga de ruptura;  $\alpha$  é o coeficiente que define a forma da curva e  $\rho$  o recalque correspondente à carga aplicada. Assim  $\alpha$  é o coeficiente que define a forma da curva, nesta observa-se uma característica assintótica a uma reta vertical que caracteriza a carga de ruptura ( $Q_r$ ). Essa função sendo reescrita com  $Q = Q_{ult}(r)$  tem-se a equação 6, que refere-se a uma reta que passa pela origem, quando impressa em uma escala semilogarítmica de base de sistema de logaritmos neperianos.

$$\alpha \cdot \rho + \ln(1 - Q / Q_{ul}) = 0 \quad (6)$$

Tendo como origem os pontos (Q,  $\Delta_r$ ) adquiridos na prova de carga, é preciso encontrar, por tentativas, a medida de  $Q_{ult}$  que apresenta o melhor retorno linear pelos pontos  $[-\ln(1 - Q/Q_{ult}), \Delta_r]$ . Estes valores são inseridos em um gráfico, e assim novas tentativas são executadas com outras medidas de  $Q_{ult}$ . No momento em que verifica-se um gráfico linear, o valor adotado de  $Q_{ult}$ , refere-se à carga de ruptura ( $Q_r$ ), conforme Figura 5.



**Figura 5:** Método de Extrapolação proposto por Van der Veen

## Metodologia

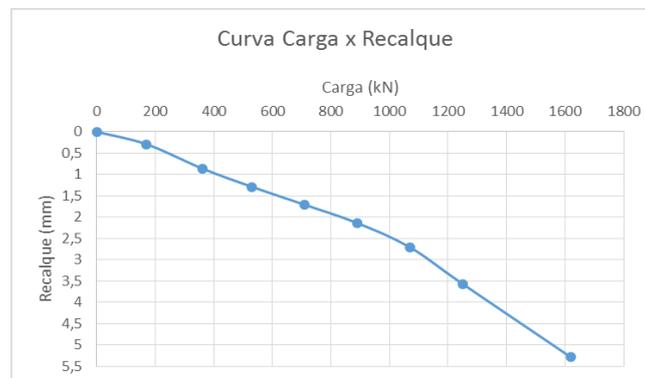
A metodologia utilizada na composição deste trabalho consistiu, inicialmente de uma revisão bibliográfica feita a partir de livros, manuais e normas técnicas. Em seguida, foram realizados ensaios de prova de carga para determinação da capacidade de carga estudada. Dessa forma, obtendo a curva carga x recalque representativa do ensaio, em seguida, realiza-se a extrapolação. A análise é realizada a partir da curva carga x recalque por diversos métodos, afim de obter a carga de ruptura da estaca.

## Resultados e Discussão

O trabalho tem o objetivo de estimar a capacidade de carga de uma estaca raiz com comprimento de 12 metros de comprimento e 350mm de diâmetro executada na cidade de Fortaleza em um solo predominantemente arenoso, através de extrapolações de prova de carga e analisar a eficiência dos métodos analisados. A Tabela 1 mostra o resultado do ensaio de prova de carga realizado na estaca do presente estudo. Na Figura 6, pode-se visualizar a curva carga-recalque obtida a partir do ensaio de prova de carga estática realizado.

**Tabela 1:** Resultado do ensaio de prova de carga

Prova de Carga	
Carga (kN)	Recalque (mm)
0	0
170	0,29
360	0,86
530	1,29
710	1,71
890	2,14
1.070,00	2,71
1.250,00	3,57
1.620,00	5,29



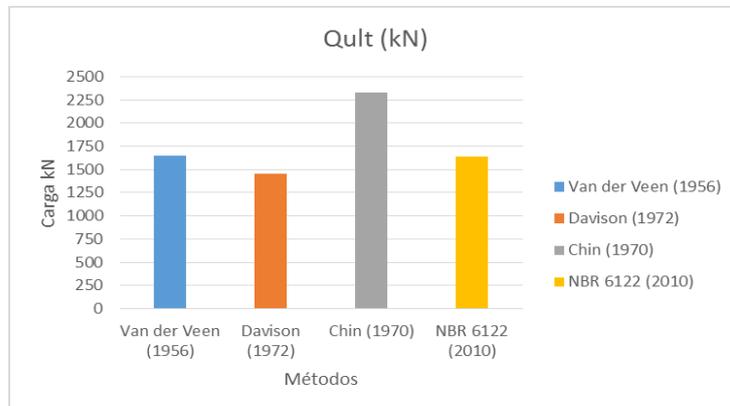
**Figura 6:** Curva carga x recalque

A partir métodos de Chin-Kondner (1970), Davisson (1972), ABNT (2010) e Van Der Veen (1953), obteve-se as respectivas cargas de ruptura para cada método, como é exibido na Tabela 2, foi possível constatar que os métodos que mais se aproximaram do valor de referência dado pela prova de carga, que foi de 1620kN, foram os métodos de: Van der Veen (1956) e o da NBR 6122 (2010).

**Tabela 2:** Valores da extrapolação da prova de carga

Métodos	Qult (kN)
Van der Veen (1956)	1650
Davisson (1972)	1450
Chin (1970)	2327,56
NBR 6122 (2010)	1640

Na Figura 7 são exibidos os resultados das extrapolações da prova de carga a partir dos métodos estudados nesse trabalho. Verifica-se que o método da NBR 6122 (2010) apresentou uma discrepância de 1,21% e o método de Van der Veen (1956) uma variação de 1,81%, que foram as menores diferenças. Já os Métodos de Chin (1970) e Davisson (1972) apresentaram as maiores discrepâncias, com valores de 30,39% e 10,49%. Dessa forma, pode-se afirmar que o método da NBR 6122 (2010) foi o que mostrou o valor com maior proximidade do valor de referência fornecido pelo ensaio de prova de carga.



**Figura 7:** Comparação dos métodos

## Conclusão

A interpretação de um ensaio de prova de carga estática nem sempre ocorre de forma direta, ao se constatar que o ensaio não apresenta uma carga de ruptura evidente, torna-se necessário a extrapolação da curva carga x recalque para que se obtenha um valor para a carga de ruptura. Ao estudar o ensaio realizado em uma estaca raiz de 12m de comprimento e 350mm de diâmetro executada na cidade de Fortaleza em um solo predominantemente arenoso. Verificou-se que os métodos da NBR 6122 (2010) e Van der Veen (1956) apontaram discrepâncias de 1,21% e 1,81% respectivamente, sendo as menores diferenças. Já os Métodos de Chin (1970) e Davisson (1972) apresentaram as maiores diferenças, com valores de 30,39% e 10,49%. Assim, percebe-se que o método da NBR 6122 (2010) foi o que apresentou um resultado com maior proximidade ao valor de referência fornecido pela prova de carga realizada no estudo.

## Referências

- AOKI, N. Considerações sobre projeto e execução de fundações profundas. Palestra proferida no Seminário de Fundações, Sociedade Mineira de Engenharia, Belo Horizonte, 1979.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12131/06 – Estacas - Prova de carga estática - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122. Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro, 2010;
- 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.
- CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson. Fundações por estacas: Projeto Geotécnico. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- DAVISSON, M.T. High Capacity Piles. Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction, ASCE, 1972, Illinois Section, Chicago.
- VAN DER VEEN, C. The Bearing Capacity of a Pile. Proc. Third International Conference Soil Mechanics Foundation Engineering, Zurich, 1953, vol. II.

## Agradecimentos

Agradecemos a CAPES pela bolsa de <sup>1</sup>