

# Análise de Métodos de Interpretação de Curva Carga x Recalque de Provas de Carga Estática em Fundações Profundas no Nordeste do Brasil

Ana Karine Santiago Bessa  
Unifor, Fortaleza, Brasil, karinesantiagobessa@gmail.com

Fernando Feitosa Monteiro  
UFC, Fortaleza, Brasil, fernandofm91@hotmail.com

Marcos Fábio Porto de Aguiar  
Unifor / IFCE, Fortaleza, Brasil, marcosfpa@hotmail.com

Tiago Melo Monteiro  
Unifor, Fortaleza, Brasil, tiagomelomont@gmail.com

Francisco Heber Lacerda de Oliveira  
Unifor, Fortaleza, Brasil, heberoliveiracivil@hotmail.com

**RESUMO:** Este trabalho apresenta uma análise dos métodos de extrapolação da curva carga x recalque de ensaios com caracterização de ruptura. Realizou-se um estudo de caso com cinco provas de cargas distintas realizadas pela empresa Tecnord (Tecnologia Nordeste de Solos e Fundações) nos estados do Ceará e do Rio Grande do Norte. As provas de carga foram analisadas com cinco diferentes métodos de extrapolação (Chin-Kondner-1963; 1970; 1971, Davisson 1972, ABNT 2010, Décourt 1996 e Van Der Veen 1953). As 5 provas de carga foram estudadas separadamente dividindo o trecho da curva de carregamento da estaca em três fases: fase 1-F1 (fase elástica da curva composta de 4 estágios de carregamento), fase 2-F2 (composta do 1º ao 7º estágio de carregamento) e fase 3-F3 (considerando todos os pontos da curva de carregamento). Dos resultados obtidos foi possível verificar que o método de Davisson (1972) é o mais conservador de todos, enquanto que o método de Chin (1970; 1971) mostrou-se ser o menos conservador. O método ABNT (2010) mostrou-se bom, mas necessita de uma curva bem caracterizada de ruptura para que possa ser utilizado. O método de Van Der Veen (1953) mostrou-se ser o mais eficiente, porém para uso do método faz-se necessário uma curva bem caracterizada de ruptura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fundações, Prova de Carga, Métodos de Extrapolação.

## 1 INTRODUÇÃO

Hoje, no Brasil, vive-se um período em que se faz necessário realizar alguns ensaios específicos na área de geotecnia a fim de se conhecer melhor o material com que se está trabalhando e também aprimorar o projeto com relação a custos e tempo de execução da obra.

A falta destes ensaios faz com que os projetistas recorram a bibliografias, às vezes, com pouco embasamento teórico, no objetivo de dimensionar a fundação da obra. Contudo, a pouca informação técnica ou a falta dela pode ocasionalmente levar a estruturas superdimensionadas ou mesmo a erros de projeto.

ABNT (2010) orienta aos construtores a realização do ensaio de prova de carga em 1% da quantidade de estacas da fundação da obra. O principal objetivo do ensaio é verificar se a capacidade de carga prevista em projeto é realmente a capacidade de carga efetiva de trabalho da estaca. Dependendo da quantidade de diâmetros diferentes das estacas, há engenheiros civis que indicam a execução de uma prova de carga para cada diâmetro diferente, mesmo que ultrapasse o percentual de 1%, pois quanto maior a quantidade de dados relativos a mesma obra maior a segurança no que diz respeito ao coeficiente de segurança da carga de trabalho da estaca.

As execuções das provas de carga são justificadas, pois estas servem de base para uma melhor compreensão do comportamento da estaca e seu respectivo recalque quando carregada, além de possibilitar a previsão de carga de ruptura da mesma através dos métodos que serão estudados e comparados neste trabalho.

É de grande importância a realização destes ensaios assim como o ensaio SPT, dentre outros, para que se possa ter mais parâmetros para conhecer o solo, onde será feita a fundação, visto que o comportamento do conjunto estaca-solo é muito complexo.

## 2 MÉTODOS DE EXTRAPOLAÇÃO DA CURVA CARGA X RECALQUE

Os métodos de extrapolação são todos baseados nos mesmos princípios, diferindo entre si apenas no tratamento matemático utilizado na extrapolação da curva experimental (Bazant, 1979). A escolha do método depende do próprio comportamento experimental, isto é, do formato da curva carga-recalque medida in situ. A seguir são apresentados os cinco métodos de extrapolação da curva carga x recalque, são eles: Chin-Kondner (1970; 1971), Davisson (1972), ABNT 2010, Décourt (1996), Van Der Veen (1953).

### 2.1 Método de Chin-Kondner (1970; 1971)

O método proposto por Chin-Kondner (1970; 1971), possibilita a extrapolação da carga de ruptura em ambos os ensaios estáticos de prova de carga, ou seja, ensaios do tipo lento e rápido. O método consiste em dividir cada recalque pela respectiva carga aplicada e colocá-lo no eixo das ordenadas. Por sua vez, no eixo das abscissas, colocam-se os recalques obtidos durante a prova de carga estática. A carga limite última é dada como o inverso da inclinação da linha formada pelos pontos plotados no gráfico, de acordo com a equação (FRANÇA, 2011).

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

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

Onde:

Q: carga aplicada;

Qu: carga limite última;

C1: inclinação da linha reta;

C2: intersecção com o eixo Y;

δ: recalque correspondente à carga aplicada.

### 2.2 Método de Davisson (1972)

O método proposto por Davisson (1972), conhecido como Offset Limit, pressupõe que a carga limite é dada por uma equação dependente do diâmetro da estaca e que exceda a compressão elástica da estaca em 4mm. A formulação do método está indicada a seguir (FRANÇA, 2011).

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

Onde:

ρ: recalque para uma dada carga aplicada;

D: diâmetro da estaca;

L: comprimento da estaca;

Q: carga aplicada;

E: módulo de Young da estaca;

A: área da seção transversal da estaca.

A Figura 1 mostra um exemplo de extrapolação pelo método de Davisson (1972).

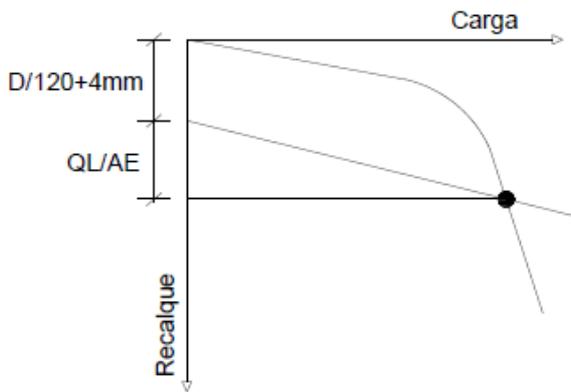


Figura 1: Método de extrapolação proposto por Davisson

### 2.3 Método ABNT (2010)

A ABNT (2010) estabelece um critério de ruptura convencional para qualquer prova de carga em que não ocorrer ruptura nítida (CINTRA E AOKI, 2009). Conforme a Figura 2, a carga de ruptura pode ser convencionalizada como aquela correspondente à interseção da curva x recalque (extrapolada, se necessário) com a reta de equação:

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

Onde:

- $\rho$ : recalque para uma dada carga aplicada;
- D: diâmetro da estaca;
- L: comprimento da estaca;
- Q: carga aplicada;
- E: módulo de Young da estaca;
- A: área da seção transversal da estaca.

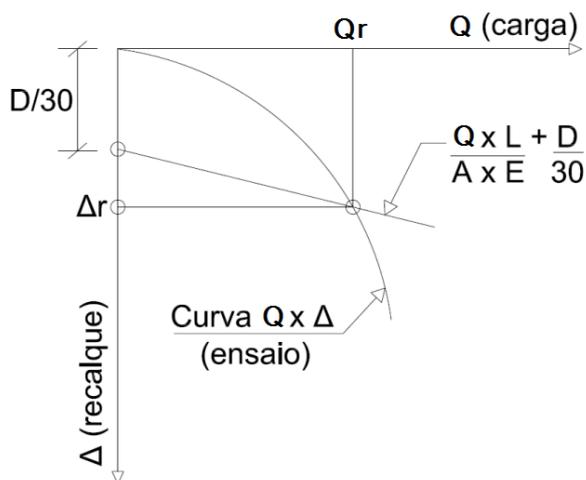


Figura 2: Critério de Ruptura convencional

### 2.4 Método da Rigidez (Décourt, 1996)

O método proposto por Décourt (1996), denominado como Método da Rigidez, utiliza-se do conceito de rigidez, que é a relação entre a carga aplicada no topo da estaca e o respectivo recalque. Com isso, pode-se elaborar um gráfico, no qual a abscissa representa a carga aplicada e a ordenada, a rigidez (FRANÇA, 2011).

Do gráfico construído é possível obter dois tipos de ruptura:

- a) Ruptura Física. É a ruptura caracterizada quando a estaca apresentar rigidez nula, que seria uma deformação infinita para uma dada carga aplicada, o que, na prática da engenharia, é impossível;
- b) Ruptura Convencional. É a ruptura definida para um recalque do topo da estaca de 10% do diâmetro da mesma.

Segundo Décourt (1996) “o gráfico de rigidez permite visualizar claramente a que distância se está da ruptura física, que por sua vez é definida de forma clara e precisa, por extrapolação linear ou logarítmica, como sendo o ponto de carga da curva P x  $\rho$  correspondente à rigidez nula”.

A rigidez, tipicamente, diminui com o aumento da carga e sendo o ensaio levado até valores pequenos de rigidez, irá permitir que através de extrapolações criteriosas, seja obtido o ponto de rigidez nula, que por definição está associada à carga de ruptura física (NIENOV, 2006). A Figura 3 mostra um exemplo de extrapolação pelo método de Décourt (1996).

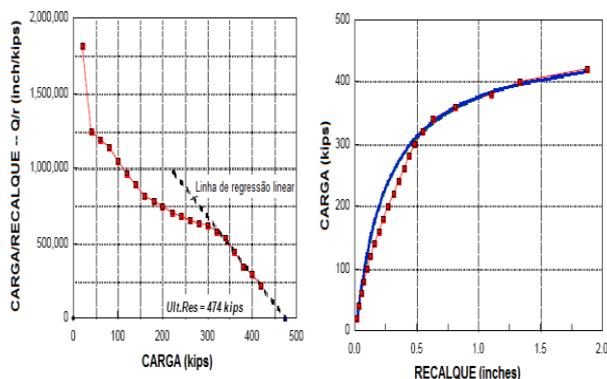


Figura 3: Método de Extrapolação proposto por Décourt.

## 2.5 Método de Van der Veen (1953)

O método propõe que a relação entre a carga e o deslocamento no topo apresente um aspecto exponencial, dado pela equação abaixo (FRANÇA, 2011).

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

Onde:

Q: carga aplicada no topo da estaca;

Q<sub>ul</sub>: carga de ruptura;

α: coeficiente que define a forma da curva;

ρ: recalque correspondente à carga aplicada;

Reescrevendo esta expressão obtemos a equação de uma reta:

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

Em que α e Q<sub>ul</sub> são duas constantes determinadas em um processo por tentativas, adotando-se valores para Q<sub>ul</sub> e desenhando-se os respectivos gráficos de  $-\ln(1 - Q / Q_{ul})$  contra ρ. O gráfico que mais se aproximar de uma reta indicará o valor procurado de Q<sub>ul</sub>, bem como o valor de α, dado pelo coeficiente angular da reta (CINTRA E AOKI, 2009).

Foi proposta uma alteração ao método de Van Der Veen (1953) deixando de impor que a curva ajustada passe pela origem do sistema de coordenadas (Aoki em 1976, apud Cintra e Aoki, 2009). Ficando a equação para:

$$Q = Q_{ul} \cdot (1 - e^{-(\alpha \cdot \rho + b)}) \quad (7)$$

O valor de b é o intercepto, no eixo dos recalques, da reta obtida na escala logarítmica. Sendo assim, proporcionará a carga de ruptura do ensaio a curva que apresentar o melhor coeficiente de correlação, R<sup>2</sup>. A Figura 4 mostra um exemplo de extrapolação pelo método de Van der Veen (1953).

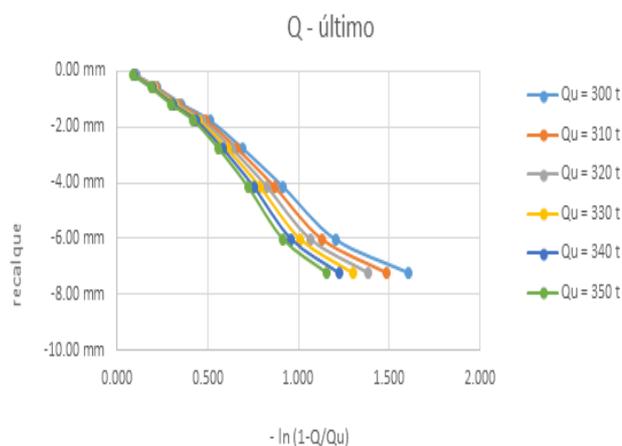


Figura 4: Método de Extrapolação proposto por Van der Veen

## 3 ESTUDO DE CASO

Para este trabalho fez-se necessário a coletas de dados de provas de carga estática em estacas que apresentassem uma curva característica de ruptura do conjunto solo-estaca. Todas as provas de carga foram realizadas pela empresa Tecnod-Tecnologia de Solos e Fundações. Foram coletados dados de 5 provas de cargas distintas, em três obras diferentes, no estado do Ceará e do Rio Grande do Norte, obtidas entre os anos de 2013 e 2014. As 5 provas de carga apresentaram curva com ruptura caracterizada (de possível determinação da carga de ruptura pelo próprio gráfico de prova de carga), são elas: PC 03, PC 05, PC 06, PC 07 e PC 08

### 3.1 Ensaios de Prova de carga

As Figuras de 5 a 9 mostram os resultados das provas de cargas (PC 03, PC 05, PC 06, PC 07 e PC 08) realizadas nas estacas das obras estudadas, com cargas de rupturas iguais a 3200 kN, 190 kN, 190 kN, 140 kN e 155 kN, e recalques de 34,12mm, 41,87mm, 27,64mm, 27,03mm, 27,4mm respectivamente.

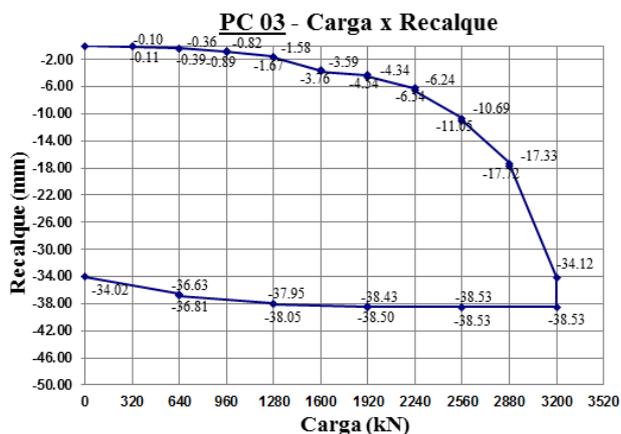


Figura 5: Prova de carga: Curva carga x recalque (PC 03).

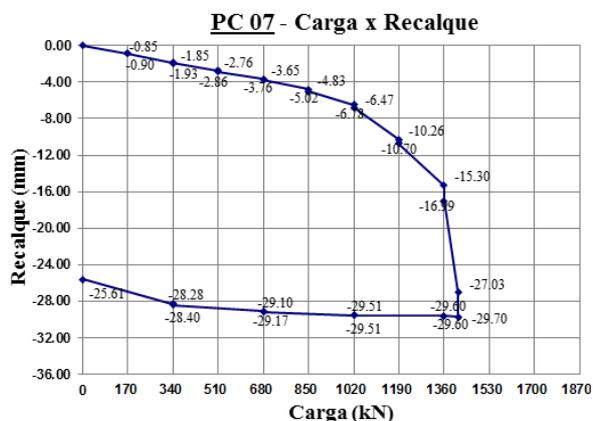


Figura 8: Prova de carga: Curva carga x recalque (PC 07).

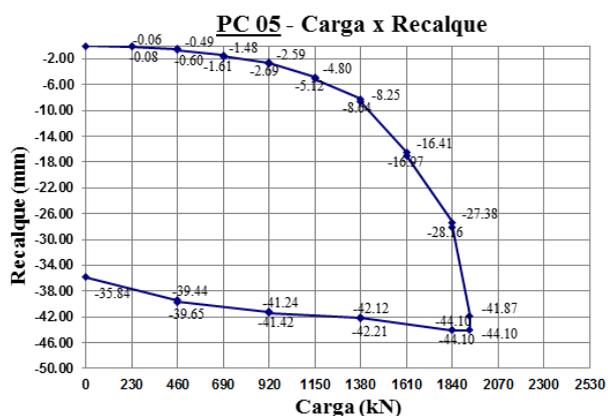


Figura 6: Prova de carga: Curva carga x recalque (PC 05).

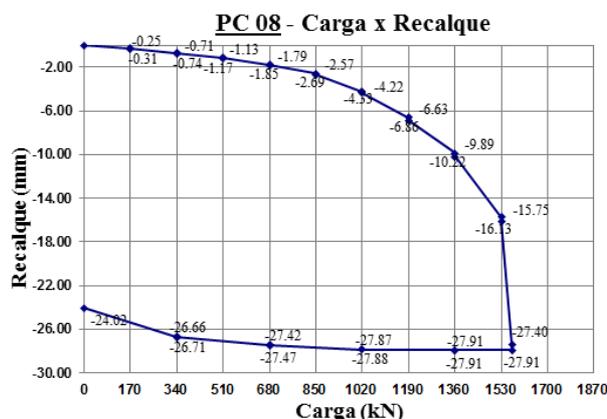


Figura 9: Prova de carga: Curva carga x recalque (PC 08).

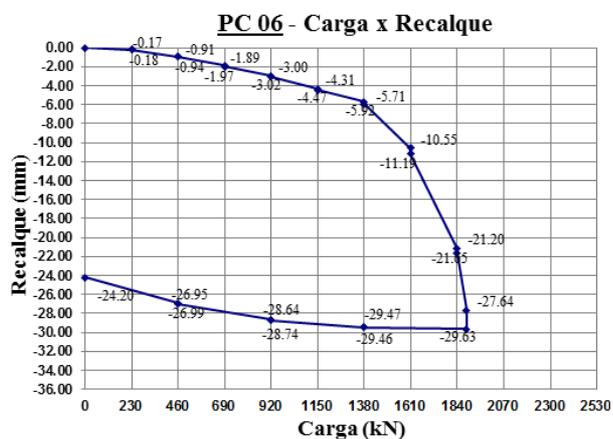


Figura 7: Prova de carga: Curva carga x recalque (PC 06)

### 3.2 Verificação dos Métodos de Extrapolação em Curvas com Ruptura Caracterizada

As 5 provas de carga foram estudadas separadamente dividindo o trecho da curva de carregamento da estaca em três fases: fase 1-F1 (fase elástica da curva composta de 4 estágios de carregamento), fase 2-F2 (composta do 1º ao 7º estágio de carregamento) e fase 3-F3 (considerando todos os pontos da curva de carregamento). Nas PC 05, 06 e 07 a fase 3 foi composta somente até o 9º estágio devido a grandes deformações.

As Tabelas 1 a 5 mostram os valores de carga de ruptura do conjunto solo estaca em cada fase estudada para os métodos de Chin (1970; 1971), Davisson (1972), ABNT (2010), Décourt (1996) e Van Der Veen (1953).

Tabela 1. Carga de Ruptura pelo Método de Chin-Kondner

Fase	Carga pelo Método de Chin-Kondner (kN)				
	PC 03	PC 05	PC 06	PC 07	PC 08
1	1670	1030	1180	-	1590
2	2500	1720	1960	2780	1640
3	3330	2040	2080	1790	1750

Tabela 2. Carga de Ruptura pelo Método de Davisson

Fase	Carga pelo Método de Davisson (kN)				
	PC 03	PC 05	PC 06	PC 07	PC 08
1	-	-	-	-	-
2	1350	1300	1380	1020	1190
3	2400	1380	1380	980	1190

Tabela 3. Carga de Ruptura pelo Método da ABNT 2010

Fase	Carga pelo Método ABNT 2010 (kN)				
	PC 03	PC 05	PC 06	PC 07	PC 08
1	-	-	-	-	-
2	-	1460	1600	-	-
3	2800	1550	1600	1200	1400

Tabela 4. Carga de Ruptura pelo Método de Décourt

Fase	Carga pelo Método de Décourt (kN)				
	PC 03	PC 05	PC 06	PC 07	PC 08
1	1520	880	1020	-	1530
2	2170	1370	1620	3320	1640
3	2790	1700	1870	2100	1720

Tabela 5. Carga de Ruptura pelo Método de Van der Veen

Fase	Carga pelo Método de Van der Veen (kN)				
	PC 03	PC 05	PC 06	PC 07	PC 08
1	3300	2000	1900	2000	1600
2	3300	2000	1900	1500	1600
3	3300	2000	1900	1500	1600

É possível verificar que na fase elástica e em algumas provas de cargas na fase 2 que os métodos de Davisson (1972) e da ABNT (2010) não se aplicam, pois, as deformações são pequenas, não caracterizando ruptura.

O método de Chin-Kondner (1970;1971) mostrou-se pouco eficiente quando analisado por fases, pois apresentou muitas variações em suas cargas de ruptura não indicando uma tendência, como por exemplo na PC 05 indicou uma carga de ruptura de 1030 kN na F1, 1720 na F2 e 2040 na F3, enquanto a PC 06 indicou uma carga de ruptura de 1180 kN na F1, 1960

na F2 e 2080 na F3. A F1 da PC 07 indicou uma carga de ruptura fora do normal, com valor acima de 10000 kN, assim como na F1 da PC 07 pelo método de Décourt (1996).

O método de Décourt (1996) mostrou-se conservador, excluindo-se a PC 07 que indicou uma alta carga de ruptura devido a F1 ser quase uma reta, pois nas crescentes fases apontou crescentes cargas ou quase estabilização das mesmas, como mostra a PC 08.

O método de Van Der Veen (1953), mesmo apresentando cargas de ruptura maiores que o método de Décourt (1996), em algumas provas de carga, mostrou-se ser o mais eficiente quando examinado em fases diferentes, pois não indicou grandes divergências entre as fases F1, F2 e F3.

Considerando apenas a F3, os métodos da ABNT (2010) e de Davisson (1972) mostraram valores abaixo da carga de ruptura caracterizada em todas as provas de carga e os métodos de Chin-Kondner (1970; 1971) e Van Der Veen (1953) indicaram valores acima da carga de ruptura caracterizada em todas as provas de carga.

O método de Décourt (1996) mostrou-se mais conservador que o método de Van Der Veen (1953), excetuando-se a PC 07 onde o valor de carga de ruptura foi maior pelo método de Décourt (1996).

#### 4 CONCLUSÃO

O método de Van Der Veen (1953) foi o mais eficiente no aspecto de haver a possibilidade de indicação de carga de ruptura, pois somente neste método foi possível analisar todas as provas de carga em todas as fases e determinar tal valor.

O estudo do método de Chin-Kondner (1970; 1971) também teve grande significado, pois foi possível verificar para todas as provas de carga os valores de carga de ruptura e estes são valores aceitáveis, com exceção da F1 da PC07, sendo maiores que os métodos da ABNT (2010) e de Davisson (1972) e em alguns casos maiores que o método de Van Der Veen (1953).

Verificou-se que na fase elástica e em algumas provas de carga na fase 2 que os

métodos de Davisson (1972) e da ABNT (2010) não se aplicam, pois, as deformações são pequenas, não caracterizando ruptura.

O método de Chin-Kondner (1970; 1971) mostrou-se pouco eficiente quando analisado por fases, pois apresentou muitas variações em suas cargas de ruptura não indicando uma tendência.

O método de Décourt (1996) mostrou-se conservador, excluindo-se a PC 07 que indicou uma alta carga de ruptura devido a fase elástica ser quase uma reta, pois nas crescentes fases apontou crescentes cargas ou quase estabilização das mesmas.

O método de Van Der Veen (1953), mesmo apresentando cargas de ruptura maiores que o método de Décourt (1996), em algumas provas de carga, mostrou-se ser o mais eficiente quando examinado em fases diferentes, pois não indicou grandes divergências entre as fases 1, 2 e 3.

Avaliando o percentual de variação do valor da carga de ruptura encontrada na F3 pelos cinco métodos estudados e a carga de ruptura verificada pelo gráfico nas provas de carga PC 03, PC 05, PC 06, PC 07 e PC 08 temos: no método de Chin-Kondner (1970; 1971) todos os valores variaram de 4% a 28% a mais que a carga de ruptura verificada pelo gráfico; no método de Davisson (1972) os resultados mantiveram uma margem de diferença entre 23% e 30% para menos da carga de ruptura verificada pelo gráfico. Pelo método da ABNT (2010) os percentuais variaram também para menos entre 10% a 18%. No método de Décourt (1996) 3 provas de cargas variaram para menos com 2% a 13% de diferença e 2 provas de carga variaram para mais com percentuais de 11% e 50%. No método de Van Der Veen (1953) os resultados mostraram-se melhores, pois 4 provas de carga variaram sua carga de ruptura para mais em um percentual de 3% a 7% e uma das provas de carga obteve uma variação de 0%.

Os métodos da ABNT (2010) e de Davisson (1972) apresentam características muito conservadoras e necessitam de curva bem caracterizada de recalque.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CAPES pela bolsa de Fernando Monteiro, a FUNCAP pela bolsa de Tiago Melo e a TECNORD (Tecnologia Nordeste de Solos e Fundações) por fornecer os dados para a realização do trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). NBR 6122, *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro.
- Bazant, Z. (1979). *Methods of foundation engineering*, Elsevier Scientific Publishing Company, p. 382-382.
- Chin, F., K (1970). Estimation of the Ultimate Load of Piles not carried to Failure, *Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering*.
- Chin, F., K. (1971). Discussion of Pile Test. Arkansas River Project. *Journal for Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, vol. 97.
- Cintra, J., C., A.; Aoki, N.; Tsuha, C., H.; Giacheti, H., L. (2009). *Fundações: Ensaio estáticos e dinâmicos*. 1. ed. São Paulo, SP.
- Davisson, M.T. (1972). High Capacity Piles. *Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction*, ASCE, Illinois Section, Chicago.
- Décourt, L. (1996). A Ruptura de Fundações Avaliada com Base no Conceito de Rigidez. *SEFE III*, São Paulo, vol. 1.
- França, D. C. (2011). *Provas de Carga Estáticas Instrumentadas em Profundidade em Estacas de Grande Diâmetro (Estacões)*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 162 p.
- Nienov, F. A. (2006). *Comportamento a compressão de estacas escavas de pequeno diâmetro em solo sedimentar na região de Santa Maria*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 133 p.
- Van Der Veen, C. (1953). The Bearing Capacity of a Pile, *Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, vol. II.