

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
técnica

IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas

IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens

VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens

XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia

23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Avaliação da Previsão de Recalques de Estacas Pré-Moldadas em Perfis de Solos Típicos da Região Metropolitana de Fortaleza

Yan Carlos Chiu Rodriguez

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, yancarloschiu@gmail.com

Alfran Sampaio Moura

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, alfransampaio@ufc.br

Danton França da Silva

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, dantonfranca@alu.ufc.br

Iury Lima Rocha

RochaBrasil Engenharia, Fortaleza, Brasil, rochabrasil@rochabrasil.net

RESUMO: Na engenharia geotécnica, as fundações devem atender a condições satisfatórias de capacidade de carga e recalques. Há diversas maneiras de estimar os recalques, sendo uma destas formas a partir de sondagens a percussão (SPT) por meio de métodos semiempíricos. O presente trabalho propõe uma avaliação das previsões de recalque pelos métodos de Poulos e Davis (1980), Aoki (1984) e Bowles (1997) de 7 estacas cravadas em perfis de solos típicos da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e fabricadas em concreto armado. Para tanto foram analisadas as provas de carga, obtendo os valores de recalques para a carga de trabalho comparando os mesmos com previsões realizadas a partir de 6 furos de sondagem a percussão. Além disso, compararam-se as estimativas entre os métodos de previsão de recalques a fim de avaliar a proximidade dos resultados entre si. Em geral, os recalques apresentaram ordem de grandeza compatível com o esperado. O método de Poulos e Davis (1980) apresentou resultados mais concordantes para a maioria das estacas e o método de Bowles (1997) os resultados mais destoantes, superestimando os recalques. O método de Aoki (1984) apresentou estimativas intermediárias, sendo mais próximas ao método de Bowles (1997) para a maioria das estacas.

PALAVRAS-CHAVE: Recalques, Métodos Semiempíricos, Provas de Carga, Estacas Cravadas de Concreto.

ABSTRACT: In geotechnical engineering, foundations must meet satisfactory conditions of bearing capacity and settlements. There are several ways to estimate settlements, one of which is based on percussion drilling (SPT) using semi-empirical methods. The present work proposes an evaluation of settlement predictions by the methods of Poulos and Davis (1980), Aoki (1984) and Bowles (1997) of 7 piles driven in typical soil profiles of the Metropolitan Region of Fortaleza (RMF) and manufactured in reinforced concrete. For that, the load tests were analyzed, obtaining the settlement values for the workload comparing them with predictions made from 6 percussion drilling holes. In addition, estimates were compared between settlement forecasting methods in order to assess the proximity of the results to each other. In general, the settlements presented an order of magnitude compatible with what was expected. The method by Poulos and Davis (1980) presented the most consistent results for most piles and the method by Bowles (1997) presented the most discordant results, overestimating the settlements. Aoki's (1984) method presented intermediate estimates, being closer to Bowles's (1997) method for most piles.

KEYWORDS: Settlement, Semi-empirical Methods, Load Tests, Concrete Driven Piles.

1 Introdução



Para o correto dimensionamento de um projeto de fundações, as fundações devem satisfazer condições quanto ao estado limite último (ELU) do sistema solo-fundação e estado limite de serviço (ELS), sendo necessária a obtenção de dados quanto a capacidade de carga e recalques admissíveis das estacas.

Dentre os diversos tipos de estacas, as estacas pré-moldadas de concreto são alternativas de fundações indicadas em casos onde a vizinhança permite ocorrência de vibrações decorrente da cravação das mesmas, e quando requer-se que transponha espessas camadas de solo de baixa capacidade de suporte. Esse tipo de estaca geralmente é cravado a percussão por martelo de queda livre ou automático, não apresentando restrições quanto a nível freático, mas quando há a presença de pedregulhos e matacões haverá dificuldades executivas para a utilização desse tipo de estaca.

Os recalques podem ser obtidos diretamente em campo por meio de provas de carga ou calculados. Velloso e Lopes (2010) separam os métodos de previsão de recalques em métodos baseados na teoria da elasticidade, numéricos e semiempíricos. Vale mencionar que em métodos semiempíricos, os recalques são estimados a partir de resultados de ensaios de campo como, por exemplo, sondagens à percussão (SPT) e ensaios de penetração do cone (CPT). Deve-se mencionar que, no presente trabalho, serão utilizados o método de Poulos e Davis (1980) baseado na teoria da elasticidade e os métodos semiempíricos de Aoki (1984) e Bowles (1997).

2 Métodos de Previsão de Recalques

2.1 Método de Poulos e Davis (1980)

A Formulação geral parte do caso particular de estaca incompressível em um meio homogêneo, elástico linear e semi-infinito com coeficiente de Poisson 0,5, sendo definida conforme Equações 1 e 2, com os fatores de correção obtidos por meio de ábacos que por sua vez são funções basicamente de sua geometria e módulo de elasticidade.

$$w = \frac{QI}{E_s B} \quad (1)$$

$$I = I_0 R_k R_h R_v R_b \quad (2)$$

Onde: w – recalque da estaca; Q – carga aplicada; E_s – módulo de elasticidade do solo; B – diâmetro da estaca; I – fator de influência corrigido; I_0 – fator de influência para estaca incompressível no espaço semi-infinito; R_k, R_h, R_v, R_b – fatores de correção quanto à compressibilidade da estaca, espessura da camada compressível, coeficiente de Poisson e base mais rígida.

2.2 Método de Aoki (1984)

O recalque total no topo da estaca pode ser obtido como a soma do encurtamento elástico no nível do fuste da estaca e a compressão do solo no nível da base da estaca. As Equações 3 a 7 expressam os cálculos do recalque total, encurtamento elástico, recalque devido a compressão do solo no nível da base, módulo de elasticidade do solo, módulo de deformabilidade do solo inicial, respectivamente.

$$w = w_e + w_s \quad (3)$$

$$w_e = \frac{\sum_i P_i L_i}{AE_p} \quad (4)$$

$$w_s = \frac{\sum_i \Delta \sigma_i L_i}{E_s} \quad (5)$$



$$E_s = E_0 \left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (6)$$

$$E_0 = \alpha K N_{spt} \quad (7)$$

Onde: w_e – encurtamento elástico da estaca; w_s – recalque devido a compressão do solo no nível da base da estaca; P_i – carga axial média da camada; L_i – comprimento da camada; A – área da seção transversal; E_p – módulo de elasticidade da estaca; $\Delta\sigma$ – acréscimo de tensão total; E_0 – módulo de deformabilidade do solo antes da execução da estaca; σ_0 – tensão geostática no centro da camada; n – coeficiente dependente da natureza do solo (0,5 para solos granulares e 0 para argilas duras e rijas); α – coeficiente relacionado ao método executivo da estaca; K – coeficiente empírico relacionado ao tipo de solo do método de Aoki e Velloso (1975).

2.3 Método de Bowles (1997)

Semelhantemente ao método de Aoki (1984), o recalque da estaca é tomado como a soma das parcelas devido o encurtamento elástico da estaca e a compressão do solo no nível da base, sendo esse primeiro definido conforme Equação 4. O recalque devido a compressão do solo na base da estaca e o módulo de elasticidade do solo são estimados conforme Equações 8 e 9.

$$w_s = \Delta q B \frac{1 - \nu}{E_s} m I_s I_F F_1 \quad (8)$$

$$E_s = 500 (N_{spt} + 15) \quad (9)$$

Onde: Δq – carga aplicada por unidade de área; ν – coeficiente de Poisson (o método sugere um valor de 0,35); $m I_s$ – equivalente a 1; I_F – fator que depende da relação comprimento e diâmetro da estaca; F_1 – fator de redução devido o mecanismo de transferência de carga (0,5 se houver carga de ponta e 0,25 se não houver).

3 Local de Estudo

Para a realização deste trabalho foram coletados resultados de sete provas de carga estáticas a compressão de estacas de concreto armado cravadas a percussão com martelo de queda livre e seis sondagens a percussão (SPT) de duas empresas em locais distintos, sendo um na cidade de Fortaleza e outro no município de Eusébio, pertencente a região metropolitana de Fortaleza (RMF). A Tabela 1 consta resumidamente as características geométricas das estacas, numeração dos ensaios de campo e localização.

Tabela 1. Geometria das estacas, numeração dos ensaios e localização.

Estaca	Seção transv. (cm)	Comprimento de cravação (m)	Nº da prova de carga considerada	Nº da sondagem (SPT) considerada	Localização
01	30x30	7,00	01	01	Aldeota e Meireles, Fortaleza – CE (Grupo I)
02	30x30	7,50	02	02	
03	30x30	3,90	03	03	
04	25x25	10,10	04	04	Região Metropolitana de Fortaleza. Eusébio – CE (Grupo II)
05	25x25	7,50	05	05	
06	25x25	7,60	06	06	
07	20x20	7,80	07	06	

A locação das sondagens e provas de carga pertencentes ao grupo I se limitaram a uma área de



aproximadamente 6 km² abrangendo parcialmente os bairros Aldeota e Meireles. Os ensaios de campo do Grupo II foram realizados no canteiro de obras de uma fundação de pesquisa na área da saúde, localizada no Polo Industrial e Tecnológico da Saúde, localizado no Eusébio, na Região Metropolitana de Fortaleza. As Figuras 1e 2 mostram a localização das sondagens dos grupos I e II, respectivamente.



Figura 1. Planta de localização das sondagens SP 01, SP 02 e SP 03.



Figura 2. Planta de localização das sondagens SP 04, SP 05 e SP 06.

3.1 Sondagens a Percussão (SPT)

A Figura 3 apresenta os resultados das sondagens do grupo I. A estratigrafia do solo na sondagem SP 01 esta conformada por uma espessa camada de areia fina e média até os 10,35 m de profundidade. Abaixo dessa, há uma areia siltosa até aproximadamente 16 m de profundidade. O nível da água se encontra a 15 m de profundidade. No caso da sondagem SP 02, o solo começa com uma camada de areia fina e média, com variação da compactidade, até 5,60 m de profundidade, seguido de uma camada de areia argilosa, com variação na cor e compactidade. O nível da água encontra-se a 6,9 m de profundidade. Por fim, a sondagem SP 03 apresenta uma pequena camada de aterro de 65 cm conformada por areia fina e fofa, após observa-se uma espessa camada de areia fina a média até 6 m. As camadas de solo entre 6 e 15 m são constituídas por uma areia fina e média, que varia na cor, seguida de argila arenosa, rija a dura, não apresentando nível da água nessa sondagem.

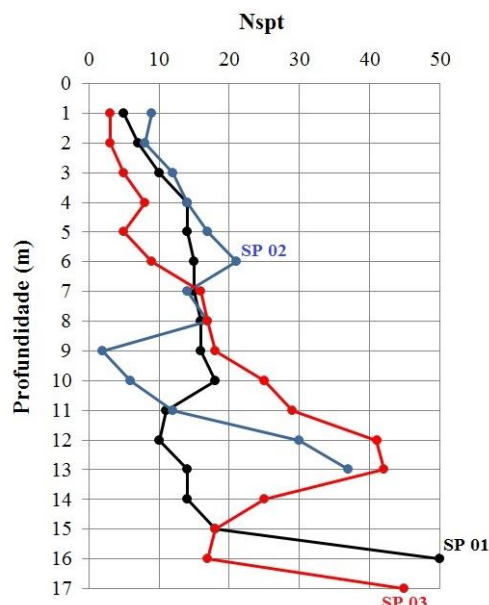


Figura 3. Resultados das sondagens à percussão SP 01, SP 02 e SP 03.

A Figura 4 apresenta os resultados das sondagens do grupo II. A estratigrafia do solo na sondagem SP 04 de modo geral, após o primeiro metro de profundidade, as camadas de solo estão formadas por um silte pouco argiloso, até 8,75 m, aumentando a compactidade em função da profundidade, de mole a médio, e com variação de cor. A partir daí as camadas subjacentes são siltes argilosos. O nível da água encontra-se a 7,52 m de profundidade. No caso da sondagem SP 05, a primeira camada é de 20 cm de espessura composta por areia fina siltosa, de cor amarela utilizada como aterro. A continuação existe uma espessa camada de silte pouco argiloso até os 5,85 m, com consistência variando de mole a médio, seguido de camadas compostas por siltes argilosos, rijo e duro, com variação na cor. O nível da água encontra-se a 7,78 m de profundidade. O subsolo na sondagem SP 06 começa com uma camada de 87 cm composta de areia fina siltosa, pouco compacta, em seguida, uma espessa camada de silte pouco argiloso, cuja compactidade varia em função da profundidade, desde mole a duro, chegando até a profundidade de 8,85 m. A partir daí as camadas seguintes estão compostas por silte argiloso, rijo e duro, com variação na cor. O nível da água encontra-se a 7,7 m de profundidade.

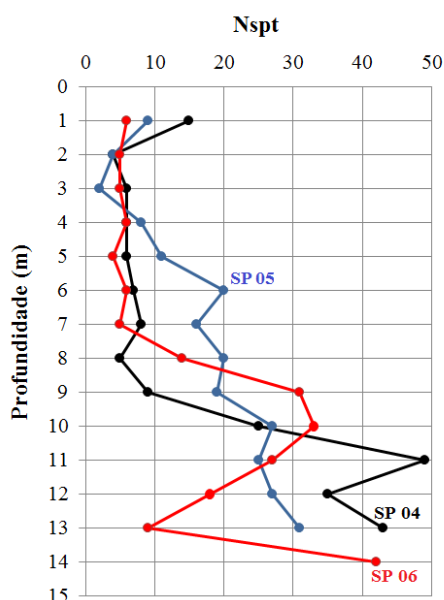


Figura 4. Resultados das sondagens à percussão SP 04, SP 05 e SP 06.



3.2 Provas de Carga Estáticas (PCE)

As curvas carga-recalque obtidas dos ensaios de prova de carga para os grupos I e II estão apresentadas nas Figuras 5 e 6. As provas de carga do grupo I foram realizadas com 7 ou 8 estágios de carregamento e 4 de descarregamento, realizando a leitura com 2 extensômetros apoiados no topo da estaca até observar a estabilização dos recalques. Vale mencionar que, pelos resultados das provas de carga realizadas, não foi observada ruptura nítida nas estacas do grupo I, exceto na estaca 03. Já as provas de carga do grupo II foram do tipo lentas e realizadas com 8 a 10 estágios de carregamento e 5 de descarregamento, não sendo observada ruptura nítida do sistema solo-fundação neste grupo de estacas. A Tabela 2 mostra os recalques medidos nas PCEs relacionados com as cargas de trabalho de cada estaca dos grupos I e II.

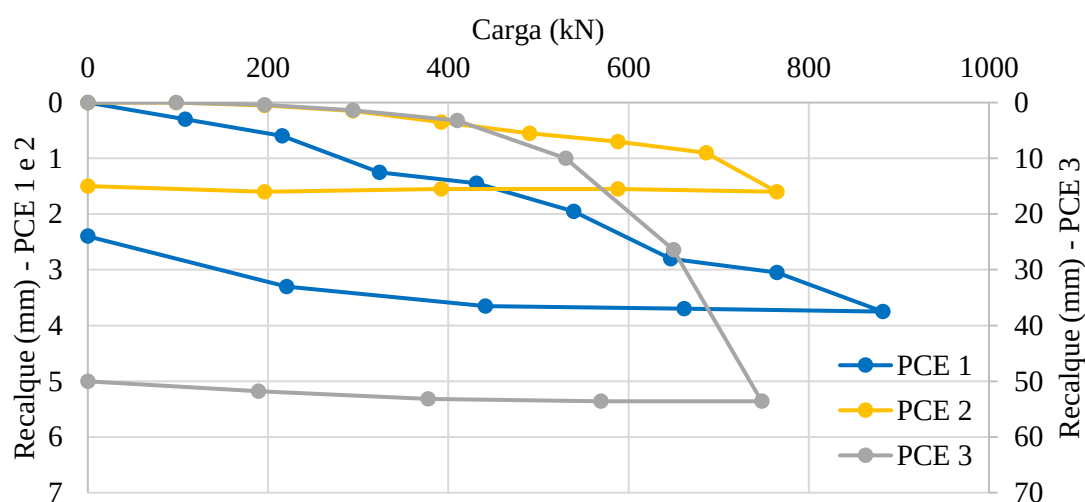


Figura 5. Provas de carga estáticas do grupo I

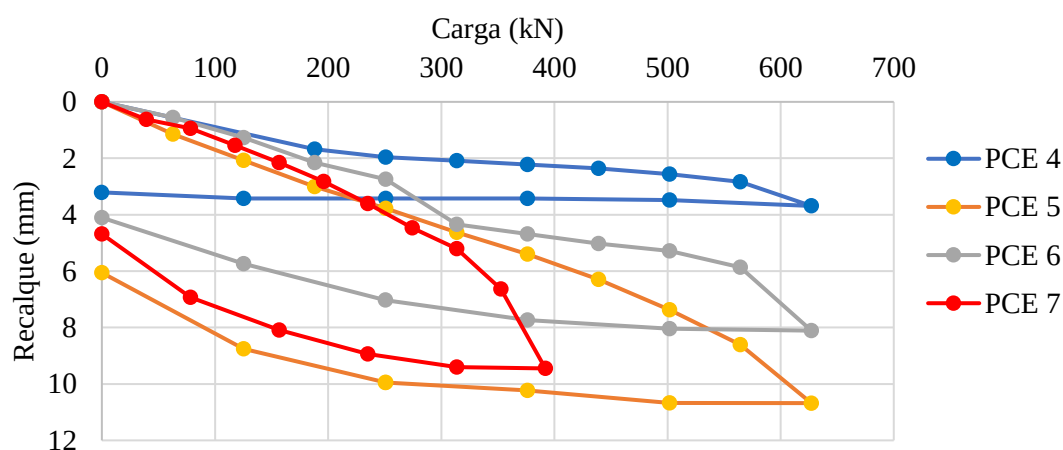


Figura 6. Provas de carga estáticas do grupo II

Tabela 2. Recalques medidos e cargas de trabalho

Estaca	01	02	03	04	05	06	07
Recalque medido (mm)	1,50	0,40	2,62	2,09	4,63	4,34	2,80
Carga de trabalho (kN)	448	388	378	319	319	319	200

Pela Tabela 2 observa-se que, para as cargas de projeto das estacas 01 a 07, os recalques medidos experimentalmente em suas respectivas PCEs variaram de 0,40 a 4,63 mm.



4 Resultados e Discussões

Na sequência, foram efetuadas previsões dos recalques para as cargas de trabalho mencionadas no item 3, obtidas pelos métodos de Poulos e Davis (1980), Aoki (1984) e Bowles (1997). Vale mencionar que, para a realização das previsões de recalques, os módulos de elasticidade do solo foram estimados a partir dos valores de N_{spt} constantes nas Figuras 3 e 4 e usando as correlações sugeridas em cada método. A carga adotada para o cálculo dos recalques corresponde à carga de trabalho de cada estaca.

Dessa forma a Figura 7 mostra um gráfico que compara os recalques calculados com os medidos para o grupo I. Nesta figura, observa-se para as estacas 01 e 03 que as previsões efetuadas apresentaram variação relativa acentuada pelos métodos de Poulos e Davis (1980) e Bowles (1997), sendo a estimativa obtida de Aoki (1984) mais concordante com o método de Poulos e Davis (1980) e as estimativas obtidas por Bowles (1997) as mais discordantes em relação as medidas experimentais obtidas das provas de carga. Para a estaca 02, observou-se diferença de 0,17 mm do recalque dado pela prova de carga em relação à estimativa obtida com a utilização da proposta de Bowles (1997), já comparando as medidas experimentais com as previsões efetuadas pelo método de Poulos e Davis (1980) obteve-se discordância mais elevada e atingindo o valor de 1,17 mm.

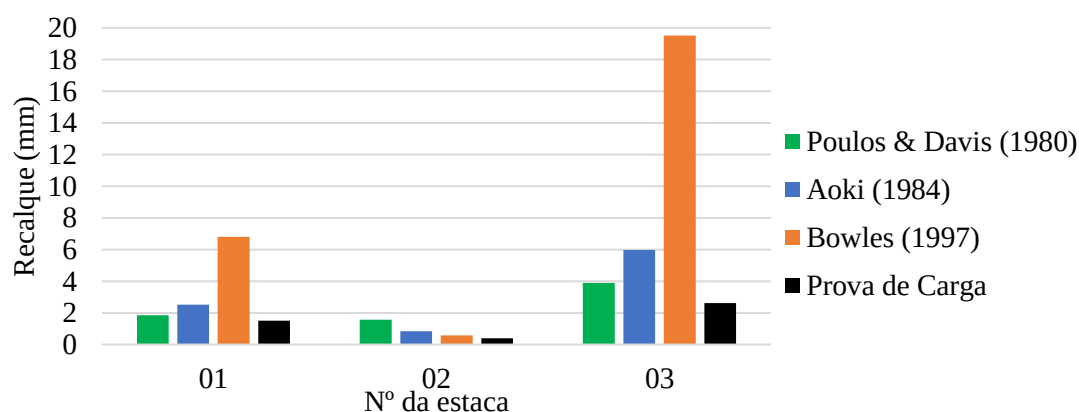


Figura 7. Recalques das estacas do grupo I

A Figura 8 mostra uma comparação entre os recalques estimados e medidos experimentalmente para o grupo II. Observa-se que as previsões obtidas por Aoki (1984) e Bowles (1997) para as estacas 04, 06 e 07 apresentaram valores bastante concordantes entre si, mas divergentes em relação aos valores experimentais. No entanto, os recalques obtidos por Poulos e Davis (1980) foram os mais concordantes em relação aos valores obtidos das provas de carga apresentando diferenças absolutas de 0,06 mm, 1,58 mm e 0,81 mm para as estacas 04, 06 e 07, respectivamente. Para a estaca 05, o método de Aoki (1984) forneceu a estimativa mais concordante com diferença de 1,25 mm em relação ao medido na prova de carga. Excetuando-se a estaca 04, a proposta de Bowles (1997) foi a mais discordante em relação aos valores experimentais obtidos das provas de carga do grupo II, como pode ser observado na Figura 8.

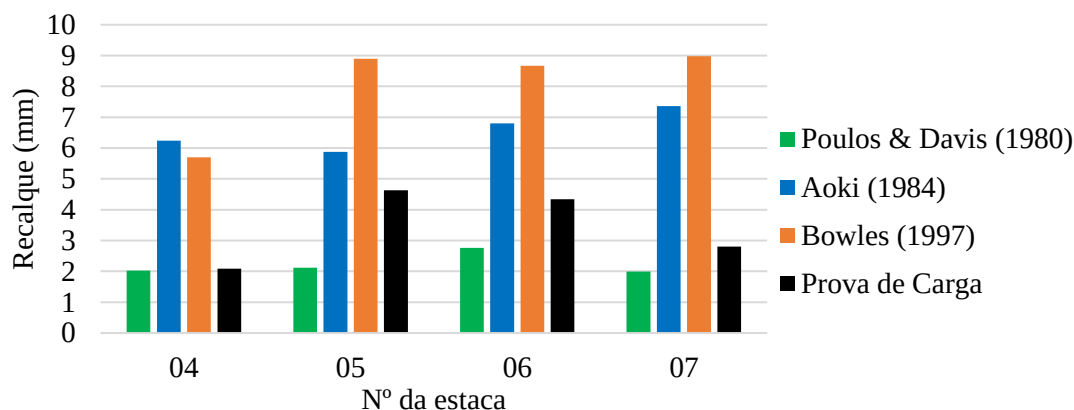


Figura 8. Recalques das estacas do grupo II

5 Conclusões

Analisando as estimativas realizadas em todas as estacas, observa-se que o método de Poulos e Davis (1980) proporcionou estimativas de recalques mais concordantes para a maioria das estacas. Por outro lado, o método de Bowles (1997) proporcionou estimativas de recalques mais discordantes para um maior número de estacas, superestimando os valores dos recalques.

O método de Aoki (1984) apresentou estimativas intermediárias quando comparadas com os métodos de Poulos e Davis (1980) e Bowles (1997) para todas as estacas, exceto estaca 04, sendo apenas para as estacas 01 e 03 as estimativas dadas por Aoki (1984) mais próximas dos valores obtidos por Poulos e Davis (1980). Ademais, a solução de Aoki (1984) proporcionou estimativa mais concordante apenas para a estaca 05.

De forma geral, tanto os recalques experimentais obtidos das provas de carga quanto as estimativas mais concordantes apresentaram concordância com relação as indicações de Décourt (1998) a qual afirma que recalques de estacas para uma carga de cerca da metade da carga de ruptura apresenta valores entre 2,0 e 6,0 mm.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as empresas Tecnord e Rochabrasil pelo fornecimento dos dados de investigação geotécnica, o POSDEHA pelo incentivo à pesquisa, a CAPES e o CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOKI, N. (1984) Previsão da curva carga-recalque. Palestra proferida na Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 1984.
- AOKI, N., VELLOSO, D.A. (1975) An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, 5., 1975, Buenos Aires. *Proceedings...* Buenos Aires, 1975. v. 1. p. 367-376.
- BOWLES, J. E. (1997) *Foundation Analysis and Design*. 5th ed. Singapura: McGraw-Hill Companies, Inc., 1207 p.
- DÉCOURT, L. (1998) Análise e projeto de fundações profundas: estacas. In: Hachich et. al. (eds.). *Fundações: teoria e prática*. 2. ed. São Paulo: Pini. p. 265-301.
- POULOS, H. G., DAVIS, E. H. (1980) *Pile foundation analysis and design*. New York: John Wiley & Sons, 397 p.
- VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. (2010) *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas*. São Paulo: Oficina de Textos, 568 p.