

Análise da Resistência ao Longo do Tempo de Estaca Metálica Cravada com Auxílio de Martelo Vibratório

Kaoru Tsuchiya

Engenheira Civil, ECGEO Consultoria e Projetos, Rio de Janeiro, Brasil, kaoru@ecgeo.com.br

Alessandra Conde de Freitas

Professora Adjunta, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, alessandracfreitas@poli.ufrj.br

Eduardo Vidal Cabral

Mestre em Engenharia Civil, ECGEO Consultoria e Projetos, Rio de Janeiro, Brasil, eduardo.cabral@ecgeo.com.br

RESUMO: Para verificar a variação da resistência mobilizada com o tempo em estaca metálica cravada com martelo vibratório, foi estimado o fator de *set-up* (A) da estaca, por dois métodos: Skov e Denver (1988) e Bullock *et al.* (2005) com base em dados de uma prova de carga estática (PCE) e cinco ensaios de carregamento dinâmico (ECD). Foram também comparados os resultados de estimativas de capacidade de carga por diferentes métodos semiempíricos com o obtido pela PCE. Quanto aos fatores de *set-up*, foi confirmada a ocorrência do fenômeno de *set-up* e os resultados mostraram uma diferença entre os dois métodos. O maior valor de A obtido pelo método de Bullock *et al.* (2005) confirma a observação feita por eles e outros autores que a capacidade de carga de ponta aumenta pouco com tempo, sendo então o aumento da resistência por atrito lateral a parcela relevante no fenômeno. O método de Pedro Paulo Costa Velloso (1981) apresentou boa convergência com os resultados da PCE e os fatores (A) de referência.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Moles, *Set-up*, Martelo Vibratório, Fator de *Set-up*.

ABSTRACT: To verify the variation in mobilized resistance over time in a vibratory driven steel pile, the set-up factor (A) for the tested pile was estimated using two methods: Skov and Denver (1988) and Bullock *et al.* (2005) based on data from a static load test (PCE) and five dynamic loading tests (ECD). The results of ultimate bearing capacity using different semi-empirical methods were also compared with those obtained by PCE. As for the set-up factors, the occurrence of the set-up phenomenon was confirmed, and the results showed a difference between the two methods. The highest value of A obtained by the method of Bullock *et al.* (2005) confirms the observation made by them and other authors that the ultimate point bearing capacity increases little over time, with the increase in resistance due to shaft resistance being the relevant part of the set-up phenomenon. Pedro Paulo Costa Velloso's method (1981) showed good convergence with the PCE results and set-up factors.

KEYWORDS: Soft Soils, Set-up, Vibratory Hammer, Set-up Factor.

1 INTRODUÇÃO

No contexto de fundações, a utilização de martelos vibratórios em substituição ao método tradicional de cravação com martelos de queda livre vem ganhando notoriedade no cenário *onshore* por promover principalmente uma maior produtividade. Vantagem apontada por empresas que executam a cravação por vibração e fabricantes de martelo vibratório, e verificada no estudo feito pela *Deep Foundations Institute*, em que o método tradicional de cravação (bate-estacas) é comparado com a utilização do martelo vibratório.

Apesar do benefício na redução do tempo de cravação, uma das vantagens apontada em Saleem (2011), a utilização de martelos vibratórios traz consigo incertezas, dentre elas o controle e a estimativa da capacidade de carga. Durante a fase de projeto, para sua elaboração, a estimativa de capacidade de carga é premissa básica. As metodologias semiempíricas ainda são as principais formas de se prever as capacidades de carga e não

abrangem cravação por vibração. Nem mesmo a NBR6122:2022, em seu Anexo F, possui diretrizes específicas para estacas cravadas por vibração, indicando apenas seguir as recomendações dos fabricantes do martelo.

Buscando um melhor entendimento do método de cravação com o auxílio de martelo vibratório na variação da capacidade de carga ao longo do tempo, foram analisados os resultados provenientes de ensaios de carregamento dinâmico e uma prova de carga estática em uma estaca metálica de perfil comercial executada em região com espessa camada de argila mole, localizada na zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Uso do martelo vibratório

Esta tecnologia surgiu na antiga União Soviética, no ano de 1949. Mas foi apenas em 1969 que o primeiro martelo vibratório foi fabricado na América. Os martelos são utilizados na cravação e extração de componentes. Seu princípio básico é a vibração, que permite uma operação de baixo impacto, quando comparada a outros métodos. O processo de cravação se dá pela diminuição do atrito lateral entre o elemento a ser cravado e o solo, através da vibração.

De acordo com o *Deep Foundations Institute* (2015), a principal desvantagem do método é a falta de controle executivo confiável, quando comparado ao das estacas cravadas por impacto. No método convencional de cravação o diagrama de cravação consiste em um “ensaio” de campo na vertical da estaca cravada. Em alguns casos, o martelo de queda livre é utilizado para a checagem da capacidade de carga e se for necessário, realizar a recravação. Essa checagem acaba reduzindo o benefício econômico e ambiental do método de cravação por vibração.



Figura 1. Martelo vibratório utilizado em estudo de caso abordado neste artigo.

2.2 Fenômeno de *Set-up*

Conforme apresentado por Bullock *et al.* (2005) o fenômeno de *set-up*, que corresponde a “recuperação” em português, pode ocorrer em todos os tipos de solo e estacas variando apenas sua escala e, de acordo com Skov e Denver (1988) é resultado de mecanismos como por exemplo a dissipação dos excessos de poropressão, efeito de *aging* (mudanças mecânicas e /ou físicas do solo ao longo do tempo), entre outros, que podem estar atuando simultaneamente ou não. O efeito oposto, ou seja, a diminuição na capacidade de carga ao longo do tempo é conhecido como relaxação.

O *set-up* se inicia logo após o final da cravação da estaca e pode se estender por anos dependendo da porcentagem de finos no solo e pode ser avaliado através do fator de *set-up* (A), que é uma variável adimensional que representa o aumento relativo do *set-up* na capacidade de carga em função do logaritmo do tempo decorrido após o final da cravação. Serão apresentadas duas metodologias de estimativa do fator de *set-up* (A) em estacas cravadas por impacto.

2.2.1 Métodos de Skov e Denver (1988) e de Bullock et al. (2005)

Skov e Denver (1988) propuseram a adoção de um fator adimensional de *set-up* (A), conforme Equação (1), para representar o aumento relativo do *set-up* na capacidade de carga (Q) em função do logaritmo do tempo decorrido após o final da cravação, sendo válido para os quatro casos estudados por eles.

Para outros casos, a fórmula deve ser utilizada com atenção:

$$\frac{Q}{Q_0} = A \cdot \log \left(\frac{t}{t_0} \right) + 1 \quad (1)$$

Sendo, (A) o fator adimensional de *set-up*; (Q) a capacidade de carga total da estaca no tempo (t); (Q₀) a capacidade de carga total no tempo de referência inicial (t₀); (t) o tempo decorrido após o final da cravação e (t₀) o tempo de referência para início do aumento da resistência (varia com o tipo de solo).

Skov e Denver consideram tanto a contribuição da ponta como o atrito lateral na capacidade de carga da estaca (Q). Enquanto Bullock et al. (2005) não incluem a contribuição da ponta na capacidade de carga da estaca, apenas a contribuição lateral (Q_s) na Equação (2):

$$A = \frac{(Q_s/Q_{s0})-1}{\log \left(\frac{t}{t_0} \right)} \quad (2)$$

Sendo (Q_s) a capacidade de Carga lateral da estaca no tempo (t) e (Q_{s0}) a capacidade de Carga lateral no tempo de referência inicial (t₀)

2.2.2 Valores típicos de A

O valor A indica o quão expressivo foi o *set-up* na capacidade de carga Q ou Q_s medida no tempo t em relação aos valores iniciais t₀ e Q₀ ou Q_{s0}. Dentre os diversos trabalhos publicados referentes ao fator de *set-up* (A), na Tabela 1 podem ser conferidos alguns valores encontrados na literatura.

Tabela 1. Valores de *set-up* por diversos autores (Tsuchiya, 2021)

Referência	Tipo de solo	t ₀ (dias)	Fator de <i>set-up</i> (A)
Skov e Denver (1988)	Areia	0,5	0,2
Skov e Denver (1988)	Argila	1,0	0,6
Skov e Denver (1988)	Calcáreo	5,0	5,0
Axelsson (1998)	Areia	1,0	0,2 – 0,8
Chow et al. (1996)	Areia	1,0	0,2 – 0,8
Bullock et al. (2005)	Variado	1,0	0,12 – 0,32
Svinkin e Skov (2000)	Argila	0,1	1,14-3,50
Augustensen et al. (2006)	Argila	1,0	0,13 - 0,18
Lutful e Decapite (2011)	Misto (silto-argiloso)	1,0	0,08 – 3,16

Como o valor de A varia em função do tipo de solo, tipo de estaca e tempos inicial e final adotados, as faixas de valores encontradas na literatura variam bastante. Portanto, devem ser utilizados valores de referência com as condições de contorno similares às que serão analisadas.

2.3 Ensaios ECD e Prova de Carga Estática do Tipo Lenta PCE

Para a determinação da capacidade de carga da estaca, foram realizados cinco ensaios de carregamento dinâmico e uma prova de carga estática do tipo lenta (PCE), conforme Figura 2. A capacidade de carga obtida pela PCE será considerada neste trabalho como uma capacidade máxima a longo prazo, portanto, 62 dias (execução da PCE) será aqui arbitrado como um tempo t máximo para a evolução do *set-up* e o valor de referência.

O ensaio de carregamento dinâmico (ECD) pode ser realizado tanto ao final de uma cravação quanto em uma posterior recravação. Podendo ser um instrumento para se avaliar a ocorrência de *set-up* ou relaxação (Cintra *et al.*, 2013). Após o impacto do martelo, a onda descendente é refletida no sentido ascendente cada vez que ocorre alguma resistência ao longo da estaca. A instrumentação registra a sobreposição das duas ondas (descendentes e ascendentes), se o solo não oferecesse nenhuma resistência, essas ondas estariam completamente superpostas. A diferença entre as duas ondas é capaz de fornecer a resistência por atrito lateral.

Se a resistência de ponta for muito pequena ou nula a onda refletida, que é função dos sentidos das velocidades de onda e de partícula, é de tração, que se soma à onda descendente aumentando a velocidade (V) e diminuindo a força (F).

Os resultados provenientes do ensaio de carregamento dinâmico podem ser interpretados por dois métodos distintos: CASE (desenvolvido no *Case Institute of Technology*) e CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*). Neste artigo, os resultados foram interpretados pelo método CAPWAP.

A prova de carga estática lenta (PCE), regulamentada pela NBR16903:2020, consiste basicamente em se determinar a capacidade de carga da estaca por meio da interpretação da curva carga versus recalque gerada através dos resultados da instrumentação do ensaio. Diferentes carregamentos aplicados em estágios pré-determinados geram recalques medidos, quando o critério da estabilização dos recalques é atingido, por extensômetros (*strain gauges*) que são utilizados para a geração da curva carga versus recalque.



Figura 2. (a) PCE em execução (b) PDA (*Pile Driving Analyzer*) utilizado nos ensaios de carregamento dinâmico (Tsuchiya, 2021) - estudo de caso abordado neste artigo.

Ressalta-se que a capacidade de carga foi também calculada por metodologias semiempíricas como a de Dècourt-Quaresma (1978), Pedro Paulo Costa Velloso (1981), Alberto Rodrigues Teixeira (1996), para fim de comparação com a interpretação dos ensaios através do método da Norma (NBR6122:2022) e pelo Método da Rigidez de Dècourt (1998).

2.4 Geologia da região estudada

A estaca estudada foi executada na zona Oeste cidade do Rio de Janeiro, no bairro de Jacarepaguá/ Barra da Tijuca. De acordo com Cabral (1979) a grande maioria dos sedimentos que constituem a região da Baixada de Jacarepaguá é resultante das oscilações glacio-eustáticas ocorridas no Quaternário e ainda se observa que as argilas orgânicas se sobrepõem sempre às areias ou areias siltsosas, de compactação média, que possivelmente constituíam o fundo da antiga enseada e variam, aproximadamente, de 2,5m a 16,0m de espessura.

As sondagens executadas próximas à estaca mostram um perfil composto por 3,8m iniciais de aterro, seguido por uma camada de 8,1m de argila muito mole ($N_{SPT} < 2$) e por fim uma camada de areia fina até se atingir o impenetrável a 14,7m (Figura 3). Os dados da argila foram obtidos de Bedeschi (2004), Baroni (2016) e Almeida (2010).

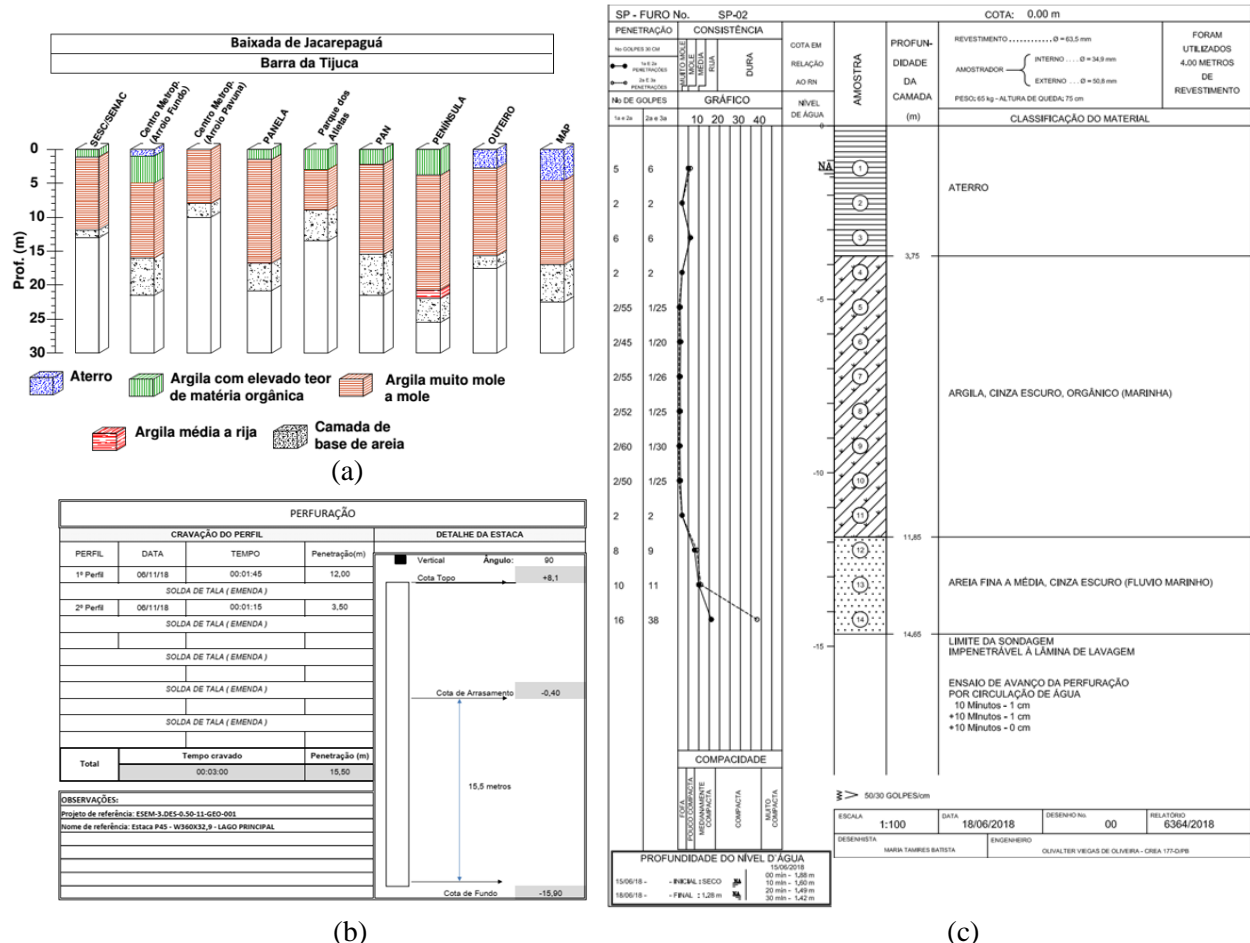


Figura 3. (a) Perfis típicos da Baixada de Jacarepaguá - (adaptado de BARONI, 2016 apud RICCIO *et al.*, 2013); (b) boletim de cravação da estaca (Tsuchiya, 2021); (c) Boletim de sondagem (Tsuchiya, 2021)

3 DADOS DA ESTACA E RESULTADOS DOS ENSAIOS

O fenômeno de *set-up* pode se estender por anos conforme apresentado na literatura, justamente por um dos principais motivos da sua ocorrência ser a dissipação do excesso de poropressão gerado na cravação da estaca. Para este artigo foi considerado que no tempo decorrido desde a cravação da estaca até a execução da PCE (62 dias) todo o acréscimo de capacidade de carga tenha ocorrido. Sendo então o valor de capacidade de carga de referência para as análises.

Através dos resultados de capacidade de carga apresentados na Tabela 2 é possível perceber que o Método da Norma foi conservador e que as metodologias de Dècourt-Quaresma (1978) e A. C. Teixeira (1996) apresentaram valores inferiores ao obtido na PCE, enquanto que a estimativa de capacidade de carga pelo método de P.P.C.Velloso (1981) apresentou boa convergência. Através do Método da Rigidez de Dècourt (1998) foi possível separar a contribuição da ponta e atrito lateral na capacidade de carga final da estaca P45.

A estaca metálica (P45) estudada possui as seguintes características:

Tabela 2. Informações gerais da estaca estudada (Tsuchiya, 2021).

Informação	P45
Comprimento (m)	15,4

Perfil metálico	W360 x 32,9
Data da cravação	06/11/2018
Sondagem de referência	SP-02 (4,0 m de distância)
Carga em serviço (kN)	220,0
Prova de Carga Estática - PCE (dias)	62 dias após cravação
Ensaios de carregamento dinâmico (dias)	0, 1, 2, 3 e 4 dias após cravação

Os ensaios de carregamento dinâmico apresentaram os resultados indicados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de carregamento dinâmico (Tsuchiya, 2021).

Ensaio	Dias após cravação	Número de golpes	Atrito (kN)	%	Ponta (kN)	%	Carga total (kN)
I	0	3	115,0	54,8	95,0	45,2	210,0
II	1	4	215,0	74,1	75,0	25,9	290,0
III	2	3	235,0	74,6	80,0	25,4	315,0
IV	3	5	265,0	75,7	85,0	24,3	350,0
V	4	4	250,0	75,8	80,0	24,2	330,0

A prova de carga estática do tipo lenta (PCE) realizada gerou uma curva carga *versus* recalque como a apresentada na Figura 4. Com uma ruptura nítida ao atingir-se o estágio correspondente à 610,0kN.

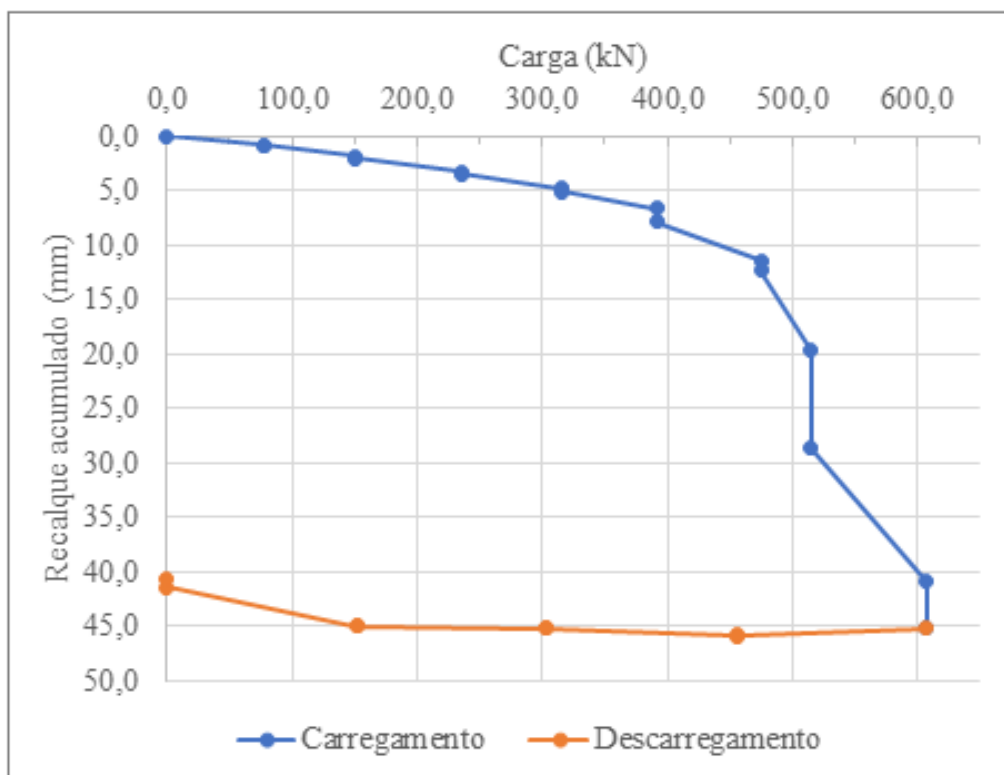


Figura 4. Curva carga *versus* recalque da Estaca P45

As capacidades de carga estimadas por várias abordagens se encontram resumidas na Tabela 4.

Tabela 4. Capacidades de Carga

Metodologia	Atrito Lateral (kN)	Ponta (kN)	Carga total (kN)
PCE (valor de referência)	-	-	610,0

Método da Norma	-	-	522,0
Rigidez de Dècourt	560,0	50,0	610,0
Dècourt-Quaresma (1978)	376,0	36,0	412,0
P.P.C.Velloso (1981)	549,0	47,0	596,0
A.R.Teixeira (1996)	418,0	36,0	454,0

O valor de capacidade de carga obtido pela metodologia de P.P.C.Velloso (1981) se aproximou bastante do valor experimental obtido através da PCE.

4 ANÁLISES

A partir dos resultados da prova de carga estática, foi possível obter os fatores de *set-up* por duas metodologias de cálculo, Skov e Denver (1988) na Tabela 5 e o método de Bullock *et al.* (2005) na Tabela 6. Os dois fatores de *set-up* obtidos foram comparados com os fatores de *set-up* calculados para cada método de estimativa de capacidade de carga resumidos na Tabela 7. A capacidade de carga no tempo $t_0=1,0$ dia foi obtida através dos ensaios de carregamento dinâmico.

Tabela 5. Fatores de *set-up* (A) de referência utilizando o método de Skov e Denver (1988)

Ensaio	Tempo decorrido após cravação (dias)	t/t_0	Total Q (kN)	Razão Q/Q_0	Fator de <i>set-up</i> (A)
I	1 (t_0)	1,00	290,00	1,00	-
II	62	62,00	610,00	2,10	0,62

Tabela 6. Fatores de *set-up* (A) de referência utilizando o método de Bullock *et al.* (2005)

Ensaio	Tempo decorrido após cravação (dias)	t/t_0	Atrito lateral Q_s (kN)	Razão Q_s/Q_{s0}	Fator de <i>set-up</i> (A)
I	1 (t_0)	1,00	215,00	1,00	-
II	62	62,00	560,00	2,60	0,90

O mesmo procedimento foi aplicado para as demais capacidades de carga obtidas, sendo os fatores de *set-up* (A) os apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Fatores de *set-up* (A) encontrados

Metodologia	Skov e Denver (1988)	Bullock <i>et al.</i> (2005)
PCE (valores de referência)	0,62	0,90
Ensaio de carregamento dinâmico	0,43	0,49
Dècourt-Quaresma (1978)	0,23	0,42
P.P.C.Velloso (1981)	0,59	0,87
A.R.Teixeira (1996)	0,32	0,53
Média \pm desvio padrão	0,39 \pm 0,13	0,58 \pm 0,17

Dentre as metodologias analisadas, o método de P.P.C. Velloso (1981) foi o que mais se aproximou dos valores de referência.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No que diz respeito a capacidade de carga total da estaca estudada, o valor obtido através da interpretação da Prova de Carga Estática (610 kN), utilizado como referência foi muito próximo ao valor baseado na extrapolação da curva por meio do método de Rigidez de Dècourt (596 kN), já que houve evidente ruptura física. Foi verificado que o método da Norma tende a ser conservativo (522 kN), conforme esperado.

Os resultados provenientes dos métodos semiempíricos foram inferiores ao obtido experimentalmente, exceto pelo método de P.P.C. Velloso (596 kN), que apresentou uma boa convergência.

Quanto aos fatores de *set-up* (A), os resultados mostraram uma diferença entre os métodos de Skov e Denver (0,62) e Bullock *et al.* (0,90). Para o caso estudado, o maior valor de A obtido pelo método de Bullock *et al.* confirma a observação feita por eles e outros autores de que a capacidade de carga de ponta aumenta pouco com tempo, sendo então o aumento da resistência por atrito lateral a parcela de relevância do fenômeno de *set-up*. Os valores de A encontrados utilizando a capacidade de carga de P.P.C. Velloso (0,59 e 0,87) também apresentaram convergência com os valores da PCE.

Com base nos resultados dos ensaios e para estacas cravadas em perfis estratigráficos similares ao apresentado (extensa camada de argila mole), o efeito de *set-up* pode ser levado em consideração na etapa de dimensionamento também para estacas vibroprensadas. Apesar das incertezas acerca do excesso de poropressão gerado durante o processo de cravação, houve aumento na capacidade de carga com o tempo. Por fim, recomenda-se verificar a parcela de contribuição da dissipação da poropressão no *set-up* com, por exemplo, leituras de piezômetros ou instalação de transdutores de poropressão no fuste da estaca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e Execução de Fundações*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solo – Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro.
- Baroni, M. (2016) *Comportamento Geotécnico de Argilas Extremamente Moles da Baixada de Jacarepaguá, RJ*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação de Engenharia, COPPE-UFRJ - Rio de Janeiro.
- Bullock, P. J., Schmertmann, J. H., McVay, M.C., Townsend, F.C. (2005a) *Side Shear setup I: Test piles driven in Florida*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 131 (3). pp. 292-300.
- Bullock, P. J., Schmertmann, J. H., McVay, M.C., Townsend, F.C. (2005b). *Side Shear setup II: Results from Florida test piles*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 131 (3). pp. 301-310.
- Cintra, J.C.A., Aoki, N., Tsuha, C.H.C., Giacheti, H.L. (2013). *Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Deep Foundations Institute (2015). *Comparison Of Impact Vs. Vibratory Driven Piles - Rev 2* – Gavin e Doherty Geo Solutions. Disponível em: <https://dfi.org/communities/driven-pile/initiatives/>. Acesso em: 21 de março de 2024.
- Tsuchiya, K. (2021) *Análise da Resistência do Longo do Tempo de Estaca Metálica Cravada com Auxílio de Martelo Vibratório*. Monografia, Escola Politécnica, UFRJ – Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/projpoli10034045.pdf>. Acesso em: 21 de março de 2024.
- Saleem, Z. (2011). *Alternatives and modifications of Monopile foundation or its installation technique for noise mitigation*. Report for North Sea Foundation in TU Delft MSc. Thesis; 2011.
- Skov, R., Denver, H. (1988) *Time dependence of bearing capacity of piles*. Proc. 3rd. *International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles*. Ottawa, Canada, (Ed. Fellenius, B.H.), pp.879-888.