

Alguns Casos de Comparação de Resultados de Provas de Carga Estáticas e Dinâmicas

Roberto Ferreira do Nascimento

Discente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Rio de Janeiro-UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, robert-bv1@hotmail.com

Bernadete Ragoni Danziger

Professora titular do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Rio de Janeiro-UERJ, Rio de Janeiro, bernadeterd@hotmail.com

RESUMO: A prova de carga é a maneira mais confiável de se comprovar o bom desempenho de um elemento de fundação. A NBR 6122 permite o emprego de prova de carga estática e dinâmica para a avaliação do desempenho. A prova de carga estática fornece a curva carga recalque no topo, incorporando, para cada nível de deslocamento, a soma das parcelas mobilizadas por atrito e pela ponta. O ensaio dinâmico apresenta ambas as parcelas mobilizadas durante o ensaio, ou seja, separa, de forma clara, as resistências devidas ao atrito lateral e à ponta. Apesar do ensaio estático ser sempre preferível por estar mais associado ao carregamento real que ocorre durante a construção, o ensaio dinâmico informa a porcentagem de ponta e atrito mobilizadas no ensaio. A interpretação do ensaio estático pelo modelo de Massad (1992, 1993) possibilita que, com o conhecimento da curva carga x recalque no topo da estaca no ensaio estático, se interprete as parcelas de atrito e ponta, além da parcela de carga residual aprisionada na ponta de estacas cravadas, ou na ponta de estacas escavadas já submetidas a um carregamento prévio. Este artigo compara, para alguns casos, os valores das parcelas de atrito e ponta obtidas dos ensaios dinâmicos, com aquelas interpretadas pelo modelo matemático de Massad. Uma convergência satisfatória foi observada quando da comparação dos resultados, sendo um resultado relevante que sinaliza para a relevância da interpretação dos ensaios estáticos pelo modelo de Massad.

PALAVRAS-CHAVE: Prova de carga estática, prova de carga dinâmica, curva carga-recalque.

ABSTRACT: Load tests are the most reliable way to verify the proper performance of a foundation element. NBR 6122 (2022) regulations allow the use of static and dynamic load tests for performance evaluation. The static load test provides the settlement load curve at the pile top, incorporating, for each displacement level, the sum of the resistance mobilized by friction and by the pile tip. The dynamic test shows both fractions of total resistance mobilized during the test, i.e. it can separate the friction and toe resistances from the total mobilized one. The interpretation of the static test by the Massad model (1992, 1993) makes it possible to interpret the friction and tip resistance with the knowledge of the load x settlement curve at the top of the static test, in addition to the residual load at the pile toe. The residual load appears at the driven piles tip after driving or in the pile tip of excavated piles which have been already submitted to a previous loading. This article compares, for some cases, the values of the friction and toe resistance measured at the dynamic tests with the values obtained from the static tests with the use of Massad Method. A satisfactory adjustment was observed when comparing the results, which is relevant for practical purposes, indicating the potential advantage of the interpretation of the static tests by the Massad model.

KEYWORDS: Static load test, Dynamic load test, Load-settlement curve

1 INTRODUÇÃO

A literatura oferece algumas formas de interpretar a curva carga-recalque de ensaios de carregamento estático, tendo a carga de ruptura global definida quando há deslocamentos progressivos sem um novo incremento de carga. No entanto, a determinação da carga de ruptura nem sempre é direta se o carregamento máximo está distante da carga de ruptura geotécnica. Por este motivo, as curvas carga-recalque costumam ser interpretadas por algum critério. Neste trabalho, serão analisadas conforme a NBR 6122 (2022).

A experiência comprova que muitas das fundações profundas existentes estão superdimensionadas, com fatores de segurança superiores ao exigido pelas normas. Isso se evidencia em muitos ensaios em que, para duas vezes a carga prevista em projeto, a curva carga-recalque indica um comportamento linear. Para um projeto mais otimizado, é importante se comprovar não apenas uma carga de ruptura, mas as parcelas da carga global absorvida por atrito e ponta. Quanto maior a parcela de atrito, melhor o comportamento no estado limite de serviço, que também se deve verificar. O modelo de interpretação de Massad (1992, 1993), concebido a partir dos trabalhos de Camberfort (1964) e Baguelin e Venon (1971), permite essa separação para estacas longas ou compressíveis e estacas curtas ou rígidas. Embora a norma permita a substituição de ensaios estáticos por dinâmicos, estudar as diferenças e potencial oferecido por cada um deles é fundamental. Os resultados dos casos indicados neste artigo mostram ótima convergência dos resultados, em termos de carga máxima mobilizada na ruptura, além de uma convergência também muito satisfatória nas parcelas de atrito e ponta.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

Para a devida compreensão do tema é importante ter bem sedimentada a teoria que versa sobre ensaio de carregamento estático, ensaio de monitoramento dinâmico e a respeito do modelo de Massad, que não serão detalhados aqui, mas podem ser consultados na extensa literatura técnica e nas publicações citadas no artigo.

2.1 Ensaio de carregamento estático

Velloso e Lopes (2011) afirmam que os ensaios de carregamento estático avaliam a capacidade de carga e os recalques das estacas, confirmando previsões de projeto e verificando a qualidade dos métodos executivos. Os ensaios podem ser realizados antes ou depois da execução da obra como um todo, com redução no fator de segurança se realizados previamente. Se feitos após a execução, as estacas devem ser selecionadas aleatoriamente. Os ensaios podem ser lentos, com estabilização em 30 minutos no mínimo, ou mais rápidos, com carga mantida por 10 minutos. O ensaio lento é o que simula melhor o comportamento real das fundações mais usuais.

2.2 Ensaio de carregamento dinâmico

A instalação de transdutores de deformação específica e acelerômetros no topo de uma estaca permite prever a capacidade de carga estática usando a teoria da Equação da Onda, monitorando a resposta da estaca à cravação. Os métodos Case e CAPWAP são amplamente utilizados para essa finalidade. O Método Case é simples e rápido, permitindo acompanhar a mobilização de resistência em tempo real. Já o Método CAPWAP é mais completo e complexo, permitindo analisar os dados posteriormente, possibilitando a obtenção da resistência total mobilizada e também as parcelas de ponta e atrito.

2.3 Modelos de interpretação de Massad

Este artigo utiliza o método de interpretação da curva carga versus recalque de ensaios de carregamento estático, de acordo com os métodos de Massad (1992, 1993 e 1998), formulados a partir da contribuição de Camberfort (1964) e Baguelin e Venon (1971). O trabalho de 1992 trata de estacas compressíveis em solos homogêneos e no trabalho de 1993 a heterogeneidade do solo é incorporada ao modelo. Já o trabalho de 1998 trata de estacas rígidas. A contribuição de Massad é importante pois incorpora, no modelo, as tensões residuais oriundas da cravação ou do ensaio dinâmico. Martins (2024) elaborou uma planilha muito amigável, com informações e que permite sua utilização rápida. A planilha foi calibrada por Martins (2024) pela reprodução de casos publicados anteriormente por Massad, em diferentes artigos, bem como utilizada na interpretação de mais de 40 ensaios, a maioria contemplando estacas instrumentadas. A interpretação dos resultados dos ensaios estáticos ilustrados neste artigo foi desenvolvida pelo primeiro autor por meio da planilha de Martins (2024).

3 CASO DE OBRA 01 – CAJAMAR - SP

Os ensaios PCE e PDA foram executados em Cajamar-SP, em agosto e setembro de 2019, em estacas escavadas com trado mecânico, sem utilização de fluido estabilizante, situadas próximas entre si. A estaca que foi ensaiada com a metodologia de carga incremental lenta, designada como PC-10, foi carregada até atingir 800 kN. A estaca que foi submetida a ensaio de carregamento dinâmico possui características semelhantes, com comprimento ligeiramente menor.

A Tabela 1 apresenta o resumo das características das estacas ensaiadas, sendo h o comprimento, D o diâmetro, E o módulo de elasticidade do concreto das estacas e K_r a rigidez como elemento estrutural, conforme a nomenclatura de Massad (1992).

Tabela 1. Características das estacas - Caso de obra 01

Tipo	Estaca	Diâmetro(m)	h (m)	E (MPa)	K_r (kN/m)	Fonte	Ensaio
Escavada	E-2001	0,40	6	21000	$439,8 \times 10^3$	Terratek	PCE LENTO
Escavada	PC 110	0,40	5,7	21000	$463,5 \times 10^3$	Terratek	PDA

A Figura 1 apresenta a curva carga-recalque do ensaio PCE na estaca E-2001 e a extrapolação da curva pelo método de Van der Veen (1953) modificada por Aoki (1976). A carga última da estaca foi determinada pelo método da NBR 6122, a fim de verificar se o carregamento máximo do ensaio estava, ou não, próximo da ruptura. De acordo com a critério da norma a carga de ruptura está em torno de 850 kN, valor próximo à carga de ensaio de 800 kN.

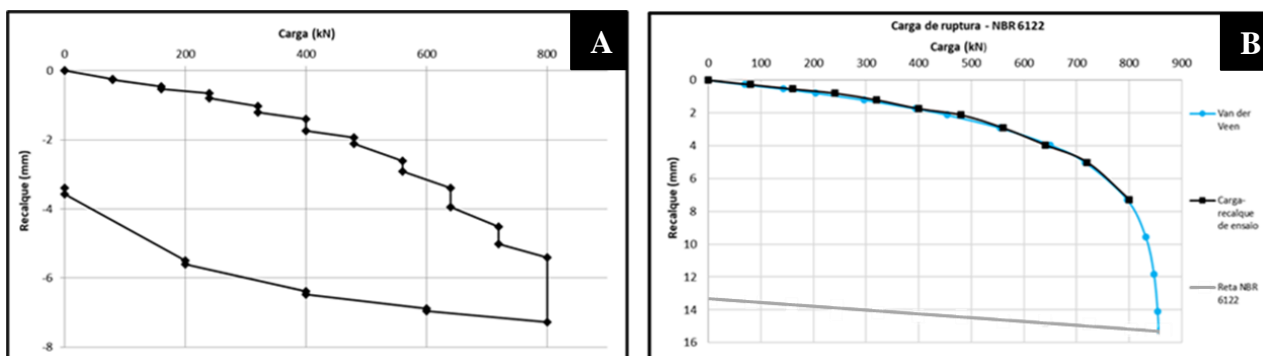


Figura 1. Curva de ensaio (A) e Determinação da carga de ruptura, NBR 6122 (B)

Através da metodologia de cálculo das duas retas de Massad e Lazo (1998), uma vez que se trata de estaca de pequeno comprimento, com rigidez relativa estaca solo, k , segundo nomenclatura de Massad (1992) igual a 0,63, estaca rígida, é possível interpretar a curva carga-recalque e separar as contribuições de atrito e ponta para resistência total do elemento de fundação. A Tabela 2 apresenta os parâmetros do método. Em estacas escavadas, por ocasião do primeiro carregamento, a carga residual inexistente. Por esta razão, o fator quantificador da carga residual (μ), é igual a unidade.

Tabela 2. Parâmetros do método das duas retas - Estaca E2001

Método duas retas – Estaca E-2001				
k	$\mu A_l r$ (kN)	μy_l (mm)	$A_l r$ (kN)	μ
0,63	371,41	1,35	371,41	1

Na estaca PC-110, com as mesmas características da E-2001, realizou-se um ensaio de carregamento dinâmico. A estimativa de carga de ruptura foi determinada pela metodologia CAPWAP. A Tabela 3 exhibe o resumo dos resultados do ensaio.

Tabela 3. Análise Capwap - Estaca PC-110

Estaca	Golpe n°	Resistência Mobilizada				Cap.Total CAPWAP (kN)	EMX (kJ)	DMX (mm)	Nega (mm)
		Atrito Lateral		Ponta					
		Q (kN)	%	Q (kN)	%				
PC-110	3	423,5	52,9	376,4	47,1	799,9	6,2	6,5	5,0

A Figura 2 mostra a curva carga x deslocamento do PDA, onde pode-se constatar que a carga máxima mobilizada da estaca foi estimada em torno de 800 kN, valor próximo à carga de ruptura do ensaio de carregamento estático e muito próximo da carga determinada pelo critério da NBR 6122. O valor do atrito lateral (423,5 kN) é um pouco superior ao valor estimado pelo método de Massad (371,41 kN). Esta diferença se deve, provavelmente, ao surgimento de tensões residuais provenientes dos primeiros golpes do ensaio, visto que a execução de uma estaca escavada não induz estas tensões. Com o ensaio, a estaca que, no ensaio estático não apresentava carga residual (primeiro carregamento), apresenta num terceiro golpe do ensaio dinâmico uma carga de atrito falsa, como se fora uma estaca cravada.

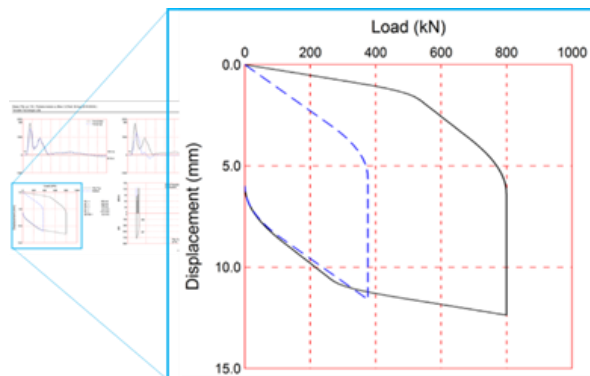


Figura 2. Curva Carga-deslocamento do ensaio dinâmico - Estaca PC-110

4 CASO DE OBRA 02 – SANTA CRUZ - RJ

Realizaram-se, também, os ensaios PCE e PDA no distrito industrial de Santa Cruz - Rio de Janeiro - RJ entre agosto de 2015 a janeiro de 2016. Neste caso, serão analisadas quatro estacas, duas metálicas (Caso de obra 02-A) e duas pré-moldadas de concreto (Caso de obra 02-B). As estacas metálicas, compostas por três elementos, dois elementos com 12 m e um elemento com 7 m. As estacas de concreto, compostas, também, por três elementos, dois elementos de 10 m e um elemento de 8 m. Será apresentado, primeiramente, o caso das estacas metálicas.

4.1 Caso 02A – Estacas Metálicas

A Tabela 4 apresenta um resumo das características das estacas ensaiadas. Da mesma forma, trata-se de duas estacas de mesma seção, comprimentos próximos, executadas em posições bem próximas entre si.

Tabela 4. Características das estacas metálicas - Caso de obra 02-A

Tipo	Estaca	Dimensões (mm)	h (m)	E (MPa)	Kr (kN/m)	Fonte	Ensaio
Metálica	EE-03	HW 360x101	30,0	205000	88,83x10 ³	Terratek	PCE LENTO
Metálica	E-10	HW 360x101	29,2	205000	91,27x10 ³	Terratek	PDA

A Figura 3 ilustra a curva de ensaio de prova de carga estática (PCE) na estaca EE-03. O ensaio indicou uma carga de ruptura de 2340 kN, mesmo valor encontrado pelo critério da norma NBR 6122.

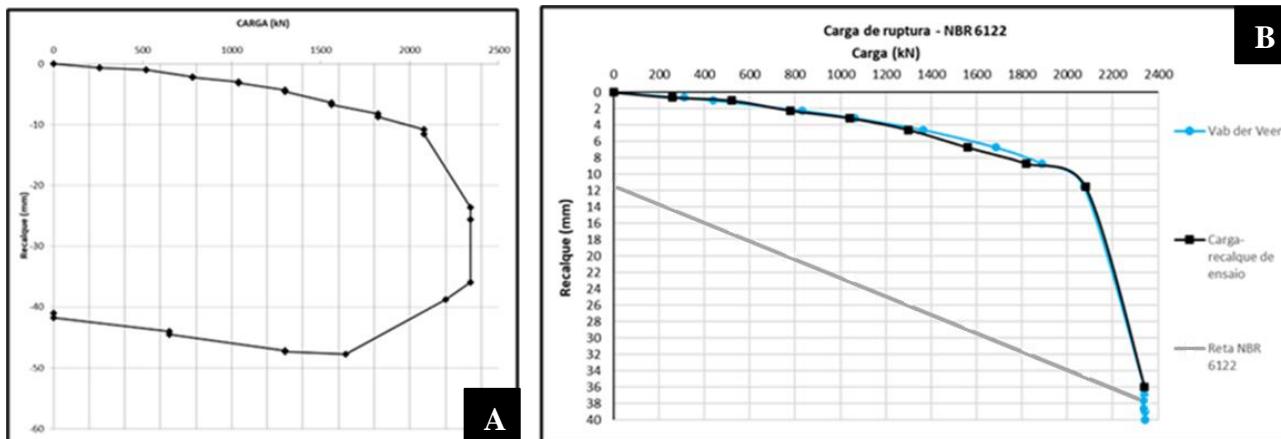


Figura 3. Curva de ensaio (A) e Determinação da carga de ruptura, NBR 6122 (B)

A estaca E-2001 do caso anterior, (Caso de obra 01), foi analisada com emprego da metodologia de cálculo das duas retas de Massad e Lazo (1998), pois foi considerada rígida. No entanto, a estaca EE-03 possui comportamento compressível, com isso a análise será realizada pela metodologia geral, apresentada por Massad (1992,1993).

A Tabela 5 resume alguns dos parâmetros de destaque do método de Massad (1992,1993) com o qual foi obtido o atrito lateral mobilizado de 1216,8 kN, aproximadamente. Observe que a estaca possui carga residual na ponta, cujo valor, obtido pelo modelo de Massad ($\mu = 1 + P_h/A_{lr}$) é igual a $P_h = 1082$ kN, que fornece um atrito falso de 2306,3 kN.

Tabela 5. Parâmetros de Massad (1992,1993) – Estaca EE-03

Relação Parabólica							
Carregamento				Descarregamento			
k	μA_{lr} (kN)	μy_1 (mm)	k	μ	$y_1 R$ (mm)	A_{lr} (kN)	
25,45	2306,3	1,02	17,3	1,89	0,79	1216,8	

Na estaca E-10, que possui as mesmas características que a EE-03, realizou-se um ensaio de carregamento dinâmico. A estimativa de carga de ruptura foi determinada pela metodologia CAPWAP. A Tabela 6 exhibe o resumo dos resultados do ensaio.

Tabela 6. Análise CAPWAP - Estaca E-10

Estaca	Golpe n°	Resistência Mobilizada				Cap.Total CAPWAP (kN)	EMX (kJ)	DMX (mm)	Nega (mm)
		Atrito Lateral		Ponta					
		Q (kN)	%	Q (kN)	%				
E-10	3	1836,9	80,4	447,9	19,6	2284,8	22,5	17,6	1,3

Por meio dos resultados do PDA pode-se constatar que a resistência mobilizada pela estaca foi estimada em torno de 2284,8 kN, valor muito próximo à carga determinada pelo critério da NBR 6122 que foi de 2340 kN. O valor do atrito lateral estimado (1836,9 kN) é superior ao valor estimado pelo método de Massad (1216,8 kN). Porém, este valor corresponde ao atrito falso, e deve ser comparado ao atrito falso obtido do ensaio estático, incorporando a carga residual aprisionada na ponta, que é de 2306,3 kN. A diferença entre estes valores é de cerca de 20%.

4.2 Caso 02B – Estacas Pré-moldadas de concreto

Neste item, serão apresentados os dados referentes as estacas pré-moldadas. A Tabela 7 apresenta o resumo das características das estacas.

Tabela 7. Características das estacas pré-moldadas - Caso de obra 2B

Tipo	Estaca	Dimensões (m)	h (m)	E (MPa)	Kr (kN/)	Fonte	Ensaio
Pré- Moldada de Concreto	EE-06	0,42	25	21000	116x10 ³	Terratek	PCE LENTO
Pré-Moldada de Concreto	E-142	0,42	25,3	21000	115x10 ³	Terratek	PDA

A Figura 4 exibe a curva de carregamento do ensaio de prova de carga estática que atingiu a carga de 1800 kN na estaca EE-06. A carga de ruptura identificada com base no critério estabelecido pela norma NBR 6122 foi de 1950 kN, próxima ao valor máximo de ensaio.

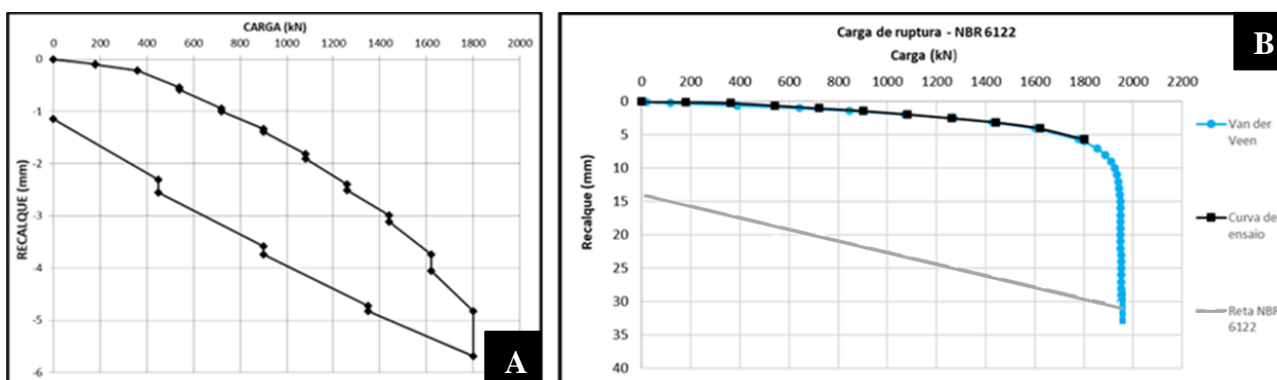


Figura 4. Curva de ensaio (A) e Determinação da carga de ruptura, NBR 6122 (B)

Assim como no caso anterior (Caso de obra 2A), a estaca é compressível. A análise da prova de carga estática será de acordo com Massad (1992, 1993). A Tabela 8 resume alguns dos parâmetros de destaque do método de Massad (1992,1993).

Tabela 8. Parâmetros de Massad (1992,1993) – Estaca EE-06

Relação Parabólica							
Carregamento				Descarregamento			
k	$\mu A l_r$ (kN)	μy_l (mm)	k	μ	$y_l R$ (mm)	$A l_r$ (kN)	
83,36	2910	0,33	16,68	1,98	0,77	1467,46	

A carga residual na ponta, considerando o valor de μ de 1,98, seria igual a $P_h = 1438$ kN, o que forneceria um atrito falso de 2905 kN, valor este que superaria a capacidade de carga global, o que não é possível. Possivelmente, apesar das estacas estarem próximas, pelo fato do perfil geotécnico poder variar mesmo num trecho pequeno, estas duas estacas podem representar diferenças de comportamento. Este aspecto será melhor investigado pelo primeiro autor na continuidade deste estudo.

Na estaca E-142, semelhante à EE-06, a mesma empresa realizou o ensaio de carregamento dinâmico. A estimativa de carga de ruptura foi determinada pela metodologia CAPWAP. A Tabela 9 exibe o resumo dos resultados do ensaio.

Tabela 9. Análise CAPWAP - Estaca E-142

Estaca	Golpe n°	Resistência Mobilizada				Cap.Total CAPWAP (kN)	EMX (kJ)	DMX (mm)	Nega (mm)
		Atrito Lateral		Ponta					
		Q (kN)	%	Q (kN)	%				
E-142	3	1767,4	86,3	279,8	13,7	2047	25,3	14,5	1,5

De posse dos resultados de PDA pode-se constatar que a carga máxima mobilizada na estaca foi estimada em torno de 2047 kN, valor muito próximo da carga de ruptura determinada pelo critério da NBR 6122 que foi de 1950 kN. O valor do atrito lateral estimado (1767,4 kN), valor este falso, diferiu do atrito falso obtido do ensaio estático, se aproximando mais do atrito verdadeiro.

5 CONCLUSÃO

O ensaio de carregamento incremental lento, para a grande maioria das estacas das edificações, é aquele cujo comportamento da curva carga versus recalque mais se aproxima do comportamento real da fundação. O cenário ideal, para projetistas e consultores, é quando há ruptura nítida no contato solo-estaca, isso possibilita a avaliação acurada do desempenho e a calibração dos métodos de previsão de capacidade de carga em fundações. No entanto, mesmo quando não há ruptura, o ensaio consiste no melhor recurso de verificação do desempenho de uma estaca isolada.

O ensaio de carregamento dinâmico é razoavelmente mais barato que o ensaio estático. Foi claramente constatado neste trabalho que os resultados dos ensaios dinâmicos, nestes casos ilustrados, se aproximaram bastante dos estáticos, principalmente os resultados de carga de ruptura extrapolados pelo critério da NBR 6122, em se tratando de estacas executadas em local próximo e com características semelhantes. A convergência dos valores de resistência se tornaria maior se os métodos de análises dinâmicas incluíssem a separação das cargas residuais, com a possibilidade de obtenção, ou o conhecimento, do atrito verdadeiro.

Os métodos de análise e interpretação das curvas carga-recalque desenvolvidos por Massad, em seus diversos trabalhos ao longo do tempo, fornecem uma ferramenta interessante, e muito útil ao projetista de fundações, que possibilita a separação das parcelas de contribuição da ponta e do atrito lateral da resistência total em elementos de fundação profunda, além da obtenção da carga residual aprisionada na ponta das estacas.

A planilha de Martins (2024), usada neste trabalho, sintetiza as expressões matemáticas dos métodos de Massad (1992,1993) e Massad e Lazo (1998) e está, claramente, calibrada para a utilização. Os resultados, convergem com elevada acurácia com os valores dantes calculados em publicações de Massad.

AGRADECIMENTOS

Registro meus sinceros agradecimentos à Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) pela oportunidade de aprofundamento na área de Geotecnia. A empresa Terratek pelo fornecimento do banco de dados. Ao colega Bryan Martins, pela liberação da planilha de cálculo para uso neste artigo. Agradeço, principalmente, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio e incentivo à minha jornada acadêmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solo – Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). NBR 13208. *Estacas – Ensaio de carregamento dinâmico*. Rio de Janeiro.

- Aoki, N.; Lopes, F. R. (1975). *Estimating stresses and settlements due to deep foundations by the theory of elasticity*. Proceedings, 5th Pan American CSMFE, Buenos Aires, v. 1, p. 377-386.
- Aoki, N. (1976). *Considerações sobre a capacidade de carga de estacas isoladas*. Notas de Aula. Rio de Janeiro: Universidade Gama Filho.
- Baguelin, F. & Venon, V.P. (1971). *Influence de la Compressibilité des Pieux sur la Mobilizations des Efforts Resistant*. -Bulletin des Liaison Lab. des Ponts et Chaussées. Num. Especial. Paris, Mai.
- Cambefort, M. (1964). *Essai sur le Comportement em terrain homogène des pieux et des groupes des piex*. Annales de l'Institut du Batiment et des Travaus Public n° 204.
- Danziger, B. (2021). *Fundações em estacas*. 1. ed. - Rio de Janeiro: LTC.
- Martins, B. (2024). *Interpretação de provas de carga em estacas pelo modelo matemático de Massad contemplando cargas residuais*. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Massad, F. (1992). *Sobre a Interpretação de Provas de Carga em Estacas, Considerando as Cargas Residuais de Ponta e a Reversão do Atrito Lateral. Parte I*. Revista Solos e Rochas, 15(2):103-115, S. P.
- Massad, F. (1993). *Sobre a Interpretação de Provas de Carga em Estacas, Considerando as Cargas Residuais na Ponta e a Reversão do Atrito Lateral. Parte II*. Revista Solos e Rochas, 16 (2): 93- 112, S. Paulo.
- Massad F.; Lazo, G. (1998). *Método Gráfico para Interpretar a Curva Carga-Recalque de Provas de Carga Verticais em Estacas Rígidas ou Curtas*. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, vol III:1407-1414, Brasília, Brasil.
- Van Der Veen, C. (1953). *The bearing capacity of a pile*. Proceedings. 3rd ICSMFE, Zurich, v. 2, p. 84-90.
- Velloso, D. V.; Lopes, F. R. (2011). *Fundações: Critérios de Projeto / Investigação do Subsolo / Fundações Superficiais / Fundações Profundas*. São Paulo: Oficina de Textos.