

ANÁLISE COMPARATIVA ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO E ESTÁTICO COM MÉTODOS DE CÁLCULO SEMIEMPÍRICOS: UM ESTUDO DE CASO COM PERFIS METÁLICOS EM EDIFÍCIOS ALTOS

Euler Santos Arruda Junior (Universidade Federal do Pará) E-mail: euler_arruda@hotmail.com
Alcides Gomes Moreira Neto (Universidade Federal do Pará) E-mail: a_moreira_net@hotmail.com
Caio José Bastos Marques dos Santos (Universidade Federal do Pará) E-mail: caiobastos48@gmail.com
Júlio Augusto de Alencar Junior (Universidade Federal do Pará) E-mail: jalencar@soloserochas.com

Resumo: Foram analisadas dez estacas tipo perfil metálico para fundação de um edifício comercial na cidade de Belém-PA, executadas em área cujo perfil estratigráfico apresenta tipicamente intercalações de camadas argilosas muito moles à rijas e arenosas medianamente compactas a compactas. Comparou-se os resultados do ensaio de carregamento lento (que foram extrapolados pelo método de Van Der Veen por recomendações da NBR 6122) com o ensaio dinâmico e com os métodos semiempíricos Aoki-Velloso e Decourt-Quaresma. A metodologia consistiu em uma análise da transferência de carga e comparação dos valores de carga mobilizada. A partir dos resultados dos ensaios foram analisados os gráficos de força mobilizada em relação ao deslocamento. Os resultados atingiram valores satisfatórios próximos aos valores calculados pelos métodos semiempíricos, proporcionalmente ao comprimento das estacas ensaiadas.

Palavras-chave: Capacidade de Carga, Ensaio de Carregamento Lento, Ensaio Dinâmico, Provas de Carga, Fundações Profundas.

COMPARATIVE ANALYSIS DYNAMIC AND STATIC LOADING TEST WITH SEMI-EMPIRICAL CALCULATION METHODS: A CASE STUDY WITH METALLIC PROFILES IN TALL BUILDINGS

Abstract: Ten metallic profile piles were analyzed for the foundation of a commercial building in the city of Belém-PA, executed in an area whose stratigraphic profile typically presents intercalations of very soft to hard clayey layers and moderately compact to compact sandy layers. The results of the slow loading test (which were extrapolated by the Van Der Veen method according to NBR 6122 recommendations) were compared with the dynamic test and with the semi-empirical methods Aoki-Velloso and Decourt-Quaresma. The methodology consisted of an analysis of load transfer and comparison of mobilized load values. From the test results, the graphs of mobilized force in relation to displacement were analyzed. The results reached satisfactory values close to the values calculated by the semi-empirical methods, proportionally to the length of the tested cuttings.

Keywords: Load Capacity, Slow Loading Test, Dynamic Tests, Load Tests, Deep Foundations.

1. Introdução

Com o avanço da tecnologia no decorrer dos anos, as edificações vêm se tornando maiores e mais complexas, inclusive, sendo construídas em terrenos de menor capacidade geomecânica. Para garantir a estabilidade dessas construções são necessárias fundações profundas mais eficientes e competentes, o que aumenta a demanda por estacas metálicas, por serem ideais para diversos tipos de terreno, em especial quando há a necessidade de elementos de fundação com elevada resistência estrutural.

Com a busca pelo aumento da eficiência das fundações tornou-se essencial a melhoria nas técnicas de monitorização, devido ao grau de responsabilidade de certas obras, visando a obtenção de informações mais precisas durante as cravações, além de possibilitar um controle mais adequado em campo.

Este trabalho foi motivado pela busca de um melhor entendimento sobre a variação dos valores de carga mobilizada entre diferentes métodos de previsão de capacidade de carga. Com o objetivo de analisar os resultados de carga mobilizada e a integridade dos elementos de fundação, comparou-se 8 provas de carga dinâmica, em estacas escolhidas pelo engenheiro projetista de fundação, com o ensaio de carregamento lento e métodos semiempíricos de previsão de carga.

O empreendimento implantado na área do caso estudado apresenta estrutura de concreto armado convencional com 28 pavimentos. Os elementos de fundação utilizados para a torre do prédio foram estacas metálicas de fabricação Gerdau-Aço Minas.



Figura 1 - Localização do estudo de caso.

Foram realizadas 6 sondagens SPT sendo que 3 delas se encontram na área onde será construída a torre e 3 na periferia da edificação. Os elementos de fundação ensaiados estavam situados próximos as prospecções SP-01, SP-05 e SP-06.

As sondagens realizadas atingiram as profundidades de 58,30 metros a 60,45 metros. As 3 investigações apresentaram um perfil de solo constituído em sua maior parte de argila arenosa e areia siltosa, apresentando profundidades distintas, encontrando-se uma camada de areia siltosa de cor cinza na conclusão do ensaio.

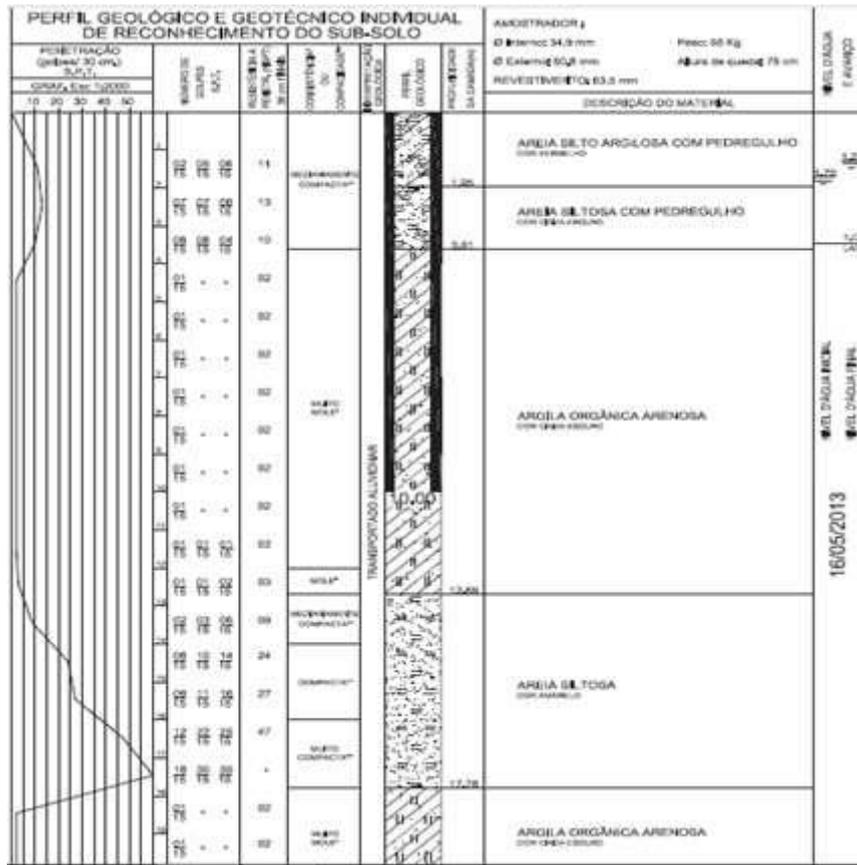


Figura 2 - Sondagem Geotécnica SP-05 folha 1.

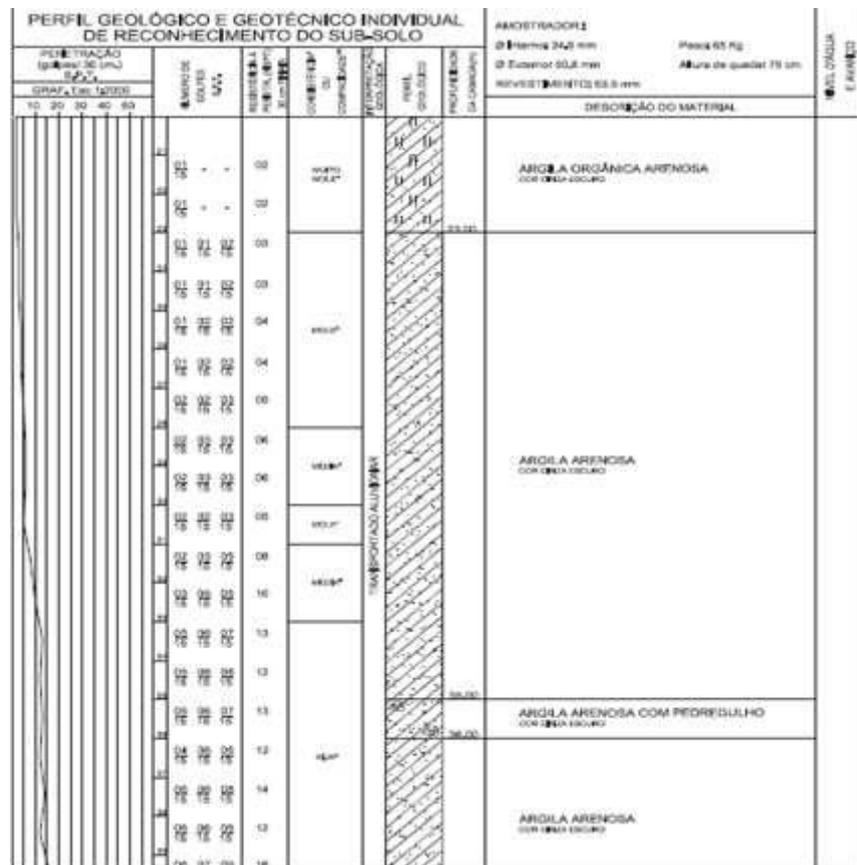


Figura 3 - Sondagem Geotécnica SP-05 folha 2.

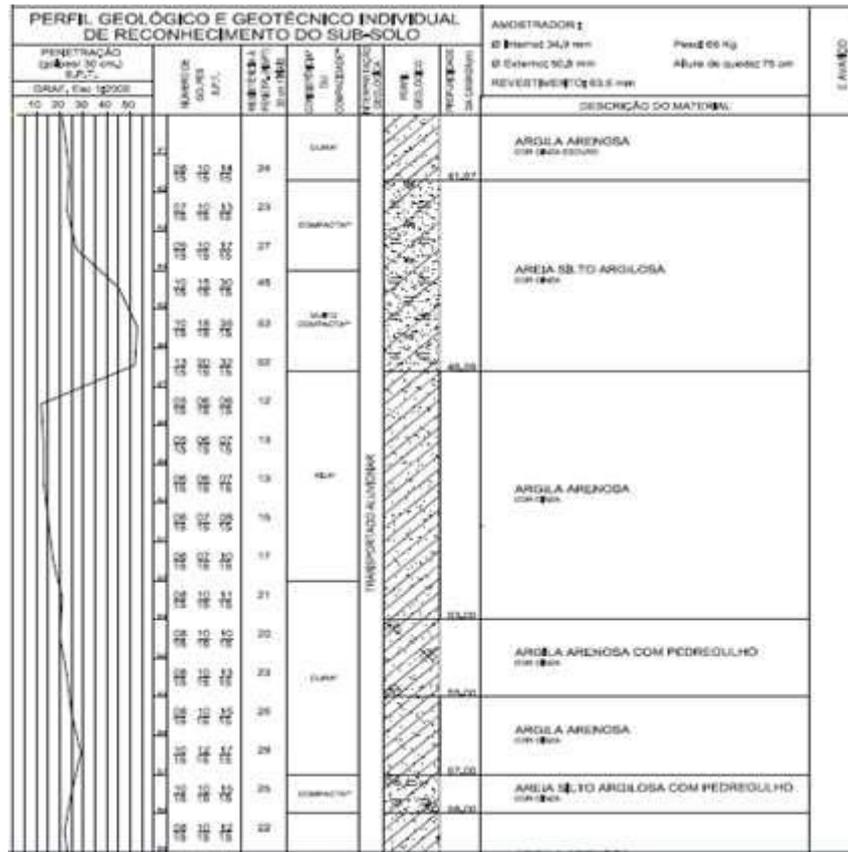


Figura 4 - Sondagem Geotécnica SP-05 folha 3.

O projeto de fundação é composto de 184 estacas no total, alcançando profundidade de 45 metros e dividindo-se em 45 estacas com perfil HP 310x79 para suportar até 140 tf; e 139 estacas com perfil HP 310x79,0 e 3 perfis HP 310x93 para suportar até 190 tf, se considerado o efeito do vento. Na Figura 5 apresenta-se disposições das estacas e quais foram ensaiadas.

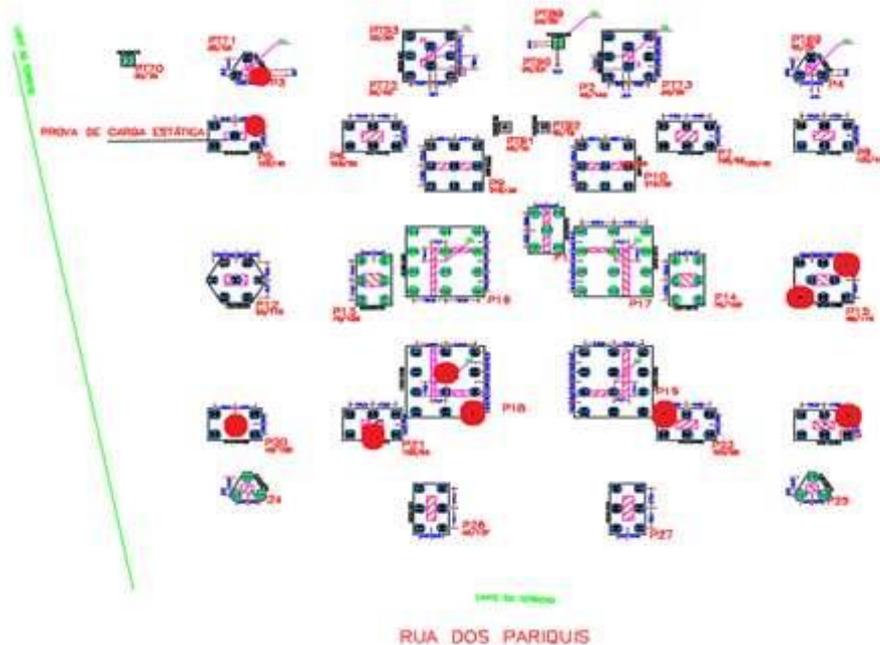


Figura 5 - Localização das estacas ensaiadas.

O monitoramento e o controle de fundações profundas através do uso de um sistema de

instrumentação, aquisição e interpretação de dados, desempenham um papel fundamental na avaliação do comportamento destas estruturas, notavelmente durante a fase de execução.

O PDA (Pile Driving Analyzer) fornece agilidade para a obra e facilita o uso do perfil metálico pois se consegue economizar o comprimento e se tem o acompanhamento da capacidade de carga, além de fornecer informações a respeito da integridade da estaca, do deslocamento máximo e das tensões máximas de compressão e de tração durante o golpe.

Os métodos semiempíricos escolhidos para fazer a comparação dos resultados de carga mobilizada foram Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma devido serem amplamente utilizados e citados na literatura técnica (ALONSO, 2011; VELLOSO, 2010).

As provas de carga estáticas (NBR 12131) destacam-se como um dos ensaios de campo mais importantes, juntamente com o PDA, usados na engenharia de fundações. O ensaio de carregamento lento tem como objetivo determinar a capacidade máxima de carga da estaca ensaiada através do comportamento carga x deslocamento ao longo do tempo, deste modo, podendo então, os métodos de cálculo e desempenho serem efetivamente comparados com o real.

2. Metodologia

A partir dos resultados das provas de carga realizadas, comparou-se e analisou-se os resultados de carga mobilizada e os resultados estimados pelos métodos semiempíricos. A seguir é apresentada a instrumentação das provas de carga.

2.1. Ensaio de Carregamento Dinâmico

A instrumentação foi realizada através de cabos que estavam conectados em um analisador de dados Pile Driving Analyser (PDA) a partir da cravação das estacas. Foram instalados 1 par de transdutores de deformação específica e 1 par de acelerômetros foram fixados com parafusos no prolongamento confeccionado. Os transdutores eram fixados na mesma direção, porém em faces opostas da estaca, e em cada face, 1 acelerômetro era fixado à direita do transdutor como se vê na Figura 6.



Figura 6 - Instrumentação das estacas.

O ensaio de carregamento dinâmico (de acordo com a NBR 13208) foi realizado a partir da aplicação de um bate estaca de queda livre com plataforma sobre rolos, como o utilizado para a cravação de elementos de fundação, com martelo de 30 kN e sistema de

amortecimento por cepo de madeira de 20 cm.

A aplicação de cargas das provas de cargas dinâmicas ocorreu com energia crescente, de forma que a altura de queda do martelo foi elevada golpe a golpe durante a aplicação no topo da estaca. Os dados referentes à mobilização da resistência a cada golpe eram medidos e enviados para a unidade PDA visto na Figura 7.



Figura 7 - Equipamento de análise PDA.

2.2. Ensaio de Carregamento Estático

Realizou-se prova de carga à compressão, de carregamento lento e controlado, com carga localizada no centro geométrico do bloco (NBR 12131). Um macaco hidráulico de 0,4 metros de diâmetro e capacidade de 300 tf foi usado no sistema de reação necessário para a prova de carga, Figura 8. O carregamento ocorreu em estágios não superiores a 20% da carga de trabalho e o descarregamento ocorreu em estágios não superiores a 25 % da carga final de teste.



Figura 8 - Sistema de reação com macaco hidráulico.

A leitura das cargas foi realizada a partir de um manômetro acoplado à bomba de óleo. As medições foram obtidas por 4 relógios comparadores, com precisão de 0,01mm, medindo os deslocamentos verticais ao longo do eixo axial do elemento de fundação testado. O tempo de aplicação das cargas foi de 30 minutos para os estágios de carga

que tiveram os recalques estabilizados e para os demais estágios a carga foi mantida até a estabilização dos recalques. O processo de descarregamento aconteceu em estágios até atingir o descarregamento total, com a duração de cada estágio de 15 minutos.

2.3. Métodos Semiempíricos de Previsão de Carga

Para efeito comparativo estimou-se a capacidade de carga por métodos semiempíricos Aoki-Veloso e Décourt-Quaresma a partir de investigação geotécnica SPT (NBR 6484 e NBR 8036) previamente realizada. Os cálculos realizados pelos métodos semiempíricos citados são amplamente encontrados na literatura e basearam-se nos resultados de resistência à penetração SPT metro a metro.

3. Apresentação de Resultados

3.1. Dados Obtidos pelo Método CAPWAP

Durante a realização das Provas de Carga Dinâmica, o Ensaio de Carregamento Dinâmico processa os dados obtidos através da instrumentação no fuste da estaca, porém o Jc (fator de amortecimento dinâmico do solo) utilizado durante o ensaio foi arbitrário. Os dados obtidos foram analisados pelo método CAPWAP, onde o Jc foi reajustado, chegando a resistências máximas mobilizadas mais coerentes. O quadro 1, mostra os dados obtidos já analisado pelo método CAPWAP.

Tabela 1 - Resultados das Análises do CAPWAP.

Estaca	Golpe	RU (tf)	QAL (tf)	% QAL	QP (tf)	% QP	Mach Quality %	J
B3-E3	8	372,3	311,9	83,8	60,4	16,2	1,3	0,5
B18-E5	6	365	267,2	73,2	97,8	26,8	1,96	0,52
B15-E6	8	317,9	271,4	85,4	46,5	14,6	1,48	0,45
B18-E12	6	364,8	311,9	85,5	52,9	14,5	2,06	0,46
B15-E2	9	315	172,8	54,9	142,2	45,1	1,57	0,6
B20-E3	5	410	357	87,1	52,9	12,9	1,94	0,52
B22-E4	10	331,3	284,7	85,9	46,6	14,1	2,12	0,5
B27-E6	7	330,4	274,1	83	56,4	17,1	1,97	0,4

Fonte: Autores (2021).

Através dos dados obtidos pelo PDA e analisados pelo método CAPWAP, é possível determinar as curvas de resistência mobilizada (RMX) versus o deslocamento máximo de cada golpe (DMX). A Figura 9 representa a curva RMX x DMX da estaca ensaiada B15-E2, e a Figura 10 apresenta todas as curvas juntas.

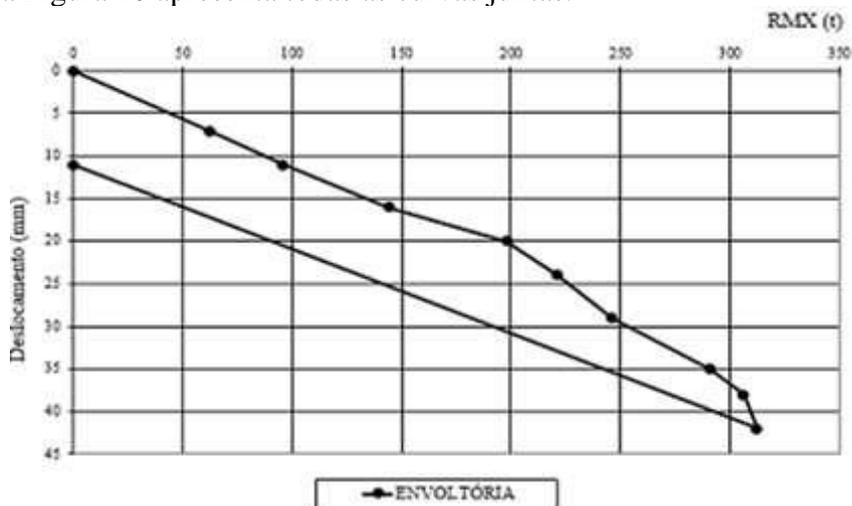


Figura 9 - Curva Resistência x Deslocamento da Estaca B15-E2.

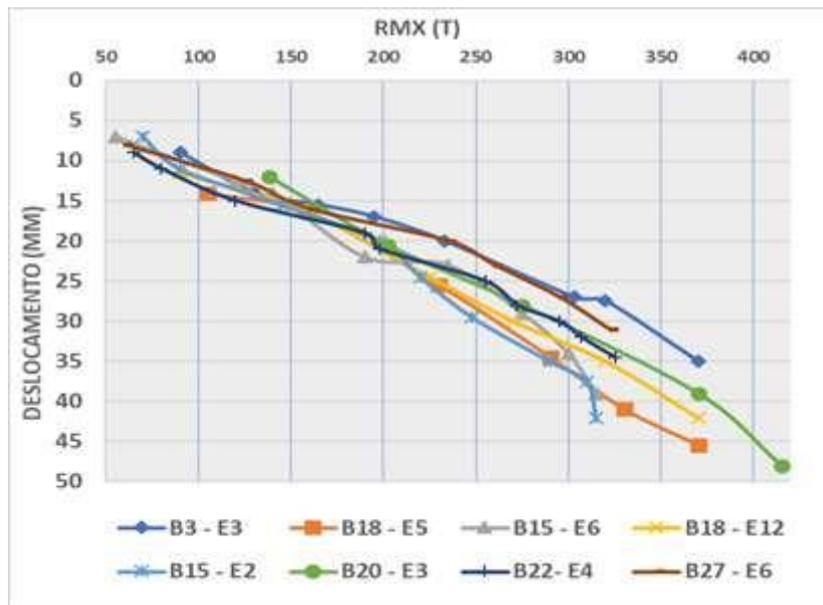


Figura 10 - Curva Resistência x Deslocamento das 8 estacas ensaiadas.

3.2. Simulação de Prova de Carga Estática

O método de análise CAPWAP é capaz de simular prova de carga estática, e consequentemente elaborando uma curva carga x recalque. Nas Figura 11 é apresentada a simulação de uma das estacas ensaiadas, correspondente à estaca B15-E2. A linha contínua representa o comportamento da região onde houve a instrumentação no fuste da estaca, enquanto que a linha tracejada representa o comportamento da ponta da estaca.

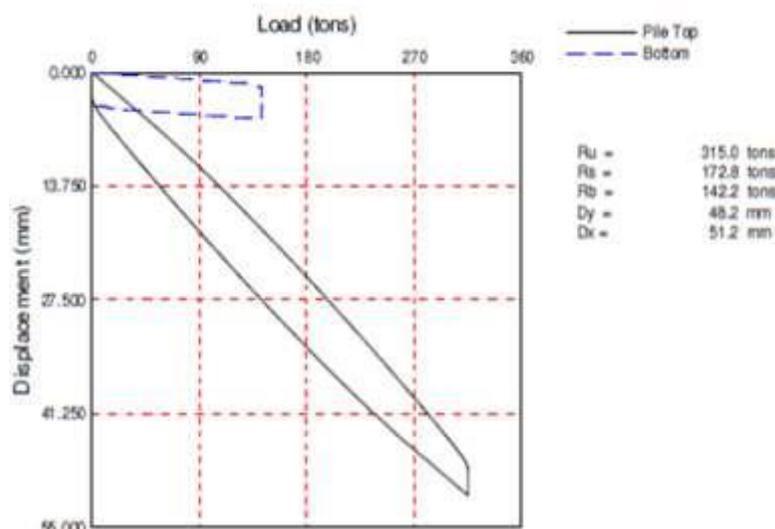


Figura 11 - Simulação de Prova de Carga Estática da estaca B15-E2.

O método de análise CAPWAP calcula a carga e o recalque resultante no topo para cada carga incremental na ponta. Considerando a elasticidade do solo, da estaca, velocidade de deslocamento da estaca nula em relação ao solo. Após um período de repouso após a

cravação, o comportamento registrado pode ser diferente, uma vez que a simulação é feita no momento do ensaio.

3.3. Apresentação e análise dos resultados das provas de carga

São expressos a seguir, os valores de deslocamento médio e máximo quando da aplicação de carregamento na faixa da carga de trabalho e no carregamento máximo atingido no ensaio.

Tabela 2 - Deslocamento médio e máximo de carregamento na faixa da carga e no carregamento máximo atingido.

Prova de carga	Estaca	Carga de trabalho (tf)	Carga máxima de ensaio (tf)	Recalque médio (mm)	Recalque máximo (mm)
1	P05-E03	157	-	12,1	12,7
1	P05-E03	-	210	18,97	21,73

Fonte: Autores (2021).

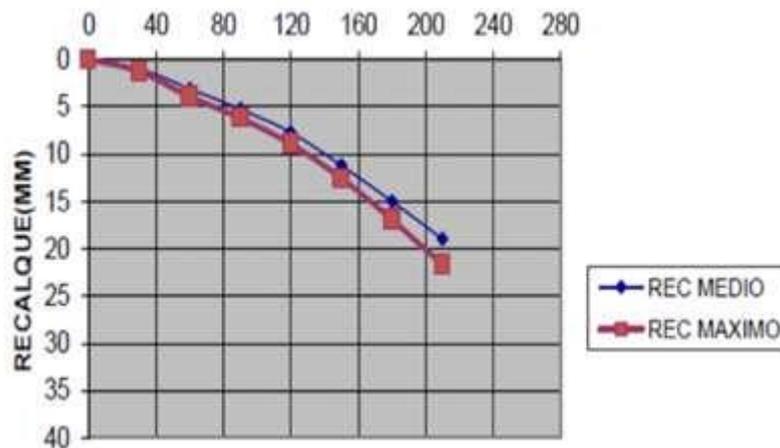


Figura 12 - Carga x Recalque da estaca B05-E03.

Apesar do ensaio não ter atingido a carga máxima prevista devido a um problema estrutural no bloco como observado na Figura 13, pode-se concluir pelos valores de recalque medidos na carga de trabalho, na carga máxima de ensaio e pela extrapolação da curva carga recalque, que os níveis de deslocamento impostos à estaca testada, bem como o coeficiente de segurança em relação à ruptura, ficaram dentro da faixa de valores admissíveis para a estrutura projetada.



Figura 13 - Falha estrutural no bloco durante Ensaio de Carregamento Lento.

Devido o rompimento do bloco e o fato de não ter sido possível comparar a carga de ruptura dos métodos semiempíricos e do PDA com a do carregamento lento, utilizou-se das recomendações da NBR 6122/2010 o método de extrapolação de Van der Veen, podendo assim, estimar a carga de ruptura do ensaio de carregamento lento no qual, a Figura 14 representa a extrapolação carga de ruptura.

O resultado obtido pelo método de extrapolação de Van der Veen foi de 3100kN para o valor de R² máximo. Utilizando o método gráfico da NBR-6122 para obter a extrapolação da carga de ruptura convencional temos, na figura 14.

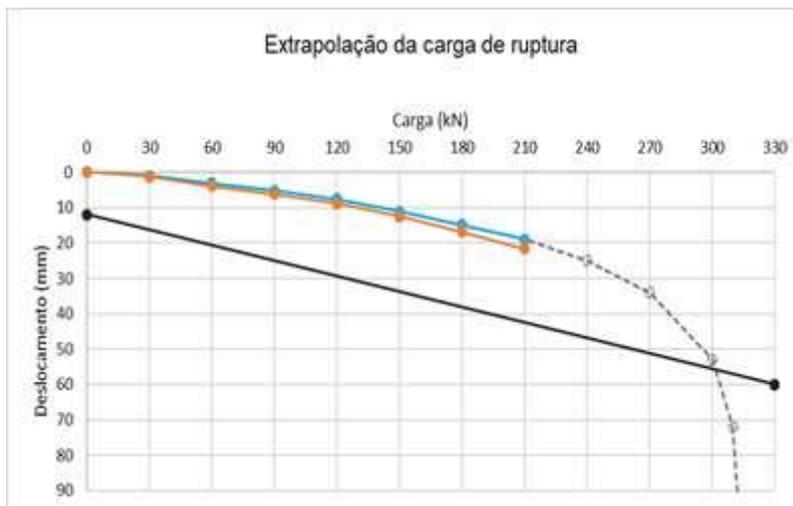


Figura 14 - Extrapolação da carga de ruptura.

Por tanto a carga de ruptura segundo o método de extrapolação de Van der Veen e as recomendações da NBR 6122, graficamente, é de aproximadamente 3100kN.

Nas figuras a seguir, são feitas comparações das 8 estacas ensaiadas entre as suas capacidades de carga: a obtida através de métodos semiempíricos (Aoki-Veloso e Decourt-Quaresma) as resistências máximas mobilizadas obtidas através do método CAPWAP e a máxima resistência obtida no método de extrapolação de Van der Veen, para o ensaio de carregamento lento, devido o rompimento estrutural do bloco confeccionado em obra.

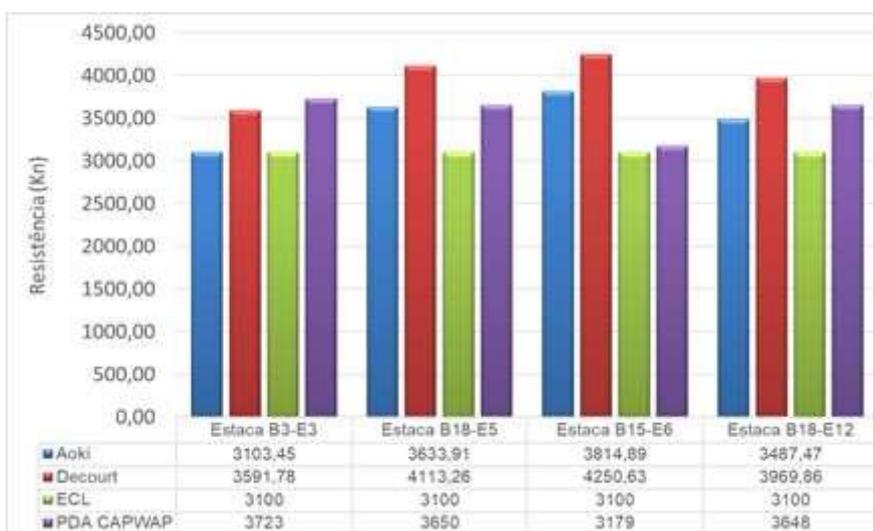


Figura 15 - Resumo comparativo B3-E3, B18-E5, B15-E6 e B18-E12.

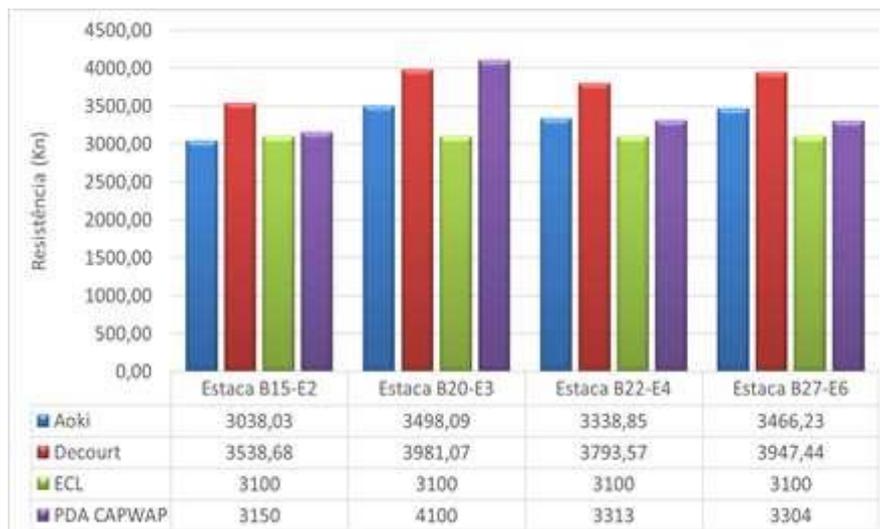


Figura 16 - Resumo comparativo B15-E2, B20-E3, B22-E4 e B27-E6.

4. Considerações Finais

No Ensaio de Carregamento Lento a estaca B5-E3 com 42 metros cravados, apresentou, de acordo com o método de extrapolação de Van der Veen e as recomendações da NBR 6122 a carga última de 3100 kN, sendo assim, valor muito próximo a energia mobilizada para carga de ruptura encontradas nas análises PDA CAPWAP, na qual, a média foi de 3508,37 kN, estando apenas 13,16% de diferença do valor da carga de ruptura mencionada. Tal resultado mostrou que a energia mobilizada foi próxima a seu valor máximo.

Em relação à carga última obtida pelo ensaio de carregamento lento obteve-se porcentagens comparativas dentro do intervalo esperado em relação aos métodos de cálculo semiempíricos e ensaio dinâmico observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resumo comparativo.

Estaca	Comparação com Ensaio de Carregamento Lento (3100kN)		PDA CAPQAP (%)
	Método de Cálculo		
	Aoki (%)	Decourt (%)	
B3-E3	0,11	15,86	20,1
B18-E5	17,22	32,69	17,74
B15-E6	23,06	37,12	2,55
B18-E12	12,5	28,06	17,68
B15-E2	-2	14,15	1,61
B20-E3	12,84	28,42	32,26
B22-E4	7,7	22,37	6,87
B27-E6	11,81	27,34	6,58

Fonte: Autores (2021).

Constatou-se que as estacas de maior comprimento apresentaram tendência de ter resultados maiores para capacidade carga pelos métodos semiempíricos. Tal resultado pode ser explicado pelo fato de as estacas terem maior de área de contato com o solo.

Os valores obtidos para a capacidade de carga foram considerados satisfatórios, confirmando a confiabilidade do estaqueamento.

Os gráficos de Força Medida e Força Calculada obtiveram uma sobreposição satisfatória, comprovando a eficiência dos métodos de análise.

O martelo de queda-livre utilizado mobilizou cargas satisfatórias, porém as mesmas

poderiam ser mais elevadas caso o equipamento possuísse um martelo com massa maior.

Os gráficos de Nega x DMX mostraram que as estacas com maior tempo de cravação possuem melhor correlação que as estacas de cravação mais recentes.

Através de todos os ensaios com energia crescente analisado pelo método CAPWAP, conclui-se que a Prova de Carga Dinâmica é uma boa opção para verificar a capacidade de carga;

Devido a possibilidade apresentada pela NBR 6122/2010 da substituição de ensaios estáticos por dinâmicos em sua maioria e perante os resultados satisfatórios dos inúmeros estudos e da vasta experiência nacional e internacional acerca da comparação de Ensaio de Carregamento Lento com Ensaio Dinâmico, esta última vem sendo cada vez mais utilizada, uma vez que, sua relação Custo x Benefício é melhor que da Prova de Carga Estática, devido sua boa produtividade e resultados conclusivos.

5. Agradecimentos

Agradecemos à construtora Quadra Engenharia LTDA, pelo fornecimento dos dados utilizados para a realização deste trabalho, agradecemos também à Universidade Federal do Pará por incentivar a pesquisa científica e dar condições necessárias para realiza-la durante a graduação.

Referências

ALONSO, U. R. *Previsão e Controle das Fundações 2ª edição*. Editora Blucher. São Paulo. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484. *Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Rio de Janeiro – RJ. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8036. *Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios*. Rio de Janeiro – RJ. 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12131. *Estacas - Prova de Carga Estática - Método de Ensaio*. Rio de Janeiro – RJ. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13208. *Estacas – Ensaio de Carregamento Dinâmico*. Rio de Janeiro – RJ. 2007.

VAN DER VEEN, C.; *The bearing capacity of a pile*; Proc. III ICSMFE, vol 2, pp. 84-90; Zurich; 1953

VELLOSO, D. A.; LOPES, FRANCISCO R. *Fundações. Critérios de projeto – Investigações de Subsolo – Fundações Superficiais*. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2004. 1 v.

VELLOSO, D. A.; LOPES, FRANCISCO R. *Fundações Volume 2. 2ª edição*. Editora Oficina De Textos. São Paulo. 2010.