



Estacas Pré Moldadas de Concreto Cravadas em São Vicente: Procedimentos Executivos e Desafios Superados

Jean Felix Cabette

Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, jeancabette@benaton.com.br

Daniel Kina Murakami

Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, daniel.murakami@benaton.com.br

Sydnei Augusto

Insert Engenharia, Santos, Brazil, sydnei@insert.eng.br

Cayami Cavalcante

Garden Park, São Vicente, Brazil, cayami@gmail.com

RESUMO: Segundo Avelino (2006), com o surgimento dos ensaios de carregamento dinâmico (ECD), o controle de qualidade de fundações profundas desenvolveu-se significativamente devido à facilidade na execução desses ensaios e seu relativo baixo custo. Este trabalho apresenta um procedimento de controle de fundações profundas em estacas pré-moldadas de concreto (Protocolo Benaton) na cidade de São Vicente, SP, inserida num subsolo composto por uma espessa camada de argila mole até cerca de 32 metros de profundidade, seguido por uma camada de solo arenoso até cerca de 36 metros de profundidade, onde a ponta das estacas foram embutidas. Na fase de projeto adotou-se através dos métodos semi empíricos Decourt & Quaresma (1982) e Aoki e Velloso (1985) a estaca com seção quadrada 295mm x 295mm para carga de trabalho de até 110 tf. No início da obra foi realizado o monitoramento “cravabilidade” com o equipamento PDA (Pile Driving Analyzer) para definição dos critérios de cravação para que a estaca atingisse a profundidade de projeto, de forma a minimizar as quebras de estacas (1%), uma vez que tratava-se de um grande desafio devido ao pouco espaço disponível para execução de reforços.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas Pré Moldadas, Ensaio de Carregamento Dinâmico, Procedimentos Executivos, PDA

ABSTRACT: According to Avelino (2006), with the emergence of dynamic load tests (DLT), the quality control of deep foundations has developed significantly due to the ease of performing these tests and their relatively low cost. This paper presents a procedure for controlling the deep foundations in precast concrete piles (Benaton Protocol) in the city of São Vicente, SP, inserted in a subsoil composed of a thick layer of soft clay up to about 32 meters deep, followed by a layer of sandy soil up to about 36 meters deep, where the toe of the piles was embedded. In the design phase, the semi-empirical methods Decourt & Quaresma (1982) and Aoki and Velloso (1985) foresaw piles with a square section of 295mm x 295mm for a workload of up to 110 tons. At the beginning of the pile installation, the pile monitoring (driveability) was carried out with the PDA (Pile Driving Analyzer) equipment to define the driving criteria for reaching the pile design depth in order to minimize the number of broken piles (1%), once it was a great challenge due to the little space available for reinforcements.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



KEYWORDS: Precast Concrete Pile, Dynamic Loading Test, Executive Procedures, PDA

1 Introdução

No Brasil os métodos semi-empíricos propostos por Aoki e Velloso em 1975 e modificado em 1985, além do método Decourt-Quaresma em 1978 com sua modificação proposta em 1982, são amplamente utilizados para dimensionamento das fundações profundas em estacas pré-moldadas de concreto.

Esses métodos foram desenvolvidos em função dos resultados de ensaios de campo, especialmente utilizando sondagens de simples reconhecimento (SPT) e provas de carga executadas em determinados tipos de estacas.

As figuras 1 e 2 ilustram a correlação entre provas de carga estática e os métodos semi-empíricos através da formulação original proposta pelos autores.

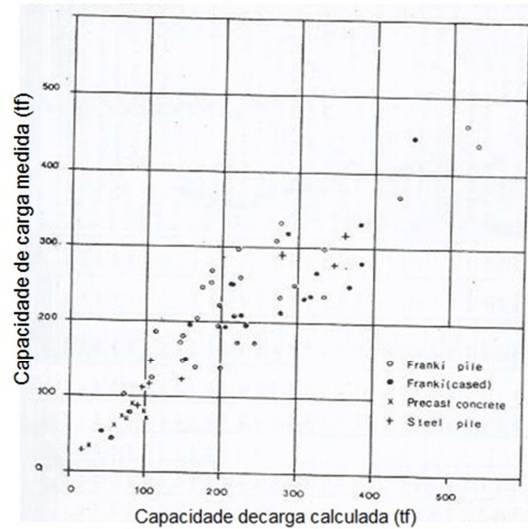


Figura 1. Correlação do Método Aoki & Velloso (1975) com provas de carga estática.

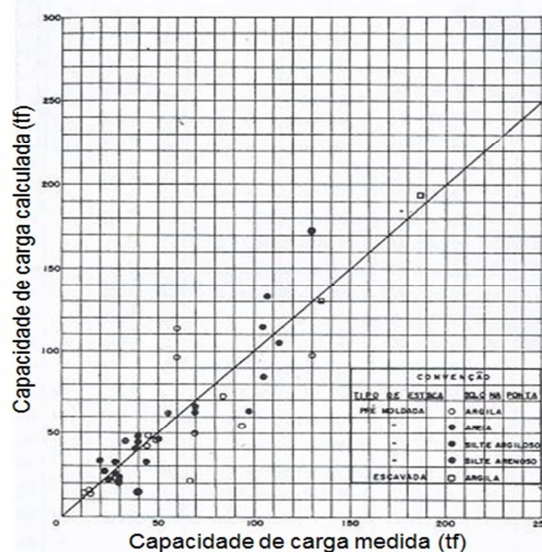


Figura 2. Correlação do Método Décourt & Quaresma (1978) com provas de carga estática.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





A norma brasileira de fundações NBR 6122:2022 estabelece a obrigatoriedade de provas de carga estática (PCE) que podem ser substituídas por ensaios dinâmicos na proporção de 5 ensaios dinâmicos para cada (PCE) em algumas situações. No caso específico de estacas pré-moldadas de concreto, quando a tensão admissível for superior a 7,0 MPa ou o número de estacas do projeto de fundações for superior a 100, existe a necessidade da realização das provas de carga. A quantidade mínima em (PCE) é equivalente a 1% (um por cento) do total de estacas do projeto, sendo que para obras acima de 200 estacas se faz obrigatória pelo menos uma (PCE) e os demais ensaios podem ser substituídos por ensaios dinâmicos;

2 Objetivos

Este artigo tem como objetivo apresentar um procedimento de controle de fundações profundas em estacas pré-moldadas de concreto, denominado de “Protocolo Benaton” na cidade de São Vicente, SP, inserida num subsolo composto por uma espessa camada de argila mole até cerca de 32 metros de profundidade, seguido por uma camada de solo arenoso até cerca de 36 metros de profundidade, onde a ponta das estacas foram embutidas. Na fase de projeto adotou-se através dos métodos semi empíricos Decourt & Quaresma (1982) e Aoki e Velloso (1985) a estaca com seção quadrada 295mm x 295mm para carga de trabalho de até 110 tf. No início da obra foi realizado o monitoramento “cravabilidade” com o equipamento PDA (Pile Driving Analyzer) para definição dos critérios de cravação para que a estaca atingisse a profundidade de projeto, de forma a minimizar as quebras de estacas (1%), uma vez que tratava-se de um grande desafio devido ao pouco espaço disponível para execução de reforços.

3 Metodologia

Serão apresentadas as estimativas de capacidade de carga das estacas com a utilização dos métodos semi-empíricos consagrados na literatura nacional, posteriormente a realização da “cravabilidade” com o equipamento PDA para validação da carga de projeto, assim como uma melhoria do projeto utilizando a Prova de Carga Estática (PCE), e por fim a padronização do sistema de cravação das estacas.

4 Caso de Obra

4.1 Descrição da obra

O caso de obra se refere à construção de um edifício residencial com 29 pavimentos localizado na cidade de São Vicente, SP. O projeto de fundações foi desenvolvido através de 300 estacas pré-moldadas de concreto, cuja maior seção utilizada possuía geometria quadrada de lado 295mm para carga de trabalho de até 110 tf

Foram idealizados os seguintes ensaios a serem executados para atendimento da NBR6122:2022 1 (uma) PCE e 15 (quinze) ensaios dinâmicos

4.2 Estimativas Decourt & Quaresma (1982) e Aoki & Velloso (1985)

A tabela 1 indica a previsão de capacidade de carga da seção de projeto da seção quadrada com lado de 295mm

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Table 1. Estimativa da capacidade de carga através de métodos semi-empíricos

Estimativa da Capacidade de Carga das estacas a compressão (tf)					Comprimento Estimado por Sondagem (Metros)
Sondagem	Decourt & Quaresma (1982)		Aoki e Velloso (1975)		
	Ruptura (tf)	Admissível (tf)	Ruptura (tf)	Admissível (tf)	
SP-01	236	118	232	116	36
SP-02	239	119	287	143	36
SP-03	231	116	244	122	37
SPT-04	225	112	229	115	39
SPT-05	223	111	271	135	37

Com base na previsão de capacidade de carga realizada através dos métodos semi-empíricos Décourt & Quaresma (1982) e Aoki & Velloso (1985), foi observado que os valores obtidos através desses métodos atenderia a solicitação de projeto de 110tf.

4.3 Resultados e Procedimento de Controle (Protocolo Benaton)

Para realização do ensaio de monitoramento da estaca “cravabilidade”, devem ser conhecidos os parâmetros limitrofes do produto “Estaca de concreto protendida” para que o procedimento possa ser bem sucedido. Nesse caso seriam as tensões de trabalho recomendáveis, segundo a NBR6122:2022, a saber:

- Estaca Protendida – $f_{ck} = 40\text{MPa}$
- Tensão de Compressão = $85\% \times 40 - 3$ (Tensão de Protensão) = 31MPa
- Tensão de Tração = $90\% \times 3 + (0,21 \times \sqrt[3]{40^2}) \times 50\% = 3,9\text{MPa}$

Sendo realizada o monitoramento com o PDA “cravabilidade”, esses limites podem ser aumentados em até 10%, ou seja, teríamos as seguintes tensões admissíveis, compressão máxima de 34MPa e tração máxima de $4,3\text{MPa}$

No início da obra foi realizado o ensaio de cravabilidade da estaca E275 com o uso do PDA (Pile Driving Analyzer) da fabricante Pile Dynamics, Inc., (figura 3) com intuito de verificar a altura de queda ideal do martelo minimizando as tensões de compressão e tração conoforme já observado por Murakami e Cabette (2014, 2022), assim como ensaios de carregamento dinâmico (ECD) na estaca E275 nas seguintes datas: Término da Cravação (figura 4), e após 9 dias (figura 5). Em todos os casos foi utilizado martelo com massa 6 toneladas com altura de queda variável de 0,3 a 0,5 metros, sendo finalizada a cravação com 0,4 metros de altura de queda para medição da nega e repique elástico.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



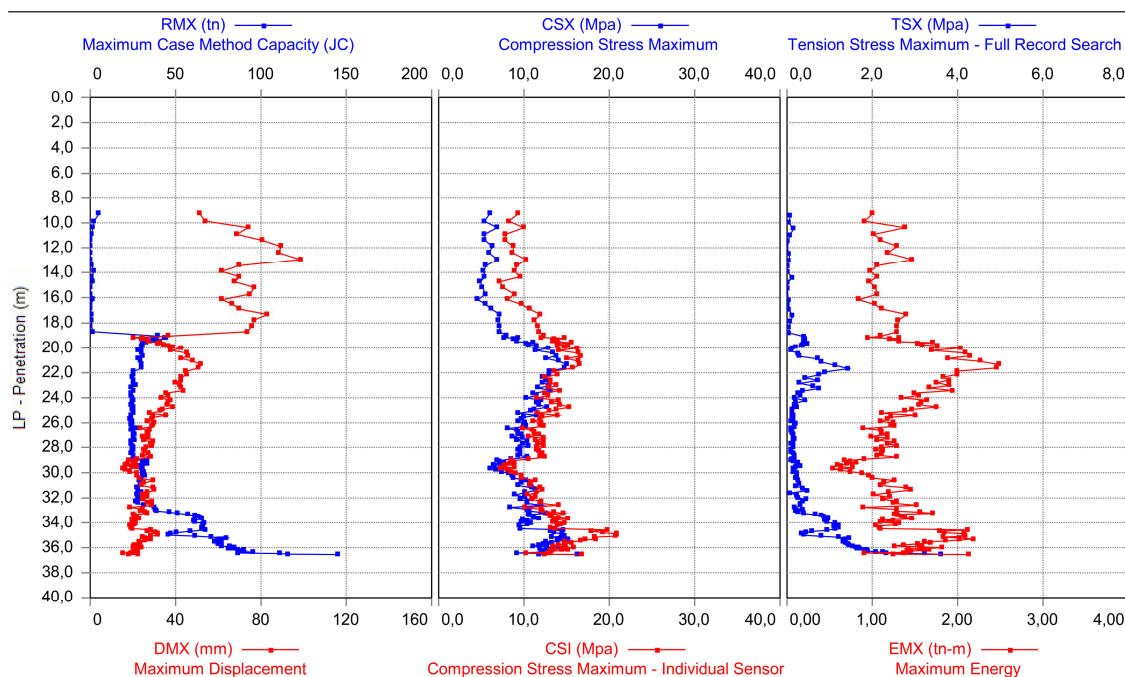


Figura 3. Ensaio de cravabilidade da estaca E275.

A nomenclatura dos parâmetros indicados na cravabilidade estão abaixo:

Legenda – Gráficos: Método Case – Reprocessamento dos Sinais: Programa PDI PLOT

LP: Comprimento abaixo do Solo

RMX: Carga mobilizada calculada pelo método CASE

DMX: Deslocamento máximo durante a aplicação do golpe

CSX: Tensão máxima de compressão na região dos sensores (média das leituras dos sensores)

CSI: Tensão máxima de compressão na região dos sensores (leitura máxima)

TSX: Máxima tensão de tração ao longo do fuste da estaca

EMX: Energia máxima transferida pelo golpe na seção dos sensores

Com base no gráfico da figura 3, observa-se que as tensões de compressão foram variáveis com a profundidade com valor máximo da ordem de 21MPa, valor esse abaixo do limite de 34MPa. Quanto a tensão de tração foi variável com a profundidade com aumento significativo ao término da cravação, com valores máximo da ordem de até 3,9MPa, e nos últimos golpes após o término da cravação, foi realizado o ensaio de carregamento dinâmico com altura crescente e verificou-se tensão da ordem de 5MPa, dessa forma o ensaio foi paralisado para que não houve risco de quebra

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



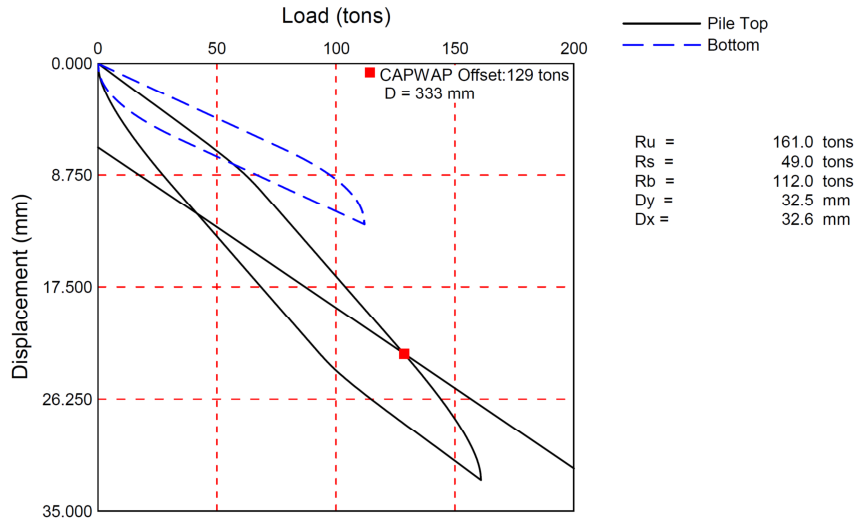


Figura 4. Ensaio Dinâmico E275 – No final da cravação, sem considerar cicatrização do solo

De acordo com a figura 4, observa-se a carga máxima mobilizada ao término da cravação foi de 161,0 tf, porém o limite de Davisson “Offset Line” foi ultrapassado pois a estaca não possuía muito atrito lateral e carga estava concentrada na ponta da estaca (49,0 tf (Atrito Lateral) e 112,0 tf (Ponta))

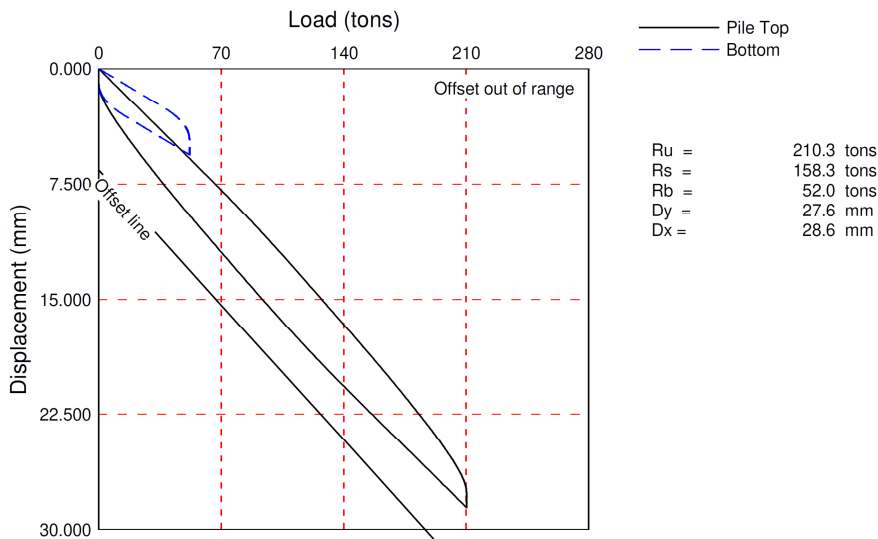


Figura 5. Ensaio Dinâmico E275 – 9 dias de repouso após a cravação

De acordo com a figura 5, observa-se a carga máxima mobilizada após 9 dias da cravação foi de 210,3 tf, e o limite de Davisson “Offset Line” não foi ultrapassado, porém o ensaio teve que ser paralisado pois a tensão de tração estava elevada, sendo assim o resultado que foi obtido não é de ruptura (158,3 tf (Atrito Lateral) e 52,0 tf (Ponta)).

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Em campo, conforme resultados obtidos através dos ensaios dinâmicos acima, e com base na experiência em obras anteriores, foi definido o procedimento de cravação com martelo do tipo queda livre de massa igual a 6.000kg, onde as estacas poderiam ser paralisadas se obtivessem simultaneamente valores de nega inferiores a 15mm/10 golpes com altura de queda de 0,40 metro e repique elástico mínimo de 18mm. Os comprimentos obtidos na cravação das estacas ficaram muito próximos da previsão de comprimentos estimado através dos métodos semi empíricos, e os resultados foram satisfatórios para atendimento das cargas de projeto e da NBR6122:2022.

Foi realizada a prova de carga estática (PCE) com intuito de utilizar o dispositivo prescrito na NBR6122:2022, item 6.2.1.2.2 Resistência determinada por provas de carga estáticas executadas na fase de alteração ou adequação do projeto, conforme figura 6, para redução de fator de segurança do projeto para 1,6 de forma a fazer a racionalização do projeto de fundações personalizado para a obra em questão. Maiores informações sobre a correlação entre PCE e Ensaio Dinâmico dessa obra pode ser encontrada em Murakami e Cabette (2023);

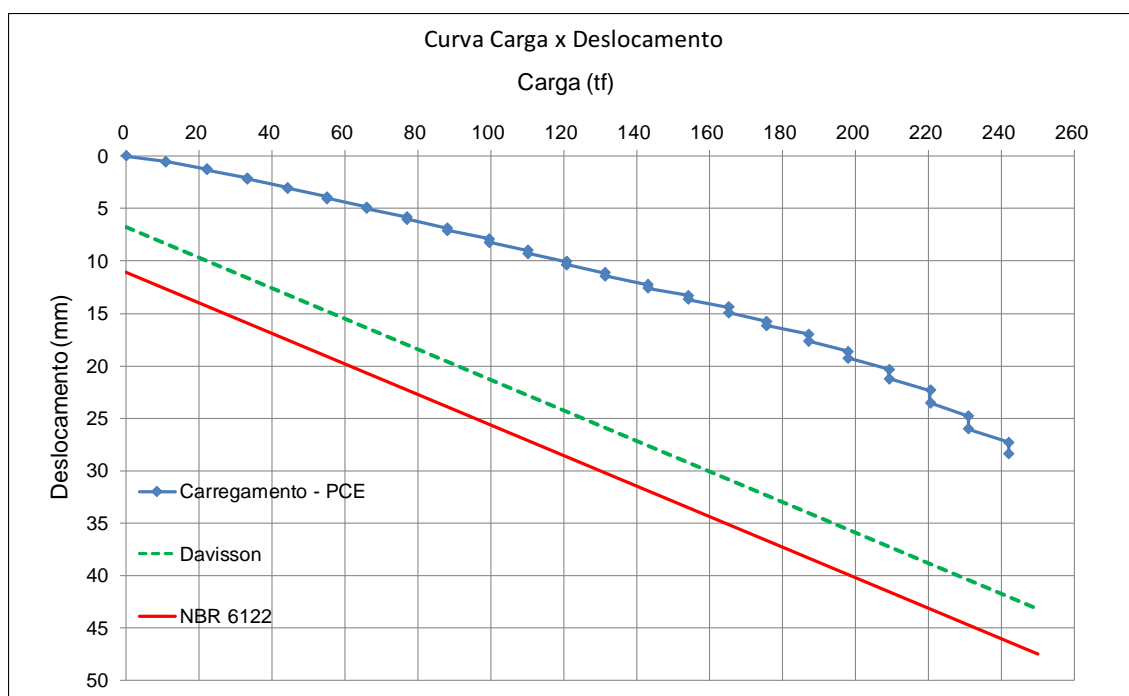


Figura 6. Prova de Carga Estática na estaca ET01

No gráfico da figura 6, observa-se que a o ensaio teve ser que paralisado quando havia sido mobilizadas 242,0tf devido a ruptura estrutural da estaca, mesmo o valor estando longe das rupturas de Davisson e da NBR6122:202;

Com base nos resultados da prova de carga estática foi possível reduzir o fator de segurança de 2,0 para 1,6 (NBR6122:2022) e houve alteração na carga de trabalho que passou de 110tf para 125tf, dessa forma os ensaios dinâmicos que foram realizados tiveram como meta mobilizar cerca de 200tf, critério esse que foi atendido nas demais estacas analisadas;

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



De acordo com o gráfico da figura 7, é possível verificar a variação estatística dos comprimentos cravados executados na obra.

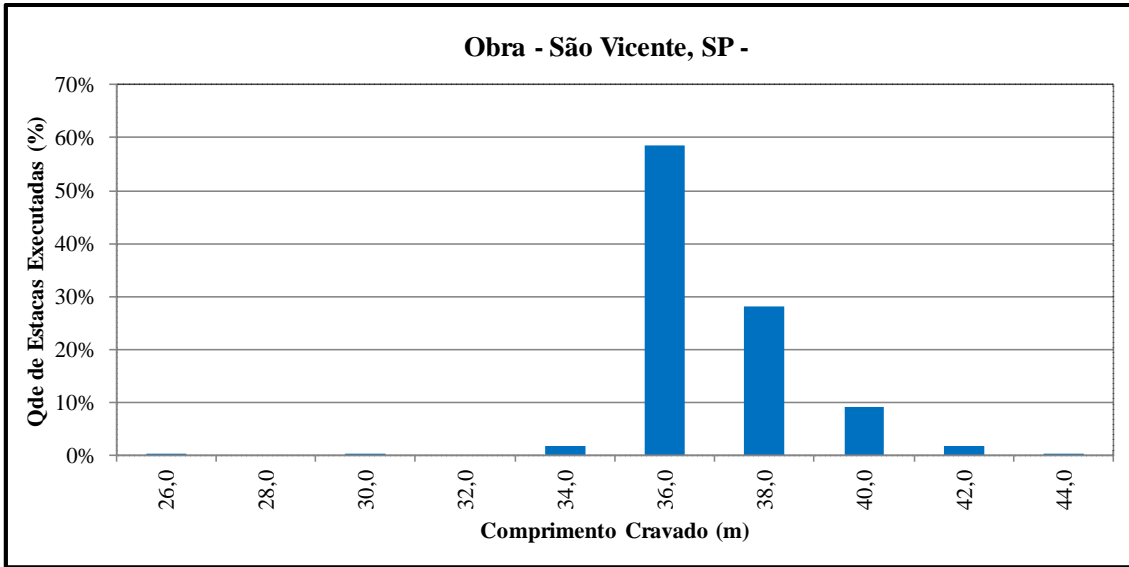


Figura 7. Variação estatística dos comprimentos cravados na obra

No gráfico da figura 8, pode-se observar a variação estatística das negas p/ 10 golpes obtidas na obra.

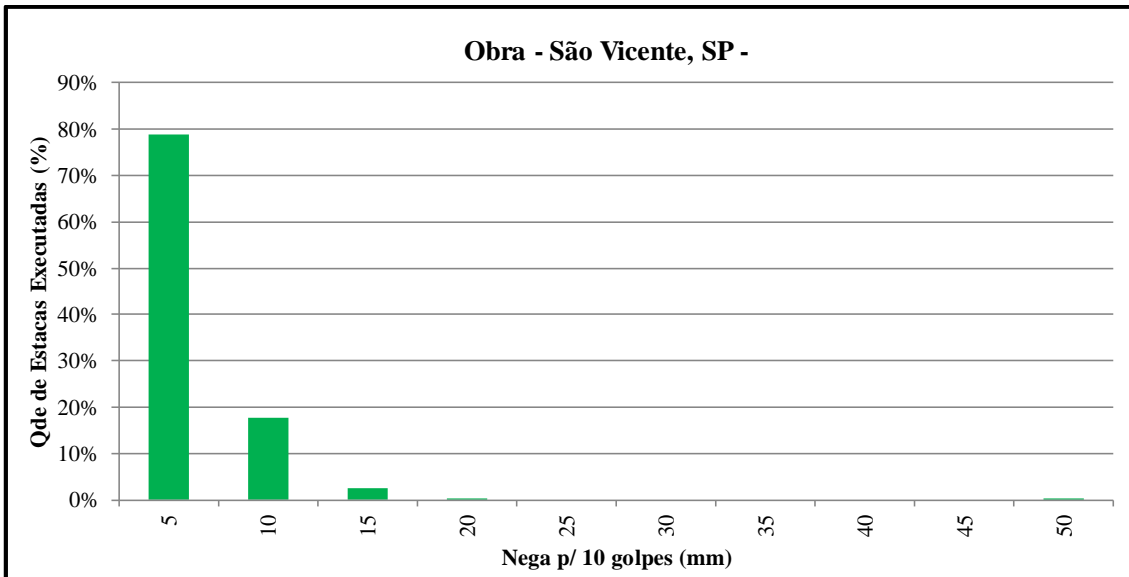


Figura 8. Variação estatística das nega p/ 10 golpes obtidas na obra.

Com auxílio do gráfico da Figura 9, é possível verificar a variação estatística dos repiques obtidos na obra.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



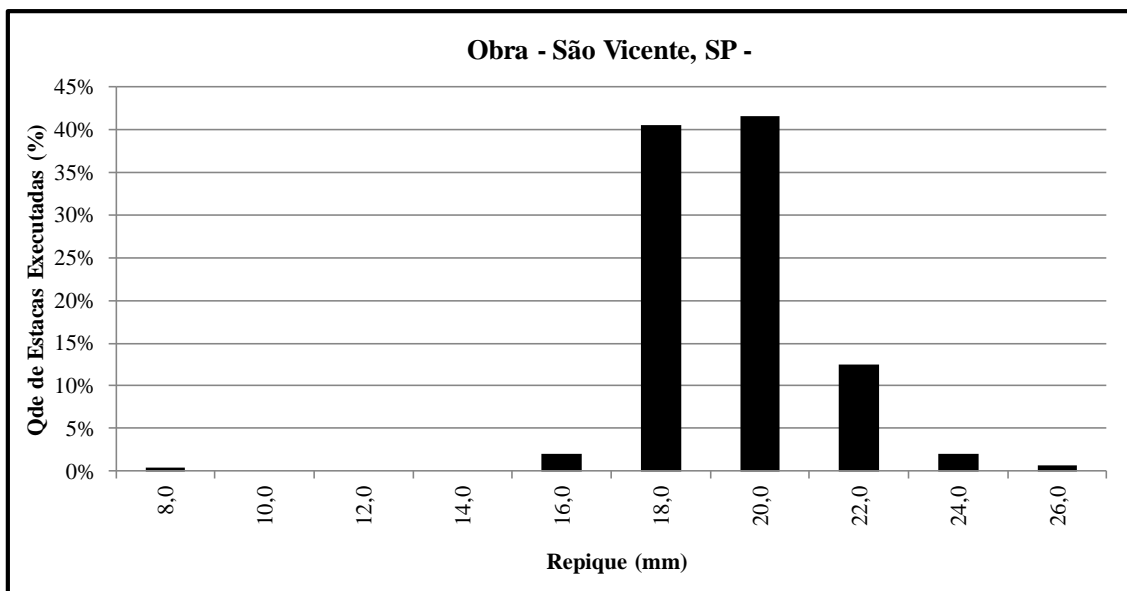


Figura 9. Variação estatística dos repiques obtidos na obra.

No total da obra foram cravadas cerca de 300 estacas, totalizando aproximadamente 11.200 metros e foram observadas apenas 3 quebras de estacas o que representa cerca de 1,0%.

5 Considerações Finais

O grande desafio dessa obra foi tornar possível a utilização de cargas elevadas nas estacas pré-moldadas de concreto de até 125tf ou equivalente a tensão admissível de até 14MPa, mantendo rigoroso processo de controle do estaqueamento com medição de nega e repique elástico que permitiu controlar a uniformidade quanto ao critério de paralização das estacas, conforme pode ser observado nos gráficos das figuras de 7 a 9.

O Protocolo Benaton, estabelece que sejam feitos os ensaios para comprovação das cargas atuantes na fase inicial da obra para validação do estudo semi-empírico, e definido rigoroso controle de execução das estacas para que não fujam do padrão definido, uma vez que o critério não é atingido a estaca é separada para realização de ensaio e avaliação técnica quanto ao desempenho dessa estaca, de forma que todas as premissas definidas na NBR6122:2022 sejam atendidas com segurança e qualidade;

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Benaton Specialist pela autorização dos dados necessários para a elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOKI, N. e VELLOSO, D. A.; An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles.; Proceedings of the 5th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, vol. 1, 1975.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



- Aoki, N.; A new dynamic load test concept.; Drivability of piles (1): 1-4, Proc. Discussion Session 14, Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng. (12), Rio de Janeiro, 1989
- Aoki, N.; Determination of Pile Capacity of Driven Piles on the Dynamic Increasing Energy Test,” D.Sc. thesis, University of São Paulo at São Carlos School of Engineering, São Carlos, Brazil, 1997(in Portuguese)
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. Solo- Prova de carga estática em fundação profunda. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 13208; Estacas Ensaio de carregamento dinâmico, Rio de Janeiro, 2007.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6122; Projeto e Execução de Fundações, Rio de Janeiro, 2022.
- Avelino, J. D., Análise de Desempenho de Estacas de Fundação em um Terreno com Presença de Solos Moles. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- DÉCOURT, L. e QUARESMA, A. R. Capacidade de Carga de Estacas a partir de Valores de SPT. Anais do 6º COBRAMSEF, Rio de Janeiro, vol.1, p. 45-53, 1978.
- DÉCOURT, L. e QUARESMA, A. R., Como calcular (rapidamente) a capacidade de carga de uma estaca. Revista Construção São Paulo, n1800, Agosto, 1982, Separata.
- Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2014) Pile driving difficulties in soils with large quakes. Seminar presented in "Workshop - Ensaios de Carregamento Dinâmico e Monitoração de Cravação de Estacas (Pile Driving Analyzer e CAPWAP)", Carmix do Brasil, São Paulo, pp 1-8 (in Portuguese).
- Murakami, D. K., Cabette, J. F., Augusto, S., Cavalcante, C.; (2023) A Comparison Between Static and Dynamic Load Tests Results in a 29.5 cm-Square Precast Concrete Pile. SEFE 10, São Paulo, SP (artigo submetido)
- Murakami, D. K., Cabette, J. F.; (2022) Pile Driving Difficulties in Soils with Large Toe Quakes. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Campinas, SP
- PILE DYNAMICS, INC. CAPWAP manual, Cleveland, 2006.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

