

Desenvolvimento Sustentável Em Fundações Profundas: Estudo de Caso de Obra de Edifício em São Paulo

Daniel Kina Murakami

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

Jean Felix Cabette

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

Eduardo Eroico Sobrinho

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

Sérgio Mello

Appogeo Assessoria e Projetos Geotécnicos, São Paulo, Brasil, sergiomello@appogeo.com.br

RESUMO: Este artigo apresenta a otimização das fundações de um edifício na zona leste de São Paulo, SP, através da redução do diâmetro das estacas pré-moldadas de concreto, aliando redução de custos e segurança de desempenho. O projeto original previa estacas circulares de 30 cm (40 tf), 40 cm (70 tf) e 50 cm (100 tf), com comprimentos entre 16 e 26 metros. Devido às restrições orçamentárias, um estudo alternativo foi realizado, inspirado em caso semelhante de Cabette e Murakami (2024), utilizando estacas de $\phi 38$ cm (100 tf) e 28 m. Propôs-se estacas de 26,5x26,5 cm (70 tf) e 29,5x29,5 cm (100 tf), com martelo de 6.000 kg. As sondagens indicaram argila mole (11 m) e areia com Nspt crescente (até 30 golpes entre 16 e 26 m). O procedimento de campo (Cabette e Murakami, 2023) incluiu monitoramento da cravabilidade com PDA, definindo critérios de nega e repique, e ensaios dinâmicos na recravação. O PDA indicou que as estacas atingiam o dobro da carga de trabalho, com comportamento similar ao caso de Murakami e Cabette (2022). Adotou-se nega menor que 10 mm/10 golpes, com alturas de queda de 40 cm (26,5x26,5 cm) e 50 cm (29,5x29,5 cm). A otimização reduziu concreto e aço em 35%, promovendo a sustentabilidade. O projeto foi concluído com sucesso.

PALAVRAS-CHAVE: Desenvolvimento Sustentável; Estacas Pré-Moldadas; Cravabilidade; PDA; Critérios de Cravação.

ABSTRACT: This paper presents a foundation optimization for a building in São Paulo, Brazil, achieving cost reduction by decreasing precast concrete pile diameters, combining cost reduction with performance safety. The original design specified 30 cm (40 tf), 40 cm (70 tf), and 50 cm (100 tf) circular piles, with lengths between 16 and 26 meters. Due to budget constraints, an alternative design, inspired by a similar case by Cabette and Murakami (2024) using $\phi 38$ cm (100 tf), 28 m piles, was developed. 26.5x26.5 cm (70 tf) and 29.5x29.5 cm (100 tf) piles were proposed, using a 6,000 kg drop hammer. Soil investigations revealed soft clay (11 m) and sand with increasing Nspt (up to 30 blows between 16 and 26 m). Field procedures (Cabette and Murakami, 2023a) included PDA monitoring, defining set and rebound criteria, and dynamic retap testing. PDA results indicated that piles achieved twice the design load, similar to the case by Murakami and Cabette (2022). A set criterion of less than 10 mm/10 blows was adopted, with drop heights of 40 cm (26.5x26.5 cm piles) and 50 cm (29.5x29.5 cm piles). The optimization achieved a 35% reduction in concrete and steel, promoting sustainability. The project was successfully completed.

KEYWORDS: Sustainable Development; Precast Concrete Piles; Driveability; PDA Testing; Pile Driving Criteria



1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções sustentáveis e economicamente viáveis em projetos de fundações é um desafio constante na engenharia geotécnica. A otimização do projeto, aliada a métodos construtivos eficientes e seguros, contribui para a redução do consumo de recursos e a minimização do impacto ambiental da construção civil. Este artigo apresenta um estudo de caso que demonstra como a análise criteriosa das condições do subsolo, a colaboração entre projetistas e a utilização de ferramentas como o Pile Driving Analyzer (PDA) podem levar a soluções inovadoras e sustentáveis em projetos de fundações.

O projeto em questão trata da construção de um edifício residencial na Zona Leste de São Paulo, SP. O projeto original de fundações previa a utilização de estacas pré-moldadas de concreto com seções circulares de diferentes diâmetros: 30 cm para cargas de até 40 tf, 40 cm para 70 tf e 50 cm para 100 tf. Os comprimentos estimados para essas estacas variavam entre 16 e 26 metros. Diante das restrições orçamentárias apresentadas pela construtora, surgiu a necessidade de um estudo alternativo para otimização das fundações, buscando a redução de custos sem comprometer a segurança e o desempenho da obra.

Um caso de obra similar, descrito por Cabette e Murakami (2024), demonstrou a viabilidade da utilização de estacas pré-moldadas de concreto com diâmetro de 38 cm e comprimento de 28 metros para cargas de até 100 tf. Nesse caso, a capacidade de carga das estacas foi comprovada por meio de ensaios de carregamento dinâmico (ECD). Inspirados por essa experiência, e considerando as características do subsolo e as cargas de projeto do edifício em questão, propôs-se a utilização de estacas pré-moldadas com seções quadradas otimizadas: 26,5 cm x 26,5 cm para cargas de até 70 tf e 29,5 cm x 29,5 cm para cargas de até 100 tf. A cravação das estacas seria realizada com martelo de queda livre de 6.000 kg.

As sondagens realizadas no local da obra revelaram a presença de uma camada de argila mole com espessura aproximada de 11 metros, sobreposta a uma camada de areia. Os valores de N_{spt} na areia aumentavam com a profundidade, atingindo valores em torno de 30 golpes nos últimos metros, entre 16 e 26 metros de profundidade. Essa informação foi fundamental para a definição dos comprimentos das estacas e para a estimativa da sua capacidade de carga.

Durante a execução das estacas prova, foi adotado o procedimento de campo descrito por Cabette e Murakami (2023), que inclui o monitoramento da cravabilidade com o PDA. Esse procedimento, detalhado nas seções subsequentes, permitiu a otimização dos critérios de cravação, minimizando as tensões nas estacas durante a cravação e reduzindo o risco de quebras. Os resultados dos ensaios de PDA, bem como a análise da cravabilidade, serão apresentados e discutidos, demonstrando a eficácia da solução otimizada e a sua contribuição para a sustentabilidade da obra. A redução no consumo de concreto e aço, resultante da diminuição das seções das estacas, será quantificada, comprovando os benefícios econômicos e ambientais da solução proposta.

Maiores informações sobre os benefícios do monitoramento da cravação das estacas com PDA (cravabilidade) podem ser encontrados em Murakami e Cabette (2014, 2022, 2023a). Mesmo em casos de obra de pequeno porte onde a NBR 6122:2022 não obrigaria a realização de ensaios, Murakami e Cabette (2023b) mostrou um caso de obra onde se fez a otimização do projeto de fundações com o uso do PDA, contribuindo para um desenvolvimento sustentável nas fundações.

2 OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivo principal demonstrar a viabilidade técnica e econômica da otimização do projeto de fundações de um edifício residencial, utilizando estacas pré-moldadas de concreto com seções quadradas otimizadas e o monitoramento da cravabilidade com PDA. A otimização buscou reduzir o consumo de materiais e os custos da fundação, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade, sem comprometer a segurança e o desempenho estrutural.



Ao atingir esses objetivos, o artigo busca contribuir para a disseminação de boas práticas em projetos de fundações, incentivando a otimização de recursos, a utilização de tecnologias como o PDA e a adoção de soluções mais sustentáveis na construção civil.

3 METODOLOGIA

Este artigo utiliza uma metodologia que combina a análise de projetos de fundações, a aplicação de procedimentos de campo com monitoramento da cravabilidade por PDA, e a análise de resultados de ensaios de PDA, com o objetivo de avaliar a eficácia da otimização proposta para as fundações do edifício residencial.

3.1. Análise do Projeto Original e da Solução Otimizada

Inicialmente, foram analisados os documentos do projeto original de fundações, com foco nas especificações das estacas pré-moldadas de concreto. As dimensões, as cargas de trabalho e os comprimentos estimados foram examinados. A solução otimizada, que propôs a redução das bitolas das estacas, foi então analisada em detalhes, justificando a escolha das novas seções (26,5x26,5 cm e 29,5x29,5 cm) em relação às cargas de projeto e às condições do subsolo.

3.2. Sondagens e Caracterização do Subsolo

Os dados das sondagens realizadas no local da obra foram analisados para caracterizar o perfil geotécnico do subsolo. A identificação das camadas de argila mole e areia, bem como a variação dos valores de N_{spt} com a profundidade, foram consideradas na definição dos comprimentos das estacas e na estimativa da sua capacidade de carga.

3.3. Procedimentos de Campo e Monitoramento da Cravabilidade

O procedimento de campo descrito por Cabette e Murakami (2023) foi aplicado na execução das estacas prova. A metodologia, que inclui o monitoramento da cravação da estaca com o PDA (cravabilidade), permitindo ajustes na altura de queda do martelo para otimizar a cravação, minimizar as tensões nas estacas e reduzir o risco de quebras.

Os critérios de nega e repique, utilizados para definir o momento de paralisação da cravação, foram estabelecidos com base nos dados obtidos pelo PDA. A realização de ensaios dinâmicos na recravação também fez parte do procedimento, visando confirmar as premissas de projeto e garantir a capacidade de carga das estacas.

3.4. Análise dos Resultados do PDA

O PDA realizado em recravação permitiu comprovar que solução alternativa de projeto atendia a carga de trabalho das estacas com o fator de segurança estabelecido pela NBR 6122:2022. A análise CAPWAP, cujos resultados serão apresentados adiante, validou a capacidade de carga das estacas otimizadas.

3.5. Comparação com Caso de Obra Similar

Os resultados obtidos com a solução otimizada foram comparados com o caso de obra apresentado por Cabette e Murakami (2024), que utilizou estacas pré-moldadas de diâmetro 38 cm vazadas (parede de 9cm e Área de concreto de 819 cm²) em condições de solo e carga semelhantes. Este caso de obra era próximo da obra apresentada neste artigo. Sendo assim, essa comparação permitiu identificar ainda na fase de projeto a



possibilidade de redução de bitolas, uma vez que o caso de obra descrito pelos autores indicou boa capacidade de carga obtido através de ensaios dinâmicos.

Em campo, as estacas prova confirmaram a semelhança com o caso de obra apresentado por Cabette e Murakami (2024), como por exemplo: a) redução considerável da nega nos últimos 0,30 m com aumento de RMX; b) efeito set up (cicatrização do solo) atuando de forma rápida. Maiores detalhes podem ser encontrados em Cabette e Murakami (2024).

3.6. Quantificação da Redução de Custos e Impacto na Sustentabilidade

A redução no consumo de concreto e aço, resultante da utilização das estacas com seções otimizadas, foi calculada e comparada com o projeto original. O impacto dessa redução na sustentabilidade da obra foi avaliado, considerando a economia de recursos e a diminuição da emissão de gases de efeito estufa associada à produção e transporte de materiais.

Essa metodologia, combinando análise de projetos, procedimentos de campo com PDA, análise de resultados e comparação com casos similares, permitiu uma avaliação completa da solução otimizada, demonstrando sua viabilidade técnica, econômica e ambiental.

4 CASO DE OBRA

Este estudo de caso descreve a otimização das fundações de um edifício residencial na Zona Leste de São Paulo, SP. O projeto original especificava estacas pré-moldadas de concreto circulares com diâmetros variados: 30 cm (40 tf), 40 cm (70 tf) e 50 cm (100 tf), com comprimentos estimados entre 16 e 26 metros. Devido a restrições orçamentárias, buscou-se uma solução alternativa para otimizar os custos das fundações.

4.1 Solução Otimizada e Dados do Subsolo

Baseado em um caso similar descrito por Cabette e Murakami (2024), onde estacas de 38 cm de diâmetro vazadas (parede de 9 cm e Área de concreto de 819 cm²) e 28 m de comprimento suportaram cargas de até 100 tf, propôs-se a redução das bitolas das estacas, mantendo a mesma quantidade por pilar. As novas seções adotadas foram: 26,5x26,5 cm para cargas de até 70 tf e 29,5x29,5 cm para até 100 tf. Utilizou-se um martelo de queda livre de 6.000 kg para a cravação. As sondagens revelaram uma camada de argila mole (11 m) sobreposta a areia com valores de N_{spt} crescentes com a profundidade, atingindo 30 golpes entre 16 e 26 m.

4.2 Procedimento de Campo e Cravabilidade

Durante a execução das estacas prova, implementou-se o procedimento de Cabette e Murakami (2023), denominado Protocolo Benaton, realizando-se o monitoramento da cravação com PDA (Pile Driving Analyzer) (cravabilidade) para otimizar a altura de queda, minimizar quebras e controlar as tensões de cravação. Os critérios de cravação foram definidos com base na nega e repique obtidos no final da cravação (medidos com lápis) durante o monitoramento com o PDA. Após a cravação, ensaios dinâmicos na recravação confirmaram as premissas do projeto. O PDA indicou que as estacas atingiam o dobro da carga de trabalho, similarmente ao caso de Cabette e Murakami (2022), com diagrama de cravação indicando valores baixos (1 a 18 golpes) nos primeiros 22 metros e negas menores que 5 mm/10 golpes entre 25 e 30 m. Adotou-se o critério de cravação com nega menor que 10 mm/10 golpes, com alturas de queda de 40 cm (26,5x26,5 cm) e 50 cm (29,5x29,5 cm).

A Figura 1 mostra os resultados da cravabilidade feito na estaca prova de seção 29,5x29,5 cm, atingindo comprimento de 25,2 m. Nota-se um aumento considerável do RMX (Máxima resistência estática) nos últimos 30 cm no final da cravação. Este aumento de RMX é acompanhado da redução dos valores de DMX (Máximo



deslocamento dinâmico), onde se observa uma redução nos valores de nega e aumento nos valores do repique elástico.

As tensões máximas de compressão (CSI), tensões médias de compressão (CSX) e tensão média de tração (TSX) estiveram dentro dos limites aceitáveis para estacas pré-moldadas de concreto. No final da cravação, próximo à nega, os valores de CSI e CSX até diminuíram em relação aos valores medidos durante a cravação da estaca, atingindo valores da ordem de 18 MPa e 30 MPa, respectivamente. Por se tratar de martelo de queda livre, nem sempre é possível ajustar o bate estaca de forma que os valores de CSX e CSI fiquem bastante próximos. De forma geral, as tensões de compressão se mantiveram dentro das condições de segurança de forma a não causar danos nas estacas.

Entretanto, os valores de TSX foram maiores próximos à nega, atingindo valores da ordem de 3,5 MPa, enquanto que ao longo da cravação os valores de TSX ficaram menores que 1,2 MPa.

Nesta estaca prova, foi observada nega de 5 mm / 10 golpes e repique elástico de 19 mm. Foi utilizado um martelo de queda livre de 6.000 kg com altura de queda de 0,50 m. Com base nesta estaca prova, adotou-se o seguinte critério de cravação das estacas: nega menor que 10 mm / 10 golpes.

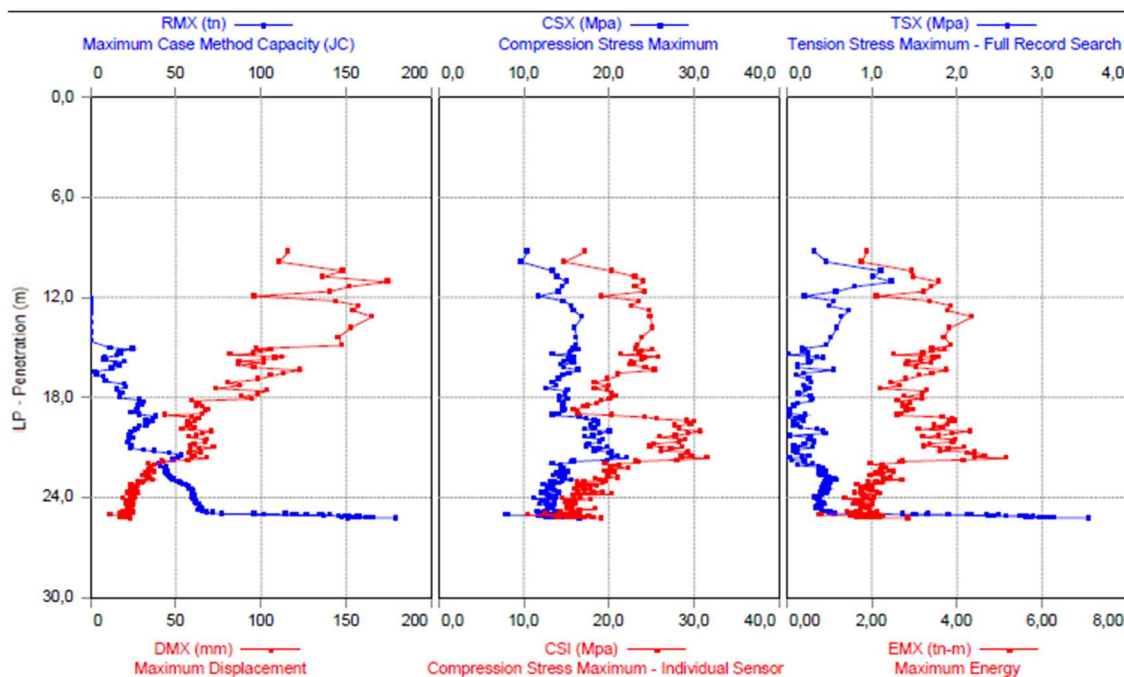


Figura 1. Monitoramento da cravação da estaca prova de seção 29,5x29,5 cm

A Figura 2 mostra os resultados da cravabilidade feito na estaca prova de seção 26,5x26,5 cm, atingindo comprimento de 25,10 m. Nota-se um aumento considerável do RMX (Máxima resistência estática) nos últimos 30 cm no final da cravação. Este aumento de RMX é acompanhado da redução dos valores de DMX (Máximo deslocamento dinâmico), onde se observa uma redução nos valores de nega e aumento nos valores do repique elástico.

As tensões máximas de compressão (CSI), tensões médias de compressão (CSX) e tensão média de tração (TSX) estiveram dentro dos limites aceitáveis para estacas pré-moldadas de concreto. No final da cravação, próximo à nega, os valores de CSI e CSX até diminuíram em relação aos valores medidos durante a cravação da estaca, atingindo valores da ordem de 15 MPa e 20 MPa, respectivamente. Entretanto, os valores de TSX foram maiores próximos à nega, atingindo valores da ordem de 4,3 MPa, enquanto que ao longo da cravação os valores de TSX ficaram menores que 1,8 MPa.



Nesta estaca prova, foi observada nega de 4 mm / 10 golpes e repique elástico de 18 mm. Foi utilizado um martelo de queda livre de 6.000 kg com altura de queda de 0,40 m. Com base nesta estaca prova, adotou-se o seguinte critério de cravação das estacas: nega menor que 10 mm / 10 golpes.

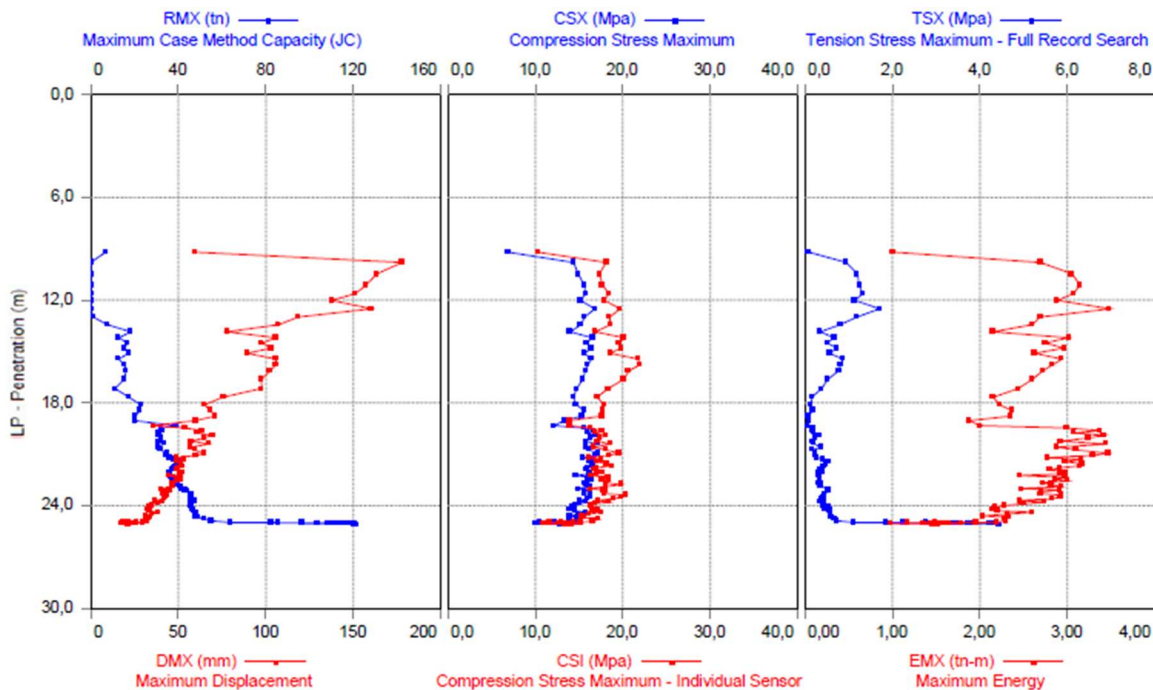


Figura 2. Monitoramento da cravação da estaca prova de seção 26,5x26,5 cm

4.3 Resultados dos Ensaios de PDA e Análise CAPWAP

A Tabela 1 mostra os resultados dos ensaios dinâmicos, indicando a idade da estaca, comprimentos cravados, altura de queda no ensaio, nega no golpe, assim como resultados da análise CAPWAP, onde há a indicação do atrito lateral, carga de ponta e RMX (soma do atrito lateral e carga de ponta). A análise dos resultados permitiu avaliar o desempenho das estacas otimizadas e verificar se a capacidade de carga atingida atendia aos requisitos do projeto.

Tabela 1. Resumo dos resultados dos ensaios dinâmicos

Estaca	Seção (cm)	Idade (dias)	Comprimento Cravado (metros)	Altura de Queda (m)	Nega (mm)	Atrito (tf)	Ponta (tf)	RMX (tf)
P33	26,5x26,5	0	25,10	0,50	1,0	81,0	79,0	160,0
P28	26,5x26,5	2	25,40	0,50	0,1	95,0	85,0	180,0
PB 8A	29,5x29,5	3	28,20	0,60	0,1	113,0	125,0	238,0
PB 9B	29,5x29,5	2	28,50	0,50	0,1	91,0	120,0	211,0
PB 26D	29,5x29,5	2	25,20	0,70	1,0	104,0	120,0	224,0

4.4 Resumo das estacas cravadas



A Figura 3 mostra os comprimentos obtidos das estacas cravadas. Nota-se maior parte das estacas (40%) atingiu comprimentos de 28 m, comportamento bastante similar ao caso observado por Cabette e Murakami (2024). A maioria das estacas (70%) obteve negas menores a 1 mm / 10 golpes (Figura 4), ocasionado pela grande resistência do solo nos últimos 0,30 m do final da cravação.

Já a Figura 5 indica os valores de repique elástico observados no final da cravação. Nota-se que boa parte (38%) atingiu valores de 19 mm de repique elástico.

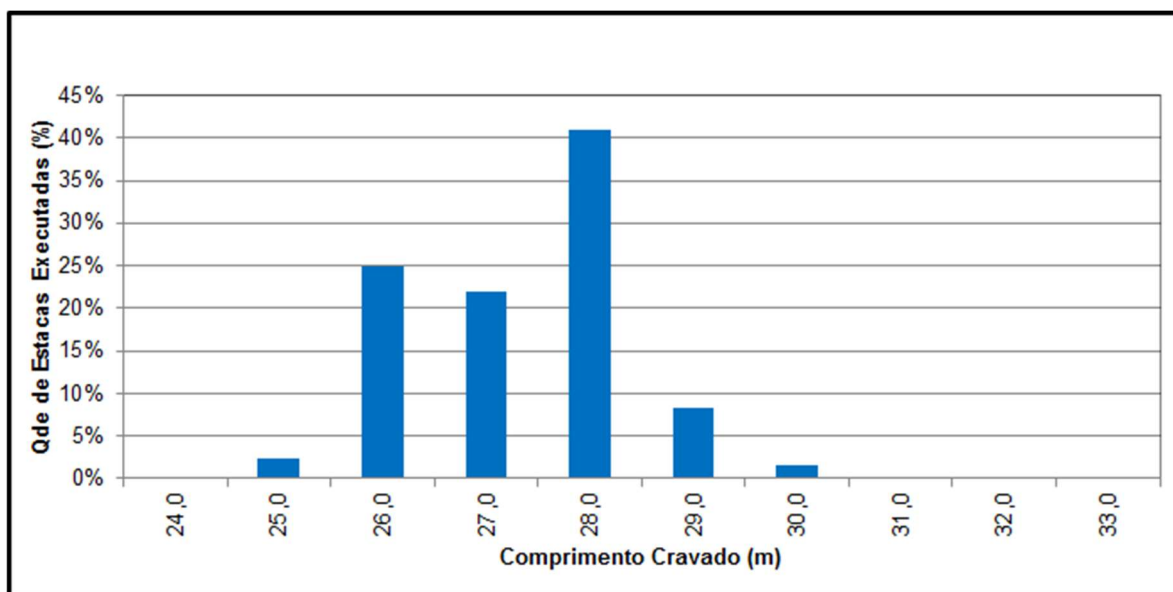


Figura 3. Comprimentos cravados das estacas

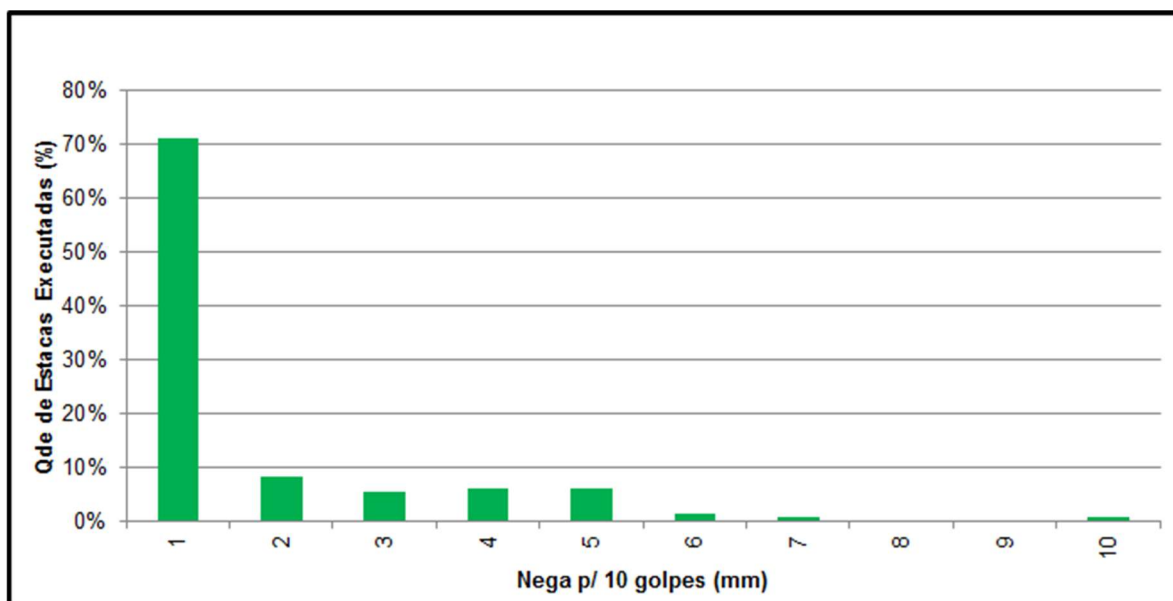


Figura 4. Negas obtidas no final da cravação



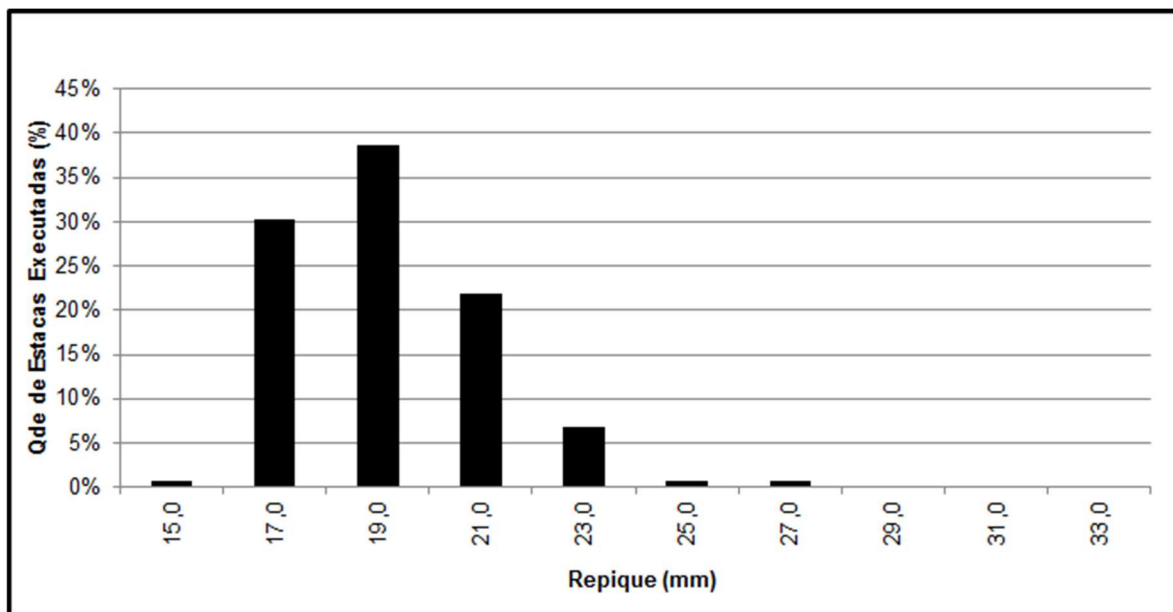


Figura 5. Repique elástico obtidos no final da cravação

4.5 Redução de Custos e Sustentabilidade

A otimização proporcionou uma redução de 35% no consumo de concreto e aço, contribuindo para a sustentabilidade do projeto. A solução otimizada, utilizando estacas com seções reduzidas e monitoramento com PDA, mostrou-se eficaz e economicamente viável, atendendo aos requisitos de carga e contribuindo para a sustentabilidade da obra.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo de caso demonstrou a viabilidade e a eficácia da otimização do projeto de fundações de um edifício residencial na Zona Leste de São Paulo. A redução das bitolas das estacas pré-moldadas de concreto, de diâmetros 30, 40 e 50 cm para 26,5x26,5 cm e 29,5x29,5 cm, resultou em uma economia significativa de materiais, comprovando que a otimização de custos pode ser alcançada com segurança e sem comprometer o desempenho da fundação. Este caso de obra utilizou os procedimentos descritos por Cabette e Murakami (2023) (Protocolo Benaton).

A utilização do PDA (Pile Driving Analyzer) foi fundamental para o sucesso da otimização. O monitoramento da cravabilidade permitiu ajustar a altura de queda do martelo, minimizar as tensões durante a cravação, reduzir o índice de quebras e definir critérios precisos de nega e repique. Os resultados do PDA, corroborados pela análise CAPWAP, confirmaram a capacidade de carga das estacas otimizadas, validando a solução proposta.

A comparação com o caso de obra similar de Cabette e Murakami (2024), que utilizou estacas de 38 cm, reforça a validade da abordagem adotada neste projeto. A redução de 35% no consumo de concreto e aço demonstra o impacto positivo da otimização na sustentabilidade da obra, alinhando-se com as práticas de construção sustentável e contribuindo para a redução do impacto ambiental.

Além dos benefícios econômicos e ambientais, a otimização das fundações demonstrou a importância da colaboração entre projetistas. O apoio do projetista original na realização da cravabilidade e dos ensaios de PDA foi fundamental para a validação da solução otimizada e para a garantia da segurança e do desempenho da fundação.



Este estudo de caso reforça a importância da análise criteriosa das condições do subsolo, da utilização de ferramentas como o PDA e da colaboração entre projetistas para o desenvolvimento de soluções otimizadas em projetos de fundações. A metodologia apresentada pode ser aplicada em outros projetos, contribuindo para a disseminação de boas práticas e para a construção de edifícios mais seguros, econômicos e sustentáveis. Futuros trabalhos podem explorar a aplicação dessa metodologia em diferentes tipos de solo e com outras configurações de estacas, ampliando o conhecimento na área e promovendo a inovação em projetos de fundações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13208 (2007) Estacas Ensaio de carregamento dinâmico, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6122 (2022) Projeto e execução de fundações, Rio de Janeiro.
- Cabette, J.F., Murakami, D. K. (2023) Estacas Pré Moldadas de Concreto Cravadas em São Vicente: Procedimentos Executivos e Desafios Superados. 10º Seminário de Fundações Especiais e Engenharia Geotécnica. São Paulo, SP.
- Cabette, J. F.; Murakami, D. K. (2024) A importância de apresentar ao menos duas soluções técnicas de fundações para livre escolha do proprietário. XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica; Balneário Camburiú, SC.
- Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2014) Dificuldade de cravação de estacas em solos com quakes elevados. Seminário apresentado em "Workshop - Ensaio de Carregamento Dinâmico e Monitoração de Cravação de Estacas (Pile Driving Analyzer e CAPWAP)", Carmix do Brasil, São Paulo, pp 1-8
- 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.
- Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2023) The Benefits of Pile Driving Monitoring for Precast Concrete Piles. Seminário de Fundações Especiais SEFE 10, São Paulo.
- Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2023) O Benefício do PDA na Redução de Custos em Obras de Pequeno Porte. Seminário de Fundações Especiais SEFE 10, São Paulo.

