

Otimização do Projeto de Fundações em Estacas Pré-Moldadas na Região de Campinas/SP Através do PDA e PCE

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

RESUMO: Este artigo apresenta a otimização das fundações de uma Estação de Tratamento de Esgoto em Campinas, SP, focando na redução de custos pela utilização de estacas pré-moldadas de concreto com seções menores. O projeto original previa estacas circulares de 25 cm (25 tf) e 30 cm (35 tf), com 6 a 8 m de comprimento, cravadas até a nega. Sondagens revelaram argila arenosa superficial (6 m), seguida por solo de alteração de rocha (argila silto-arenosa e areia argilosa) até 7,30-9,35 m. O nível d'água variou entre 8,15 m e 8,54 m, ausente em uma sondagem até 7,30 m. A otimização propôs estacas quadradas de 19,5x19,5 cm (25 tf) e 23,5x23,5 cm (35 tf), com martelo de 2.800 kg. A capacidade de carga foi estimada pelo método Aoki & Velloso (1985), considerando apoio em argila. O procedimento de campo (Cabette e Murakami, 2023) incluiu monitoramento da cravação com PDA, critérios de nega e repique, PDA na recravação e PCE. Nas estacas prova, a nega foi menor que 10 mm, com alturas de queda de 30 cm (19,5x19,5 cm) e 40 cm (23,5x23,5 cm). O PDA confirmou a capacidade de carga, com mobilização superior ao dobro do projeto, reduzindo quebras (0,3%) e otimizando o projeto com 22% de redução em concreto e aço. A solução viabilizou a obra, satisfazendo construtora e cliente. O artigo detalha procedimentos, resultados e economia.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização de Projetos de Fundações; Estacas Pré-Moldadas; Métodos Semi-Empíricos; PDA; Sustentabilidade.

ABSTRACT: This paper presents a foundation optimization case study for a Wastewater Treatment Plant in Campinas, Brazil, achieving cost reduction through smaller precast concrete pile sections. The original design called for 25 cm (25 tf) and 30 cm (35 tf) circular piles, driven to refusal, with lengths between 6 m and 8 m. Soil investigations revealed surficial sandy clay (6 m), underlain by weathered rock (silty sandy clay and clayey sand) to 7.30-9.35 m. The water table depth ranged from 8.15 m to 8.54 m, and was not encountered in one borehole to 7.30 m. Optimization involved 19.5x19.5 cm (25 tf) and 23.5x23.5 cm (35 tf) square piles, using a 2,800 kg drop hammer. Capacity was estimated using the Aoki & Velloso (1985) method, assuming clay tip bearing. Field procedures (Cabette and Murakami, 2023) included PDA driving monitoring, set and rebound criteria, retap PDA, and SLT. Test piles achieved less than 10 mm set with 30 cm (19.5x19.5 cm) and 40 cm (23.5x23.5 cm) drop heights. PDA confirmed pile capacity, with mobilized loads exceeding twice the design values, minimizing breakage (0.3%) and achieving a 22% reduction in concrete and steel. The optimized solution proved successful. The paper details procedures, results, and cost savings.

KEYWORDS: Foundation Design Optimization; Precast Concrete Piles; Semi-Empirical Methods; PDA Testing; Sustainability



1 INTRODUÇÃO

A busca por soluções otimizadas em projetos de fundações é uma constante na engenharia civil, impulsionada pela necessidade de aliar segurança, eficiência e economia. A escolha do tipo de fundação e o dimensionamento adequado das estacas são etapas fundamentais nesse processo, impactando diretamente o custo e o prazo da obra.

A previsão da capacidade de carga de uma estaca, apesar de parecer uma tarefa simples, envolvem diversas variáveis tais como, a forma como se executam as estacas, tipo de solo, data em se realizam as provas de carga (cicatrização do solo “set up”), entre outros.

Exemplos sobre a complexidade da previsão da capacidade de carga seriam os eventos de previsão de capacidade de carga, onde é possível observar que diversos participantes possuem sua própria percepção do que seria a carga de ruptura de uma estaca. No último Cobramseg 2024 ocorreu um evento de previsão de capacidade de carga (BC-ETS), cujos resultados estão na Figura 1:

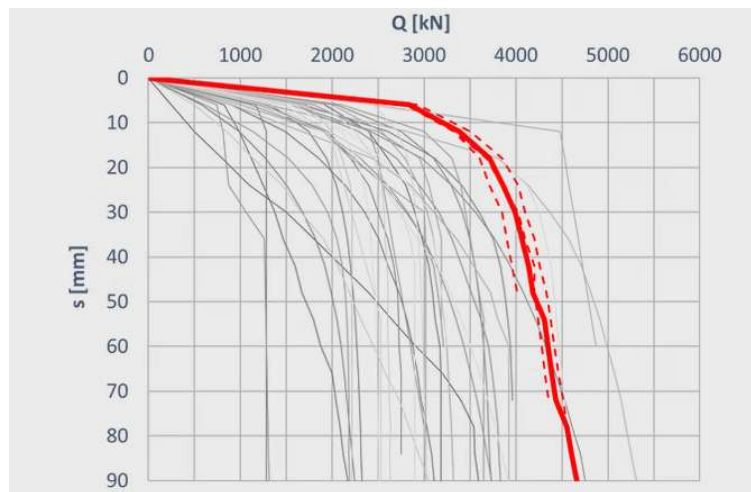


Figura 1. Resultados da previsão da capacidade de carga dos participantes (BC-ETS, 2024)

A curva em vermelho (Figura 1) representa a curva da prova de carga estática, enquanto que as demais linhas são as previsões de diversos participantes. Nota-se grande dispersão de resultados e a conclusão é de que prever com exatidão uma prova de carga estática é uma tarefa extremamente difícil. O autor principal deste artigo submeteu sua previsão e recebeu duas menções honrosas de destaque entre as melhores previsões no evento (Murakami, 2024).

Além da dificuldade de prever com exatidão o comportamento de um determinado tipo de estaca, durante a fase de projeto podem ser estudados mais de um tipo de fundação, tornando a tarefa de projetar fundações com o menor custo possível e com segurança de desempenho ainda mais difícil.

Cabette e Murakami (2024) mostram um caso de obra onde foram estudados dois tipos de fundações: a) 4 estacas hélice contínua por pilar, de diâmetro 70 cm e comprimento 32 m; b) 6 estacas pré-moldadas, de diâmetro 38 cm e comprimento 28 m. O cliente optou pela solução em estacas pré-moldadas que apresentaram um consumo de concreto 78% menor em relação à solução em hélice contínua, contribuindo para o desenvolvimento sustentável na construção civil. O desempenho das fundações foi comprovado através de ensaios dinâmicos.

A forma como se executam as fundações pode afetar o desempenho. Em estacas pré-moldadas de concreto, métodos teóricos podem estabelecer critérios de cravação de forma a atender às cargas previstas em projeto. Entretanto, há casos de obra onde tais critérios teóricos podem não atingir às cargas de projeto com o fator de segurança estabelecido pela NBR 6122:2022. Murakami e Cabette (2023) citam um caso de obra em Itupeva, SP, onde tais critérios teóricos levariam a cargas menores que o desejado, o que resultariam em



reforços de fundações ou recravações de estacas, aumentando o custo e prazo da obra. Os autores contornaram este problema através do monitoramento da cravação da estaca durante a realização da estaca prova, permitindo aumentar a altura de queda além da altura convencional, garantindo o atendimento das cargas de projeto.

Cabette e Murakami (2023) descrevem um caso de obra desafiador em São Vicente, SP, onde se utilizou estacas pré-moldadas de concreto de seção 29,5x29,5 cm para até 125 tf, equivalente à tensão admissível de 14 MPa. O subsolo local possuía espessa camada de solo mole, o que poderia resultar em elevadas tensões de tração durante a cravação das estacas. Os autores contornaram este problema executivo através do procedimento que será descrito com maiores detalhes na metodologia deste artigo.

Neste contexto, o presente artigo apresenta um estudo de caso que demonstra como a análise criteriosa das condições do subsolo, aliada à experiência em projetos semelhantes e à utilização de ferramentas como o Ensaio de Carregamento Dinâmico (PDA), pode levar a soluções inovadoras e economicamente viáveis. Diante de restrições orçamentárias, a empresa responsável pela obra solicitou uma otimização dos custos das fundações.

2 OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivo principal demonstrar a eficácia da otimização do projeto de fundações de uma Estação de Tratamento de Esgoto, proposta pela substituição das seções das estacas pré-moldadas por seções menores, visando reduzir custos sem comprometer a segurança e desempenho. Para isso, o trabalho compara a solução original e a otimizada, além de apresentar os procedimentos de campo para controle da cravação, baseados em Cabette e Murakami (2023).

O artigo busca contribuir para a disseminação de boas práticas em projetos de fundações, incentivando soluções que aliem segurança, eficiência e sustentabilidade.

3 METODOLOGIA

Este artigo adota uma abordagem metodológica que combina a análise de documentos de projeto, a aplicação de métodos semi-empíricos para estimativa da capacidade de carga de estacas e a análise de resultados de ensaios de campo, Provas de Carga Estática (PCE) e Ensaios de Carregamento Dinâmico (PDA).

3.1. Análise do Projeto Original e da Solução Otimizada:

Inicialmente, foram analisados os documentos do projeto original da Estação de Tratamento de Esgoto, incluindo as especificações das estacas pré-moldadas de concreto inicialmente previstas. Em seguida, foi examinada a solução otimizada, que previa a utilização de estacas com seções transversais menores. As características geométricas das estacas, como diâmetro e comprimento, foram comparadas entre as duas soluções.

3.2. Estimativa da Capacidade de Carga pelo Método Semi-Empírico:

Para avaliar a viabilidade técnica da solução otimizada, foi utilizada o método semi-empírico de Aoki & Velloso (1985) para estimar a capacidade de carga das estacas. Esse método, amplamente utilizado no Brasil, correlaciona dados de sondagens SPT com a capacidade de carga de estacas, considerando as características do solo e da estaca. Levando em consideração que as sondagens indicaram a presença de camadas de argila e areia na região de apoio da ponta das estacas, adotou-se, de forma conservadora, o cenário de apoio em argila para a estimativa da capacidade de carga.



3.3. Procedimentos de Campo para o Controle da Cravação:

Durante a execução da obra, foram adotados procedimentos de campo rigorosos para garantir a qualidade da cravação das estacas e a obtenção de dados confiáveis nos ensaios de PDA e PCE. Esses procedimentos, baseados nas recomendações de Cabette e Murakami (2023), incluíram:

Monitoramento da cravabilidade: O PDA foi utilizado para monitorar a cravabilidade das estacas em tempo real, permitindo ajustes na altura de queda do martelo para otimizar a cravação e minimizar o risco de danos às estacas.

Definição dos critérios de cravação: Os critérios de cravação foram definidos com base nos valores de nega e repique obtidos no final da cravação da estaca prova durante o monitoramento da cravação com o PDA.

Realização de ensaios de PDA na recravação e PCE: Após a cravação, foram realizados ensaios de PDA na recravação e PCE para confirmar as premissas de projeto e validar a capacidade de carga das estacas.

3.4. Análise dos Resultados dos Ensaios de PDA e PCE:

Os resultados dos ensaios de PDA e PCE foram analisados e comparados com as previsões do método semi-empírico Aoki & Velloso (1985). Essa comparação permitiu avaliar a precisão do método semi-empírico e validar a capacidade de carga das estacas otimizadas. A análise dos dados do PDA foi realizada utilizando o software CAPWAP, considerando o melhor ajuste das curvas calculada e medida pelos sensores. Maiores informações sobre procedimentos para a realização do PDA e análise CAPWAP podem ser encontrados em Murakami (2015).

3.5. Quantificação da Redução de Custos e Análise da Sustentabilidade:

A redução de custos proporcionada pela solução otimizada foi quantificada, comparando o consumo de concreto e aço entre as estacas inicialmente previstas e as estacas otimizadas. Além disso, foi analisado o impacto da redução do consumo de materiais na sustentabilidade da obra, considerando a importância da redução da pegada de carbono na construção civil.

Essa metodologia, combinando análise teórica, procedimentos de campo e avaliação de resultados, permitiu uma avaliação completa da solução otimizada para as fundações da Estação de Tratamento de Esgoto, demonstrando sua viabilidade técnica, econômica e ambiental.

4 CASO DE OBRA

Este caso de obra descreve a otimização das fundações de uma Estação de Tratamento de Esgoto em Campinas, SP. O projeto original previa estacas pré-moldadas de concreto com seções circulares de 25 cm (para cargas de até 25 tf) e 30 cm (para cargas de até 35 tf), com comprimentos estimados entre 6 m e 8 m, cravadas até a nega. As sondagens SPT revelaram uma camada superficial de colúvio de argila arenosa (6 m), seguida por solo de alteração de rocha (argila silto-arenosa e areia argilosa) até 7,30-9,35 m de profundidade, atingindo o impenetrável. O nível d'água variou entre 8,15 m e 8,54 m, não sendo observado em uma das sondagens até o limite de 7,30 m.

4.1 Otimização da Solução de Fundações:

Visando a otimização de custos, e com base na experiência em obras semelhantes (Murakami e Cabette, 2023a), idealizou-se a substituição das estacas circulares por seções quadradas de 19,5x19,5 cm (25 tf) e 23,5x23,5 cm (35 tf), utilizando martelo de queda livre de 2.800 kg. A estimativa inicial da capacidade de carga foi realizada pelo método Aoki & Velloso (1985), considerando, conservadoramente, o apoio da ponta da estaca



em argila.

4.2 Procedimentos de Campo e Critérios de Cravação:

O procedimento de campo, conforme Cabette e Murakami (2023), incluiu: 1) monitoramento da cravação com PDA para otimizar a altura de queda, minimizar quebras e tensões; 2) definição dos critérios de cravação (nega e repique) com o PDA; 3) realização de PDA na recravação e PCE para confirmar as premissas. Nas estacas prova, a cravabilidade indicou nega menor que 10 mm com alturas de queda de 30 cm (19,5x19,5 cm) e 40 cm (23,5x23,5 cm). O PDA, ao final da cravação, indicou mobilização de carga superior ao dobro da carga de projeto, tornando desnecessário o aumento da altura de queda. A Figura 1 mostra o resultado do monitoramento da cravação da estaca prova de seção 19,5x19,5 cm. Notam-se máximas tensões de compressão (CSI) inferiores à 28 MPa e tensão de tração (TSX) inferiores à 2,3 MPa. A Figura 2 mostram os resultados do monitoramento da estaca prova de seção 23,5x23,5 cm. Notam-se máximas tensões de compressão (CSI) inferiores à 31 MPa e tensão de tração (TSX) inferiores à 1,7 MPa.

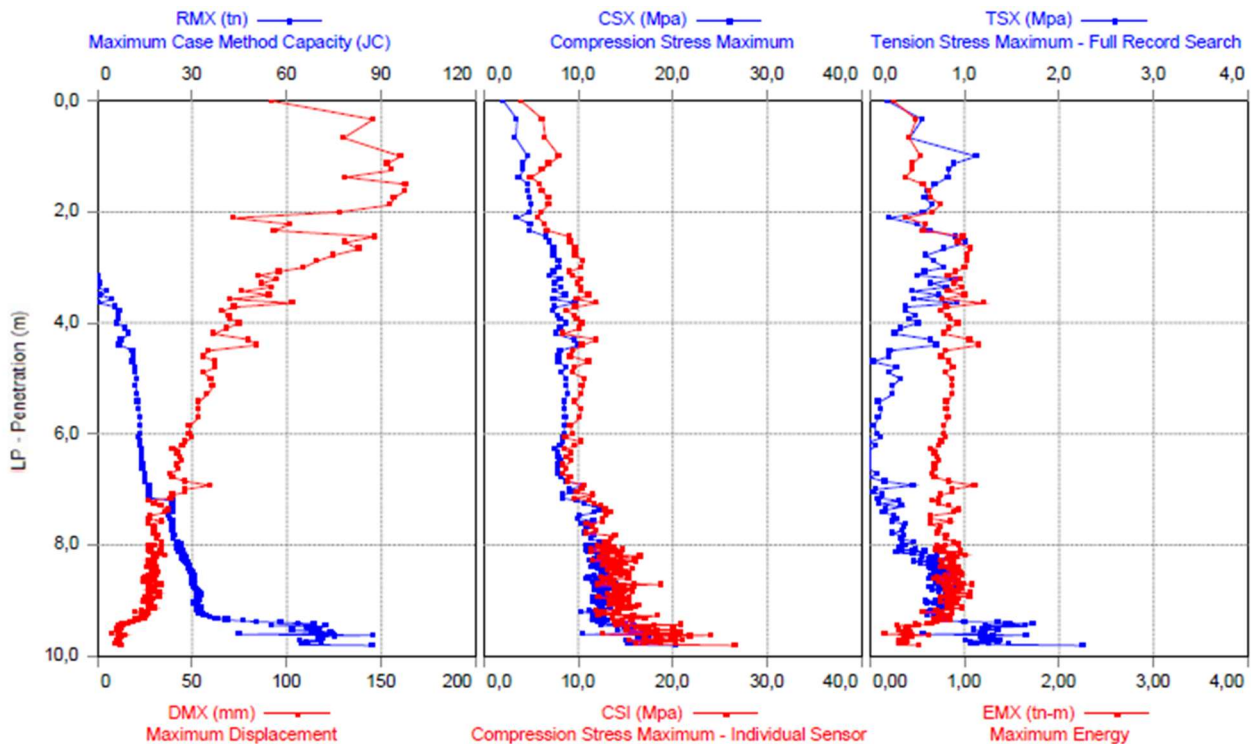


Figura 2. Monitoramento da cravação da estaca prova de seção 19,5x19,5 cm.

Onde: LP: Comprimento abaixo do Solo; RMX: Carga mobilizada calculada pelo método CASE; DMX: Deslocamento máximo durante a aplicação do golpe; CSX: Tensão média de compressão na região dos sensores (média das leituras dos sensores); CSI: Tensão máxima de compressão na região dos sensores (leitura máxima dos sensores); TSX: Máxima tensão de tração ao longo do fuste da estaca; EMX: Energia máxima transferida pelo golpe na seção dos sensores



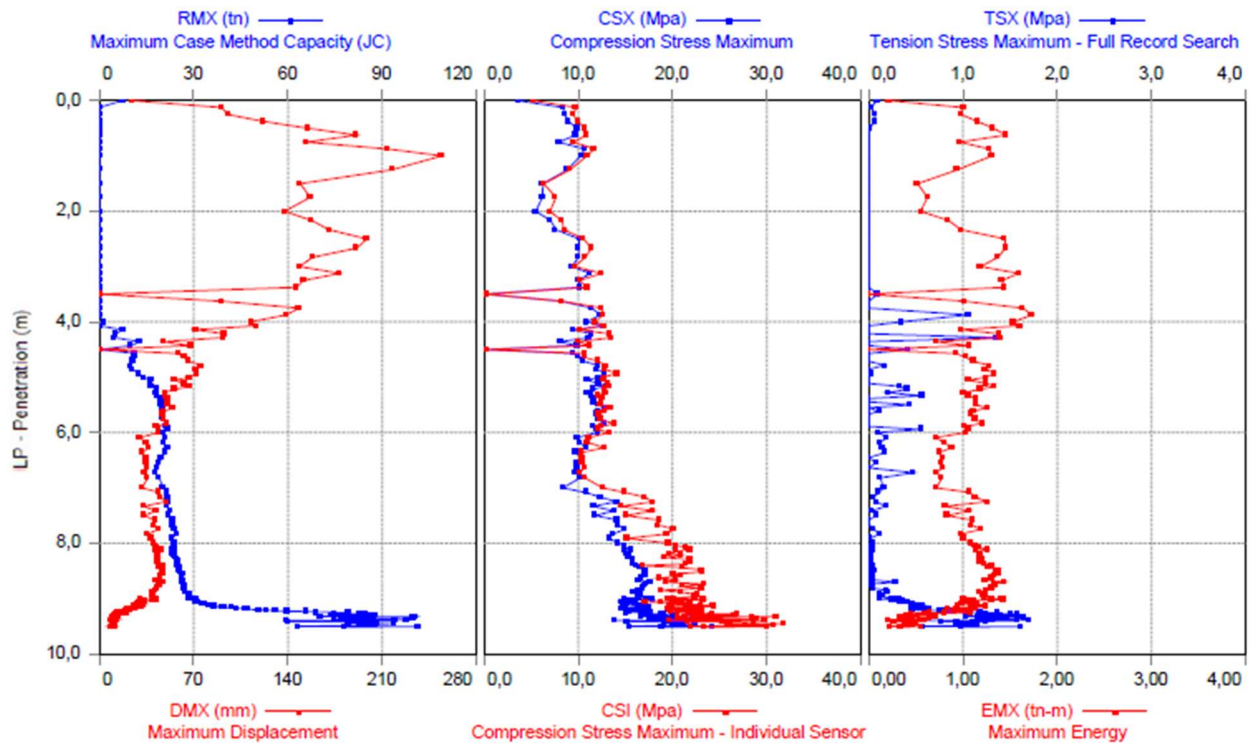


Figura 3. Monitoramento da cravação da estaca prova de seção 23,5x23,5 cm.

4.3 Resultados dos Ensaios:

Os ensaios de PDA e PCE confirmaram a capacidade de carga das estacas otimizadas. Os resultados do PDA, apresentados na tabela 1, mostram: identificação da estaca, seção transversal, idade (número de dias após a cravação da estaca), comprimentos das estacas, altura de queda, nega no golpe, resistências mobilizada (RMX). Destaca-se o baixo índice de quebras de estacas (0,3%), atribuído ao controle rigoroso da cravação, além da otimização da altura de queda no monitoramento com PDA. Nota-se que as negas obtidas nos ensaios foram zeradas, o que indica que a carga de ruptura das estacas é superior ao obtido nos ensaios, com exceção da estaca RB E318 que a nega foi de 8 mm. Esta estaca foi considerada como quebrada em função do parâmetro Beta ter apresentado um valor de 32%.

As PCEs, realizadas em duas estacas (E306 e E210) de 23,5x23,5 cm, atingiram 70 tf com deslocamentos máximos de 2,94 mm e 5,99 mm, respectivamente, conforme indicado na tabela 1. Já as estacas E58 e E51, de seção 19,5x19,5 cm, atingiram cargas máximas de 50 tf com deslocamentos máximos de 4,27 mm e 3,89 mm, respectivamente.

A Figura 4 mostra a curva da PCE na estaca E306. A mesma apresentou um comportamento muito próximo do linear até a carga máxima de 70 tf, não apresentando inícios de ruptura geotécnica, assim como observado nas demais PCEs das estacas E210 (Figura 5), E58 (Figura 6) e E51 (Figura 7).



Tabela 1. Resumo dos resultados do PDA

Estaca	Seção (cm)	Idade (dias)	Comprimento Cravado (metros)	Altura de Queda (m)	Nega (mm)	Resistência Mobilizada (tf)
E08 - CL	19,5 x 19,5	1	6,3	0,2	0	68,4
E15 - CL	19,5 x 19,5	0	6,3	0,2	0	103,3
E02 - EP	19,5 x 19,5	8	9,8	0,5	0	81,0
E14 - EP	19,5 x 19,5	7	10,0	0,3	0	100,0
E03 - SO	19,5 x 19,5	4	9,9	0,4	0	81,0
E11 - SO	19,5 x 19,5	8	9,5	0,3	0	109,9
D01 - E32	19,5 x 19,5	6	9,1	0,2	0	84,8
D01 - E53	19,5 x 19,5	6	9,1	0,4	0	64,5
D01 - E67	19,5 x 19,5	11	8,2	0,4	0	63,4
D02 - E59	19,5 x 19,5	8	7,8	0,3	0	71,0
D02 - E70	19,5 x 19,5	8	7,9	0,2	0	65,1
D02 - E79	19,5 x 19,5	8	8,0	0,3	0	86,9
RB - E153	23,5 x 23,5	26	5,5	0,3	0	108,0
RB - E158	23,5 x 23,5	26	5,6	0,2	0	115,7
RB - E181	23,5 x 23,5	25	5,6	0,3	0	98,5
RB - E184	23,5 x 23,5	16	5,5	0,2	0	119,0
RB - E251	23,5 x 23,5	35	5,8	0,2	0	120,0
RB - E280	23,5 x 23,5	3	5,8	0,3	0	101,6
RB - E316	23,5 x 23,5	18	5,9	0,2	0	136,6
RB - E318	23,5 x 23,5	3	6,0	0,3	8	Quebrada (BTA=32%)

Tabela 2. Resultados das Provas de Carga Estática (PCEs)

Estaca	Seção (cm)	Idade (dias)	Comprimento Cravado (metros)	Carga Máxima (tf)	Recalque Máximo (mm)
E306	23,5x23,5	62	5,65	70	2,94
E210	23,5x23,5	63	5,65	70	5,99
E58	19,5x19,5	54	7,7	50	4,27
E51	19,5x19,5	54	7,7	50	3,89



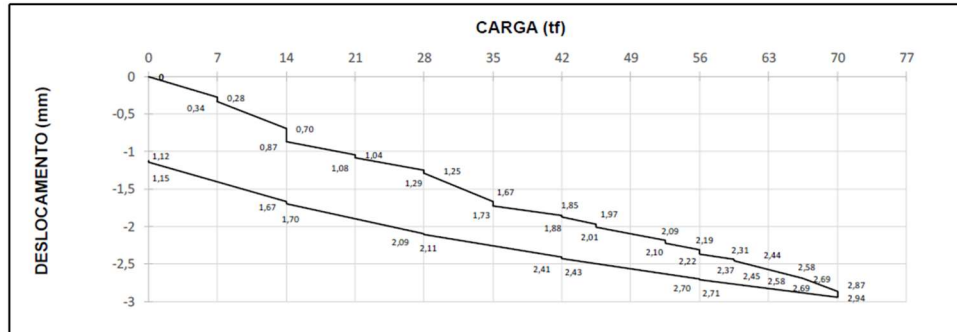


Figura 4. Gráfico carga vs. recalque da PCE da estaca E306 de seção 23,5x23,5 cm.

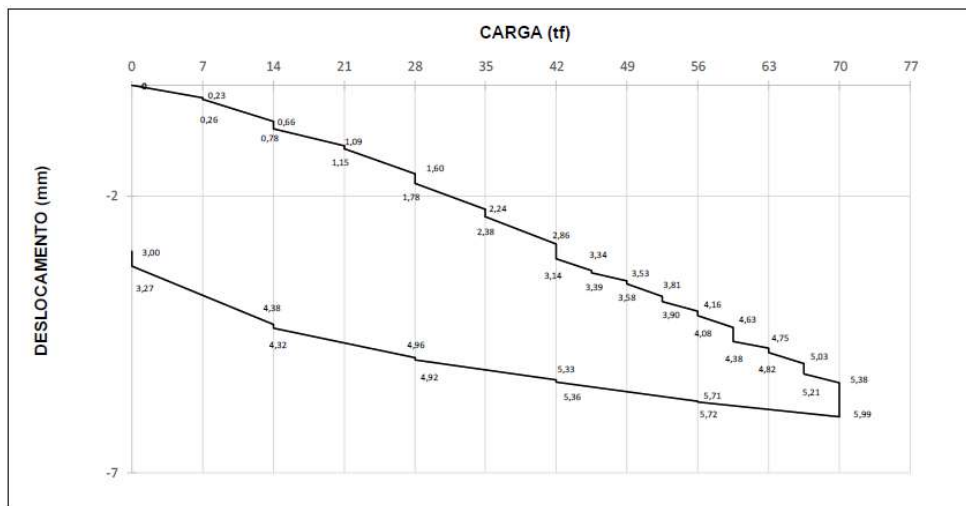


Figura 5. Gráfico carga vs. recalque da PCE da estaca E210 de seção 23,5x23,5 cm.

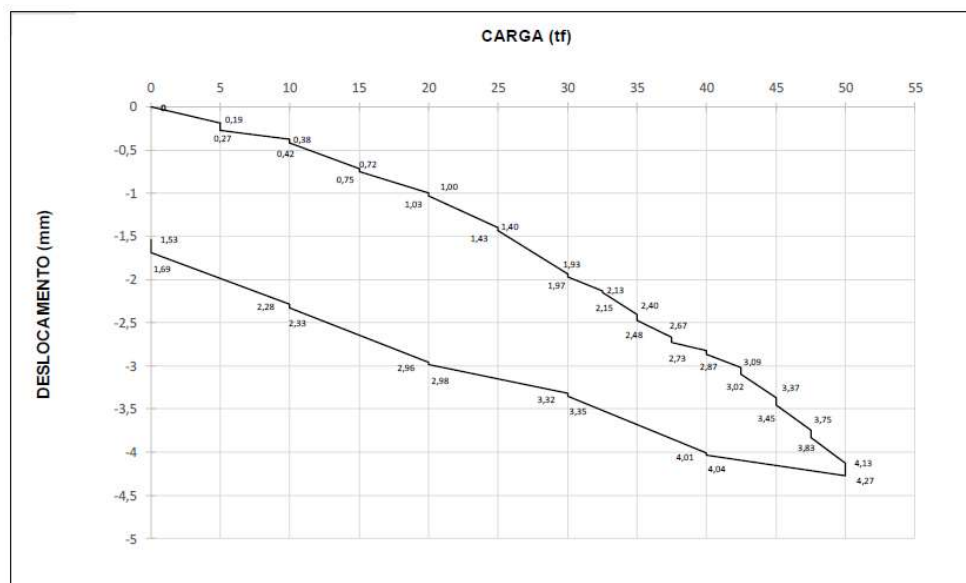


Figura 6. Gráfico carga vs. recalque da PCE da estaca E58 de seção 19,5x19,5 cm.



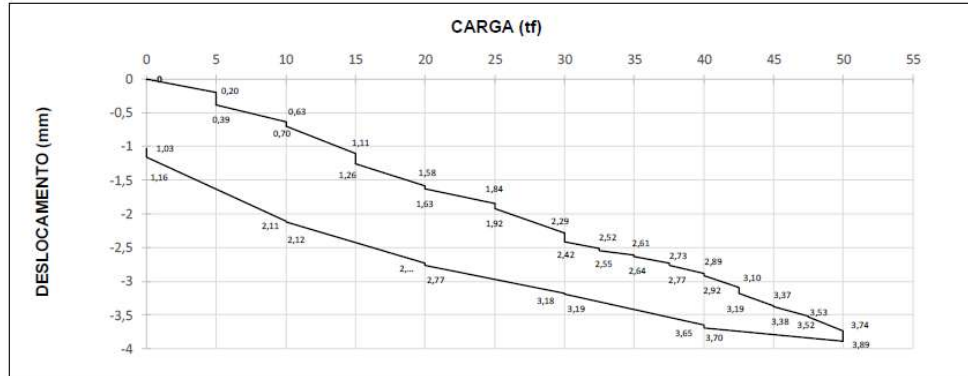


Figura 7. Gráfico carga vs. recalque da PCE da estaca E51 de seção 19,5x19,5 cm.

4.4 Impacto da Otimização:

A redução das seções das estacas proporcionou uma economia significativa de concreto e aço, estimada em 22%, contribuindo para a sustentabilidade da obra. A solução otimizada viabilizou o projeto dentro das restrições orçamentárias, atendendo às expectativas da construtora e do cliente. A análise detalhada dos resultados e os benefícios da otimização serão discutidos nas seções subsequentes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo de caso demonstrou a eficácia da otimização do projeto de fundações de uma Estação de Tratamento de Esgoto, utilizando estacas pré-moldadas de concreto com seções menores em relação ao projeto original. A análise criteriosa das informações do subsolo, aliada à experiência prévia dos autores em projetos semelhantes, aliada à aplicação de métodos semi-empíricos e ensaios em fundações (PDA e PCE), permitiu a redução das seções das estacas, resultando em uma economia significativa de materiais e custos.

A substituição das seções circulares de 25 cm e 30 cm, inicialmente previstas, por seções quadradas de 19,5x19,5 cm e 23,5x23,5 cm, respectivamente, comprovou-se uma solução técnica e economicamente viável. A capacidade de carga das estacas otimizadas foi confirmada pelos ensaios de PDA e PCE, garantindo a segurança e o desempenho da fundação.

O monitoramento da cravação com PDA, seguindo o procedimento proposto por Cabette e Murakami (2023), permitiu um controle rigoroso da cravação, minimizando o índice de quebras de estacas e otimizando o processo executivo. A redução no consumo de concreto e aço, estimada em cerca de 22%, demonstra o impacto positivo da otimização na sustentabilidade da obra.

A otimização das fundações, além dos benefícios econômicos e ambientais, contribuiu para a viabilidade do projeto, atendendo às expectativas da construtora e do cliente final, demonstrando o potencial da engenharia geotécnica em proporcionar soluções eficazes para os desafios da construção civil. Futuros estudos podem explorar a aplicação dessa metodologia em outros tipos de obras e condições de subsolo, contribuindo para a disseminação de boas práticas e para o desenvolvimento de projetos de fundações mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aoki, N. (1985) Considerações sobre a previsão e desempenho de alguns tipos de fundações profundas sob ação de cargas verticais. In: Simpósio Teoria e Prática de Fundações Profundas UFRGS, Porto Alegre, v.1, pp. 211-251



- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13208 (2007) Estacas Ensaio de carregamento dinâmico, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solo - Prova de carga estática em fundações profundas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6122 (2022) Projeto e execução de fundações, Rio de Janeiro.
- BC Experimental Testing Site BC-ETS (2024). Evento de previsão de capacidade de carga de estacas. Balneário Camburiu, SC. <https://www.bc-ets.com.br/> (acessado em 17/07/2025).
- Cabette, J. F. (2014). Análise dos métodos semi-empíricos utilizados para a estimativa da capacidade de carga de estacas pré-fabricadas com base em resultados de ensaios de carregamento dinâmico. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Cabette e Murakami (2023). Estacas Pré Moldadas de Concreto Cravadas em São Vicente: Procedimentos Executivos e Desafios Superados. Seminário de Fundações Especiais SEFE 10, São Paulo.
- Cabette e Murakami (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 Camburiu, SC.
- Decourt, L. (1982) Prediction of the bearing capacity based exclusively on N values of SPT. Proc. Of ESOPT II, pp. 19-34, Amsterdam.
- Davisson, M. T. (1963) Estimating buckling loads for piles. 2ª PCSMFE, São Paulo
- Murakami, D. K. (2015). Novo procedimento para a realização de análise capwap no ensaio de carregamento dinâmico em estacas pré-moldadas. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo
- Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2014) Dificuldade de cravação de estacas em solos com quakes elevados. Seminário apresentado em "Workshop - Ensaios 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) O Benefício do PDA na Redução de Custos em Obras de Pequeno Porte. Seminário de Fundações Especiais SEFE 10, São Paulo.
- 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. (2024). Recebi duas menções honrosas no eventode previsão de comportamento do BC-ETS deste Cobramseg 2024. https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7246697311383212032/?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7246697311383212032%2CFEED_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29. (acessado em 17/07/2025)

