

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/522

Comparativo da Capacidade de Carga por Provas de Carga Estática e Dinâmica em Estaca Metálica com Seção Transversal Variável

Maysa Sthefany Rabelo Oliveira

Discente, Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, Brasil, omaysa420@outlook.com

Danilo Silva dos Santos Marques

Professor, Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, Brasil, danilo_silva@outlook.com

Carlos Rezende Cardoso Júnior

Professor, Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, Brasil, eng.carlos.rezende@gmail.com

Demóstenes de Araújo Cavalcanti Júnior

Professor, Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, Brasil, demostenes-jr@uol.com.br

RESUMO: Dentro do cenário da engenharia de fundações, prever com precisão o desempenho de fundações profundas é sempre desafiador. Apesar disso, métodos para avaliação da capacidade de carga em estacas têm evoluído e se diversificado ao longo dos anos, permitindo a execução de obras que atendem aos fatores de segurança preconizados pelas normas técnicas. Nesse sentido, a Prova de Carga Estática (PCE) e o Ensaio de Carregamento Dinâmico (Pile Driving Analyzer-PDA) são ensaios que permitem verificar a capacidade de carga das fundações profundas juntamente com deslocamentos, proporcionando um melhor controle na qualidade das fundações. Desta forma, o presente artigo tem como objetivo comparar os valores de capacidade de carga obtidos através de ensaios de carregamento dinâmico e prova de carga estática. Os ensaios foram realizados em uma estaca metálica com comprimento entre 37,15 a 37,45 metros, que atravessa espessa camada de solo mole e apoiada em camada de rocha calcária, na cidade de Aracaju, estado de Sergipe. Foram realizados Ensaio de Carregamento Dinâmico e Prova de Carga Estática para avaliar o critério de controle dinâmico de cravação das estacas. Os resultados apontaram convergência entre os ensaios de campo realizados.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas Metálicas, Prova de Carga Estática, Ensaio de Carregamento Dinâmico, Fundações Profundas.

ABSTRACT: Within the foundation engineering landscape, accurately predicting the performance of deep foundations is always challenging. Despite this, methods for evaluating the load capacity of piles have evolved and diversified over the years, allowing the execution of works that meet the safety factors recommended by technical standards. In this sense, the Static Load Test (PCE) and the Dynamic Load Test (Pile Driving Analyzer-PDA) are tests that allow checking the load capacity of deep foundations together with displacements, providing better control over the quality of the foundations. Therefore, this article aims to compare the load capacity values obtained through dynamic loading tests and static load tests. The tests were carried out on a metal pile with a length between 37.15 and 37.45 meters, which crosses a thick layer of soft soil and supported by a layer of limestone rock, in the city of Aracaju, state of Sergipe. Dynamic Loading Tests and Static Load Tests were carried out to evaluate the dynamic control criteria for pile driving. The results showed convergence between the field tests carried out.

KEYWORDS: Metal Piles, Static Load Test, Dynamic Load Test, Deep Foundations.

1 INTRODUÇÃO

A verificação da qualidade e do desempenho da capacidade de carga em fundações profundas é de grande importância na engenharia geotécnica. Diferentemente da superestrutura de edifícios, como vigas, pilares e lajes, nas fundações nem sempre é possível realizar inspeções ou perícias visuais que possam detectar possíveis anomalias e danos, por se tratar de elementos necessariamente enterrados.

Fundações são elementos estruturais responsáveis por transmitir cargas provenientes da superestrutura ao maciço do solo (NBR 6122:2022). Dessa forma, as fundações têm como função resistir aos esforços provocados. A escolha do tipo de fundação depende das características presentes no solo, custos, edificações vizinhas, da tipologia estrutural e das cargas que atuam no elemento. O avanço na construção civil possibilitou a execução de edifícios mais altos e esbeltos, e conseqüentemente, um crescimento nas cargas impostas da estrutura, e com isso a necessidade de buscar inovações nas soluções e tecnologias de fundações.

Inicialmente, realiza-se a caracterização e o reconhecimento do subsolo por meio de investigações geotécnicas que permitem obter parâmetros que possibilitam a escolha do tipo de fundação mais adequado para determinado terreno. A sondagem do tipo SPT, método amplamente difundido no Brasil, evidencia dados essenciais que auxiliam na elaboração do projeto, como: a profundidade do lençol freático, a identificação da variação das camadas com seus tipos de solo e os índices de resistência a penetração (N_{SPT}). De posse dos resultados das sondagens, normalmente aplicam-se métodos semiempíricos para determinação da capacidade de carga em estacas, e assim realiza-se o dimensionamento das fundações profundas.

No entanto, os métodos semiempíricos tratam-se de métodos de previsão de capacidade de carga na fase de projeto e devido a variabilidade do terreno e outras limitações dos métodos, seus resultados não são exatos. Dessa forma, surge a necessidade da verificação das capacidades de carga adotadas em projeto através de ensaios de campo.

Nesse contexto, a prova de carga estática (PCE) e o ensaio de carregamento dinâmico (ECD) se destacam como métodos de verificação do desempenho das fundações, com a função de avaliar a capacidade de carga definida em projeto, e conseqüentemente, proporcionar condições mínimas de segurança da estrutura, além de possibilitar a redução de custos, caso executada ainda durante a fase de projeto das fundações. Enquanto o método estático simula o carregamento real em uma edificação, o ensaio dinâmico abrange uma interação entre sinais de força e velocidade com a resistência do solo. A NBR 6122:2022 determina os critérios e a quantidade de ensaios executados na obra, conforme os procedimentos obrigatórios estabelecidos pela norma.

Dessa forma, o presente artigo tem como objetivo apresentar o comparativo da capacidade de carga por provas de carga estática e dinâmica em estaca metálica com seção transversal variável com a finalidade de avaliar o critério de controle dinâmico de cravação das estacas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Prova de Carga Estática (PCE)

De acordo com a NBR 16903:2020, a prova de carga estática consiste na aplicação de esforços axiais ou transversais no topo da estaca registrando simultaneamente os deslocamentos correspondentes em cada nível de carregamento, assim obtém o comportamento real da fundação. A aplicação dos esforços aumenta gradativamente, sendo mobilizado por macacos hidráulicos que utilizam o sistema de reação constituído por vigas metálicas e tirantes, que mantém o equipamento estabilizado simultaneamente à compressão na estaca. Os esforços são aplicados até que se atinja duas vezes o valor da carga de trabalho da fundação ou com sua ruptura geotécnica.

O carregamento na execução de provas de carga estática pode ser do tipo lento (PCE), rápido (PCR), misto (PCM) ou cíclico (PCCL ou PCCR). Neste estudo de caso, utilizou-se o método tipo lento. Os estágios aplicados, conforme procedimento, não devem ser superiores a 20% da carga de trabalho e devem ser mantidos pelo tempo mínimo de 30 minutos ou até ocorrer a estabilização do recalque. A NBR 6122:2022, determina que sejam realizados ensaios de prova de carga estáticas em no mínimo 1% das estacas do empreendimento a

fim de ser verificar o atendimento aos requisitos mínimos de segurança e possibilitando a realização de possíveis ajustes no projeto.

2.2 Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD)

O ensaio de carregamento dinâmico (ECD) também tem como objetivo avaliar a capacidade de carga mobilizada por uma fundação profunda. No entanto, neste ensaio seu carregamento é aplicado dinamicamente à estaca por meio de golpes com um sistema de percussão adequado. O ensaio utiliza o método CASE (*Case Institute of Technology*) no momento do ensaio ao aplicar energias cinéticas no topo da estaca, e posteriormente, com a utilização do software CAPWAP, que utiliza sinais de força e velocidade gravados em campo instalados no fuste da estaca.

Os pares de acelerômetros, que geram uma tensão proporcional à aceleração das partículas da estaca, e transdutores de deformação específicas, que fornecem uma tensão proporcional à deformação sofrida pelo material da estaca durante o golpe, são acoplados no fuste da estaca próximo ao topo, por meio de parafusos, posicionados em planos ortogonais, compensando os efeitos de flexão que ocorrem quando o ensaio é realizado. Os sinais emitidos através de sensores são enviados por um cabo e analisadas pelo equipamento PDA (*Pile Driving Analyser*), que armazena e processa os sinais “online”, e posteriormente, são cravados e reanalisados por meio do software. Após cada golpe aplicado, o equipamento registra dados como: a energia máxima transferida para as estacas, a força máxima de compressão, a carga mobilizada pelo método CASE, deslocamentos e tensões de tração e compressão.

Além disso, através da análise CAPWAP, é possível distinguir a parcela de resistência pelo atrito lateral da resistência de ponta, e assim, determinar a distribuição de atrito ao longo do fuste da estaca. Essa análise, geralmente executada posteriormente a partir dos dados armazenados pelo PDA, permite também obter o limite de deformação elástica do solo. O ensaio dinâmico possui a vantagem de ser realizado de forma rápida e prática, proporcionando menor custo. De acordo com a NBR 6122:2022, a prova de carga estática pode ser substituída em uma quantidade proporcional a cinco ensaios de carregamento dinâmico.

2.3 Estacas Metálicas

As estacas metálicas, segundo NBR 6122:2022, são elementos estruturais fabricados em indústrias, que podem ser compostos por perfis laminados, soldados ou trilhos ferroviários. Diferindo da maioria das estacas moldadas in loco, as estacas metálicas integram o grupo das chamadas de estacas de deslocamento, visto que uma vez que são inseridas no terreno através de processos de cravação não descompactam o solo, mas deslocam o material para suas vizinhanças, e com isso reduzem o índice de vazios em torno da estaca, melhorando sua capacidade de carga.

Para realizar a cravação pode-se utilizar equipamentos como: martelo de queda livre sobre rolos metálicos, martelo hidráulico sobre esteiras ou martelos vibratórios. As estacas são bastante empregadas por conseguirem serem cravadas em grandes profundidades, suportam maiores cargas estruturais, por provocar pouca vibração no terreno durante sua execução, não apresentar risco de quebra, necessita de blocos de coroamento com dimensões menores, possibilitando uma redução no peso do aço e do concreto, e ideais em casos de presença de camadas extensas de solos moles, a fim de transferir esforços para um substrato profundo, competente ou impenetrável.

2.4 Apresentação da Obra

A obra em estudo trata-se de uma edificação comercial com dezessete pavimentos, em estrutura de concreto armado convencional, a ser construído na cidade de Aracaju/SE. Inicialmente, foram executados 11 furos de sondagens a percussão e mistas para caracterização do solo e do maciço rochoso presente. As sondagens indicam que o local possui um subsolo constituído por uma camada argilosa com presença de matéria orgânica com consistência mole a muito mole com espessura entre 14,00 e 21,00 metros após passar por uma extensa camada predominante de material arenoso com compactidade medianamente compacta a compacta. A Figura 1 apresenta o perfil geotécnico, onde é possível observar a estratigrafia do solo e a variação

dos índices de resistência encontrados a partir das sondagens, bem como a representação das estacas metálicas de fundação que atravessam a camada de argila e se apoiam no maciço rochoso.

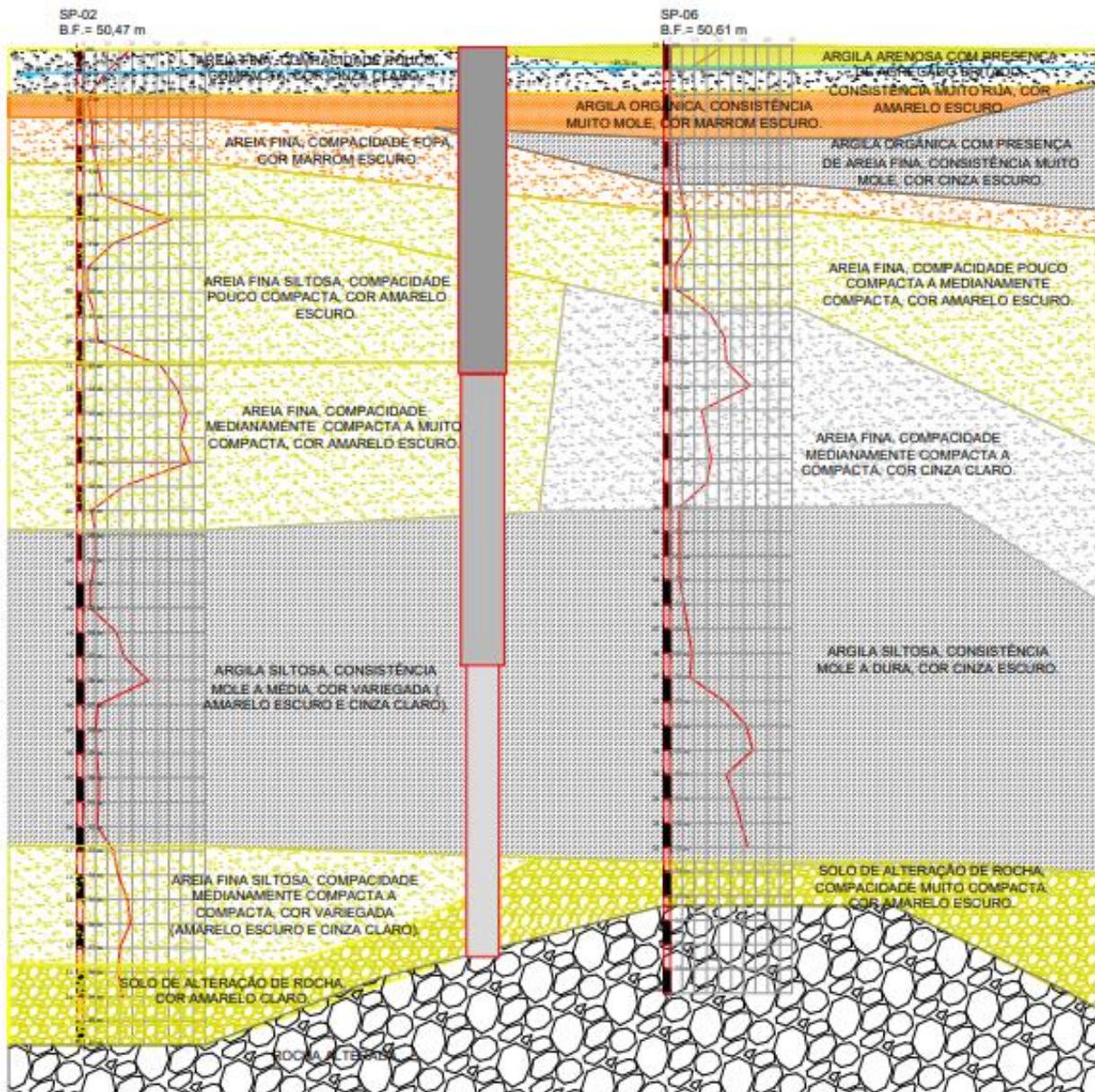


Figura 1. Perfil esquematizado do terreno.

Devido as características de resistência e compressibilidade do terreno, nível de água, e de acordo com as características da edificação a ser construída, a solução prevista em projeto para fundação foram estacas do tipo metálicas. O comprimento das estacas foi de aproximadamente de 37,45 metros e com perfil decrescente com a profundidade, ou seja, as seções são da mesma família de perfis com dimensões de aba e alma equivalentes, mas com espessuras distintas ao longo da sua profundidade, proporcionando uma redução significativa no peso do aço. A Figura 2 apresenta o detalhe tipo de uma das seções do estaqueamento da obra.

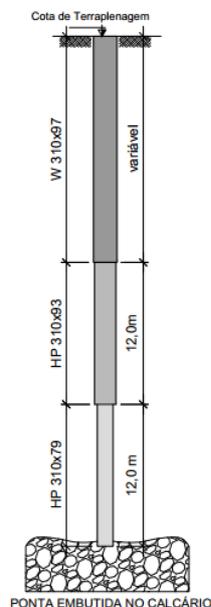


Figura 2. Detalhe específico dos perfis das estacas.

3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO

A fim de se obter o comparativo da capacidade de carga por provas de carga estática e dinâmica e avaliar o critério de controle dinâmico de cravação das demais estacas a serem executadas, foram realizadas duas provas de carga a priori, sendo uma dinâmica e outra estática com carregamento lento, com idade de 13 e 15 dias, respectivamente, após a cravação da estaca.

O ensaio de prova de carga estática foi interrompido entre o 7º e o 8º estágio de carregamento total previsto (duas vezes a carga de trabalho = 2 x 175,00 tf), atingindo a ruptura geotécnica com 269,00 tf, e deslocamento de 60 mm. Após 18 horas, iniciou o descarregamento em quatro estágios, obtendo um recalque residual de aproximadamente 32 mm. A Figura 3 apresenta a plotagem da curva carga x deslocamento, a partir da realização da prova de carga estática para a estaca ensaiada, onde é possível observar que a estaca foi levada à ruptura.

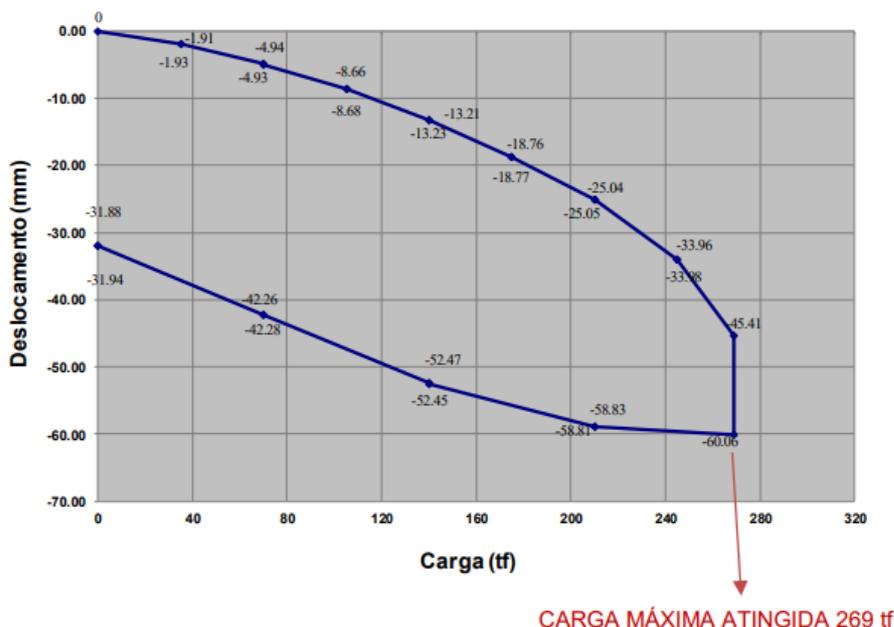


Figura 3. Curvas carga x deslocamento fornecido pela PCE.

Imediatamente após a desmontagem do sistema de reação da prova de carga estática, foi executado o primeiro ensaio dinâmico (PDA 1). Após a conclusão do primeiro ensaio dinâmico, obtendo-se resultado coerente com o resultado da PCE, mas não atingindo a carga de ruptura esperada de projeto, foi recomendado a continuação da cravação da estaca com martelo hidráulico JUNTAN 9 tf. Após o avanço de 30 cm da ponta da estaca na camada de calcário, foi executado o segundo ensaio dinâmico (PDA 2).

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de campo. Os resultados de capacidade de carga dos ensaios dinâmicos foram obtidos através das análises produzidos pelo modelo CAPWAP. Enquanto na prova de carga estática trata-se da carga de ruptura geotécnica.

Tabela 1. Resumo dos ensaios de campo realizados.

Ensaio	Comprimento cravado (m)	Capacidade de Carga (tf)
PDA 1	37,15	272,00
PCE	37,15	269,00
PDA 2	37,45	328,00

A Figura 4 apresenta o gráfico do boletim de cravação da estaca, antes e após o avanço da ponta da estaca na camada de rocha calcária, respectivamente. Na Tabela 2 é possível observar os resultados para nega e repique.

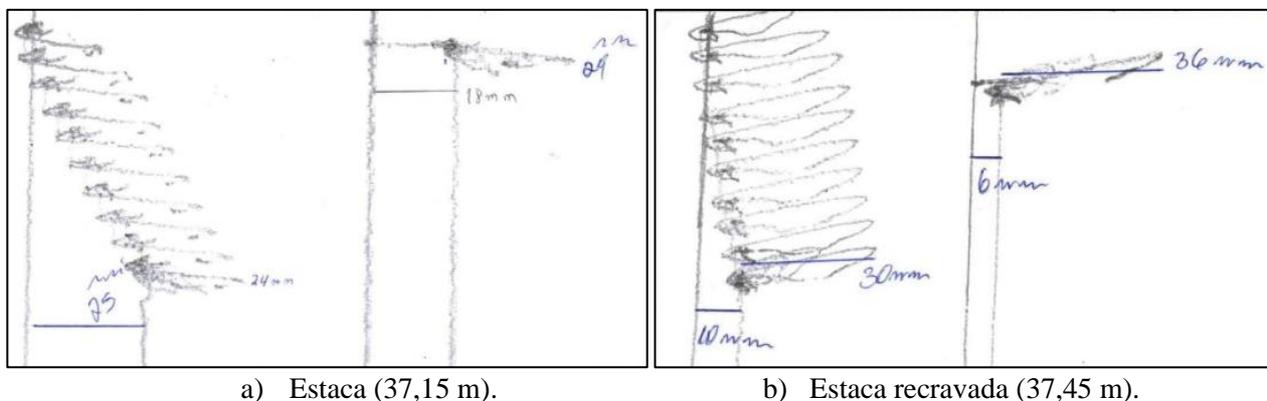


Figura 4. Gráficos com controle de cravação em campo da estaca P38-EF.

Tabela 2. Resumos do resultados obtidos em campo no boletim.

Estaca	Comprimento cravado (m)	Data da cravação	Nega (mm)	Repique (mm)
P38-EF	37,15	29/08/2022	25,00	24,00
P38-EF (Recravada)	37,45	12/09/2022	10,00	30,00

4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS

A Figura 5 apresenta graficamente o comportamento para carga de ruptura da estaca, através dos ensaios de carregamento dinâmico e a prova de carga estática executados na estaca antes e após a recravação.

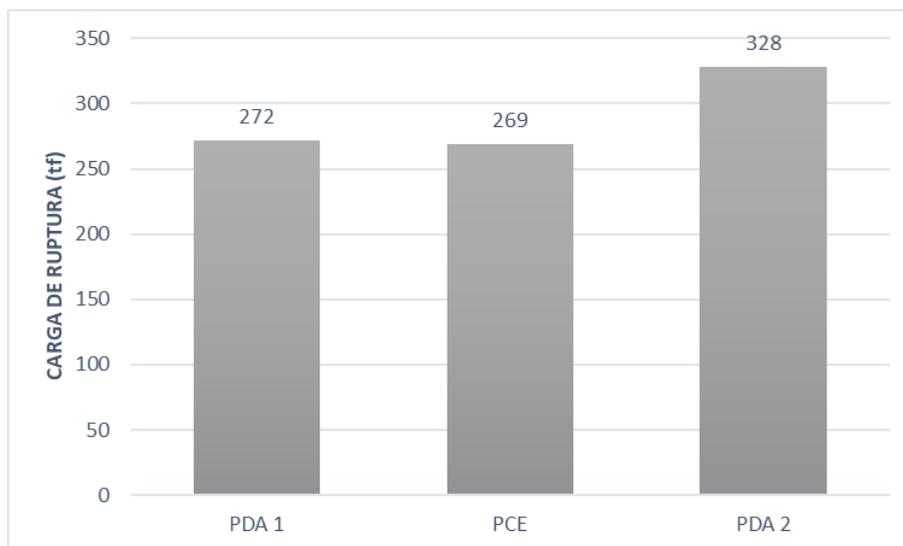


Figura 5. Comparação entre os ensaios de campo realizados.

A partir da comparação dos resultados dos ensaios PDA 1 e PCE, ambos realizados na estaca com cravação por martelo hidráulico e vibratório, é possível observar comportamento equivalente em termos de capacidade de carga. A prova de carga estática apresentou uma carga de ruptura de 269,00 tf, enquanto o PDA 1 estimou a capacidade de carga em 272,00 tf. Esse resultado demonstra a grande confiabilidade do resultado obtido com o ensaio de carregamento dinâmico para estacas metálicas com seção variável.

Por fim, a partir da comparação das capacidades de carga entre os ensaios PDA 1 e PDA 2, após a penetração de 30 cm da ponta da estaca no calcário, após a recravação, notou-se aumento significativo na capacidade de carga geotécnica do conjunto, com ganho de aproximadamente 22%, passando a carga geotécnica de ruptura de 269,00 tf para 328,00 tf.

5 CONCLUSÃO

Da comparação dos resultados das provas de carga estática e dinâmica, foi possível observar comportamento equivalente em termos de capacidade de carga geotécnica. Esse resultado demonstrou confiabilidade nas cargas de ensaio obtidas a partir do ensaio de carregamento dinâmico para estacas metálicas com seção variável.

A partir dos resultados obtidos dos ensaios de PDA na estaca piloto e seu comparativo com as medições das negas e repiques, foi possível calibrar o modelo de controle dos parâmetros dinâmicos de cravabilidade para as demais estacas da obra com bastante confiabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Geotec Consultoria e Serviços Ltda. pela disponibilização dos dados que possibilitaram a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque, P. J. R. & Garcia, J. R. (2020) *Engenharia de Fundações*. Grupo Editora Naciocal – GEN. Rio de Janeiro, pg. 3. 1º Edição.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). NBR 13208. *Estacas – Ensaios de carregamento dinâmico*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solos - Prova de carga estática em fundação profunda..* Rio de Janeiro.
- Cintra, A. C. J & Aoki, N. (2010) *Fundações por estacas: Projeto Geotécnico*. Editora Oficina de Textos, São Paulo. 1º Edição.
- Dias, S. R., Mucheti, S. A., & Ferreira, M. D. N. (2020). *Análise do Comportamento de Estacas Metálicas em São Luís - MA*. XX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. Rio de Janeiro.
- Falconi, F. e Perez Júnior, W.; (2008) *Prova de carga estática instrumentada em estaca metálica de seção decrescente com a profundidade na Baixada Santista - Análise de desempenho e critérios de dimensionamento*. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, XI, 2008, Coimbra, Portugal. Anais. Coimbra: Sociedade Portuguesa de Geotecnia. v. 4, p. 147-154.