XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/58

Estaca Metálica Laminada em Grau 60 Trabalhando por Ponta

Dirney Cury Filho
Gerente Ténico, Gerdau S.A., São Paulo, Brasil, dirney.cury@gmail.com

Tiago Garcia Rodriguez
Diretor, Geoprova Engenharia, Campinas, Brasil, tiago@geoprova.com.br

Alline Evangelista Silva
Coordenadora de Projetos, Apoio Assessoria e Projeto e Fundações, São Paulo, Brasil, alline.ev@gmail.com

RESUMO: A aplicação de estacas metálicas laminadas em obras de fundações profundas tem crescido no Brasil, sobretudo em regiões onde a cravação até o topo rochoso proporciona elevadas cargas admissíveis. Em 2024, foi feita a primeira publicação nacional envolvendo Prova de Carga Estática (PCE) em estaca metálica laminada no Grau 60, demonstrando ganhos relevantes de desempenho estrutural e geotécnico associados à utilização de perfis de maior resistência mecânica. Dando continuidade às investigações, o presente trabalho apresenta os resultados de uma nova PCE realizada em um perfil HP 310×79, cravado em um terreno cujas características geotécnicas favorecem o desenvolvimento predominante de resistência por ponta. A estaca foi cravada até nega fechada sobre o topo rochoso. A prova de carga foi conduzida até um carregamento máximo de 400 tf, correspondente a aproximadamente 400 MPa de tensão no perfil metálico, considerando a área bruta de aço (sem desconto da espessura de sacrifício). Os resultados indicaram comportamento geotécnico com deformações elásticas compatíveis com fundações apoiadas em rochosa. Após a aplicação da carga máxima, foi observado a ruptura estrutural da estaca, evidenciando que o limite de desempenho no ensaio foi regido pela capacidade resistente estrutural do perfil metálico, e não pelo comportamento do solo. Essa constatação reforça a efetividade da solução quando executada até o topo rochoso e demonstra o potencial de utilização do aço Grau 60 para ampliar a capacidade estrutural disponível em projetos que demandam cargas de trabalho superiores. Os resultados obtidos neste estudo contribuem para a consolidação do uso de estacas metálicas de alta resistência em condições de suporte por ponta, fornecendo evidências experimentais inéditas para o cenário brasileiro. A análise reforça que o emprego de perfis Grau 60 pode otimizar projetos, reduzir quantidades de material (custo) e ampliar a capacidade de carga. O trabalho complementa a literatura existente e fortalece o entendimento técnico sobre o comportamento de estacas metálicas sob carregamentos elevados, abrindo espaço para novas pesquisas e aplicações práticas no contexto da engenharia de fundações.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca Metálicas, Grau 60, Prova de Carga Estática.

ABSTRACT: The steel piles or H-pile in deep foundation works has been increasing in Brazil, particularly in regions where driving piles achieve the bedrock which allows the development of high allowable loads. In 2024, the first national publication involving a Static Load Test (SLT) H-pile manufactured with Grade 60 steel was presented, demonstrating significant improvements in both structural and geotechnical performance associated with the use of higher-strength steel profiles. Going ahead with these investigations, the present study reports the results of a new SLT carried out on an HP 310×79 GR 60 pile driven in soil conditions that favor the predominant development of end-bearing resistance. The pile was driven until achieve the bedrock. The load test was conducted up to a maximum load of 400 tf, corresponding to approximately 400 MPa of stress in the steel profile, considering the gross steel area (without deduction for corrosion allowance). The results indicated a geotechnical behavior characterized by elastic deformations compatible with rock-supported foundations. After the application of the maximum load, structural failure of the pile was observed, indicating that the performance limit during the test was governed by the structural resistance of the steel rather than by the soil behavior. This finding reinforces the effectiveness of the solution when piles are driven to the bedrock and demonstrates the potential use of Grade 60 steel to increase the available structural capacity in projects requiring higher working loads. The results obtained in this study contribute to consolidating the use of high-strength steel piles under end-bearing support conditions, providing unprecedented experimental evidence for the Brazilian scenario. The analysis also indicates that the use of Grade 60 steel profiles can optimize designs, reduce material quantities (and consequently costs), and increase load capacity. This work complements the

This content is Public.

existing literature and strengthens the technical understanding of the behavior of steel piles under high loading levels, opening opportunities for further research and practical applications in the field of foundation engineering.

KEYWORDS: Steel Pile, Grade 60, Static Load Test.

1 INTRODUÇÃO

O emprego de estacas metálicas tem se tornado cada vez mais competitivo na engenharia como alternativa de fundação. No Brasil, sua utilização foi impulsionada na década de 1950 pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), durante o governo de Getúlio Vargas (1951–1954). Embora esse tipo de fundação seja utilizado mundialmente há mais de 120 anos, ainda existe, sob a ótica da engenharia geotécnica, uma lacuna no entendimento mais aprofundado de seu comportamento e desempenho em campo. Outro aspecto relevante é a limitada disponibilidade de dados provenientes de ensaios experimentais, especialmente aqueles relacionados a provas de carga estática em compressão realizadas em estacas metálicas (CURY FILHO, 2016; AÇOMINAS,1981).

A Figura 1 apresenta uma linha do tempo da evolução da utilização de estacas metálicas, destacando inicialmente o emprego de trilhos ferroviários reaproveitados, seguido pelo desenvolvimento de perfis soldados, posteriormente pela introdução dos perfis laminados produzidos no Brasil com a implantação do laminador da Gerdau, além da utilização de estacas com seção decrescente e soluções com estacas mistas.

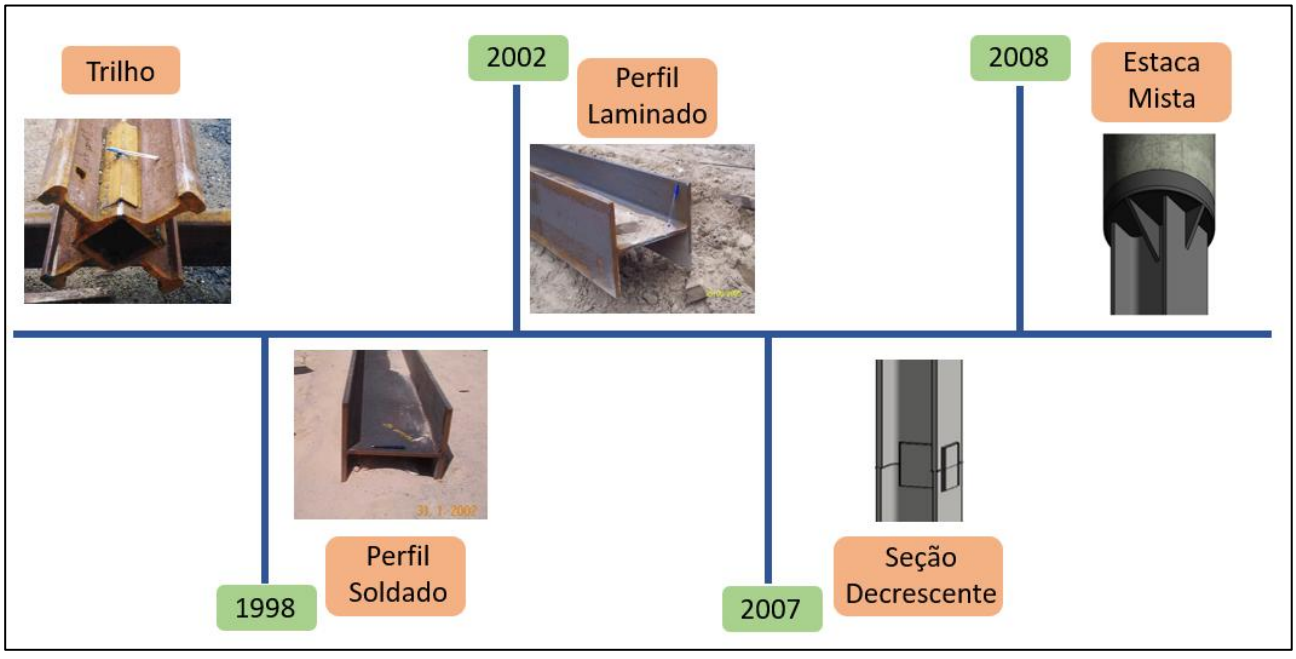


Figura 1. Linha do tempo da evolução de estacas metálicas.

A partir de 2002, as estacas metálicas passaram a ganhar maior destaque como solução de fundação, especialmente com a introdução de perfis estruturais produzidos em aço laminado de alta resistência e a diversidade de bitolas disponíveis no mercado. Nesse contexto, destacam-se os perfis estruturais da Gerdau fabricados em aço ASTM A572 Grau 50, com tensão de escoamento de 345 MPa. Posteriormente, esses mesmos perfis passaram também a ser produzidos em aço ASTM A572 Grau 60, elevando a tensão de escoamento para 415 MPa. A Figura 2 ilustra a evolução da resistência dos perfis estruturais Gerdau, desde a utilização do aço ASTM A36, com tensão de escoamento de 250 MPa, até os perfis em aço ASTM A572 Grau 60, com resistência de 415 MPa.

This content is Public.

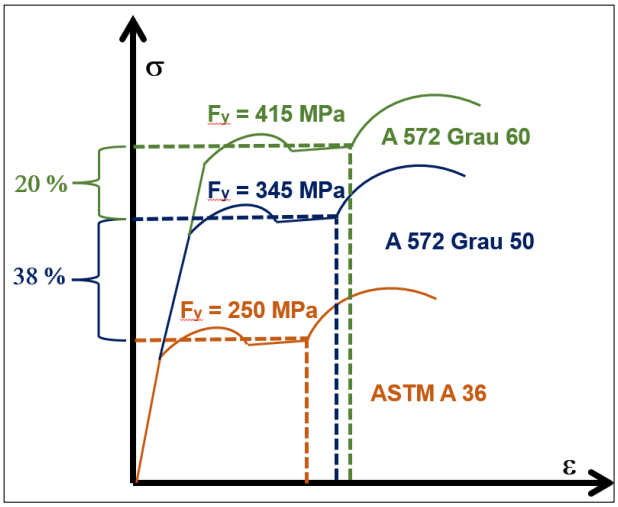


Figura 2. Resistência estrutural dos Perfis Metálicos Gerdau ao longo dos anos (CURY FILHO, D. *et al*., 2024)

Este artigo apresenta os resultados de uma prova de carga estática realizada em uma estaca metálica HP310x79, laminada em aço ASTM A572 Grau 60, com comprimento cravado de 14,40 m e carga máxima de ensaio de 4.000 kN. Cury Filho et al. (2024) publicaram anteriormente o primeiro estudo envolvendo prova de carga em estaca metálica laminada em aço Grau 60. Nesse trabalho, o ensaio atingiu uma carga máxima de 3.418 kN, estabelecendo, até então, um recorde de carregamento para um perfil HP310x79. Contudo, o ensaio não pôde ser levado a cargas superiores devido à ocorrência de ruptura estrutural (escoamento) na mesa do perfil, próxima à região de aplicação da carga pelo cilindro hidráulico. Tal comportamento pode ter sido provocado por uma possível excentricidade entre o eixo do perfil e o eixo do cilindro hidráulico, uma vez que, sob elevados níveis de tensão, pequenas excentricidades podem gerar momentos fletores significativos. No presente estudo, esse limite foi superado, atingindo-se uma carga máxima de 4.000 kN. Para evitar a ocorrência de problemas estruturais semelhantes, foram adotados reforços estruturais na região de apoio do cilindro hidráulico, conectando a chapa superior de reação à mesa e à alma do perfil, conforme ilustrado na Figura 8.

Cury Filho *et al*. (2024) também destacam a importância da utilização de martelo hidráulico com massa batente superior a 50 kN, bem como da adoção de um rigoroso controle de nega durante o processo de cravação. Esses aspectos são considerados fundamentais para garantir que o desempenho geotécnico da estaca seja compatível com as estimativas de projeto.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização Geológica/Geotécnica

Para a caracterização do subsolo local foram executados sete furos de sondagem do tipo SPT. As investigações indicaram a presença de uma camada superficial de aterro com baixa capacidade de suporte, com espessura variando entre 1,7 m e 4,35 m. Abaixo dessa camada ocorre um depósito aluvionar composto predominantemente por areia fina, com valores de Nspt variando entre 1 e 14 golpes, estendendo-se até profundidades entre 7,50 m e 10,90 m. Sotoposto a esse material, foi identificada uma camada de solo residual composta por silte muito arenoso, micáceo, com fragmentos de rocha, seguida por areia média, apresentando valores de Nspt variando entre 2 golpes e impenetrável. A sondagem SP-02 corresponde ao furo mais próximo do local de cravação da estaca metálica; na Figura 3 é apresentado o respectivo perfil geológico / geotécnico.

This content is Public.

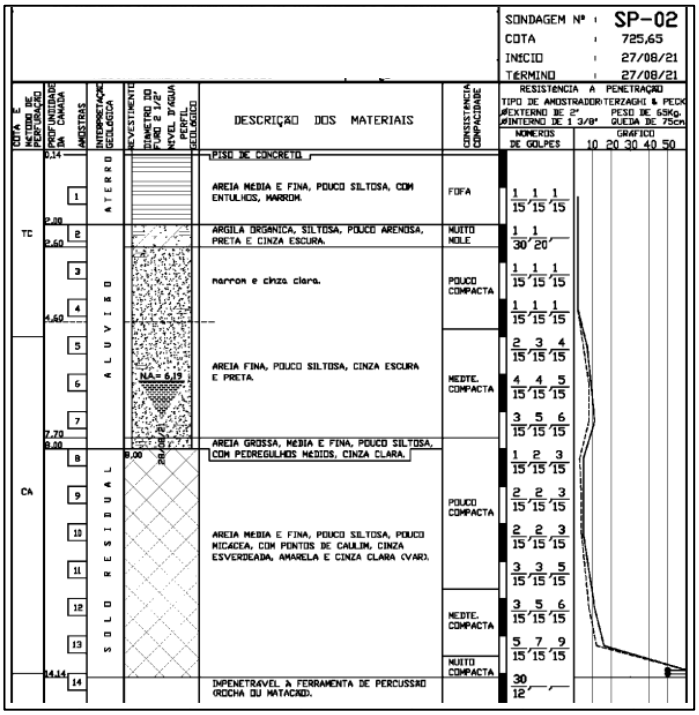


Figura 3. Perfil geológico / geotécnico através da sondagem SP-02, próxima ao local de cravação.

2.2 Características da estaca e da prova de carga estática

Para a avaliação do desempenho geotécnico e estrutural da estaca metálica HP310x79, laminada em aço Grau 60, foi realizada uma prova de carga estática com carregamento lento. A estaca foi cravada até a condição de impenetrável, atingindo a profundidade de 14,40 m, utilizando equipamento sobre esteiras acoplado a um martelo hidráulico de alta eficiência, com massa batente de 60 kN. Durante o processo de cravação, em função da baixa resistência das camadas de solo atravessadas, foram adotadas alturas de queda crescentes, iniciando-se com 30 cm, posteriormente 50 cm e finalizando com 60 cm, quando foi registrada condição de "nega zero". A Figura 4 apresenta o boletim de execução da estaca, incluindo o diagrama de cravação e os registros de nega e repique. As Figuras 5, 6 e 7 apresentam fotos obtidas em campo durante o processo de cravação da estaca.

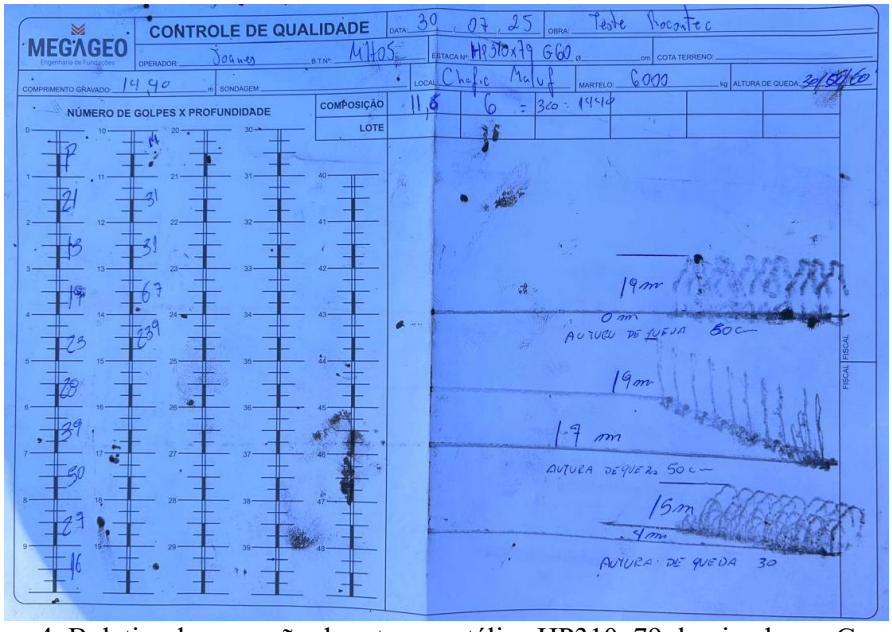
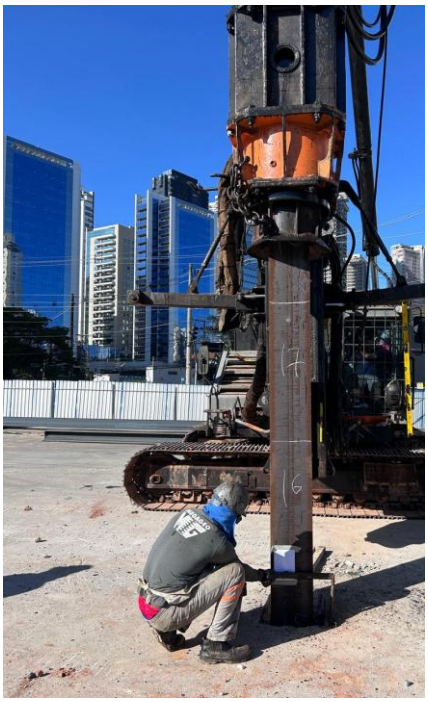


Figura 4. Boletim de cravação da estaca metálica HP310x79, laminada em Grau 60.

This content is Public.

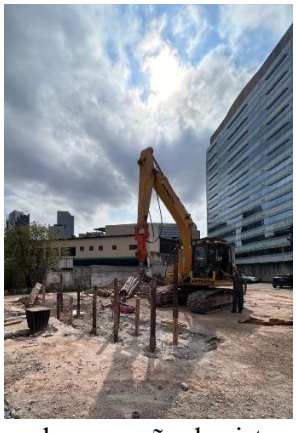
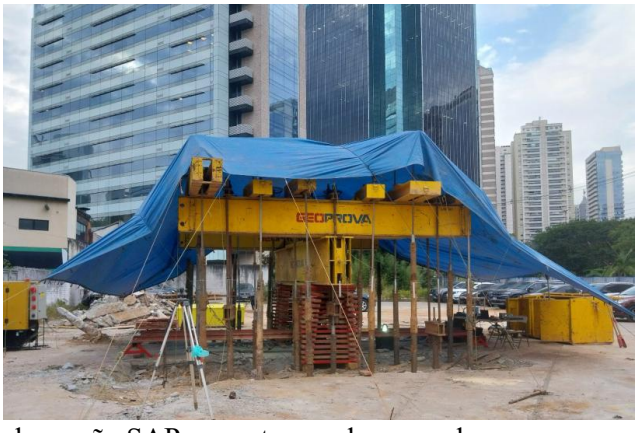


Figuras 5, 6 e 7. Fotos em campo durante a cravação da estaca metálica.

A prova de carga estática foi conduzida seguindo os preceitos da NBR 16903 (ABNT, 2020). O sistema de carregamento adotado foi convencional, pelo topo com transferência por vigas metálicas e ancoradas ao solo através de reações provisórias no sistema SAP, cujos elementos resistentes à tração consistiram em estacas helicoidais. A Figura 5 apresenta fotos ilustrativas do ensaio. O plano de carregamento à compressão foi desenvolvido cuidadosamente, garantindo a segurança durante o ensaio caso a estaca tivesse uma ruptura estrutural, sendo acrescimos de carga de 500 kN até o 4º estágio de carregamento, seguido por incrementos de 250kN.

Na prova de carga foram utilizadas 16 reações provisórias no sistema SAP com comprimento previsto de 14 metros, uma viga principal, duas vigas secundárias, 10 vigotas, 2 vigas de referência, 4 relógios analógicos deflectômetro, célula de carga e cilindro hidráulico com capacidade de 6.000 kN. Com objetivo de prevemir ruptura estrutural do topo da estaca (próximo ao cilindro hidráulico) devido a excentricidades durante a montagem, foram realizados reforços estruturais conectando a chapa superior de apoio do cilindro à mesa e à alma do perfil. As Figuras 8 a12 apresentam fotos da prova de carga estática.

Figuras 8, 9 e 10. Fotos da execução do sistema de reação SAP e montagem da prova de carga.

This content is Public.



Fotos 11 e 12. Montagem da prova de carga estática.

Com a realização da prova de carga foi possível produzir a curva Carga VS Deslocamento. O ensaio foi interrompido com 4.000 kN por ruptura estrutural do elemento no trecho enterrado, não sendo possível identificar a profundidade, consequentemente, não foi possível realizar o descarregamento. Na Figura 13, além da curva Carga VS Deslocamento foi adicionado a deformação elástica teórica do elemento de fundação, adotando a área bruta de aço de 100 cm² e módulo de elasticidade de 200 GPa, conforme manual de estacas metálicas Gerdau.

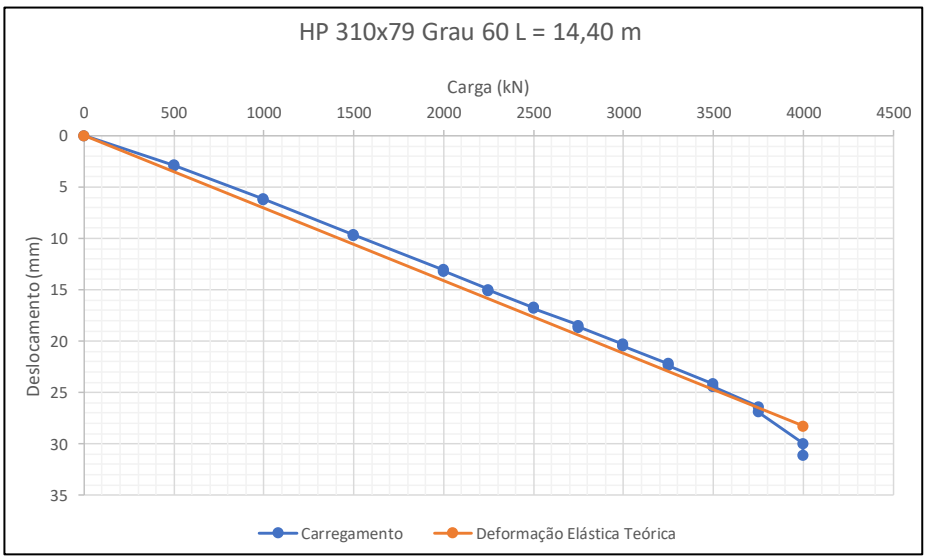


Figura 13. Resultado da prova de carga estática e deformação elástica teórica.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.

Além da análise da curva Carga × Deslocamento, foram aplicados o critério de ruptura da NBR 6122 (ABNT, 2022) e o critério proposto por Terzaghi (1943). A aplicação desses métodos indica que não houve ruptura geotécnica da estaca durante o ensaio. Observa-se ainda que o comportamento registrado foi predominantemente elástico, com valores de deformação próximos aos esperados para esse regime, demostrando também que a carga aplicada foi resistida majoritariamente pela ponta da estaca. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 14.

This content is Public.

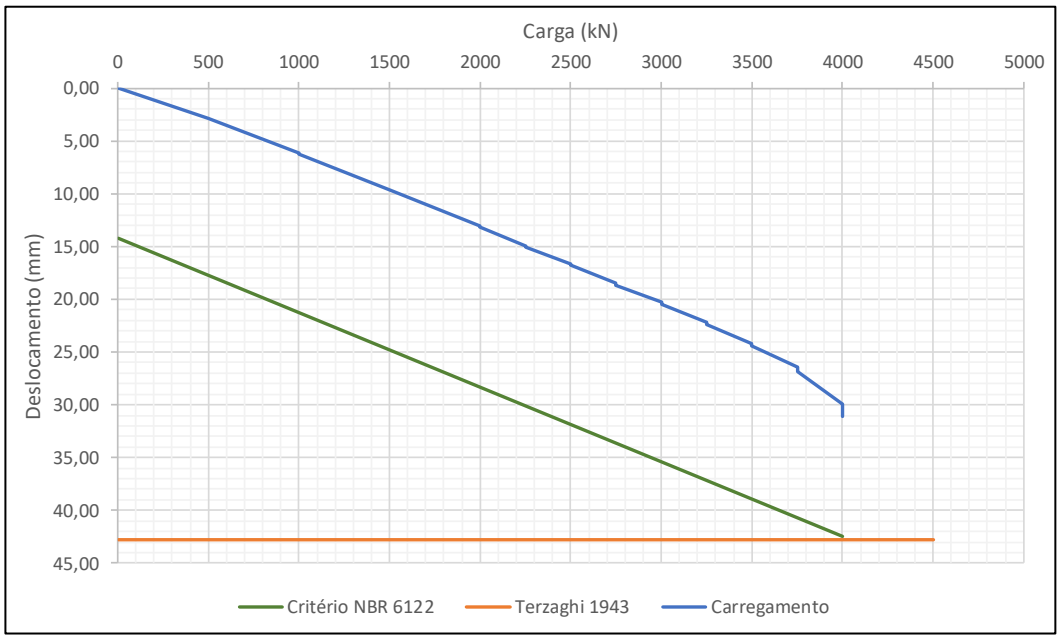


Figura 14. Análise dos resultadas PCEs pelo critério na NBR 6122 (ABNT, 2019) e Terzaghi (1943).

Comparando-se os resultados obtidos neste estudo com aqueles apresentados por Cury Filho et al. (2024), observam-se comportamentos semelhantes em termos de deformações para a mesma ordem de grandeza das cargas aplicadas. Destaca-se que, no presente ensaio, foi atingida uma carga máxima de 4.000 kN, correspondente a uma tensão aproximada de 400 MPa, considerando-se a área bruta de aço de 100 cm². Embora o material apresente tensão de escoamento de 415 MPa, é importante ressaltar que estacas executadas em campo, sejam cravadas ou moldadas *in loco*, dificilmente permanecem perfeitamente no prumo, ocorrendo variações dos níveis de tensão ao longo do fuste. Esses fatores podem gerar esforços adicionais de flexão, o que ajuda a explicar a ocorrência de ruptura estrutural no trecho enterrado da estaca. A Figura 15 apresenta a comparação entre os resultados da prova de carga estática realizada neste estudo e aqueles obtidos por Cury Filho et al. (2024).

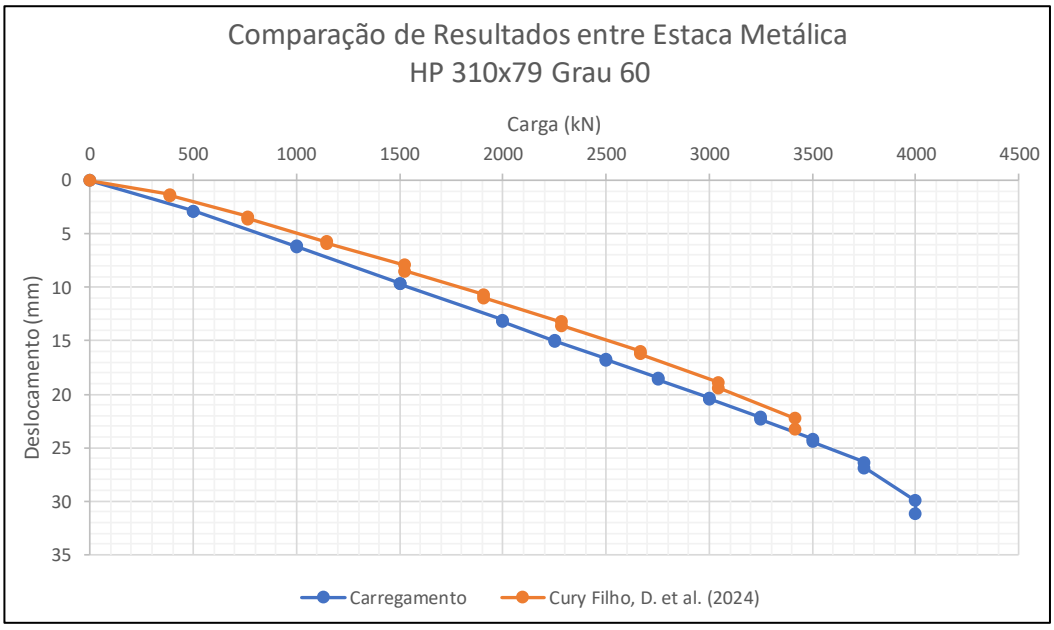


Figura 15. Comparação entre resultados obtidos neste artigo e por Cury Filho, D. *et al.* (2024).

This content is Public.

5 CONCLUSÕES.

A prova de carga estática realizada na estaca metálica HP310x79, laminada em aço ASTM A572 Grau 60 e cravada até 14,40 m de profundidade, atingiu carga máxima de 4.000 kN, valor superior ao anteriormente reportado para esse perfil em ensaios experimentais disponíveis na literatura nacional.

A análise da curva carga × deslocamento, associada à aplicação dos critérios de ruptura da NBR 6122 (ABNT, 2022) e de Terzaghi (1943), indicou que não ocorreu ruptura geotécnica da estaca durante o ensaio, evidenciando comportamento predominantemente elástico do sistema de fundação.

Os resultados obtidos sugerem que a resistência mobilizada foi majoritariamente associada à ponta da estaca, compatível com as condições geotécnicas do subsolo investigado e com a condição de cravação até o impenetrável.

A comparação com os resultados apresentados por Cury Filho *et al*. (2024) demonstrou comportamento semelhante das deformações para níveis de carregamento da mesma ordem de grandeza, reforçando a consistência experimental dos resultados obtidos para estacas metálicas laminadas em aço Grau 60.

A ruptura estrutural observada no trecho enterrado da estaca, ocorrida próximo ao limite de tensão do material, indica que pequenas excentricidades de carregamento e variações na distribuição de tensões ao longo do fuste podem induzir esforços adicionais de flexo-compressão, influenciando o comportamento estrutural do elemento de fundação.

Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo reforçam o potencial de utilização de estacas metálicas laminadas em aço de alta resistência como solução eficiente para fundações profundas, contribuindo para o avanço do conhecimento experimental e fornecendo subsídios técnicos para o aprimoramento de critérios de projeto e execução desse tipo de fundação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022) NBR 6122 *Projeto e execução de fundações profundas*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 16930:2020, *Solo – Prova de Carga Estática em Fundação Profunda*, Rio de Janeiro

Açominas - Siderbrás. *Estacas em perfis de aço.* 1 ed. Belo Horizonte: Açominas - Siderbrás, 1981. 83p. (Coletânea Técnica do uso do aço) v. 4.

Cury Filho, D. (2016) *Previsão da Carga de Ruptura de Estacas Metálicas Submetidas a Esforços de Compressão em Solo de Diabásio da Região de Campinas / SP*, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 223p.

Cury Filho, D. *et al.* (2024) *Prova de Carga em Perfil Laminado no Grau 60 – Uma Nova Tecnologia*, COBRAMSEG, 2024, Balneário de Camboriú. Anais.

Décourt, L. (2008). *Provas de carga em estacas podem dizer muito mais do que têm dito*. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais – SEFE, 6, 2008, São Paulo. Anais… São Paulo: ABMS. v. 1. p. 221-245.

Terzaghi, K. (1943) *Theoretical Soil Mechanics*. JOHN WILEY AND SONS, New York, 511p.

This content is Public.