

Prova de Carga em Perfil Laminado no Grau 60 – Uma Nova Tecnologia

Dirney Cury Filho

Gerente Técnico, G2Base Fundações e Contencções, São Paulo, Brasil, dirney.cury@gmail.com

Tiago Garcia Rodriguez

Sócio-diretor, Geoprova Engenharia, Campinas, Brasil, tiago@geoprova.com.br

Guilherme Soler Varela da Silva

Sócio-diretor, Geoprova Engenharia, Campinas, Brasil, guilherme@geoprova.com.br

Alline Evangelista Silva

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

RESUMO: Com a evolução da ciência dos materiais, hoje em dia é possível fabricar perfis laminados em Grau 60, ou seja, com tensão de escoamento de 415 MPa contra 345 MPa dos perfis laminados Grau 50. Este artigo apresenta a primeira Prova de Carga Estática em uma estaca HP 310x79, ASTM A-572 Grau 60, com tensão obtida no ensaio acima de 400 MPa, considerando espessura de sacrifício de 1 mm conforme recomendação da NBR 6122 (ABNT, 2022), sendo este caso um recorde de carga aplicada em uma estaca HP 310x79. Também é apresentado neste artigo uma prova de carga em uma estaca HP 310x125, ASTM A-572 Grau 50, instrumentada e ensaiada no mesmo local que a Grau 60. As estacas foram cravadas em solo sedimentar da bacia terciária da cidade de São Paulo, através de martelo hidráulico Junttan 5 toneladas, chegando até o limite de cravação (topo rochoso). As provas de carga expõem que estacas curtas apoiadas em rocha podem chegar a cargas altas com deformações elásticas, tornando essa nova tecnologia uma alternativa de fundação interessante dentro do seu custo / benefício.

PALAVRAS-CHAVE: Estaca Metálica, Grau 60, Prova de Carga Estática, Instrumentação Geotécnica

ABSTRACT: With the evolution of materials science, nowadays it is possible to manufacture rolled profiles in Grade 60, meaning with a yield strength of 415 MPa compared to Grade 50 rolled profiles' 345 MPa. This article presents the first Static Load Test on an HP 310x79 pile, ASTM A-572 Grade 60, with a test tension above 400 MPa, considering a sacrificial thickness of 1 mm as recommended by NBR 6122 (ABNT, 2022), this being a record of applied load on an HP 310x79 pile. Also presented in this article is a load test on an instrumented HP 310x125 pile, ASTM A-572 Grade 50, at the same location as the Grade 60 one. The piles were driven into the sedimentary soil of the tertiary basin of São Paulo city, using a 5-ton Junttan hydraulic hammer and reaching the driving limit (rock top). The load tests show that short piles supported on rock can withstand high loads with elastic deformations, making this new technology an interesting foundation alternative within its cost/benefit.

KEYWORDS: Steel pile, Grade 60, Static Load Test, Geotechnical Instrumentation

1 INTRODUÇÃO

O emprego de estacas metálicas está cada vez mais competitivo no setor geotécnico como alternativa de fundação. As estacas metálicas no Brasil foram desenvolvidas pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) na década de 50, no governo de Getúlio Vargas (1951-1954). Apesar de serem implantadas mundialmente há mais de 120 anos, ainda existe uma carência, sob a ótica da geotecnia, sobre o entendimento e funcionalidade do seu comportamento. Outro fator que merece destaque é a escassez de dados, resultantes de testes

experimentais, sobre o comportamento das estacas metálicas, especialmente, perfis submetidos a provas de carga com esforços compressivos (CURY FILHO, 2016; AÇOMINAS, 1981).

Ao longo dos anos as estacas metálicas começaram a ganhar destaque, como solução de fundação, quando os perfis estruturais Gerdau foram produzidos em aço laminado de alta resistência (ASTM A-572), Grau 50, com tensão de escoamento de 345 MPa. A partir de alguns anos, esses mesmos perfis A-572 também podem ser produzidos no Grau 60, aumentando sua tensão de escoamento para 415 MPa. A Figura 1 ilustra o ganho de resistências dos perfis estruturais Gerdau desde a época do aço A36 (250 MPa) até A572 GG 60 (415 MPa).

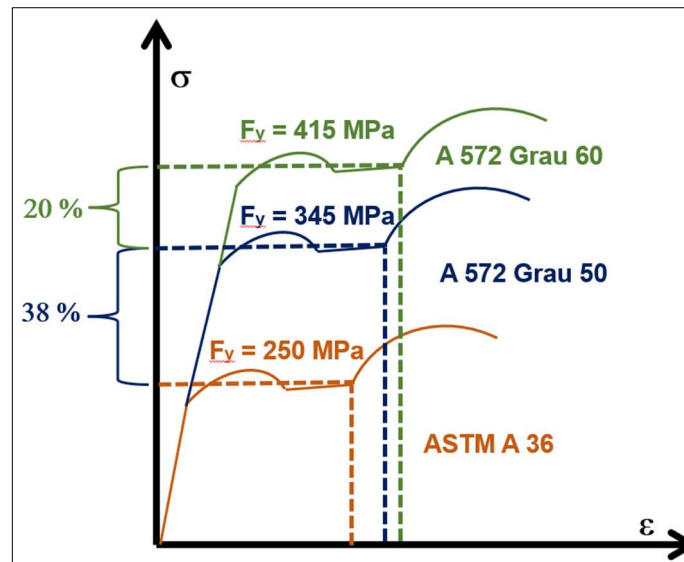


Figura 1. Resistência estrutural dos Perfis Metálicos Gerdau ao longo dos anos.

Neste artigo são apresentadas duas provas de carga estáticas (PCE) em estacas metálicas ASTM A-572 Grau 50 e Grau 60. As PCEs foram realizadas em uma estaca HP 310x79 (Grau 60) e em outra estaca HP 310x125 (Grau 50).

É destacado neste artigo que a PCE realizada na estaca HP 310x79 em Grau 60 é a pioneira no Brasil, onde foi possível chegar em tensões de ensaio acima de 400 MPa, considerando a espessura de sacrifício de 1mm conforme orientação da NBR 6122 (ABNT, 2022), resultando em um recorde de carga aplicada nessa bitola de perfil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização Geológica/Geotécnica

Para caracterização do subsolo local foram realizados 8 furos de sondagem tipo SPT. Estas sondagens apresentaram uma camada superficial de baixa capacidade, formada por aterros e aluviões, até 5,0 metros, por vezes apresentando camadas delgadas e argilas orgânicas, seguida por uma camada de solo sedimentar, predominantemente composta de argilas silto-arenosas, de resistências variando de mole a dura ($4 > N_{spt} > 50$ ou mais). O nível do lençol freático foi encontrado a 2,50 m de profundidade.

As sondagens SP-04 e SP-05 são as mais próximas das duas PCEs. A seguir, na Figura 2, é apresentado o Perfil Geológico / Geotécnico supracitado.

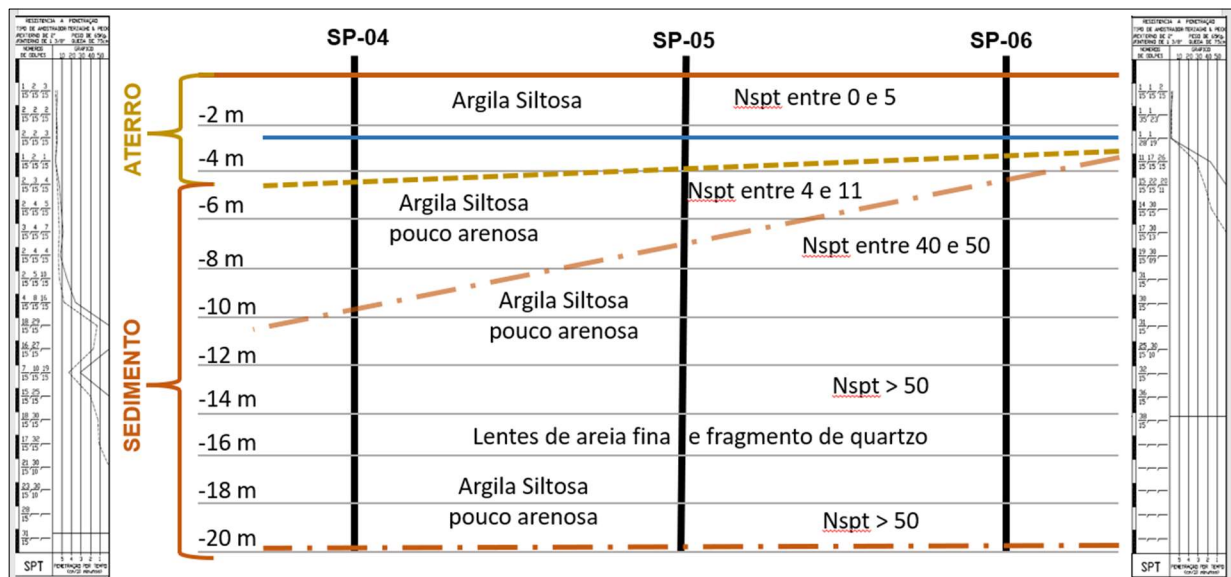


Figura 2. Perfil Geológico / Geotécnico da obra.

2.2 Características das estacas ensaiadas

Foram cravadas duas estacas metálicas para verificação do desempenho geotécnico e estrutural através de PCEs, sendo uma com seção HP310x125, ASTM A-572 Grau 50, denominada PCE-02, e outra com seção HP 310x79, ASTM A-572 Grau 60, denominada PCE-03. As estacas foram cravadas até, aproximadamente, 14 m de profundidade e tiveram critérios de paralisação com negas diferentes. Para a estaca Grau 50 (PCE-02) a nega obtida foi de 11 mm e repique de 12 mm, para a estaca Grau 60 a nega obtida foi de 1 mm e repique de 17 mm.

Os critérios de paralisações foram diferentes com o objetivo de verificar a influência do desempenho geotécnico da estaca, sendo que a decisão de adotar nega “fechada” para Grau 60 era justamente tirar o máximo de desempenho geotécnico possível tendo em vista que estruturalmente a estaca é mais resistente comparada com a Grau 50.

O martelo utilizado para cravação das estacas foi do modelo hidráulico Junttan com 5 toneladas e a altura de queda para obter as negas do Grau 50 (HP 310x125) e Grau 60 (HP 310x79) foram de 60 cm e de 50 cm, respectivamente. Na Figura 3 é apresentado a foto do equipamento na obra que foi utilizado para as cravações das estacas. Também são apresentadas as fichas de cravações das estacas HP 310x125 (PCE-02) e HP 310x79 (PCE-03) nas Figuras 4 e 5 e na Tabela 1 é apresentado o resumo dos dados obtidos durante a cravação das estacas

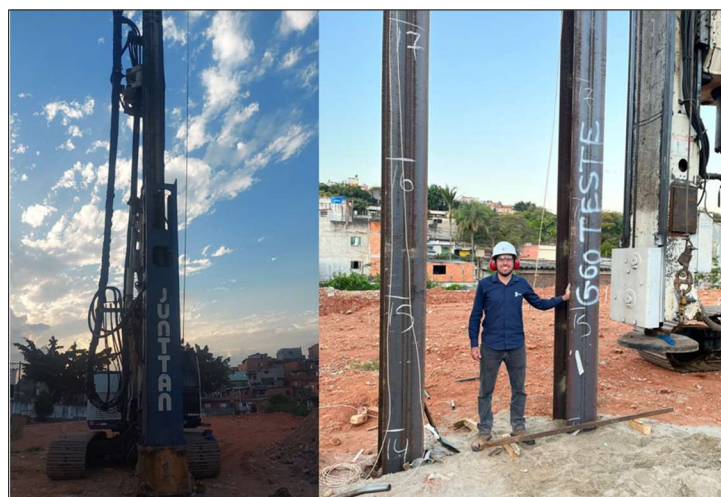


Figura 3. Detalhe do equipamento utilizado e estaca metálica Grau 60.

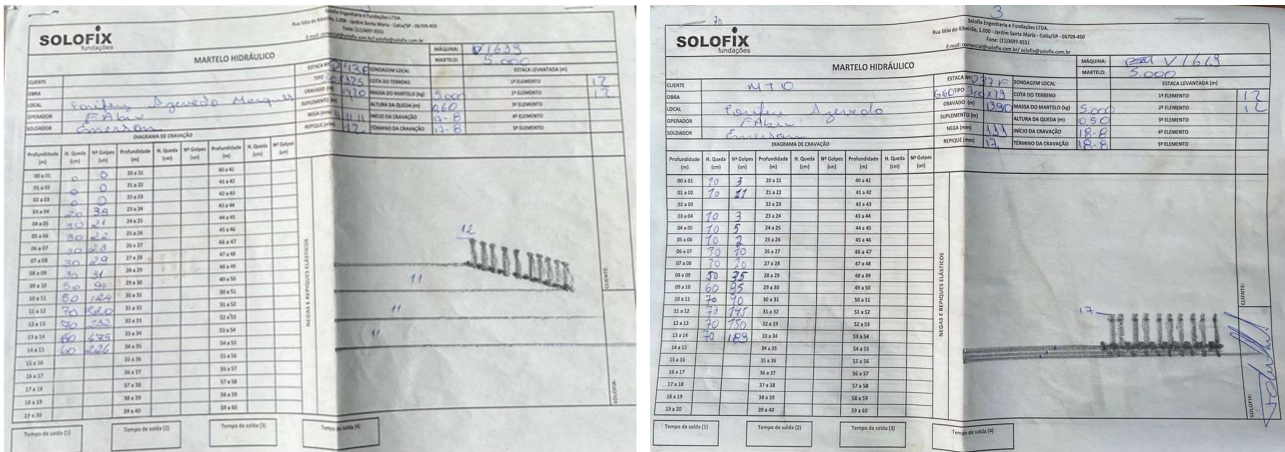


Figura 4 e 5. Boletim de cravação da estaca HP 310x125 (PCE-02) Grau 50 e da estaca HP 310x79 (PCE-03) Grau 60.

Tabela 1. Resumo dos dados das estacas e cravação

Ensaio	Nº da Estaca	Tipo estaca	Seção [cm]	Comprimento Cravado (m)	Tipo de Carregamento	Nega final de cravação (mm)	Repique elástico no final da cravação (mm)
PCE-02	ET.02	Perfil metálico	HP 310 X 125 (GRAU 50)	14,20	Lento	11	12
PCE-03	ET.03	Perfil metálico	HP 310 X 79 (GRAU 60)	13,90	Lento	1	17

As provas de carga foram conduzidas seguindo os preceitos da NBR 16903:2020. Nestas estacas foram instalados sensores resistivos (*strain gages*) em profundidade para a verificação das parcelas de carga correspondentes ao atrito lateral e ponta, por meio da instalação de dois níveis de instrumentação, com dois sensores em cada, sendo um deles de topo (referência) e o outro 0,50 m da ponta.

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 4 apresenta fotos ilustrativas do ensaio e dos sensores utilizados.



Figura 4. A esquerda: montagem da prova de carga utilizando reações no sistema SAP. A direita foto dos sensores resistivos (*strain gages*) utilizados.

Através das provas de carga estática foram produzidas as curvas Carga VS Recalque e Rigidez. A Figura 5 ilustra os resultados obtidos da PCE-02 e a Figura 6 os resultados obtidos da PCE-03.

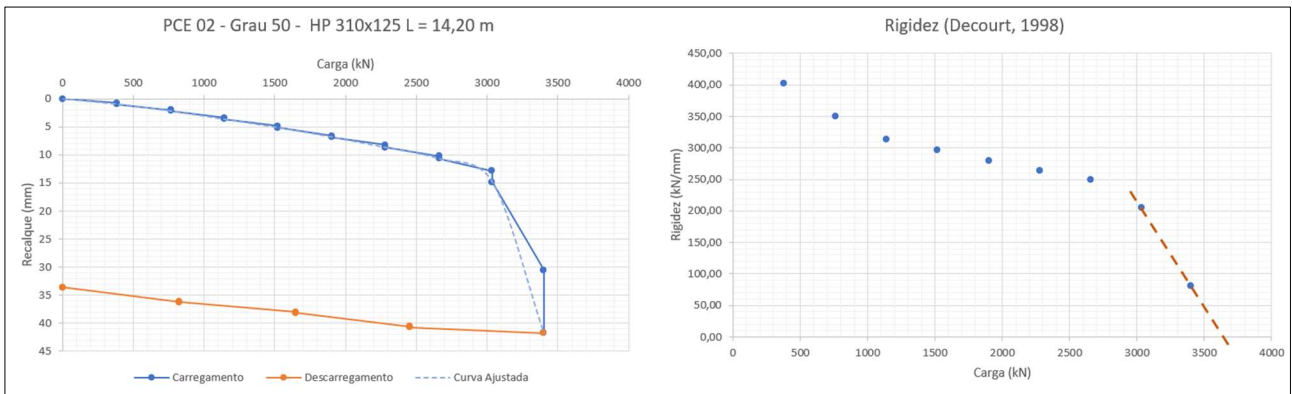


Figura 5. Resultados da PCE-02 – HP 310x125 Grau 50

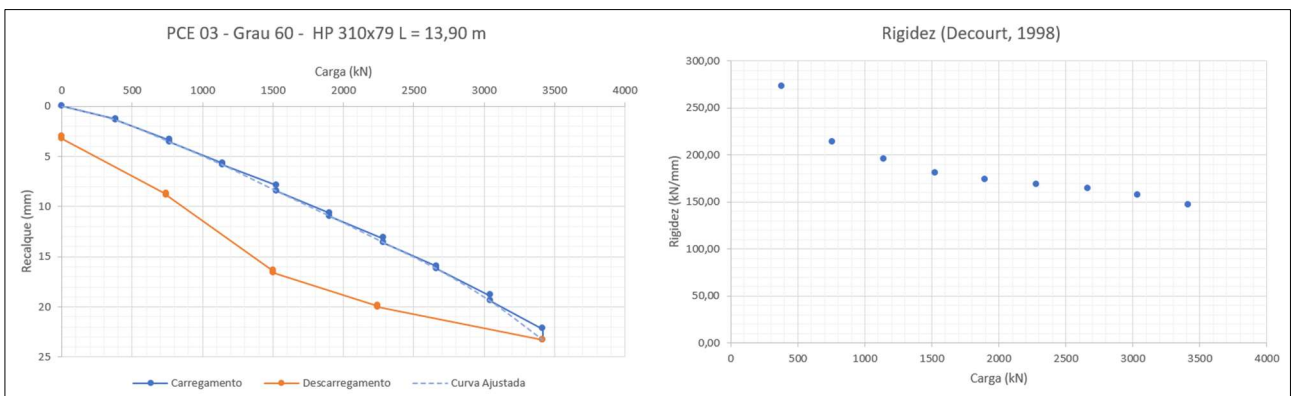


Figura 6. Resultados da PCE-02 – HP 310x79 Grau 60

Alguns fatores ocorridos durante ensaio, não permitiram o avanço da carga da estaca da PCE-03. Durante o carregamento do 9º estágio de carga, foi constatado o escoamento da mesa do perfil, próximo ao cilindro hidráulico. Este fato, aparentemente, evidencia a superação da tensão de escoamento do perfil, na fibra mais solicitada (resultante de flexões acidentais, ocasionadas pelo descasamento, de poucos milímetros, do centro de gravidade do perfil e do centro de gravidade do conjunto hidráulico). A Figura 7 apresenta o aspecto do perfil após a ruptura.



Figura 7. Ruptura estrutural do perfil Grau 60.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Curva Carga VS Recalque

Além do Gráfico de Rigidez, proposto por Decourt (2008), foi aplicado o critério de ruptura da NBR 6122 (ABNT, 2022) e critério proposto por Terzaghi (1943). Os resultados são apresentados na Figura 8.

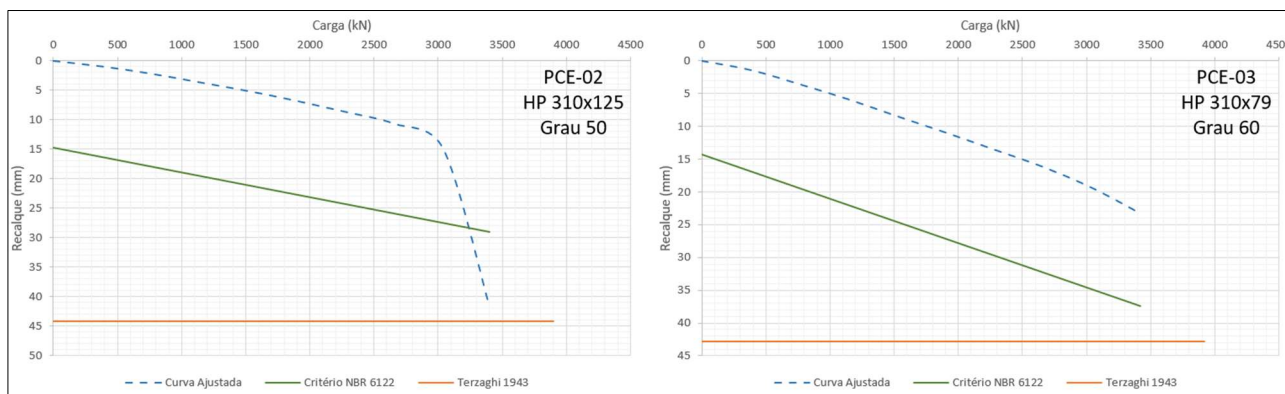


Figura 8. Análise dos resultados PCEs pelo critério na NBR 6122 (ABNT, 2019) e Terzaghi (1943)

Através dos resultados obtidos é possível afirmar que a PCE-02 rompeu geotecnicamente pelo critério da NBR 6122 (ABNT, 2019) e que apesar da ruptura estrutural da PCE-03 a mesma teve comportamento, praticamente, elástico. Tal fato é comprovado pela similaridade dos dados obtidos durante o ensaio na PCE-02 com a inclinação da reta criada pelo método da NBR 6122 (ABNT, 2022), onde considera apenas a deformação elástica do elemento de fundação.

Outro ponto importante é que a PCE-02 teve nega de 11 mm, diferentemente da PCE-03 onde a cravação foi paralisada com nega de 1 mm.

Adicionalmente, as cargas últimas de ambas as estacas foram muito próximas, 3.400 kN, porém a diferença de peso por metro entre as bitolas é significativa, chegando em uma redução de 58% do peso por metro de estaca.

3.2 Instrumentação Geotécnica

Através da instalação de sensores resistivos (*strain gages*) na PCE-02 (HP 310x125) foi possível verificar qual a parcela de carga é correspondente a ponta da estaca e a diferença da carga aplicada é atribuída ao atrito lateral. Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 2. Resumo dos resultados obtidos através da instrumentação

Ensaio	Sondagem	Carga de ensaio [kN]	Deslocamento		Distribuição de Carga		
			Máximo [mm]	Residual [mm]	Última Carga Analisada (kN)	Atrito total (%)	Ponta (%) *
PCE-02	SP-05	3.426	41,75	33,61	3.258	32%	68%
PCE-03	SP-04	3.428	23,31	3,04	-	-	-

Com os resultados obtidos também foi elaborado um gráfico da distribuição de carga ao longo da profundidade por carregamento. É ilustrado na Figura 9 o gráfico de distribuição de carga da PCE-02.

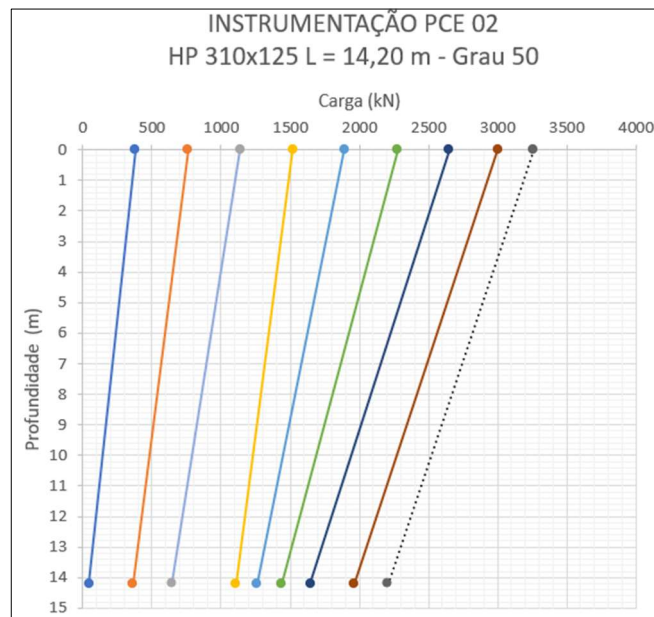


Figura 9. Distribuição de carga por carregamento da PCE-02 (HP 310x125 – Grau 50).

É necessário esclarecer que durante a leitura da última carga de distribuição o sensor instalado na profundidade (0,50 m da ponta da estaca) apresentou um valor inferior ao carregamento anterior, neste caso foi adotado o mesmo intervalo de valor medido no topo da estaca. Esse resultado adotado está destacado com linha tracejada da Figura 9.

Devido as características geológicas / geotécnicas era esperado que as estacas metálicas trabalhassem predominantemente por ponta e a instrumentação da PCE-02 comprovou essa premissa, onde 68% da carga aplica foi resistida pela ponta da estaca.

3.3 Tensões aplicadas nas estacas metálica

O item 8.6.7 da NBR 6122 (ABNT, 2022) que recomenda que as estacas metálicas devem ser dimensionadas considerando a seção reduzida, ou seja, espessura de sacrifício conforme características geológicas do subsolo local.

De maneira a buscar uma melhor comparação entre os dois ensaios, realizou-se a compatibilização em termos da tensão aplicada, sendo neste caso utilizada, em ambos os casos, a área reduzida com 1 mm de espessura de sacrifício em todas as faces do perfil. Os resultados são apresentados na Figura 10.

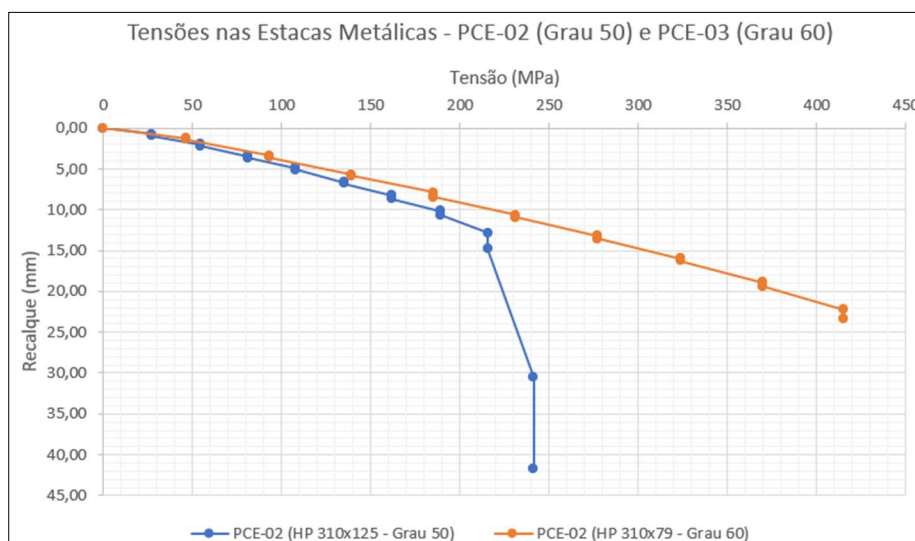


Figura 10. Tensões máximas atingidas nas estacas metálicas durante o ensaio

Para a estaca HP 310x125 (PCE-02), ASTM A-572 Grau 50, a máxima tensão aplicada foi 215 MPa, sendo que o perfil Grau 50 é laminado para uma tensão de até 345 MPa. O limitante de tensão foi a ruptura geotécnica, porém a cravação da estaca foi paralisada com nega de 11 mm, possivelmente com uma nega mais “fechada”, < 5mm, a tensão durante o ensaio poderia ter sido maior, conseqüentemente a carga última dessa estaca.

Para a estaca HP 310x79 (PCE-03), ASTM A-572 Grau 60, a tensão atingida foi a máxima estrutural do perfil, 415 MPa, ocasionado a ruptura estrutural conforme Figura 7.

4 CONCLUSÕES

Este artigo é o pioneiro em estacas metálicas Grau 60, no Brasil, onde foi possível atingir durante a prova de carga estática tensões acima de 400 MPa, considerando espessura de sacrifício de 1 mm conforme a prerrogativa normativa da NBR 6.122 (ABNT, 2022), resultando em um recorde de carga aplicada em uma estaca HP 310x79 de 3.420 kN.

As estacas metálicas apoiadas em rocha se mostraram uma boa alternativa de solução de fundação, podendo atingir cargas geotécnicas elevadas. Porém, recomenda-se que a cravação se mantenha até atingir nega inferior a 5 mm.

O equipamento utilizado para cravação, assim como os critérios de paralisação das estacas podem influenciar significativamente no desempenho geotécnico. Não é recomendado que sejam utilizados martelos sem ser 100% hidráulicos, com peso inferior a 5 toneladas.

A instrumentação em estacas metálicas é um desafio para os geotécnicos devido ao processo de cravação, que é potencialmente danoso aos sensores instalados. O presente artigo apresentou a aplicação de um novo sensor resistivo tipo *strain gage* (Figura 4), mais robusto, que suportou os esforços de cravação. Ressalta-se que este sensor foi desenvolvido pelos autores, especificamente para esta finalidade, sendo possível capturar as parcelas da resistência da estaca durante o ensaio da PCE-02. O desenvolvimento destes sensores segue e será objeto de futuras publicações. A instrumentação geotécnica realizada na PCE-02, HP 310x125, mostrou que de fato a maior parcela de carga é resistida pela ponta, para subsolos com essas características

Mais provas de carga estáticas, até o limite estrutural ou geotécnico, em Grau 60 são necessários para uma amostragem maior de comprovação do desempenho geotécnico / estrutural. Porém os resultados aqui apresentados são promissores e demonstram um ótimo potencial do uso dessa nova tecnologia aplicada em perfis laminados no grau 60 ASTM A-572, na engenharia de fundações.

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.
- 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.