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/COBRAMSEG2026.5/33

Avaliação Dos Efeitos Da Escavação Por Meio De Provas De Carga Estática Instrumentadas: Estudo Comparativo De Obras Vizinhas Em Goiânia

Nicolly Goulart Alves Soares
Estudante, Instituto Federal Goiano - Campus Trindade, Trindade, Brasil,
nicolly.soares@estudante.ifgoiano.edu.br

Aleones José da Cruz Junior
Professor, Instituto Federal Goiano - Campus Trindade, Trindade, Brasil, aleones.junior@ifgoiano.edu.br

Flávia Albuquerque
Engenheira Civil, Goiânia, Brasil, eng.albuquerquef@gmail.com

Daniel Magalhães da Cruz
Doutorando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, daniel.cruz@ufrgs.br

Juan Felix Rodríguez Rebolledo
Professor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, jrodriguezr72@unb.br

RESUMO: A escavação altera o estado de tensões do terreno e pode modificar o comportamento dos elementos de fundações profundas. Este trabalho avalia, de forma comparativa, o efeito da escavação em provas de carga estática (PCE) instrumentadas de estacas hélice contínua, executadas em duas obras vizinhas em Goiânia: no terreno natural (anterior à escavação) de um edifício alto e no terreno escavado (após a escavação) de outro empreendimento adjacente. As PCEs foram executadas conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 16903 (ABNT, 2020), observando-se também as condições mínimas de projeto e verificação da NBR 6122 (ABNT, 2022). Cada ensaio foi instrumentado com sensores de imersão instalados ao longo do fuste e na ponta das estacas, permitindo monitorar a transferência de carga e a participação relativa dos mecanismos resistentes. A instrumentação possibilitou ainda comparar curvas carga–recalque e indicadores de rigidez entre as fases anterior e posterior à escavação, fornecendo dados experimentais para análise do efeito da redistribuição de tensões causada pela remoção do solo. O estudo discute a redistribuição de tensões induzida pela escavação e seus efeitos na interpretação do desempenho das estacas, a partir dos resultados das tensões cisalhantes unitárias (adesões) obtidas entre as camadas instrumentadas, das variações da parcela de ponta, das possíveis mudanças de rigidez e das implicações na estimativa da capacidade de carga. Os resultados permitem evidenciar diferenças mensuráveis entre os cenários analisados, destacando como a escavação influencia a participação fuste/ponta e a rigidez inicial do sistema estaca–solo. As conclusões contribuem para a interpretação crítica de PCEs em contextos com etapas de escavação significativas, oferecendo subsídios para decisões de projeto, como o ajuste de parâmetros de cálculo, critérios de aceitação e segurança em empreendimentos com condições geotécnicas semelhantes.

PALAVRAS-CHAVE: Provas de Carga Estática, Estacas Hélice Contínua, Instrumentação, Efeitos da Escavação.

ABSTRACT: Excavation alters the stress state of the ground and can modify the behavior of deep foundation elements. This study comparatively evaluates the effect of excavation on instrumented static load tests (SLTs) of continuous flight auger (CFA) piles, carried out at two neighboring construction sites in Goiânia: on natural ground (prior to excavation) at a high-rise building, and on excavated ground (after excavation) at an adjacent development. The SLTs were performed in accordance with the procedures established by NBR 16903 (ABNT, 2020), also observing the minimum design and verification requirements of NBR 6122 (ABNT, 2022). Each test was instrumented with embedment sensors installed along the shaft and at the tip of the piles,

enabling monitoring of load transfer and the relative contribution of each resistance mechanism. The instrumentation also allowed for comparison of load–settlement curves and stiffness indicators between the pre- and post-excavation phases, providing experimental data for analyzing the effect of stress redistribution caused by soil removal. The study discusses the stress redistribution induced by excavation and its effects on the interpretation of pile performance, based on the results of unit shear stresses (adhesion values) obtained between the instrumented layers, variations in the tip load share, possible stiffness changes, and the implications for bearing capacity estimation. The results reveal measurable differences between the analyzed scenarios, highlighting how excavation influences the shaft/tip load distribution and the initial stiffness of the pile–soil system. The conclusions contribute to the critical interpretation of SLTs in contexts involving significant excavation stages, offering guidance for design decisions such as the adjustment of calculation parameters, acceptance criteria, and safety considerations in projects with similar geotechnical conditions.

KEYWORDS: Static Load Tests, Continuous Flight Auger Piles, Instrumentation, Excavation Effects.

1 INTRODUÇÃO

A prova de carga estática (PCE) é um ensaio de campo confiável para avaliar o comportamento carga–recalque de fundações, pois permite verificar diretamente a capacidade de carga e a rigidez do sistema solo–estrutura. Por meio de carregamentos controlados, possibilita observar o comportamento real da fundação, podendo ser complementada por instrumentação ao longo do fuste e na ponta da estaca.

No Brasil, a execução e interpretação da PCE são regulamentadas pela NBR 16903 (ABNT, 2020), que a define como método de referência para confirmar a capacidade resistente e o comportamento deformacional de fundações profundas. A NBR 6122 (ABNT, 2022) indica que seus resultados podem auxiliar no ajuste de parâmetros de projeto, definição de critérios de aceitação e verificação da segurança.

Com o aumento da complexidade das obras, especialmente em edifícios altos, cresce a necessidade de soluções de fundação mais elaboradas, exigindo equipamentos adequados e empresas especializadas. Nesse contexto, as PCEs têm sido amplamente utilizadas no controle e validação do desempenho de fundações profundas, muitas vezes com instrumentação que permite avaliar a transferência de carga e os mecanismos resistentes ao longo da estaca. Em geral, os ensaios buscam reproduzir as condições previstas em projeto, como diâmetro, comprimento, tipo de estaca e cota de execução.

Uma prática comum é executar as PCEs no nível natural do terreno para obter dados preliminares de projeto. No entanto, o comportamento pode diferir daquele observado após a escavação, devido ao alívio de tensões causado pela remoção do solo, que altera o confinamento lateral e o estado de tensões do maciço. Nessas condições, o solo pode apresentar comportamento semelhante ao de material sobreadensado, com mobilização inicial associada à recompressão até que as tensões aplicadas superem o peso do solo removido.

Diante disso, este trabalho analisa o comportamento de quatro PCEs instrumentadas em estacas hélice contínua, a partir de um estudo de caso em duas obras vizinhas em Goiânia. Duas provas foram realizadas em terreno natural e duas após escavação. A análise considera os resultados da instrumentação, avaliando a rigidez do sistema estaca–solo, o atrito lateral ao longo do fuste e a contribuição da resistência de ponta na capacidade de carga.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização do Estudo de Caso

As obras analisadas neste estudo estão localizadas no Setor Bueno, em Goiânia (GO), na região Centro-Oeste do Brasil, aproximadamente nas coordenadas 16°42’36”S e 49°16’06”W. Tratam-se de dois empreendimentos vizinhos, implantados no mesmo sítio geotécnico e desenvolvidos pela mesma incorporadora, conforme ilustrado na Figura 1. O sítio geotécnico é caracterizado predominantemente por solos lateríticos na superfície e solos residuais em profundidade, típicos da região. Essa proximidade e origem comum favorecem condições geotécnicas e construtivas semelhantes, contribuindo para a análise comparativa proposta neste trabalho.



Figura 1. Localização do estudo de caso.

Na Obra I foi construída uma torre residencial com 42 pavimentos, dois subsolos e cerca de 123 m de altura. Já na Obra II, a torre possui 33 pavimentos, três subsolos e aproximadamente 99 m de altura. No Terreno I, foram realizadas duas provas de carga estática instrumentadas (PCEs) em estacas executadas no nível natural do terreno. No Terreno II, foram executadas duas PCEs instrumentadas após a escavação de cerca de 9 m para implantação dos subsolos. Assim, os ensaios consideram duas condições distintas de estado de tensões no solo: estacas executadas em terreno natural e após escavação. As quatro PCEs analisadas fazem parte do banco de dados do sítio experimental "AI", apresentado por Cruz Junior e Sales (2023).

2.2 Características dos Ensaios

Para as análises deste trabalho, foram consideradas quatro PCEs que antecederam o projeto executivo e contribuíram para a definição dos comprimentos das estacas. Todas as provas foram realizadas conforme a NBR 16903 (ABNT, 2020), com carregamento lento em dez estágios e incrementos regulares de carga. A Tabela 1 apresenta um resumo das principais características geométricas das estacas, das condições de execução e dos carregamentos máximos aplicados em cada ensaio.

PCE	Obra	Data	Diâmetro (m)	Comp. (m)	Carga Máx (tf)	Condição
PCE - 01	I	Out./2020	0,80	23,00	500	Natural
PCE - 02	I	Out./2020	0,80	21,00	445	Natural
PCE - 03	II	Out./2023	0,90	19,60	460	Escavado
PCE - 04	II	Out./2023	0,90	19,60	460	Escavado

Tabela 1 – Características das provas de carga estática instrumentadas.

A PCE-01 e a PCE-02 foram realizadas no nível do terreno natural da Obra I, enquanto a PCE-03 e a PCE-04 foram executadas após a escavação do terceiro subsolo da Obra II, correspondente a cerca de 9 m de profundidade. Essa diferença nas condições de execução constitui a principal variável do estudo, pois a escavação altera o estado de tensões do maciço e o confinamento do solo ao redor das estacas. A Figura 2 apresenta a configuração esquemática do sistema de reação e da montagem do ensaio, ilustrando o arranjo adotado na Obra I. Destaca-se que as estacas das duas obras possuem diâmetros distintos, refletindo as soluções de fundação adotadas em cada empreendimento.

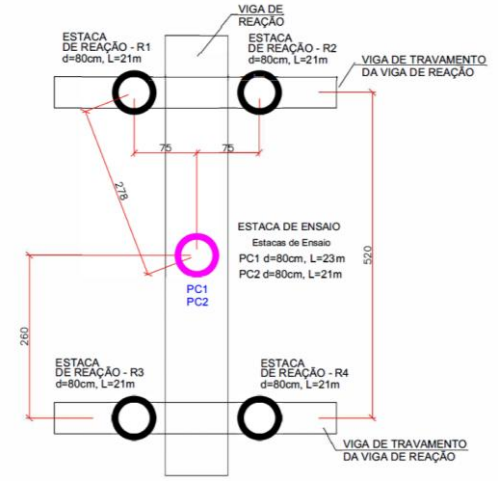


Figura 2 – Desenho esquemático da configuração de montagem dos ensaios.

2.3 Instrumentação

A instrumentação adotada para determinar as forças ao longo da profundidade consistiu no uso de sensores miniaturizados, conforme a metodologia de Cruz Junior (2016), com extensômetros de resistência elétrica de 120 ohms em configuração de ponte completa de Wheatstone, seguindo rigorosamente os procedimentos de fabricação, proteção, calibração e instalação. Para a instalação, utilizou-se ferragem auxiliar posicionada nos níveis previamente definidos de instrumentação, conforme ilustrado na Figura 4. As deformações medidas pelos sensores, associadas às cargas aplicadas no topo da estaca, foram utilizadas para determinar o módulo de elasticidade secante do concreto, conforme Lam & Jefferis (2011) e Fellenius (2012), considerando sua variação com o nível de deformação. Para o estudo, foram obtidas as Equações 1 a 4, referentes às PCE-01 e PCE-02 (Obra I) e às PCE-03 e PCE-04 (Obra II), nas quais E representa o módulo de elasticidade secante (em GPa) e ε as deformações medidas em microstrain (με), adotadas como negativas para compressão.

$$E\ (GPa) = 0{,}0450\ \varepsilon\ (mm/m) + 48{,}27 \quad (1)$$

$$E\ (GPa) = 0{,}0340\ \varepsilon\ (mm/m) + 41{,}14 \quad (2)$$

$$E\ (GPa) = 0{,}0103\ \varepsilon\ (mm/m) + 40{,}75 \quad (3)$$

$$E\ (GPa) = 0{,}0214\ \varepsilon\ (mm/m) + 44{,}59 \quad (4)$$



(a) (b)

Figura 4 - Instalação dos sensores na PCEs instrumentadas na Obra II: (a) detalhe do sensor instalado próximo a ponta na PCE-04; e (b) vista geral da PCE-03, detalhe da proteção dos cabos e sensores de referência no topo.

Os terrenos apresentam leves desníveis, resultando em diferentes profundidades de escavação. Além disso, as sondagens indicaram variações nas camadas do solo e nos valores de NSPT.A Figura 5 apresenta as PCE-

01 e PCE-03, incluindo as cotas de execução, o perfil do solo com base na sondagem mais próxima, os valores de NSPT em função da profundidade, o nível d'água e as posições dos sensores de instrumentação.

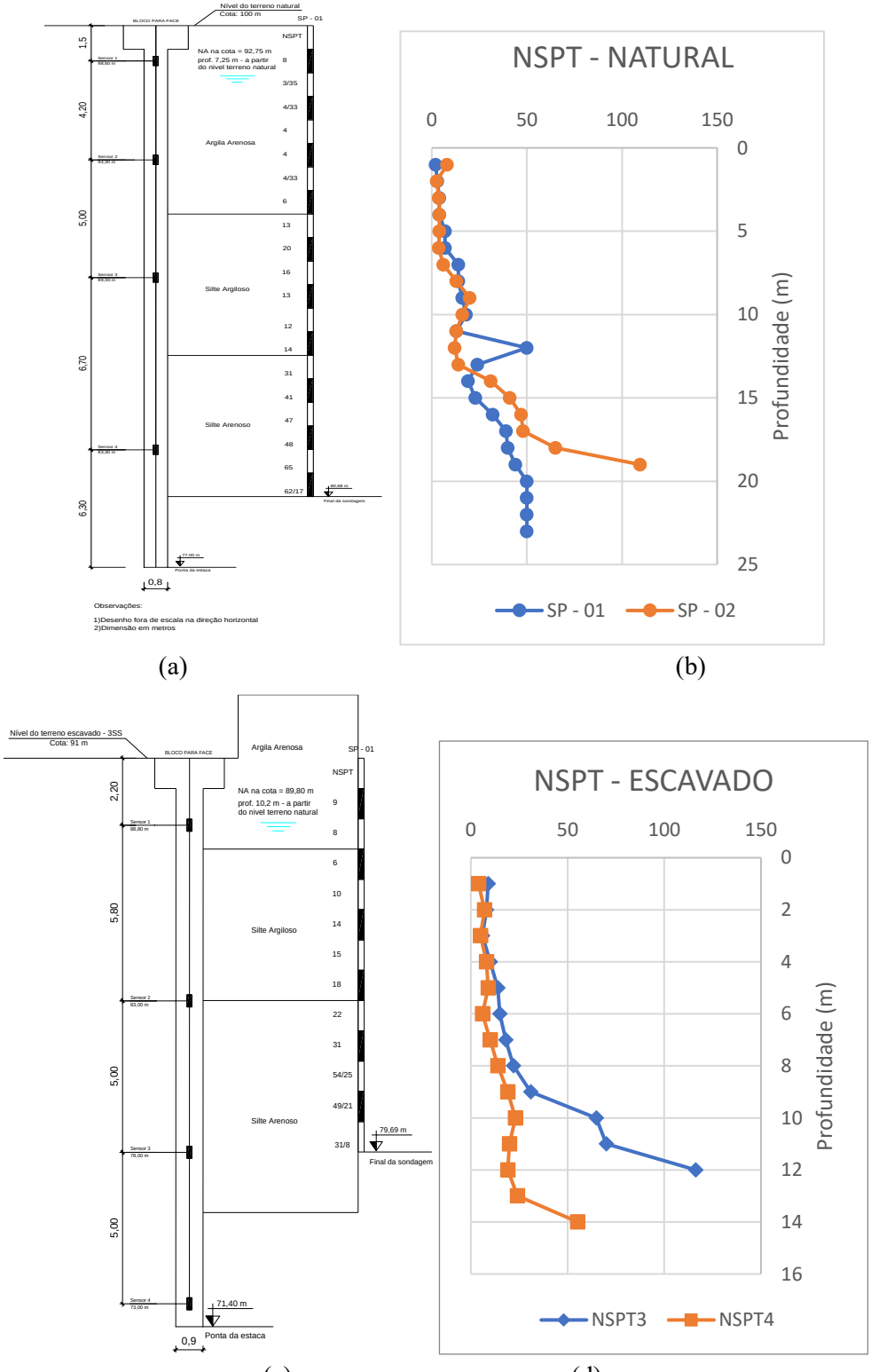


Figura 5 – Características dos solos e de instalações das PCES – PCE-01; (b) PCE-02; (c) PCE-03; (d) PCE-04.

A partir da aplicação da teoria da elasticidade, utilizando o valor do módulo secante correspondente às deformações medidas nos diferentes níveis instrumentados e considerando área de seção transversal constante, tornou-se possível determinar a carga atuante em cada nível de sensor. Dessa forma, foi possível construir as curvas de transferência de carga ao longo da estaca, bem como as curvas carga–recalque no topo apresentadas na Figura 6.

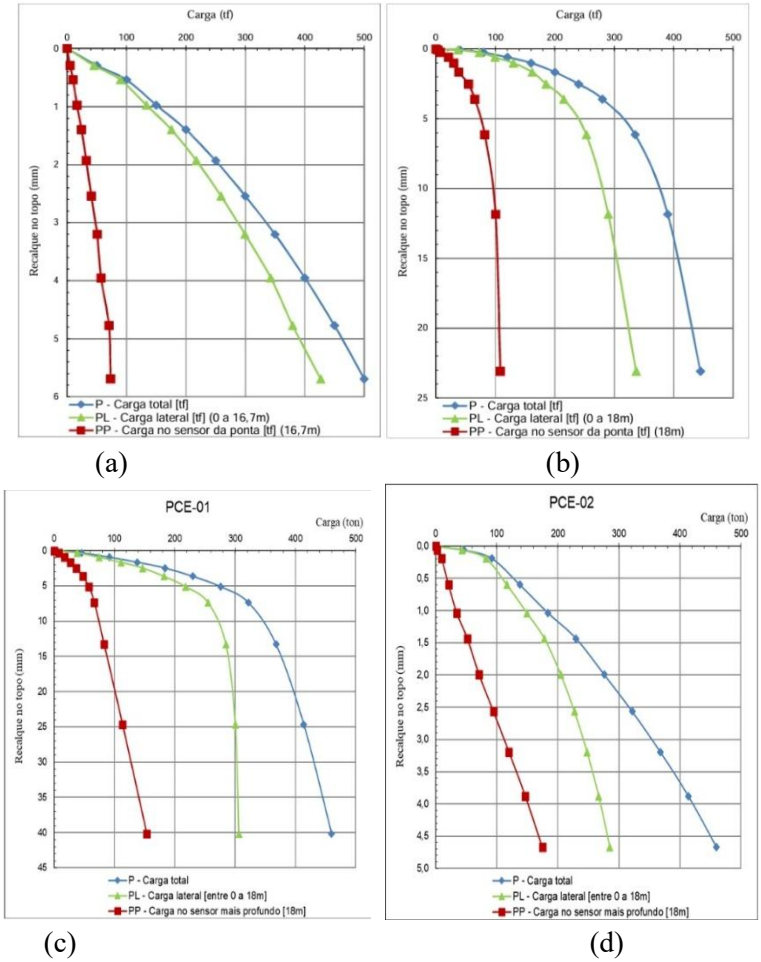


Figura 6 – Curvas Carga versus Recalque –
(a) PCE-01; (b) PCE-02; (c) PCE-03; (d) PCE-04.

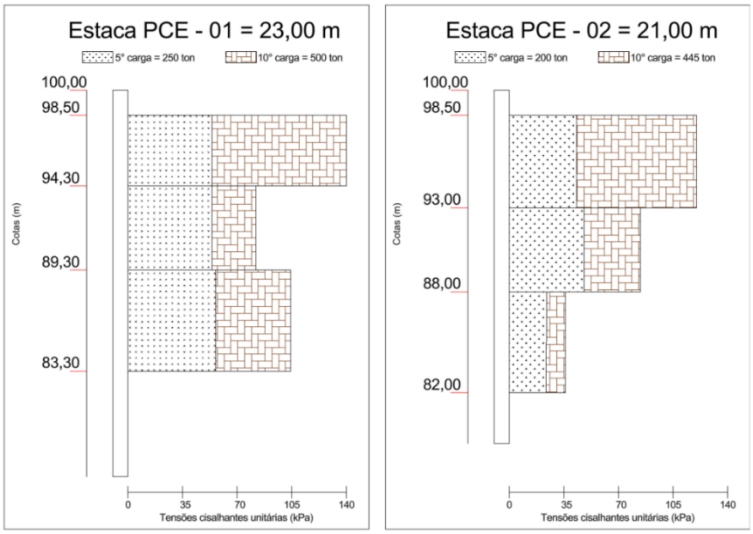
3 ANÁLISE DE RESULTADOS

A Figura 7 apresenta os resultados das tensões cisalhantes unitárias (adesões) no 5º e 10º estágios de carregamento das duas provas de carga estática (PCEs) da Obra I.

Na PCE-01, no 5º estágio (250 tf), o diagrama mostra mobilização progressiva da resistência lateral ao longo do fuste, sem indícios de plastificação nos trechos instrumentados. No 10º estágio (500 tf), as tensões aumentam, principalmente nos segmentos superiores e próximos ao topo, indicando maior mobilização do atrito lateral, ainda distante da ruptura geotécnica.

Destaca-se que, na Obra I, as estacas foram executadas sem escavação prévia, mantendo o estado de tensões original do solo. Assim, o coeficiente de empuxo no repouso (K_0) permanece praticamente inalterado, resultando em menores tensões normais na interface estaca–solo e, consequentemente, menores tensões cisalhantes mobilizadas em comparação com estacas executadas após escavação.

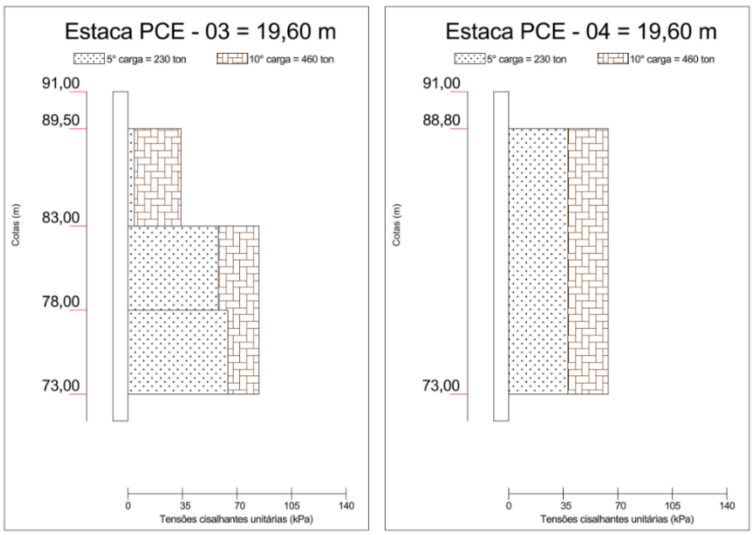
Na PCE-02, no 5º estágio (200 tf), o diagrama apresenta distribuição gradual ao longo do fuste, com redução dos valores do topo para a base. No 10º estágio (445 tf), há aumento das tensões em todos os sensores, indicando maior mobilização do atrito lateral ao longo do comprimento instrumentado. Ressalta-se que o trecho entre 18 m e 21 m não foi instrumentado, limitando a análise nesse intervalo.



(a) (b)

Figura 7 – Gráfico de Tensão cilhante versus recalque – Obra I –
(a) detalhe do gráfico da PCE-01; (b) detalhe do gráfico da PCE-02.

A Figura 8 apresenta as curvas de transferência de carga das PCE-03 e PCE-04, executadas na Obra II, onde o terreno foi previamente escavado em cerca de 9 m antes da execução das estacas. As estacas possuem diâmetro de 90 cm, comprimento de 19,6 m e foram submetidas a dez estágios de carregamento, com incrementos de aproximadamente 46 tf, até atingir a carga máxima de 460 tf.



(a) (b)

Figura 8 – Gráfico de Tensão cilhante versus recalque – Obra II –
(a) detalhe do gráfico da PCE-03; (b) detalhe do gráfico da PCE-04.

A PCE-03 apresenta comportamento distinto das estacas executadas em terreno natural. No 5º estágio (230 tf), os sensores entre 2,20 m e 8 m registram baixas tensões cisalhantes devido à reduzida sobrecarga após a escavação, enquanto nos trechos mais profundos, entre 13 m e 18 m, concentra-se a maior parte da resistência mobilizada. No 10º estágio (460 tf), esse comportamento se intensifica: os segmentos inferiores apresentam altas tensões cisalhantes e os superiores permanecem com baixa mobilização de atrito, em função da remoção dos primeiros 9 m de solo, que reduz as tensões verticais efetivas e o confinamento lateral.

Na PCE-04, a escavação provoca alívio das tensões verticais ao longo de todo o perfil, reduzindo σ'v em todas as profundidades e, consequentemente, o confinamento lateral e a mobilização do atrito. No 5º estágio (230 tf), os segmentos superiores apresentam baixas tensões cisalhantes, enquanto o sensor inferior registra valores mais elevados por estar sob maior confinamento. No 10º estágio (460 tf), as tensões máximas

permanecem abaixo de 65 kPa em toda a extensão instrumentada, inferiores às observadas em estacas executadas em terreno natural, confirmando que o alívio de sobrecarga influencia a mobilização do atrito ao longo de toda a estaca, inclusive fora da região escavada.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho investigou os efeitos da escavação do terreno no comportamento de estacas, por meio da análise comparativa de quatro provas de carga estática instrumentadas, realizadas em duas condições: terreno natural e terreno previamente escavado.

As conclusões baseiam-se nos dados de instrumentação e nos resultados de campo, considerando que há variações geotécnicas entre as obras, o que limita comparações diretas.

Com base nos resultados, destacam-se:

• A tensão cisalhante unitária foi maior nas PCEs em terreno natural, especialmente até 7 m de profundidade, atingindo 140 kPa na PCE-01 (sensor a 5,70 m).

• A PCE-03, no 10º estágio, apresentou cerca de 24% da tensão cisalhante total da PCE-01, enquanto a PCE-04 atingiu aproximadamente 45% no estágio final.

• Houve diferença na redistribuição de carga: nas estacas em terreno natural, a carga na ponta variou entre 15% e 27%; nas estacas em terreno escavado, entre 33% e 38%, indicando maior contribuição da ponta.

• As cargas máximas aplicadas foram diferentes (500 tf, 445 tf, 460 tf e 460 tf), dificultando a comparação direta da resistência última.

De modo geral, o comportamento distinto das estacas resulta da combinação de fatores como: alterações no estado de tensões devido à escavação (alívio e recompressão), variações do perfil geotécnico e diferenças no processo executivo.

Esses fatores influenciam a mobilização do atrito lateral e a redistribuição de cargas, evidenciando a importância do estado de tensões no desempenho de fundações profundas em áreas escavadas.

AGRADECIMENTOS

Ao IF Goiano – Campus Trindade, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), pelo incentivo e subsídio ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. Solo - Prova de carga estática em fundações profundas. Rio de Janeiro.
- Cruz Junior, A.J. da. (2016). Instrumentação de fundações estaqueadas. Dissertação de Mestrado, Publicação D0139G16, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 208 p.
- Cruz Junior, A. J. da; Sales, M. M. (2023) *Banco de dados de provas de carga estática instrumentada.* Relatório técnico. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 40 p. disponível em: Relatório_ Banco_de_Provas_de_Carga estatica instrumentadas.
- Fellenius, B.H. (2012). Discussion of "critical assessment of pile modulus determination methods" 1 appears in the canadian geotechnical journal, 48 (10): 1433–1448 [doi: 10.1139/t11-050]. Can. Geotech. J., 49(5): 614–621.
- Lam, C. & Jefferis, S.A. (2011). Critical assessment of pile modulus determination methods. Can. Geotech. J., 48(10): 1433–1448.