DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/13

Análise de Transferência de Carga em uma Estaca Hélice Contínua Monitorada com Sensor de Fibra Óptica Distribuída - DFOS

Rafael Petronilho de Oliveira Rocha 1
Acadêmico do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, rafaelpetronilho@gmail.com

Paulo Roberto Sedrez de Souza 2
Diretor Técnico da Empresa Solugeot Instrumentação e Monitoramento, Itajaí, Brasil, paulo@solugeot.com.br

Danilo Pitz 3
Diretor Executivo da Empresa Solugeot Instrumentação e Monitoramento, Itajaí, Brasil, danilo@pitz.com.br

Ricardo Bergan Born 4
Diretor Técnico da Empresa BornSales Engenharia, Balneário Camboriú, Brasil, ricardo@bornsales.com.br

Roberto Pettres 5
Professor e Pesquisador, Departamento de Matemática da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, pettres@ufpr.br

Sidnei Helder Cardoso Teixeira 6
Professor e Consultor Geotécnico, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, sidnteix@outlook.com

RESUMO: O uso da tecnologia baseada em sensores de fibra óptica distribuída (*Distributed Fiber Optic Sensors* – DFOS) tem se mostrado promissor para o monitoramento de grandes estruturas geotécnicas naturais e artificiais como encostas e taludes, respetivamente, e estruturas civis como barragens, fazendo da fibra um extenso sensor que pode ser utilizado para relacionar e determinar diferentes variáveis associadas à integridade e segurança da obra. Neste trabalho essa tecnologia é utilizada para o monitoramento de uma fundação profunda, em um caso particular de uma estaca hélice contínua com 0,60 m de diâmetro e 27,00 m de comprimento, instrumentada com tecnologia DFOS e submetida a ensaio de prova de carga estática. O tipo de metodologia idealizada e apresentada permite o acompanhamento contínuo de medições de deformação ao longo de toda a estaca, sendo possível avaliar a transferência de carga ao longo do fuste e na ponta desta. A instrumentação foi realizada por meio da instalação de um cabo de fibra óptica posicionado no interior da armadura da estaca. O ensaio mobilizou carregamentos de até 4000 kN, permitindo o registro das deformações distribuídas durante todo o carregamento. Os resultados evidenciaram variações significativas de deformação em zonas associadas à transição do perfil geotécnico, demonstrando que o DFOS é uma ferramenta robusta e aplicável à rotina de provas de carga para a interpretação do comportamento solo–estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: DFOS, Fibra Óptica, Estaca Hélice Contínua, Prova de Carga Estática, Monitoramento de Fundações.

ABSTRACT: The use of technology based on distributed fiber optic sensors (DFOS) has shown promise for monitoring large natural and artificial geotechnical structures such as slopes and embankments, respectively, and civil structures such as dams, making fiber an extensive sensor that can be used to relate and determine different variables associated with the integrity and safety of the work. In this paper this technology is used to monitor a deep foundation, in a particular case of a continuous flight auger pile with a diameter of 0.60 m and a length of 27.00 m, instrumented with DFOS technology and subjected to a static load test. The type of

methodology conceived and presented allows for the continuous monitoring of deformation measurements along the entire pile, making it possible to evaluate the load transfer along the shaft and at the tip. The instrumentation was carried out by installing a fiber optic cable positioned inside the pile reinforcement. The test involved loads of up to 4000 kN, allowing the recording of distributed deformations throughout the loading period. The results showed significant variations in deformation in zones associated with the transition of the geotechnical profile, demonstrating that DFOS is a robust and applicable tool for routine load testing in the interpretation of soil-structure behavior.

KEYWORDS: DFOS, Distributed Optical Fiber, Continuous Flight Auger Pile, Static Load Test, Foundation Monitoring.

1 INTRODUÇÃO

O desempenho de fundações profundas constitui um dos aspectos mais críticos no projeto e na segurança de obras de engenharia geotécnica, uma vez que está diretamente relacionado à capacidade de carga, aos recalques e à interação solo–estrutura. A estimativa confiável da capacidade de carga de estacas é, portanto, fundamental para garantir tanto a segurança estrutural quanto a viabilidade econômica das obras (Poulos & Davis, 1980; Fellenius, 2014).

Tradicionalmente, a capacidade de carga de fundações profundas é determinada por meio da execução de provas de carga dinâmica (PCD) ou estática (PCE), conforme estabelecido em normas técnicas nacionais e internacionais, como a ABNT NBR 16903 e a ASTM D1143/D1143M. Esses ensaios têm como objetivo simular os carregamentos que a estrutura a ser construída imporá à fundação, permitindo a antecipação do conhecimento acerca do seu desempenho mecânico e do comportamento carga–recalque da estaca.

A carga total aplicada a uma estaca é transferida ao solo ao longo do seu comprimento por meio da mobilização do atrito lateral ao longo do fuste e da resistência de ponta. No entanto, em provas de carga estática não-instrumentadas, o entendimento sobre os mecanismos e a distribuição dessa transferência de carga ao longo da estaca limita-se, em grande parte, a interpretações baseadas em modelos teóricos, empíricos ou semiempíricos, não sendo possível observar diretamente a mobilização progressiva dessas parcelas de resistência (Fellenius, 2001; Randolph & Wroth, 1978).

Com o intuito de superar tal limitação, técnicas de instrumentação baseadas no uso de extensômetros elétricos, strain gauges e células de carga distribuídas em níveis específicos da estaca, passaram a ser empregadas em estacas submetidas a provas de carga, permitindo a medição direta de grandezas como deformações, forças axiais e distribuição de tensões locais ao longo do comprimento da fundação, contribuindo de forma significativa com a compreensão do comportamento mecânico das fundações profundas (Osterberg, 1998; Fellenius, 2014). No entanto, tal instrumentação fazia uso de sensores pontuais, apresentando informações locais de pontos discretos da fundação.

Avanços recentes na tecnologia de sensores de fibra óptica distribuída, conhecidos como *Distributed Fiber Optic Sensing* (DFOS), têm permitido a medição contínua da deformação ao longo de toda a extensão da estaca, fornecendo uma visão global e detalhada da transferência de carga e da interação solo–estaca, em contraste com as medições discretas obtidas por sensores convencionais (Bell et al., 2013; Kindler et al., 2017).

Entre as diferentes técnicas de DFOS, destaca-se uma técnica baseada no espalhamento Brillouin, apresentada com maiores detalhes na seção 2, que possibilitam a obtenção do campo de deformações distribuídas ao longo da fibra óptica com elevada resolução espacial. A aplicação dessa tecnologia em provas de carga em estacas tem demonstrado grande potencial para aprimorar a interpretação dos ensaios, reduzir incertezas associadas aos modelos tradicionais e fornecer subsídios mais robustos para o projeto geotécnico e a calibração de métodos analíticos e numéricos (Mohamad et al., 2010; Barrias et al., 2016).

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma aplicação de sensores de fibra óptica distribuída para o monitoramento de uma estaca hélice contínua instrumentada e submetida a ensaio de prova de carga estática. O monitoramento contínuo das deformações ao longo do comprimento da estaca permitiu avaliar de forma direta a transferência de carga ao longo do fuste e na ponta, bem como sua relação com o perfil geotécnico local e com os níveis de carregamento aplicados. Os detalhes sobre a tecnologia DFOS, o teste de prova de

carga, os aspectos geotécnicos, a instrumentação da estaca e os resultados de deformação são apresentados a seguir.

2 TECNOLOGIA DE SENSORIAMENTO DISTRIBUÍDO POR FIBRA ÓPTICA (DFOS) BASEADA NO ESPALHAMENTO BRILLOUIN – TÉCNICA BOTDA

2.1 Comparação entre o Sensoriamento Pontual e Distribuído

Em sistemas de instrumentação pontual, como extensômetros elétricos, strain gauges ou sensores de fibra óptica pontuais, como por exemplo os *Fiber Bragg Gratings* - FBG, as medições são realizadas apenas em posições previamente definidas. Embora esses sensores possam apresentar elevada precisão local, a informação obtida restringe-se a pontos discretos, o que pode limitar a identificação de fenômenos complexos, como redistribuições de esforços, gradientes de deformação e zonas localizadas de dano.

Por outro lado, no sensoriamento distribuído, cada pequeno trecho da fibra óptica funciona como um sensor independente. Dessa forma, ao longo de dezenas ou centenas de metros, obtém-se um campo contínuo de medições, com resolução espacial da ordem de centímetros a metros. Esse diferencial é particularmente relevante em estruturas extensas ou enterradas, nas quais a definição prévia dos pontos críticos nem sempre é possível. Na Figura 1 é ilustrada uma viga de concreto com fissuras se desenvolvendo em locais que não coincidem com a posição dos sensores pontuais, em contrapartida a fibra óptica se distribui ao longo de todo o seu comprimento, cruzando as fissuras. Diante desta situação, no gráfico acima da viga, se destaca o fato das fissuras estarem sendo identificadas apenas pelo sensor distribuído, uma vez que os sensores pontuais foram posicionados em regiões onde as fissuras não ocorrem.

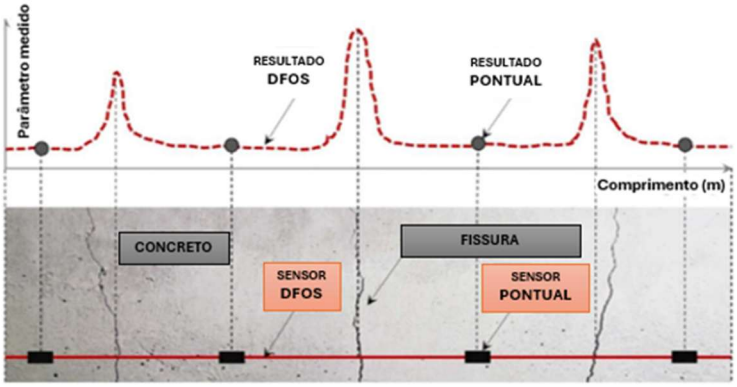


Figura 1. Diferenças entre sensores pontuais e distribuído (modificado de Nerve Sensor, 2026).

2.2 Conceito de Funcionamento da Tecnologia DFOS por meio da técnica BOTDA

Quando um pulso de luz é injetado no núcleo de uma fibra óptica, sua propagação ocorre de forma confinada, com velocidade conhecida e dependente do índice de refração do material. À medida que o pulso luminoso se desloca ao longo da fibra, ocorrem interações com a microestrutura do material que compõe o núcleo, resultando em diferentes mecanismos de retroespalhamento da luz. Parte dessa luz retroespalhada retorna à fonte emissora e, uma vez conhecido o tempo de percurso do sinal e a velocidade de propagação na fibra, torna-se possível determinar com precisão a posição ao longo do cabo onde ocorreu a interação. Esse princípio constitui a base da técnica conhecida como *Optical Time Domain Reflectometry*- OTDR (HARTOG, 2017).

O sinal óptico retroespalhado apresenta um espectro caracterizado por diferentes componentes, cujas frequências são sensíveis a variações das propriedades físicas do meio. Entre esses componentes destaca-se o espalhamento Brillouin, fenômeno associado à interação da luz com ondas acústicas térmicas presentes na fibra. O pico espectral correspondente ao espalhamento Brillouin, denominado frequência de Brillouin, apresenta elevada sensibilidade tanto às variações de deformação mecânica quanto às variações de

temperatura. A dependência da frequência de Brillouin em relação a esses parâmetros pode ser considerada aproximadamente linear em faixas usuais de operação, o que facilita a calibração do sistema por meio da determinação de coeficientes de sensibilidade específicos para cada tipo de fibra óptica (GLISIC; INAUDI, 2007; HARTOG, 2017).

A técnica *Brillouin Optical Time Domain Analysis* - BOTDA explora o espalhamento Brillouin estimulado por meio da interação entre dois sinais ópticos contrapropagantes, emitidos a partir de extremidades opostas da fibra óptica: um pulso de bombeio (*pump*) e uma onda contínua de prova (*probe*). Essa configuração permite um aumento significativo da relação sinal-ruído e da resolução espacial das medições, possibilitando a obtenção de perfis distribuídos de deformação e temperatura com elevada confiabilidade ao longo de grandes extensões de fibra (INAUDI; GLISIC, 2010).

Alternativamente, pode-se empregar a técnica *Brillouin Optical Time Domain Reflectometry*- BOTDR, na qual o pulso óptico é injetado apenas por uma das extremidades da fibra. Embora essa abordagem apresente vantagens operacionais em situações específicas, sua resolução espacial e precisão são, de modo geral, inferiores às obtidas com a técnica BOTDA, em razão da menor intensidade do sinal retroespalhado espontâneo utilizado na análise (BARLOW et al., 2013).

3 PROVA DE CARGA ESTÁTICA, ASPECTOS GEOTÉCNICOS E INSTRUMENTAÇÃO DA ESTACA

O ensaio de carregamento estático em fundações profundas é um dos principais métodos experimentais para a avaliação do comportamento do sistema solo–estaca sob carregamento controlado. No Brasil, sua execução é normatizada pela ABNT NBR 16903:2020 — Solo — Prova de carga estática em fundações profundas, em conjunto com a ABNT NBR 6122:2019 — Projeto e execução de fundações.

O ensaio consiste na aplicação de cargas conhecidas no topo da estaca, em incrementos sucessivos, com o monitoramento simultâneo dos recalques da cabeça da estaca, que englobam o encurtamento elástico do fuste e o recalque da ponta. O carregamento prossegue até a ruptura do sistema ou até a carga máxima programada, sendo posteriormente realizado o descarregamento.

A aplicação progressiva da carga promove a mobilização da resistência do sistema estaca–solo, composta pelas parcelas de atrito lateral e de ponta. Em cada estágio, a resistência mobilizada é igual à carga aplicada, permitindo a avaliação da relação carga–recalque e da capacidade resistente da fundação.

O carregamento é realizado por macaco hidráulico atuando contra um sistema de reação dimensionado para a carga máxima do ensaio. No presente trabalho, o sistema de reação foi composto por estacas helicoidais, conectadas a uma viga metálica, respeitando os afastamentos mínimos normativos. A carga aplicada foi controlada por célula de carga calibrada, e os deslocamentos foram monitorados por relógios comparadores digitais instalados em vigas de referência independentes e apontados na superfície do bloco de coroamento, assegurando a confiabilidade das medições.

3.1 Perfil Geológico-geotécnico

O subsolo da área investigada, em Balneário Piçarras–SC, foi caracterizado por meio de sondagens à percussão (SPT), executadas conforme a ABNT NBR 6484, atingindo profundidades da ordem de 38 a 40 m. De modo geral, o perfil é composto por uma camada superficial de aterro delgado, com espessura inferior a 0,30 m, sobreposta a solos predominantemente arenosos finos, silto-arenosos e silto-argilosos.

Nos primeiros metros observa-se a presença de areias finas siltosas, variando de fofa a medianamente compacta, com valores de NSPT baixos a intermediários. Em maiores profundidades, o perfil evolui para camadas de siltes pouco argilosos e argilas siltosas, apresentando consistência média a rija, com incremento progressivo dos valores de NSPT. A partir de aproximadamente 25 a 30 m de profundidade, predominam solos de elevada resistência, classificados como siltes arenosos e siltes argilosos muito compactos ou muito rijos, associados ao material proveniente da alteração de rocha, com registros de impenetrabilidade ao trépano em alguns furos.

O nível d'água foi identificado a profundidades da ordem de 3,4 a 3,9 m, variando entre os furos executados. O conjunto dos resultados indica um perfil estratigráfico heterogêneo nos níveis superficiais,

com aumento significativo da resistência do solo em profundidade, condição favorável à adoção de fundações profundas apoiadas em camadas mais competentes.

3.2 Instrumentação da Estaca

Para a instrumentação, instalou-se um cabo de fibra óptica no eixo da estaca, descendo e retornando pela mesma monobarra, que manteve o conjunto vertical e centralizado e garantiu a ancoragem ao concreto, possibilitando a aplicação da técnica BOTDA. A estaca PCE-01 foi perfurada com 27,00 m de comprimento e a ponta da monobarra alcançou a mesma profundidade, garantindo o monitoramento total do comprimento da estaca com o sensor DFOS.

Na Figura 2 são apresentados os detalhes da instalação da fibra óptica na estaca, contemplando o içamento da monobarra instrumentada, detalhe dos segmentos do cabo descendo e subindo e a condição final da instalação com a monobarra centralizada na estaca executada.



Figura 2. Instalação da fibra óptica na estaca. Esquerda: içamento; centro: segmento de cabo descendo e subindo; direita: estaca instrumentada.

4 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

Adotou-se, ao longo do trabalho, a convenção de sinais na qual valores positivos de deformação e deslocamento corresponderam ao encurtamento axial do elemento (compressão e deslocamento descendente), enquanto valores negativos indicaram alongamento ou deslocamento ascendente.

A prova de carga estática mobilizou carregamentos de até 4000 kN, aplicados incrementalmente em oito estágios de 500 kN, utilizando sistema de reação composto por estacas helicoidais e vigas metálicas.

O monitoramento foi realizado por sensoriamento distribuído em fibra óptica empregando a técnica BOTDA, na qual ambas as extremidades do cabo foram conectadas à unidade leitora, proporcionando maior qualidade de sinal em comparação à técnica BOTDR. As deformações foram registradas ao longo de todo o comprimento da estaca com resolução espacial de 1,0 m.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Os perfis de deformação obtidos para todos os estágios de carregamento apresentaram redução progressiva com a profundidade, atingindo valores próximos de zero na ponta, indicando dissipação predominante das tensões aplicadas na cabeça por atrito lateral. Admitindo comportamento elástico linear e estado uniaxial de tensões, aplicou-se a relação $N = EA\varepsilon$, estabelecendo proporcionalidade direta entre deformação e força axial. Assim, as oscilações observadas ao longo do comprimento refletiram variações locais na transferência de carga ao solo, associadas à mobilização não uniforme do atrito lateral e da

resistência de ponta. Adicionalmente, como $\varepsilon = N/(EA)$, eventuais variações da área transversal ou da rigidez axial também influenciaram a magnitude das deformações, podendo justificar valores menores em elevações superiores (Figura 3 – esquerda).

A instrumentação em dois segmentos de fibra, instalados nos sentidos descendente e ascendente, permitiu avaliar possíveis efeitos de flexão por comparação entre os sinais, não tendo sido observadas diferenças significativas, o que indicou comportamento predominantemente axial (Figura 3 – direita).

Assumindo compatibilidade de deformações entre fibra e concreto, a integração das leituras forneceu o encurtamento axial do fuste, enquanto os relógios comparadores mediram o deslocamento total do topo. Desta forma, o deslocamento da ponta foi então estimado pela diferença entre o deslocamento total e o encurtamento elástico (Figura 4).

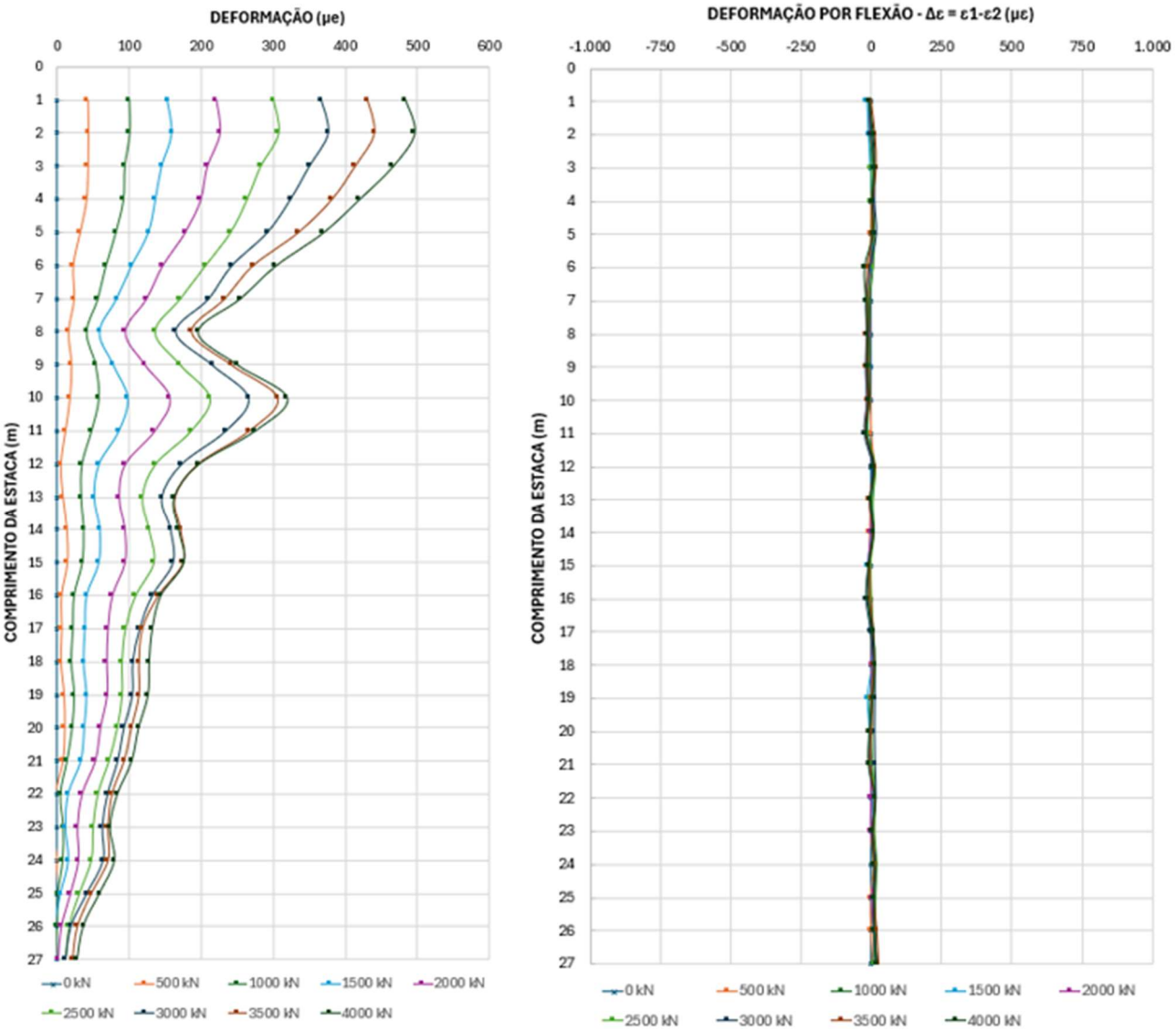


Figura 3. Distribuição de Deformação vs Profundidade

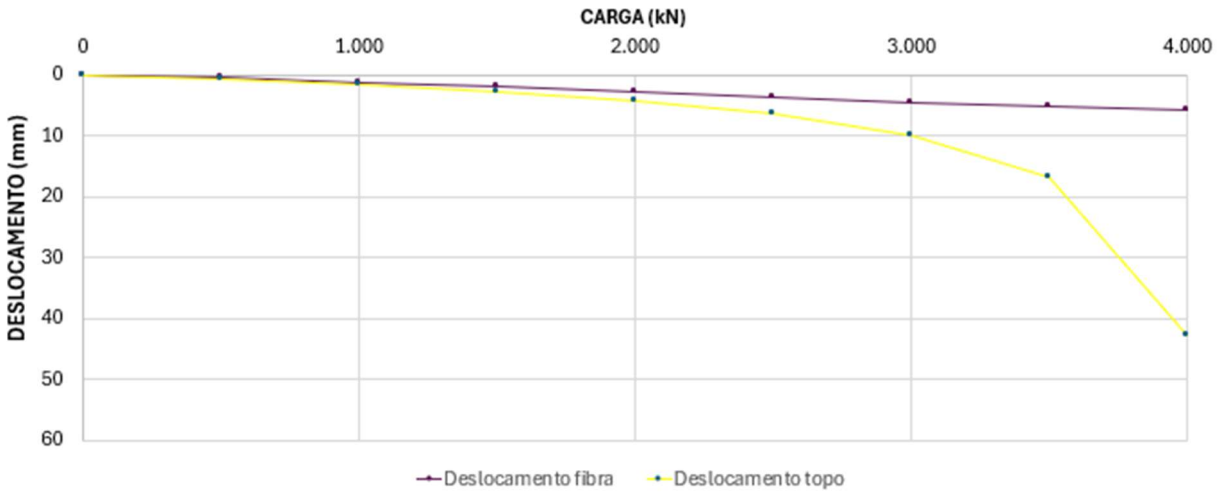


Figura 4. Comparativo entre o deslocamento do topo medido pelos relógios comparadores e o encurtamento do fuste estimado pela fibra óptica distribuída (DFOS).

5 CONCLUSÕES

O estudo demonstrou a viabilidade técnica e a eficácia do uso de sensores distribuídos de fibra óptica (DFOS), baseados na técnica BOTDA, para o monitoramento de fundações profundas, permitindo a obtenção de perfis contínuos de deformação ao longo de todo o comprimento da estaca durante a prova de carga estática. A instrumentação possibilitou a avaliação direta do mecanismo de transferência de carga, evidenciando a mobilização progressiva do atrito lateral ao longo do fuste e a participação complementar da resistência de ponta, com dissipação predominante das tensões aplicadas na cabeça ao longo da profundidade. As oscilações locais de deformação mostraram-se coerentes com a estratigrafia do subsolo, especialmente na zona de transição entre camadas arenosas e argilosas, indicando sensibilidade do método às variações geotécnicas. Em comparação com sistemas pontuais tradicionais, o DFOS proporcionou maior resolução espacial, continuidade de dados e redução de incertezas interpretativas, configurando-se como uma ferramenta robusta, confiável e aplicável à rotina de provas de carga e à análise do comportamento solo–estrutura

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo fomento à pesquisa no Brasil, bem como à Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo incentivo aos seus colaboradores quanto à realização de publicações científicas. Agradecem, ainda, à empresa Solugeot Instrumentação e Monitoramento, precursora no mercado nacional de instrumentação de estruturas civis com tecnologia de fibra óptica, pelo suporte técnico e pelo subsídio dos recursos necessários à implementação do sistema de monitoramento com fibra óptica empregado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. Solos – Prova de carga estática em fundação profunda. Rio de Janeiro.

ASTM International (s.d.). ASTM D1143/D1143M: Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load. West Conshohocken, PA.

Barrias, A.; Casas, J. R.; Villalba, S. (2016). A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications. *Sensors*, 16 (5), p. 748.

Bell, A. *et al.* (2013). Distributed fiber optic sensing for pile load testing. In: *Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction*. Cambridge.

Fellenius, B. H. (2001). From strain measurements to load in geotechnical instrumentation. *Geotechnical News*, 19 (1), p. 35–38.

Fellenius, B. H. (2014). *Basics of foundation design*. Electronic edition.

Glisic, B.; Inaudi, D. (2007). *Fibre optic methods for structural health monitoring*. Chichester: John Wiley & Sons.

Hartog, A. H. (2017). *An introduction to distributed optical fibre sensors*. Boca Raton: CRC Press.

Inaudi, D.; Glisic, B. (2010). Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 132 (1).

Kindler, A. *et al.* (2017). Brillouin-based distributed fiber optic sensing in geotechnical applications. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7 (2), p. 217–231.

Mohamad, H. *et al.* (2010). Brillouin distributed strain measurement in geotechnical structures. *Engineering Structures*, 32 (11), p. 3528–3537.

Nerve Sensor (2026). Distributed fibre optic sensing vs. conventional spot gauges. Disponível em: https://nerve-sensors.com/technology/about-dfos/. Acesso em: 09 jan. 2026.

Osterberg, J. O. (1998). The Osterberg load test method for bored and driven piles. In: *Proceedings of the First International Conference on Site Characterization (ISC'98)*. Atlanta.

Payne, D.; Barlow, A.; Hartog, A. (2013). Distributed optical fibre sensing for civil engineering applications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability*, 166 (ES6), p. 256–268.

Poulos, H. G.; Davis, E. H. (1980). *Pile foundation analysis and design*. New York: John Wiley & Sons.

Randolph, M. F.; Wroth, C. P. (1978). Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division (ASCE)*, 104 (GT12), p. 1465–1488.