

Estudo Experimental para Medição de Deformações em Tubo de Inclinômetro Utilizando Fibra Óptica Distribuída

Paula Tavares Pedrosa

Gerente de Engenharia (M.Sc Geotecnia), 3Geo Consultoria, Niterói-RJ, Brasil, paula.pedrosa@3geo.io

Mariana Meszaros Sousa

Engenheira (Engenheira civil), 3Geo Consultoria, Niterói-RJ, Brasil, mariana.sousa@3geo.io

Felipe Tinoco Simões

Analista de Engenharia (Engenheiro ambiental), 3Geo Consultoria, Niterói-RJ, Brasil, felipe.tinoco@3geo.io

Keylane Vieira Silva

Engenheira (Engenheira civil), 3Geo Consultoria, Niterói-RJ, Brasil, keylane.silva@3geo.io

Rodrigo Menezes Raposo de Almeida

Professor Associado do departamento de engenharia civil da Universidade Federal Fluminense e sócio da 3Geo Consultoria, Niterói-RJ, Brasil, rraposo@3geo.io

RESUMO: A fibra óptica distribuída para monitoramento de deformações em estruturas é estudada como uma solução inovadora alternativa à instrumentação convencional, possibilitando o monitoramento contínuo destes ativos. Esta tecnologia pode ser também utilizada no monitoramento de deslocamentos horizontais em profundidade, com o mesmo objetivo de inclinômetros. O presente estudo, refere-se a um experimento destinado à avaliação das leituras realizadas com fibra óptica distribuída em um tubo de inclinômetro. Quando ocorre a movimentação do solo, são gerados no tubo esforços de compressão e tração. Sendo assim, para simular a situação real de carregamento do tubo de inclinômetro, foram aplicados deslocamentos conhecidos ao longo do eixo longitudinal de um tubo fixado na horizontal em uma base estável. As deformações foram medidas com instrumento manual de medição e com a fibra óptica distribuída, permitindo o acompanhamento das deformações de maneira contínua por meio do interrogador BOTDR (Brillouin Optical Time-Domain Reflectometer), possibilitando a avaliação do seu comportamento quando sujeito aos esforços aplicados. Além dos resultados dos testes executados, o artigo apresenta preliminarmente uma breve revisão bibliográfica acerca dos conceitos principais da instrumentação com fibra óptica distribuída aplicada à geotecnia. Os resultados apresentam a metodologia de análise das leituras e a sua comparação com as deformações aplicadas.

PALAVRAS-CHAVE: Fibra óptica distribuída, inclinômetro, instrumentação geotécnica, BOTDR.

ABSTRACT: The use of distributed optical fiber for monitoring strains in large structures has been studied as an innovative alternative solution to conventional instrumentation, enabling continuous monitoring of these assets. This technology can also be used to monitor horizontal displacements at depth, with the same objective as inclinometers. The present study refers to an experiment aimed at evaluating readings taken with distributed optical fiber in an inclinometer tube. When soil movement occurs, compression and tension stresses are generated in the tube. Therefore, to simulate the real loading situation of the inclinometer tube, known displacements were applied along the longitudinal axis of a tube fixed horizontally on a stable base. The strains were measured with a manual measuring instrument and with the fiber, allowing the recording of the strains continuously using the BOTDR (Brillouin Optical Time-Domain Reflectometer) interrogator, enabling the evaluation of its behavior when subjected to the applied efforts. In addition to the results of the tests, the article preliminarily presents a brief bibliographical review about the main concepts of distributed fiber optic instrumentation applied to geotechnics. The results present the methodology for analyzing the readings and comparing them with the applied deformations.

KEYWORDS: Distributed optical fiber, inclinometer, geotechnical instrumentation, BOTDR.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia da fibra óptica distribuída (DFOS) para monitoramento de deformações em ambientes geotécnicos é uma prática que está em aceitação crescente em projetos de engenharia, superando as limitações das medições convencionais. Ainda que algumas inovações estejam disponíveis no mercado, a abordagem comumente utilizada para monitoramento geotécnico continua sendo a aplicação de sensores em pontos selecionados, realizada complementarmente aos modelos teóricos e simulações numéricas. Apesar da eficácia desta prática, a probabilidade de identificação de danos localizados pode ser reduzida (Bednarski et al., 2021).

É recente a aplicação de fibra óptica distribuída para monitoramento de deformações, principalmente aplicado ao meio geotécnico, representando uma inovação importante no campo da engenharia civil e geotécnica. Os autores, pela empresa 3Geo Consultoria, têm sido pioneiros nesta área de desenvolvimento, visando garantir monitoramento contínuo com qualidade, segurança e eficiência para estruturas de grande porte, como pontes, barragens, túneis, galerias, entre outros.

Neste contexto, o uso de DFOS como instrumento de medição de deformações oferece uma alternativa para um monitoramento mais abrangente e contínuo de estruturas. Esta metodologia permite não apenas monitoramento contínuo longitudinal na estrutura, como em profundidade, a exemplo da instrumentação de verticais de tubos inclinométricos. Esse sistema de aquisição de dados permite leituras em intervalos curtos, eliminando a necessidade de leitura manual.

A DFOS consiste em um cabo sensoriado ao longo de seu comprimento que oferece uma solução para o monitoramento contínuo de estruturas. A aplicação da fibra óptica distribuída é realizada a partir de seu lançamento ou fixação, de maneira contínua, sobre o local onde se deseja monitorar, seja para monitoramento geotécnico ou estrutural. Conforme Amirmojahedi *et al.* (2016), o sensor DFOS mede efetivamente pontos discretos espaçados de forma constante e o parâmetro medido é a média em determinado comprimento, conhecido como resolução especial.

A fibra é conectada a um interrogador que emite um pulso de comprimento conhecido, o qual se propaga através da fibra óptica, e então há o espalhamento de uma quantidade de energia em todas as direções. Monitora-se os espalhamentos de ida e volta, o que chamamos de espalhamento e retroespalhamento. Por ser realizado de forma contínua, a instrumentação com fibra óptica distribuída permite monitorar longitudinalmente uma estrutura geotécnica, conhecendo duas deformações na profundidade de lançamento.

É, ainda, possível realizar o monitoramento de deformações em profundidade, quando esta fibra está instalada em um tubo verticalmente embutido no solo, simulando o funcionamento de um inclinômetro. Visto o potencial dessa nova tecnologia aplicada a geotecnia este artigo apresenta o resultado dos testes de deformação realizados em um tubo de inclinômetro, com ênfase na medição da flexão no cabo de fibra óptica, reproduzindo uma deformação real em profundidade.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados do teste para medição dos deslocamentos em um tubo de inclinômetro, quando submetido a esforços de flexão, a partir da deformação da fibra óptica distribuída ao longo do tubo, que foi lida pelo interrogador BOTDR (*Brillouin Optical Time-Domain Reflectometer*).

A avaliação das leituras pretende validar esta metodologia de monitoramento de deformações, comparando-a com as medições manuais dos deslocamentos, além de avaliar o erro associado aos resultados.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

O inclinômetro é um instrumento geotécnico que consiste em um tubo guia, através do qual um torpedo devidamente calibrado é introduzido para realização de leituras de modo a acompanhar as movimentações horizontais do local de instalação em profundidade.

De acordo com Dunnyclif (1988), os tubos de inclinômetros devem possuir sua base inferior instalada em terreno estável, preferencialmente em fundação, com pelo menos 3 a 6 metros abaixo da zona esperada para deformação. Tendo em vista esta recomendação, uma vez que a parte inferior do tubo guia fica posicionada em local onde não é prevista a movimentação do solo, ao ocorrer movimentações do terreno acima desta camada, o perfil do inclinômetro sofre deformações. Ou seja, caso haja deslocamento horizontal no terreno, o tubo será forçado, promovendo seu desvio.

A montagem dos inclinômetros, portanto, consiste na instalação de um conjunto de tubo guia verticalmente no solo até a fundação. O tubo possui quatro ranhuras internas, a 90° em relação a sua geratriz, possibilitando a orientação em relação às direções preferenciais de movimentação. Com o tubo instalado, realiza-se o monitoramento a partir da introdução do torpedo de leitura, com as rodas encaixadas nas ranhuras do tubo, permitindo que sejam realizadas as leituras da inclinação a cada profundidade (Figura 1).

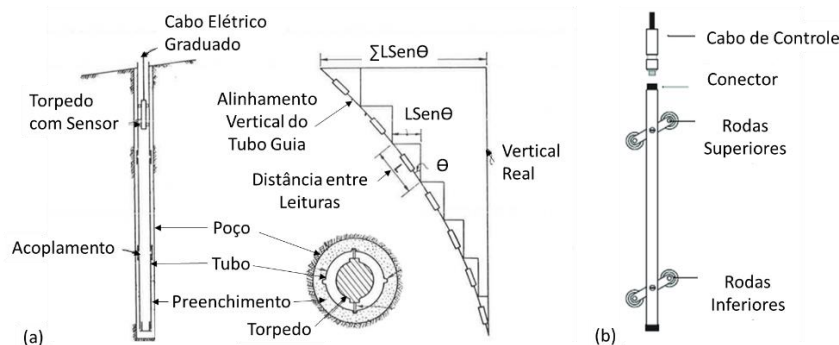


Figura 1. (a) Funcionamento (Dunniclif, 1982); (b) Torpedo de leitura (Machan & Bennett, 2008).

A instrumentação com inclinômetros, amplamente conhecida e utilizada por geotécnicos, é a solução convencional que permite o monitoramento manual e pontual das deformações horizontais do solo em profundidade, com espaçamento normalmente de 0,5 metro, sendo este o espaço entre as rodas do torpedo.

Para inclinômetros convencionais há erros associados à instalação e leitura do instrumento que podem reduzir a acurácia e precisão do monitoramento. Segundo Machan & Bennett (2008) a precisão do sistema inclui uma combinação de erros aleatórios e sistemáticos, sendo os erros aleatórios inerentes aos sensores, limitando a precisão da sonda, e os erros sistemáticos relacionados às ações humanas que afetam a condição dos sensores e do torpedo de leitura.

Com a utilização da tecnologia da fibra óptica distribuída (DFOS), é possível realizar o monitoramento contínuo em estruturas e, também, em tubos de instrumentos, como os inclinômetros, podendo reduzir, assim, os erros randômicos e sistemáticos associados aos inclinômetros convencionais.

Desta forma, é possível garantir maior abrangência na coleta de dados a partir dos sensores DFOS, que medem os parâmetros continuamente ao longo do comprimento da fibra óptica, em substituição aos sensores convencionais localizados pontualmente, conforme Figura 2a) e 2b) (Bednarski et al., 2021).

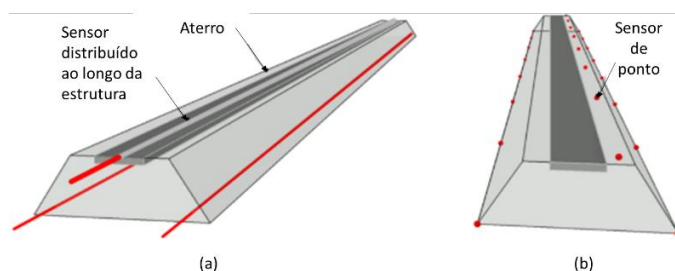


Figura 2. Modelo de monitoramento de taludes usando: (a) fibra óptica distribuída; (b) instrumentação convencional (Bednarski et al., 2021).

De acordo com o manual da Omnisens (2019), o monitoramento da fibra óptica distribuída ocorre a partir da emissão de um pulso de comprimento conhecido, que se propaga através da fibra óptica, gerando o espalhamento de uma quantidade de energia em todas as direções. Os três principais processos de espalhamento da luz são Rayleigh, Brillouin e Raman, conforme apresentado na Figura 3.

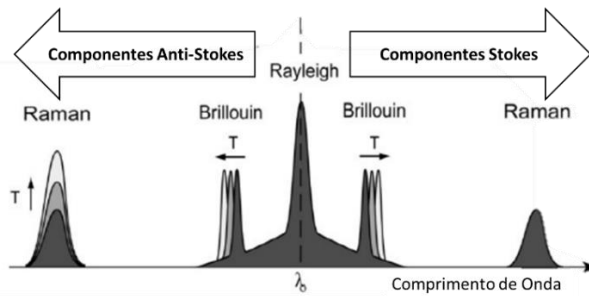


Figura 3. Espectro típico da luz retro espalhada de uma fonte monocromática de laser que se propaga em uma fibra óptica (Omnisens, 2019).

Este estudo utiliza o princípio de medição BOTDR, onde há emissão de um pulso de luz de Brillouin na fibra óptica, que retornará para a extremidade de entrada possibilitando a interpretação dos dados. De acordo com Sun et al. (2016), o espalhamento de luz de Brillouin é causado pela interação não linear entre a luz incidente e os fótons excitados no meio de propagação da luz e essa luz mudará de frequência por um deslocamento de Brillouin.

Tendo como base o princípio de funcionamento destes dois instrumentos, – inclinômetro e fibra óptica distribuída – é possível combiná-los em uma única tecnologia. Conforme a teoria clássica do feixe de Euler, o deslocamento lateral do tubo pode ser calculado com dados de deformação da fibra óptica (Sun et al., 2016). A movimentação de solo medida pelo inclinômetro atua como carga sendo aplicada no tubo. Essa carga lateral aplicada gera esforços de compressão e tração no tubo. Sendo assim, com a instalação da fibra óptica acoplada ao tubo para monitoramento da deformação, é possível identificar o quanto duas faces opostas foram deformadas, e, assim, obter o deslocamento.

Mohamad (2011), apresentou esta abordagem para medição de deformações em estacas em comparação com leituras de inclinômetros. De acordo com este autor, ao avaliar um trecho infinitesimal, sendo conhecidas as deformações em faces opostas, pode-se quantificar o deslocamento horizontal a partir das Equações 1 e 2.

$$k = \frac{1}{d}(\varepsilon_a - \varepsilon_b) \quad \varphi = \int k \, dz + A \quad u = \int \varphi \, dz + B \quad (1)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\varepsilon_a + \varepsilon_b) \quad w = \int \bar{\varepsilon} \, dz + c \quad (2)$$

Onde k é a curvatura; φ é o gradiente; u é o deslocamento lateral; e $\bar{\varepsilon}$ é a deformação axial média; ε_a e ε_b são deformações nos pontos “a” e “b”; ω é o deslocamento vertical (desprezado neste trabalho); A, B e C são constantes calculadas com base em condições de contorno estabelecidas.

Sendo assim, a diferença nas deformações medidas nas fibras em lados opostos pode ser convertida em curvatura usando a Eq. (1) e Eq. (2). Obtém-se a inclinação pela integração da curvatura e, integrando-a duas vezes, obtém-se o deslocamento lateral.

Sun et al. (2016), apresenta também a aplicação da fibra óptica distribuída para monitoramento em tubos de inclinômetros (Figura 4), com uma metodologia similar à apresentada por Mohamed (2011).

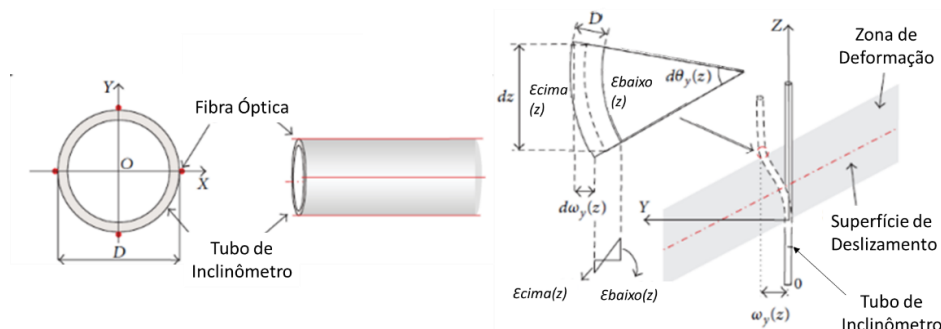


Figura 4. Princípio do cálculo de deslocamento (Sun, et al., 2016).

4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada pelos autores consiste na instalação de fibra óptica distribuída ao longo da lateral externa do tubo de inclinômetro, descendo até o fundo do tubo pela posição A0 (A+) e retornando pela lateral oposta do tubo, A180 (A-). O conjunto tubo-fibra foi fixado em uma base de cavaletes, de forma a mantê-lo estável para que fosse imposta a deformação no tubo. A fibra óptica foi fixada com fita adesiva reforçada ao longo do eixo, e nos pontos onde estão posicionados os cavaletes de apoio, foram utilizados suportes de borracha aderidos ao tubo do inclinômetro, garantindo que a fibra não seja submetida a pressão por parte do cavalete, evitando interferência nas leituras. O esquema de montagem é apresentado na Figura 5.

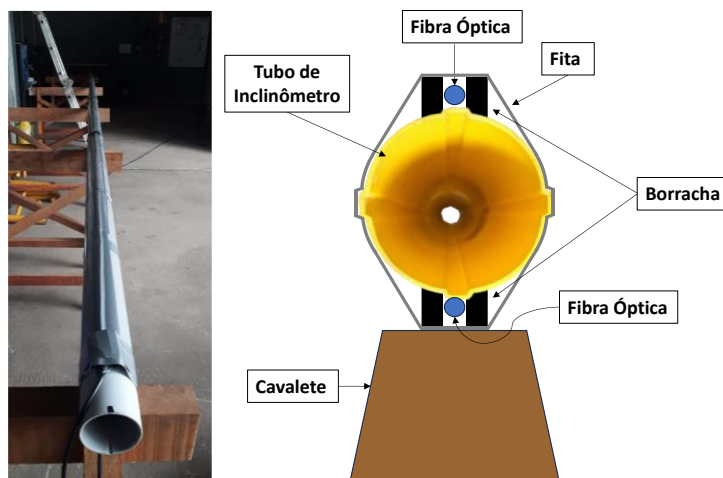


Figura 5. Representação da instalação da fibra óptica no ensaio.

Foi utilizado o tubo guia com diâmetro de 75 mm, e, para simulação da flexão do tubo, foram posicionados objetos de diâmetros conhecidos e crescentes entre o tubo de inclinômetro e o cavalete, em um ponto de distância conhecida do fundo do tubo, de forma a induzir um deslocamento no instrumento. A Figura 6 ilustra um esboço de como foi feita a montagem.

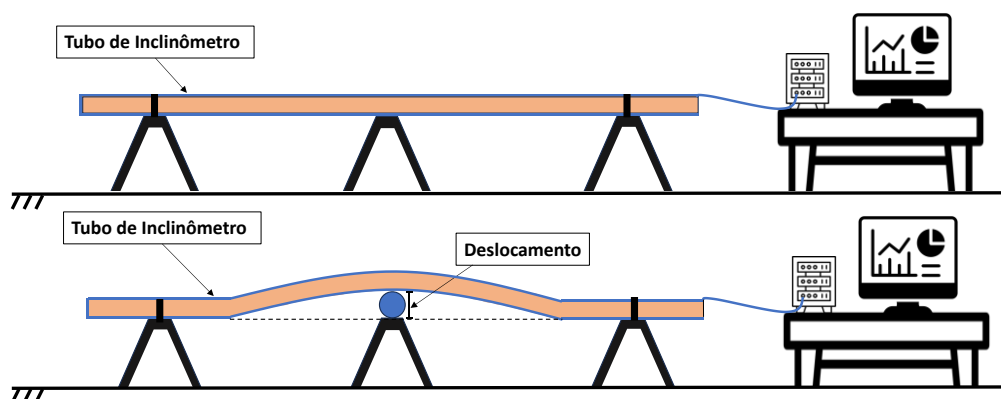


Figura 6. Representação do ensaio.

Para monitoramento das deformações obtidas pela fibra óptica, foi utilizado um interrogador DiTest para emissão dos pulsos de luz e leitura dos dados. Os dados obtidos foram tratados em programa específico para análise e interpretação em planilhas, possibilitando elaboração de gráficos de deslocamento.

Durante a execução do teste, foram registrados a hora e o diâmetro do objeto utilizado para induzir a deformação, bem como os pontos de início e final do tubo e o ponto de aplicação da deformação. Os dados obtidos pelo BOTDR, ao final do ensaio, foram descarregados e tratados.

Em uma situação real, sabe-se que o tubo pode sofrer compressão, tração e até mesmo torção em alguns trechos. No presente estudo, as análises estão sendo realizadas em função do deslocamento incremental, com base na direção preferencial do deslocamento. Uma vez que foi induzida a flexão do tubo, conforme

apresentado na Figura 6, espera-se que a fibra superior (direção preferencial do movimento – A+) seja tracionada, enquanto a fibra inferior (A-) seja comprimida (Figura 7).

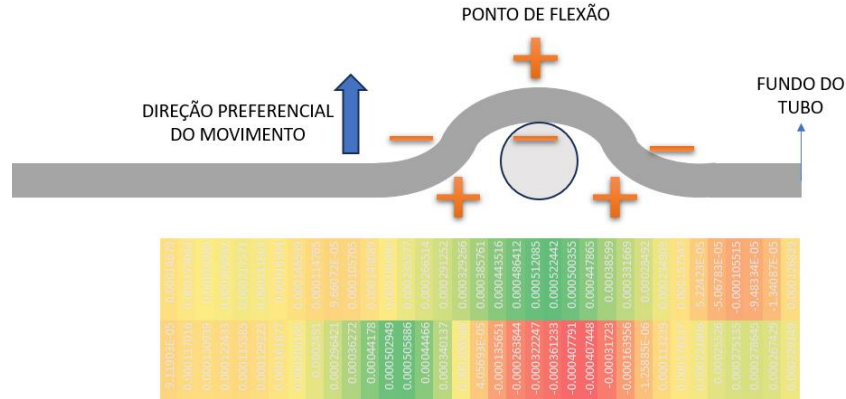


Figura 7. Esquema de análise das deformações no tubo.

A análise consistiu, portanto, na identificação dos pontos de tração e compressão das fibras superior e inferior. O ponto onde foi visualizada ocorrência de tração em uma das fibras e compressão na outra, foi identificado como o ponto de flexão, conforme apresentado na Figura 7. Tendo o ponto de flexão determinado, foram selecionados os pares de pontos exatos (ponto na fibra inferior e superior) de deformação máxima, ou seja, associado ao maior deslocamento. Para os pares de leituras foram, por fim, calculados os pontos de deslocamento do tubo de inclinômetro, conforme as equações 1 e 2.

Cabe ressaltar que a metodologia empregada para leitura por meio da fibra óptica distribuída ocorre em intervalos regulares de 0,255 metros. Esta condição pode atribuir imprecisões às leituras obtidas, visto que o ponto de medição pela fibra óptica pode não coincidir precisamente com o local de deslocamento máximo. Por fim, após os cálculos dos deslocamentos, foram gerados os gráficos de deslocamento incremental, onde foi possível identificar o ponto de deslocamento máximo e comparados aos deslocamentos impostos pela deformação do tubo. Foram avaliados também os erros embutidos em cada resultado.

5 RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir da metodologia proposta apresentaram valores de deslocamentos calculados próximos aos esperados, conforme deformação sofrida pelo tubo, imposta pela utilização dos objetos de diâmetro conhecido.

Os dados foram lidos pelo software DITEST Data Viewer da Omnisens, onde observa-se o sinal de ida da fibra óptica e o retro espalhamento (sinal de volta). O trecho de interesse (tubo do inclinômetro), representado no sinal de ida e no sinal de volta, é dividido entre os eixos A+ e A- do instrumento (Figura 8).

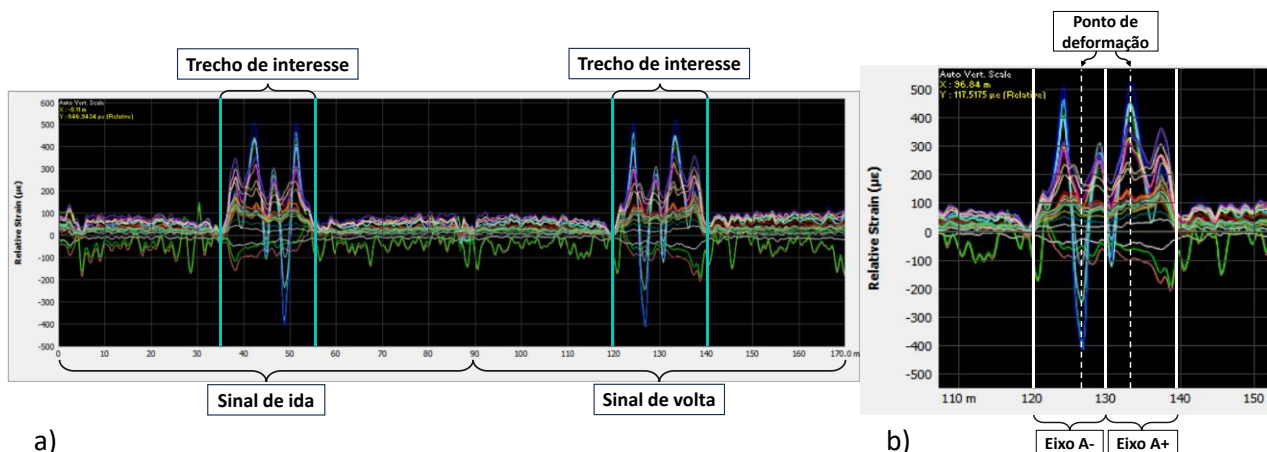


Figura 8. (a) Leitura dos dados no software DITEST Data Viewer da Omnisens. (b) Trecho de interesse.

É possível observar, ainda, na Figura 8 que, o ponto de deformação em cada eixo fica evidente, bem como os trechos de compressão no eixo A- e a tração no eixo A+, conforme esperado.

Os dados foram, então, submetidos ao tratamento proposto, visando obter os pares de pontos correspondentes na fibra em A+ e A- e, posteriormente, realizar o cálculo dos deslocamentos. Os deslocamentos incrementais calculados para cada diâmetro são apresentados na Figura 9.

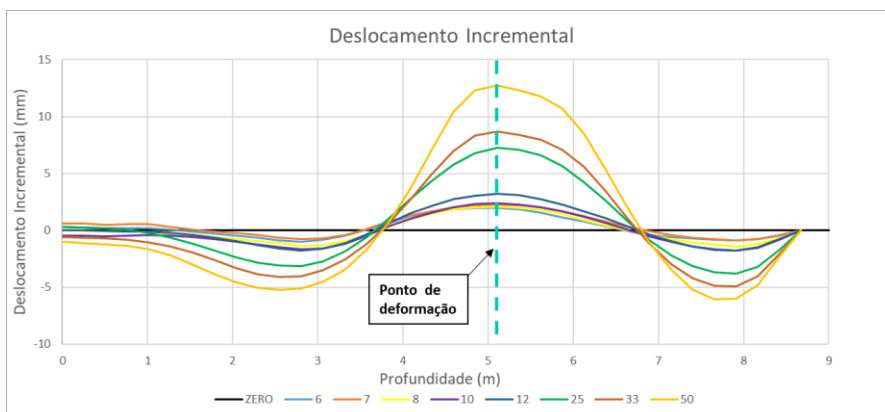


Figura 99. Deslocamentos incrementais calculados para cada diâmetro de deformação imposta.

A partir dos deslocamentos incrementais, foram calculados os deslocamentos acumulados apenas para a direção preferencial de deslocamento. Ou seja, do ponto a partir do qual há tração da fibra de cima e compressão da fibra de baixo, foi feito o acumulado dos deslocamentos incrementais até o ponto máximo de deformação. Sendo assim, a Tabela 1 apresenta os dados do ensaio, horário e diâmetro da deformação, e os resultados obtidos pelos cálculos. Os valores obtidos foram comparados com os deslocamentos aplicados pelos objetos de diâmetros conhecidos e apresentados graficamente na Figura 10.

Tabela 1 – Intervalo de tempo referente a cada deslocamento forçado.

| Deslocamento Aplicado | Início | Final | Deslocamento Calculado | Erro (mm) | Erro (%) |
|-----------------------|--------|-------|------------------------|-----------|----------|
| 5,5 | 13:35 | 13:45 | 5.602 | -0,10183 | 1.85% |
| 6,5 | 13:45 | 13:55 | 7.184 | -0,68393 | 10.52% |
| 7,5 | 13:55 | 14:05 | 6.532 | 0,967833 | -12.90% |
| 9,5 | 14:05 | 14:15 | 9.495 | 0,005419 | -0.06% |
| 11,5 | 14:15 | 14:25 | 10.858 | 0,641665 | -5.58% |
| 25 | 14:25 | 14:35 | 26.999 | -1,99902 | 8.00% |
| 32,8 | 14:35 | 14:45 | 32.509 | 0,290999 | -0.89% |
| 50 | 14:45 | 15:19 | 50.746 | -0,74627 | 1.49% |

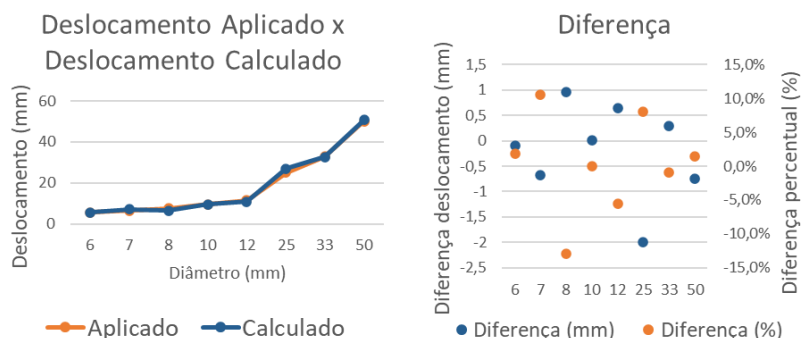


Figura 10. Gráfico do Deslocamento Aplicado pelo Deslocamento Calculado. Gráfico de Diferença.

6 CONCLUSÕES

Conclui-se com este trabalho que o desenvolvimento do inclinômetro automatizado com fibra óptica e lido por BOTDR (*Brillouin Optical Time-Domain Reflectometer*) com a emissão do pulso de luz de Brillouin é um complemento útil para o monitoramento de inclinômetros da maneira tradicional. O deslocamento aplicado em comparação com o deslocamento medido pela fibra óptica apresentou uma boa correlação, com valores próximos ao esperado e diferenças pequenas entre deslocamentos inclinométricos reais e calculados (máximo de 2 mm). O erro percentual chegou a aproximadamente 12%. Não há, no entanto, um padrão que indique que os erros estão associados com a magnitude da deformação.

Destre as possíveis causas levantadas pelos autores para os erros observados, destacam-se: a possível deformação dos materiais utilizados para deformar o tubo; a precisão na medição dos pontos de leitura da fibra; a precisão na determinação do comprimento do inclinômetro para as análises no software de tratamento de dados, além de erros intrínsecos à tecnologia e ao ensaio, que não foi realizado com controle de laboratório.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Propõe-se para trabalhos futuros a realização de ensaio considerando outros tipos de deformação, visto que a deformação ensaiada foi de flambagem de um tubo, movimento não convencional em inclinômetros, exceto quando submetidos a recalque. Desta forma, poderá ser aprofundada a análise dos deslocamentos acumulados.

Além disso, podem ser realizados novos testes com verificação exata do comprimento da fibra e seus pontos de medição, para que se tenha um protótipo com menor interferência de erros. Pode-se promover uma investigação detalhada acerca da influência de fatores como: precisão do instrumento BOTDR e posicionamento do ponto de deslocamento imposto, principalmente para determinação dos pares de pontos de medição na fibra inferior e superior.

Como não foi possível a medição com torpedo convencional para comparação dos deslocamentos, sugere-se em um novo teste a utilização do torpedo e, se possível, a realização do teste em tubo vertical.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão à 3Geo Consultoria pelo apoio. A expertise e dedicação da equipe foram fundamentais para o sucesso de nossos projetos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amirmojahedi, M., Saberizade, M., Sadeghi, M. & Keshtkar, M., 2016. *Fiber optical sensors in Geotechnical Engineering*. 5th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics. Tehran, Iran, November 15-17.
- Bednarski, Ł.; Sieńko, R.; Grygierek, M.; Howiacki, T., 2021. *New Distributed Fibre Optic 3DSensor with Thermal Self-Compensation System: Design, Research and Field Proof Application inside Geotechnical Structure*. *Sensors* 2021, 21, 5089.
- Dunniclif, J. 1988. *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. New York: John Wiley.
- Machan, G, Bennett, V., 2008. *Use of Inclinometers for geotechnical instrumentation in transportation Projects: state of the practice*. Transportations Research Circular n° E-C129.
- Mohamad, H.; Soga, K.; Pellew, A.; Bennett, P. J., 2012. *Performance monitoring of a secant-piled wall using distributed fiber optic strain sensing*. *Journal of Geotechnical&Geoenvironmental Engineering*, vol. 137, no. 12, pp. 1236–1243, 2012.
- Omnisens, S.A. (2019). DITEST INTERROGATOR - Fiber Optic Distributed Temperature and Strain Analyzer. User Manual, Version 1-10 – EN.
- Sun, Y.; Shi, B.; Zhang, D.; Tong, H.; Wei, G.; Xu1, H., 2016. *Internal Deformation Monitoring of Slope Based on BOTDR*. Hindawi Publishing Corporation. *Journal of Sensors*. Vol 2016.