

UTILIZAÇÃO DE SENSORES À BASE DE FIBRA ÓPTICA VISANDO O MONITORAMENTO DE GRANDES ESTRUTURAS NA ENGENHARIA CIVIL

Renato da Silva Maciel, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - E-mail:
renato.maciel@dnit.gov.br

Luis Augusto Conte Mendes Veloso, Universidade Federal do Pará
Romulo Lopes, Universidade Federal do Pará

Resumo: As fibras ópticas são utilizadas em diferentes áreas e nas mais variadas aplicações. Na Engenharia Civil começaram a ser utilizadas no monitoramento de estruturas como alternativa de substituição dos tradicionais sensores elétricos. Este trabalho tem como objetivo estudar a aplicação e viabilidade dos sensores a base de fibra óptica no monitoramento de grandes estruturas da engenharia civil. Para avaliação dos resultados, foram realizados três diferentes tipos de testes experimentais onde corpos-de-prova foram instrumentados com extensômetros elétricos e ópticos. O primeiro tipo de teste correspondeu a ensaios de tração simples em barras de aço com carregamento monotônico até o rompimento de barras de aço. No segundo tipo de teste foi estudada a automação de um medidor triortogonal de junta que é um instrumento tipicamente utilizado para a instrumentação de barragens de concreto. Finalmente o último tipo de testes foi constituído por ensaios de cilindros de concreto à compressão para a determinação do módulo de elasticidade. Com relação à utilização dos sensores ópticos, durante a realização dos testes surgiram muitos problemas relacionados com a unidade óptica de aquisição de dados sendo necessária a utilização de três diferentes modelos de unidade de aquisição para a conclusão dos testes. No que se refere à exatidão dos resultados, observou-se que os resultados apresentados pelos sensores ópticos foram compatíveis com os resultados dos sensores elétricos. Entretanto, quando os sensores ópticos foram solicitados por grandes deformações implicaram em perda de sinal devido à interrupção do fluxo de luz, inabilitando o sensor para leituras.

Palavras-chave: Sensores Ópticos. Rede Bragg. Monitoramento de Estruturas.

USE OF OPTIC FIBER SENSORS AIMING MONITORING OF LARGE CIVIL ENGINEERING STRUCTURES

Abstract: Optical fibers are used in different areas and in many applications. In Civil Engineering, they have been used for the structural monitoring as an alternative to traditional electrical sensors. This work aims to study the feasibility and application of sensors based on optic fibers to monitor large civil engineering structures. Three different types of experimental tests were carried out to evaluate the results where specimens were instrumented with electrical and optical strain gages. The first type of tests was simple tensile tests where steel bars were submitted to monotonic loading until collapse. In the second type of test, the automation of a triorthogonal joint gage, that is a typical instrument used for monitoring concrete dams. Finally, was studied the last type of tests was compression tests carried out with cylindrical concrete specimens for determining Young modulus. Regarding the use of optical sensors, there were many problems with the optical data acquisition system; so three different data acquisition units were used to carry on the tests. Concerning the accuracy of the results, it was observed that the results obtained with optical sensors were similar to the electrical sensors results. However, when the optical sensors were submitted to large deformations, signal loss occurred due to the interruption of the light flow.

Keywords: Fiber Optic Sensors. Bragg Grating. Monitoring of Structure.

1. INTRODUÇÃO

As fibras ópticas possuem notáveis características, consideradas como vantagens para a área de monitoramento, dentre essas características estão a imunidade às interferências eletromagnéticas, dimensões reduzidas, matéria-prima abundante, grande capacidade de transporte de informação e baixa atenuação.

O presente trabalho estudou a aplicação e viabilidade de sensores à base de fibra óptica no monitoramento de grandes estruturas da engenharia civil no Brasil. Foi investigado o

comportamento dessa tecnologia inovadora de sensoriamento por sensores ópticos utilizadas na área de instrumentação de grandes estruturas.

Sabe-se que o questionamento sobre a comparação entre os sensores ópticos e elétricos é inevitável para quem trabalha com pesquisas que utilizam a instrumentação como técnica de resolução de problemas. Para este trabalho não seria diferente a intrigante questão: quais as diferenças dos resultados apresentados entre os sensores ópticos e sensores elétricos? E quais os benefícios proporcionados pelos sensores ópticos?

Além das pouquíssimas publicações de trabalhos relacionados aos sensores ópticos, outra dificuldade é o elevado custo de aquisição de todos os componentes necessários para se realizar as investigações por meio dessa tecnologia. Porém, há uma tendência de que com o desenvolvimento tecnológico, essa diferença de custo diminua, principalmente aplicando a multiplexação de canais.

Dentre as tecnologias de sensores ópticos utilizados pelo mundo, uma ganha notoriedade por sua facilidade de manuseio e operação, seu pequeno porte e características intrínsecas. Esta tecnologia chama-se Rede Bragg.

Dessa forma, o objetivo geral da pesquisa baseou-se em mostrar a aplicação dos sensores ópticos de rede Bragg no monitoramento de grandes estruturas na engenharia civil, por meio de testes em laboratório.

Para a pesquisa alcançar o seu objetivo principal foram necessários: a) realizar ensaios em laboratório utilizando sensores a base de fibra óptica de Rede Bragg e sensores elétricos; b) analisar e comparar os resultados obtidos em laboratórios com os extensômetros ópticos e elétricos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo e aplicação dos sensores ópticos realizaram-se testes experimentais em laboratório com a finalidade de verificar o perfeito funcionamento dos equipamentos e aumentar a experiência no manuseio destes sensores. Os ensaios, basicamente, consistiram em comparar os resultados obtidos com os sensores ópticos com os resultados dos tradicionais sensores elétricos.

Uma das diferenças encontradas na literatura entre os extensômetros ópticos e elétricos é o fator de calibração, onde o valor do fator de um extensômetro elétrico é aproximadamente 2, em comparação ao extensômetro óptico cujo fator é cerca de 0,8, apresentado na Figura 1 (MEASURES, 2001, pág. 270).

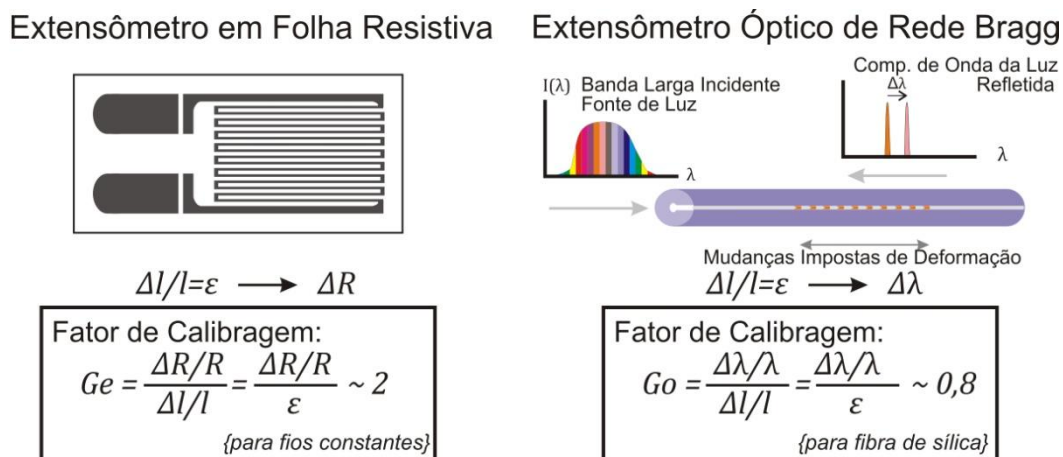


Figura 1 – Fatores de calibragem dos extensômetros elétrico e óptico (adaptado de MEASURES, 2001).

Uma pré-análise constatou as seguintes comparações na instalação entre os extensômetros ópticos e elétricos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação do procedimento de instalação dos extensômetros elétricos com os ópticos.

ATIVIDADES DA INSTRUMENTAÇÃO	PROCEDIMENTOS, MATERIAS E FERRAMENTAS	
	EXTENSÔMETRO ELÉTRICO	EXTENSÔMETRO ÓPTICO
Preparação da Superfície	Procede-se a limpeza da superfície onde será aplicado o sensor por meio de processo químico ou combinação do processo abrasivo e químico.	O processo é o mesmo do extensômetro elétrico, no entanto, deve-se ter um cuidado maior no manuseio do sensor óptico, afim de não danificar a fibra com dobras de raios curtos, o raio mínimo para uma fibra é de 10mm.
Colagem do Extensômetro	Utiliza-se um adesivo para a colagem, tendo sempre o cuidado para não haver solavancos ou bolsas de ar, entre o filme do extensômetro e a superfície. No processo de colagem utiliza-se, como auxílio, uma fita adesiva para que os terminais de conexão não sejam colados na superfície.	Utiliza-se um adesivo para a colagem, tendo sempre o cuidado para não haver solavancos ou bolsas de ar, entre o filme do extensômetro e a superfície. Durante a colagem, deve-se ter o cuidado com a pressão aplicada sobre o extensômetro.
Preparação do Cabeamento	O cabeamento elétrico deve ser estanhado nas extremidades, para garantir a corrente elétrica, evitando o mau contato entre partes metálicas. Cada extensômetro requer um cabo.	O extensômetro óptico é fabricado com cabos de comprimento definido em suas extremidades. Os cabos podem ser emendados.
Conexão do Extensômetro ao Cabeamento	Os terminais do extensômetro devem ser soldados ao cabo, devendo-se usar o ferro de solda eletrônica (tipo lápis) e a bobina de solda estanho. Para conectar o extensômetro ao aparelho de aquisição de dados, dependendo do modelo, pode-se apenas colocar a ponta do cabo no conector parafusado ou soldá-los em um conector para porta LPT. Cada sensor terá que ser ligado numa entrada específica do sistema de aquisição de dados.	A ligação do extensômetro óptico ao sistema de aquisição é realizada por conectores (ferrolho) na placa de entrada (canal). Os sensores podem ser ligados em série até um determinado número, dependendo do fabricante, usando-se apenas uma entrada do sistema de aquisição de dados. Quando conectados em série, deve-se observar o comprimento de onda que o sensor está trabalhando.
Aferição e Calibragem do Extensômetro pelo Sistema de Aquisição	Instalar o extensômetro no sistema de aquisição, calcula-se o seu valor de engenharia, utilizando o valor encontrado no software de aquisição, assim inicia-se a calibração do extensômetro (zerar o sensor). Após a calibração fazer o balanceamento do sensor que determinará os seus valores limites.	O extensômetro é conectado ao sistema de aquisição, a caracterização do sensor é feita pelo programa de interface. Basta escolher o tipo de sensor que está sendo utilizado e dar um nome a ele para realizar um teste de medição.
Interferências	As resistências dos cabos (grandes extensões); interferências eletromagnéticas; variação de temperatura.	Micro-imperfeições originadas de sua fabricação.

2.1 Ensaios de Tração em Barras de Aço

O primeiro ensaio realizado foi o rompimento de três barras de aço, com diâmetro de 20,0 mm e comprimento de 60 cm cada uma. As barras foram submetidas a um carregamento monotônico produzido em uma máquina de tração e instrumentadas com pares de sensores ópticos e sensores elétricos, visando corrigir uma eventual excentricidade durante o ensaio. O

ensaio foi embasado na norma da ABNT, NBR ISO-6892/2002 – “Material Metálico – Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração – Método de Ensaio”.

Foi utilizada neste ensaio uma Câmera Termográfica, para a leitura da variação da temperatura ao longo do tempo durante o ensaio, pois sabe-se que esta variação poderá influenciar mais diretamente nos resultados apresentados pelos extensômetros ópticos. Com o monitoramento da variação térmica, possibilitou ajustar os valores obtidos no ensaio.

2.2 Ensaio no Modelo Medidor Triortogonal de Junta

O segundo ensaio foi realizado o estudo de automação de um modelo do medidor triortogonal de junta, com o intuito de utilização dos sensores ópticos para a aplicação em Barragens de Concreto, o modelo utilizado encontra-se na Figura 2-a.

O medidor triortogonal de junta é instalado a cada junta estrutural de uma barragem entre blocos. Conforme a movimentação da estrutura é possível medir o deslocamento entre juntas em três eixos através do medidor triortogonal de junta, onde a leitura é realizada manualmente em muitas UHês brasileiras.

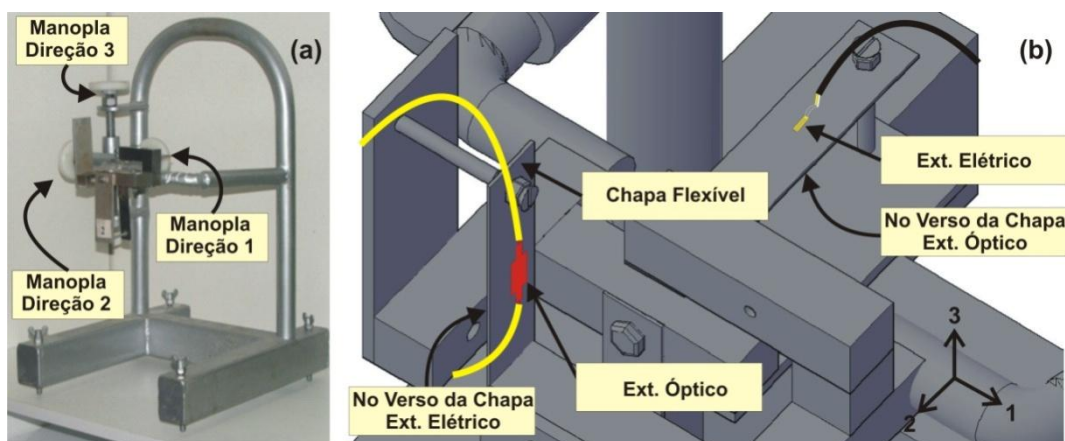


Figura 2 – (a) Modelo do medidor triortogonal de junta e (b) Esquema de instalação dos extensômetros no modelo do medidor triortogonal de junta.

O sistema funciona da seguinte forma: em cada eixo de medição do instrumento instalou-se um conjunto de chapas metálicas. Essas chapas são compostas de pares opostos, sendo uma chapa rígida e outra flexível. Por serem opostas, cada chapa foi instalada na posição correspondente a um bloco. Na extremidade da chapa rígida foi instalado um parafuso para transmitir o deslocamento sofrido para a chapa flexível quando houver a movimentação entre blocos, conforme Figura 2-b.

A chapa flexível comporta-se como uma viga engastada elasticamente, Figura 3 (esquerda), possibilitando calcular o deslocamento entre os blocos pela determinação da flecha. Por isso, foram instalados dois extensômetros em cada chapa, um em cada face, sendo um extensômetro óptico e o outro elétrico. Portanto, a chapa flexível se deforma correspondentemente ao deslocamento do respectivo eixo. Como os extensômetros foram instalados em lados opostos da chapa, as deformações medidas têm sinais contrários.

Além da utilização dos extensômetros foi utilizado um transdutor de deslocamento a laser para aferição e calibração da constante elástica dos apoios das chapas flexíveis e também para comparação das flechas medidas pelos extensômetros.

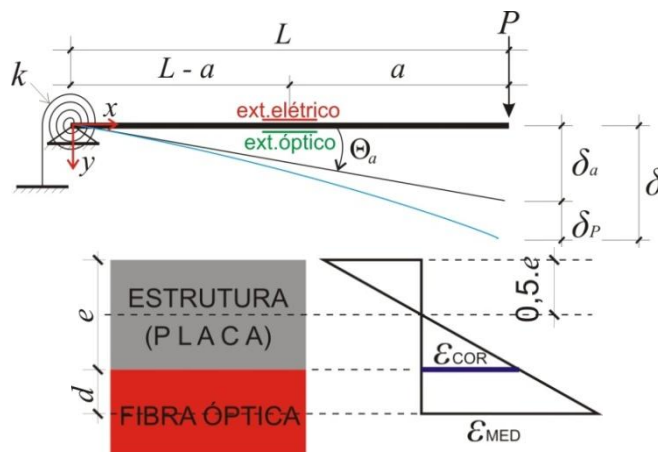


Figura 3 - Modelo analítico adotado para as chapas flexíveis (esquerda) e Correção da leitura do sensor óptico elementos fletidos de pequena espessura (direita).

A instrumentação de elementos finos apresenta um erro na leitura de sensores ópticos, conforme Figura 3 (direita), que pode ser facilmente corrigido por meio da equação 2.1 (KLECKERS e GÜNTHER, 2007).

$$\epsilon_{COR} = \frac{0,5.e}{0,5.e + d} \cdot \epsilon_{MED} \tag{2.1}$$

onde: ϵ_{COR} é a deformação na superfície do elemento, ϵ_{MED} é a deformação medida pela fibra, e é a espessura do elemento e d é a distância do centro das fibras à superfície do elemento.

A flecha da barra tem uma parcela devido ao giro do apoio e outra decorrente da flexão (BLANCO, OLLER e GIL, 2008), sendo dada pela equação 2.2.

$$\delta = \left(\frac{P.l}{k} \right) \cdot L + \frac{P.L^3}{3.E.I} \tag{2.2}$$

onde: P é a força aplicada; L é o comprimento da barra; E é o módulo de elasticidade do material; I é o momento de inércia da seção e k é a constante de engastamento.

2.3 Ensaio de Compressão de Corpos de Prova de Concreto

O terceiro e último ensaio corresponde a testes de compressão em corpos de prova de concreto para a determinação do módulo de elasticidade tangente inicial. O módulo de elasticidade no concreto é dado pela declividade da reta que intercepta os níveis de tensão de 0,5 MPa e 0,3f_c, onde f_c representa a resistência do concreto, segundo o que prescreve a NBR 8522 – Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão x Deformação – Método de Ensaio.

Assim, os corpos de prova foram instrumentados com extensômetros ópticos e extensômetros elétricos, para verificar as deformações longitudinais e assim obter as curvas de tensão-deformação. Para isso utilizou-se a prensa Emic, dotada de um clip-gage para medida de deformações o que possibilitou a comparação entre os resultados obtidos com os extensômetros ópticos e extensômetros elétricos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaios de Tração em Barras de Aço

Para o ensaio utilizou-se um interrogador óptico Braggmeter industrial, o interrogador elétrico ADS-2000 e uma Câmera Termográfica para verificar as variações de temperatura durante o ensaio de tração na barra. A Figura 4 mostra a temperatura das barras através da imagem capturada pela câmera termográfica na máquina de tração durante o ensaio.

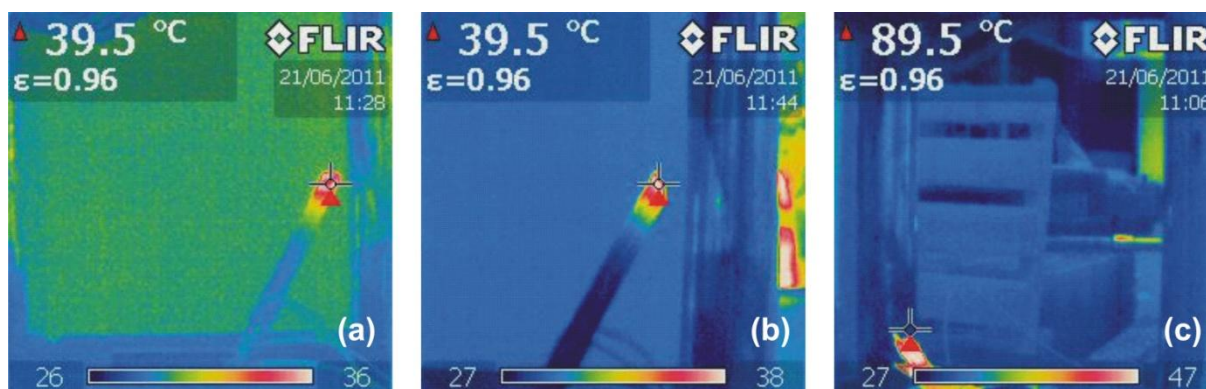


Figura 4 - Imagem da câmera termográfica das barras: (a) BA-01, (b) BA-02 e (c) BA-03.

Em seguida, na Figura 5 estão mostradas as séries temporais de deformação do extensômetro óptico e elétrico, para cada barra.

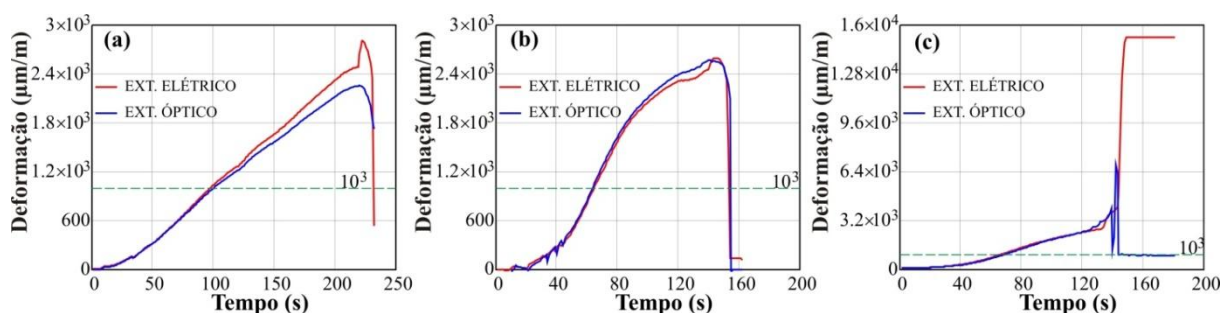


Figura 5 – Séries temporais de deformação-valores médios (a) BA-01, (b) BA-02 e (c) BA-03.

A partir dos dados medidos foi possível a comparação entre as deformações medidas em cada barra de aço por meio dos extensômetros elétricos e ópticos. No entanto, a correção da deformação gerada pela variação de temperatura aumentou a diferença entre esses extensômetros, que foi calculado para os pontos de deformação de 100, 500, 10³ e 2x10³µm/m. Na Tabela 2 apresenta-se a diferença percentual das leituras dos extensômetros medidas nas três barras de aço.

Tabela 2 - Diferenças percentuais entre os resultados dos extensômetros do ensaio de tração das barras de aço.

Barra	Diferença (%)*							
	para 100 µm/m		para 500 µm/m		para 10 ³ µm/m		para 2x10 ³ µm/m	
	Elétrico - Óptico	Elétrico - Óptico Corrigidos	Elétrico - Óptico	Elétrico - Óptico Corrigidos	Elétrico - Óptico	Elétrico - Óptico Corrigidos	Elétrico - Óptico	Elétrico - Óptico Corrigidos
BA-1	-5,61	-12,52	-1,03	-5,61	-3,73	-6,98	-8,07	-11,89
BA-2	-21,87	-23,59	7,10	1,06	3,76	1,68	2,68	0,79
BA-3	2,06	-0,23	-10,40	-31,80	-7,59	-22,03	-1,72	-3,66

$$*Diferença = \left(\frac{\text{Deformação óptico} - \text{Deformação elétrico}}{\text{Deformação elétrico}} \right) \cdot 100$$

3.2 Ensaio no Modelo Medidor Triortogonal de Junta

Na Figura 6 verificam-se as chapas flexíveis instrumentadas com extensômetros óptico e elétrico e o transdutor de deslocamento a laser utilizado para medir a flecha total na extremidade das chapas.

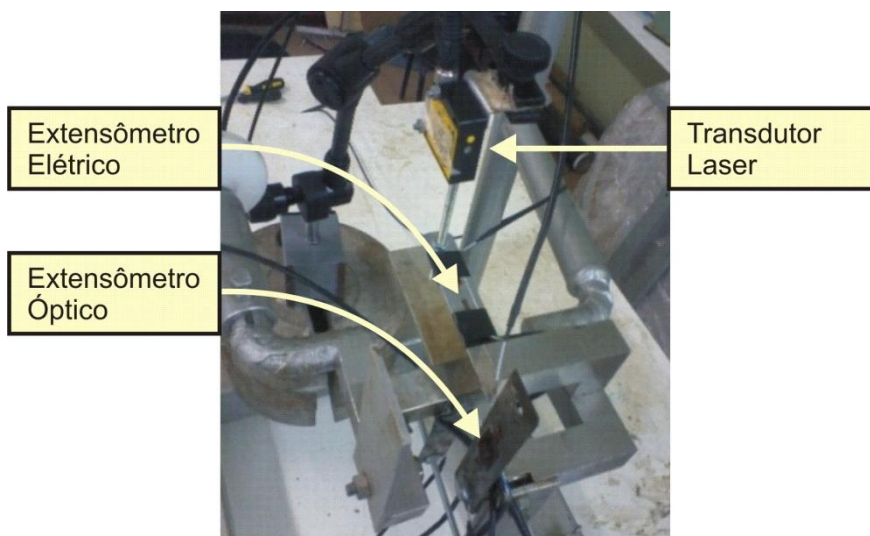


Figura 6 - Chapa flexível do modelo de medidor triortogonal de junta.

Durante o teste foi observado que os valores de deformações medidos pelos extensômetros ópticos tendem a ser superiores aos valores medidos pelos extensômetros elétricos. Quando realizada a correção dos valores ópticos pela equação 2.1, as diferenças em relação aos valores dos extensômetros elétricos aumentaram, conforme pode ser observado na Figura 7.

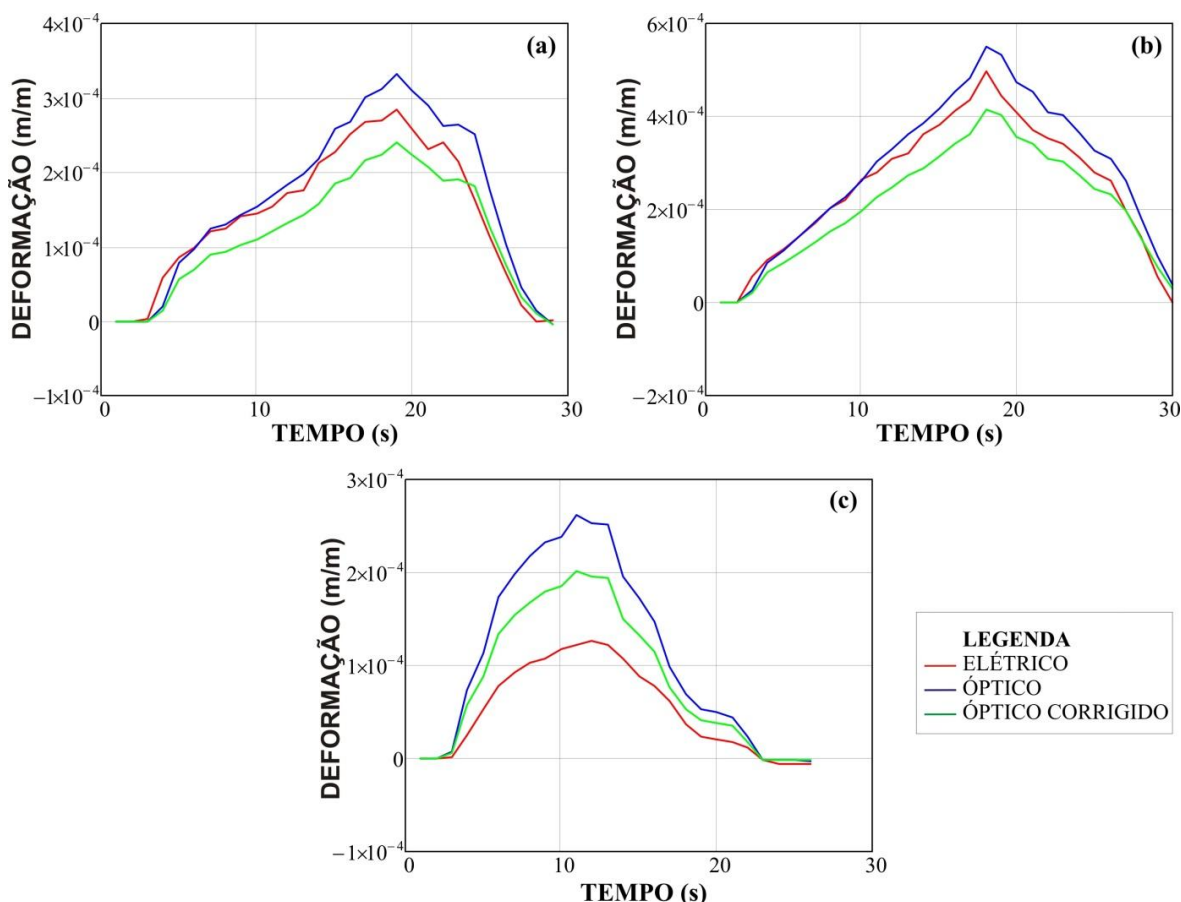


Figura 7 - Deformações medidas pelos extensômetros: (a) Direção 1, (b) Direção 2 e (c) Direção 3.

Na Figura 8 são mostradas as séries temporais de deslocamentos obtidas a partir dos extensômetros e comparadas com os valores do transdutor à laser. Na sequência, apresenta-se a Tabela 3, com os erros máximos percentuais medidos no ensaio do modelo do medidor triortogonal de junta, para as direções 1 e 2.

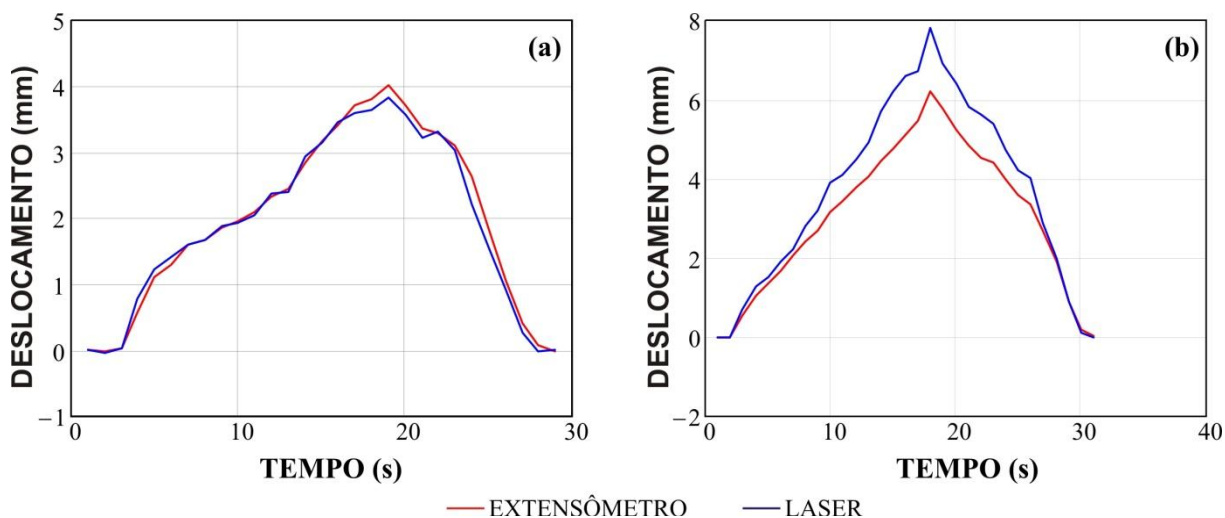


Figura 8 - Deformações medidas pelos extensômetros;. (a) Direção 1 e (b) Direção 2.

Tabela 3 - Erro máximo percentual dos deslocamentos medidos diretamente pelo transdutor de deslocamento e os calculados a partir das deformações dos extensômetros.

POSIÇÃO	ERRO (%)*
Direção 1	5,24
Direção 2	-20,45

$$*Erro = \left(\frac{\text{Deslocamento extensômetro} - \text{Deslocamento laser}}{\text{Deslocamento laser}} \right) \cdot 100$$

Dos resultados apresentados na Tabela 3 verifica-se que o erro máximo percentual foi o módulo de aproximadamente 20%, sendo que nestas análises outras fontes de erro estão associadas tais como desconhecimento do valor do módulo de elasticidade do material das chapas flexíveis e também imprecisões nas distâncias das aplicações dos extensômetros.

3.3 ENSAIO DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

O ensaio seguiu as orientações da norma NBR-8522, sendo instrumentados dois corpos de prova cilíndricos de 15x30cm. Os corpos de prova confeccionados com concreto foram identificados como T1 e T2. Cada corpo de prova foi instrumentado com três sistemas de aquisição de dados: sistema EMIC, sistema Braggmeter e sistema ADS. Na Figura 9, apresentam-se as séries temporais de deformação medidas nos ensaios.

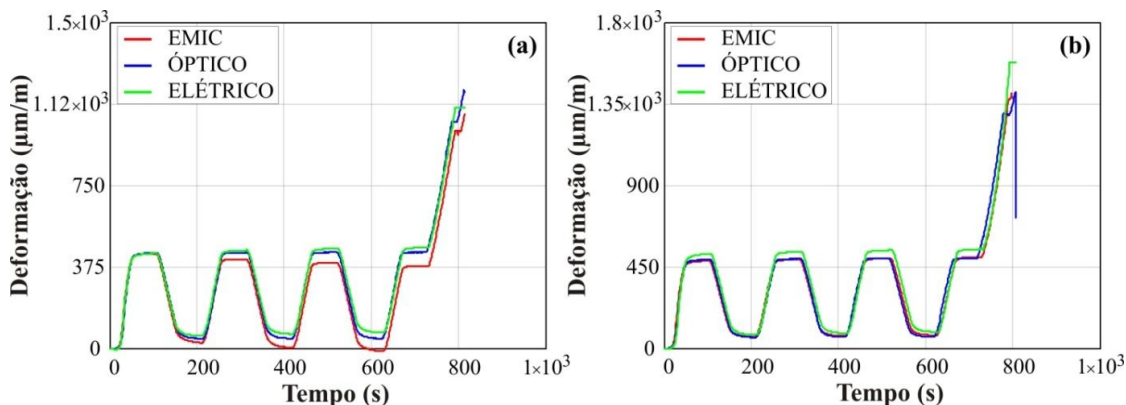


Figura 9 - Gráficos de deformação-tempo: (a) Corpo de Prova T1 e (b) Corpo de Prova T2.

Os valores do módulo de elasticidade tangente inicial foram determinados conforme as recomendações da NBR-8522, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 4 para cada corpo de prova ensaiado.

Tabela 4 - Valores dos módulos de elasticidade obtidos.

CORPO DE PROVA	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)		
	EMIC	ÓPTICO	ELÉTRICO
T1	27,874	27,629	27,787
T2	23,706	27,670	25,631

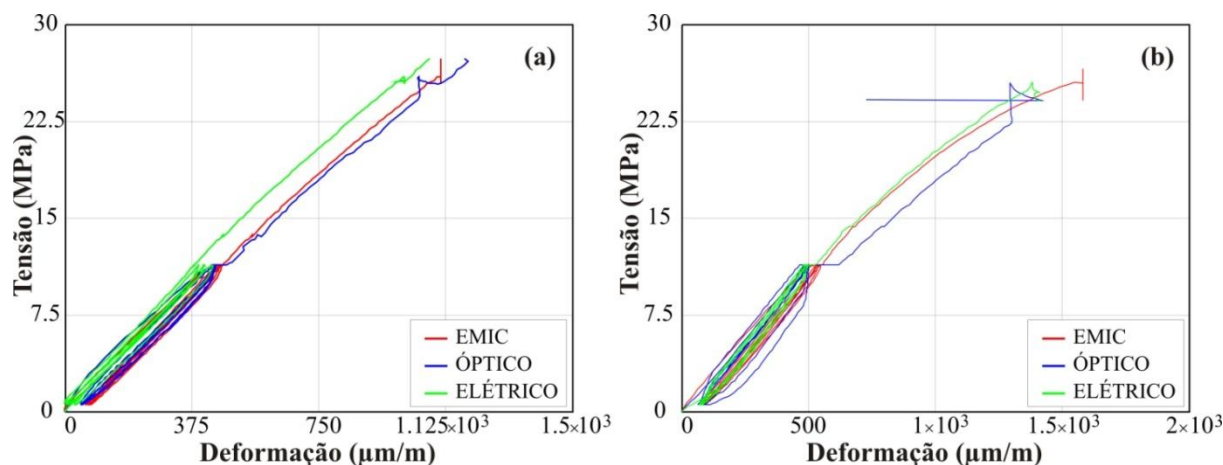


Figura 10 - Gráfico de tensão-deformação: (a) CP-T1 e (b) CP-T2.

4. CONCLUSÕES

Verificou-se que os resultados apresentados foram satisfatórios, onde os valores obtidos com os sensores ópticos foram próximos dos resultados dos sensores elétricos, algumas discrepâncias ocorreram por conta de algumas dificuldades encontradas devido ao mau funcionamento da unidade de aquisição de dados óptica.

No ensaio de tração das barras de aço, verificou-se que os extensômetros elétricos permitem medir maiores níveis de deformações. Isso porque para os extensômetros ópticos, grandes níveis de deformações provocam alterações na geometria da fibra que interrompem o fluxo de luz inabilitando a leitura do sensor. Sobre o efeito de escorregamento devido a aderência da poliamida na superfície da barra de aço abordado em trabalhos da revisão bibliográfica, este efeito apresentou resultados inconclusos, pois ora as deformações medidas pelos extensômetros ópticos eram maiores que as do elétrico, ora eram menores.

Dos testes realizados com o modelo do medidor de junta triortogonal verificou-se a viabilidade de sua automação a partir da utilização de extensômetros ópticos. Entretanto, verificou-se que o sistema óptico tende a medir valores de deformação maiores que os extensômetros elétricos. Corrigindo os resultados dos extensômetros ópticos constatou-se que as diferenças em relação aos valores dos extensômetros elétricos aumentaram.

Com relação aos ensaios de compressão realizados em corpos de prova cilíndricos de concreto, os resultados medidos pelos extensômetros ópticos, elétricos e clip-gage ficaram muito próximos entre si, mostrando o bom desempenho do sistema óptico.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao FINEP e CNPQ pelo financiamento da pesquisa, ao Professor Marco José de Sousa do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPA pela partilha de seu conhecimento em Redes de Bragg.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão – NBR-8522*. Rio de Janeiro, 2008.

BLANCO, E.; OLLER, S.; GIL, L. *Análisis experimental de estructuras*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería – CIMNE. Barcelona, 2008.

GLIŠIĆ, Branko. INAUDI, Daniele. *Overview of Fibre Optic Sensing Applications to Structural Health Monitoring*. In: 13th FIG Symposium on Deformation and Analysis. In: 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Lisbon, 2008.

INAUDI, Daniele; GROSSO, Andrea. *Fiber Optic Sensors for Structural Control*. In: The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 2008.

KLECKERS, Thomas; GÜNTHER, Bernd. *Optical versus electrical strain gages: A comparison*. HBM, 2007. Disponível em: <http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/techarticles/2007/stressanalysis_optical-electrical_en.pdf>. Acesso em 20 mar. 2011.

MEASURES, Raymond. *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*. Academic Press. San Diego - Califórnia, 2001.

SILVEIRA, João F. A. *Instrumentação e Comportamento de Fundações de Barragens de Concreto*. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

VELOSO, L. A. C. M. ; et al. *Alternativas para a automação dos medidores triortogonais de junta de barragens de concreto da UHE Tucuruí*. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 2007, Bento Gonçalves. IBRACON, 2007.

YU, Francis; YIN, Shizhuo. *Fiber Optic Sensors*. New York: Marcel Dekker, 2002.