

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DESENVOLVIMENTO DE NOVOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA PARA MEDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO

Leonardo Dantas Rodrigues, leodr@ufpa.br
Gabriel Farias Ferreira, naotenhoiddisponivel@gmail.com
Renan Antonio Nascimento dos Reis, renanreisvbl@gmail.com
Filipe Renan Benicio da Silva, filipee_renam@hotmail.com
Cindy Stella Fernandes, cindystella@ufpa.br
Marco José De Sousa, marcojsousa@ufpa.br
João Crisostomo Weyl, jweyl@ufpa.br
Hérica Raiane Costa Pereira, raianeherica@gmail.com

Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá. CEP 66075-110.

Resumo: Em ensaios mecânicos laboratoriais e em avaliações de componentes estruturais, as deformações provocadas pelas cargas aplicadas é uma das principais informações a serem obtidas. A utilização de extensômetros de resistência elétrica (strain gages) é apropriada e confiável para medições localizadas ou pontuais de deformações uniformes ou com baixos gradientes de deformação. No entanto, para medições em regiões com altos gradientes de deformação os extensômetros não são adequados, pois medem a média das deformações sob sua grade, não sendo capaz de informar os valores máximos existentes. Nos últimos anos, o uso de sensores de fibra óptica (FO) vem ganhando cada vez mais espaço nas medições de deformação. Por possuírem dimensões bastante reduzidas podem ser utilizadas em regiões onde os extensômetros não são adequados, como zonas de altos gradientes de deformação. Os sensores atualmente utilizados têm como princípio a inscrição de redes de Bragg na fibra, que funcionam como um filtro que determina o único comprimento de onda que será refletido ou transmitido dentre os vários contidos na luz branca. O comprimento de onda é relacionado com a deformação ocorrida no sensor que está instalado no componente de interesse. Este método, embora eficiente e de mais fácil instalação em relação aos strain gages (SG), tem no seu custo o principal inconveniente. Os equipamentos utilizados para inscrição das redes de Bragg na fibra e os equipamentos para aquisição dos dados de medição são muito caros. Neste trabalho, serão realizadas análises preliminares para desenvolvimento de um novo sensor de deformação de FO, com baixos custos de produção e de utilização em campo. Os sensores consistem da emenda de fibras monomodo (SMF) com pequenos trechos de fibra multimodos(MMF), que possuem um núcleo menor do que aquelas, produzindo perdas de potência luminosa, que podem ser relacionadas com deformação e, principalmente variações de curvatura. Nos testes já realizados, foram feitos ensaios de tração e flexão comparando-se os resultados obtidos com os sensores de fibra com os de SG. Os sensores de FO apresentaram um comportamento linear de perdas de potência à medida em relação às deformações.

Palavras-chave: Medição de deformações, extensômetros, sensores de fibra óptica, fibras monomodo e multimodo.

1. INTRODUÇÃO

Em ensaios mecânicos laboratoriais e em avaliações de componentes estruturais, as deformações provocadas pelas cargas aplicadas é uma das principais informações a serem obtidas. Os sensores de resistência elétrica (Strain Gages - SG) são os mais utilizados na medição de deformação em estudos de caracterização de materiais e análise estrutural. Entretanto, os SG, apesar de sua grande confiabilidade, possuem algumas limitações, dentre as quais vale destacar a de só serem apropriados para regiões com deformações uniformes e as complicações inerentes à sua instalação. Tentando dirimir tais limitações, os sensores de fibra óptica (FO) estão sendo cada vez mais utilizados, com destaque para os sensores com redes de Bragg. Esses sensores baseiam-se na filtragem de um único comprimento de onda contido na luz branca por redes de Bragg inscritas na fibra óptica, e relacionam essa filtragem com a deformação sofrida pelo sensor instalado em um determinado local.

Segundo (Maciel, 2013), a instalação dos sensores FO é muito mais prática do que a instalação dos SG, além de ganhar vantagens em frente as interferências elétricas causadas por grandes comprimentos dos cabos. No entanto,

(Oliveira, 2012) atenta para o alto custo de todos os equipamentos de aquisição de sinais do sensor com redes de Bragg, o que justifica a busca por outras opções de medição mais econômicas.

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento preliminar de sensores FO para medição de deformação, utilizando a emenda de uma pequena seção de fibra multimodo (Multimode fiber - MMF) entre duas fibras ópticas monomodo (Single mode fiber - SMF) com trechos de multimodo, também conhecido como sensor SMS (Singlemode – multimode- Singlemode). O sensor proposto usa técnica de descasamento de diâmetro de núcleo (Core diameter mismatch – CDM).

Devido a diferença de diâmetro dos núcleos das fibras, é inserida perda de potência no sinal óptico, que pode ser acentuada também com a curvatura da fibra e relacionada com deformações de um determinado corpo de prova onde encontram-se instaladas. A escolha desse tipo de sensor, se deve pelo fato de que apesar da já existência de sensores de FO, como as redes de Bragg, estes demandam equipamento de alta custo e fibra dopada. Este trabalho apresenta metodologia da instalação do sensor de FO, comparando os resultados obtidos dos sensores FO com os resultados apresentados por SG, fazendo um tratamento estatístico desses dados e tentar demonstrar sua viabilidade e sua aplicabilidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Monitorar as condições estruturais em obras de construção civil, indústria metal-mecânica, transportes e demais setores, trazem vários benefícios como: redução da ocorrência de falhas em sistemas e estruturas, conservação de recursos, aumento de produtividade em processos de fabricação, melhora no tempo de resposta em caso de emergências e aumento da segurança pública (Arms, 2004). Atualmente existem vários métodos de inspeção não-destrutivos para avaliação de tensões, a técnica mais aplicada é a extensometria, através dos SG (Dally, 1991). A utilização das fibras ópticas para fabricação de sensores na engenharia, é uma realidade atual, como a utilização das redes de Bragg.

2.1. Extensômetros de Resistência Elétrica (Strain Gages - SG)

Os SG são sensores elétricos de resistência e são constituídos por pequenos fios metálicos dispostos em forma de grade e são colados na superfície da estrutura. Quando a estrutura é deformada, a grade do SG deforma de forma conjunta e sua resistência elétrica se altera. Conectando-se o SG a um circuito tipo ponte de Wheatstone e induzindo-se uma corrente conhecida, pode-se relacionar as deformações ocorridas no componente avaliado com as diferenças de voltagem provocadas pelo desbalanceamento do circuito. Esse é o princípio básico de funcionamento de SG e um esquemático de sua instalação é mostrado na Fig.1.

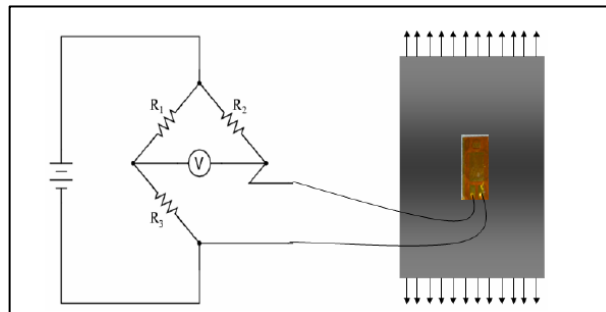


Figura 1. Representação da ligação de um extensômetro à ponte de Wheatstone.

2.2 Fibras Ópticas (FO)

As FO possuem uma estrutura composta por um núcleo cilíndrico dielétrico sólido de raio “a” e índice de refração característico, n_1 . O núcleo é formado por um vidro composto de sílica de alta pureza (SiO_2). Este núcleo é rodeado por um revestimento dielétrico (casca), que possui um índice de refração característico, n_2 . A condição de $n_2 < n_1$, permite que ocorra propagação da energia luminosa através do mecanismo de reflexão interna total. As FO podem ser divididas em duas classes: monomodo (Single mode fiber - SMF) e multimodo (Multi mode fiber - MMF). Uma fibra SMF é capaz de sustentar apenas um modo de propagação, enquanto as MMF podem conter centenas de modos. Esses modos são ondas eletromagnéticas que satisfazem a equação de onda homogênea na fibra e as condições de contorno para as superfícies de guias de onda.

2.2.1 Atenuação

A forma de quantificar a perda de potência do sinal óptico em uma FO, durante a propagação da luz, é chamada de atenuação. Os mecanismos básicos de atenuação da FO são: absorção, dispersão e as perdas radiativas por

absorção de energia óptica. Os parâmetros responsáveis por causar estes mecanismos na fibra estão relacionados à qualidade e características do material utilizados, comprimento de onda do feixe de luz, emendas, conectores e curvaturas. O raio se propaga no guia de onda quando a condição de reflexão interna total é satisfeita, ou seja, o ângulo de incidência θ_1 é maior que o ângulo crítico. As perdas por curvatura ocorrem quando a onda entra em uma curva e forma um ângulo θ_2 , o qual decresce conforme redução do raio de curvatura. Quando o ângulo θ_2 se torna menor que o ângulo crítico, a reflexão total deixa de acontecer e parte da onda é irradiada, conforme mostra a Fig.2.

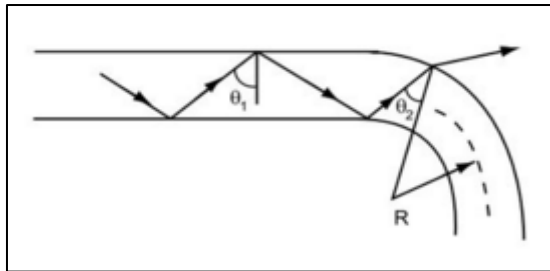


Figura 2. Irradiação em um guia de onda curvo.

2.3 Sensores de Fibra Óptica

Existem vários dispositivos e técnicas difundidas para sensoriamento óptico, tais como os sensores baseados em grades de Bragg em fibra (FBG - fiber Bragg gratings), interferômetro de Fabry-Perót, interferômetro de MachZehnder, interferômetro de Michelson, entre outros. Sensores ópticos comerciais são usualmente baseados nas FBG. Embora sensíveis e facilmente multiplexados em termos de comprimento de onda, os sensores FBG são relativamente caros para serem fabricados pois exigem equipamentos especiais dispendiosos e fibras ópticas dopadas.

2.3.1 Sensores SMS (Single Mode – Multi Mode – Single Mode)

O sensor SMS proposto é baseado em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo (Core diameter mismatch - CDM) e permite que a interrogação do sinal óptico seja feita utilizando apenas a potência óptica total transmitida ou refletida, o que pode ser aferido através de um simples fotodetector. Outra característica do sensor proposto, é que este pode ser feito independente de variações significativas de temperatura, o que faz dele sensor mais apropriado ou simples para a detecção da deformação mecânica, visto que não é influenciado pelos efeitos de temperatura. O sensor de curvatura SMS opera detectando deflexões transversais para as quais a fibra óptica oferece resistência desprezível. Portanto, sensores SMS são potencialmente interessantes na concepção de sensores que necessitem de sistemas inerciais mecânico-elásticos sensíveis e precisos, que não experimentem quaisquer tipos de resistência mecânica pelo transdutor.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Foram feitas emendas de fibras MMF entre duas SMF. Sendo a MMF (FG105-LCA da empresa Thorlabs) com dimensões de 105/125 μm de núcleo e casca, respectivamente; e a SMF-28 padrão, da empresa Corning, de dimensão 8,2/125 de núcleo e e de casca, respectivamente. Os parâmetros característicos das fibras SMF e MMF são mostradas na Tab .1. Para a fabricação do sensor, foi utilizada uma máquina de emenda modelo FSM-60S da empresa Furukawa, possibilitando a emenda entre as fibras SMF e MMF.

A potência transmitida pela FO foi medida utilizando um medidor de potência óptica modelo GFHP-B. A fonte laser operou na faixa de comprimento de onda de 1550 nm, com potência de lançamento de - 2 dBm; os sensores possuíam MMF com dimensões de 105/125 μm , com 3 mm de comprimento cada, e SMF 8,2/125 μm , com 30 mm de comprimento entre as duas MMF; e foram fixados com cianoacrilato.

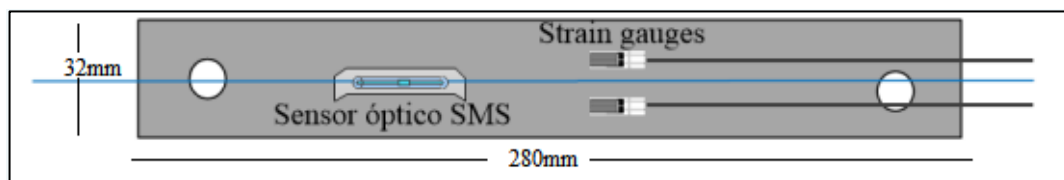


Figura 3. Power meter GFHP-B (A), máquina de fusão FSM-60S (B), utilizados para fabricação dos sensores.

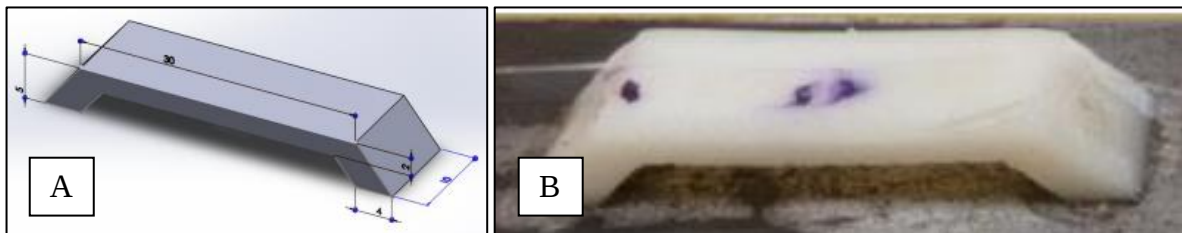
Tabela 1. Parametros característicos da SMF e MMF.

	SMF – 28 Corning	MMF (FG105 – LCA Thorlabs)
Diâmetro do Núcleo (μm)	8,2	105
Índice de Refração do Núcleo	1,45522	1,457
Diâmetro da Casca (μm)	125	125
IR Casca	1,45	1,440

Os experimentos foram realizados, utilizando uma barra de aço SAE 1020 de modulo de elasticidade 200GPa com dimensões de 32mm x 280mm x 3mm, instrumentada com SG, juntamente com o sensor de FO SMS. A barra foi submetida a tração utilizando um dispositivo para aplicação de carga. As deformações foram registradas com o aqisitor de dados, modelo VISHAY® D4. Os extensômetros foram colados de forma a obter as deformações longitudinais da barra, utilizando uma ligação de três fios e um quarto de ponte. A Fig. 4 mostra os sensores instalados na barra, e a Fig. 5, demonstra um desenho esquemático da barra.

**Figura 4. Barra de aço SAE 1020 instrumentada com os SGs e FOs.****Figura 5. Desenho esquemático da Barra de aço SAE 1020 instrumentada com os SG e FO.**

Para provocar curvaturas controladas no sensor SMS no ensaio de tração, projetou-se uma peça de plástico ABS P430 com modulo de elasticidade 37MPa foi fabricada através de impressão 3D, na qual o sensor foi colado. A peça, já com o sensor instalado, foi colada no espécime, Fig. 6 (B). As dimensões conjunto estão mostradas na Fig. 6 (A).

**Figura 6. (A) Desenho CAD da peça plástica, cotada em mm, (B) Detalhe Fibra óptica fixada na peça plástica.**

Considerando-se que a mini-estrutura de plástico (na qual a fibra foi colada) acompanha perfeitamente a deformação da barra de aço, e fazendo uso da equação da deformação para cargas axiais, temos:

$$\frac{P_{AÇO}}{A_{AÇO} \cdot E_{AÇO}} = \frac{P_{ABS}}{A_{ABS} \cdot E_{ABS}} \quad (1)$$

Onde:

$P_{AÇO} / P_{ABS}$ = Carga axial aplicada (N)

$A_{AÇO} / A_{ABS}$ = Área da seção transversal (m^2)

$E_{AÇO} / E_{ABS}$ = Módulo de Young (Pa)

Uma vez conhecida a carga (P_{ABS}) e a distância d (da base colada ao centróide da seção retangular), aplica-se a equação da linha elástica Eq.3, e determina-se a curvatura ($1/\rho$) sofrida pelo sensor:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E_{ABS} \cdot I} = \frac{P_{ABS} \cdot d}{E_{ABS} \cdot I} \quad (2)$$

Onde:

P_{ABS} = Carga axial aplicada (N)

d = Distância ao centróide da seção

E_{ABS} = Módulo de Young (Pa)

I = Momento de inércia de área da seção transversal (m^4)

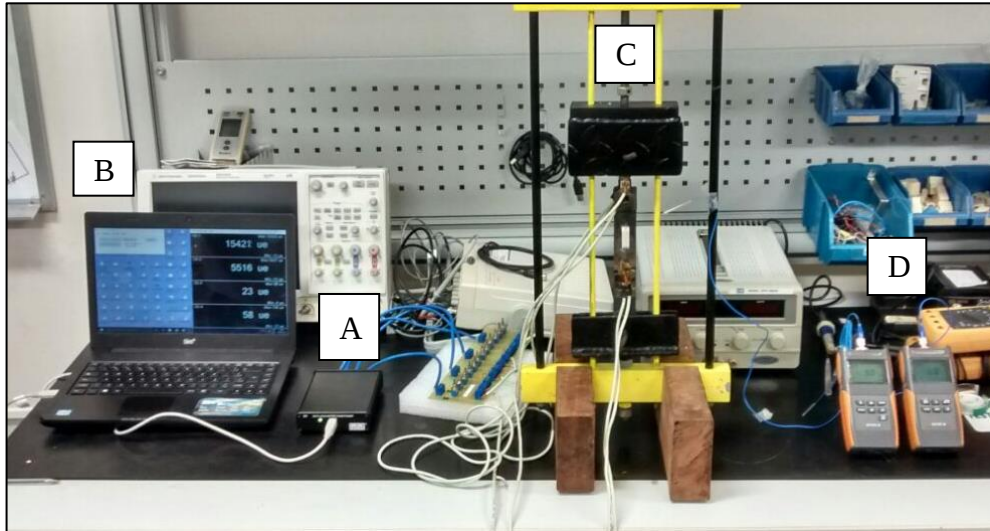


Figura 7. Bancada de medição completa com: (A) aquisitor VISHAY® D4; (B) microcomputador para registro das deformações; (C) dispositivo de aplicação de carga; (D) power meter para verificação da atenuação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, os dados obtidos são apresentados e analisados, e explicando e possíveis diferenças em ambos os casos. Os resultados do ensaio de tração são apresentados na Fig. 8.

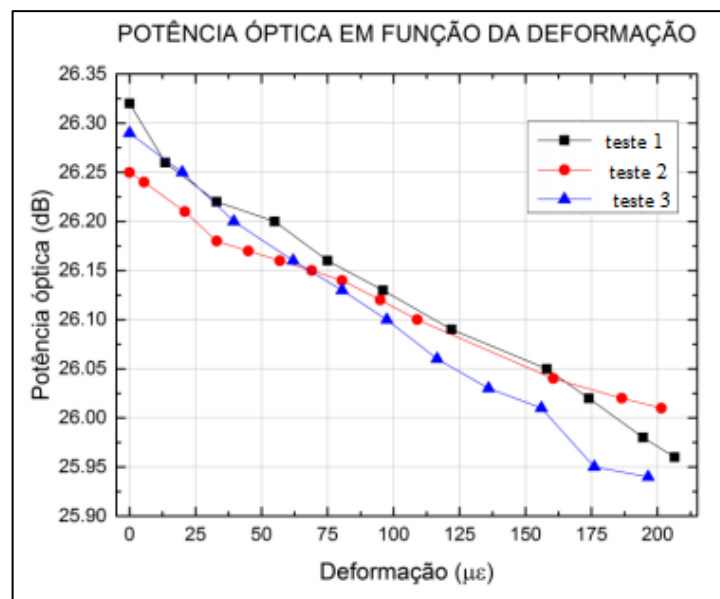


Figura 8. Variação da potência transmitida de acordo com a deformação da barra de aço SAE 1020.

É importante ressaltar que os valores mostrados representam o módulo da variação de potência transmitida. Constatou-se assim o aumento da perda de potência, conforme aumento da deformação. Isso deve-se ao aumento do raio de curvatura. Esse fenômeno pode ser melhor observado na Fig.9.

Os pontos da abscissa dos gráficos das repetições não coincidem porque o dispositivo de aplicação não permitia a estabilidade necessária para isso. Então, não foi possível impor exatamente as mesmas deformações nas repetições. Porém, isso não representa um problema, pois o objetivo era obter a tendência de comportamento da variação de potência luminosa em relação à curvatura.

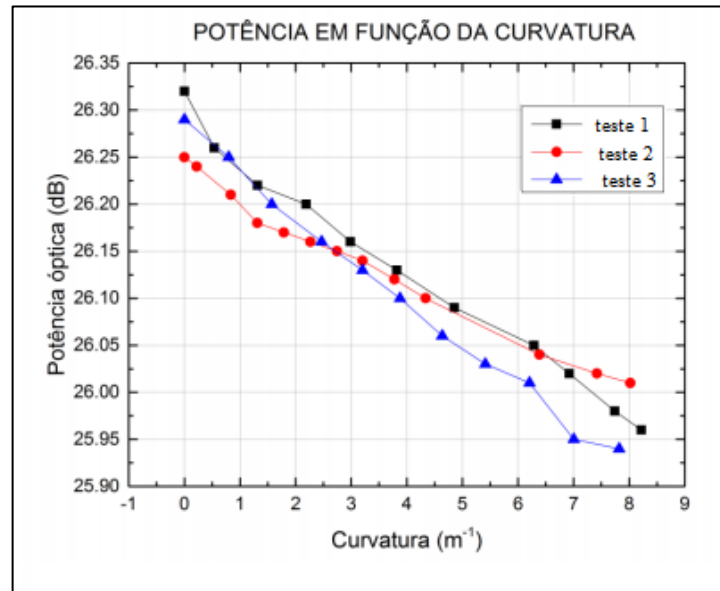


Figura 9. Redução da variação da potência transmitida com aumento do raio de curvatura.

A Figura 9, mostra de forma clara a redução da perda de potência transmitida conforme o aumento do raio de curvatura, sendo condizente com o fenômeno da atenuação. É interessante também observar a boa linearidade dos resultados obtidos como mostrado na Fig. 10.

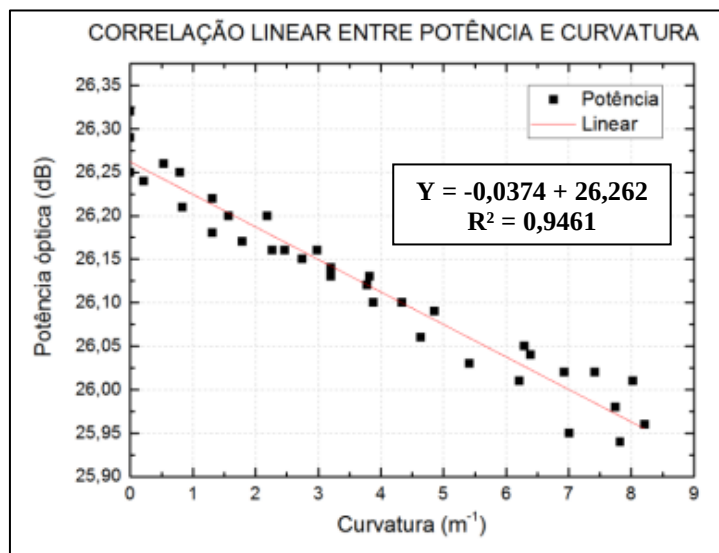


Figura 10. Correlação linear entre potência óptica e curvatura (linha de tendência).

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta as avaliações preliminares para a criação de novos tipos de sensores de tensão e deformação com FO. Para a fabricação do sensor foram feitas emendas entre fibras monomodo (menor núcleo) e multimodo (maior

núcleo). Essa união ocasiona mudanças abruptas nas dimensões de núcleo, o que acarreta numa grande sensibilidade da capacidade de transmissão de potência luminosa da fibra, principalmente com relação à curvaturas na mesma. O objetivo é oferecer uma alternativa mais barata e mais versátil do que os sensores baseados em redes de Bragg.

Foram realizados ensaios de tração numa barra, onde foi colada uma peça de plástico ABS, no qual estava instalado o sensor SMS. Com esta metodologia pôde-se obter variações de curvatura na fibra a medida que se aplicavam as cargas trativas no espécime. Também foram colados dois SG para possibilitar uma comparação entre as variações de potência luminosa da fibra com as deformações ocorridas na barra, conforme as Eq. (1) e (2) demonstram ao relacionar as deformações na barra e na peça ABS. Os resultados correlacionam diretamente a curvatura e eventual perda de luz na fibra com o resultado dos SG, com uma pequena margem de erro. Além de confirmarem a grande sensibilidade do sensor SMS para apontar variações de curvatura, os resultados mostraram bastante repetitivos, o que é um pré-requisito necessário para sensores deste tipo. Por fim, as variações de potência luminosa na fibra mostraram um comportamento linear com as variações de deformações, o que tende a facilitar as correlações.

Uma grande quantidade de experimentos ainda será realizada, para realização de análises estatísticas que reforcem as conclusões obtidas nestes primeiros ensaios, e até para possibilitar a avaliação desses sensores mediante à aplicação de outras condições de carregamento. Porém, enfatiza-se que estes primeiros resultados mostraram que estes sensores são bastante promissores, pois, além do baixo custo e boa eficácia demonstrada até o momento, ainda propiciam a possibilidade de reutilização, diferentemente dos SG.

6. REFERÊNCIAS

- Dally, J. W.; Riley, W. F., 1991, "Experimental Stress Analysis", McGraw-Hill, 4rd edition, Unite States of America.
- Maciel, R. S., 2013, "Utilização de Sensores à Base de Fibra Ótica Visando o Monitoramento de Grandes Estruturas de Engenharia Civil", Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Universidade Federal do Pará, Belém.
- Oliveira, A. O., 2012, "Sistema Para Medida Simultânea de Temperatura e Deformação com Redes de Bragg em 800nm", Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Townsend, C. P.; Arms, S. W., 2004, "Posture and body movement measuring system", U.S.A. Patent n. 6,834,436, Unite States of America

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DEVELOPMENT OF NEW FIBER OPTIC SENSORS FOR STRAIN MEASUREMENT

Leonardo Dantas Rodrigues, leodr@ufpa.br
Gabriel Farias Ferreira, naotenhoiddisponivel@gmail.com
Renan Antonio Nascimento dos Reis, renanreisvbl@gmail.com
Filipe Renan Benicio da Silva, filipee_renam@hotmail.com
Cindy Stella Fernandes, cindystella@ufpa.br
Marco José De Sousa, marcojsousa@ufpa.br
João Crisostomo Weyl, jweyl@ufpa.br
Hérica Raiane Costa Pereira, raianeherica@gmail.com

Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá. CEP 66075-110.

Abstract. *In laboratorial mechanical assays and in assessments of structural compounds, the deformations caused by the applied charges are one of the main information to be catch. The utilization of gages of electrical resistor's (strain gages) is appropriated and reliable to localized or in a spot of uniform deformations or with low gradients of deformation. But for measurements in high gradient of deformation regions those strain gages are not recommended because they give only the deformations average and not the biggest values existing. In the last years the use of optical fiber (OF) gages is taking more space in the deformations measurement. Having very low dimensions they can be used in spaces where the strain gages are not recommended, like the high gradients of deformation zones. The sensors utilized currently have the principle of inscription of Bragg webs in the fiber, who work like a filter that defines the one wave length or transferred between many others contained in the white light. The wave length is related with the deformation in the gage that is installed in the body of interest. This method though more efficient and easier to install than the strain gages, have the big cost as the principal inconvenient. The equipment utilized in the inscription of Bragg webs such as the equipment of reading data is very expensive. In this work, preliminary analysis was realized to evolve a new sensor of deformation of, with low cost of production and utilization. The sensor consists in the amendment of single-mode fiber (SMF) with little parts of multi-mode fiber (MMF), which have the nucleus much littler than the others, making loss of luminosity potency. Those loss can be related with the deformations occurred, by, principally, variations in this curvature. Deformation tests were did and the variation of potency was compared with the deformations taken by the two strain gages in the specimen. Tensile tests were conducted, in which the sensor power variations were compared with strains measured with two SG installed in the specimen. The intention was to obtain a volume of data required for proper statistical evaluation. This allowed a more accurate analysis of the behavior of these new FO sensors with which the parameters can be defined relationship between light intensity and distortion and / or curvature radius. However, it emphasizes that the results of this preliminary study were satisfactory because the FO sensors showed a linear behavior of power loss as compared to deformations. Keywords: Measurement deformations, Strain Gages, Optical Fiber sensors, Single mode fiber e Multi mode fiber.*

Keywords: *Measurement deformations, Strain Gages, Optical Fiber sensors, Single mode fiber e Multi mode fiber.*