

08 a 11 de Outubro de 2019  
Universidade Federal de Juiz de Fora  
Juiz de Fora - MG

## MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS UTILIZANDO SENSORES ÓPTICOS: MODELAGEM, SIMULAÇÃO E *SETUP* EXPERIMENTAL

**Felipe Oliveira Barino**<sup>1</sup> - felipe.barino@engenharia.ufjf.br

**Deivid Campos**<sup>1</sup> - deivid.campos@engenharia.ufjf.br

**Renato Luiz**<sup>1</sup> - renato.luiz@engenharia.ufjf.br

**Italo Alvarenga**<sup>1</sup> - italo.alvarenga@engenharia.ufjf.br

**Alexandre Bessa**<sup>1</sup> - alexandre.bessa@engenharia.ufjf.br

<sup>1</sup>Universidade Federal de Juiz de Fora - Juiz de Fora, MG, Brazil

**Resumo.** *Este trabalho apresenta a utilização de sensores ópticos no monitoramento de estruturas. Resultados obtidos por um modelo matemático, simulação e prática são comparadas para um esquema de mensuração de deformação em quatro pontos de uma barra de alumínio utilizando Redes de Período Longo.*

**Palavras-chave:** *Monitoramento de estruturas, Sensoriamento de deformação, Sensores ópticos, Redes de período longo*

### 1. INTRODUÇÃO

Os avanços no mercado de telecomunicações têm chamado atenção aos sensores ópticos em fibra, pelo aumento da oferta de componentes ópticos a um bom custo benefício e a vasta opção de fornecedores, Santos & Fahari (2014). Desde o desenvolvimento das chamadas redes de difração em fibra e a descoberta de sua sensibilidade ao ambiente externo, esses dispositivos têm sido utilizados como sensores, para mensuração de temperatura, Bhatia & Vengsarkar (1996), deformação, Zhang et al (1999), índice de refração do meio, Patrick et al (1998) e curvatura, Liu et al (2000), por exemplo. Algumas vantagens desse tipo de sensor com relação aos sensores elétricos ou eletrônicos tradicionais são: peso reduzido, imunidade à interferência eletromagnética, baixa atenuação, facilidade de multiplexação, resistência à corrosão e capacidade de operar em ambientes hostis.

As chamadas Redes de Período Longo em Fibra (LPFGs, do inglês, *Long-period Fiber Gratings*) são dispositivos em fibra óptica fabricados pela perturbação periódica do índice de refração desta, que funcionam como filtros rejeita-faixa com bandas de atenuação centradas em, Rego (2016):

$$\lambda_{res}^m = (n_{eff,co} - n_{eff,cl}^m) \Lambda \quad (1)$$

onde  $\lambda_{res}^m$  é o  $m$ -ésimo comprimento de onda ressonante da LPFG,  $n_{eff,co}$  e  $n_{eff,cl}^m$  são os índices de refração efetivos do modo fundamental e dos  $m$  modos de casca, respectivamente, e  $\Lambda$  é o período da rede de difração. Essas bandas de atenuação ocorrem devido ao acoplamento do modo de propagação fundamental, do núcleo da fibra monomodo, a um modo copropagante da casca da fibra. Tal acoplamento ocorre nos comprimentos de onda dados pela equação (1) e, por efeitos de espalhamento na interface da casca com o ambiente, atenuação acontece, Haus & Huang (1991).

Esses dispositivos são sensíveis à deformação por dois fatores: (I) pela variação no período da rede, pela deformação física na fibra, (II) pela variação nos índices de refração efetivos do núcleo e do modo ressonante, devido ao efeito termoóptico. Seja  $\eta_{co}$  e  $\eta_{cl}$  os coeficientes elastoópticos dos materiais que formam o núcleo e a casca da fibra, respectivamente, a sensibilidade da LPFG à deformação é dada por, Shu et al (2002):

$$\frac{d\lambda_{res}^m}{d\epsilon} = \lambda_{res}^m \frac{\frac{d\lambda_{res}^m}{d\epsilon}}{n_{eff,co} - n_{eff,cl}^m} \left( 1 + \frac{\eta_{co}n_{eff,co} - \eta_{cl}n_{eff,cl}^m}{n_{eff,co} - n_{eff,cl}^m} \right) \quad (2)$$

O monitoramento de estruturas (SHM, do inglês *Structural Health Monitoring*) é útil em diversas indústrias, como aeronáutica, engenharia civil e mecânica, por exemplo, e se baseia na observação periódica e contínua de uma dada estrutura, Farrar & Worden (2006). Para tal, a mensuração de deformação possui um papel extremamente relevante e ajuda a manter a segurança da estrutura, prevendo falhas e possibilitando um melhor planejamento de manutenção preventiva.

O uso de sensores ópticos nesses esquemas de monitoramento é bem reportado na literatura, eles vêm sendo utilizados em pontes como é o caso dos trabalhos apresentados por Chan et al (2006), Tennyson et al (2001) e Lin et al (2005). Já Kuang et al (2003) desenvolvem um sistema para detecção de rachaduras em estruturas de concreto utilizando fibras plásticas. Outras aplicações de sensores ópticos em estruturas de concreto podem ser vistas em Maher & Nawy (1993), Davis et al (1997), Lin et al (2004), Moyo et al (2005) e Kang et al (2007).

Portanto é possível dizer que sensores ópticos possuem certa relevância no âmbito do SHM, principalmente utilizando sensores baseado em Redes de Bragg (FBG, do inglês *Fiber Bragg Gratings*). Porém o uso de LPFGs é pouco difundido no contexto de SHM, apesar de possuir ocorrências do uso de *setups* híbridos, com FBGs e LPFGs, para medida de temperatura e deformação, como os trabalhos desenvolvidos por Patrick et al (1996), Srimannarayana et al (2008) e Patrick et al (1996). Há também a aplicação de LPFGs para forças bidimensionais como apresentado em Barino & Santos (2018), além de serem utilizadas também para mensuração de umidade em estruturas, como os trabalhos apresentados por Venugoplan et al (2008) e Zheng (2015).

Nesse trabalho é proposto o uso de LPFGs no monitoramento de deformação em estruturas, um ensaio é realizado em uma barra de alumínio com quatro sensores LPFGs previamente calibrados para validar seu uso em SHM. Os resultados deste ensaio são então comparados com o modelo matemático e com resultados obtidos a partir de simulações pelo método dos elementos finitos.

## 2. MÉTODOS

Os sensores LPFGs (nomeados: S021, S022, S023 e S024) foram fabricados pela técnica do arco elétrico, conforme descrita por Rego (2016), em fibra monomodo (SMF-28), estes

foram fixados em uma barra de alumínio 6351-T6 de dimensões 64 mm x 20 mm x 605 mm, suportada por dois apoios nas duas extremidades. Com o objetivo de deformar a barra e medir a deformação nos pontos em que os sensores foram fixados, adiciona-se uma massa ( $m$ ) no centro da barra, conforme ilustrado na Figura 1. Já a configuração do circuito óptico utilizado é: uma fonte luminosa *broadband* (BBS) com comprimento de onda central próximo a 1550nm, passando pelas quatro LPGs e o espectro resultante é observado em um analisador de espectro óptico (OSA, Anritsu MS9740A).

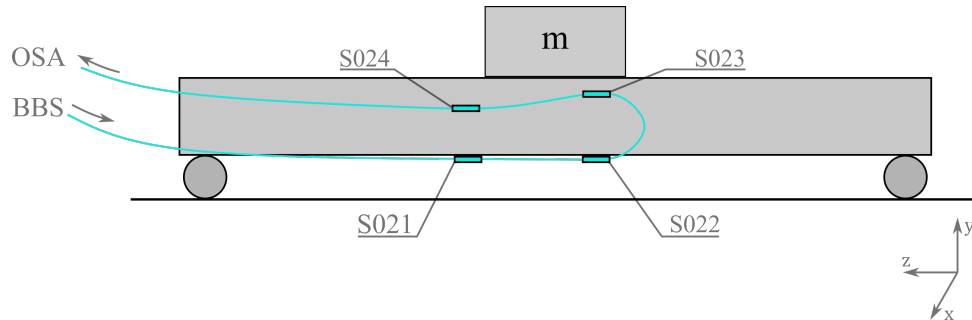


Figura 1- Esquema do *setup* experimental para mensuração de deformação em uma barra com quatro LPGs.

Para correlacionar a deformação no ponto do sensor à massa utilizada no processo de calibração e comparar os valores lidos pelos sensores, um modelo matemático para a deformação nos pontos de interesse foi desenvolvido utilizando o momento fletor e o momento de inércia da barra de alumínio dada. O momento fletor, para o caso estudado é dado por:

$$M_f = \frac{FL}{2} \quad (3)$$

onde  $F$  é a força aplicada,  $L$  o comprimento da barra. Já, considerando a largura da barra como  $b$  e sua altura como  $h$ , o momento de inércia é:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4)$$

Combinando as duas equações acima, pode-se obter a deformação em um dos pontos de interesse pela lei de Hooke. Seja  $y$  a distância de tal ponto ao eixo neutro e  $E$  o Módulo de Young do material, a deformação em termos do momento fletor e do momento de inércia é:

$$s = \frac{1}{E} \frac{M_f y}{I} \quad (5)$$

Utilizando a equação acima para as massas utilizadas no processo de calibração, tem-se os resultados mostrados na Tabela 1 para os quatro sensores LPGs.

Tabela 1- Deformação calculada nos sensores.

Massa [kg]	s [ $\mu\epsilon$ ]			
	S021	S022	S023	S024
0	0	0	0	0
19.850	16.54	23.46	12.5	2.584
39.980	33.31	47.25	25.1	5.204
60.195	50.15	71.14	37.8	7.835
80.125	66.75	94.70	50.31	10.43
100.34	83.60	118.6	63.00	13.06

Para validar o esquema de sensoriamento proposto, os valores numéricos obtidos por teste a três apoios utilizando uma prensa hidráulica (Figura 2) e os sensores desenvolvidos foram comparados com valores obtidos pelo modelo matemático e por simulação.

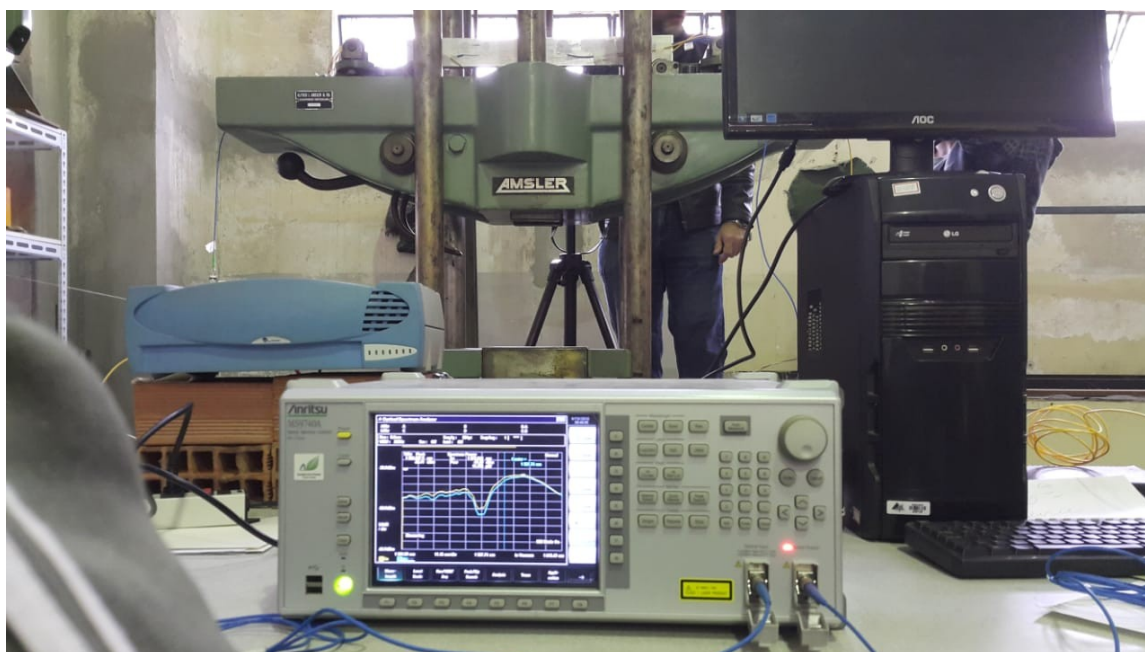


Figura 2- *Setup experimental.*

A barra foi modelada no *software* de simulação ANSYS usando a ferramenta Static Structural por meio de um bloco sólido extrudado a partir de um retângulo, como mostrado na Figura 3. A discretização do modelo foi feita por uma malha retangular com 16217 nós. Os parâmetros ambientais foram configurados para casar com o ambiente do experimento.

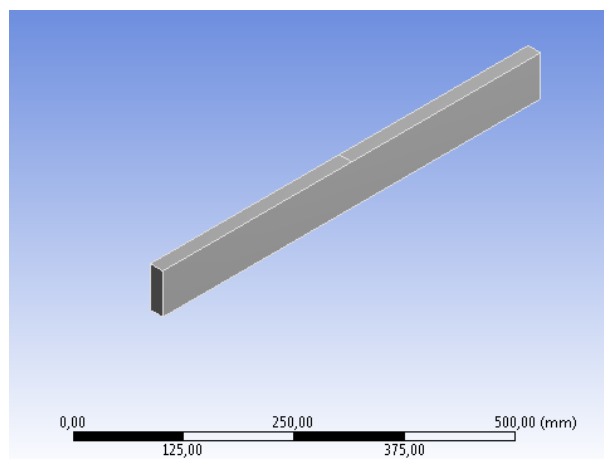


Figura 3- Modelo 3D da barra, utilizado na simulação por FEM.

### 3. RESULTADOS

A variação nos comprimentos de onda ressonante das LPFGs, causadas pelas massas mostradas na Tabela 1, foram obtidas com o OSA. Dessas variações ajusta-se a curva de calibração estática dos sensores, relacionando o deslocamento do comprimento de onda ressonante com a deformação mensurada. O resultado destes ajustes estão mostrados nos gráficos da Figura 4.

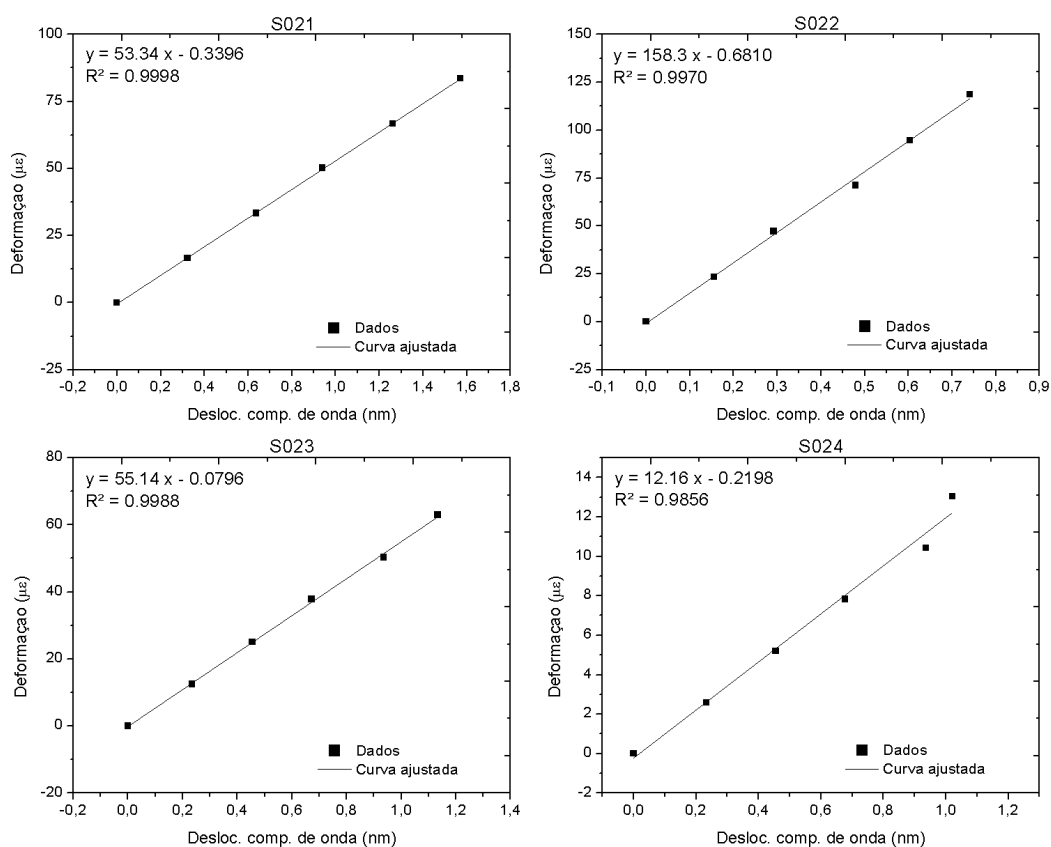


Figura 4- Curvas de calibração para as quatro LPFGs.

Note, nesses gráficos, que todos os sensores apresentaram comportamento linear, com coeficiente de determinação maior que 0,98 em todos os casos. Veja também que a variação na deformação com relação ao comprimento de onda ressonante foram de 53,34  $\mu\epsilon/\text{nm}$ , 158,3  $\mu\epsilon/\text{nm}$ , 55,14  $\mu\epsilon/\text{nm}$  e 12,16  $\mu\epsilon/\text{nm}$ , para os sensores S021, S022, S023 e S024, respectivamente. Por outro lado, podemos dizer que a sensibilidade dos sensores são de 18,75 pm/ $\mu\epsilon$ , 6,317 pm/ $\mu\epsilon$ , 18,14 pm/ $\mu\epsilon$  e 82,24 pm/ $\mu\epsilon$ , tais sensibilidades são maiores que as reportadas por sensores ópticos baseados em FBGs encontrados na literatura, com mesma finalidade, que possuem sensibilidades na ordem de 1 pm/ $\mu\epsilon$  (Moyo et al (2005); Melle & Liu (1993); Grattan & Meggitt (2013)).

Já o deslocamento no comprimento de onda ressonante para o teste realizado na prensa hidráulica com carga de 600 kg obtido para cada sensor foi: 9,3 nm, 4,6 nm, 6,8 e 5,8 nm. Com auxílio das curvas de calibração mostradas na Figura 4 obtém-se a deformação em cada ponto em que estão colocados os sensores. A Figura 5 apresenta as curvas de deformação geradas pela simulação, com base na posição de cada sensor foram obtidos os valores de deformação esperados para os sensores. Os resultados obtidos tanto pela curva de calibração experimental, quanto pela modelagem matemática e pela simulação por FEM estão mostrados na Tabela 2.

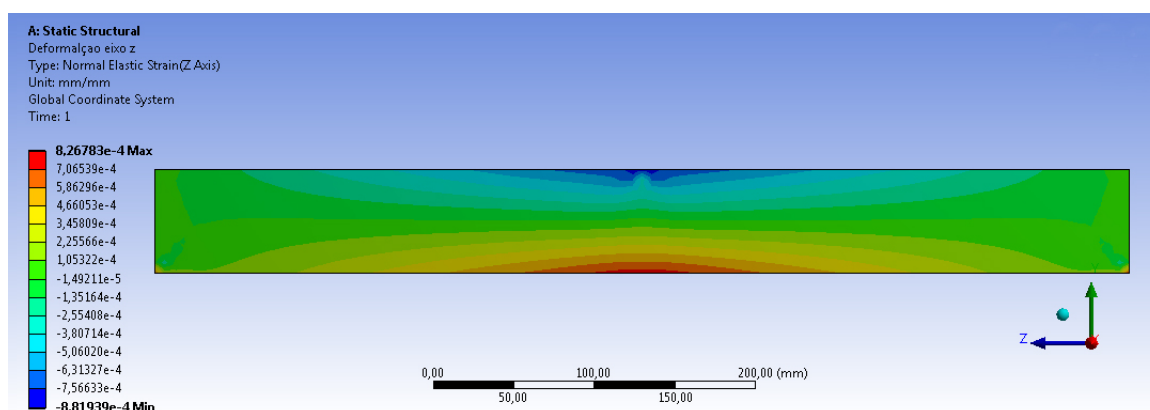


Figura 5- Resultados da simulação

Tabela 2- Comparação dos obtidos experimentalmente com os teóricos e simulados.

LPG	s [ $\mu\epsilon$ ]		
	Curva experimental	Modelo matemático	FEM
S021	727.2	780.8	826.8
S022	715.5	709.1	704.7
S023	497.3	499.8	506.0
S024	375.9	265.9	255.4

## 4. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado mostra que sensores a fibra óptica são uma solução viável para monitoramento de estruturas, uma vez que além de suas características intrínsecas, eles performam bem na mensuração de deformação. Possuem ótima linearidade, dentro da faixa dinâmica estudada, e também grande sensibilidade a deformação.

Enquanto as FBGs são dispositivos largamente utilizados em SHM, com soluções comerciais disponíveis, as LPGs estão se desenvolvendo em tal área de aplicação, mas se mostram como alternativa promissora, uma vez que a sensibilidade é maior e pode ser otimizada por meio da escolha do modo ressonante de operação mais adequado.

## Agradecimentos

Agradecemos ao apoio da FAPEMIG, CNPq, Propesq-UFJF, Inerge-UFJF e CPFL Energia.

## REFERÊNCIAS

- Barino, F. O. & Santos, A. B. . (2018) Sensor óptico LPFG para avaliação de forças bidirecionais. Anais do CBA 2018, João Pessoa, PB, Brazil.
- Bathia, V. and Vengsarkar, A. M. (1996). Optical fiber long-period grating sensors. Optic letters, v. 21, n. 9, p. 692-694, 1996.
- Chan, T. H., Yu, L., Tam, H. Y., Ni, Y. Q., Liu, S. Y., Chung, W. H., & Cheng, L. K. (2006). Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation. Engineering structures, 28(5), 648-659.
- Davis, M. A., Bellemore, D. G., & Kersey, A. D. (1997). Distributed fiber Bragg grating strain sensing in reinforced concrete structural components. Cement and concrete composites, 19(1), 45-57.
- Farrar, C. R. and Worden, K. (2006). An introduction to structural health monitoring. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 365, n. 1851, p. 303-315, 2006.
- Grattan, L. S., & Meggitt, B. T. (Eds.). (2013). “*Optical Fiber Sensor Technology: Fundamentals*”. Springer Science & Business Media.
- Haus, H. A. and Huang, W. (1991). Coupled-mode Theory, Proceedings of the IEEE, v.79, n. 10, p. 1505-1518, 1991
- Kang, L. H., Kim, D. K., & Han, J. H. (2007). Estimation of dynamic structural displacements using fiber Bragg grating strain sensors. Journal of sound and vibration, 305(3), 534-542.
- Kuang, K. S. C., Cantwell, W. J., & Thomas, C. (2003). Crack detection and vertical deflection monitoring in concrete beams using plastic optical fibre sensors. Measurement Science and Technology, 14(2), 205.
- Liu, Y., Williams, J. A. R. and Bennion, I. (2000). Optical bend sensor based on measurement of resonance mode splitting of long-period fiber grating. IEEE Photonics Technology Letters, v. 12, n. 5, p. 531-533, 2000.
- Lin, Y. B., Chang, K. C., Chern, J. C., & Wang, L. A. (2004). The health monitoring of a prestressed concrete beam by using fiber Bragg grating sensors. Smart Materials and Structures, 13(4), 712.
- Lin, Y. B., Pan, C. L., Kuo, Y. H., Chang, K. C., & Chern, J. C. (2005). Online monitoring of highway bridge construction using fiber Bragg grating sensors. Smart Materials and Structures, 14(5), 1075.
- Maher, M. H., & Nawy, E. G. (1993). Evaluation of fiber optic Bragg grating strain sensor in high strength concrete beams. In Applications of Fiber Optic Sensors in Engineering Mechanics (pp. 120-133).
- Melle, S. M., & Liu, K. (1993). Practical fiber-optic Bragg grating strain gauge system. Applied optics, 32(19), 3601-3609.
- Moyo, P., Brownjohn, J. M. W., Suresh, R., & Tjin, S. C. (2005). Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure. Engineering structures, 27(12), 1828-1834.
- Patrick, H. J., Williams, G. M., Kersey, A. D., Pedrazzani, J. R., & Vengsarkar, A. M. (1996). Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination. IEEE Photonics Technology Letters, 8(9), 1223-1225.
- Patrick, H., Williams, G. M., Kersey, A. D., Pedrazzani, J. R., & Vengsarkar, A. M. (1996, May). Strain/temperature discrimination using combined fiber Bragg grating and long period grating sensors. In Optical Fiber Sensors (p. Tu42). Optical Society of America.
- Patrick, H. J., Kersey, A. D. and Bucholtz, F. (1998). Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction. Journal of Lightwave technology, v. 16, n.9, p. 1606, 1998
- Rego, G., Arc-induced long period fiber gratings, J. of Sensors, vol. 2016, pp. 3598634 (14 pg.), Jan. 2016.
- Santos, J. L. and Fahari, F. (2014). “*Handbook of Optical Sensors*”, 1ed., CRC Press.
- Shu, X., Zhang, L. and Bennion I. (2002). Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings. Journal of Lightwave Technology, v. 20, n. 2, p. 255-266, 2002.



- Srimannarayana, K., Shankar, M. S., Prasad, R. L. S., Mohan, T. K., Ramakrishna, S., Srikanth, G., & Rao, S. R. P. (2008). Fiber Bragg grating and long period grating sensor for simultaneous measurement and discrimination of strain and temperature effects. *Optica Applicata*, 38(3).
- Tennyson, R. C., Mufti, A. A., Rizkalla, S., Tadros, G., & Benmokrane, B. (2001). Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors. *Smart materials and Structures*, 10(3), 560.
- Venugopalan, T., Sun, T., & Grattan, K. T. V. (2008). Long period grating-based humidity sensor for potential structural health monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 148(1), 57-62.
- Zhang, L., Liu, Y., Everall, L., Williams, J. A. R. and Bennion, I. (1999). Design and realization of long-period grating devices in conventional and high birefringence fibers and their novel application as fiber-optic load sensors. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, v. 5, n. 5, p. 1373-1378, 1999.
- Zheng, S. (2015). Long-period fiber grating moisture sensor with nano-structured coatings for structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, 14(2), 148-157.

## Structural Health Monitoring Using Optical Sensors: Finite Element Method Simulation and Experimental Setup

**Abstract.** *This paper presents the utilization of optical sensors in structural health monitoring. Results obtained by mathematical model, simulation and practical setup are compared for a four-point strain measurement scheme of an aluminum beam using Long Period Fiber Gratings.*

**Keywords:** *Structural Health Monitoring, Strain sensing, Optical sensors, Long-period fiber grating*