

ROSETA EXTENSOMÉTRICA ÓPTICA RECTANGULAR

Frazão, O¹; Araújo, F. M.¹; Dias, I.¹; Costa, A. N.²; Torres Marques, A.²

¹INESC Porto – Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos,
Rua do Campo Alegre, 687, 4169-007 Porto.

²INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial,
Rua do Barroco, 174, 4465-591 Leça do Balio, Portugal



RESUMO

Este artigo apresenta uma roseta extensométrica óptica rectangular. Uma placa compósita de fibra de carbono, foi instrumentada com uma fibra óptica contendo três sensores de Bragg formando uma roseta rectangular. Estas placas instrumentadas podem ser usadas para monitorizar, reforçar e proteger estruturas, sendo actualmente uma aérea importante no controlo e reparações de estruturas.

1- INTRODUÇÃO

Os sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica são particularmente úteis em várias aplicações tecnológicas, sobretudo aquelas onde o elemento sensor pode ser embebido num material compósito resultando assim numa estrutura inteligente para monitorização em tempo real de estruturas aeroespaciais ou civis [1]. As redes de Bragg em fibra óptica - FBG [2, 3] são bastante conhecidas para a medição de deformação e temperatura em estruturas inteligentes, e tem vantagens únicas em relação aos sensores convencionais. Estas vantagens são devido ao comportamento intrínseco das fibras ópticas tais como, imunidade a interferência electromagnética, altas temperaturas, tolerância a radiações, flexibilidade, tamanho reduzido, estabilidade e durabilidade em condições ambientais. Esta tecnologia de sensores permite medir parâmetros tais como: carga/deformações, vibrações, temperatura, detecção de fracturas em estruturas. As fibras de carbono podem ser usadas

como reforço e protecção de estruturas. As duas tecnologias associadas têm um papel importante na monitorização de reparações e reforço de estruturas [4].

2- TEORIA DAS FBG

As redes de Bragg são formadas por uma modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra óptica. O valor máximo da reflectividade dessa micro-estrutura ocorre quando a constante de propagação do modo guiado no núcleo se encontra em ressonância com a modulação espacial do índice com período Λ , estabelecendo a conhecida condição de Bragg

$$\lambda_b = 2n_{\text{efc}} \Lambda, \quad (1)$$

onde n_{efc} é o índice efectivo do modo guiado.

As redes de Bragg, como parte integrante da fibra óptica, são sensíveis à aplicação de grandezas físicas na mesma medida que a própria matriz de sílica. Cedo foi reconhecido que as propriedades espectrais das redes de Bragg dependiam de grandezas

como a temperatura e a tensão mecânica [1]. Se considerarmos a relação de Bragg na sua forma diferencial, temos

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b \left(\frac{\Delta n_{\text{efc}}}{n_{\text{efc}}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \right); \quad (2)$$

ou seja, a aplicação de qualquer grandeza física à fibra que provoque uma alteração do índice efectivo ou do período, induz um desvio no comprimento de onda ressonante. O princípio básico de operação dos sensores de Bragg baseia-se então na medição dos desvios em comprimento de onda induzidos na condição de ressonância por variações de temperatura [1], de deformação mecânica [1], de pressão [5] ou de campos magnéticos [6]. No entanto, dada a importância prática atribuída aos sensores de temperatura e de deformação, a maioria das demonstrações práticas têm sido centradas nessas aplicações [3]. A sensibilidade à temperatura dos sensores de Bragg resulta da expansão térmica da matriz de sílica e da dependência do índice de refração com a temperatura. Assim, para uma variação de temperatura ΔT , o correspondente desvio na ressonância de Bragg é dado por

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right) \Delta T = \lambda_b (\alpha + \xi) \Delta T \quad (3)$$

onde α e ξ são o coeficiente de expansão térmica e o coeficiente termo-óptico da sílica, respectivamente. No caso da sílica, o coeficiente de expansão térmica tem o valor de $0.55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ e o coeficiente termo-óptico o valor de $8.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; pelo que, na presença de variações de temperatura, a variação do comprimento de onda ressonante é dominada pela alteração do índice de refração. Por outro lado, a sensibilidade à tensão mecânica advém simultaneamente da deformação física da matriz de sílica e da alteração do índice devido ao efeito foto-elástico. A variação do comprimento de onda ressonante para a aplicação de tensão mecânica axial, da qual resulta uma deformação longitudinal $\Delta\epsilon$, é então dada por

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial\epsilon} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial\epsilon} \right) \Delta\epsilon = \lambda_b (1 - p_e) \Delta\epsilon \quad (4)$$

onde p_e é a constante foto-elástica. Esta constante tem, no caso da sílica, um valor numérico aproximado de 0.22.

3 - ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO A DUAS DIMENSÕES

Em extensometria, existem dois eixos principais de deformação os quais são desconhecidos. A finalidade é calcular a magnitude e direcções desses eixos principais através da medição das deformações em três eixos diferentes no plano e com ângulos bem definidos. Estas condições são necessárias e suficientes para a determinação desses eixos. As deformações locais são deduzidas a partir da lei de Hooke [7]

$$\epsilon_y = d + r \cos(2\alpha), \quad (5)$$

onde d e r são os valores médios e derivativos de deformação são dados por:

$$d = (\epsilon_x + \epsilon_y)/2, \quad (6)$$

$$r = (\epsilon_x - \epsilon_y)/2.$$

A deformação local, dada pela equação (5) pode ser re-escrita para cada deformação de uma roseta rectangular:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= d + r \cos(2\alpha) \\ \epsilon_2 &= d + r \cos[2(\alpha + 45^\circ)] \\ \epsilon_3 &= d + r \cos[2(\alpha + 90^\circ)] \end{aligned} \quad (7)$$

onde α é o angulo de orientação do principal eixo (5) com a respectiva direcção do sensor FBG. A solução analítica para a equação (6) pode ser obtido para dois tipos de roseta: rectangular ($\beta = 45^\circ$) ou delta ($\beta = 120^\circ$). Conhecido β e medindo ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 , podemos determinar os parâmetros d , r e α .

A forma analítica para a deformação média d , deformação derivativo r e o

principal eixo de orientação $tg(2\alpha)$ na roseta rectangular é dado por

$$d = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)/2,$$

$$r = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \left\{ 1 + \left[2 \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} - 1 \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \text{Tan}^{-1} \left(\frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right).$$

A principal deformação pode ser calculada através da deformação medida ε_1 , ε_2 e ε_3 , pelo uso da equação (8), e equação (6)

$$\varepsilon_x = d - r, \quad (9)$$

$$\varepsilon_y = d + r.$$

4- RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os sensores de Bragg foram embebidos entre camadas de CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic) produzindo uma roseta extensométrica óptica rectangular. Neste caso os comprimentos de onda utilizados nos sensores foram: $\lambda_{B1}=1528\text{nm}$ (FBG₁), $\lambda_{B2}=1539\text{nm}$, (FBG₂) e $\lambda_{B3}=1552\text{nm}$ (FBG₃). Os três sensores foram colocados a 0°, 90° e 45° uns dos outros e embebidos entre duas camadas de 0°. A configuração do laminado é de $[90/0]_{(s)}$ com dimensões de $150 \times 70 \times 0.33 \text{ mm}^3$, dando um total de espessura de 1.33 mm, tendo sido curada a 100 °C durante uma hora com uma pressão de $0.8 \times 10^5 \text{ Pa}$.

Nestas medições foram realizadas à temperatura constante (20 °C), no entanto a roseta pode medir a temperatura através da medição das deformações [3]. As experiências foram realizadas através da instrumentação a uma placa de betão polimérico $600 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$ usando uma ISTRON (mod. 4208). A placa foi sujeita a um teste de flexão com 500 mm entre os pontos de apoio. A placa foi deflectida a 0° do sensor FBG₁. Na Figura 2 podemos observar as variações de comprimentos de onda em função da carga aplicada.

Podemos observar na Figura 3 a deformação ε_x e ε_y calculada a partir das deformações dos sensores ópticos. A figura mostra que $\varepsilon_1 = \varepsilon_x$ e $\varepsilon_3 = \varepsilon_y$ pois ε_1 e ε_3 estão orientados segundo as coordenadas X-Y.

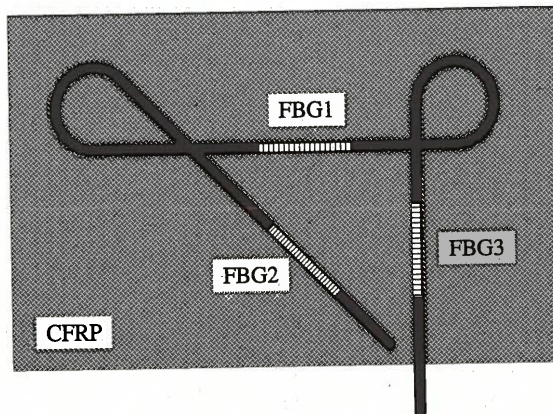


Fig. 1. Esquema da roseta óptica.

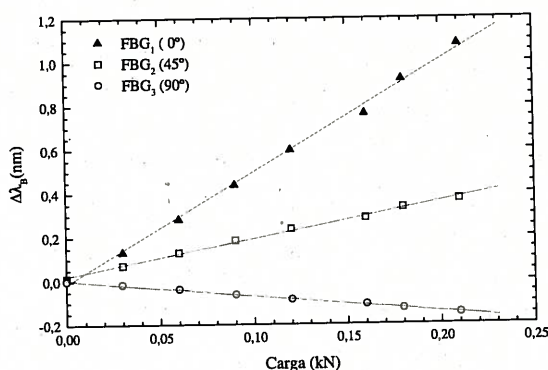


Fig. 2. Evolução dos comprimentos de onda em função da carga.

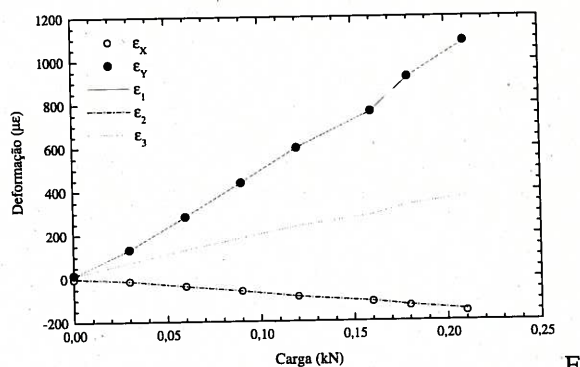


Fig. 3.- Evolução experimental de ε_x , ε_y , ε_1 , ε_2 e ε_3 .

5 - CONCLUSÕES

A roseta extensométrica óptica baseada em sensores de Bragg em fibra óptica foi projectada, produzida e testada. Os sensores de Bragg apresentaram um bom

desempenho, constituindo uma alternativa à utilização de extensómetros eléctricos convencionais. Estas placas criam facilidades na monitorização em tempo real, podendo também serem multiplexadas espacialmente. As aplicações destas placas são sobretudo para protecção, reabilitação e monitorização de estruturas para engenharias civis.

REFERÊNCIAS

[1] Udd, E., 1988. Embedded Sensor make structures Smart, *Laser Focus World*, 138.

- [2] Kersey, A.D., Davis, H.J. Patrick, M.A., LeBlanc, K.P. Koo, M., Askins, C.G., Putnam, M.A., and Friebele, E.J., 1997. Fiber Grating Sensors, *J. Lightwave Technol.* vol. 15, 1442-1463.
- [3] Morey, W.W., Meltz, G., and Glenn, W.H. "Fibre optic Bragg grating sensors", in *Fiber Optic and Laser Sensors VII*, Proc. SPIE 1169, Boston, USA, 98-107, 1989.
- [4] Krishan K. Chawla "Composite Materials Science and Engineering", 2 Edition, Sringer, 1998.
- [5] Xu, M.G., Reekie, L., Chow, Y.T., and Dakin, J.P. "Optical in-fibre grating high pressure sensor", *Electron. Lett.* 29, 398-399, 1993.
- [6] Kersey, A.D., and Marrone, M.J. "Fibre Bragg high-magnetic-field probe", in *Proc. 10th International Conference On Optical Fiber Sensors*, Glasgow, UK, 53-56, 1994.
- [7] Melle, S.M., Liu, K., and Measures R.M. "Practical fiber-optic Bragg grating strain gauge system", *Appl. Opt.* 32, 3601-3609, 1993.