

APLICAÇÃO DE SENSORES EM FIBRA ÓPTICA EMBEBIDOS PARA A MONITORIZAÇÃO DA SAÚDE DE ESTRUTURAS COMPÓSITAS

R. de Oliveira¹, C.A. Ramos², O. Frazão³, A. Torres Marques⁴

¹Investigador INEGI, ²Assistente ISEP, ³Investigador INESC-Porto, ⁴Professor Catedrático DEMEGI, FEUP

RESUMO

Neste estudo são propostos dois procedimentos diferentes para a monitorização da saúde de materiais compósitos a partir da medida da deformação e da emissão acústica. Dois sistemas baseados em sensores em fibras ópticas foram desenvolvidos usando uma rede de Bragg em fibra óptica e um interferómetro de Fabry-Pérot para a detecção da deformação e da emissão acústica. Os sensores foram embebidos numa placa em material compósito e fornecem informação em tempo real sobre a integridade do material “anfitrião”.

1- INTRODUÇÃO

Com o forte crescimento das indústrias optoelectrónica e das comunicações ópticas, a evolução da tecnologia das fibras ópticas tem tido um desenvolvimento que permite o constante progresso nos sensores em fibra óptica.

Esse desenvolvimento, em associação com os avanços nos materiais compósitos, abriu um novo campo para as estruturas inteligentes. O fácil processamento dos materiais compósitos permite o bom embebedimento dos sensores em fibra óptica no material durante o fabrico. As estruturas assim obtidas são capazes de sentir alterações, de as interpretar e de reagir às mesmas, por exemplo, usando actuadores.

Os sensores em fibra óptica são atractivos por oferecerem uma série de vantagens em comparação com os sensores eléctricos convencionais [Dakin et al. (1988), Udd (1995), Krohn (2000)]. Tendo como principais propriedades as das fibras ópticas, tais como transmissão com baixas perdas, imunidade a interferências electromagnéticas, baixo peso, pequenas dimensões e isolamento eléctrico.

Pelo facto de aguentarem altas temperaturas, podem também operar em diferentes meios químicos e aquosos permitindo medições em áreas não acessíveis de um outro modo. Ao embeber sensores em fibra óptica em materiais compósitos, é possível melhorar o processo de fabrico, dado que se podem monitorizar parâmetros como a temperatura, a pressão, a deformação, o grau de cura, a viscosidade e o conteúdo químico [Udd (1995)]. Os sensores podem, também, ser aplicados na avaliação da integridade de uma estrutura em serviço, tal como aqui se apresenta.

Diferentes sensores em fibra óptica foram utilizados com sucesso na avaliação de dano em materiais compósitos [Le Blanc et al. (1995), Zhou et al. (2002)].

Os sensores em fibra óptica são classificados de acordo com os parâmetros da luz a ser modulados (intensidade, fase ou comprimentos de onda) [Krohn (2000)]

Dois tipos de sensores evidenciaram-se ao demonstrarem ser mais apropriados para aplicações em materiais compósitos inteligentes. Um deles é o interferómetro extrín-

seco de Fabry-Pérot e o outro as redes de Bragg em fibra óptica [Measures (1995)].

Os sensores de Bragg (FBG) embebidos em material compósito têm demonstrado grande potencial na medição simultânea de deformações e temperatura [Frazão et al. (2000), Measures (1995)]. Todavia, o embebedimento do sensor FBG no material compósito ainda requer otimização. A sua presença no material “anfitrião” induz alterações do campo da tensão na sua vizinhança. Uma calibração é, então, requerida afim de estabelecer um relacionamento entre a deformação no “anfitrião” e a deformação medida pelo sensor FBG.

Os interferómetros extrínsecos de Fabry-Pérot em fibra óptica (EFPI) são de maior sensibilidade, particularmente aos fenómenos transitórios. Mas, ao contrário dos sensores FBG, que dão uma medição absoluta, eles requerem uma desmodulação. Os sensores EFPI têm sido utilizados com sucesso para a medição de deformação [Liu et al. (1998)] e a detecção de emissão acústica (EA) [Claus et al. (1995), Le Blanc et al. (1995), Leng et al. (2002), Read et al. (2002)]. As dificuldades da sua utilização residem na desmodulação que requer metodologias implicando elevados custos (lasers, etc.).

Este artigo apresenta a elaboração de dois sistemas baseados em sensores em fibra óptica para a monitorização da saúde de estruturas em materiais compósitos reforçados com fibra a partir da monitorização da deformação e da EA. Estes sistemas foram aplicados no caso de um laminado em material compósito submetido a um carregamento dinâmico.

2 – SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

As fibras ópticas são guias de ondas cilíndricas concebidos em sílica. Consistem num núcleo rodeado por uma bainha concêntrica, com índices de refração diferentes, garantindo a propagação da luz.

As redes de difracção de Bragg são constituídas por uma fibra óptica com modulação periódica do índice de refração

do núcleo ao longo de alguns milímetros. As redes de difracção são escritas nas fibras, pela exposição a um padrão de interferência de uma intensa radiação a luz ultravioleta na região espectral dos 248 nm [Measures (1995)]. Quando iluminado por uma fonte de luz de espectro largo, o espectro de luz reflectida pelo FBG consiste num pico de luz muito estreito (figura 1).

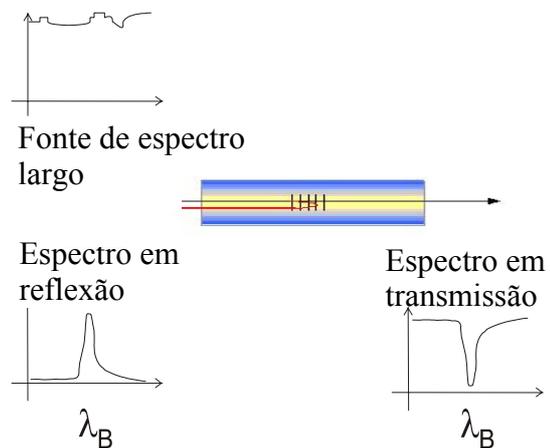


Fig 1 – Rede de Bragg

O comprimento de onda central dessa banda, i.e. o comprimento de onda de Bragg λ_B , é relacionado com o índice de refração efectivo do núcleo da fibra, n_0 , e o período da rede de difracção, Λ , pela relação:

$$\lambda_B = 2n_0\Lambda_B \quad (1)$$

Os sensores de Bragg são sensores à modulação de comprimento de onda. As redes são simples elementos intrínsecos, que fazem uma medição absoluta da perturbação física sentida. O seu princípio de operação básica é de monitorizar a variação do comprimento de onda associada com a condição de ressonância de Bragg. Essa variação do comprimento de onda é independente da intensidade da fonte de luz. As características do sensor FBG justificam que é o candidato favorito para medições de deformações e de temperatura. Para uma variação de deformação, $\Delta\varepsilon$, a variação do comprimento de onda é obtida pela expressão.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{n_0} \frac{\partial n_0}{\partial \varepsilon} \right) \Delta\varepsilon = \lambda_B (1 - p_e) \Delta\varepsilon \quad (2)$$

onde p_e é o coeficiente fotoelástico da fibra. No caso de fibras de sílica, a sensibilidade do sensor FBG é de $\sim 1.15 \text{ pm}\mu\epsilon^{-1}$, para λ_B a 1555 nm [Morey et al. (1989)]. Uma das limitações significativas do sensor FBG reside na sua dual sensibilidade à temperatura e à deformação, o que requer um controlo dos dois parâmetros usando técnicas para discriminação das duas.

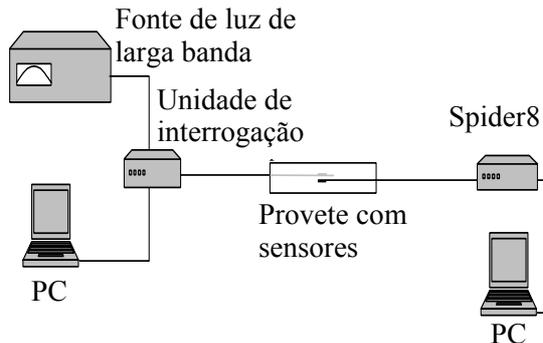


Fig 2 – Sistema óptico

O sistema óptico usado para a monitorização em tempo real consistiu numa fonte óptica de banda larga de érbio (Photonics FIBREWHITE) para iluminar os sensores FBG, um analisador de espectro óptico (ANDO AQ6330) para ver as variações do comprimento de onda de Bragg, um sistema AC de interrogação dos sensores de Bragg, e um computador com um sistema de aquisição de dados (LabView™) para poder observar com flexibilidade os dados, processar, e armazenar toda a informação observada. Um sensor de deformação eléctrico foi usado para a comparação dos valores da deformação medidos pelo sensor FBG. Este foi apenas montado na superfície do material, acima da posição do sensor FBG. O sensor eléctrico foi conectado a um sistema de aquisição de dados Spider8 de HBM® ligado a um computador com o software de Catman 3.1™

Na figura 3 é representado o espectro óptico do FBG embebido, observado pelo analisador de espectro. A qualidade do embebimento foi verificada pela constatação da não mudança do espectro após embebimento.

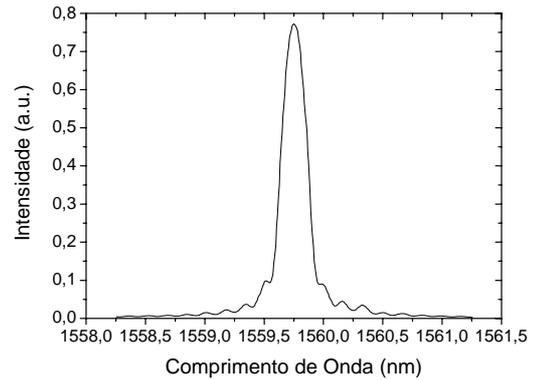


Fig 3 – Espectro óptico do FBG

3 – INTERFERÓMETRO EXTRÍNSECOS DE FABRY-PÉROT EM FIBRA ÓPTICA

Um EFPI de baixa *finesse* (figura 4) é baseado na interferência de duas ondas electromagnéticas e é basicamente constituído por dois planos paralelos separados

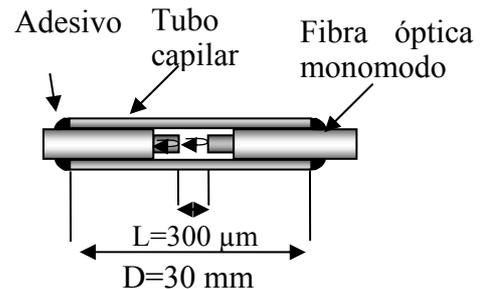


Fig 4 – EFPI em fibra óptica

por uma distância L . Os espelhos paralelos são alinhados com a sua normal na direcção da propagação do plano de onda da luz. Os planos reflectores consistem em extremidades de fibras ópticas monomodo cortadas a 90° , que fornecem uma reflexão de Fresnel de 4% da luz na interface ar/sílica. O alinhamento das fibras ópticas foi garantido por um tubo capilar de sílica com um diâmetro exterior ligeiramente superior ao da fibra óptica em torno de $250 \mu\text{m}$. As fibras ópticas são coladas às extremidades

No caso de EFPI de baixa *finesse*, o sinal de saída é quase sinusoidal (figura 5). A intensidade da luz reflectida pode ser aproximada pela expressão

$$I = 1 - \cos \delta \quad (3)$$

onde δ é a fase.

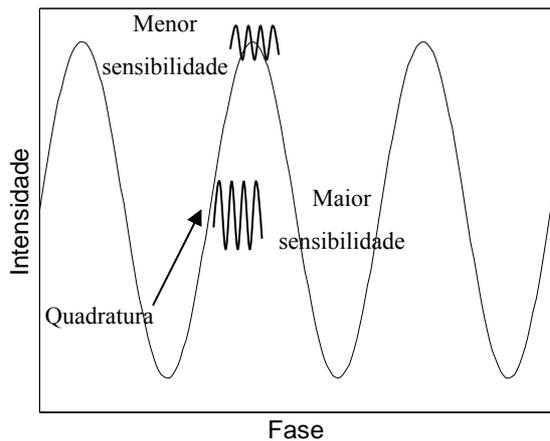


Fig 5 – Função de transferência do EFPI

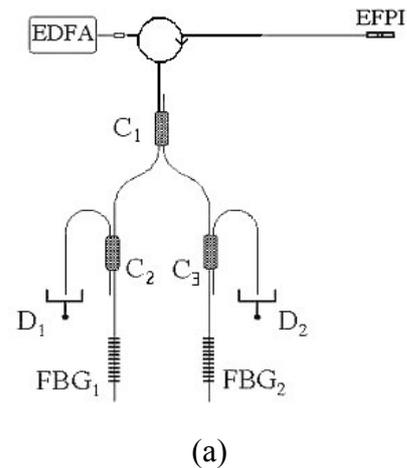
As ondas elásticas de emissão acústica ao propagarem-se no material “anfitrião” produzem pequenas variações da fase. Ao medir pequenas variações da fase é desejável trabalhar ao longo da região linear da curva de resposta (figura 5), isto é a região entre os picos e os vales, pois dá maiores valores da mudança da intensidade reflectida para uma variação da fase da luz dada. Na quadratura, a relação entre a variação da fase e a intensidade reflectida é linear.

É essencial manter o ponto de operação na quadratura para ter a máxima sensibilidade. Diferentes técnicas foram desenvolvidas para estabilizar a cavidade interferométrica [Read et al. (2002), Kim et al. (2004)], por exemplo, o uso de moduladores de frequência ou de fase para a estabilização activa pelo ajuste da frequência da fonte laser, ou a compensação da fase usando dispositivos piezoeléctricos.

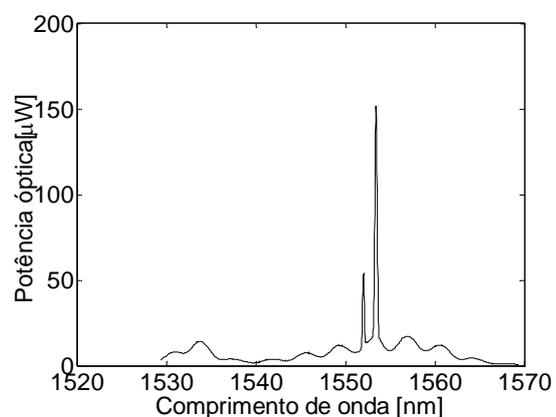
Utilizando dois sinais em quadratura de fase é possível estabilizar a sensibilidade de leitura do sensor interferométrico.

A capacidade dos sensores FBG a seleccionar uma banda espectral, quando iluminados por uma fonte de espectro largo, foi utilizada para recuperar a fase. Foi então possível obter, a partir de dois comprimentos de onda, dois sinais em quadratura de fase. A montagem experimental está representada na figura 6 (a).

Na figura 6 (b) está representado o espectro óptico medido, por um analisador de espectro óptico, em C1. Essa figura é obtida permitindo à luz ser reflectida nas



(a)



(b)

Fig 6 – (a) Montagem experimental para a interrogação do EFPI; (b) espectro óptico da luz reflectida pela EFPI e os dois FBG

extremidades das fibras que contêm os sensores FBG 1 e 2. A luz reflectida pelos dois sensores FBG (os dois picos) é convertida em sinais eléctricos através de fotodetectores (JDS Uniphase) com largura de banda de 100 kHz (D1 e D2).

Os dois FBG reflectem uma faixa estreita da luz. Essas faixas são centradas num comprimento de onda, isto é, comprimento de onda de Bragg (equação 1). Os comprimentos de onda de Bragg são escolhidos de maneira a ter os dois sinais em quadratura da fase e de maneira a operar-se ao longo da região linear da curva de resposta.

A fase, δ , é obtida a partir da equação [de Oliveira et al. (2004)]:

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{\nu_2 - \nu_2}{\nu_1 - \nu_1} \right) \quad (4)$$

sendo $V_{1,2}$ voltagens constantes dependentes da potência óptica e do ganho do detector, v_1 e v_2 as tensões de saída aos fotodíodos.

Os sinais foram digitalizados por um osciloscópio da série de Tektronix TS200 controlado por LabVIEW™ e transferido a um computador por uma interface GPIB (IEEE488.2).

O comprimento da cavidade, L , pode ser obtido a partir da variação do comprimento da fase, $\Delta\delta$, através da expressão:

$$L = \frac{\Delta\delta}{4\pi n \left(\frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \right)} \quad (5)$$

sendo λ_1 e λ_2 escolhidos de tal modo que $\Delta\delta = \pi/2$.

O comprimento da cavidade, L , varia quando o material é submetido a deformações mecânicas e térmicas. A variação do comprimento, ΔL , é obtida através da equação:

$$\Delta L = L\varepsilon + A\Delta T \quad (6)$$

sendo ΔT a variação da temperatura e, A , a variação de L para uma variação de temperatura de um grau [J.S. Leng e A. Asundi (2002)]. $A = L(\alpha_t - \alpha_{fo})$, sendo α_t e α_{fo} os coeficientes de expansão térmica do tubo capilar e da fibra óptica respectivamente. Esses são de valor aproximadamente idênticos. Desse modo o sensor EFPI é insensível a temperatura [Liu et al. (1999)].

A deformação medida pelo sensor EFPI é, então, calculada através da equação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{D} \quad (7)$$

sendo ΔL a variação do comprimento da cavidade e D o comprimento de referência.

4 - MONITORIZAÇÃO DA SAÚDE A PARTIR DA MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

4.1- Resultados experimentais

Os sensores em fibra óptica foram embebidos num laminado de fibra de carbono/epóxido. A placa de material

compósito foi fabricada em autoclave a partir de camadas de pré-impregnado. As camadas exteriores foram feitas de *twill* sendo as camadas internas feitas de tecido unidireccional. Os sensores foram embebidos, no plano médio, perpendicularmente à direcção de carregamento, paralelos à direcção dos reforços das camadas adjacentes (figura 7).

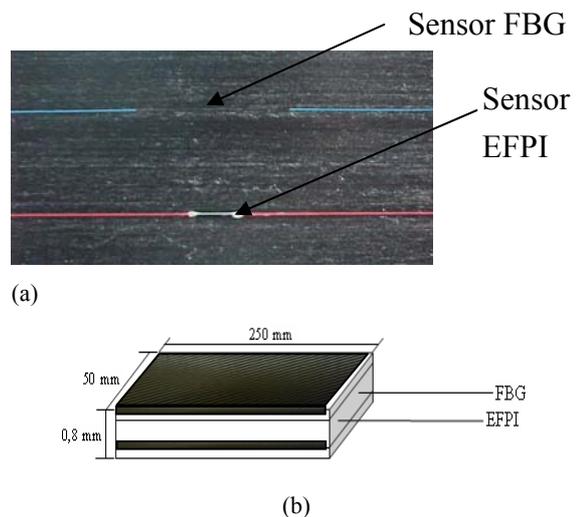


Fig 7 – (a) Sensores FBG e EFPI e (b) posicionamento dos sensores na placa compósita

O provete foi solicitado por flexão, em quatro pontos, em modo dinâmico. Uma carga, F , de 25 N foi aplicada nos dois suportes numa frequência de 10 Hz. O deslocamento máximo imposto no centro do comprimento do provete foi de 2 mm. A montagem experimental está representada na figura 8.

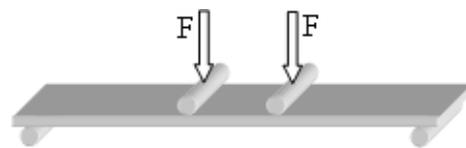


Fig 8 – Montagem de flexão quatro pontos

O provete foi solicitado durante duas horas. Somente são mostrados, para visualização, os resultados ao longo de um segundo de teste. A força aplicada à placa compósita é representada na figura 9, assim como a resposta do sensor FBG, que demonstrou ser perfeitamente ajustada à solicitação mecânica imposta.

A resposta do sensor FBG foi comparada à resposta do extensómetro eléctrico monta-

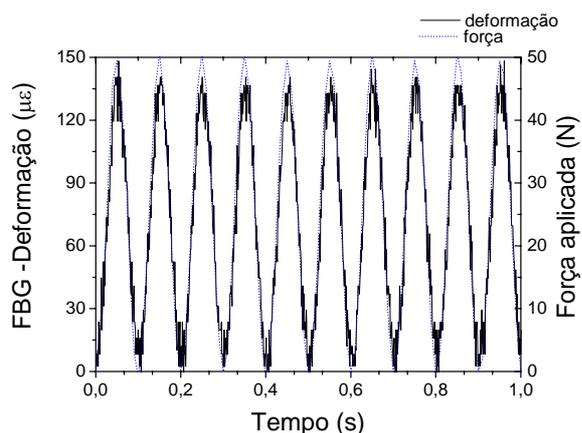


Fig 9 – Resposta do sensor FBG e força aplicada à placa

do na superfície (figura 10). Exibem similares tendências, sendo as deformações máximas registadas pelos dois sensores quase idênticas.

A resposta do sensor EFPI surgiu com menos ruído de que a resposta do sensor FBG (figura 11). No entanto, a deformação ainda deve ser calculada. Nas figuras 11 e 12 estão representadas as respostas de um dos fotodetectores. A variação de fase é obtida a partir das respostas dos dois fotodetectores usando a equação 4 sendo a deformação derivada das equações 5 e 6.

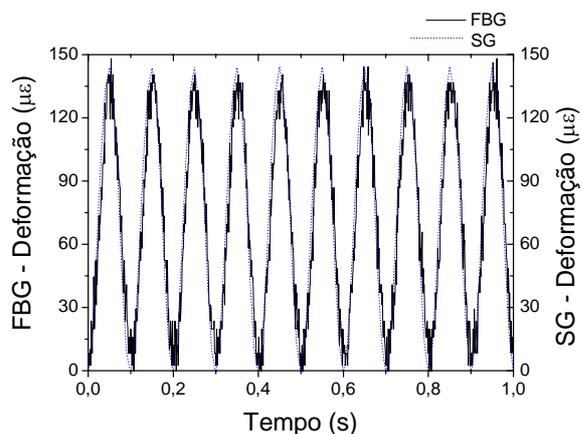


Fig 10 – Respostas do sensor FBG e do extensômetro eléctrico

4.2- Discussão

Neste estudo, um cuidado especial foi dedicado ao embebimento dos sensores em fibra óptica no material compósito. O bom embebimento garantiu uma medição eficiente da deformação, sendo os valores

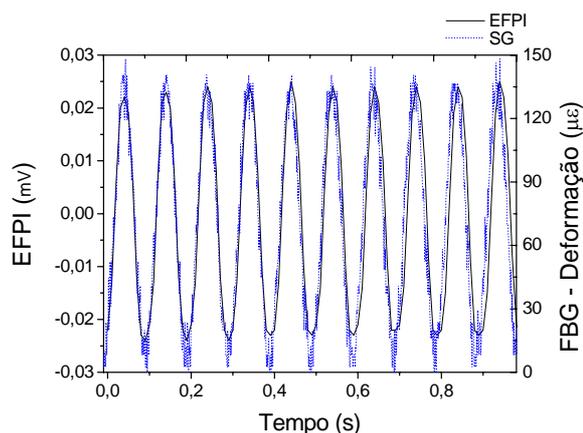


Fig 11 – Respostas do sensor EFPI e do sensor FBG

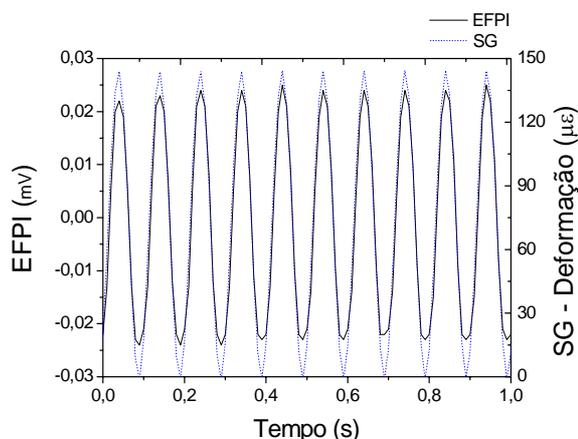


Fig 12 – Respostas do sensor EFPI (em mV) e do extensômetro eléctrico

fornecidos pelo sensor FBG muito próximos dos valores obtidos pelo extensômetro eléctrico. Apesar da sua mais elevada sensibilidade, o processo da desmodulação do EFPI torna este sensor menos interessante para a medição da deformação em baixas frequências. O dano do material anfitrião pode ser monitorizado através do aumento da deformação ao longo do teste de flexão dinâmico.

5 - MONITORIZAÇÃO DA SAÚDE A PARTIR DA EMISSÃO ACÚSTICA

5.1- Resultados experimentais

Ao solicitar o material, este começa por se deformar elasticamente. Um armazenamento de energia elástica da deformação é associado com esta deformação. Parte da energia de deformação elástica é libertada rapidamente sob a forma de ondas elásticas (EA), na redistribuição local da tensão, tal

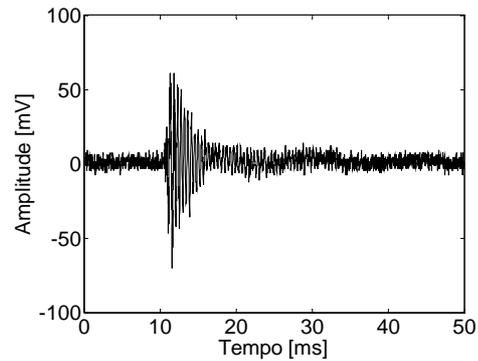
como ocorre na aparição de fissuras. A análise das ondas de EA permite monitorizar, em contínuo, a integridade de estruturas/componentes durante toda a sua vida útil, e controlar, em tempo real, a estrutura inteira com poucos sensores. Isto permite detectar o início do dano e monitorizar a sua propagação, bem como localizá-lo. O uso de ferramentas de processamento da informação, tal como as redes neuronais permitirá uma mais rápida e eficiente identificação dos mecanismos de danos fonte dos sinais de EA [de Oliveira et al. (2005)].

O sensor EFPI foi escolhido para a detecção das ondas de EA por ser mais sensível aos fenómenos transitórios do que o sensor FBG. O processo da desmodulação utilizado foi o mesmo que o usado para a medição da deformação. Para a conversão das ondas de EA, cujo conteúdo frequencial está contido na banda de 50 kHz à 1 MHz foram necessários fotodetectores de grande largura de banda de frequência assim como um rápido conversor analógico/digital com elevada escala dinâmica e memória de armazenamento suficiente.

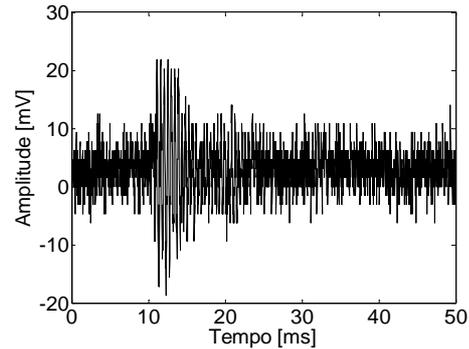
A capacidade do sistema em fibra óptica proposto para a detecção de ondas de EA foi verificada para ondas simuladas de acordo com o método de Hsu-Nielsen. Para isso, usou-se a fractura de minas de lápis, que causam eventos monopolares e que ocorrem enquanto a carga é libertada na superfície do material. A metodologia aplicada está descrita na norma ASTM E976.

Na figura 13 está representada a resposta do sensor em fibra óptica a uma rotura da mina de lápis na superfície do material observada em ambos os fotodetectores. Nota-se um ruído importante nos sinais de EA. Parte deste ruído pode ser removido a partir da equação 4

O material foi também submetido a um impacto, sendo a resposta do sensor EFPI observada à saída de um dos dois fotodetectores (figura 15).



(a)



(b)

Fig 13 – Resposta do sensor EFPI a uma rotura de mina observada nos dois fotodetectores

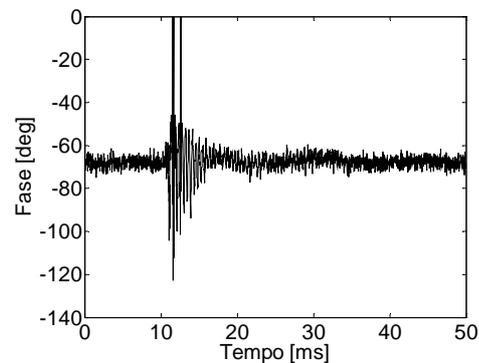


Fig 14 – Variação da fase devido à onda de EA

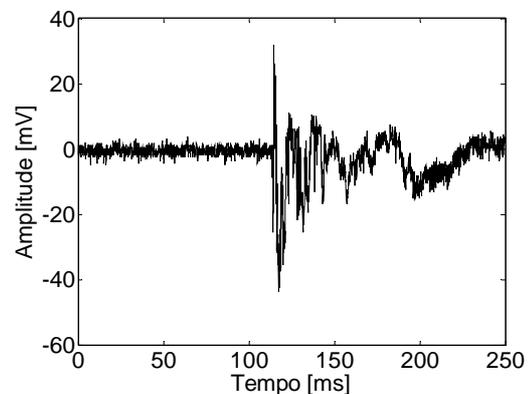


Fig 15 – Resposta do sensor EFPI a um impacto observada num dos fotodetectores

5.2- Discussão

O sensor EFPI em fibra óptica detectou com sucesso as ondas de AE. Esta configuração permite detectar o dano no material compósito pela detecção de EA. Entretanto, uma baixa relação sinal/ruído foi obtida para frequências elevadas de ondas de EA. O uso dos FBG como seleccionador espectral assim como o uso de uma fonte óptica de banda larga parece não ser a solução mais apropriada para detectar as ondas de EA. A potência óptica do sinal na entrada dos fotodetectores não é suficientemente importante, sendo perdida demasiada potência. Fotodetectores de elevado ganho são, então, necessários. Todavia, esses fotodetectores têm uma largura de banda de frequência demasiado limitada para as ondas de EA. Novas configurações estão a ser actualmente em estudo para superar esta limitação

6- CONCLUSÕES

Os sensores em fibra óptica foram usados pela sua facilidade em serem embebidos em materiais compósitos. Tais sensores são bons candidatos para a concepção de um sistema nervoso para materiais inteligentes, pois permitem a monitorização em contínuo da integridade do material “anfitrião”. Sistemas em fibra óptica foram desenvolvidos para detectar dano em tempo real. Isto foi feito usando sensores FBG aplicados para a medição de deformação sob solicitação dinâmica e sensores EFPI para detectar os eventos transitórios de EA. Esses sensores revelaram-se ser mais adaptados em condições diferentes, o sensor FBG sendo mais apropriado para medições de deformação dinâmica em baixas frequências. Esse sensor tem, além disso, a vantagem de poder ser multiplexado. É, assim, possível obter numa estrutura real, a partir de uma única fibra óptica, vários sensores que possam ser distribuídos ao longo da estrutura. A elevada sensibilidade do sensor EFPI faz dele o melhor candidato para detectar as ondas de EA. Neste estudo, foi proposto um sistema que permite detectar ondas de EA usando um sensor de baixa *finesse*. Tal sensor detectará cada

evento individual de dano. A interpretação dos sinais de EA requererá um procedimento para tratar múltiplos sinais, de forma o mais independente possível da decisão humana. Isto pode ser feito usando as redes neuronais, que permitem processar, em simultâneo e em paralelo, uma grande quantidade de dados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia o suporte financeiro no âmbito da bolsa SFRH/BPD/17290/2004, e dos projectos POCTI/EME/48574/2002 e POCTI/EME/62147/2004. O autor C.A. Ramos agradece ainda ao programa PRODEP III, Medida 5, Acção 5.3.

REFERÊNCIAS

- Dakin, J., Culshaw B., Optical fibre sensors: Principles and components, Artech House, ISBN 0-89006-317-6, 1988
- Udd, E., Fibre Optic Smart Structure Technology, In Fibre Optic Smart Structures, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-55448-0, pag. 5-21, 1995
- Krohn, D.A., Fibre Optic Sensors: Fundamentals and Applications, Instrument Society of America, third edition, ISBN 1-55617-714-3, 2000
- Le Blanc, M., Measures, R.M., Fibre Optic Damage Assessment, In Fibre Optic Smart Structures, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-55448-0, pag. 518-613, 1995
- Zhou, G., Sim, L.M., Damage detection and assessment in fibre-reinforced composite structures with embedded fibre optic sensors-review, Smart Material and Structures, Vo. 11, pag. 925-939, 2002
- Measures, R., Fiber Optic Strain Sensing, Smart Structures, E. Udd Ed., ISBN 0-471-55448-0, pag. 171-247, 1995
- Frazão, O., Correia, N., Novo, C., Vieira, A., Costa, A.N., Araújo, F., Marques, A.T., Optical Fibre Embedded in a Composite Laminate with Applications to Sensing, *Bianisotropics*, Lisboa, 2000
- Liu, T., Wu, M., Rao, Y., Jackson, D.A., Fernando, G.F., A multiplexed optical fibre-based extrinsic Fabry-Perot sensor system for in-situ strain monitoring in composites,

- Smart Matererials and Structures, Vo. 7, pag. 550-556, 1998
- Claus, R.O., Sudarshanam, V.S., Murphy, K.A.; Interferometric optical fiber sensors for ultrasonic wave measurement, Smart Structures, E. Udd Ed., ISBN 0-471-55448-0, pag. 563-580, 1995
- Leng, J.S., Asundi, A., Non-destructive evaluation of smart materials by using extrinsic Fabry-Perot interferometric and fiber Bragg grating sensors, NDT&E International, Vo. 35, pag. 273-276, 2002
- Read, I., Foote, P., Murray, S., Optical fibre acoustic emission sensor for damage detection in carbon fibre composite structures, Measurement Science and Technology, Vo. 13, pag. N5-N9, 2002
- Morey, A.W., Meltz, G, Glenn, W., Fibre optic bragg grating sensors, Fiber Optic and Lasers Sensors VII, Vo. 1169, pag. 98-107, 1989
- Kim, D.-H., Koo, B.-Y., Kim, C.-G., Hong, C.-S., Damage detection of composite structures using a stabilized extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor system, Smart Mater. Struct., Vo. 13, pag. 593-598 2004
- de Oliveira, R., Frazão, O., Santos, J.L., Marques, A.T., Optic fibre sensor for real time damage detection in smart composite, Computers & Structures, Vo. 82, pag. 1315-1321, 2004
- Leng, J.S., Asundi, A., Real-time cure monitoring of smart composite materials using extrinsic Fabry-Perot interferometer and fibre Bragg grating sensors, Smart Materials and Structures, Vo. 11, pag. 249-255, 2002
- Liu, T., Brooks, D., Badcock, R., Ralph, B., Fernando, G.F., A multi-mode extrinsic Fabry-Perot interferometer strain sensor, Smart Materials and Structures, Vo. 6, pag. 464-469, 1999
- de Oliveira, R., Ramos, C.A., Marques, and A.T., Health monitoring of FRP using acoustic emission and artificial neural networks, II ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, Lisbon, 18-21 July 2005