

SENSORES BRAGG EM FIBRA ÓPTICA PARA A DETERMINAÇÃO DE EXTENSÕES EM APLICAÇÕES DA BIOMECÂNICA

A. Vieira¹, O. Frazão², C. Novo³, J. A. Simões¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Aveiro

² Instituto de Engenharia Electrónica e Sistemas de Comunicação, Universidade do Porto,

³ Instituto de Engenharia e Gestão Industrial, Universidade do Porto

RESUMO

Neste artigo descreve-se a utilização de sensores de Bragg na determinação de extensões em aplicações da Biomecânica. Os sensores de Bragg em fibra óptica são hoje bastante utilizados para determinar deformações em peças estruturais de Engenharia, estando a metodologia técnica perfeitamente dominada. O estudo aqui descrito teve como objectivo aferir a aplicabilidade desta técnica experimental, utilizando-se um fémur sintético com extensómetros e sensores de Bragg colados lado a lado sendo as extensões medidas por ambas as técnicas. Aplicou-se uma carga aleatória ao fémur intacto e mediram-se as extensões. Os resultados mostraram uma boa concordância entre as extensões medidas por ambas as técnicas. Esta técnica, pela sua elevada resolução e facilidade de utilização, poderá a curto prazo substituir os meios tradicionais de medição de extensões, em particular na área da Biomecânica Experimental.

INTRODUÇÃO

Na Biomecânica Experimental, diferentes métodos de determinação de extensões podem ser aplicados: fotoelasticidade 2D e 3D, métodos ópticos e o mais frequentemente a extensometria. Relativamente a esta última técnica, o seu princípio físico de medição baseia-se na variação da resistência dum elemento condutor, provocada pela alteração do seu comprimento e secção quando deformado. O elemento condutor disposto numa determinada direcção, ao alongar-se diminui a secção, aumentando assim a resistência à passagem de electrões. Este processo de medida implica a colagem do extensómetro numa superfície onde se pretende medir a extensão. É um procedimento de certa forma moroso, em particular se for necessário fazer a colagem de

vários extensómetros. O método tem sido extensivamente validado para várias aplicações de medição das extensões, geralmente em superfícies de materiais rígidos.

Uma das novas aplicações das redes Bragg em fibra óptica (FBG – *Fibre Bragg Grating*) é a utilização como elemento sensor em estruturas inteligentes construídas em materiais compósitos essencialmente para medição de extensões unidireccionais (direcção da fibra óptica) [1].

A fotosensibilidade foi descoberta em 1978 por Hill et. al. [2] enquanto estudavam os efeitos não lineares da transmissão de luz através das fibras ópticas normalizadas. Durante as experiências com um laser iónico de Argon ($\lambda=488$ nm) estes investigadores observaram a crescente atenuação da luz transmitida através do

núcleo da fibra óptica. Ao investigar a origem desta atenuação, observaram que em simultâneo aumentava a intensidade da luz reflectida durante uma exposição prolongada. Experiências subsequentes demonstraram que a reflexão de luz se deve a uma modulação periódica fotoinduzida do índice refractivo do núcleo ao longo de toda a fibra. A alteração do índice refractivo fotoinduzido no núcleo da fibra ocorre devido à absorção de luz. Contudo, este método de alterar internamente o índice refractivo permite fracas modulações que funcionam como filtros reflectores para o comprimento de onda da luz utilizado ($\lambda_B = 488 \text{ nm}$). Pequenas variações no comprimento de onda de ressonância podem ser obtidas tracionando ou aquecendo a fibra durante a exposição. Por outro lado, os sensores escritos internamente desta forma não são localizados.

A modulação periódica do índice refractivo do núcleo da fibra óptica funciona como um espelho para o comprimento de onda que satisfaz a condição Bragg. Se um sensor FBG for iluminado com uma luz de espectro largo, as suas propriedades refractivas promovem a reflexão de um espectro estreito com uma largura de banda. O período da estrutura (*grating*) e o seu comprimento, assim como o grau de alteração do índice refractivo e a sua definição, determinam a maior ou menor reflectividade de um espectro mais ou menos estreito.

O comprimento de onda central do espectro reflectido (ressonância) pode ser determinado pela relação de Bragg: $\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda$, onde λ_B é o comprimento de onda central, n_{eff} é o índice refractivo efectivo do núcleo da fibra, e Λ é o período da modulação do índice. O comprimento de onda de ressonância do sensor Bragg varia segundo as alterações de temperatura e deformação na fibra, devido à variação do período de modulação do índice $\Delta\Lambda$. Para uma variação da temperatura ΔT , a correspondente variação do comprimento de onda de ressonância é calculada por:

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

onde α representa o coeficiente de expansão térmica da fibra e ξ é o coeficiente termo-óptico da fibra.

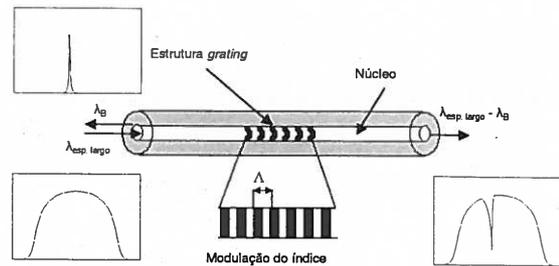


Fig 1 – Ilustração de uma estrutura *grating* uniforme com o período e o índice de modulação constantes.

Por outro lado, a variação do comprimento de onda, induzida por uma variação longitudinal da deformação $\Delta\epsilon$, é calculada por:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial \epsilon} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \epsilon} \right) \Delta\epsilon = \lambda_B (1 + p_e) \Delta\epsilon \quad (2)$$

onde p_e é o coeficiente fotoelástico da fibra.

A principal limitação dos sensores Bragg reside na sua dupla sensibilidade à temperatura e deformação. A separação dos sinais, correspondentes às variações da temperatura e da deformação, pode ser conseguida colocando dois sensores sujeitos à mesma variação de temperatura, sendo um deles protegido da deformação. No entanto, quando a medição é realizada num curto intervalo de tempo a temperatura ambiente pode ser considerada constante. Outras variáveis físicas, além da extensão, podem ser medidas utilizando a fotosensibilidade das fibras ópticas normalizadas, como por exemplo: pressão, caudal, vibração acústica, aceleração, campos eléctricos ou magnéticos, assim como alguns efeitos químicos.

Durante vários anos a fotosensibilidade das fibras ópticas não teve utilidade prática devido às suas limitações técnicas. Quase dez anos depois, Meltz et. al. [3] fabricou estruturas periódicas no núcleo de uma fibra óptica, ao expor lateralmente a fibra a dois feixes de luz UV iguais, que ao interceptarem formavam um padrão de interferência que é gravado no núcleo da fibra (figura 2).

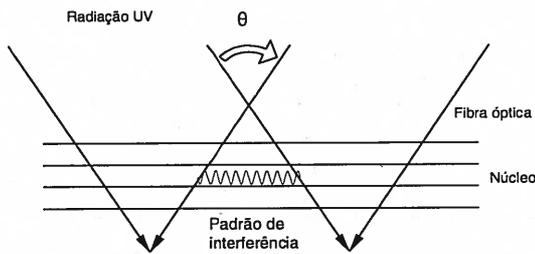


Fig 2 – Formação de uma estrutura *grating* fotoinduzida no núcleo de uma fibra óptica normalizada. Técnica interferométrica de escrita externa.

As zonas de elevada intensidade de luz provocam um aumento local do índice refractivo no núcleo fotossensível, enquanto as regiões sem luz não são afectadas. O período do padrão de interferência Λ varia segundo a variação do ângulo θ entre os feixes de luz que interferem:

$$\Lambda = n_{UV} \lambda_{UV} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3)$$

onde n_{UV} é o índice refractivo do núcleo para o comprimento de onda λ_{UV} do feixe de luz UV incidente.

Ainda não são muitos os métodos para escrever estruturas Bragg em fibras ópticas, mas pode referir-se a técnica interferométrica, a técnica de máscara de fase e a técnica ponto a ponto. As técnicas de escrita são limitadas pela estabilidade do feixe de luz, tanto espacial como temporal, necessária para construir estruturas periódicas microscópicas com elevada definição e contraste. As técnicas referidas para escrever externamente permitem produzir sensores Bragg localizados (poucos milímetros de comprimento) com qualquer comprimento de onda de ressonância, em função das variáveis do processo. A técnica utilizada neste trabalho emprega uma máscara de fase como elemento de difracção óptica, para modular espacialmente o feixe de luz UV. A máscara de fase é produzida a partir de uma placa de sílica fundida de alta qualidade.

A estrutura periódica, vista de perfil na figura 3, é gravada na máscara de fase por holografia ou por litografia. O perfil da estrutura é dimensionado para que quando sobre ela incide um feixe de luz UV, o feixe

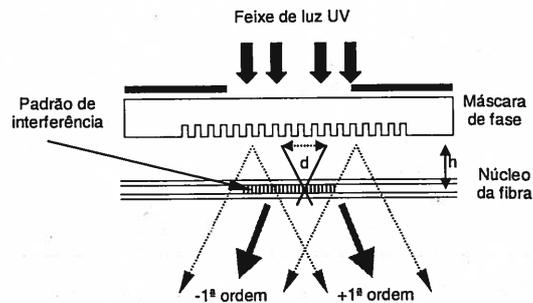


Fig 3 – Esquema da técnica de máscara de fase para foto-modelar o índice refractivo numa fibra óptica fotossensível.

refractado de ordem zero seja reduzido (tipicamente menor que 5% de potência transmitida), e os feixes positivos e negativos de primeira ordem sejam maximizados. O padrão de interferência é produzido pela interferência dos feixes difractados (positivo e negativo de primeira ordem).

A fotossensibilidade das fibras ópticas normalizadas (sílica e germânio) permite construir estruturas periódicas no núcleo da fibra óptica. Estas estruturas são obtidas pela alteração permanente do índice de refração, devido a alterações, a nível molecular, num padrão periódico ao longo da fibra. Vários modelos teóricos indicam os defeitos na estrutura molecular tetraédrica ideal do vidro, nomeadamente deficiências de oxigénio no germânio (defeito GeO), como os principais responsáveis pela fotossensibilidade das fibras ópticas [4]. Apesar das evidências experimentais de alguns dos modelos propostos, verificam-se também algumas incongruências nas previsões das alterações fotoinduzidas no índice de refração. Acredita-se actualmente que mais do que um processo determinam essa alteração, e portanto condicionam a dinâmica da formação das estruturas *grating*. O modelo do "color center", mais aceite pela comunidade, assume que as alterações fotoinduzidas do espectro de absorção do núcleo determinam a alteração do índice de refração do mesmo, segundo a relação Kramers-Kronig:

$$\epsilon_r(\lambda) = 1 + \int \frac{\epsilon_i(\lambda')}{\lambda' - \lambda} d\lambda' \quad (4)$$

que relaciona as partes real e imaginária da constante dieléctrica $\epsilon = \epsilon_p + i\epsilon_i = (n + ik)^2$, onde

n é o índice de refração e k é o índice de absorção. Esta relação surge da condição de casualidade para a resposta dielétrica, e demonstra como a alteração do índice de refração produzido na região infravermelha/visível do espectro é resultado da alteração do espectro de absorção do vidro na região ultravioleta. Neste modelo, proposto por Hand e Russel [7], a exposição UV produz alterações das propriedades materiais do vidro introduzindo novas transições electrónicas dos defeitos (*color centers*). Segundo este modelo, a fotosensibilidade deve-se à excitação electrónica local dos defeitos GeO provocada pela absorção de luz. O modelo da compactação sugere que a alteração do índice de refração é devida a alterações na densidade do vidro induzidas pela radiação. Enquanto o modelo da relaxação de tensões sugere que a mesma alteração do índice se deve ao relaxamento das tensões termoelásticas no núcleo da fibra. Segundo o efeito de *stress-óptico*, sabe-se que as tensões reduzem o índice de refração, e por isso, o relaxamento das tensões determina um aumento do índice de refração.

O processo de fabricação da estrutura periódica consiste na exposição da fibra óptica à luz UV de comprimento de onda 248nm, devido à elevada fotosensibilidade da fibra óptica normalizada para este comprimento de onda. Em 1989, Meltz et al. [3] demonstraram a ocorrência de fortes alterações do índice de refração quando as fibras ópticas normalizadas eram expostas à luz UV com comprimento de onda próximo daquele que corresponde ao pico de absorção de luz do defeito GeO (240-250 nm).

Na prática, a alteração do índice de refração fotoinduzida, Δn , é positiva e proporcional ao conteúdo de Ge e, por isso, proporcional à concentração de defeitos. Com as fibras ópticas normalizadas, utilizadas em telecomunicações, que contêm cerca de 3 mol%, obtêm-se $\Delta n \approx 3 \times 10^{-5}$. Lemaire et. al. [6] descreveram um método para aumentar a fotosensibilidade das fibras baseado na exposição desta a uma atmosfera de hidrogénio a elevada pressão (20-750 atm) e temperatura ambiente durante alguns dias. As fibras tratadas por este processo

exibem valores de Δn cerca de duas ordens de grandeza superiores, excedendo por vezes 0,01. Outro método para aumentar a fotosensibilidade, demonstrado por Bilo-deau et. al. [7], consiste em submeter a fibra a uma chama (hidrogénio-oxigénio) de temperatura superior a 1700°C. Este método permite valores de Δn ainda superiores (cerca de uma ordem de grandeza relativamente ao anterior) para uma banda em torno dos 240 nm, porem fragiliza a fibra. Por exemplo, ao fotoinduzir uma fibra com $\Delta n \approx 2 \times 10^{-4}$ obtêm-se uma reflectividade de 99% num sensor Bragg de 8 mm com uma largura de banda de $\approx 0,24$ nm. Geralmente, as ligeiras variações do comprimento de onda de ressonância são detectadas com maior exactidão para sensores de FBG de menor largura de banda. Como a largura de banda de um filtro/sensor FBG é inversamente proporcional ao seu comprimento, são necessários para aplicações sensoriais estruturas *grating* compridas de elevada reflectividade.

As redes de Bragg são considerados excelentes dispositivos sensores porque o valor medido está relacionado com o comprimento central do espectro reflectido. Assim, evitam-se problemas de flutuações da amplitude ou intensidade do sinal, que são comuns com outros tipos de sensores. Como cada sensor de Bragg reflecte um espectro estreito com um comprimento de onda central que depende das condições de produção, é possível numa fibra óptica inscrever uma série destas estruturas *grating*, cada uma com a sua localização e ressonância característica. Desta forma é possível dividir o espectro largo da luz que ilumina a fibra, em vários espectros estreitos, cada um relativo a um determinado sensor, sem interferência entre os vários espectros reflectidos. Esta configuração permite medir vários sensores de uma só fibra a partir da medição de apenas um sinal. O espectro reflectido é medido por um analisador de espectros enquanto o valor do comprimento de onda central é registado em ordem ao tempo. Com um interruptor óptico é possível iluminar várias fibras sequencialmente com a mesma fonte óptica e assim medir várias

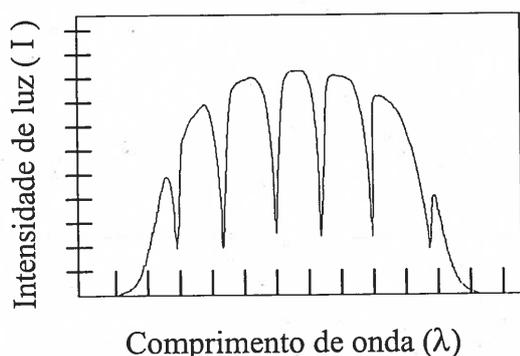


Fig 4 - Esquema do espectro de luz transmitida por uma fibra com várias ressonâncias características.

ressonâncias características em várias fibras. A figura 4 ilustra um espectro de luz transmitida por uma fibra com várias ressonâncias características.

Existem vários esquemas possíveis para detectar as variações na ressonância do sensor. Normalmente o sensor é iluminado por luz de espectro largo (gerada por exemplo por um diodo super luminescente-LED) e determina-se o comprimento de onda do pico do espectro da luz reflectida. A detecção de pequenas variações no comprimento de onda de ressonância do sensor Bragg, que corresponde a alterações no parâmetro medido, é desta forma importante. Em laboratório, utilizam-se analisadores de espectros de elevada precisão para determinar estas ligeiras variações. Os espectrómetros convencionais apresentam resoluções típicas de 0,05 nm, são de elevado custo e de leitura lenta. Em aplicações práticas, a detecção destas pequenas variações deverá ser realizada por instrumentação compacta e mais barata, baseada em filtros ópticos passa-banda, filtros ópticos passa-alto ou detecção interferométrica. Uma das técnicas mais atractivas de interrogação baseia-se na utilização de um filtro óptico sintonizável por elementos piezoeléctricos (figura 5a), como o filtro Fabry-Perot, para detectar o comprimento de onda do pico do espectro reflectido. Utilizando um filtro passa-alto é possível determinar as pequenas variações do comprimento de onda do pico, que são proporcionais à intensidade da luz (figura 5b).

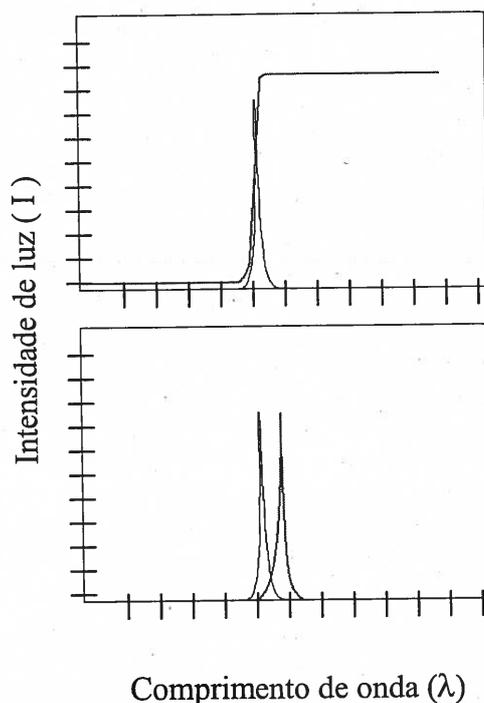


Fig 5 a) - Princípio do esquema de interrogação utilizando filtro passa-banda sintonizável; 5b) - Utilizando filtro passa-alto.

Uma característica interessante da fotosensibilidade nas fibras ópticas é a sua anisotropia. A reflectividade das estruturas periódicas depende da polarização do feixe de luz que ilumina a fibra, ou seja, a alteração fotoinduzida do índice de refração é birrefringente. O índice de refração medido com luz polarizada paralelamente à direcção de polarização do feixe de inscrição é ligeiramente superior ao medido com luz polarizada perpendicularmente. O comprimento de onda de ressonância depende do índice de refração, e consequentemente, as ressonâncias ocorrem para dois comprimentos de onda que satisfazem a condição de Bragg. No caso mais simples de polarização linear, os eixos da birrefringência fotoinduzida são paralelo e ortogonal à direcção de polarização. A direcção da birrefringência induzida no núcleo é determinada pela direcção do vector de polarização do feixe e pelas propriedades da fibra. As diferenças entre os comprimentos de onda de ressonância podem ser utilizadas para determinar a birrefringência. A origem da anisotropia do índice refractivo fotoinduzido no núcleo da fibra não foi

ainda completamente explicada. Um modelo físico geralmente aceita determina que a probabilidade de absorção de um fóton por um centro de cor depende da sua orientação microscópica local na estrutura molecular do vidro, relativamente à direcção de polarização da luz. Com este tipo de sensores e esquemas de interrogação poderá ser possível, num mesmo sensor, medir a deformação longitudinal e a compressão radial, ou até, fazer a compensação da temperatura sem recorrer a um segundo sensor.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste estudo foram medidas e comparadas as extensões provocadas em extensómetros e em sensores de Bragg. Para o efeito, foi utilizado um fémur compósito (*Pacific Research Labs, Vashon Island, WA, USA*). Este tipo de modelo femoral é uma réplica de um fémur de 480 mm de comprimento e 30 mm de diâmetro médio da diáfise. O osso compacto é constituído por um material compósito de fibra de vidro, sob a forma de tecido balanceado impregnado com resina de epóxido, com 5 mm de espessura média. O osso esponjoso é constituído por uma resina de poliuretano. Algumas das propriedades mecânicas destes modelos são semelhantes às de fémures *in vivo*. Por exemplo, o módulo de elasticidade é idêntico na direcção axial da diáfise do fémur, não se verificando o mesmo na direcção circunferencial. O módulo de elasticidade da resina de poliuretano é 7 a 15 vezes superior ao módulo de elasticidade do osso esponjoso.

O modelo femoral foi instrumentado com extensómetros do tipo CEA-06-125UN-350 (Measurements Group Inc.), com *gage factor* de 2,105. Foram colados vinte extensómetros, cinco em cada aspecto do fémur (medial, lateral, anterior e posterior), mas só quatro, dois no aspecto lateral e outros dois no aspecto medial, foram usados na comparação de resultados com os sensores de Bragg. As zonas de colagem dos extensómetros foram polidas com uma lixa fina, e desengorduradas posteriormente

com álcool etílico. A colagem dos extensómetros foi realizada com uma cola do tipo cianoacrilato (methyl-2-cyano-crylate). Simultaneamente, foi efectuada a colagem dos elementos de suporte de soldadura dos cabos destinados à transmissão de sinais eléctricos para o sistema de medição.

Ao lado dos extensómetros da parte lateral (L1 e L2) e da parte medial (M1 e M2), na região proximal do fémur, foram coladas duas fibras ópticas com dois sensores de Bragg (figura 6). Deste modo, os níveis de extensões esperados deveriam ser aproximadamente iguais. O fémur foi fixo numa base de poliéster, numa posição 10° em abdução e 9° em flexão, e colocado numa máquina de ensaios universal Instron® que lhe aplicou uma força compressiva vertical progressiva de velocidade constante até cerca de 2 kN.

O sistema usado para a monitorização dos sensores Bragg (FBG) encontra-se representado na figura 7. Este sistema inclui um equipamento de interrogação *Microoptics*, baseado num filtro sintonizável de Fabry-Perot referenciado a uma rede de Bragg interna e que permite uma resolução de 1pm e um computador para aquisição e registo dos dados. As extensões verificadas nos extensómetros foram registadas através de um sistema Spider 8 da HBM.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma fibra de sílica, a sensibilidade comprimento de onda/deformação é:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\varepsilon_z} = \lambda_B(1 - p_e) \quad (5)$$

onde p_e é o coeficiente fotoelástico da fibra

$$p_e = \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (6)$$

onde p_{11} e p_{12} são os componentes do tensor fotoelástico, n é o índice refractivo do núcleo, e ν é o coeficiente de Poisson. Para uma fibra óptica normalizada $p_{11}=0.113$, $p_{12}=0.252$, $\nu=0.16$ e $n=1.482$ [8].

Os sensores FBG1 ($\lambda_{B1} = 1530,84$ nm), FBG2 ($\lambda_{B2} = 1545,558$ nm), FBG3 ($\lambda_{B3} = 1549,99$ nm) e FBG4 ($\lambda_{B4} = 1543,579$ nm) foram sensíveis à variação de deformação.



Fig 6 – Pormenor do extensómetro e da fibra colados na superfície do fémur sintético.

As deformações dos quatro sensores FBG, calculadas segundo a equação 4, estão representados na figura 8, em conjunto com as deformações medidas pelos extensómetros. As diferenças entre os valores medidos pelos sensores FBG e pelos extensómetros correspondentes, devem-se principalmente a diferenças nas posições relativas entre o extensómetro e o sensor FBG correspondente e a variações do coeficiente fotoelástico da fibra (devido à espessura da camada de cola e/ou às variações normais da composição da própria fibra).

No aspecto medial sujeito à compressão observou-se uma tendência para a encurvadura da fibra, principalmente na sua ponta, devido à concentração de tensões. Esta tendência foi agravada pelo facto da fibra se encontrar colada numa superfície côncava, fazendo com que o sensor FBG1 estivesse colado abaixo da cabeça do fémur (região calcar). A resistência à encurvadura da fibra pode ser melhorada utilizando cola com melhor resistência ao corte. Por outro

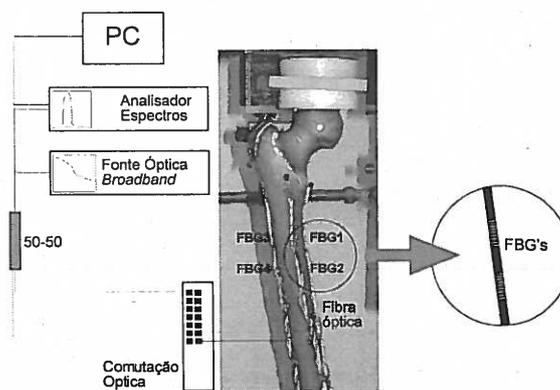


Fig 7 – Desenho esquemático do sistema de monitorização dos sensores FBG.

lado, a tendência para a encurvadura é reduzida numa situação de pressão hidrostática, enquanto a fibra fica suportada por todos os lados, como é o caso das fibras embebidas.

Com esta configuração dos sensores e respectivas ressonâncias características (λ_{Bi}) não foi possível medir simultaneamente ambas as fibras. Este facto ocorreu porque o espectro de ressonância do sensor FBG2 ($\lambda_{B2} = 1545,558 \text{ nm}$) sujeito a compressão interferia, no decorrer do ciclo de carga, com o espectro de ressonância do sensor FBG4 ($\lambda_{B4} = 1543,579 \text{ nm}$) sujeito a tracção. Este problema teria sido evitado se os sensores sujeitos a compressão fossem produzidos com λ_{Bi} sempre menores que os dos sensores sujeitos a tracção. A figura 9 ilustra o espectro reflectido pelos sensores de FBG sujeitos à compressão.

É ainda possível melhorar a resolução usando esquemas de interrogação dos sensores FBG mais sensíveis [9]. Contudo, os resultados obtidos podem ser considerados bons.

4. CONCLUSÕES

O trabalho descrito neste artigo mostra o potencial dos sensores FBG para medir extensões desenvolvidas à superfície de um fémur. Os valores medidos em quatro zonas diferentes dos aspectos medial e lateral do fémur, tanto por extensómetros como por sensores FBG, são concordantes entre si. Por outro lado, as fibras ópticas mantiveram a sua integridade durante o ciclo de carga máxima de 2 kN. Contudo, com o sensor FBG1, verificou-se cedência da cola e es-

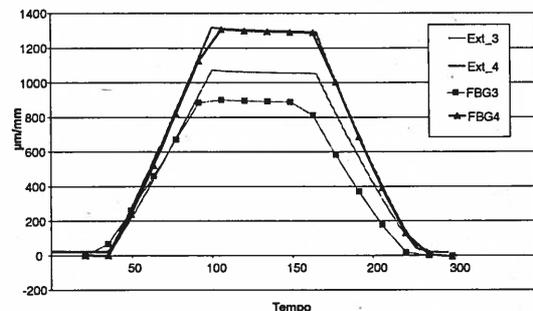
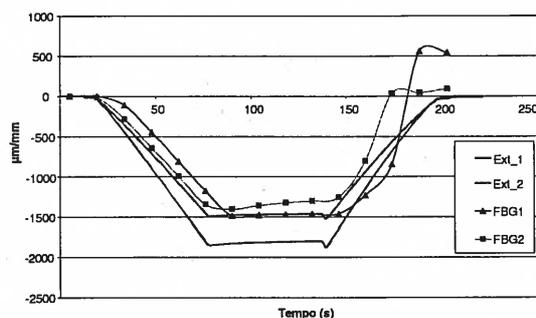


Fig 8 – Resultados experimentais: Extensões nos aspectos medial (negativas) e lateral (positivas) do fêmur medidas com os extensómetros (Ext.) e com os sensores FBG (FBGi).

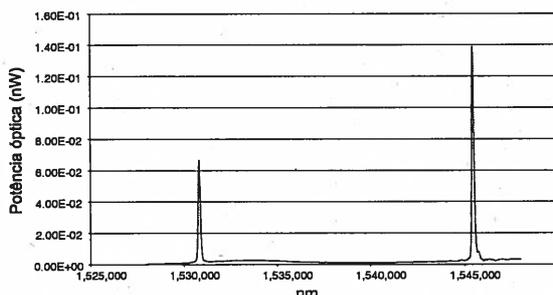


Fig 9 – Espectro refletido pelos sensores FBG sujeitos à compressão.

corregamento da fibra relativamente à superfície do fêmur. O sistema optoelectrónico para a monitorização de extensões na superfície do fêmur poderá substituir os sistemas electrónicos de extensometria na medição de extensões de tracção. No aspecto medial, sujeito à compressão, verificaram-se alguns problemas pelo que a medição de extensões de natureza compressiva deverá ser objecto de futuros estudos.

A flexibilidade dos sensores FBG permite, além das extensões longitudinais, medir também extensões circunferenciais, bastando para tal enrolar a fibra em torno do fêmur. Desta forma, a tecnologia dos sensores FBG poderá permitir construir uma rede de vários sensores, longitudinais e circunferenciais, distribuídos ao longo da superfície femoral, numa construção muito

simples. Outra grande vantagem dos sensores FBG é que podem facilmente ser embebidos no material polimérico onde se pretende medir as deformações, durante a sua produção. As dimensões reduzidas, tanto dos sensores como da cablagem, induzem muito menor reforço ou concentração de tensões, não afectando significativamente as propriedades mecânicas localmente. Desta forma será possível medir extensões no interior de uma estrutura, como por exemplo, medir as extensões no interior do manto de cimento ósseo que constitui o elemento de ligação do implante ao osso.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia o financiamento do projecto POCTI/EME/38367/2001 que permitiu desenvolver o presente estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] Frazão, O.; Correia, N.; Novo, C.; Costa, A.; Araújo, F. M.; Marques, A. T.: Optical fiber embedded in a composite laminate with applications to sensing. *Bianisotropics 2000*, Lisbon, 489-493.
- [2] Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D.C., Kawasaki, B.S. 1978. *Appl. Phys. Lett.* 32: 647-49.
- [3] Meltz G., Morey W. W., Glenn W. H.: Formation of Bragg gratings in optical fibres by transverse holographic method. *Opt. Lett.* 1989, vol.14, nº15, 823.
- [4] Othonos, A.: Fiber Bragg gratings. *Rev. Sci. Instrum.* 68 (12), 1997, 4309-4341.
- [5] Hand, D. P.; Russel: *Opt. Lett.* 15 (1990), 102.
- [6] Lemaire, P. J.; Atkins R. M.; Mizrahi, V.; Reed, W. A.: *Electron. Lett.* 29 (1993), 1191.
- [7] Bilodeau, F.; Malo, B.; Albert, J.; Johnson, D. C.; Hill, K. O.; Hibino, Y.; Abe, Y.; Kawachi, M.: *Opt. Lett.* 18 (1993), 953.003.
- [8] Morey, A. W.; Meltz, G.; Glenn, W.: Fiber optic bragg grating sensors. *Fiber Optic and Laser Sensors VII* 1169 (1989), 98-107.
- [9] Kersey, A. D.; Berkoff, T. A.; Morey, A. W.: High resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength shift detection. *Electron. Lett.* 28 (1992), 236-238.