

Artigo REF: 39A004

## MONITORIZAÇÃO ÓPTICA DA EVOLUÇÃO DE DEFORMAÇÕES EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

M. Fátima F. Domingues<sup>1(\*)</sup>, Hugo F. T. Lima<sup>\*1</sup>, Paulo S. B. André<sup>1,2</sup>, Rogério N. Nogueira<sup>2</sup>, Humberto S. A. Varum<sup>3</sup> e João L. Pinto<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Aveiro, Departamento de Física - Aveiro, Portugal

<sup>2</sup>Instituto de Telecomunicações - Aveiro, Portugal

<sup>3</sup>Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil - Aveiro, Portugal

(\*)Email: fatima.domingues@ua.pt

### RESUMO

*As estruturas de património arquitectónico apresentam, pela sua natureza e história, um elevado desafio no campo da conservação. Para vencer esse desafio é indispensável combinar o conhecimento e experiência científico e cultural para o estudo exaustivo das melhores soluções a aplicar, quer no âmbito da análise e diagnóstico, quer no âmbito da intervenção e conservação.*

*Com o objectivo de facultar meios de análise e diagnóstico adequados ao património arquitectónico, foram desenvolvidos e implementados sistemas ópticos para monitorização estrutural. Um dos sistemas tem por base o uso de sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg. Um outro sistema tem por base a medição laser de distâncias por diferença de fase.*

### INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o estudo da evolução de deformações em edifícios históricos tem-se vindo a acentuar, com o objectivo de estabelecer diagnósticos correctos e programar planos de recuperação eficazes. No presente trabalho serão apresentados dois sistemas ópticos implementados e desenvolvidos para monitorização estrutural. Um dos sistemas tem por base o uso de sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica e o outro sistema tem por base a medição laser de distâncias por diferença de fase.

As redes de Bragg em fibra óptica são componentes ópticos caracterizados pela modulação periódica longitudinal do índice de refração do núcleo de uma fibra óptica. Estas estruturas actuam como filtros ópticos, permitindo a passagem de todas as radiações, excepto aquela cujo comprimento de onda satisfaz a condição de Bragg, dada por  $\lambda_{Bragg} = 2n\Lambda$ , onde  $n$  é o índice de refração da fibra,  $\Lambda$  o período de modulação do índice e  $\lambda_{Bragg}$  o comprimento de onda de Bragg [Nogueira, 2005].

A utilização de redes de Bragg como sensores tem-se vindo a acentuar nas mais diversas áreas de engenharia. Com efeito, dado que o comprimento de onda reflectido varia com perturbações externas, tais como variações de temperatura ou tensão mecânica, as redes de Bragg podem ser utilizadas como sensores extremamente precisos, com propriedades relevantes no campo da engenharia civil. Nesta área, podem salientar-se as aplicações na monitorização dinâmica [Antunes, 2007] e estática [Lima et al., 2007] de estruturas e no estudo dos processos de cura de materiais [Lima, Ribeiro et al., 2007].

Relativamente à medição laser de distâncias, o sistema utilizado baseia-se na emissão de um sinal óptico e na posterior análise do sinal reflectido [S. Jain, 2003]. Um feixe laser, modulado com uma determinada frequência, é direccionado para um dado alvo a uma certa distância. O sinal retro reflectido é recebido com uma diferença de fase em relação ao emitido. A distância é determinada a partir dessa diferença de fase. Neste caso, a precisão na medida da distância depende directamente da precisão da medida de fase [C. Baud et al., 2006], [Jain, 2003]. O sistema Laser Range Finder (LRF) utilizado possui um alcance de 200 m e uma precisão de 1,5 mm. O software e a tecnologia disponibilizada possibilitam a sua interface com um PDA, através de comunicação Bluetooth. Deste modo, é possível controlar a aquisição das distâncias e efectuar o armazenamento dos valores adquiridos para posterior análise.

## DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

### Aplicação de sensores baseados em redes de Bragg para monitorização estrutural

Tendo como objectivo avaliar a estabilidade do Arco-Cruzeiro da Igreja da Santa Casa da Misericórdia de Aveiro, foi desenvolvido um sistema de monitorização estrutural baseado em sensores de Bragg em fibra óptica, com capacidade para monitorizar deformações à escala micrométrica.

Este sistema é composto por 19 sensores de deslocamento e 5 sensores de temperatura, colocados sobre as principais fendas detectadas na avaliação estrutural inicial. A disposição destes sensores encontra-se assinalada na Figura 1, na qual é também possível observar uma linha a vermelho que percorre as fissuras de maior dimensão.

Consoante a fissura que se pretendia monitorizar, os sensores foram instalados em suportes para regiões planas e em suportes para regiões desniveladas, representados esquematicamente na Figura 2. Estes suportes foram fixos à estrutura usando uma resina epoxy, de modo a não danificar a estrutura. Os sensores foram depois unidos formando 5 cabos, que depois se ligam à unidade de interrogação.

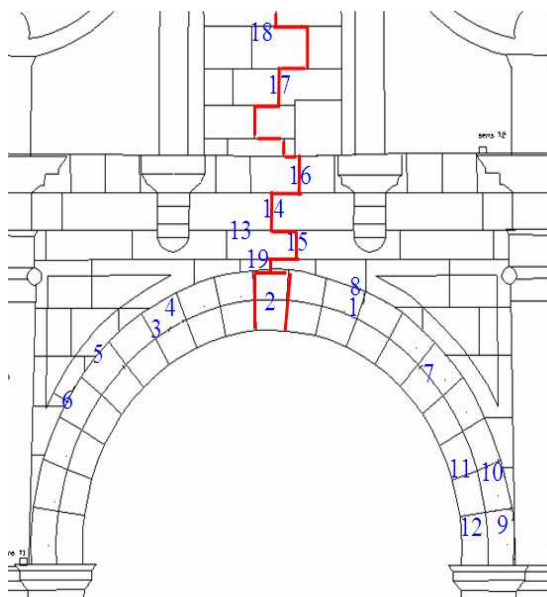


Figura 1. Esquema da disposição dos sensores de Bragg na Igreja da Misericórdia de Aveiro.

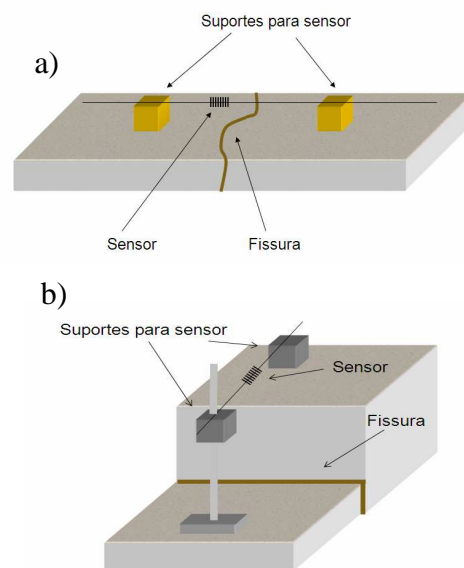


Figura 2. Esquema do suporte do sensor para as regiões planas (a) e desniveladas (b).

## **Aplicação da medição laser de distâncias para monitorização**

Tendo por base o funcionamento de um medidor de distâncias descritas anteriormente, foi projectado um sistema de varrimento para monitorização de estruturas. Neste sistema de varrimento, um feixe laser portador de um sinal é direccionado através de um espelho rotativo para a estrutura/objecto que se pretende analisar. Através do software de interface existente entre o LRF e o PDA, é possível adquirir e armazenar sucessivos valores de distâncias em intervalos de tempo definidos pelo utilizador.

A rotação do espelho, responsável pelo varrimento da estrutura, é controlada através da aplicação de uma sinal triangular, e assim, é também possível controlar a direcção do feixe na estrutura. Conjugando estes dois sistemas (aquisição de distâncias e varrimento), é possível adquirir sucessivos valores de distâncias, do espelho à estrutura.

Para que num varrimento sejam adquiridos um número máximo de pontos possível, é necessário que a velocidade de aquisição de distâncias esteja coordenada com velocidade de varrimento. Esta, é estabelecida pela velocidade de rotação do espelho e é proporcional à tensão que lhe é aplicada.

A partir da relação entre o valor de tensão aplicada e o ângulo de rotação, dada por  $\theta = 8,345 * V + \theta_i$ , (onde  $\theta_i$  é ângulo inicial, V é a tensão aplicada e  $\theta$  é o ângulo do feixe com a horizontal), é possível calcular o ângulo a que cada valor de distância é adquirido, desde que a razão entre a taxa de aquisição e a velocidade de varrimento seja devidamente controlada. Assim, os dados directamente recolhidos através do varrimento, distância ao ponto e respectivo ângulo, correspondem às coordenadas polares de cada ponto da estrutura. Os pontos adquiridos têm como origem de referencial o sistema de varrimento. Através das coordenadas polares, podemos posteriormente calcular as coordenadas cartesianas, que quando representadas graficamente nos fornecem o perfil da estrutura em análise.

## **RESULTADOS**

### **Sensores de Bragg**

A aquisição de dados foi realizada em intervalos de duas semanas. O sistema de interrogação usado em conjunto com os sensores de Bragg, permite uma resolução em deslocamento de 0,2  $\mu\text{m}$  e em temperatura de 0,1°C.

Nos resultados obtidos é possível observar deslocamentos com duas origens distintas: deslocamentos resultantes de fenómenos térmicos, que ocorrerem quando os materiais se expandem/contraem devido a variações de temperatura, e deslocamentos estruturais, resultantes do movimento efectivo entre os pontos de fixação dos sensores. Estes últimos podem ser causados por um vasto conjunto de factores, tais como tensões acumuladas, vibrações resultantes do tráfego automóvel ou sismos.

Na Figura 3 mostram-se alguns dos resultados obtidos, relativamente à variação da temperatura e deslocamento para algumas das fissuras no Arco-Cruzeiro ao longo de um ano de monitorização.

Analisando o gráfico observa-se que existem fissuras que apresentam um comportamento bem correlacionado com a temperatura, como é o caso das fissuras 4 e 5, nas quais não se observam deslocamentos estruturais significativos, permanecendo praticamente com a mesma dimensão do início do estudo. Por outro lado, existem fissuras, como a fissura 2, cuja comportamento não se correlaciona com as variações térmicas, observando-se alguns deslocamentos estruturais, os quais se vão acumulando ao longo do tempo, e que permitem afirmar que esta fissura apresenta uma tendência para fechar.

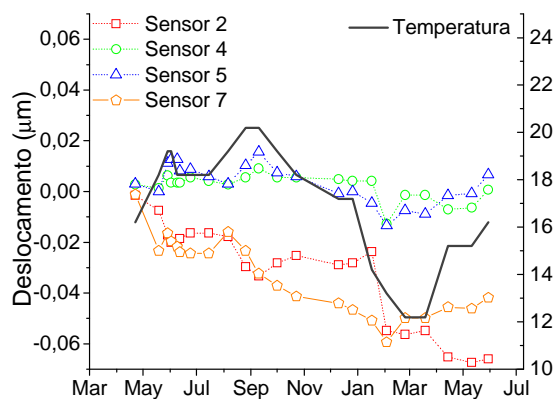


Figura 3. Evolução das temperaturas e deslocamentos entre as duas filas de pedras do arco.

A Figura 4 apresenta os resultados de deformação obtidos para um conjunto de sensores localizados na parte superior do Arco-Cruzeiro. Apesar da existência de pequenos deslocamentos estruturais, o gráfico da Figura 4 mostra essencialmente o efeito que um sismo ocorrido em Fevereiro de 2007, de magnitude 5,9 com epicentro a 500 km da Igreja, provocou na estrutura. Após o sismo verificou-se que as fissuras mais afectadas se situam na região identificada a vermelho na Figura 1, confirmando que esta é a região mais crítica da estrutura. A análise do comportamento das fissuras permitiu inferir o comportamento do arco face ao sismo, o qual se encontra esquematicamente representado na Figura 5.

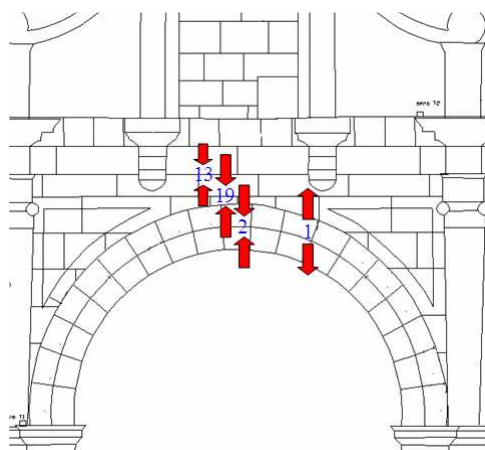


Figura 5. Localização e direcção dos deslocamentos estruturais causados pelo sismo.

### Medição laser

Com o propósito de verificar a viabilidade do sistema de varrimento projectado, na monitorização estrutural, foi efectuada uma série de nove varrimentos para uma mesma linha de perfil de uma parede. Estes testes foram realizados no mesmo dia e consecutivamente. Na Figura 6 estão representados graficamente os resultados obtidos para todos os varrimentos efectuados. Na Figura 7 pode-se ver o perfil da parede ao qual foi efectuado o varrimento.

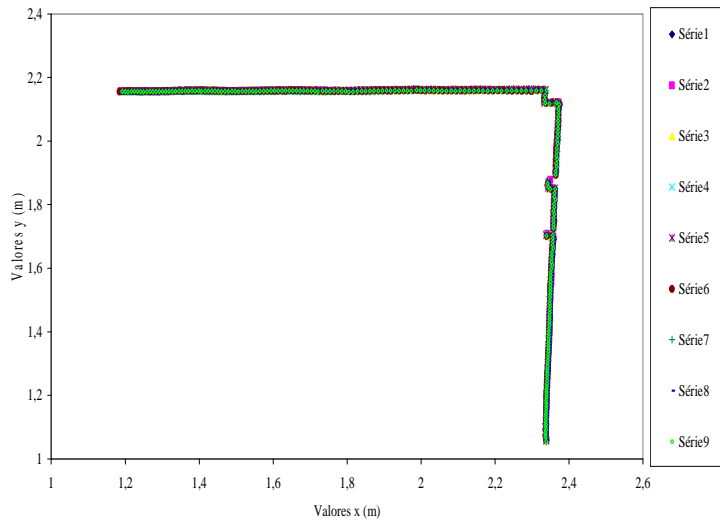


Figura 6: Sobreposição de dados relativos a vários varrimentos efectuados ao mesmo perfil de uma parede.

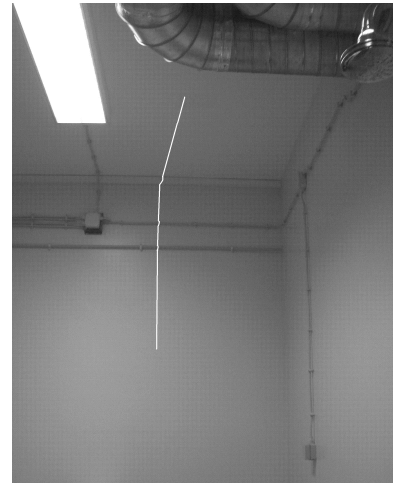


Figura 7: Fotografia da parede e esquema do perfil de varrimento.

Como se pode verificar pela sobreposição das várias linhas de perfil na Figura 6, adquiridas em diferentes varrimentos, os dados obtidos são coincidentes. Esta constatação pode revelar-se de extrema utilidade aquando da sua aplicação na monitorização de estruturas, pois varrimentos efectuados a uma mesma linha de perfil na estrutura, mas realizados com intervalos de tempo considerável (dias, semanas ou meses), permitem inferir o movimento efectuado pela estrutura, caso as linhas para o mesmo perfil não sejam coincidentes.

Este sistema de varrimento foi também testado para a sua eventual utilização na primeira fase da reconstrução 3D de objectos, correspondente à aquisição de dados relativos ao relevo do objecto. A segunda fase será a correspondente ao tratamento computacional dos dados adquiridos. Para esta primeira fase, foram adquiridos sucessivos perfis de uma estátua com um espaçamento de 2mm entre si. As dimensões da estátua são de aproximadamente 6 cm de largura por 10 cm de altura. Na Figura 8 estão representados os dados obtidos no varrimento para um dos perfis. A Figura 9 corresponde à fotografia da estátua em análise, assim como ao

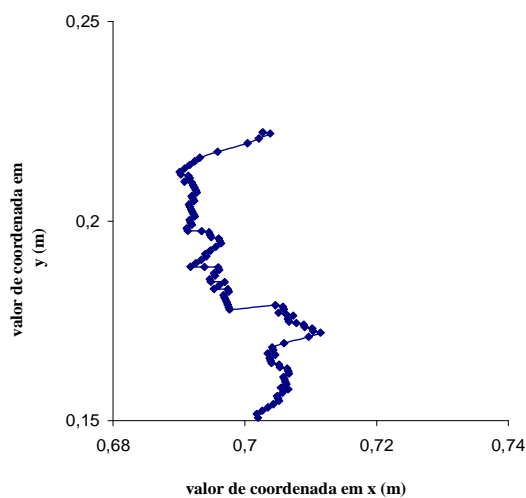


Figura 8: Representação gráfica dos dados de varrimento referentes ao perfil de uma estátua.

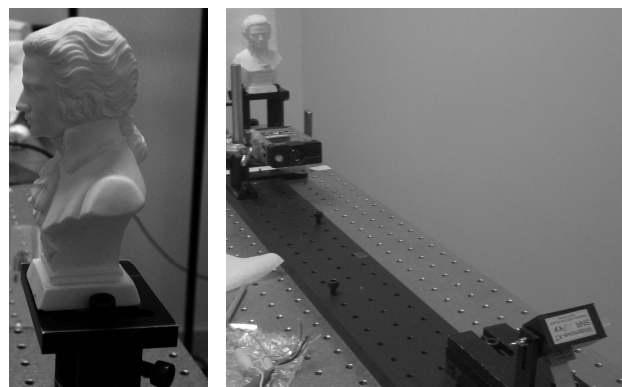


Figura 9: Fotografia da estátua à qual se efectuou o varrimento e sistema experimental.

sistema experimental utilizado. Como se pode verificar pela análise da Figura 8, é possível reconstruir graficamente, através deste método, pormenores de relevo de uma estátua de dimensões relativamente pequenas.

## **CONCLUSÃO**

Os sistemas ópticos apresentados foram desenvolvidos de modo a permitirem uma adequada monitorização da evolução de deformações em edifícios, em diferentes escalas, com vista à implementação das melhores práticas de reabilitação do património histórico e cultural. Como vantagens adicionais, salientam-se a elevada sensibilidade, o carácter não destrutivo e a possibilidade de medida em tempo real. Os dados obtidos possibilitam também a calibração de modelos numéricos existentes, permitindo um estudo mais aprofundado do comportamento estrutural.

Com a implementação de um sistema de monitorização estrutural baseado em redes de Bragg em fibra óptica, foi possível medir deformações à escala micrométrica. Com este sistema foi também possível observar o comportamento das fissuras da estrutura face às variações térmicas e identificar os efeitos de fenómenos oscilatórios na estrutura, tais como o sismo acima mencionado.

Através da medição laser de distâncias é possível adquirir dados para a recriação do perfil de estruturas, com precisão na ordem dos milímetros (precisão associada ao LRF utilizado). Os dados adquiridos pelo sistema de varrimento projectado podem também ser usados para a reconstrução 3D de objectos ou da estrutura em análise.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem o apoio recebido do projecto Física em Rede e da Fundação para a Ciência e Tecnologia, através da bolsa SFRH/BD/30295/2006.

## **REFERÊNCIAS**

- Antunes, P., Análise dinâmica de estruturas com sensores de Bragg, Dissertação de Mestrado, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, (2007)
- Baud, C. & Tap-Béteille, H. & Lescure, M. & Béteille, J. P., Analog and digital implementation of an accurate phasemeter for laser range finding, *Sensors and Actuators, A* 132 (2006) 258-264.
- Jain, S., *A Survey of Laser Range Finding*, (2003).
- Lima, H. & Ribeiro, R. et al., Continuous monitoring of setting and hardening of mortar using FBG sensors, *Proc. SPIE*, 6585 (2007) pp. 6585OD.
- Lima, H. et al., Structural health monitoring of the church of Santa Casa da Misericórdia of Aveiro using FBG sensors, *Proc. SPIE* 6619 (2007) 661941.
- Nogueira, R. N., *Redes de Bragg em fibra óptica*, Tese de Doutoramento, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, (2005).