

## MONITORIZAÇÃO DINÂMICA DE ESTRUTURAS COM SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

**Antunes, Paulo<sup>1,2\*</sup>, Rodrigues, Hugo<sup>3</sup>, Varum, Humberto<sup>3</sup>, André, Paulo<sup>1,2</sup>**

1: Instituto de Telecomunicações  
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal (pantunes@ua.pt, pandre@av.it.pt)

2: Departamento de Física  
Universidade de Aveiro  
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

3: Departamento de Engenharia Civil  
Universidade de Aveiro  
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal (hrodrigues@ua.pt, hvarum@ua.pt)

4: Departamento de Engenharia Civil  
ESTG, Instituto Politécnico de Leiria, 2411-901 Leiria, Portugal

**PALAVRAS CHAVE:** Monitorização estrutural, ensaios não-destrutivos, acelerómetros, sensores de fibra óptica.

### RESUMO

Para o estudo da segurança e durabilidade das estruturas, é vantajoso explorar as tecnologias de detecção para identificar danos estruturais e até programar a sua manutenção. A monitorização estrutural oferece um novo paradigma para avaliar e acompanhar a evolução de parâmetros que caracterizam uma estrutura, combinando sensores e sistemas de monitorização com algoritmos de identificação de danos. Neste trabalho pretende-se, de alguma forma, resumir e apresentar algum do trabalho realizado no Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro e Universidade de Aveiro no âmbito da monitorização dinâmica de estruturas, com sensores tradicionais como sismógrafos e com acelerómetros de fibra óptica desenvolvidos e produzidos em Aveiro.

### 1. INTRODUÇÃO

Uma das mais promissoras tecnologias de deteção é baseada em sensores de fibra óptica, o uso destes dispositivos na monitorização estrutural tem aumentado significativamente nos últimos anos, devido às inúmeras vantagens sobre as soluções convencionais de monitorização, tais como imunidade a campos electromagnéticos, isolamento eléctrico, baixo peso, possibilidade de multiplexar vários sensores na mesma fibra óptica (evitando um elevado numero de cabos), possibilidade de monitorização a longas distâncias, entre outras [1]. Pretendeu-se demonstrar a aplicabilidade dos sensores de fibra óptica em vários tipos de estruturas, com diferentes geometrias e materiais de construção, em comparação com sensores tradicionais usados em simultâneo para comparação de resultados. Para esse fim, foram monitorizadas estruturas diferenciadas, tais como uma ponte pedonal metálica, um reservatório de água elevado, uma parede de adobe e torres de telecomunicações. Estas estruturas são representativas de estruturas com elevado impacto socioeconómico na sociedade actual. O adobe é um dos mais antigos materiais de

construção em todo o mundo, estimando-se que cerca de 30 % da população mundial habite neste tipo de construções. As torres de telecomunicações são um dos suportes físicos mais importantes para a instalação de equipamentos de radiocomunicações usados para a emissão de ondas electromagnéticas, que permitem vários serviços, tais como rádio, televisão e comunicações móveis. Sobretudo por razões económicas e funcionais da sua própria natureza, as torres são estruturas leves, esbeltas e flexíveis. Portanto, a análise dinâmica é necessária para determinar a resposta em ressonância, que pode ser significativa.

Um parâmetro importante a ser monitorizado é a aceleração, a partir do qual as frequências próprias da estrutura podem ser obtidas. O valor das frequências próprias e a sua diminuição está muitas vezes relacionado com a degradação da estrutura, podendo ser usado como indicador da sua integridade, permitindo agir preventivamente, se necessário, minimizando os custos e evitando a perda de vidas humanas associadas a eventuais colapsos [2].

## 2. ESTRUTURAS ESTUDAS E MONTAGEM EXPERIMENTAL

As monitorizações efectuadas incluem: o acompanhamento de um teste destrutivo de uma parede de adobe, construída à escala real no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro; uma ponte pedonal do Campus Universitário da Universidade de Aveiro; estruturas esbeltas, nomeadamente torres de telecomunicações móveis; e um reservatório de água elevado.

A parede de adobe estudada, apresentada na figura 1a), foi construída com uma geometria em planta em forma de “I”, com uma altura de 3.07 m e um comprimento de 3.50 m. Foram utilizados três sensores dinâmicos (um acelerómetro electrónico uniaxial da *Crossbow*, modelo CLX02LF1Z; um sismógrafo, modelo GSR18 da *GeoSig* e acelerómetro óptico uniaxial baseado em redes de Bragg [3]). Em vários momentos do ensaio da parede, aplicando-se três impulsos dinâmicos sobre a parede, como forma de excitação, foram registados dados de aceleração ao longo do tempo. Este procedimento foi repetido para vários níveis de dano, antes, durante e após o ensaio estático destrutivo com os sensores colocados no topo da parede.

A segunda estrutura apresentada é uma ponte pedonal situada no Campus Universitário da Universidade de Aveiro. Esta estrutura, que é apresentada na figura 1b), faz a ligação entre a zona central do Campus Universitário de Santiago e o Campus do Crasto, sobre o Esteiro de São Pedro. A parte superior do tabuleiro da ponte é formada por uma treliça metálica, com secções “H”, com altura constante de 4 m. A laje do tabuleiro é em betão armado, com 15 cm de espessura e apresenta uma largura de 3 m, sendo apoiado em duas vigas longitudinais, com secção em “I”, sendo o comprimento total da estrutura de 324 m. Para a obtenção das frequências verticais da ponte pedonal foi utilizado um acelerómetro óptico uniaxial baseado em redes de Bragg [3], com um sistema de interrogação comercial da *Fibersensing*, modelo FS4200. Como referência para comparação foi utilizado um acelerómetro electrónico uniaxial da *Crossbow*, modelo CLX02LF1Z, com uma sensibilidade de 0.997 V/G. Os sensores são fixados a uma placa metálica, ( $\approx 5$  kg) colocada aproximadamente ao centro da estrutura, entre pilares de apoio.

Para este trabalho foram também escolhidos dois monopólos distintos instalados na região de Aveiro, em Portugal, com 50 m de altura, apresentados nas figuras 1c) e d). No primeiro monopolo (TWR01) as secções tubulares são unidas por ligações aparafusadas. No segundo monopolo (TWR02) são unidas por ajuste forçado, que é conseguido com o pré-esforço de cabos de aço. O equipamento de monitorização consiste numa fonte óptica de banda larga ALS-CL-17-B-FA da *Amonics*, um circulador óptico, um espectrómetro da *Ibsen*, modelo I-MON E e um acelerómetro óptico biaxial [4]. O acelerómetro óptico foi fixo no topo da estrutura com uma peça metálica de ligação apropriada a cada torre. A ligação de fibra óptica foi colocada no local temporariamente, através de uma única fibra óptica por detrás da escadaria de acesso.

A última estrutura apresentada neste estudo é o reservatório de água da Universidade de Aveiro, apresentado na figura 1e), com uma altura total de 35.25 m. É constituído por uma lâmina de 30.9 m de altura e 4 m de largura; um elemento de secção tubular circular de diâmetro interior 1.2 m e 0.6 m de espessura, com uma altura de 30.9 m; e por um reservatório com a geometria correspondente a um

paralelepípedo oco. Para a obtenção das frequências próprias do reservatório foi utilizado um acelerómetro óptico biaxial baseado em redes de Bragg desenvolvido [4]. O equipamento de monitorização é semelhante ao usado nas torres de radiocomunicações. No entanto, neste caso foi possível usar como referência os dados obtidos com um sismógrafo, modelo GSR18 da *GeoSig*.

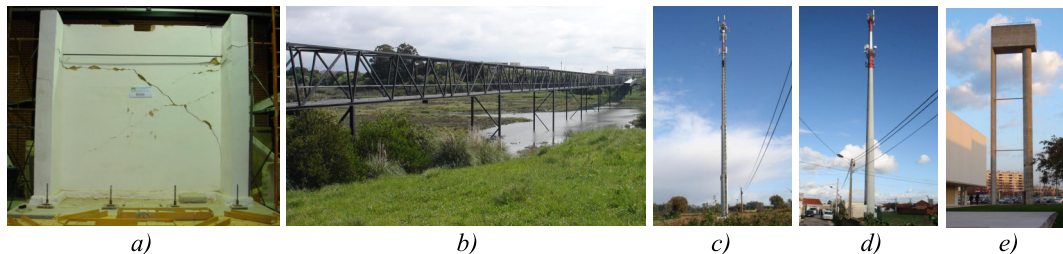


Figura 1: a) Estado final de dano da parede de adobe ensaiada (face Sul), b) Fotografia da ponte pedonal sobre o Esteiro de São Pedro, c) Torre de comunicações TWR01, d) Torre de comunicações TWR02, e) Reservatório de água da Universidade de Aveiro.

### 3. RESULTADOS

A evolução da primeira frequência própria da parede de adobe, medida nos diferentes ensaios dinâmicos de acordo com o referido anteriormente, apresenta-se registada na figura 2.

Ensaio dinâmico	Condições do ensaio
1	Sem carga vertical adicional
2	Com carga vertical adicional
3	Após ligar o actuador
4	Após 1º ciclo de carga
5	Após 3º ciclo de carga
6	Após 1ª fissura diagonal
7	Após 2ª fissura diagonal
8	Final do ensaio, sem carga vertical adicional

Descrição dos ensaios dinâmicos realizados

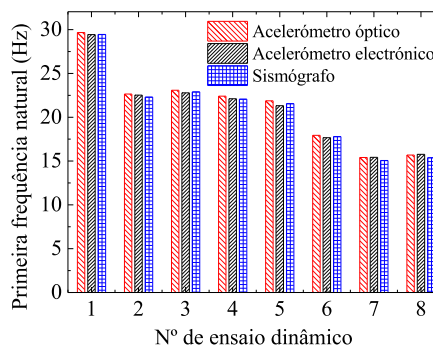


Figura 2: Descrição dos ensaios realizados e evolução da primeira frequência própria da parede de adobe ao longo do ensaio destrutivo, medida com os três sensores.

Na tabela 1 encontram-se resumidos os valores das frequências próprias transversais obtidas por Transformada Rápida de Fourier dos dados de aceleração adquiridos na ponte pedonal.

Tabela 1: Frequências próprias transversais determinadas a partir dos dados de aceleração registados.

Modo	Frequência própria (Hz)		Erro relativo (%)
	Acelerómetro óptico	Sismógrafo	
1	1.524	1.524	< 0.033
2	3.025	3.025	< 0.016
3	3.299	3.299	< 0.015

Na tabela 2 encontram-se resumidos os valores das frequências próprias obtidas experimentalmente nas situações em que a excitação externa é aplicada no topo da torre e a meia altura, para as duas torres de telecomunicações estudadas e nas duas direcções para as quais o acelerómetro é sensível, para as situações em que a excitação é aplicada a meia altura e a 2 m do topo da torre.

Na tabela 3 apresentam-se os valores da primeira frequência própria do reservatório de água nas duas direcções sensíveis e a diferença relativa entre os valores obtidos com o sensor óptico e o sismógrafo.

Tabela 2: Frequências próprias das torres TWR01 e TWR02, obtidas experimentalmente.

Modo	Direcção 1 (Hz)				Direcção 2 (Hz)			
	TWR01		TWR02		TWR01		TWR02	
	1/2 Altura	2 m do topo	1/2 Altura	2 m do topo	1/2 Altura	2 m do topo	1/2 Altura	2 m do topo
1	0.429	0.414	0.661	0.661	0.414	0.399	0.668	0.603
2	1.628	1.562	2.085	2.078	1.555	1.562	2.216	2.078

Tabela 3: Frequências próprias determinadas a partir dos dados de aceleração registados no reservatório.

Modo	Acelerómetro Óptico		Sismógrafo		Diferença relativa (%)	
	Direcção	Direcção	Direcção	Direcção	Direcção	Direcção
	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal
1	0.889 Hz	0.824 Hz	0.889 Hz	0.824 Hz	< 0.05	< 0.06

Pela análise dos dados das tabelas 1, 2 e 3, as frequências próprias obtidas com recurso aos acelerómetros ópticos coincidem com as frequências obtidas com os sensores de referência, comprovando o funcionamento adequado dos sensores ópticos. Verifica-se que os valores encontrados são consistentes, apresentando apenas pequenas diferenças. Estas poderão estar relacionadas com o método simplificado (*peak-picking*) utilizado na sua obtenção a partir do espectro de frequências, ou com variações de temperatura entre os instantes de medida. No entanto, o método utilizado, pela sua simplicidade e rapidez de aplicação, é considerado apropriado para a validação da utilização dos sensores ópticos.

#### 4. CONCLUSÕES

Recorrendo a sensores de fibra óptica desenvolvidos, foram monitorizados diferentes tipos de estruturas, com geometrias e materiais de construção diversos. Os resultados obtidos na determinação das frequências naturais das estruturas com os sensores ópticos são comparados a resultados obtidos com recurso a sensores electrónicos comerciais. Os resultados ilustram a viabilidade do uso desta tecnologia com um comportamento apropriado quando comparados com os valores obtidos com recurso a sensores electrónicos, no entanto, com vantagens, tais como imunidade a campos electromagnéticos, isolamento eléctrico, baixo peso, possibilidade de multiplexar vários sensores na mesma fibra óptica e a possibilidade de monitorização a longas distâncias.

#### 5. AGRADECIMENTO

Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da "FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia", Portugal, especificamente no âmbito do projeto com referência PTDC/ATP-AQI/3934/2012, que os autores reconhecidamente agradecem.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K., Dasgupta, K. and Bhattacharya, D. K. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring--Present status and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol. 147, pp. 150-164 (2008).
- [2] Helmut Wenzel, P. F. *SHM at the Civil Infrastructure: Applications, recent Progress and future Demands*. [http://www.brimos.com/Brimos/HTML/FRAMESET/Frameset\\_Downloads.htm](http://www.brimos.com/Brimos/HTML/FRAMESET/Frameset_Downloads.htm) (2010).

[3] Antunes, P. F. C., Lima, H. F. T., Alberto, N. J., Rodrigues, H., Pinto, P. M. F., Pinto, J. L., Nogueira, R. N., Varum, H. S. A., Costa, A. G. and André, P. S. B. Optical fiber accelerometer system for structural dynamic monitoring. *Sensors Journal, IEEE*, Vol. 9, pp. 1347-1354 (2009).

[4] Antunes, P., Marques, C., Varum, H. and André, P. Biaxial optical accelerometer and high angle inclinometer with temperature and cross axis insensitivity. *Sensors Journal, IEEE*, Vol. 12, pp. 2399 - 2406 (2012).