

# Sensor óptico para monitorização do comportamento dinâmico de estruturas

Paulo Antunes\*, Hugo Lima\*, Pedro Pinto \*, Humberto Varum\*\*, Paulo André\*<sup>·+</sup>

\* Departamento de Física  
Universidade de Aveiro  
Campus Universitário de Santiago – Aveiro  
Telf: +351 234 370 356; fax: +351 234 378 197;  
e-mail: pantunes@ua.pt, hlima@ua.pt, pedro.pinto@ua.pt

\*\* Departamento de Engenharia Civil  
Universidade de Aveiro  
Campus Universitário de Santiago – Aveiro  
Telf: +351 234 370 049; fax: +351 234 370 094; e-mail: hvarum@ua.pt

+ Instituto de Telecomunicações  
Campus Universitário de Santiago – Aveiro  
Telf: +351 234 377 900; fax: +351 234 377 901; e-mail: pandre@av.it.pt

**Resumo** — Este trabalho centra-se no desenvolvimento de um sistema, baseado em tecnologia óptica, que permite a identificação das frequências naturais de estruturas especiais de engenharia e que vai de encontro às necessidades de uma monitorização eficaz e de baixo custo. O sistema óptico implementado foi validado através de testes de campo numa ponte pedonal, comparando a resposta medida com a obtida com sensores baseados em tecnologia electrónica. Os resultados alcançados confirmam a viabilidade da solução implementada nas medidas dinâmicas pretendidas para estruturas.

## 1. Introdução

A monitorização do comportamento dinâmico de estruturas especiais, tais como edifícios altos, pontes, reservatórios elevados, torres ou barragens permite não só a caracterização das suas propriedades estruturais globais, como também a monitorização da evolução do seu estado de conservação global, como a detecção, identificação, localização e avaliação da extensão de danos ocorridos pela degradação natural ou causados por uma acção extrema, de origem humana ou natural, como as induzidas por explosões, incêndios, vento ou sismos [1]. Os sensores de aceleração apresentam-se como ferramentas chave neste tipo de monitorização, sendo por isso essencial o seu desenvolvimento e aperfeiçoamento.

Os acelerómetros electrónicos tradicionais são dispositivos baseados em elementos piezoeléctricos, resistivos, piezo-resistivos, capacitivos ou conjugados de vários tipos. Esta tecnologia provou ser de elevado interesse e utilidade, no entanto, estes dispositivos, quando aplicados em grande escala, como é necessário em grandes estruturas, requerem um elevado número e

extensão de cabos, podendo ser afectados por interferências electromagnéticas, o que poderá condicionar os resultados obtidos. Os acelerómetros ópticos apresentam várias vantagens, relativamente aos sensores convencionais, tais como a possibilidade de multiplexar um elevado número de sensores em série no mesmo cabo, imunidade a campos electromagnéticos e a possibilidade de transmitir sinais a longas distâncias sem necessidade de amplificadores adicionais, podendo resultar numa redução significativa do custo de implementação.

Entre os sistemas de sensores baseados em tecnologia óptica, os que utilizam como elemento central a rede de Bragg gravada em fibra óptica, apresentam-se como uma excelente alternativa para o estudo de vibrações mecânicas, variações de temperatura, pressão ou deformação em estruturas. São promissores, não só devido aos factores já enunciados, mas também em virtude das suas reduzidas dimensões, inércia química, alta sensibilidade, possibilidade de monitorização remota, baixa complexidade do projecto e relativa simplicidade dos componentes opto-electrónicos utilizados [2]-[5].

Este trabalho centrou-se no desenvolvimento, implementação e teste de um sistema baseado em tecnologia óptica que permite a identificação das frequências naturais de estruturas de engenharia e que fosse ao encontro das necessidades de uma monitorização eficaz e de baixo custo.

## 2. Redes de Bragg em fibra óptica

As redes de Bragg em fibra óptica ou *Fiber Bragg Gratings* (FBG) são componentes ópticos passivos

relativamente simples, obtidos a partir de uma modulação local, longitudinal e periódica, do índice de refração do núcleo da fibra óptica. Esta modulação é obtida por exposição de uma fibra óptica fotossensível a um padrão óptico intenso de radiação ultravioleta, através de métodos interferométricos ou por máscara de fase [6].

Quando o comprimento de onda do modo de propagação do campo óptico incidente satisfaz a condição de Bragg, as componentes dispersas por cada plano consequente da estrutura são adicionadas construtivamente, resultando num sinal reflectido. Quando a condição de Bragg não é verificada, as componentes dispersas pelos planos tornam-se progressivamente fora de fase, acabando por se anular. A condição de Bragg impõe que o espectro de reflexão esteja centrado no comprimento de onda de Bragg,  $\lambda_B$ , dado por (1):

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{eff} \quad (1)$$

onde  $\Lambda$  é o período da perturbação do índice de refração e  $n_{eff}$  é o índice de refração efectivo do modo guiado.

A variação do comprimento de onda reflectido pela rede, quando esta é sujeita a perturbações externas, permite a utilização deste tipo de dispositivo como sensor. De acordo com (1), o comprimento de onda de Bragg depende do índice de refração efectivo do núcleo da fibra e do período do padrão de interferência. Qualquer perturbação externa que actue nestes parâmetros poderá ser quantificada pela consequente alteração no comprimento de onda de Bragg. A aplicação de uma tensão mecânica na rede ou variações de temperatura em seu torno alteram o índice de refração e a sua periodicidade.

Para uma rede não sujeita a perturbações mecânicas ( $\Delta l=0$ ), o efeito da variação da temperatura ( $\Delta T$ ) no comprimento de onda de Bragg é descrito por (2):

$$\Delta\lambda_B = S_T \Delta T \quad (2)$$

onde  $S_T$  é a sensibilidade da rede em relação à variação de temperatura. Para redes de Bragg em fibras ópticas, cujo comprimento de onda de Bragg esteja centrado em 1550 nm, é de esperar uma sensibilidade térmica de aproximadamente 13 pm/°C [6].

Para uma rede não sujeita a perturbações térmicas ( $\Delta T=0$ ), o efeito de perturbações mecânicas no comprimento de onda de Bragg pode ser descrito por (3):

$$\Delta\lambda_B = S_M \varepsilon_z \quad (3)$$

onde  $S_M$  é a sensibilidade da rede à deformação, segundo o eixo longitudinal  $z$ , e  $\varepsilon_z$  é a elongação relativa, segundo esse mesmo eixo longitudinal.

Um valor típico de sensibilidade à deformação é 1.2 pm por cada 1  $\mu$  de elongação relativa [6].

### 3. Acelerómetro e sistema de interrogação

O acelerómetro implementado, ilustrado na (Fig. 1) e (Fig. 2), é composto por três elementos principais: uma massa inercial, um mecanismo de suspensão e um dispositivo detector. O mecanismo de suspensão é constituído por uma lâmina de aço (actuando como uma mola) e pela própria fibra óptica. Durante o processo de aceleração do dispositivo a massa tenderá a permanecer em repouso, fazendo com que a lâmina de aço e a fibra óptica sofram deformações [2][8]. Estas deformações correspondem à variação da posição da massa inercial e é com base nesse movimento que é possível aferir a aceleração sentida no suporte, através da variação do comprimento de onda central da FBG que funciona como dispositivo detector.

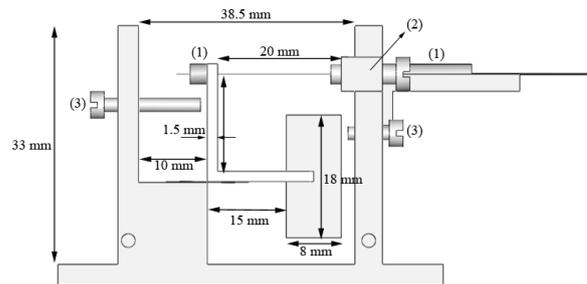


Fig .1. Esquema dimensional do acelerómetro óptico.

A fibra óptica é fixa com resina epoxy em dois pequenos cilindros de latão, indicados na (Fig. 1) com o apontador (1). Estes cilindros são fixos no acelerómetro. Um mecanismo esticador acoplado, indicador (2) na (fig. 1), permite puxar um dos cilindros segundo o eixo longitudinal da fibra óptica, aplicando assim a pré-tensão desejada na fibra óptica. Este sistema permite a rápida colocação ou troca da fibra óptica mesmo fora de ambiente laboratorial, sendo esta última possibilidade importante de ser considerada em caso de quebra da fibra em testes de campo ou durante a sua utilização em obras. A colocação de dois parafusos de longo curso, componente (3) na (fig. 1) permite fixar a massa inercial, de modo a proteger o acelerómetro de eventuais acelerações extremas que possam ser induzidas neste durante o transporte do dispositivo. A (Fig.2) apresenta uma esquematização do dispositivo implementado, com indicação dos seus componentes principais.

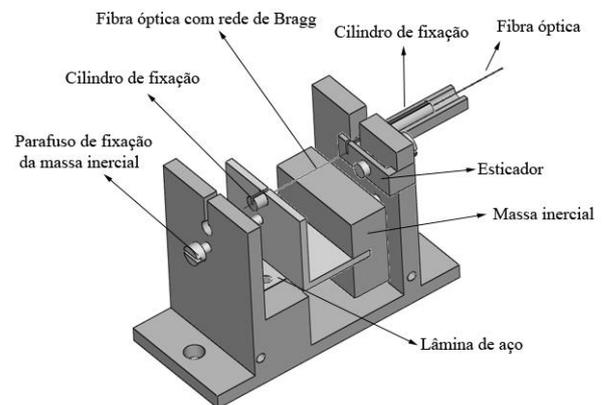


Fig .2. Esquema tridimensional do acelerómetro implementado e seus componentes.

O sistema de interrogação é baseado num filtro óptico passa banda com resposta linear na região espectral de funcionamento do acelerómetro, permitindo converter a variação de comprimento de onda central da FBG em variação de tensão eléctrica à saída do filtro óptico. Quando a rede está sujeita a perturbações externas, o comprimento de onda reflectido altera-se e a potência óptica transmitida pelo filtro óptico varia em função da área de convolução dos espectros do filtro e da rede [7]. A saída do filtro encontra-se ligada a um fotodetector que converte a potência óptica numa corrente eléctrica, sendo esta convertida para tensão eléctrica por um amplificador de transimpedância. A região de operação de um sistema deste é limitada pela largura espectral do filtro óptico e pela elongação máxima permitida à fibra. A esquematização do funcionamento deste sistema de interrogação é apresentada na (Fig. 3). O sistema implementado permite compensar eventuais flutuações da potência óptica injectada no acelerómetro. Para isso, o sinal proveniente do acelerómetro é dividido em duas componentes, uma de referência que é inserida directamente num fotodetector e outra que passa pelo filtro óptico antes de ser injectada num segundo fotodetector. Após os fotodetectores os sinais eléctricos seguem percursos semelhantes. Passam por um amplificador de transimpedância e por um estágio de amplificação final, sendo depois convertidos para formato digital e processados num computador. Para a conversão para o formato digital foi utilizada uma placa de aquisição da National Instruments, modelo USB6008. Foi desenvolvida em Labview® uma aplicação onde o sinal do sensor é dividido pelo sinal de referência, sendo deste modo compensadas oscilações na potência óptica da fonte de ruído.

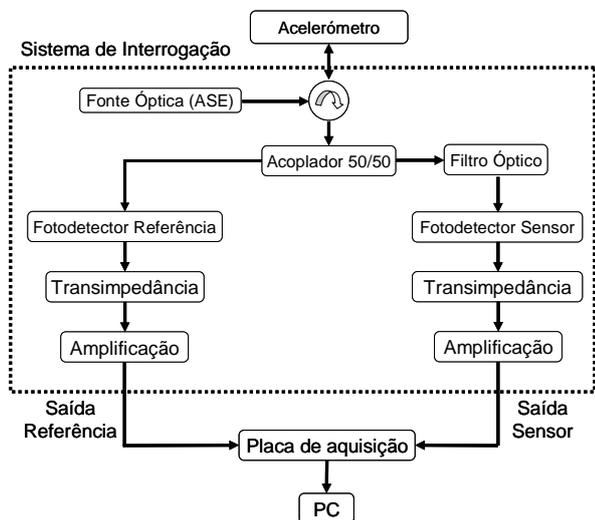


Fig. 3. Esquema do sistema de interrogação utilizado.

A aplicação em Labview® desenvolvida permite também observar e registar sinais adicionais de sistemas electrónicos ligados à placa de aquisição, permitindo comparar, em tempo real, o sinal do sistema óptico com um sistema electrónico de referência. Tal como foi referido anteriormente, o sensor será também sensível a variações de temperatura, dada a dependência do valor de  $\lambda_B$  com a temperatura, no entanto, este tipo de variação será de muito baixa

frequência, alterando apenas a linha de base do sinal medido.

## 4. Resultados

Tendo em conta o tipo de estruturas em que se pretende estudar a aplicabilidade do dispositivo desenvolvido e o valor típico das frequências naturais deste tipo de estruturas (0-20 Hz), optou-se pela primeira calibração do dispositivo para frequências até 10 Hz. Um método de montagem simples e baixo custo que permite este tipo de calibração recorre a um pêndulo rígido com frequência de oscilação neste intervalo.

O acelerómetro óptico e um acelerómetro electrónico de referência, da Crossbow Technology, inc., (modelo CLX02LF1Z - LF séries) com uma sensibilidade de 0,997 V/G, foram colocados num suporte rígido de acrílico e este por sua vez foi fixo ao pêndulo rígido. Com o pêndulo em movimento, contendo os dois sistemas, observou-se a aceleração em tempo real. Ajustando a sensibilidade do sistema óptico com o ganho dos amplificadores do sistema de interrogação calibrou-se o sistema óptico de modo a que as curvas de aceleração obtidas com os dois sistemas se sobrepusessem, como se pode observar na (Fig. 4).

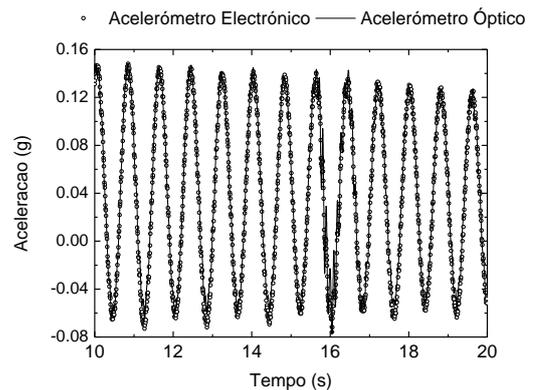


Fig. 4. Aceleração do pêndulo rígido medida com o sistema óptico e com o acelerómetro electrónico de referência.

O espectro de frequências obtido pela transformada de Fourier das evoluções de aceleração apresentadas na (Fig. 4), permite comparar a frequência da oscilação do pêndulo medida com os dois sistemas (ver Fig. 5).

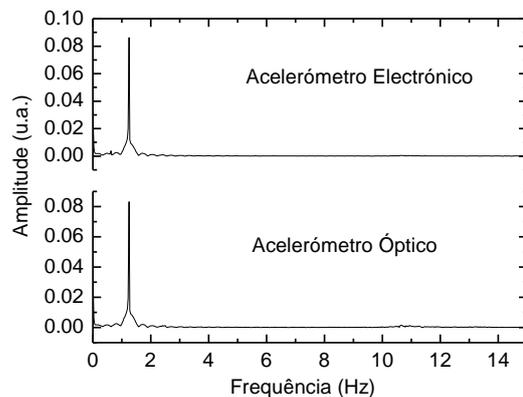


Fig. 5. Espectros de frequência obtidos a partir da oscilação do pêndulo rígido.

Após calibração, o sistema foi testado para vários valores de frequência, utilizando um shaker mecânico, associado a um controlador Power Amplifier BAA60, onde foi colocado o suporte de acrílico com os acelerómetros óptico e electrónico. A resposta dos dois sistemas para frequências de 10, 20, 30 e 40 Hz é apresentada na (Fig. 6).

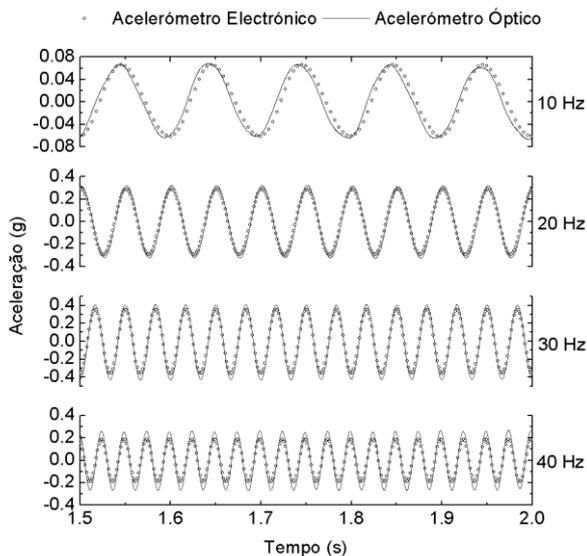


Fig. 6. Aceleração do shaker medida com os dois sistemas, para várias frequências de oscilação.

Os dados da (Fig. 6) permitem verificar a qualidade da resposta, em termos de amplitude e frequência, registada com o sistema implementado para frequências até 20 Hz. Devido à variação da sensibilidade do sistema óptico com a frequência, para frequências de oscilação superiores a 20 Hz o sinal do sistema óptico denota alguma divergência em termos de amplitude, relativamente ao sinal medido com o sistema electrónico, mantendo-se no entanto a convergência em termos de frequência de oscilação.

Após a caracterização laboratorial, o sistema óptico foi testado na medição da resposta dinâmica da ponte pedonal do Campus Universitário da Universidade de Aveiro.

A estrutura da ponte é constituída por uma treliça metálica tubular com altura constante de 4.00 m e largura de 4.00 m. A largura da zona interior de circulação de peões e bicicletas é de 3.00 m, sendo o tabuleiro apoiado em duas vigas longitudinais com secção em I que fazem parte da estrutura principal em treliça da ponte, ligadas por uma laje de betão armado com 0.15 m de espessura. A ponte é apoiada nas suas extremidades nos encontros e em 8 pilares intermédios afastados de 36.00 m, sendo o comprimento total da ponte de aproximadamente 300 m.

Os acelerómetros óptico e electrónico foram fixos a uma placa metálica, com massa suficientemente grande por forma a evitar movimentos relativos de oscilação entre esta e a oscilação da estrutura. A placa com os acelerómetros foi colocada na secção equidistante dos encontros da ponte.

Foram realizados dois ensaios. Durante o primeiro ensaio foram aplicados três impulsos mecânicos na

estrutura, registando-se a evolução da aceleração ao longo do tempo, representada na (Fig. 7).

Durante o segundo ensaio foram aplicados quatro impulsos mecânicos. Os dados de aceleração registados com os dois sistemas, óptico e electrónico, apresentam-se na (Fig. 8).

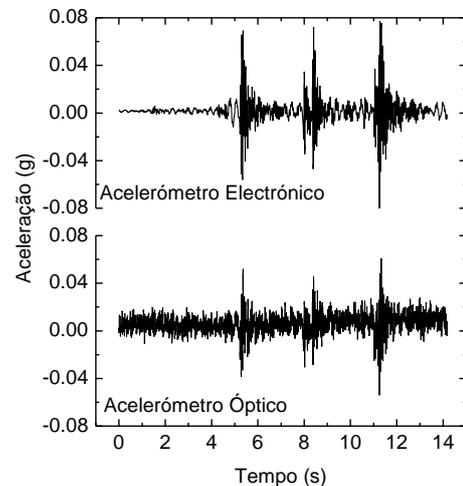


Fig. 7. Evolução da aceleração medida com os dois sistemas, durante o primeiro ensaio na ponte pedonal.

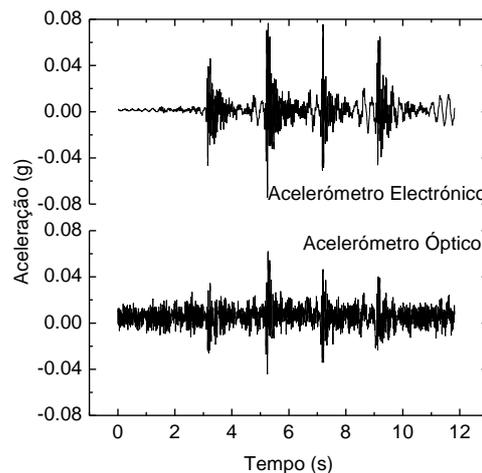


Fig. 8. Evolução da aceleração medida com os dois sistemas, durante o segundo ensaio na ponte pedonal.

Considerando a duração de registo de cada ensaio, ilustrado nas figuras anteriores, calculou-se o desvio quadrático médio entre os dados registados com o acelerómetro óptico implementado e com o acelerómetro electrónico de referência. Obtiveram-se valores de  $4.09 \times 10^{-3} G$  e  $4.27 \times 10^{-3} G$ , respectivamente para o primeiro e o segundo ensaio.

A transformada de Fourier dos registos de aceleração ao longo do tempo permite identificar algumas frequências naturais da estrutura da ponte pelo método de *peak picking* [8].

Os espectros de frequências obtidos para o primeiro e segundo ensaio apresentam-se, respectivamente, na (Fig. 9) e na (Fig. 10).

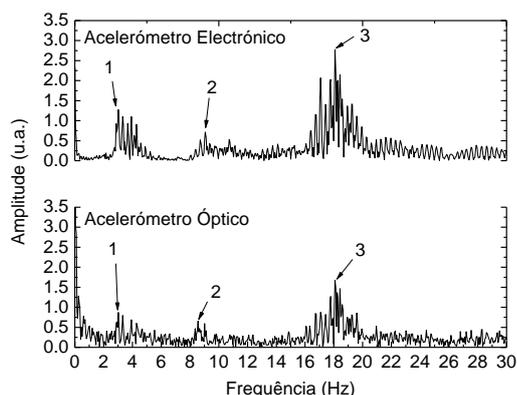


Fig. 9. Espectros de frequência obtidos para o primeiro ensaio.

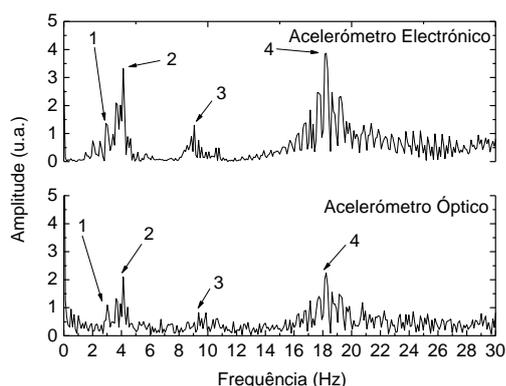


Fig. 10. Espectros de frequência obtidos para o segundo ensaio.

Na (Tabela I) apresentam-se as frequências naturais da estrutura obtidas através dos dados registados nos dois acelerómetros, bem como o erro da medida efectuada com o sistema óptico relativamente à medida efectuada com o sistema electrónico.

TABELA I  
FREQUÊNCIAS NATURAIS DA PONTE ESTIMADAS A PARTIR DOS  
DOIS ENSAIOS REALIZADOS E ERRO RELATIVO.

		Frequência (Hz)		
	n	Acel. Electrónico	Acel. Óptico	Erro Relativo (%)
1º Ensaio	1	3.021	3.021	<0.017
	2	8.561	8.561	<0.006
	3	18.078	18.078	<0.003
2º Ensaio	1	2.020	2.020	<0.025
	2	4.129	4.129	<0.012
	3	9.064	9.064	<0.006
	4	18.229	18.229	<0.003

Verifica-se que os valores das frequências da estrutura obtidos com o acelerómetro óptico praticamente coincidem com os valores obtidos com o acelerómetro electrónico.

## 5. Conclusões

Implementou-se um acelerómetro óptico e o sistema de interrogação associado, de baixo custo, que permite o registo de vibrações em estruturas, nomeadamente em

aplicações onde se pretende determinar as suas frequências naturais e modos de vibração.

O sistema implementado foi utilizado em medidas de campo na ponte pedonal do Campus da Universidade de Aveiro, onde foi possível a determinação das frequências naturais da estrutura com um erro máximo de 0.025%, relativamente às medidas efectuadas com recurso a um sensor baseado em tecnologia electrónica de utilização corrente. O desvio médio quadrático dos dados de aceleração registados com o sensor óptico, nos ensaios realizados, apresentou um valor máximo de  $4.27 \times 10^{-3}$  G, relativamente aos registos com o acelerómetro de referência.

## Agradecimentos

Paulo Antunes e Hugo Lima agradecem o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, através das Bolsas de Doutoramento com referência SFRH/BD/41077/2007 e SFRH/BD/30295/2006, respectivamente.

## Referências

- [1] Sung-Pil Chang, Jaeyeol Yee, Jungwhae Lee, "Necessity of the bridge health monitoring system to mitigate natural and man-made disasters", *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 5, Issue 3, pp. 173 – 197, June 2009.
- [2] A. Mita e I. Yokoi, "Fiber Bragg grating accelerometer for structural health monitoring", *Fifth International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC 2000)*, pp. 631-636, Sydney, Australia, 2000.
- [3] S.F.A. Csipkes, T.W. Graver, T.C. Haber, A. Méndez e J. W. Miller, "The maturing of optical sensing technology for commercial applications", *Micron Optics Inc.*, 2005.
- [4] C. Baldwin, J. Niemczuk, J. Kiddy e T. Salter, "Review of fiber optic accelerometers", *IMAC XXIII: A conference & Exposition on Structural Dynamics*, SEM, Session 37, Paper N° 444, 2005.
- [5] Y.J. Rao, "In-fibre Bragg grating sensors", *Measurement Science & Technology*, Vol. 8, pp. 355-375, 1997.
- [6] A. Othonos e K. Kalli, "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing", Artech House (ed), 1999.
- [7] P. F. C. Antunes, H. F. T. Lima, N. J. Alberto, H. Rodrigues, P. M. F. Pinto, J. L. Pinto, R. N. Nogueira, H. S. A. Varum, A. G. Costa, P. S. B. André, "Optical Fiber Accelerometer System for Structural Dynamic Monitoring", *Sensors Journal*, IEEE, Vol. 9, nº11, pp.1346-1354, Nov. 2009.
- [8] A. Roshan-Ghias, M.B. Shamsollahi, M. Mobed e M. Behzad, "Estimation of modal parameters using bilinear joint time-frequency distributions", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, Issue 5, pp. 2125-2136, July 2007.