# MONITORIZAÇÃO DA FORMA DA VELA DE UM BARCO BASEADA EM SENSORES DE BRAGG

# MONITORING OF THE DEFLECTED FORM OF A BOAT SAIL BASED ON BRAGG SENSORS

# P. G. M. Q. Ferreira<sup>1</sup>, E. S. Caetano<sup>2</sup>, P. M. Pinto<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Estudante de doutoramento, CONSTRUCT-ViBest, FEUP, Porto - Portugal.
 <sup>2</sup>Professor Associado com Agregação, CONSTRUCT-ViBest, FEUP, Porto - Portugal.
 <sup>3</sup>CEO, Fibersail, Lda.



## RESUMO

Este artigo apresenta um sistema de monitorização baseado em redes de sensores de deformação de fibra ótica utilizado para reconstruir a forma da vela de um barco em tempo real. O método desenvolvido é validado através de ensaios experimentais utilizando uma barra instrumentada com sensores de Bragg deformada em configurações correntes da forma da vela, evidenciando-se o número reduzido de secções instrumentadas requerido para a definição dos parâmetros da forma.

### ABSTRACT

This paper presents a monitoring system based on fiber optic strain gauge networks used to reconstruct the deflected form of a yacht sail in real time. The developed method is validated through experimental tests using an instrumented beam with Bragg sensors deformed in common configurations of the sail shape. It is shown that a small number of instrumented sections is required to accurately define the sail shape parameters

Palavras-chave: Monitorização / Rede de Bragg (FBG) / Forma estrutural / Vela

## 1. INTRODUÇÃO

A determinação da forma da vela de barcos em tempo real recorrendo a medições à escala real em competições ou em laboratório tem ganho um interesse crescente ao longo dos últimos anos, fornecendo dados para o dimensionamento e desempenho aerodinâmico das velas e das embarcações (Motta et al. 2014).

Os sistemas de monitorização baseados em técnicas de imagem (Pelley e Modral 2008) são os mais utilizados para esse fim, e utilizam geralmente câmaras montadas no "deck" e no mastro do barco direcionadas para as velas para identificar a localização global destes elementos através de alvos aí colocados. No entanto, os sistemas de visão requerem o posicionamento de câmaras com visibilidade para a vela deformada e têm alguns problemas relacionados com a suscetibilidade das lentes às condições ambientais: baixa precisão; apenas funcionam com luz solar; efeitos negativos da chuva e humidade nas lentes das câmaras; e complexidade do processamento de dados. Em alternativa, a caracterização da forma da vela com base em medições de extensões através de sensores de Bragg (*FBG*) pode colmatar as limitações elencadas previamente, sendo reportado em (Farrell et al, 2010) o desenvolvimento de um sistema de monitorização baseado neste tipo de sensores aplicável a velas rígidas.

O presente trabalho descreve um método desenvolvido e implementado para a determinação da forma do perfil de velas flexíveis baseado na medição de deformações em barras instrumentadas inseridas em secções destas (Ferreira et al. 2016). Este trabalho foi recentemente objeto de uma patente (Rocha et al. 2015), assentando na conversão das extensões medidas nas barras em curvaturas locais e na sua integração a fim de reconstituir a forma deformada da barra.

Este artigo descreve o conceito, a sua implementação e os ensaios de validação realizados com uma barra com *FBG* e com um sistema de visão. Aplicando diferentes configurações típicas da forma da barra deformada quando inserida numa bainha da vela, determina-se o número mínimo de sensores FBG necessários para avaliar o perfil deformado com suficiente precisão, e são caracterizadas as fontes de incerteza nas medições do sistema ótico, de forma a compreender o potencial de aplicação associado.

### 2. RECONSTITUIÇÃO DA FORMA POR MEDIÇÃO DE EXTENSÕES

A navegação de um veleiro é habitualmente feita através da observação visual direta de um conjunto de parâmetros mais relevantes da forma das velas em vários perfis horizontais, por exemplo a 25, 50 e 75% da altura (Fig. 1(a)). Estes parâmetros são a corda, a profundidade máxima e respetiva localização, e os ângulos de ataque e de saída (Fig. 1(b)).

No sentido de promover a otimização da navegação, pretende-se que os parâmetros acima mencionados sejam quantificados por via experimental, em tempo real, através de um sistema de monitorização da vela baseado num conjunto de sensores de deformação. Os sensores são instalados nas faces opostas de barras inseridas num conjunto de secções horizontais das velas e ligados a um interrogador ótico (Fig. 1(c)). Com os sinais colhidos a partir de um algoritmo implementado num computador portátil, é identificada a curvatura da barra num conjunto de secções. A forma da barra é estimada por interpolação e integração das curvaturas, e os parâmetros dos perfis horizontais deformados das barras são calculados e enviados para uma aplicação web através de uma ligação por cabo ou wireless, sendo mostrados num dispositivo móvel e atualizados a cada segundo.

Cada barra é instrumentada em *NS* secções com 2*NS* sensores *FBG* colados nas suas faces opostas, de acordo com a Fig. 2(a). Com base na medição nos dois sensores de cada secção transversal instrumentada, obtém-se a curvatura  $\kappa$  (*s*), definida por

$$\kappa(s) = \frac{\varepsilon_{inf} - \varepsilon_{sup}}{H} \tag{1}$$

em que  $\varepsilon_{inf}$  e  $\varepsilon_{sup}$  são as extensões nas fibras inferior e superior, respetivamente, e H é a distância entre essas fibras.

A reconstituição da forma do eixo longitudinal da barra é realizada através da discretização da barra em *m* elementos retilíneos. Para cada elemento *i* com com-



Fig. 1 – (a) Veleiro; (b) Parâmetros da forma de perfil da vela e (c) Sistema de Monitorização.

primento ds, a rotação  $\theta_i$  entre as extremidades  $i \in i+1$  pode ser calculada por

$$\theta_i = 2 \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{2} \int_{s_i}^{s_{i+1}} \kappa(s) \, ds \right], \operatorname{com} i = 1, 2, \dots, m$$
(2)

em que  $s_i e s_{i+1}$  são as coordenadas inicial e final, respetivamente, em relação ao referencial longitudinal *s* da barra, como ilustrado na Fig. 2(b). A rotação  $\theta_i$  é distribuída igualmente pelas duas secções de extremidade do elemento *i* e é usada para definir o ângulo  $\alpha_i$  do eixo da barra em relação à horizontal no nó esquerdo do elemento *i* através de

$$\alpha_{i} = \alpha_{i-1} + \frac{\theta_{i-1}}{2} + \frac{\theta_{i}}{2}, \text{ com } i = 1, 2, \dots, m$$
(3)

As coordenadas dos nós de extremidade de cada elemento podem ser expressas no referencial  $x^{l}z^{l}$  (Fig. 2(c)), em que a direção do eixo  $x^{l}$  coincide com a corda do perfil da vela que a barra representa. A realização de um ajuste polinomial dos pontos que constituem as extremidades dos elementos permite estimar os parâmetros da secção da vela. A corda é dada pela abcissa do último nó no eixo  $x^{l}$ . A derivada da equação que define o perfil da vela permite determinar os restantes parâmetros.

Este método foi implementado em ambiente *LabView*®, conjugando um programa para aquisição e processamento de dados com outro para a reconstituição da deformada da barra, permitindo a visualização da deformada em tempo-real atualizada a cada segundo.

### 3. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÉTODO DESENVOLVIDO

#### 3.1. Instrumentação do modelo físico

Para validar o método acima descrito, foram instrumentadas e ensaiadas em laboratório duas barras compósitas com 2mm de espessura, 10mm de largura e 1m de comprimento, realizadas a partir de um perfil de fibra de vidro (*PRFV*) (Fig. 3(a)). Uma das barras é o modelo físico, e outra é uma barra auxiliar utilizada para estudar o efeito da temperatura nas medições dos sensores, como será discutido na secção 5. A barra auxiliar foi instrumentada com dois *FBG* semelhantes aos utilizados no modelo físico e com uma sonda de temperatura.

O modelo físico foi instrumentado com 20 sensores *FBG* agrupados em duas séries multiplexadas, de acordo com a Fig. 3(a). Cada *array* integra 10 *FBG* espaçados longitudinalmente de 10cm. O conjunto de *FBGs* foi colado em duas posições paralelas, em faces opostas da barra, com um adesivo apropriado de base de poliéster.

A fibra ótica monomodo utilizada para a realização dos *arrays* apresenta  $8\mu m$  de diâmetro de núcleo,  $125\mu m$  de diâmetro da baínha, e 250 $\mu m$  de diâmetro de revestimento. Consequentemente, a distância efetiva entre os núcleos de fibras opostas é de 2,25mm. Os sensores utilizados têm uma resolução de  $1\mu\epsilon$ , amplitude máxima de  $\pm 2500\mu\epsilon$ , sensibilidade à deformação de  $0,788\mu\epsilon^{-1}$  e comprimentos de onda de referência variados e



**Fig. 2** – Instrumentação da barra compósita: (a) Disposição das fibras e dos sensores *FBG* em faces opostas; (b) Curvatura e rotação de secção transversal (c) Sistema de coordenadas do perfil deformado da barra.

igualmente distribuídos entre 1500 e 1600nm. O modelo foi revestido com uma película aderente de forma a homogeneizar as faces da barra que contêm os *arrays*. Atendendo ao processo manual da multiplexagem na realização de cada *array* em que foram utilizadas emendas por fusão (ver a Fig. 3(b)), assim como da colagem das fibras óticas à barra, o espaçamento entre sensores não é exatamente de 10 cm. Este facto motivou o desenvolvimento da análise de sensibilidade apresentada na secção 5, de forma a avaliar a importância de pequenas diferenças no posicionamento de sensores.

### 3.2. Sistema de monitorização baseado em fibras óticas e em técnicas de imagem

O modelo físico foi fixo nas suas extremidades a uma mesa graduada (Fig. 3(c)). A possibilidade de ajustar a fixação das extremidades da barra permitiu a sua deflexão em várias configurações que reproduzem situações típicas da deformação da vela. A instrumentação da barra com um número variado de sensores FBG permitiu a medicão de extensões nas diferentes configurações ensaiadas para reconstituição da deformada. Para verificar a precisão das formas estimadas com recurso ao método descrito na secção anterior, foi realizada alternativamente a reconstituição da forma da barra com base numa câmara e na aplicação de técnicas de imagem.

O sistema de monitorização baseado em constituído por fibras óticas é um interrogador ótico BraggMETER FS2200 com uma banda de funcionamento de 100nm, entre 1500 e 1600nm, resolução de 1pm, precisão absoluta de  $\pm 2$ pm, 4 canais e frequência de amostragem de 100Hz. A aquisição de sinal é realizada através de uma aplicação informática em ambiente LabView®, cujo interface gráfico se apresenta parcialmente na Fig. 3(d), sistema permitindo o controlo do de interrogação e o tratamento dos dados recolhidos. Os parâmetros do modelo são configurados nesta aplicação: comprimento do modelo, espessura efetiva, localização das secções instrumentadas e sensibilidade dos sensores de deformação. A aplicação efetua a representação da configuração deformada do modelo em tempo real, fornecendo também os parâmetros mais relevantes da forma da vela.

O sistema de visão é constituído por uma câmara *Nikon 5200*, por um computador e por uma mesa graduada. São tiradas fotografias ao modelo através da câmara ligada a um computador, que efetua o processamento de imagem através de uma aplicação implementada em *MATLAB*®. As imagens recolhidas referem-se ao modelo deformado e à mesa graduada, sendo-lhes aplicada uma correção de distorção e de perspetiva. Finalmente, a identificação do contorno da barra permite a definição das



Fig 3 – (a) Modelo; (b) Detalhe do modelo; (c) Setup do ensaio e (d) Interface gráfica do sistema ótico.

coordenadas de um conjunto de pontos.

No primeiro passo do processamento da imagem, é realizada uma representação vetorial de 4 pontos conhecidos da imagem carregada (Fig. 4(a)), colocados nos cantos da mesa, através de uma variante do algoritmo de Harris e Stephens (1988). De seguida, é aplicada a correção da distorção utilizando rotina de **MATLAB®** а lensdistort. Aplica-se então a correção da decorrente perspetiva da falta de perpendicularidade entre a câmara e o plano da mesa. Esta correção usa as coordenadas dos 4 alvos identificados para realizar uma transformação espacial de caráter projetivo. simultâneo. realiza-se Em uma transformação de rotação para criar um sistema de coordenadas xy, compatível com os pixéis da imagem, em que o eixo dos xx é vertical, o dos yy é horizontal e a origem é o alvo superior esquerdo (ver a Fig. 4(b)).

Com a imagem retificada, é aplicado um algoritmo de deteção de fronteiras do tipo Canny para identificar o contorno do modelo (Fig. 4(c). Os contornos paralelos identificados são intercetados por linhas verticais, pertencentes ao sistema de coordenadas xy, usado para determinar as coordenadas das fronteiras superior e inferior da barra. A aplicação de uma média aritmética às coordenadas destes contornos permite determinar as coordenadas do eixo médio da barra, que representa o seu perfil deformado (Fig. 4(d)). Os parâmetros mais relevantes da forma da vela são então determinados e comparados com os resultantes da aplicação do sistema de medição baseado nos sensores *FBG*.

### 3.3. Resultados do ensaio

Para avaliar o erro de medição associado ao conjunto de 20 sensores *FBG* instalados no modelo físico, e para validar o método descrito na secção 2, foi realizado um ensaio em que a barra compósita foi defletida em várias configurações deformadas típicas das dos perfis das velas sob ação do vento. A identificação do perfil deformado foi realizada pelos dois sistemas de monitorização descritos na secção 3.2, e as configurações deformadas obtidas foram comparadas.

A Fig. 5 apresenta 12 configurações deformadas selecionadas para análise. Estas configurações estão distribuídas em 3 níveis diferentes de profundidade. Em cada nível, criou-se assimetria gradualmente na configuração deformada através do aumento do ângulo de ataque e da diminuição do ângulo de saída. Os resultados obtidos a partir das medições de extensões baseiam-se em 10 secções instrumentadas. A elevada qualidade



Fig. 4 - Processamento de imagem: (a) Passo 1 - Correção da distorção; (b) Passo 2 - Correção da perspetiva; (c) Passo 3 - Deteção dos contornos do modelo; (d) Passo 4 - Determinação da configuração deformada do modelo e dos parâmetros da forma da vela.

das estimativas obtidas é percetível na sobreposição de deformadas obtidas pelas duas vias.

Em relação aos parâmetros mais relevantes dos perfis estudados, nota-se que a corda reduz progressivamente de 95 a 85cm entre as configurações 1 e 12. Entres configurações, a profundidade estas aumenta gradualmente de 5 a 20cm, ou seja, de 5% a 22% do comprimento da corda. A evolução da localização da profundidade máxima é distinta em cada nível de profundidade devido à assimetria imposta. A amplitude da variação da localização da profundidade máxima é mais menor elevada na configuração de profundidade máxima, para a qual toma 46cm valores entre e 27cm, correspondentes а 49% e 28% do comprimento da corda, respetivamente. Para níveis mais elevados de profundidade, esta oscila entre 43 e 39cm, equivalentes a 50% e 45% do comprimento da corda. A menor variação da localização da profundidade máxima nas deformadas com maior profundidade foi uma imposição do ensaio, considerando a gama linear de funcionamento dos sensores de deformação de ±2500µɛ. Estes níveis de deformação foram obtidos sistematicamente com o aumento da profundidade e da assimetria da deformada. Finalmente, os ângulos de ataque e de saída variam entre 0 e 50°.



Fig. 5 – Configurações deformadas estudadas.

### 4. INSTRUMENTAÇÃO ÓTIMA

O objetivo deste estudo é o de quantificar o número mínimo de secções transversais ou sensores a instrumentar no protótipo a fim de identificar a deformada da vela com suficiente precisão. Para este efeito, quantificou-se inicialmente o erro associado às configurações deformadas do modelo obtidas através de um número de secções instrumentadas inferior ao utilizado no ensaio original, mantendo, contudo, os dois sensores por secção. Numa segunda fase, realizou-se o mesmo estudo usando sensores localizados somente numa das faces, e, por último, utilizaram-se sensores distribuídos alternadamente em ambas as faces da barra.

Numa fase inicial, a redução do número de secções instrumentadas foi realizada utilizando os dados provenientes de *FBG* específicos igualmente distribuídos ao longo do modelo. Isto correspondeu a considerar o ensaio inicial como referência, compreendendo 10 secções com 20 *FBG*, e à reconstituição das configurações deformadas excluindo os dados de um número de secções instrumentadas progressivamente superior, até ao mínimo de 3 secções, com base em 6 *FBG*.

As configurações deformadas medidas pelos sistemas de monitorização baseados em sensores óticos e de visão foram comparadas através dos erros na determinação dos parâmetros do perfil da vela, definidos na Tabela 1. Estes erros referem-se ao comprimento da corda ( $E_c$ ), à profundidade máxima (expressa em relação à profundidade máxima de referência,  $E_d$ , ou ao rácio da profundidade máxima de referência  $E_{d/c}$ ), à localização da profundidade máxima de referência,  $E_l$ , ou ao rácio da localização da profundidade máxima de referência,  $E_l$ , ou ao rácio da localização da profundidade máxima de referência,  $E_l$ , ou ao rácio da localização da profundidade máxima de referência,  $E_l$ , ou ao rácio da localização da profundidade máxima de referência,  $E_l$ , ou ao rácio da localização da profundidade máxima de referência,  $E_l$ , ou ao rácio da localização da profundidade máxima de referência,  $E_l$ , ou ao rácio da localização da profundidade máxima de referência,  $E_l$ , ou ao rácio da localização da profundidade máxima de referência,  $E_l$ , ou ao rácio da localização da profundidade máxima de referência,  $E_l$ , ou ao rácio da localização da profundidade máxima de referência,  $E_l$ , ou ao rácio da localização da profundidade máxima de referência,  $E_l$ , ou ao rácio da localização da profundidade máxima de referência,  $E_l$ , e aos ângulos de entrada ( $E_e$ ) e de saída ( $E_f$ ).

A Fig. 6(a) apresenta os erros máximos de caracterização dos parâmetros avaliados para as 12 configurações deformadas estudadas, evidenciando que a instrumentação da barra usando 3 e 4 secções, correspondendo respetivamente a 6 e 8 *FBG*, conduz a erros de caracterização inaceitáveis. A instrumentação da barra em 5 secções, 10 *FBG*, conduz a erros de cerca de 0,3% para a corda, 1,4% para a profundidade máxima, 3,0% para a localização da profundidade máxima e 1,8° para os ângulos de entrada e de saída.

Considerando a simetria das extensões localizadas em lados opostos da barra, foi realizado um segundo estudo para avaliar a possibilidade de utilizar um sensor *FBG* por secção para a reconstituição da deformada do modelo. As extensões da face da barra onde não existem FBG são consideradas simétricas relativamente às da outra face, onde estão instalados FBG. Neste estudo, foi utilizada a configuração deformada 4, perfil com maior assimetria representada na Fig. 5. A primeira parte deste estudo foi realizada utilizando 10 FBG ao longo de um único lado da barra. De acordo com a representação de referência e as configurações deformadas obtidas na Fig. 6(b), foram obtidos erros inaceitáveis de cerca de 8% na profundidade máxima, evidenciados pelas diferenças significativas entre as formas deformadas do modelo reconstituídas usando os 2 sistemas de monitorização anteriormente referidos. Na segunda parte do estudo, foram consideradas apenas 5 secções, utilizando 5 FBG, localizados alternadamente ao longo das faces superior e inferior da barra, de acordo

com a representação na Fig. 6(c): 3 sensores numa face e 2 sensores na face oposta. Esta distribuição de sensores também conduziu a erros inaceitáveis de cerca de 16% na profundidade máxima. A razão para tais erros devese ao facto das extensões não serem exatamente simétricas, em consequência da localização inexata dos sensores e da influência da temperatura na deformação axial da barra.

## 5. INCERTEZA NAS MEDIÇÕES

A incerteza dos parâmetros da forma extraídos com base no sistema de fibra ótica foi avaliada quanto à exatidão na definição da espessura e da posição das secções instrumentadas, e em relação ao impacto do efeito da temperatura nas medições.

No que respeita à definição da espessura,

Tabela 1 - Erros de caracterização dos parâmetros da forma do perfil da vela.

imetro	Corda Profundidade máx		ade máxima	Localização da profundidade máxima		Ângulo de entrada	Ângulo de saída
Parâ	c (cm)	d (cm)	d/c (%)	1 (cm)	l/c (%)	e (°)	f (°)
Erro	$E_{c}(\%)$	$E_d(\%)$	$E_{d/c}(\%)$	E <sub>1</sub> (%)	$E_{l/c}(\%)$	E <sub>e</sub> (°)	$E_{\rm f}(^{\rm o})$
	$\frac{ c-c_{ref} }{c_{ref}}*100$	$\frac{ d-d_{ref} }{d_{ref}}*100$	$\frac{ d/c-d/c_{ref} }{d/c_{ref}}*100$	$\frac{ l-l_{ref} }{l_{ref}}*100$	$\frac{ l/c - l/c_{ref} }{l/c_{ref}} * 100$	$ e - e_{ref} $	$\left f-f_{ref}\right $
15 - - 0 <b>%)</b> - 5 - 0 - - 0 -	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1						
		(a)		<b>(b)</b>		( <b>c</b> )	
<b>Profundidade (cm)</b>	Referê H = 2.2 H = 2.1 H = 2.1 H = 2.1 H = 2.1 O	ncia 25mm (5 Sec.; 10FBG) im (10 Sec.; 20FBG) imm (10 Sec.; 20FBG) 50 rda (cm)	10 <b>b</b> <b>b</b> <b>c</b> <b>c</b> <b>c</b> <b>c</b> <b>c</b> <b>c</b> <b>c</b> <b>c</b>	- Referência - s = si (5 Sec.; 10FB - s = si + 2mm (10 Sec - s = si - 2mm (10 Sec - 50 Corda (cm)	G) GC; 20FBG) C.; 20FBG) G) G( C.; 20FBG) G) G) G) G) G) G) G) G) G)	Referência           ε2=ε2i; ε1=ε1i (           ε2=ε2i+50με; ε           Sec.; 20FBG)           Sec.; 20FBG)           Sec.; 20FBG)           50           Corda (cn	5 Sec.; 10FBG) 1=ε1i-50με (10 =ε1i+50με (10
	(d)			(e)		(f)	

Fig 6 – (a) Erros máximos de caracterização das 12 deformadas com o número de secções instrumentadas usando 2 FBG por secção; (b) e (c) Reconstituição da configuração deformada 4 com base em diferentes distribuições dos FBG nas duas faces da barra e (d), (e) e (f) respetivamente sob influência da espessura, da localização dos FBG e dos efeitos termo óticos nas extensões.

a configuração deformada 4 (Fig. 5) foi determinada com base nas espessuras de 2 e 2,5mm, usando 20 *FBG*, como mostra a Fig. 6(d). São também apresentadas a configuração de referência obtida usando a configuração com base em 10 *FBG* e uma espessura de 2,25mm, apresentada no ensaio descrito na secção 3.3, e o sistema de monitorização de visão. As diferenças nos perfis evidenciam a necessidade de caracterizar com precisão a espessura da barra.

Relativamente à incerteza da localização exata das secções instrumentadas ao longo da barra, a configuração deformada 4 foi avaliada com base num desfasamento da localização dos *FBG* sobre as faces da barra de  $\pm 2$ mm, usando 20 *FBG*, como mostra a Fig. 6(e). São também apresentadas a configuração de referência obtida usando o sistema de visão e a configuração com base em 10 *FBG* na localização real. As pequenas diferenças nos perfis mostram a reduzida sensibilidade ao erro longitudinal na definição da posição das secções instrumentadas.

No que se refere ao impacto dos efeitos termo óticos nas medições, e face à sensibilidade esperada dos FBG nas condições reais, a configuração deformada 4 foi determinada com base em 20 FBG uma variação diferencial para de temperatura de  $\pm 12^{\circ}$ C atuando nas faces do modelo, equivalente a aplicar extensões de  $\pm 50\mu\epsilon$ , como mostra a Fig. 6(f). São também apresentadas a configuração de referência obtida utilizando técnicas de visão e a configuração com base em 10 FBG e nas extensões reais. As diferenças nos perfis mostram a elevada sensibilidade dos FBG aos efeitos termo óticos e a necessidade de isolar os FBG ou de compensar estes efeitos.

## 6. CONCLUSÕES

O método de caracterização da forma desenvolvido e implementado permite obter estimativas dos parâmetros mais relevantes da forma de velas deformadas com erros máximos inferiores a 5% usando apenas cinco secções transversais instrumentadas, ou seja, 10 sensores FBG.

Relativamente às fontes de incerteza nas medições, a exatidão na definição da espessura da barra é o aspeto mais relevante, e os erros na definição da posição longitudinal dos *FBG* não são tão importantes. O ensaio térmico mostrou uma clara sensibilidade dos *FBG* aos efeitos termo óticos e a necessidade de isolar os *FBG* ou de compensar estes efeitos.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) sob a bolsa individual de doutoramento (SFRH/BD/70979/2010).

## REFERÊNCIAS

- Farrell, T. *et al.* 2010. System and method for real-time measurement of sail conditions and dynamics, Patente EUA 20100140462 A1, 10 Jun 2010.
- Ferreira, P. *et al.* 2016. Real-time flying shape detection of yacht sails based on strain measurements, Ocean Eng. (sub.).
- Harris, C. e Stephens, M. 1988. A combined corner and edge detector, 4th Alvey Vision Conf., Manchester, p. 147-151.
- Motta, D. *et al.* 2014. Experimental investigation of asymmetric spinnaker aerodynamics using pressure and sail shape measurements, Ocean Eng., 90, p. 104-118.
- Pelley, D.J.L. e Modral, O. 2008. VSPARS: A combined sail and rig shape recognition system using imaging techniques, 3rd High Performance Yacht Design Conference, Auckland, p. 57-67.
- Rocha, V. *et al.* 2015. Real-time shape measuring method and system, Patente Europeia 2,921,817 A1, 23 Set 2015