

## Sensores a fibra ótica encapsulados: produção e caracterização

## Encapsulated optical fiber sensors: production and characterization

### RESUMO

Rodrigo Sanas Zamboni  
[rodrigoszamboni@hotmail.com](mailto:rodrigoszamboni@hotmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Márcia Muller  
[mmuller@utfpr.edu.br](mailto:mmuller@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

O sensoriamento ótico ganhou destaque nos últimos anos. Por este motivo, os pesquisadores do LabLaser da UTFPR-CT tem trabalhado com a produção e caracterização de sensores a fibra ótica de macrocurvatura, tanto de forma individualizada quanto de forma multiplexada, para aplicações envolvendo a monitoração de forças. No presente trabalho é apresentado um protocolo de produção e caracterização destes sensores, a fim de adequar a sensibilidade e a faixa dinâmica de operação às aplicações, controlando duas variáveis: dureza do silicone e diâmetro do anel de fibra encapsulado. São apresentados detalhes da metodologia de produção e caracterização dos sensores, através da qual são coletados os espectros de transmissão sob a ação de forças externas, bem como um projeto de molde para encapsulamento. É apresentada a resposta de um sensor sob ação de cargas de até 500 g.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sensor de força. Macrocurvatura. Sensor a fibra ótica.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



### ABSTRACT

Optical sensing has gained prominence in recent years. For this reason, the researchers at the LabLaser at UTFPR-CT have been working with the production and characterization of macro-bend optical fiber sensors, both individually and in a multiplexed manner, for applications involving force monitoring. This work presents a production and characterization protocol for these sensors, in order to adapt the sensitivity and the dynamic range of operation to the applications, controlling two variables: silicone hardness and encapsulated fiber ring diameter. Details of the production methodology and characterization of the sensors are presented, through which the transmission spectra are collected under the action of external forces, as well as a mold design for encapsulation. The response of a sensor under loads of up to 500 g is shown.

**KEYWORDS:** Force sensor. Macro-bend. Fiber optic sensor.

## INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os sensores a fibra ótica, bem como as tecnologias derivadas destes dispositivos, ganharam posição de destaque nos estudos científicos. Setores industriais (principalmente os de comunicações óticas e optoeletrônica) experimentaram tais avanços de forma positiva, possibilitando o desenvolvimento de tecnologias de detecção por fibra ótica com menor custo, por exemplo. O uso da fibra ótica nos mais variados setores, submetidos às mais variadas técnicas ocorre devido à versatilidade do material. Intensidade luminosa, temperatura, pressão, deformação, campo magnético, são exemplos de grandezas físicas capazes de serem mensuradas a partir de um sensor a fibra ótica (KROHN, MACDOUGALL, MENDEZ, 2014).

O laboratório de Laser (LabLaser) da UTFPR-CT, tem trabalhado com estes sensores nos últimos anos, sendo que as atividades realizadas tem sido desenvolvidas com o apoio de estudantes de graduação participantes do programa de iniciação científica (PIBIC-CNPq). Os trabalhos publicados pelo grupo compreendem tanto o estudo, fabricação e aplicação de sensores isolados quanto sua multiplexação (KAMIZI et al., 2019), além de promover esta tecnologia para experimentos educacionais (DE CARVALHO et al., 2019).

Recentemente, os trabalhos tem buscado o desenvolvimento e a aplicação de sensores de macrocurvatura em fibra ótica (LUGARINI et al., 2019), que consistem em um anel de fibra encapsulado por um material elastomérico (KAMIZI et al., 2019). Ao acoplar a luz de uma fonte visível de banda larga na extremidade de entrada da fibra, coleta-se na extremidade de saída da fibra o espectro da luz transmitida. A interrogação deste sensor ocorre por meio da medição da sua transmitância, medida espectroscópica comparativa entre a intensidade de luz captada na saída em relação à intensidade de luz da entrada, matematicamente expressa pela razão entre as respectivas intensidades, para cada frequência do espectro (MOREIRA et al., 2009).

A base de funcionamento dos sensores consiste na alteração do sinal ótico transmitido devido à alteração na geometria da fibra encapsulada. Modelos simplificados expressam matematicamente a perda do sinal ótico de forma exponencial, tanto na variável do raio de curvatura ( $\exp(-R)$ ), como na variável do comprimento de onda ( $\exp(\lambda)$ ) (TSAO, CHENG, 2002). Desta maneira, uma carga posicionada sobre o sensor deforma o anel de fibra, que por sua vez modifica a transmitância e, por consequência, o espectro da luz transmitida pelo sensor.

Além disso, é detectado no espectro de transmissão da fibra franjas de interferência, relacionados ao fenômeno conhecido como *Whispering Gallery Mode* (WGM). O excerto abaixo, retirado de uma dissertação de mestrado, descreve este fenômeno:

Numa fibra curvada, nas interfaces entre a bainha e o revestimento polimérico ou entre o revestimento polimérico e o ar, parte do sinal óptico é refletido. Este sinal óptico refletido pode voltar para o núcleo, o que faz com que o valor das perdas totais diminuam criando espectros de atenuação com bandas. (MARTINS, 2009)

Neste trabalho, realizado ao longo de 6 meses no período entre 02/2020 e 07/2020, são apresentados resultados obtidos com um sensor de força baseado em macrocurvatura em fibra ótica. Os espectros de transmissão do sensor sob a

ação de forças externas permitem não só a detecção de forças mas também a determinação de suas magnitudes. Também é apresentado um protocolo que foi desenvolvido visando a produção e caracterização de sensores com características físicas diferentes. O protocolo prevê o estudo da influência de dois parâmetros construtivos dos sensores na resposta as forças aplicadas sobre os mesmos. Para tanto o protocolo prevê: (a) variar o diâmetro do anel de fibra encapsulado e (b) variar a rigidez do material elastomérico, dopando-o com pó de quartzo. Espera-se que variando-se estes parâmetros nos sensores de força, seja possível adequar a sensibilidade e a faixa dinâmica de operação às aplicações. O protocolo detalhado para a produção e caracterização dos sensores será utilizado na continuidade das atividades durante a vigência da cota PIBIC/CNPq contemplada para o biênio 2020-2021.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Fabricação dos sensores

Os sensores de macrocurvatura produzidos pelo grupo e utilizados nos trabalhos anteriores, consistiam num anel de fibra de 0,5 cm de diâmetro encapsulado em elastômero de silicone. Atualmente, o anel de fibra é feito sobre uma placa de acrílico com um orifício de 0,5 cm de diâmetro. Após moldar este laço, coloca-se uma segunda placa de acrílico, idêntica à primeira, sobre a fibra. Preenche-se o orifício com o silicone. Esta fase é denominada de pré-encapsulamento. Após a secagem, o conjunto formado pelo pequeno cilindro de silicone envolto pelo anel de fibra é colocado dentro do molde encapsulante, onde preenche-se novamente com silicone para formar o produto final (KAMIZI et al., 2017).

Para o protocolo proposto neste trabalho, objetiva-se variar tal diâmetro de 0,3 cm até 0,6 cm, com passo de 0,1 cm. Ao mesmo tempo, pretende-se modificar a rigidez do material encapsulante pela adição de pó de quartzo ao silicone (Dow Corning<sup>®</sup>, BX3-8001).

O molde cilíndrico encapsulante a ser utilizado será confeccionado por uma impressora 3D, a partir de um modelo gerado em software de desenho (CAD), com dimensões internas de 2,5 cm de diâmetro e 1 cm de altura. Além de maior do que o molde usado anteriormente, este conterà também uma faixa diametral, que servirá de referência para posicionar os anéis de fibra no centro do molde. Para a confecção dos anéis de fibra ótica (Monomodo, SSMF, DRAKTEL, G-652) com diferentes diâmetros, será utilizado como molde um bastão medidor de alianças (cone metálico).

A nova sequência para a produção do sensor consiste em preparar o silicone, confeccionar o laço de fibra e montar o dispositivo. A preparação do silicone será feita pesando – separadamente – as partes de silicone e de pó de quartzo que serão utilizadas. Já a confecção do laço de fibra será feita enrolando o guia ótico no bastão. Como o diâmetro do bastão aumenta gradativamente ao longo de seu comprimento, é possível confeccionar anéis de diferentes diâmetros. Serão feitas marcações no metal do bastão correspondentes aos diâmetros que serão estudados neste trabalho, com o intuito de padronizar os laços. Após o cumprimento destas etapas, o anel de fibra será posicionado dentro do molde

cilíndrico e em seguida o molde será preenchido com o material encapsulante. Nesta etapa, adiciona-se um catalisador líquido na mistura, com proporção de uma gota para cada grama de silicone. Este processo acelera o endurecimento da borracha.

### Caracterização dos sensores

A caracterização do sensor de força é realizada por meio do monitoramento do espectro da luz incidente através do comportamento da transmitância na fibra. O sistema de análise de dados utilizado é formado por um espectrômetro (HR4000, Ocean Optics) e uma fonte de luz (LS-01, Ocean Optics) conectados ao sensor. Esta rede é ligada ao computador de análise. A configuração do sistema de testagens consiste em um suporte de cargas feito com tubos de PVC, desenvolvido no LabLaser.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra uma imagem do sensor fabricado e testado para forças aplicadas sobre a sua superfície produzidas por cargas de até 500 g, com passo de 50 gramas (o incremento de carga foi feito de maneira manual). Tal sensor foi fabricado pelo processo utilizado atualmente no LabLaser, descrito anteriormente. Possui dimensões externas de 2,1 cm de diâmetro e 0,8 cm de altura (antigo molde de encapsulamento). Contém um anel de fibra de 0,5 cm de diâmetro.

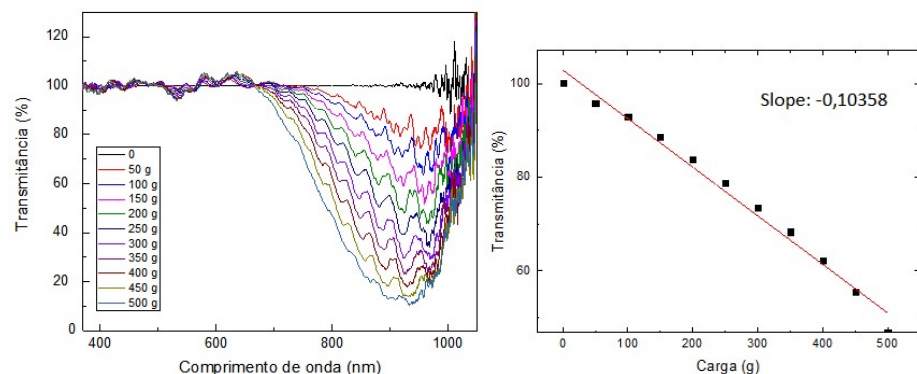
Figura 1 – Sensor a fibra ótica de macrocurvatura



Fonte: Autoria própria (2020).

Os espectros de transmissão do sensor foram tratados no software OriginLab®. Desta maneira, foi construído o gráfico de transmitância em função do comprimento de onda, explicitado à esquerda.

Figura 2 – Espectros coletados do sensor de força (esquerda); Curva de calibração do sensor, para comprimento de onda de 800 nm (direita)

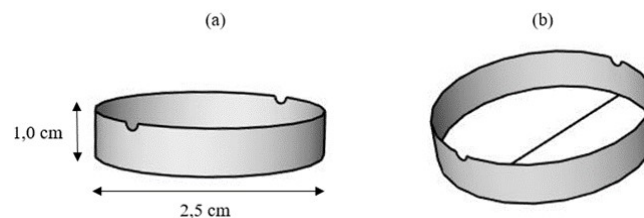


Fonte: Autoria própria (2020).

No gráfico da esquerda, o espectro representado pela linha preta corresponde ao sinal transmitido sem a aplicação de carga. Já possui perda de transmissão devido à curvatura inicial do anel, porém, para o sensor de força, esta é a referência, ou seja, 100% da transmissão. Quando são aplicadas cargas, a geometria do sistema muda, modificando, portanto, a transmitância. Em torno de 600 nm, observa-se dois pequenos máximos, referentes ao reacoplamento para o núcleo da fibra dos WGM. A partir de 700 nm aproximadamente, observa-se a diminuição da transmissão devido às perdas do sinal para a casca e os modos de radiação. Quanto maior a carga, maior a deformação do anel e maiores as perdas de sinal nesta região. O gráfico da direita mostra a curva de calibração do sensor para o comprimento de onda de 800 nm. Observa-se que a transmitância cai linearmente com o aumento da carga aplicada, demonstrando uma boa faixa dinâmica de operação nesse comprimento de onda e nesta faixa de cargas. O valor do coeficiente angular obtido da linearização da curva indica a sensibilidade do sensor, que neste caso foi de  $(-0,104 \pm 0,004)$  unidades de atenuação/g.

Os resultados seguintes referem-se ao projeto de molde para fabricação de sensores e ao protocolo desenvolvido para a fabricação e caracterização dos sensores de força baseados em macrocurvatura em fibra ótica. Apresenta-se, na Figura 3, o projeto do molde cilíndrico para produção usando software gráfico computacional (CAD) e impressora 3D. Este molde foi projetado a fim de permitir a produção de sensores cilíndricos com dimensões de 2,5 cm de diâmetro e 1 cm de altura, independentemente do diâmetro do anel de fibra ótica.

Figura 3 – Modelo tridimensional em escala do molde cilíndrico encapsulante. (a) vista lateral, com medidas; (b) vista panorâmica



Fonte: Autoria própria (2020).

Existem duas vantagens principais deste molde em relação ao usado atualmente: um melhor controle e repetibilidade das dimensões dos sensores produzidos e a presença de uma referência para posicionar o anel de fibra ótica.

O protocolo de produção e caracterização dos sensores a fibra ótica de macrocurvatura prevê as etapas de produção e testes dos moldes, produção de sensores diversos para testes e definição de parâmetros construtivos, produção e caracterização dos sensores de força.

O objetivo é construir sensores cilíndricos de mesmo formato externo, independente do diâmetro do anel de fibra encapsulada.

O protocolo prevê uma etapa de testes realizados a fim de definir os valores de concentração do pó de quartzo para a dopagem do silicone utilizado na encapsulação dos sensores. Para tanto, sensores com o menor e o maior diâmetro e diferentes durezas do material encapsulante devem ser testados sob a ação de diferentes cargas. Estes testes tem como objetivo definir os valores de A, B e C (vide quadro 1), bem como a faixa dinâmica de operação dos sensores. A etapa

seguinte prevê a caracterização dos sensores produzidos com diferentes parâmetros construtivos.

O quadro 1 ilustra os parâmetros propostos no protocolo desenvolvido para a produção dos sensores. Os valores de A, B, C, são genéricos, visto que os valores exatos de dopagem do silicone com pó de quartzo são definidos com base em testes.

Quadro 1 – Parâmetros do protocolo de produção e teste dos sensores

Diâmetro (cm)	Rigidez A	Rigidez B	Rigidez C
0,3	M1	M5	M9
0,4	M2	M6	M10
0,5	M3	M7	M11
0,6	M4	M8	M12

Fonte: Autoria própria (2020).

M1, M2, M3, etc., representam cada teste com os respectivos parâmetros fixados. Cada teste deve fornecer os dados de deformação do sensor com massas que variam de 0 gramas até 1500 gramas, com passo de 50 gramas. Com estes valores de carga, a pressão máxima aplicada sobre o sensor de força é de aproximadamente 3 N/m<sup>2</sup>.

## CONCLUSÃO

A caracterização do sensor baseado em macrocurvatura em fibra ótica forneceu uma resposta linear a cargas de até 500 gf aplicadas à sua superfície com sensibilidade de  $(-0,10358 \pm 0,00424)$  unidades de atenuação/g. Esta calibração permite o uso do sensor na determinação de cargas desconhecidas aplicadas sobre o sensor. O funcionamento do sensor é baseado nas alterações observadas no seu espectro de transmissão na região do visível devido a mudanças na geometria do anel quando da aplicação de forças sobre a superfície do encapsulamento.

O protocolo de fabricação e caracterização proposto para a produção de sensores com características construcionais diferentes permite avaliar o papel do diâmetro do anel e da dureza do elastômero tanto na sensibilidade do sensor, quanto na sua faixa dinâmica de operação.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à todos os integrantes do LabLaser, em especial aos meus amigos Natália Wendt e Vinícius de Carvalho. Faço questão de citar também minha orientadora Marcia Muller, por todo o conhecimento compartilhado. Por fim, agradeço o apoio financeiro recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERÊNCIAS

KROHN, D. A.; MACDOUGALL, T.; MENDEZ, A. **Fiber optic sensors: fundamentals and applications**. Bellingham, WA: Spie Press, 2014.

DE CARVALHO, V. et al. Promoting optical fibre sensor technology with educational experimental setup. **Physics Education**, v. 54, n. 4, p. 045005, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/ab1366/meta>. Acesso em: 26 set. 2020.

KAMIZI, M. A. et al. Multiplexing Optical Fiber Macro-Bend Load Sensors. **Journal of Lightwave Technology**, v. 37, n. 18, p. 4858-4863, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8742655>. Acesso em: 26 set. 2020.

KAMIZI, M. A. et al. A Smartphone Based Fiber Sensor for Recognizing Walking Patterns. **IEEE Sensors Journal**, v. 19, n. 21, p. 9782-9789, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8756298>. Acesso em: 26 set. 2020.

LUGARINI, D. et al. Fabrication of a Flexible Tactile Sensing System with Macro-Bend optical Fiber Sensors. *In*: LATIN AMERICAN WORKSHOP ON OPTICAL FIBER SENSORS, 1., 2019, Rio de Janeiro. **Proceedings...** São Caetano do Sul: SBMO, 2019. p. 73-77.

MARTINS, A. F. M. **Estudo de Fibras Ópticas Sujeitas a Curvaturas Apertadas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

TSAO, S.; CHENG, W. Simplified formula of bending loss for optical fiber sensors. **Fiber & Integrated Optics**, v. 21, n. 5, p. 333-344, 2002. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01468030290087723>. Acesso em: 26 set. 2020.

KAMIZI, M. A. et al. Fabrication and characterization of fiber Bragg grating based sensors for force measurements. *In*: 2017 SBMO/IEEE MTT-S INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENFE (IMOC), 1., 2017, Águas de Lindóia. **Anais...** São Caetano do Sul: SBMO, 2017. p. 1-5.