



# Produção e caracterização de sensores de macrocurvatura em fibra ótica

## *Production and characterization of optical fiber macro-bend sensors*

Rodrigo Sanas Zamboni\*, Marcia Muller†

### RESUMO

O sensoriamento ótico ganhou destaque nos últimos anos. Por este motivo, os pesquisadores do LabLaser da UTFPR-CT têm 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. Neste trabalho são apresentados resultados da caracterização destes sensores controlando duas variáveis: dureza do silicone encapsulante e diâmetro do anel de fibra, a fim de adequar a sensibilidade e a faixa dinâmica de operação às aplicações. 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. Observou-se que a sensibilidade dos sensores aumenta tanto com a diminuição da dureza do silicone quanto com a diminuição do diâmetro do anel de fibra. Os sensores apresentaram resposta linear para cargas na faixa entre 600 gf e 1800 gf.

**Palavras-chave:** sensor de força, macrocurvatura, dopagem, sensor a fibra ótica.

### ABSTRACT

Optical sensing has gained prominence in recent years. For this reason, researchers at the UTFPR-CT LabLaser have been working with the production and characterization of macro-bend optical fiber sensors, both individually and multiplexed, for applications involving force monitoring. In the present work, results from the characterization of these sensors are presented, controlling two variables: silicon hardness and diameter of the encapsulated fiber ring, in order to adapt the sensitivity and dynamic range of operation to the applications. Details of the production and sensor characterization are presented, through which the transmission spectra are collected under the action of external forces. It was observed that the sensors sensitivity increases with the silicone hardness and fiber loop diameter decrease. The sensors showed a linear response to loads in the range between 600 gf and 1800 gf.

**Keywords:** force sensor, macro-bend, doping, fiber optic sensor.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os sensores a fibra ótica ganharam posição de destaque nos estudos científicos. Setores industriais experimentaram avanços que possibilitaram o desenvolvimento de tecnologias de detecção por fibra ótica com menor custo. 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 por meio de um sensor a fibra ótica (KROHN, David A.; MACDOUGALL, Trevor; MENDEZ, Alexis, 2014).

---

\* Licenciatura em física, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil; [rzamboni@alunos.utfpr.edu.br](mailto:rzamboni@alunos.utfpr.edu.br)

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba; [mmuller@utfpr.edu.br](mailto:mmuller@utfpr.edu.br)



O laboratório de Laser (LabLaser) da UTFPR-CT tem trabalhado com estes sensores nos últimos anos. As atividades realizadas contam 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, Marcos Aleksandro et al., 2019), além de promover esta tecnologia para experimentos educacionais (DE CARVALHO, Vinícius et al, 2019).

Recentemente, os trabalhos dos bolsistas de iniciação científica estão direcionados no desenvolvimento e aplicação de sensores de macrocurvatura em fibra ótica (Lugarini, D.; Carvalho, V.; Kamizi M A; L.; MULLER, M., 2019), que consistem em um anel de fibra encapsulado por um material elastomérico (KAMIZI, Marcos Aleksandro et al., 2019). A interrogação deste tipo de 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 (MARTINS, 2009).

A base de funcionamento dos sensores consiste na alteração do sinal ótico transmitido devido à alteração na geometria do anel de fibra encapsulado. 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, Shyh-Lin; CHENG, Wen-Ming, 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, relacionadas ao fenômeno conhecido como *Whispering Gallery Mode* (WGM). Tal fenômeno compreende o reacoplamento do sinal ótico (para o núcleo da fibra) perdido devido à curvatura do guia (MARTINS, 2009).

A partir disso, esta pesquisa se propõe a responder a seguinte questão: Qual a influência dos parâmetros construtivos correspondentes a dureza do material encapsulante e variação do diâmetro do anel de fibra na sensibilidade dos sensores de força?

Para tanto, avaliou-se sensores com características construtivas diferentes. Foram desenvolvidos quatro conjuntos de sensores encapsulados em silicone contendo 0%, 15%, 30% e 45% de pó de quartzo em relação à massa total do sensor. Cada conjunto contém três sensores, com diâmetros do anel de fibra de 5 mm, 6 mm e 7 mm, totalizando 12 sensores. São apresentadas as sensibilidades dos sensores produzidos e também são discutidas as adequações da faixa dinâmica de operação dos distintos sensores às possíveis aplicações.

## 2 MÉTODO

### 2.1 Fabricação dos sensores

A sequência para a produção do sensor consiste em preparar o silicone, confeccionar o laço de fibra e montar o dispositivo. A preparação do silicone é feita pesando – separadamente – as partes de silicone e de pó de quartzo que serão utilizadas. Já a confecção do anel é feita enrolando a fibra ótica em uma broca de furadeira, com o respectivo diâmetro desejado (5 mm, 6 mm ou 7 mm). Com o intuito de fixar o nó do anel, despeja-se uma fina camada de esmalte sobre o mesmo. Após o cumprimento destas etapas, posiciona-se o anel de fibra sobre uma placa de acrílico com um orifício no meio. O tamanho do orifício é idêntico ao tamanho do laço de

fibra. Em seguida, posiciona-se uma segunda placa de acrílico (idêntica à primeira) acima deste conjunto, garantindo que os orifícios fiquem centralizados. Preenche-se o orifício com o silicone. Após a secagem, o conjunto formado pelo pequeno cilindro de silicone envolto pelo anel de fibra é colocado dentro do molde cilíndrico encapsulante (2,1 cm de diâmetro e 1 cm de altura), onde preenche-se novamente com silicone para formar o produto final (KAMIZI, Marcos A. et al., 2017). O controle do tamanho dos anéis é feito com um paquímetro e verificado durante todo o processo.

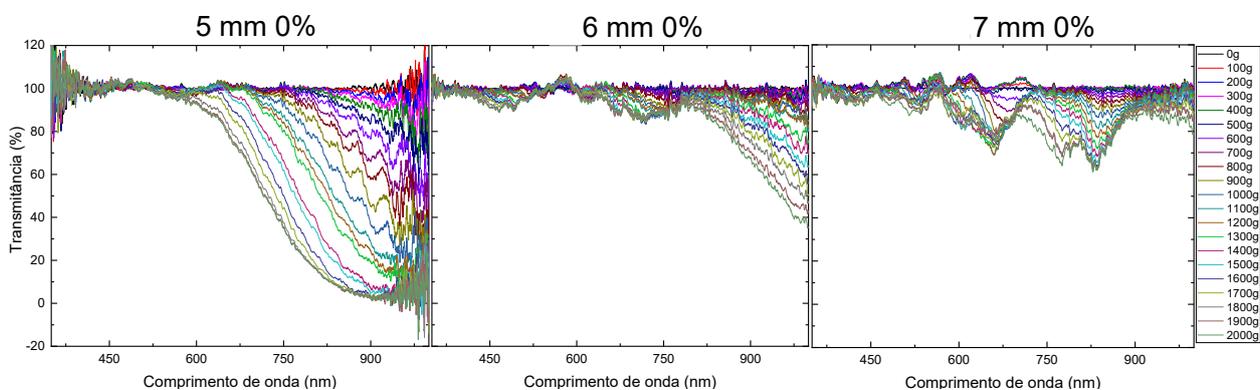
## 2.2 Caracterização dos sensores

A caracterização do sensor de força é realizada por meio do monitoramento do espectro transmitido. O sistema de análise de dados utilizado é formado por um espectrômetro (HR4000, *Ocean Optics*) e uma fonte de luz branca (LS-01, *Ocean Optics*) conectados ao sensor. A configuração do sistema de testagens permite que as cargas sejam aplicadas sobre a superfície dos sensores. Todos os 12 sensores foram interrogados por cargas de até 2000 g, com passo de 100 g. O espectro transmitido pelo sensor na ausência de carga aplicada é armazenado no espectrofotômetro como espectro de referência, correspondendo a uma transmissão de 100% para toda a faixa espectral avaliada. Quando são aplicadas cargas, a geometria do anel muda, modificando, portanto, a transmitância. Quanto maior a carga, maior a deformação do anel e maiores as perdas de sinal. A sensibilidade do sensor corresponde a atenuação do sinal por unidade de pressão aplicada. As atenuações são diferentes para cada comprimento de onda, por este motivo, para a aferição da sensibilidade destes sensores foi considerada a área abaixo de cada espectro, na faixa entre 700 nm e 900 nm. O valor obtido é associado à respectiva carga em um gráfico de área (porcentagem de atenuação x nm) por pressão. O coeficiente angular desta reta é a sensibilidade. O software OriginLab® foi utilizado para a análise dos espectros de transmissão e para realizar a integração numérica que fornece a área sob a curva na faixa espectral de interesse.

## 3 RESULTADOS

São mostrados na Fig. 1 os espectros de transmissão dos sensores com 0% de dopagem sob a ação de diferentes cargas.

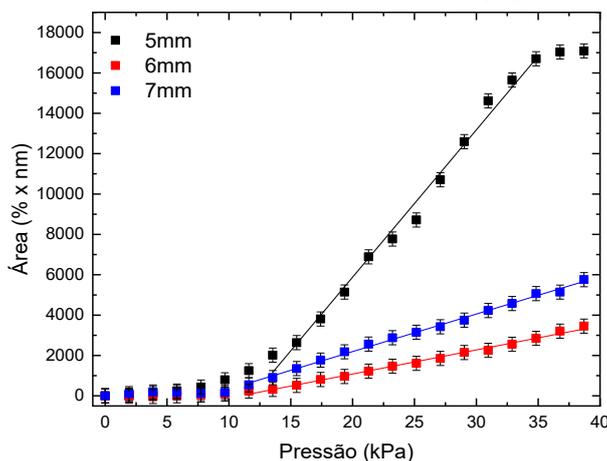
**Figura 1 – Espectros de transmissão dos sensores com diferentes diâmetros do anel de fibra e 0% de dopagem com pó de quartzo**



Fonte: Autoria própria (2021)

Os valores de área em função da carga aplicada para os sensores com 0% de dopagem com pó de quartzo estão apresentados na Fig. 2.

**Figura 2 – Área sob o espectro na faixa espectral entre 700 nm e 900 nm em função da carga aplicada sobre os sensores com diferentes diâmetros de anel e 0% de dopagem com pó de quartzo**



Fonte: Autoria própria (2021)

As incertezas presentes neste gráfico são provenientes das incertezas na medição das cargas de prova e do diâmetro externo do sensor. Para pressões na faixa compreendida entre aproximadamente 12 kPa (600 g) e 35 kPa (1800 g) as respostas dos sensores são lineares. Os coeficientes angulares das retas ajustadas aos pontos experimentais fornecem as sensibilidades apresentadas na Tab. 1. Os sensores com 45% de dopagem não responderam às cargas com valor máximo de 2000 g. Para esta dopagem, a interrogação deverá ser feita com uma faixa de massas maior que 2000 g.

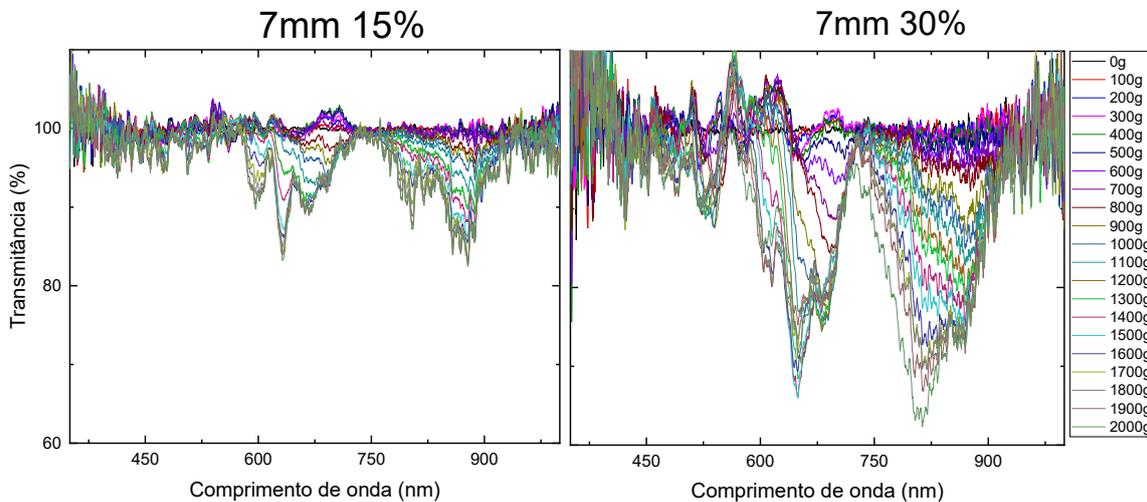
**Tabela 1 – Sensibilidade dos sensores (%nm/Pa)**

Diâmetro	Porcentagem de dopagem			
	0%	15%	30%	45%
5 mm	0,73	0,63	0,47	-
6 mm	0,12	0,07	0,004	-
7 mm	0,19	0,06	0,7	-

Fonte: Autoria própria (2021).

Na Fig. 3 são mostrados os espectros coletados para os sensores com 15% de pó de quartzo (esquerda) e 30% de pó de quartzo (direita), ambos com anel de fibra com 7 mm de diâmetro. A escala do eixo das ordenadas foi alterada para a faixa entre 60% e 110% a fim de melhorar a visualização das curvas.

**Figura 3 – Espectros de transmissão do sensor com 15% de dopagem com pó de quartzo (esquerda); espectros de transmissão do sensor com 30% de dopagem com pó de quartzo (direita)**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

O aumento do diâmetro do anel de fibra encapsulado potencializa os WGM e diminui a perda do sinal para a casca e modos de radiação na região acima de 700 nm. Este fato indica que os sensores com maior diâmetro interno respondem melhor à detecção espacial de forças em um sistema multiplexado, por exemplo.

#### 4 CONCLUSÃO

A caracterização dos sensores baseados em macrocurvatura em fibra ótica forneceu uma resposta linear a cargas entre 600 gf e 1800 gf (12 kPa e 35 kPa, respectivamente) aplicadas à sua superfície. A sensibilidade dos sensores diminuiu com o aumento da dopagem (para um mesmo diâmetro de fibra encapsulada), fato esperado pelos autores. Também se observou que a sensibilidade aumenta com a diminuição do diâmetro do anel de fibra. Um ponto de ajuste neste trabalho é a modificação da faixa de comprimentos de onda através da qual é calculada a sensibilidade dos sensores. Com a variação do diâmetro interno da fibra e a dopagem, os WGM podem ser potencializados, afetando a sensibilidade do sensor, estudo este que se encontra em andamento. O prosseguimento deste trabalho propõe a produção e caracterização de sistemas multiplexados contendo combinações de sensores de diferentes diâmetros e porcentagens de pó de quartzo.

#### AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer 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. **Fiber optic sensors: fundamentals and applications**. Research Triangle, NC: ISA, 2000.
- DE CARVALHO, Vinícius et al. Promoting optical fibre sensor technology with educational experimental setup. **Physics Education**, v. 54, n. 4, p. 045005, 2019.
- KAMIZI, Marcos Aleksandro et al. Multiplexing Optical Fiber Macro-Bend Load Sensors. **Journal of Lightwave Technology**, v. 37, n. 18, p. 4858-4863, 2019.
- KAMIZI, Marcos Aleksandro et al. A Smartphone Based Fiber Sensor for Recognizing Walking Patterns. **IEEE Sensors Journal**, v. 19, n. 21, p. 9782-9789, 2019.
- Lugarini, D.; Carvalho, V.; Kamizi M A; L.; MULLER, M. Fabrication of a Flexible Tactile Sensing System with Macro-Bend Optical Fiber Sensors. In: **Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors**, 2019, Rio de Janeiro. **Proceedings of the Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors**. São Caetano do Sul: SBMO, 2019. v. 1. p. 73-77.
- MARTINS, André Filipe Moreira. **Estudo de Fibras Ópticas Sujeitas a Curvaturas Apertadas**. 2009. f. 54. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física) – Universidade de Aveiro (UA), Aveiro.
- TSAO, Shyh-Lin; CHENG, Wen-Ming. Simplified formula of bending loss for optical fiber sensors. **Fiber & Integrated Optics**, v. 21, n. 5, p. 333-344, 2002.
- KAMIZI, Marcos 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 Conference (IMOC)**. IEEE, 2017. p. 1-5.