

Análise de Propriedades Elásticas de Sensores à Fibra Ótica Encapsulados em Elastômero

Natália Carolina Schvan Wendt, Vinicius de Carvalho,
Marcia Muller, José Luís Fabris
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR
Curitiba, Brasil

Francelli Klemba Coradin
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Curitiba, Brasil

Abstract— O trabalho apresenta uma proposta para a avaliação simultânea da sensibilidade à pressão aplicada e das características da encapsulação de sensores à fibra ótica baseados em macrocurvatura. Para tanto foram fabricados e avaliados sensores de macrocurvatura de geometria similar encapsulados em material elastomérico com dois diferentes parâmetros de rigidez. Para caracterização dos sensores, os mesmos foram submetidos a ensaios experimentais realizados com controle de pressão e deformação relativa. Os experimentos forneceram as curvas de calibração e as sensibilidades dos dispositivos à pressão e à deformação, bem como o módulo de elasticidade do material encapsulante.

Palavras chave — sensores, macrocurvatura, sensibilidade, módulo de Young.

I. INTRODUÇÃO

A operação de sensores de macrocurvatura em fibra ótica baseia-se na análise da atenuação do sinal ótico transmitido pela fibra, normalmente associada às variações de curvatura na fibra resultantes de alterações do parâmetro que se deseja medir. Perdas no sinal transmitido ocorrem devido ao acoplamento entre modos guiados e de radiação na região em que a fibra é curvada. Além destas, mudanças de intensidade no sinal transmitido também ocorrem pelo acoplamento entre modos guiados e modos de fuga que são refletidos nas interfaces das camadas externas da fibra denominados whispering gallery modes (WGM). Ambos os efeitos são dependentes de parâmetros geométricos da fibra ótica e das características espectrais da luz injetada na fibra [1], [2].

Tais sensores são fáceis de fabricar e podem ser codificados por intensidade, o que os torna atraentes devido ao baixo custo de fabricação e interrogação. Sensores de macrocurvatura têm sido aplicados na detecção de diferentes parâmetros, como pressão mecânica [3], [4], tensão elétrica [5], temperatura [6] e índice de refração [7].

Nesses dispositivos, a encapsulação utilizada é responsável por garantir a integridade dos transdutores, com reflexos nos parâmetros de operação como, por exemplo, a sensibilidade.

Sendo assim, é importante a caracterização dos materiais encapsulantes, visando o funcionamento satisfatório do sensor, além de viabilizar adequações de acordo com a aplicação pretendida [8].

Quando são aplicadas tensões mecânicas (σ) em determinados materiais elásticos, deformações relativas (ε) podem ocorrer de forma proporcional, como descrito por (1) para materiais na região elástica. A constante de proporcionalidade é chamada de módulo de elasticidade ou módulo de Young (G).

$$\sigma = G\varepsilon \quad (1)$$

O módulo de Young é um parâmetro físico fundamental para a engenharia de materiais, estando associado ao grau de rigidez de um material sólido. Dependente da composição química, microestruturas e defeitos, torna-se uma propriedade intrínseca do material [9].

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para a análise de sensores a fibra ótica baseados em macrocurvatura, possibilitando a análise da sensibilidade e faixa dinâmica de operação dos dispositivos de acordo com a rigidez do material encapsulante. Para isso, foram realizados ensaios experimentais com controle de pressão sobre os dispositivos e com controle de deformação relativa. Foram levantadas curvas de calibração que possuem características associadas à elasticidade da encapsulação; nesse sentido, também foi possível estimar o módulo de Young dos materiais encapsulantes.

II. MÉTODOS

Para fabricação do sensor, um segmento de fibra ótica em anel (SSMF, G-652, Draktel) foi encapsulado em material elastomérico de silicone (Dow Corning, BX3-8001). Foram fabricados dois sensores de formato cilíndrico com diferentes concentrações de pó de quartzo (0% e 33%) adicionados ao

silicone junto ao catalisador [4], com a finalidade de alterar a rigidez mecânica do material. A macrocurvatura na fibra é formada por um anel com diâmetro de $(4,00 \pm 0,01)$ mm e o plano formado pelo anel é alinhado perpendicularmente à base do cilindro elastomérico e posicionado na parte central do mesmo. Após a cura do elastômero, o sensor cilíndrico resultante, representado na Fig. 1, tem base com diâmetro de $(16,00 \pm 0,01)$ mm e altura de $(11,00 \pm 0,01)$ mm.

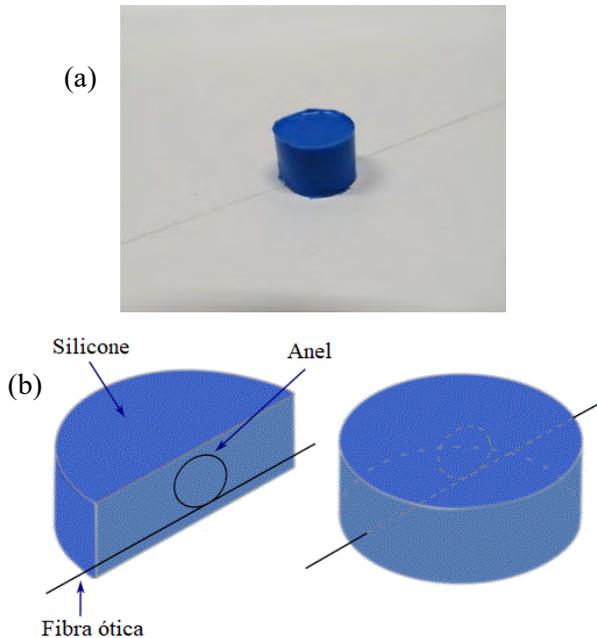


Fig.1. (a) Foto do sensor; (b) Diagrama esquemático do sensor (direita), mostrando um corte transversal do dispositivo (esquerda) para evidenciar o posicionamento da fibra ótica com a macrocurvatura em anel.

Para a interrogação do sensor foi utilizada uma lâmpada halógena de banda larga (LS-1, Ocean Optics, 360 a 2000 nm), juntamente com um espectrômetro UV-Vis a fibra ótica (HR4000, Ocean Optics, resolução de 6,2 nm). O sistema é interligado a um computador que realiza a coleta e exibição dos dados espectrais.

Os espectros de atenuação do sensor sob a ação de pressão ou deformação são relativos ao sinal de referência correspondente ao espectro de transmissão do sensor na ausência de carga aplicada.

Testes de resposta à pressão foram realizados para caracterizar as sensibilidades dos sensores. Os ensaios experimentais foram realizados utilizando um aparato no qual o sensor foi posicionado abaixo de um suporte de massas que o pressiona uniformemente, conforme o esquema da Fig. 2. A pressão corresponde a carga aplicada sobre a área da base do cilindro do sensor.

As curvas de calibração dos sensores foram determinadas numa faixa estendida de pressões entre $(8,18 \pm 0,35)$ kPa e $(78,86 \pm 0,35)$ kPa com passos de $(2,44 \pm 0,35)$ kPa.

Nos testes de deformação foi utilizado um parafuso micrométrico na configuração apresentada na Fig. 2. Foram realizadas deformações relativas de até $(184,24 \pm 0,09)$ mε com

passos de $(9,18 \pm 0,09)$ mε. A deformação relativa é calculada levando em conta a deformação aplicada pelo parafuso micrométrico e a altura inicial do sensor.

Também foi realizado um ensaio experimental de pressão para investigar a repetibilidade de cada um dos sensores. Ambos foram submetidos a três ciclos de pressões entre $(8,18 \pm 0,35)$ kPa e $(17,94 \pm 0,35)$ kPa em passos de $(2,44 \pm 0,35)$ kPa, com intervalos de 10 minutos entre ciclos.

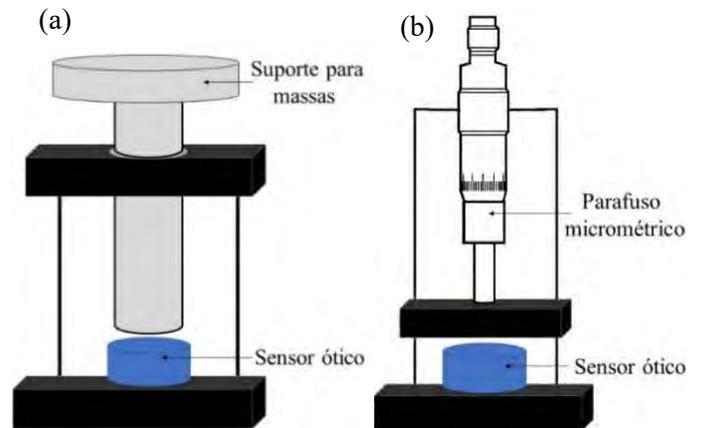


Fig.2. (a) Diagrama esquemático do aparato experimental de pressão; (b) Diagrama esquemático do aparato experimental de deformação.

III. RESULTADOS

A Fig. 3, referente ao teste de repetibilidade, mostra os espectros de atenuação em função das pressões aplicadas para os três ciclos de medições realizados com um mesmo sensor (0%). As barras de erros representam os desvios-padrão dos três ciclos.

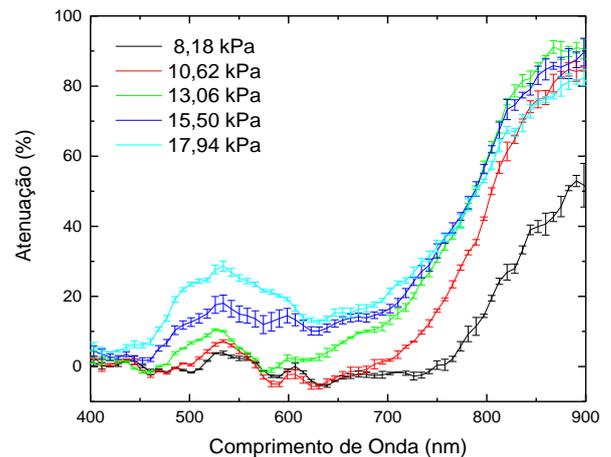


Fig.3. Espectros de atenuação média para cada valor de pressão aplicada indicando repetibilidade.

Abaixo de 700 nm a atenuação é dominada por efeitos de acoplamento entre modos guiados e WGM, enquanto que acima de 700 nm a atenuação é principalmente devida às perdas por acoplamento entre modos guiados e de radiação resultantes das alterações na macrocurvatura da fibra [10].

A Fig. 4 apresenta os espectros de atenuação apenas para algumas das pressões aplicadas para melhor visualização.

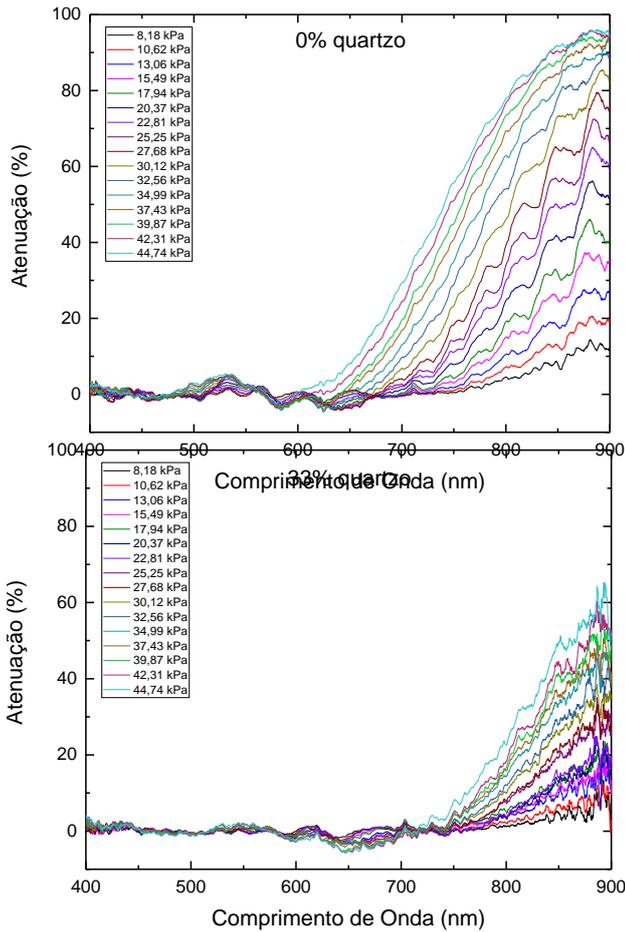


Fig.4. Espectros de atenuação em função da pressão para o sensor sem adição de quartzo e para o sensor com 33% de adição de quartzo ao silicone encapsulante.

A análise quantitativa da resposta do sensor é realizada através do cálculo da área sob a curva referente a cada pressão aplicada, tomando como linha de base a atenuação sem força aplicada. A região analisada foi a banda espectral entre 700 nm a 900 nm, onde a atenuação é devida majoritariamente às perdas por curvatura da fibra.

No gráfico da Fig. 5 são apresentadas as curvas de resposta e de calibração para os dois sensores distintos, sem e com a adição de pó de quartzo ao elastômero, 0% e 33% de quartzo respectivamente. As análises foram restritas aos valores de pressão de até 40 kPa, para a faixa espectral escolhida na qual os sensores têm respostas aproximadamente lineares. Verifica-se que a inclinação de cada reta depende da quantidade de quartzo na composição da borracha, de modo que a sensibilidade dos dispositivos é relacionada com a rigidez do material encapsulante.

As sensibilidades à pressão encontradas foram de $(0,410 \pm 0,010)\% \cdot \text{nm}/\text{Pa}$ e $(0,117 \pm 0,007)\% \cdot \text{nm}/\text{Pa}$ para 0% e 33% de pó de quartzo, respectivamente.

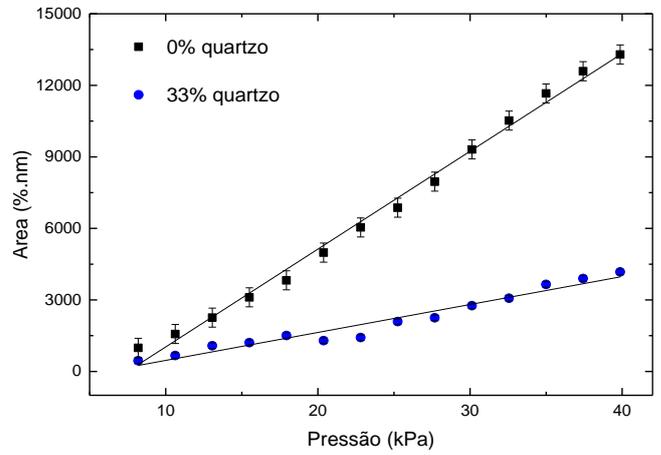


Fig.5. Resposta dos sensores em termos das áreas sob o espectro de atenuação para cada pressão aplicada.

A análise da resposta do sensor à deformação relativa é avaliada por meio do cálculo das áreas sob as curvas de atenuação do sensor, da mesma maneira que para a análise de pressão.

A Fig. 6 apresenta os espectros de atenuação para apenas algumas das deformações realizadas para melhor visualização.

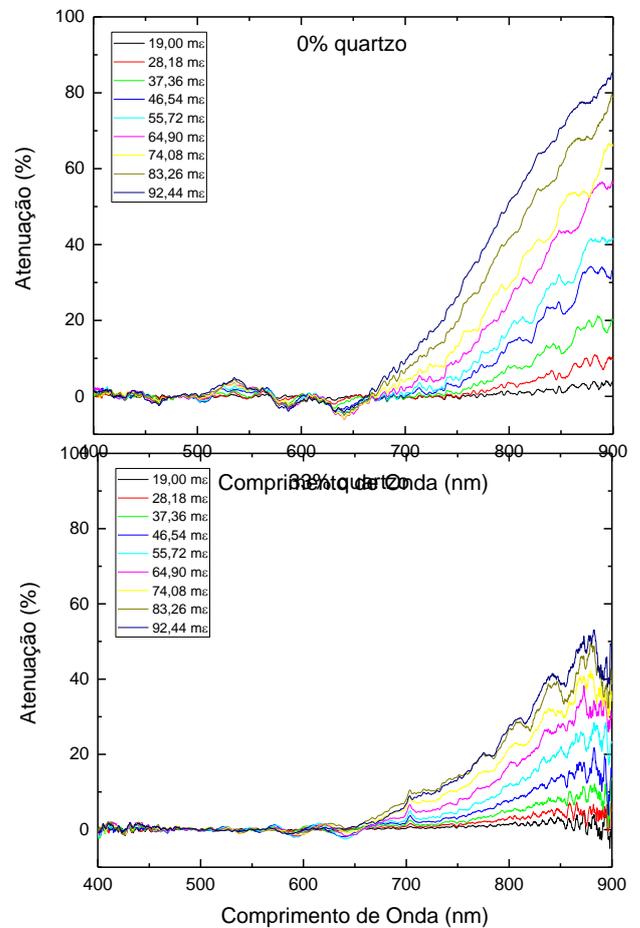


Fig.6. Espectros de atenuação em função da deformação relativa para o sensor sem adição de quartzo e para o sensor com 33% de adição de quartzo ao silicone encapsulante.

No gráfico da Fig. 7 são apresentadas as curvas de resposta e de calibração para os dois sensores distintos, 0% e 33% de quartzo. As análises foram restritas a um limite de compressão de 1 mm (0,09 ϵ), onde o sensor tem uma resposta aproximadamente linear. Para 0% e 33% de pó de quartzo, as sensibilidades foram de $(1,35 \pm 0,05) \times 10^5$ %./nm/ ϵ e $(7,79 \pm 0,26) \times 10^4$ %./nm/ ϵ , respectivamente.

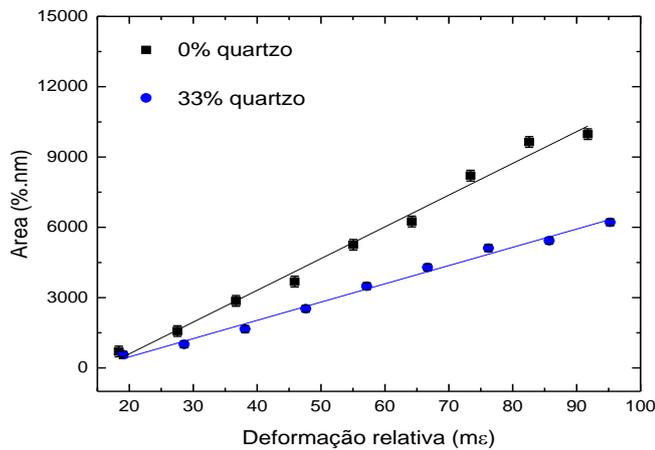


Fig.7. Resposta dos dois sensores em termos das áreas sob o espectro de atenuação em função da deformação relativa.

Para se obter o módulo de Young dos materiais encapsulantes dos sensores é preciso uma relação entre pressão e deformação relativa, de acordo com (1). Os eixos verticais da Fig. 5 e da Fig. 7 apresentam os valores de área sob a curva do espectro (A). Portanto, fazendo a razão entre os coeficientes angulares do gráfico de deformação e de pressão estima-se o módulo de Young para cada sensor, de acordo com (2).

$$\frac{\frac{A}{\epsilon}}{\frac{A}{\sigma}} = \frac{\sigma}{\epsilon} = G \quad (2)$$

Para o sensor com 0% de quartzo foi obtido um módulo de Young $G_{0\%} = (0,33 \pm 0,01)$ MPa, enquanto que para o sensor com 33% de quartzo foi $G_{33\%} = (0,67 \pm 0,05)$ MPa. Os resultados obtidos estão dentro da faixa de valores de módulo de Young para borrachas de silicone fornecidos na literatura [11].

A Tabela I apresenta as sensibilidades determinadas bem como os módulos de elasticidade associados a cada concentração de quartzo utilizada no material de encapsulação dos dispositivos.

TABELA I: SENSIBILIDADE DOS SENSORES À PRESSÃO E SEUS RESPECTIVOS MÓDULOS DE YOUNG

Concentração de quartzo (%)	Sensibilidade (unid. arb./Pa)	Módulo de Young, G (MPa)
0	$0,410 \pm 0,010$	$0,33 \pm 0,01$
33	$0,117 \pm 0,007$	$0,67 \pm 0,05$

IV. CONCLUSÃO

A metodologia experimental de caracterização apresentada neste trabalho permite avaliar características operacionais dos sensores de macrocurvatura encapsulados em materiais elastoméricos ao mesmo tempo em que é obtido o coeficiente de elasticidade do material. Nesse sentido, a sensibilidade e faixa de operação do sensor podem ser adequadas às aplicações desejadas, determinando regiões de linearidade para operação que são fortemente dependentes do módulo de Young do material encapsulante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido das agências de financiamento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] S. H. Nam, S. Yin. "High-Temperature Sensing Using Whispering Gallery Mode Resonance in Bent Optical Fibers". IEEE photonics technology letters, vol. 17, no. 11, Nov 2005.
- [2] Q. Wang, G. Farrell, T. Freir. "Theoretical and experimental investigations of macro-bend Losses for standard single mode fibers". Optics Express, vol. 13, no. 12, Jun 2005.
- [3] W. -C. Wang, W. R. Ledoux, B. J. Sangeorzan and P.G. Reinhall, "A shear and plantar pressure sensor based on fiber-optic bend loss," Journal of Rehabilitation Research & Development, vol. 42, no. 3, pp. 315-326, May/June 2005.
- [4] M. A. Kamizi, L. H. Negri, J. L. Fabris, M. Muller, "A Smartphone Based Fiber Sensor for Recognizing Walking Patterns," IEEE Sensors Journal, vol. 19, no. 21, pp 9782-9789, Nov. 2019.
- [5] P. Wang, Y. Semenova, Q. Wu and G. Farrell, "A Fiber-Optic Voltage Sensor Based on Macrobending Structure," Optics and Laser Technology, vol. 43, no. 4, pp. 922-924, Jan 2011.
- [6] A. T. Moraleda, C. V. Garcá, J. Z. Zaballa and J. Arrue, "A Temperature Sensor Based on a Polymer Optical Fiber Macro-Bend," Sensors, vol. 13, pp. 13076-13089, Sept 2013.
- [7] P. Wang, Y. Semenova, Q. Wu, G. Farrell, Y. Ti and J. Zheng, "Macrobending single-mode fiber-based refractometer," Applied optics, vol. 48, n. 31, pp. 6044-6049, Nov 2009.
- [8] M. A. Kamizi, M. A. Pedroso, J. L. Fabris and M. Muller, "Fabrication and characterization of fiber Bragg grating based sensors for force measurements," 2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), pp. 1-5, 2017.
- [9] W. D. Callister Júnior, Ciência e Engenharia de Materiais, 5th ed., Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- [10] M. A. Kamizi, D. Lugarini, R. Fuser, L. H. Negri, J. L. Fabris and M. Muller, "Multiplexing Optical Fiber Macro-Bend Load Sensors," Journal of Lightwave Technology, vol. 37, no.18, pp. 4858-4863, Sept. 2019.
- [11] "Overview of materials for Silicone Rubber". Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b30885d0d3c42f489961abb0eccc494b>. Acesso em: 06 mar. 2020