UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO – UFES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ELITON MATHIAS MORAIS

ANÁLISE DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DE NÍVEL DE LÍQUIDO COM DUAS FBGS EMBUTIDAS EM DIAFRAGMA

Vitória ES
Março de 2022

Eliton Mathias Morais

ANÁLISE DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DE NÍVEL DE LÍQUIDO COM DUAS FBGS EMBUTIDAS EM DIAFRAGMA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Gomes Leal Junior
Coorientador: Prof. Dra. Maria José Pontes

Vitória ES
Março de 2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

Morais, Eliton Mathias, 1996-
M827a Análise de sistema de medição de nível de líquido com duas FBGs embutidas em diafragma / Eliton Mathias Morais. - 2022.
75 f. : il.

Orientador: Arnaldo Gomes Leal Junior.
Coorientadora: Maria José Pontes.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Grade de Bragg. 2. Nível de líquido. 3. Borracha de silicone. 4. Polidimetilsiloxano. 5. Sensores de pressão. 6. Borracha nitrílica. I. Leal Junior, Arnaldo Gomes. II. Pontes, Maria José. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

Eliton Mathias Morais

ANÁLISE DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DE NÍVEL DE LÍQUIDO COM DUAS FBGS EMBUTIDAS EM DIAFRAGMA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Dissertação aprovada. Vitória - ES, 7 de Março de 2022

Prof. Dr. Arnaldo Gomes Leal Junior
Orientador

Prof. Dra. Maria José Pontes
Coorientadora

Prof. Dr. Anselmo Frizera Neto
Examinador

Prof. Dr. Carlos Alberto Ferreira Marques
Examinador Externo

Vitória ES

Março de 2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por ter me sustentado até aqui, sem Ele jamais teria alcançado essa conquista tão importante em minha vida. Aos meus pais por terem me apoiado em todos os momentos da minha vida. E aos colegas e amigos de laboratório. E em especial a Samilly por ter me incentivado a fazer o mestrado e por toda paciência nos momentos mais difíceis. Gostaria de agradecer à Petrobras – Processo 2017/00702-6 e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) – Processo 84336650 que financiaram os materiais necessários para este estudo. E também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos. Por fim, gostaria de agradecer aos meus orientadores por todo apoio, incentivo e dedicação.

“Sou artista o suficiente para inspirar-me livremente na minha imaginação. A imaginação é mais importante que o conhecimento. O conhecimento é limitado. A imaginação abrange o mundo inteiro.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Atualmente, existe uma demanda crescente para o monitoramento de níveis de líquidos utilizando sensores de fibra óptica em diversas áreas da indústria devido as várias vantagens apresentadas pelas fibras ópticas e pela importância desse monitoramento nas indústrias [1, 2]. Apresenta-se nesta dissertação um sistema sensor de nível de líquido de fibra óptica baseado em um par de grades de Bragg (FBG, do inglês *Fiber Bragg Gratings*) de fibra, embutidos em um diafragma de borracha de silicone circular (polidimetilsiloxano – PDMS, do inglês *polydimethylsiloxane*) e em um diafragma de borracha nitrílica. São apresentados os princípios de medição destes sensores. O sensor de diafragma de borracha de silicone possui cerca de 2,2 mm de espessura e 45 mm de diâmetro. Afim de analisar a linearidade e sensibilidade do sensor, o diafragma foi submetido a testes de compressão, bem como carregamento e descarregamento de nível de líquido. Os testes de flexão, compressão e aumento do nível de líquido mostraram que a inserção de duas FBGs (coeficiente de determinação ajustado (R_a^2) igual a 0,995 para flexão, 0,951 para compressão e 0,997 para nível de líquido) no diafragma resultou em um sistema com maior linearidade do que com FBGs individuais. No entanto, o teste de diminuição do nível de água mostrou que o sistema contendo ambas FBGs (R_a^2 igual a 0,999) apresentou maior linearidade quando comparado com a FBG2 (0,973) e linearidade igual à da FBG1 (0,999). A caracterização da temperatura também foi realizada e verificou-se que a sensibilidade à variação de temperatura da FBG1 foi de 11,40 pm/°C e para a FGB2 foi de 10,03 pm/°C. A sensibilidade à temperatura foi melhorada para ambas FBGs quando comparadas às FBGs não revestidas com valores típicos de 9,75 pm/°C. Portanto, o sistema sensor baseado em FBG proposto é capaz de medição simultânea de força e temperatura em um arranjo compacto embutido em diafragma. O sensor de diafragma de borracha nitrílica foi construído com 3 camadas de borracha, sendo duas FBGs inseridas no diafragma. Foram construídas 4 configurações diferentes, onde variou-se a espessura da camada central. Para analisar a linearidade e sensibilidade do sensor, o diafragma foi submetido a testes de flexão, onde nas 4 configurações a linearidade do sistema com duas FBGs é melhor que o uso de apenas uma FBG, com exceção da configuração 3, em que a FBG1 apresentou maior linearidade e a FBG2 menor. A caracterização da temperatura para todas configurações resultou em um valor menor que a sensibilidade normalmente encontrada em FBGs não revestidas (9,75 pm/°C).

Palavras-chave: Grade de Bragg; nível de líquido; borracha de silicone; polidimetilsiloxano; sensores de pressão; borracha nitrílica.

ABSTRACT

Currently, there is a growing demand for monitoring liquid levels using fiber optic sensors in several areas of the industry due to the various advantages presented by optical fibers and the importance of this monitoring in industries [1, 2]. This master's thesis presents a fiber optic liquid level sensor system based on a pair of fiber Bragg gratings (FBGs) embedded in a circular silicone rubber (polydimethylsiloxane - PDMS) diaphragm and a nitrile rubber diaphragm. The measurement principles of these sensors are presented. The silicone rubber diaphragm sensor is about 2.2 mm thick and 45 mm in diameter. To analyze the linearity and sensitivity of the sensor, the diaphragm was subjected to compression tests as well as liquid level loading and unloading. Flexion, compression and liquid level rise tests showed that the insertion of two FBGs (adjusted coefficient of determination (R_a^2) equal to 0.995 for flexion, 0.951 for compression and 0.997 for liquid level) in the diaphragm resulted in a system with greater linearity than with individual FBGs. However, the water level decrease test showed that the system containing both FBGs (R_a^2 equal to 0.999) showed greater linearity when compared to FBG2 (0.973) and linearity equal to that of FBG1 (0.999). Temperature characterization was also performed and presented a sensitivity to temperature variation of 11.40 pm/°C for FBG1 and 10.03 pm/°C for FBG2. Temperature sensitivity was improved for both FBGs when compared to uncoated FBGs with typical values of 9.75 pm/°C. Therefore, the proposed FBG-based sensor system is capable of simultaneous force and temperature measurement in a compact diaphragm-embedded system. The nitrile diaphragm sensor is constructed of 3 layers of rubber with two FBGs inserted into the diaphragm. Four configurations were constructed, where the thickness of the central layer was varied. To analyze the linearity and sensitivity of the sensor, the diaphragm was submitted to bending tests, where in the 4 configurations the linearity of the system with two FBGs is better than the use of only one FBG, with the exception of configuration 3, in which the FBG1 presented higher linearity and lower FBG2. Finally, configuration 4 presented a system with greater linearity with two FBGs, since the R^2 of the response of both FBGs (0.952) is greater than that of FBG1 (0.948) and FBG2 (0.818) alone. Temperature characterization for all configurations resulted in a value lower than the sensitivity normally found in uncoated FBGs (9.75 pm/°C).

Keywords: Bragg fiber; liquid level; Silicone rubber; polydimethylsiloxane; pressure sensors; nitrile rubber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (a) Princípio da propagação da luz em fibras de índice degrau. (b) Princípio da propagação da luz em fibras de índice gradual. 21
Figura 2. Esquema da geometria de máscara de fase para inscrição de grades de Bragg em fibras ópticas. 26
Figura 3. Representação esquemática da montagem e conexão do sensor e a distribuição de tensão no diafragma. 29
Figura 4. Estrutura do sensor proposto. 30
Figura 5. Diagrama esquemático do sensor de nível líquido. 31
Figura 6. Sensor de pressão e temperatura baseado em um diafragma oblongo. 32
Figura 7. Passos para a fabricação de diafragmas com FBG. 33
Figura 8. A estrutura do sensor de pressão do tipo diafragma FBG. 34
Figura 9. Representação esquemática da configuração experimental usada para caracterizações dos testes de (a) flexão e (b) compressão. 35
Figura 10. Representação esquemática da configuração experimental usada para caracterizações de teste de nível de líquido. 36
Figura 11. Estrutura do diafragma de borracha de silicone com duas FBGs inseridas. 37
Figura 12. Estrutura da parte (a) frontal e (b) traseira do suporte do diafragma. 38
Figura 13. (a) Visão geral da máquina de ensaio de flexão de diafragmas. (b) Detalhamento dos elementos da máquina de ensaio de flexão de diafragmas. 39
Figura 14. (a) Foto mostrando os tubos de PTFE inserido entre as camadas de borracha nitrílica do diafragma. (b) Foto da superfície superior do diafragma. (c) Desenho esquemático da construção do diafragma de borracha nitrílica. 40
Figura 15. (a) Visão geral do torno equipado para realizar a usinagem da borracha nitrílica. (b) Detalhamento dos elementos que compõem a máquina de usinagem. 41
Figura 16. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para (a, c) FBG1 e a (b, d) FBG2. 44
Figura 17. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da força de flexão para (a) FBG1 e a (b) FBG2. 47
Figura 18. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da força de compressão para (a) FBG1 e a (b) FBG2. 48

Figura 19. Respostas temporais durante a subida e descida do nível do líquido para FBG1 e FBG2. 48
Figura 20. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da elevação do nível do tanque para (a) FBG1 e a (b) FBG2. 49
Figura 21. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da redução do nível do tanque para (a) FBG1 e a (b) FBG2. 50
Figura 22. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para (a) FBG1 e a (b) FBG2 da configuração 1 do diafragma. 51
Figura 23. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para (a) FBG1 e a (b) FBG2 da configuração 2 do diafragma. 52
Figura 24. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para (a) FBG1 e a (b) FBG2 da configuração 3 do diafragma. 52
Figura 25. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para (a) FBG1 e a (b) FBG2 da configuração 4 do diafragma. 53
Figura 26. Resposta do comprimento de onda de Bragg durante o avanço e o recuo do pistão para a FBG1 e FBG2: (a) configuração 1, (b) configuração 2, (c) configuração 3 e (d) configuração 4 do diafragma. 55
Figura 27. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função do aumento da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 1 do diafragma. 56
Figura 28. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função do aumento da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 2 do diafragma. 57
Figura 29. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função do aumento da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 3 do diafragma. 58
Figura 30. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função do aumento da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 4 do diafragma. 58
Figura 31. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg dos ciclos de flexão em função da diminuição da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 1 do diafragma. 59

Figura 32. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg dos ciclos de flexão em função da diminuição da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 2 do diafragma. 59
Figura 33. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg dos ciclos de flexão em função da diminuição da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 3 do diafragma. 60
Figura 34. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg dos ciclos de flexão em função da diminuição da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 4 do diafragma. 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões dos Diafragmas. 42
Tabela 2. Comparação da sensibilidade e linearidade no teste de temperatura entre as configurações de diafragma de borracha nitrílica. 54
Tabela 3. Comparação da sensibilidade e linearidade no teste de flexão entre as configurações de diafragma de borracha nitrílica. 61
Tabela 4. Comparação entre sensores FBG embutidos em diafragma para avaliação multiparâmetros. 63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS - *Acrylonitrile butadiene styrene* (Acrilonitrila butadieno estireno)

CYTOP - *Cyclic transparent optical polymer fiber* (Fibra de polímero óptico transparente cíclico)

EMI - Electromagnetic Interference (Interferência Eletromagnética)

FBG - *Fiber Bragg Gratings* (Grades de fibra de Bragg)

FDM - *Fused deposition modeling* (Modelagem por fusão e depósito)

MMFs - *Multi-mode fibers* (Fibra multimodo)

mPOFBG - *Microstructured polymer fiber optic Bragg gratings* (Grades de Bragg em fibra óptica microestruturada de polímero)

PDMS - *Polydimethylsiloxane* (Polidimetilsiloxano)

PE - *Polyethylene* (Polietileno)

PLA - *Polylactic acid* (Acido Poliláctico)

PP - *Polypropylene* (Polipropileno)

PTFE - *Polytetrafluoroethylene* (Politetrafluoroetileno)

RTDs - *Resistance temperature detectors* (Detectores de temperatura de resistência)

SMFs - *Single-mode fibers* (Fibra monomodo)

TPU - *Thermoplastic polyurethane* (Poliuretano termoplástico)

UV - *Ultraviolet* (Ultravioleta)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA 15

1.2 OBJETIVOS 18

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO 19

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 20

2.1 FIBRA ÓPTICA 20

2.2 GRADES DE BRAGG 22

2.2.1 Princípio de funcionamento das FBGs 22

2.2.2 Técnicas de gravação de grades de Bragg 25

2.2.3 Aplicações de FBGs em sensores 27

3 MATERIAIS E MÉTODOS 35

3.1 SENSOR BASEADO EM DIAFRAGMA DE BORRACHA DE SILICONE 35

3.1.1 Setup experimental 35

3.1.2 Fabricação do sensor 36

3.2 SENSOR BASEADO EM DIAFRAGMA DE BORRACHA NITRÍLICA 38

3.2.1 Setup experimental 38

3.2.2 Fabricação do sensor 40

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 43

4.1 SENSOR BASEADO EM DIAFRAGMA DE BORRACHA DE SILICONE 43

4.1.1 Caracterização de temperatura 43

4.1.2 Caracterização de flexão 45

4.1.3 Caracterização de compressão 47

4.1.4 Caracterização de nível de líquido 48

4.2 SENSOR BASEADO EM DIAFRAGMA DE BORRACHA NITRÍLICA 50

4.2.1 Caracterização de temperatura 50

4.2.2 Caracterização de flexão 54

5 CONCLUSÕES 62
5.1 CONTRIBUIÇÕES 65
5.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA 65
5.3 TRABALHOS FUTUROS 65
REFERÊNCIAS 67

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0, requer a integração de sensores em ferramentas, materiais e máquinas para monitoramento preciso e em tempo real da produção e realimentação para sistemas de controle e gestão [3]. Com isso, observa-se que a tecnologia de sensoriamento utilizando fibra óptica tem um enorme potencial para abordar aplicações na indústria [4], na área da saúde [5], em ambientes radioativos [6], em ambientes explosivos [7] e monitoramento de saúde estrutural [8]. Nos últimos anos, os sensores em fibra óptica vêm experimentando um grande crescimento devido às várias vantagens apresentadas como imunidade à interferência eletromagnética (EMI, do inglês *electromagnetic interference*), tamanho pequeno, peso leve, alta sensibilidade, capacidade de multiplexação, facilidade de transmissão da luz de sinal e segurança em ambientes agressivos e explosivos quando comparados aos sistemas elétricos convencionais [1, 2].

Um importante campo de aplicação dos sensores de fibra óptica é o de monitoramento de níveis de líquidos [2]. Há uma demanda crescente devido às suas vantagens e amplas aplicações em várias áreas, incluindo indústria química, detecção de combustíveis em ambientes explosivos [9], estações de tratamento de águas residuais [10] e alerta de inundação [11]. Atualmente, existem diferentes tipos de estruturas e configurações de fibra que são utilizados para personalizar aplicações específicas como a medições de parâmetros estruturais e industriais (nível de líquido, pressão, temperatura, umidade, deformação, entre outros) [1].

Dentre os parâmetros citados acima, nesse trabalho serão abordados os de nível de líquido, pressão e temperatura. Existem diversos sensores para medição desses parâmetros baseados em diferentes tecnologias. A medição de nível de líquido por pode ser obtida pela capacitância multieletrodo [12], ultrassom [13], radiação [14], vibração [15], flutuação [16], rádio [17] e reflexão de luz [18]. A medição da pressão pode ser obtida pela capacitância variável (capacitivos), piezo-resistivo (Strain Gage), potenciométrico, piezo-elétrico, relutância variável e ressonante. E por fim, a temperatura pode ser adquirida através de termopares, detectores de temperatura por resistência (RTDs, do inglês r*esistance temperature detectors*), termistores e sensor de temperatura por radiação no infravermelho sem contato. Porém, à

sensibilidade a campos eletromagnéticos, risco de corrosão e uso de sinais elétricos, torna inadequados o uso dos sensores citados para algumas aplicações industriais [19].

Dentre os vários tipos de sensores para a medição do nível de líquido em fibra óptica existentes, podemos destacar os sensores de fibra óptica interferométricos e os baseados em grades de Bragg em fibra [2]. Os interferômetros têm sido amplamente estudados devido a sua ampla faixa dinâmica, alta precisão e alta sensibilidade. Eles funcionam a partir da interferência entre dois sinais de luz propagados por diferentes caminhos ópticos de uma ou duas fibras [20], e são classificados em quatro tipos, chamados Fabry-Perot, Mach-Zehnder, Michelson e Sagnac [2]. A grade de Bragg é produzida a partir de uma modulação do índice de refração do núcleo quando a fibra é exposta a um padrão de intensidade periódico [21]. A FBG funciona como um filtro espectral reflexivo que seleciona um determinado comprimento de onda, ou seja, ela funciona como um espelho que reflete um determinado comprimento de onda e deixa passar os outros comprimentos de onda [2]. Além disso, outra vantagem das FBGs é a capacidade de multiplexação, ou seja, possui a capacidade de inscrever vários sensores na mesma fibra, o que não ocorre nos interferômetros [10].

A pressão pode ser medida usando FBGs sem nenhum revestimento ou estrutura para auxiliar a medição. Entretanto, além das FBGs serem finas, frágeis e vulneráveis, normalmente a sua sensibilidade à pressão é apenas 3,04 pm/MPa, o que é muito baixa para atender aos requisitos de precisão de medição de pressão na prática [22-24]. A sensibilidade da medição de pressão pode ser melhorada fazendo a detecção de pressão indiretamente através da detecção da deformação [22, 24, 25]. Isso é realizado através da incorporação de FBG em compósitos [26], polímeros [27, 28] madeira [29] e ligas metálicas [30], diafragma-cantilevers [22, 31], tubos Bourdon [32] ou a uma estrutura de diafragma [33], entre outros. As estruturas formadas possibilitam a medição de diferentes parâmetros, como pressão [34], vibração [35], nível de líquido [36] e concentração de compostos químicos [37]. Porém, algumas das estruturas apresentadas têm a fabricação relativamente complexas e múltiplos sensores são difíceis de serem multiplexados em uma única fibra óptica [23, 24]. Uma abordagem de construção relativamente simples e frequentemente empregada para o monitoramento do nível de líquidos é o uso de um diafragma com FBGs embutidas. Essa configuração estima o nível de líquido a partir da pressão hidrostática aplicada ao diafragma. Porém, esse método só funciona para um único fluido, e o mesmo deve possuir a densidade relativa constante [10]. Além do

monitoramento de nível de líquido, os sensores baseados em diafragma com FBGs incorporados são empregados na detecção de pressão [34], vibração [35], aceleração [38] e força [39].

Recentemente, os sensores de pressão FBG embutidos ou anexados em diafragmas têm sido muito estudados e amplamente implementados, devido às vantagens já mencionadas nesta dissertação. Song et al. [33] desenvolveram uma estrutura de diafragma construída através de um diafragma de fibra de carbono com uma FBG pré-tensionada com suas extremidades fixadas sobre a superfície do diafragma com epóxi. Este trabalho gerou um sensor com alta sensibilidade e estrutura simples para aplicações na área de detecção de nível de líquido. Huang et al. [24] projetaram um sensor de pressão construído a partir de um diafragma de aço inoxidável com duas FBGs coladas na direção radial da superfície do diafragma. Dessa forma, com base na diferença dos comprimentos de onda foi possível compensar a sensibilidade cruzada e melhorar a sensibilidade à pressão. Marques et al. [11] apresentaram um novo sistema de monitoramento de nível de líquido altamente sensível construído a partir de 5 grades de Bragg em fibra óptica microestruturada de polímero (mPOFBG, do inglês *microstructured polymer fiber optic Bragg gratings*) inseridos em diafragmas de borracha de silicone. O sensor apresentou uma alta resposta linear na faixa de detecção, uma alta resolução, uma boa repetibilidade e possui o potencial de fornecer leituras de nível independentemente da temperatura e da densidade do líquido. Ameen et al. [40] apresentaram uma estrutura de diafragma com uma FBG colada e uma FBG externa a estrutura do diafragma para medir a variação de temperatura. Foram construídas 3 configurações diferentes de diafragmas, onde uma configuração consiste em uma única folha de diafragma de grafeno na parte superior da FBG, a outra configuração usa duas folhas de grafeno e a última configuração considerou a FBG posicionada entre duas folhas de grafeno. Diaz et al. [41] propuseram um sensor de nível de líquido baseado em um diafragma de resina epóxi com uma FBG embutida e um sensor externo para compensar a sensibilidade cruzada. Tal montagem resultou em um sensor com uma maior estabilidade térmica na medição de nível de líquido. Leal-Junior et al. [42] apresentaram uma técnica para a compensação dos efeitos da temperatura nos sensores de pressão baseados em diafragmas de polímeros. Foi utilizado um diafragma oblongo de borracha nitrílica com uma FBG inserida e um sensor externo de temperatura utilizando outra FBG. Com isso observou-se um melhor desempenho em relação à sensibilidade cruzada. Em outro trabalho, Leal-Junior et al. [1] desenvolveram uma abordagem de otimização da sensibilidade e linearidade para sensores FBGs inscritas em fibra de polímero óptico transparente cíclico

(CYTOP, do inglês c*yclic transparent optical polymer fiber*) embutidos em diafragmas circulares. Estes diafragmas foram impressos em poliuretano termoplástico (TPU, do inglês *thermoplastic polyurethane*), sendo fabricados 3 diafragmas em diferentes diâmetros e espessuras para a realização de testes de pressão, força e nível de líquido. Leal-Junior et al. [10] desenvolveram um sensor criado a partir de um diafragma de poliuretano com duas FBGs embutidas de forma que ficassem posicionadas em direções opostas, considerando como referência a linha neutra da dobra do diafragma. Dessa forma, o sensor apresentou alta sensibilidade e linearidade para todos os casos analisados, e também foi possível realizar a compensação de temperatura. Her et al. [43] desenvolveram um sensor para a medição de pressão e nível de água construído a partir de uma FBG integrada em um diafragma de epóxi. Nesse estudo, investigou-se o efeito da espessura do diafragma na sensibilidade e precisão do sensor.

Podemos observar que o uso de duas FBGs em um diafragma tem sido pouco estudado. Portanto, essa dissertação tem como propósito a análise da linearidade e a sensibilidade de dois sensores de nível de líquido. O primeiro sensor foi submetido a testes de flexão, compressão e imersão em tanque com água, já o segundo sensor foi submetido a testes de flexão e fadiga. O primeiro sensor foi construído a partir de duas FBGs inseridas em um diafragma de borracha de silicone (PDMS). As FBGs foram posicionadas em direções opostas, considerando como referência a linha neutra de flexão do diafragma. Seguindo o mesmo princípio, o segundo sensor foi construído a partir de 3 camadas de borracha nitrílica, onde a camada central separa as duas FBGs. Deste modo, esse estudo contribuiu para uma melhor compreensão de como a inserção de duas FBGs no diafragma se relacionam com o comportamento do sensor, assim podendo ser aplicados a outras finalidades que utilizem um sensor de fibra óptica, incorporado em um diafragma, como detecção de pressão, vibração, aceleração e força [1, 44].

1.2 OBJETIVOS

O objetivo dessa dissertação é demonstrar a sensibilidade e linearidade para a detecção de multiparâmetros em um sistema compacto de sensores FBGs incorporados ao diafragma. Assim, esta análise fornece orientações sobre a incorporação de duas FBGs no diafragma com a discussão do comportamento do sensor sob diferentes parâmetros. Os objetivos específicos desta dissertação são listados abaixo.

- Analisar a linearidade e sensibilidade de um sensor construído a partir de duas FBGs inseridas em um diafragma de borracha de silicone (PDMS) nos testes de flexão, compressão e nível de líquido.
- Analisar a linearidade e sensibilidade de um sensor construído a partir de duas FBGs inseridas em um diafragma de borracha nitrílica nos testes de flexão.
- Analisar a influência da variação da distância entre as FGBs na sensibilidade do sensor.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No Capítulo 1 dessa dissertação foi abordado a importância da medição de diferentes parâmetros na indústria e a relevância dos sensores FBGs nesse cenário. Também foi apresentado a proposta desse trabalho e seus objetivos. Já no Capítulo 2 foi abordado a fundamentação teórica sobre fibras ópticas, grade de Bragg e os fundamentos mecânicos necessários para a compreensão desse trabalho. O Capítulo 3 contempla a metodologia adotada no trabalho, explicando como foram realizados os testes e quais equipamentos foram usados. O Capítulo 4 discute os resultados obtidos nos testes realizados no capítulo anterior. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

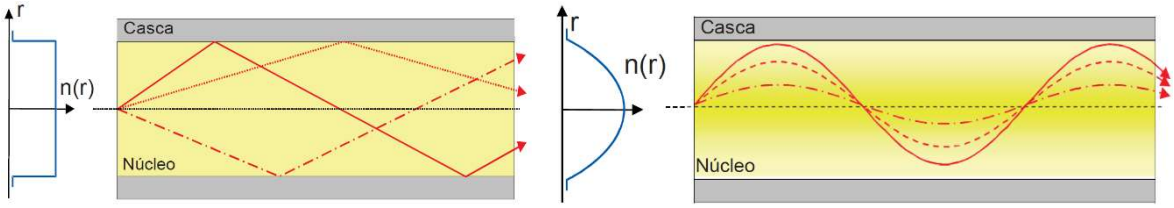
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FIBRA ÓPTICA

As fibras ópticas são capilares formados a partir de materiais dielétricos cristalinos e homogêneos que servem como guias de ondas nas regiões do visível e infravermelho em sistemas de comunicação e sensores ópticos. As mais comumente usadas são a sílica (SiO_2) pura ou a sílica dopada. A dopagem altera o índice de refração do núcleo da fibra causado por alterações nas propriedades do vidro, como viscosidade e ponto de fusão [45].

As fibras ópticas possuem seção transversal circular dividida em basicamente três camadas concêntricas com diferentes diâmetros, índices de refração e diferentes funções. A camadas são divididas em núcleo, casca e camada de proteção, sendo a última camada responsável por proporcionar uma proteção mecânica à fibra por meio de um revestimento de acrilato. Além disso, as fibras comerciais possuem revestimentos adicionais de polímeros específicos. A perda de intensidade de luz ao se propagar ao longo de uma fibra ocorre devido à absorção do material ou espalhamento [46]. Por esta razão, o núcleo é cercado por uma casca que possui um índice de refração cerca de 1% menor que o do núcleo. Portanto, de acordo com a lei de Snell-Descartes da óptica geométrica, o feixe de luz acoplado ao guia de ondas é confinado em seu núcleo por reflexão interna total [47, 48].

Uma fibra óptica possui classificações para o modo de propagação do feixe de luz, que pode ser dividido em fibra monomodo (SMFs, do inglês *single mode fibers*) e fibra multimodo (MMFs, do inglês *multimode fibers*). Nas MMFs, o núcleo consiste em um material com índice de refração constante superior ao de sua casca. As MMFs têm vários modos de propagação e a luz pode se propagar por vários caminhos diferentes. Quanto ao perfil de índice, as MMFs são divididas em índice degrau e índice gradual de acordo com a o perfil de mudança do índice de refração da casca em relação ao núcleo. As fibras de índice gradual possuem melhor desempenho que as fibras de índice degrau [46, 49]. A Figura 1 apresenta uma comparação entre o perfil de índice degrau e o perfil de índice gradual.



(**a**) (**b**)

Figura 1. (a) Princípio da propagação da luz em fibras de índice degrau. (b) Princípio da propagação da luz em fibras de índice gradual.

Fonte: Adaptado de [49].

As SMFs possuem "diâmetro do núcleo 10 vezes menor se comparado ao diâmetro do núcleo de MMFs e tem maior capacidade de transmissão. As SMFs apresentam propagação predominantemente no modo fundamental (modo LP01) [46, 49]. Em comparação com as MMFs, as SMFs têm maior velocidade de transmissão e menor perda de transmissão e, portanto, geralmente mais adequados para aplicações de longa distância [50].

A alta demanda na indústria de telecomunicações por fibra, reduziu de significativamente o custo do material do sensor de fibra e aumentou o desempenho da fibra com o passar dos anos. Com isso, foi possível propor sensores em fibra óptica para viscosidade, rotação, aceleração, pressão, vibração, posição linear e angular, temperatura, tensão, umidade, medição de campo elétrico e magnético, acústica, medições químicas entre outras aplicações de sensores [51].

A razão para o rápido crescimento dos sensores baseados em fibra, é devido a algumas características atraentes que geralmente não estão disponíveis com outros sistemas de detecção elétricos disponíveis no mercado, como tamanho pequeno, peso leve, imunidade a EMI, desempenho em alta temperatura, grande largura de banda, versatilidade geométrica, fácil multiplexação, capacidade de monitoramento remoto, isolamento elétrico, grande largura de banda, alta precisão e resolução, baixa reatividade química e resistência a temperaturas elevadas [51-53]. Além disso, em aplicações de sensoriamento remoto, é possível realizar o monitoramento a vários quilômetros de distância do ponto de medição [51, 54], além de permitir sensoriamento pontual ou distribuído [55], podendo medir de forma independente e simultânea mais de um parâmetro físico ou químico [53].

A fibra óptica, como meio físico, está sempre sujeita a variações geométricas, como tamanho e forma, bem como alterações ópticas, como índice de refração e conversão de modo

de propagação. A magnitude dessas mudanças pode ser grande ou pequena, dependendo da natureza e magnitude da perturbação [51].

Ao contrário das aplicações de comunicação, na detecção utilizando a fibra óptica, a resposta às influências externas (temperatura, tensão, tensão, rotação, correntes elétricas, entre outras) são objeto de aprimoramento das fibras, pois são elas que resultam em variações no sinal de luz transmitido. Se forem calibradas em função de um parâmetro específico, podem mensurar a influência externa desejada. Diferentes tipos de sensores de fibra óptica utilizam diferentes fenômenos físicos como amplitude (intensidade), fase, frequência e polarização para modular a luz transmitida. Isto permite que cada sensor tenha seu desempenho característico, determinando qual influência externa o sensor é capaz de mensurar [50, 51].

2.2 GRADES DE BRAGG

A Grade de Bragg em fibra (FBG) é uma perturbação periódica do índice de refração ao longo do comprimento da fibra que é formada pela exposição do núcleo a um intenso padrão de interferência óptica. A FBG foi demonstrada pela primeira vez por Hill et al. em 1978. Eles demonstraram que é possível alterar o índice de refração do núcleo de uma fibra óptica, fotossensível dopada com germânio, lançando íons de argônio diretamente ao núcleo da fibra e assim formando grades. Após vários minutos, ocorreu um aumento na intensidade da luz refletida, que cresceu até que quase toda a luz fosse refletida da fibra. Essa descoberta ficou conhecida como "Grades de Hill" [21]. Porém o uso do termo "Grades de Bragg ou Redes de Bragg" só foi proposto por Meltz et al. em 1989. Ele demonstrou ser possível alterar o índice de refração do núcleo externamente à fibra óptica, sendo possível criar um padrão de grades, onde o espaçamento entre as grades define qual comprimento de onda será refletido [56].

2.2.1 Princípio de funcionamento das FBGs

A FBG é frequentemente usada em tecnologias de telecomunicações e sensoriamento [57] e é feita a partir de uma modulação periódica ou quase periódica do índice de refração dentro do núcleo de uma fibra óptica fotossensível [57, 58]. A FBG normalmente funciona como um filtro espectral, de modo que quando a luz de banda larga é propagada ao longo da grade, o único comprimento de onda que atende à condição de ressonância de Bragg é refletido [39, 57]. O comprimento de onda refletido é chamado de comprimento de onda de Bragg (λ_B). O λ_B é

proporcional ao índice de refração efetivo (n_{eff}) e ao período (Λ), conforme mostrado na Equação (1) [59].

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

O comprimento de onda refletido é afetado principalmente pelo índice de refração efetivo e pelo período de grade [22]. Estes são influenciados por distúrbios externos, incluindo temperatura e estresse, deslocando assim o comprimento de onda central [23]. Em suma, se o estresse for aplicado a uma FBG, ela mudará o comportamento do comprimento de onda de Bragg devido a variações no período da grade. Essa variação também ocorre quando a fibra óptica na qual a FBG é gravada sofre expansão térmica devido às variações de temperatura.

A variação no comprimento de onda de Bragg é causada por mudanças no índice de refração e acontece a partir do efeito termo-óptico, que é causado pela variação de temperatura. O comprimento de onda também é afetado pelo efeito fotoelástico, causado pelo estresse da fibra [25]. Os efeitos da distorção e variação de temperatura no desvio do comprimento de onda central da FBG são expressos pela Equação (2) [22].

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(1 - P_\varepsilon)\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T] \quad (2)$$

onde $P\varepsilon$ é a constante fotoelástica efetiva, ε é a tensão na fibra, α é o coeficiente de expansão térmica, ζ é o coeficiente termo-óptico, λ_B é o comprimento de onda inicial de Bragg e ΔT é a variação de temperatura.

A resposta da FBG em função da temperatura e do estresse depende não apenas dos parâmetros físicos da fibra óptica, mas também das propriedades do diafragma e de seus parâmetros geométricos quando a FBG estiver nele inserida. Esses parâmetros influenciam a deflexão do diafragma, que então passa para a fibra óptica [25], pois quando a pressão é aplicada no diafragma plano, essa flexão passa para as FBGs, deslocando assim o comprimento de onda da grade de fibras [23].

No entanto, as FBGs têm uma sensibilidade cruzada entre estresse e temperatura, estando sujeita a erros durante a medição, por exemplo, do nível de líquido [41]. Geralmente, as FBGs são usadas sob temperatura constante, exceto quando uma técnica de compensação é usada para

isolar os efeitos da temperatura nas medições. Sensores de temperatura são comumente usados como técnica de compensação, pois também são baseados em FBG para estimar a diferença entre o sensor de temperatura e o sensor de nível de líquido [41, 42].

A pressão hidrostática causada pela variação do nível do líquido é o que causa a variação da pressão no diafragma. Assim, podemos assumir que $(1 - P_\varepsilon)\,\varepsilon$ é a sensibilidade ao nível (k_L) e $(\alpha + \zeta)\,\Delta T$ é a sensibilidade à temperatura (k_T). Portanto, podemos reescrever a Equação (2) associando o comprimento de onda inicial de Bragg ($\lambda_{B,0}$), variação de temperatura (ΔT) e variação de nível (ΔL) com a variação de comprimento de onda de Bragg [41].

$$\lambda_{B,L} = k_L \Delta L + k_T \Delta T + \lambda_{B,0} \tag{3}$$

A equação (3) pode ser usada para ambas FBGs inseridas no diafragma. Para a FBG que mede a temperatura, o termo $k_L \Delta L$ é igual a zero. As equações (4)-(6) referem-se ao comprimento de onda de Bragg medido a partir de FBG1 ($\lambda_{B1,L}$), FBG2 ($\lambda_{B2,L}$) e da FBG de temperatura ($\lambda_{B,T}$) respectivamente.

$$\lambda_{B1,L} = k_{L1} \Delta L + k_{T1} \Delta T + \lambda_{B1,0} \tag{4}$$

$$\lambda_{B2,L} = k_{L2} \Delta L + k_{T2} \Delta T + \lambda_{B2,0} \tag{5}$$

$$\lambda_{B,T} = k_{TT} \Delta T + \lambda_{BT,0} \tag{6}$$

onde ΔL é a variação do nível do líquido, ΔT é a variação da temperatura, k_{L1} é a sensibilidade da FBG1 à variação do nível, k_{L2} é a sensibilidade da FBG2 à variação do nível do líquido, k_{T1} é a sensibilidade da FBG1 à variação da temperatura, k_{T2} é a sensibilidade da FBG2 à variação da temperatura, k_{TT} é a sensibilidade da FBG de temperatura à variação de temperatura, e $\lambda_{B1,0}$, $\lambda_{B2,0}$ e $\lambda_{BT,0}$ são os comprimentos de onda iniciais da temperatura da FBG1, FBG2 e FBG, respectivamente [42]. Se conhecermos os valores de sensibilidade, podemos correlacionar as equações acima para encontrar a variação do nível do líquido e a variação da força aplicada no sensor.

2.2.2 Técnicas de gravação de grades de Bragg

Podemos classificara as técnicas de gravação externa como interferométrica ou não interferométrica. Dentre essas classificações existem muitos métodos para a produção da FBG no núcleo da fibra óptica [60].

Um dos métodos mais eficazes e mais utilizados para inscrever grades de Bragg em fibras fotossensíveis é a técnica de máscara de fase [61, 62]. A máscara de fase reduz muito a complexidade do processo de fabricação das grades de Bragg, produzindo grades com alto desempenho [21, 62].

A gravação por máscara de fase, emprega um elemento óptico difrativo (máscara de fase) para modular espacialmente o feixe ultravioleta (UV, do inglês *ultraviolet*) [62]. Quando um feixe incide na máscara de fase, ele é difratado em várias ordens com m = 0, 1, 2, 3…. Onde m = 0 corresponde ao feixe transmitido e as ordens m = ± 1 geram o padrão de superposição espacial dos feixes, o que resulta num padrão de interferência na região de gravação no núcleo da fibra óptica [61].

As ordens incidentes e difratadas satisfazem a equação (7) da difração geral [60]:

$$\Lambda_{pm} = \frac{m\lambda_{uv}}{\left(\sin\frac{\theta_m}{2} - \sin\theta_i\right)} \qquad (7)$$

As máscaras de fase podem ser fabricadas por exposição holográfica ou por exposição a um feixe de elétrons. As máscaras de fase são fabricadas a partir de placas de sílica de alta qualidade, onde os sulcos gravados com uma relação de período (Λ_{pm}) e profundidade cuidadosamente controlada, pois são eles os responsáveis pela transmissão da radiação UV [62].

No processo de fabricação das máscaras de fase, o perfil das grades periódicas é escolhido de tal forma que quando um feixe UV incide na máscara de fase, o feixe difratado de ordem m = 0 é minimizado ao máximo [60, 62], onde geralmente é reduzido para menos de 5% da potência transmitida [62].

Na gravação por máscara de fase, o comprimento de onda de Bragg λ_B é dependente do índice de refração efetivo do núcleo (n_{eff}) e da periodicidade da máscara de fase (Λ_{pm}). O período de modulação pela interferência é sempre metade do período gravado na máscara de

fase, independente do comprimento de onda da fonte ultravioleta usada [61, 62]. Então a periodicidade da grade de Bragg será dada como mostra a Equação (8):

$$\Lambda = \frac{\Lambda_{pm}}{2} \tag{8}$$

Substituindo a Equação (8) na Equação (1), podemos definir o λ_B em função da periodicidade da máscara de fase pela Equação (9):

$$\lambda_B = n_{eff}\Lambda_{pm} \tag{9}$$

Para que seja feita a gravação de FBGs na fibra utilizando a máscara de fase, é necessário que se remova a camada de revestimento (proteção de acrilato) da fibra [63], em seguida, a fibra é posicionada em contato ou próximo a parte de trás da máscara de fase. O feixe UV ilumina a máscara de fase e a interferência que ocorre entre os feixes de várias ordens gera um padrão de franjas que induz a mudança de índice de refração permanente no núcleo da fibra inscrevendo assim a grade de Bragg nas fibras ópticas, como mostrado na Figura 2 [61, 62]. Entretanto, geralmente somente as ordens m = ± 1 são utilizadas para gerar as grades. Afim de obter um padrão de interferência mais limpo, outros modos precisam ser suprimidos [61]. Uma lente cilíndrica pode ser usada para focalizar o padrão de franjas de interferência ao longo do núcleo de fibra [62].

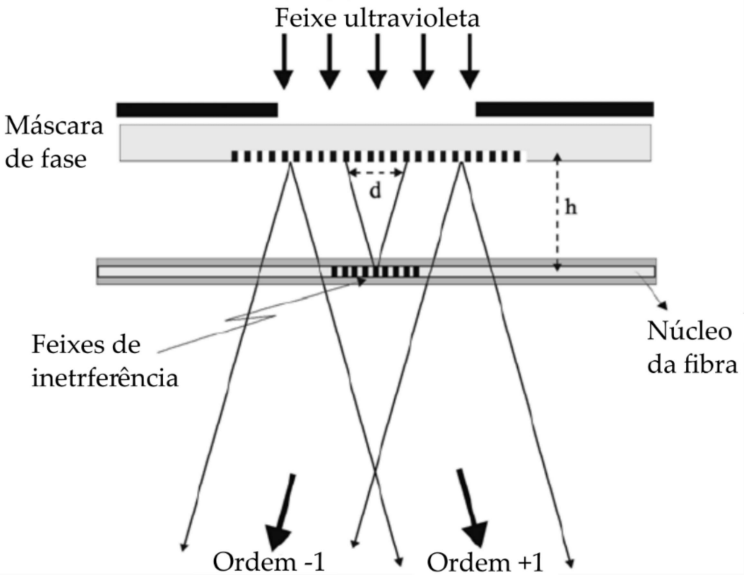


Figura 2. Esquema da geometria de máscara de fase para inscrição de grades de Bragg em fibras ópticas.
Fonte: Adaptado de [62].

A técnica de gravação por máscara de fase apresenta a vantagem da simplicidade de usar apenas um elemento óptico, fornecendo um método robusto e inerentemente estável para reproduzir grades de Bragg em fibra [62]. Como a fibra é colocada muito próxima da máscara de fase, a sensibilidade às vibrações mecânicas é bastante reduzida, assim, os problemas de estabilidade são reduzidos, aumentando o grau de reprodutibilidade [61, 62]. Outra vantagem é que lasers com baixa coerência temporal não afetam a capacidade de gravação da grade [21, 61, 62], porém, aqueles com baixa coerência espacial afetam [61].

Uma desvantagem dessa técnica é que para cada comprimento de onda de Bragg desejado, é necessária uma máscara de fase com período Λ_{pm} diferente. Podendo ser feitos alguns ajustes de comprimento de onda, aplicando tensão à fibra durante o processo de gravação da grade, podendo variar 2 nm no comprimento de onda de Bragg da fibra relaxada [21].

A técnica de gravação por máscara de fase foi o método utilizado para a produção das FBGs utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

2.2.3 Aplicações de FBGs em sensores

Os sensores ópticos baseados em FBG ocupam espaço crescente em aplicações comerciais devido às suas inúmeras vantagens [63]. Uma grande variedade de dispositivos FBG foi desenvolvida devido às suas propriedades fotossensíveis e compatibilidade inerente com fibras ópticas [21]. Dispositivos de fibra óptica baseados em grade de Bragg também podem ser desenvolvidos para comunicações de fibra óptica, como lasers de fibra [64, 65]; compensação de dispersão [66, 67]; dispositivos seletivos de comprimento de onda [68, 69]; amplificadores de fibra dopada com érbio [70, 71]; monitoramento de rede e identificação de fibra [72, 73]; e lasers semicondutores com refletor externo de grade de Bragg [74, 75].

O sensoriamento por fibra óptica tem estimulado pesquisas nas áreas industriais, médica e civil [76]. Nessas áreas, é necessário monitorar diversos parâmetros como nível de líquido, temperatura, tensão, pressão, deformação, vibração, aceleração, índice de refração, etc. Alguns exemplos desses sensores são citados abaixo.

Sensor de temperatura baseado em FBG: A detecção de temperatura é a mais comumente usada em vários campos de aplicação. Os sensores de temperatura tradicionais, como termostatos, termopares e detectores de temperatura de resistência, são volumosos, possuem

faixas de operação baixas, não são imunes a EMI e não são adequados para detecção distribuída. Sensores baseados em FBGs possuem alta confiabilidade, baixa condutividade térmica, tamanho pequeno e forte imunidade a EMI [77]. Uma aplicação das FBGs para sensores de temperatura é demonstrada em [78], onde Sugino et al. apresentaram três tipos de métodos de revestimento de zinco para aumentar a contração térmica à temperatura criogênica para o monitoramento de temperatura de ímãs supercondutores. Outra aplicação foi apresentada em [41], onde Diaz et al. demonstram o uso de uma FBG para compensar a sensibilidade cruzada de temperatura em um sensor de nível de baseado em uma FBG embutida em um diafragma de resina epóxi.

Sensor de nível líquido baseado em FBG: Aplicações como armazenamento de petróleo e combustível, estações de tratamento de esgoto, processamento químico e diversos outros tipos de indústrias, exigem medição de nível. A corrosão e explosão são as razões pela qual os sensores elétricos raramente são usados. Sensores ópticos, principalmente FBGs, são resistentes à corrosão, eletricamente isolantes e intrinsecamente seguros, e são uma tecnologia promissora para medição precisa do nível de líquido [77].

Os diafragmas são frequentemente usados para o monitoramento de nível de líquido. Geralmente possuem uma fácil construção e funcionam a partir da variação da pressão hidrostática aplicada ao diafragma e transmitida a FBG [10]. Os sensores de nível baseados em diafragmas podem ser construídos de diversas formas, como por impressão 3D, por cura de resinas, pela fixação da FBG na face de um diafragma e embutindo a FBG em um diafragma.

A fabricação de diafragmas por impressão 3D ou modelagem por fusão e depósito (FDM, do inglês *fused deposition modeling*) funciona basicamente através da adição de camadas sobrepostas que são liberadas a partir de um extrusor que aquece e deposita o material escolhido para a construção da peça. Alguns desses materiais podem ser TPU, ácido poliláctico (PLA, do inglês polylactic acid), acrilonitrila butadieno estireno (ABS, do inglês *acrylonitrile butadiene styrene*), polipropileno (PP, do inglês *polypropylene*), polietileno (PE, do inglês *polyethylene*) [79]. Um trabalho utilizando esse método de fabricação foi proposto por Leal-Junior et al. [1], onde foi desenvolvido um design ideal para os diafragmas visando otimização da sensibilidade e linearidade para sensores. O desenvolvimento dos diafragmas foi realizado a partir de análises numéricas levando em consideração o tipo de material usado e os parâmetros geométricos do diafragma. A partir das análises e da resolução da impressora 3D (0,05 mm), foram escolhidas

três configurações para a fabricação do diafragma. A configuração 1 escolhida para fabricação de um diafragma foi de 0,8 mm de espessura e um diâmetro de 30 mm. Já a configuração 2, possui um diâmetro de 45 mm e espessura de 1,2 mm. E por fim, a configuração 3 foi fabricada com 0,2 mm de espessura e 42 mm de diâmetro.

As três configurações dos diafragmas foram fabricadas utilizando o material TPU e foram embutidas FBGs inscritas em fibra de CYTOP nos diafragmas. Os diafragmas foram fabricados utilizando uma impressora 3D Sethi3D S3 (Sethi, Brasil), onde a mesma foi configurada para realizar a impressão com 100% de densidade de enchimento e 0,02 mm de espessura de camada. Na Figura 3 é apresentado o desenho esquemático do diafragma e do seu posicionamento na configuração experimental.

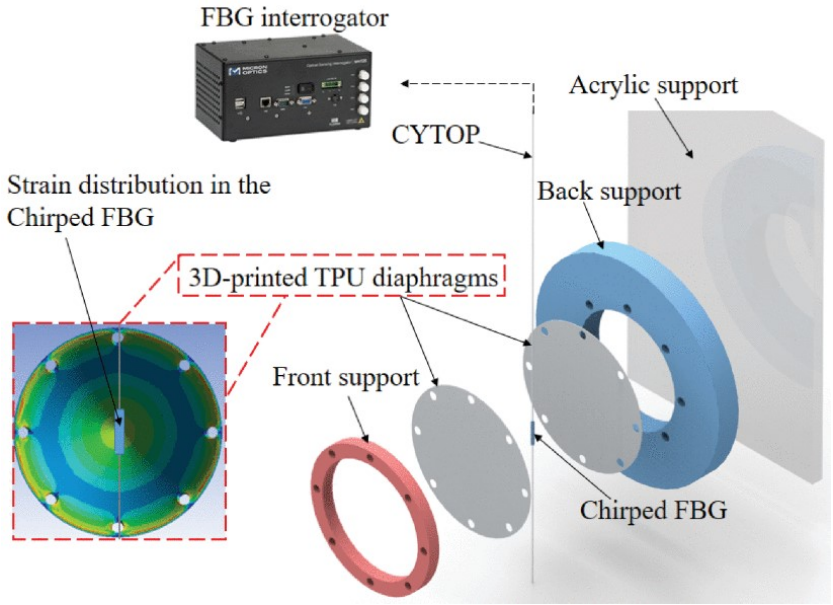


Figura 3. Representação esquemática da montagem e conexão do sensor e a distribuição de tensão no diafragma. Fonte: [1].

A fabricação de diafragmas por cura de resina, é geralmente feita com uma mistura da resina escolhida com o catalisador. A resina é então aplicada em um molde e a FBG é posicionada em seu interior. A proporção de catalisador e o tempo de cura são específicos para cada tipo de resina. Algumas resinas utilizadas para a fabricação dos diafragmas são a resina epóxi [41], resina de poliuretano [10] e a borracha de silicone [11]. Um trabalho utilizando esse método de fabricação foi proposto por Diaz et al. [41], onde propuseram um sistema de sensor para a medição de nível de líquido composto por uma grade de Bragg em fibra introduzida em um diafragma de resina epóxi, combinado com um sensor de temperatura composto por uma

grade de Bragg em fibra. O sensor de temperatura tem como objetivo medir a variação de temperatura que será usada para reduzir a sensibilidade cruzada de temperatura para obter resultados mais precisos na medição de nível.

No experimento foi usado uma FBG de 3 mm que foi inserida em um diafragma de cilíndrico de resina epóxi que possui 50 mm de diâmetro e espessura de 1,1 mm. Afim de melhorar a fixação da fibra no diafragma, a proteção de acrilato foi removida em torno de 45 mm na seção da fibra, e a proteção foi mantida na transição da resina para a parte exterior do diafragma. Em seguida, a resina epóxi (lente líquida - *Advanced* 2) foi aplicada em um molde plástico que possui as mesmas dimensões do diafragma, a FBG foi centralizada e pré-esforçada no seu interior e o molde foi mantido inalterado durante 24 horas.

Após construído o sensor, foi feito um suporte de Nylon para a fixação do sensor de 1,1 mm de espessura e 50 mm de diâmetro. Esse suporte possui um furo central de 19 mm de diâmetro e 8 furos circundantes de 3,8 mm com o espaçamento de 13,2 mm para ser fixado usando parafusos. A Figura 4 exibe o sensor FBG embutido no diafragma e o suporte do conjunto.

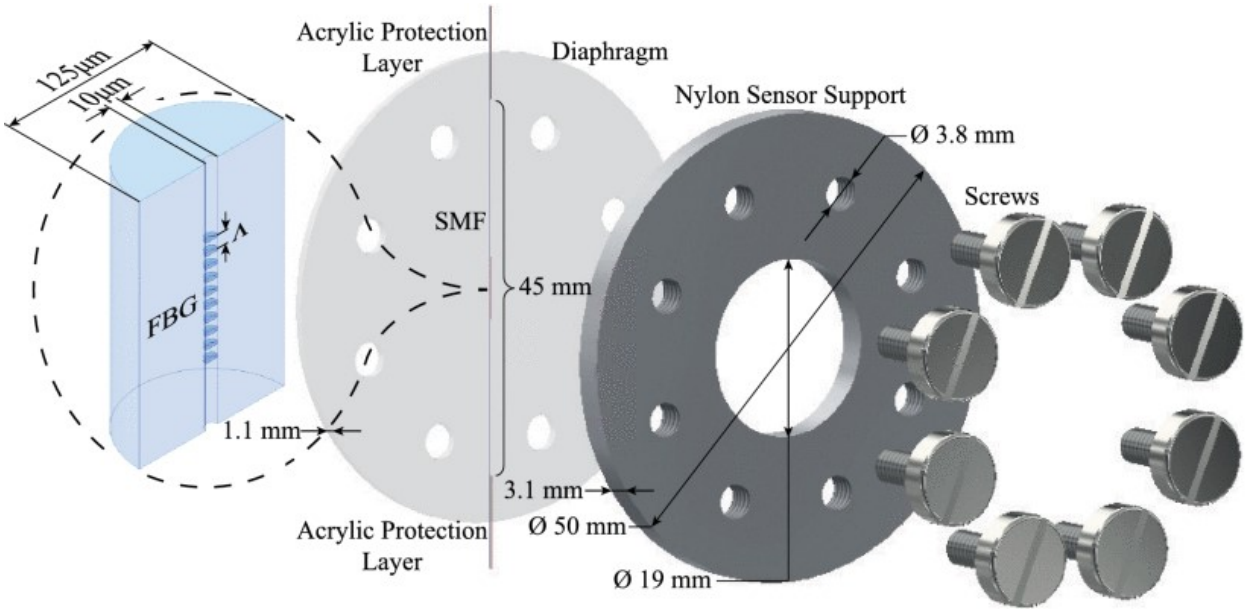


Figura 4. Estrutura do sensor proposto.
Fonte: [41].

No método de fabricação por fixação da FBG na face de um diafragma, a FBG é fixada em uma das faces do diafragma, de modo que a tensão gerada pelo nível de líquido seja

transmitida do diafragma para a FBG. Os diafragmas podem ser construídos de diferentes materiais, como aço inoxidável [24], fibra de carbono [33] e resina epóxi [43]. Um trabalho desenvolvido utilizando esse método de fabricação foi proposto por Song et al. [33], onde foi desenvolvido uma estrutura de diafragma de fibra de carbono com uma FBG fixada para aplicações na área de detecção de nível de líquido. O diafragma foi construído usando um tecido de fibra de carbono com trama do tipo sarja com 57 mm de diâmetro e 0,2 mm de espessura. Em uma das superfícies do diafragma foi colada uma FBG usando uma resina epóxi. A FBG foi posicionada no centro do diafragma e uma das extremidades da fibra foi colada, após isso, a fibra foi pré-esforçada e a outra extremidade foi colada. Fazendo com que as tensões aplicadas no diafragma sejam transmitidas para a FBG.

Após a fabricação do diafragma, o sensor foi fixado na circunferência de uma carcaça de metal, onde a água ou óleo entra no sensor a partir do orifício sensor e atua na superfície do o diafragma composto de fibra de carbono. A Figura 5 apresenta o desenho esquemático do sensor FBG de nível de líquido proposto usando o diafragma.

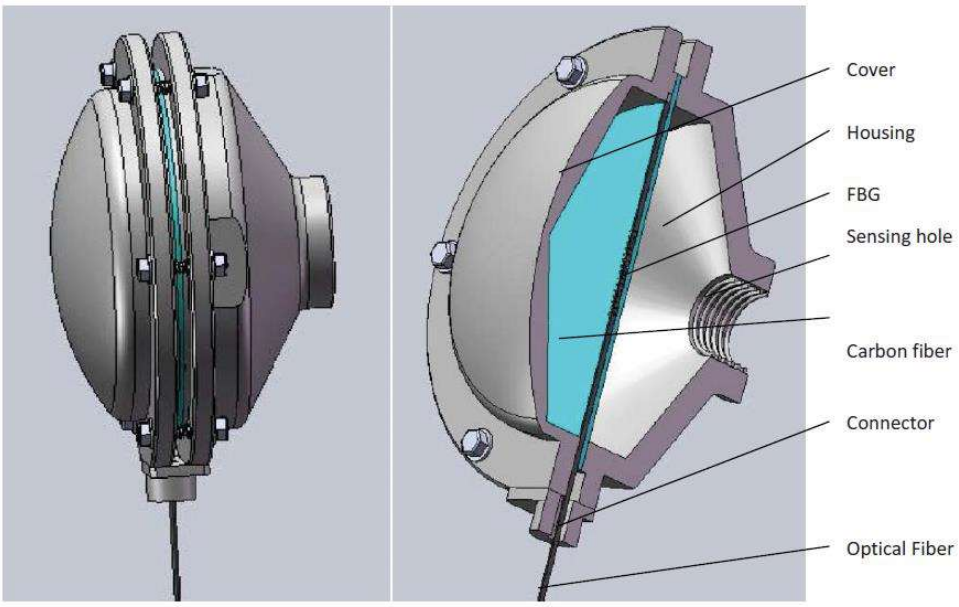


Figura 5. Diagrama esquemático do sensor de nível líquido.
Fonte: [33].

No método de fabricação por embutimento da FBG em diafragmas, a FBG é inserida entre dois ou mais diafragmas de forma que a FBG fique fixa, assim impossibilitando o escorregamento da mesma no momento da deformação do diafragma. Materiais como a borracha nitrílica [42] são utilizados na montagem desse tipo de estrutura. Leal-Junior et al.

[42] apresentaram uma técnica para a compensação dos efeitos da temperatura nos sensores de pressão baseados em diafragmas de polímeros onde foi utilizado o método de fabricação por embutimento da FBG. Foi utilizado um diafragma oblongo de borracha nitrílica com uma FBG inserida e um sensor externo de temperatura utilizando outra FBG. O diafragma é constituído a partir de uma FBG inserida dentro de um tubo capilar de Politetrafluoroetileno (PTFE, do inglês *Polytetrafluoroethylene*) que possui 0,5 mm de diâmetro externo. Esse tubo é posicionado entre duas camadas de diafragma de formato oblongo de borracha nitrílica com 1,8 mm de espessura cada. Afim de limitar a deformação lateral do diafragma, foi usado um retentor de alumínio na montagem do sistema.

Para obter a temperatura, foi utilizada uma FBG inserida dentro de um tubo de PTFE com o diâmetro externo de 4 mm, e esse tubo foi inserido dentro de um tudo de alumínio para evitar qualquer tipo de deformação mecânica na FBG. Todo esse conjunto foi fixado próximo ao diafragma para ambas FBGs estarem sofrendo a mesma variação de temperatura. O diafragma oblongo empregado na análise é apresentado na Figura 6.

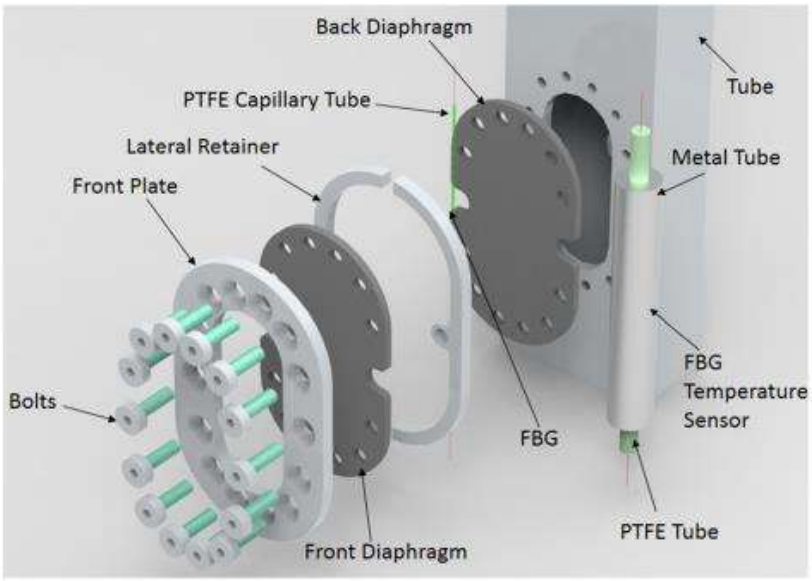


Figura 6. Sensor de pressão e temperatura baseado em um diafragma oblongo.
Fonte: [42].

Outra divisão na construção desses sensores é em relação ao número de FBGs anexadas a estrutura. Como vimos anteriormente, a grande maioria desses sensores é construída usando somente uma FBG, porém existem sensores que utilizam mais de uma FBG, como:

Leal-Junior et al. [10] desenvolveram um sensor criado a partir de um diafragma de poliuretano com duas FBGs embutidas. A fabricação do diafragma foi construída a partir de um molde onde as FBGs de cerca de 10 mm de comprimento foram posicionadas de forma que ficassem em direções opostas, considerando como referência a linha neutra da dobra do diafragma. Esse posicionamento foi realizado manualmente utilizando suportes de fibra para garantir que as FBGs estejam no centro do diafragma e para controlar a distância entre as FBGs (parâmetro "a" da Figura 7). Após isso, foi aplicada uma resina de poliuretano (Liquid Lens Advanced, Reino Unido) e curada à temperatura e umidade ambiente em um período de 24 h. A Figura 7 mostra uma representação esquemática dos passos para a fabricação do diafragma de FBG.

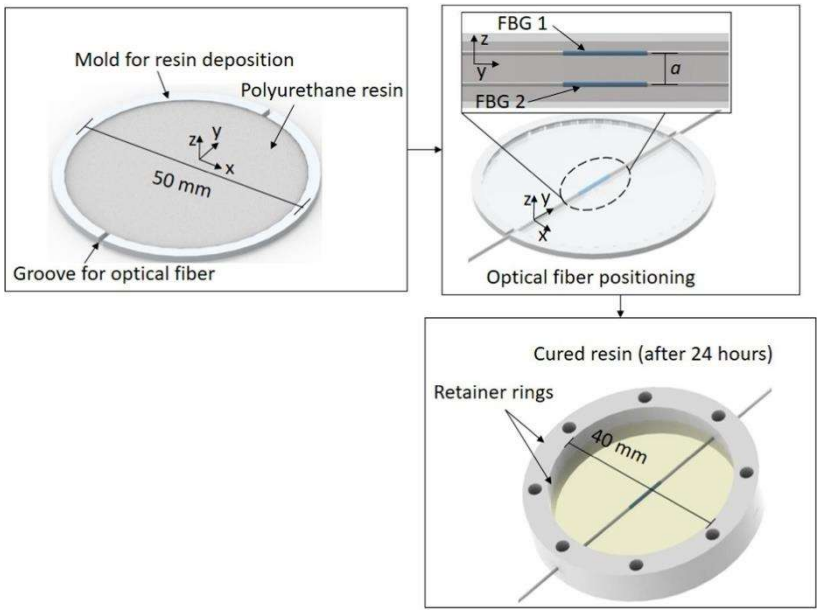


Figura 7. Passos para a fabricação de diafragmas com FBG.
Fonte: [10].

Huang et al. [24] projetaram um sensor de pressão construído a partir de um diafragma circular de aço inoxidável com duas FBGs coladas na direção radial da superfície do diafragma. O sensor foi fabricado utilizado um diafragma circular de 60 mm de diâmetro e 1,5 mm de espessura. Na superfície do diafragma foram coladas duas FBGs em sequência na direção radial como apresentado na Figura 8. A FBG1 foi posicionada adjacente à borda do diafragma enquanto a FBG2 foi fixada na área central do diafragma.

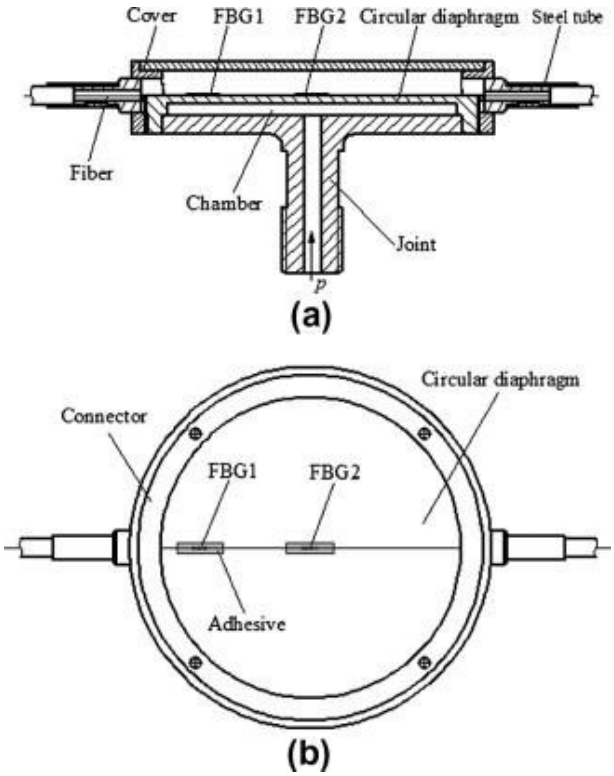


Figura 8. A estrutura do sensor de pressão do tipo diafragma FBG.
Fonte: [24].

Nesse trabalho foram utilizadas as técnicas de fabricação de diafragma a partir da cura de resina e por embutindo de FBGs em diafragmas. As etapas de fabricação e construção dos diafragmas são detalhadas na seção 3.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

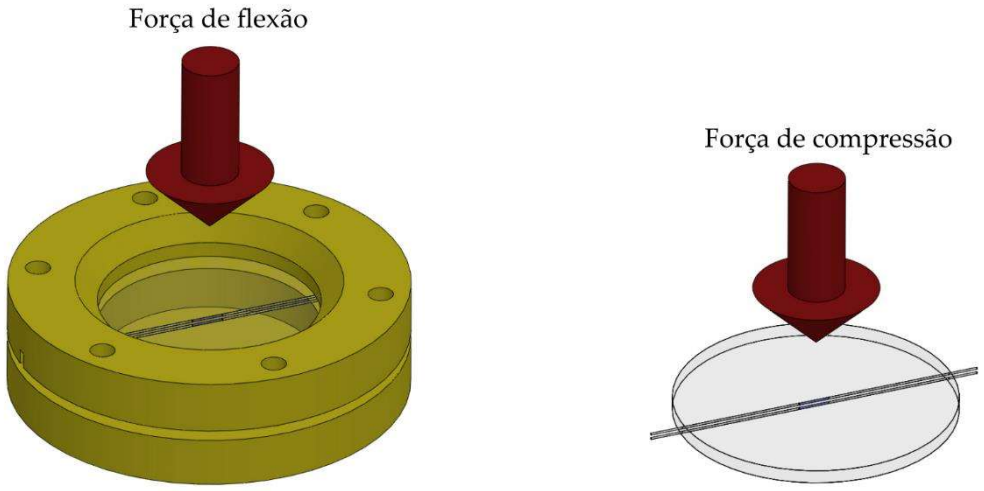
Nesta seção serão apresentados os procedimentos de montagem dos sistemas para a realização dos testes práticos dos diafragmas. Todo o processo de fabricação dos sensores e dos componentes necessários para a realização dos testes serão apresentados. Tornando possível a reprodução desse trabalho.

3.1 SENSOR BASEADO EM DIAFRAGMA DE BORRACHA DE SILICONE

3.1.1 Setup experimental

Os espectros refletidos foram adquiridos com o interrogador óptico sm125 (Micron Optics, Atlanta, GA, EUA) com resolução de 1 pm e uma taxa de aquisição de 2 Hz. Primeiramente, a temperatura foi caracterizada na estufa 1/400 ND (Ethik Technology, São Paulo, Brasil), variando de 23,5 °C a 45 °C, para obter a sensibilidade à temperatura de cada FBG.

A caracterização da força de flexão foi feita através da aplicação pesos calibrados sobre o diafragma fixado ao suporte, representado na Figura 9(a). E a caracterização da força de compressão foi realizada aplicando pesos calibrados sobre o diafragma apoiado em superfície plana, como mostrado na Figura 9(b).



(a) **(b)**

Figura 9. Representação esquemática da configuração experimental usada para caracterizações dos testes de (a) flexão e (b) compressão.

Conforme mostrado na Figura 10, a caracterização do nível de líquido foi realizada fixando o diafragma no suporte, e vedando com silicone para garantir que apenas uma das superfícies do diafragma fosse exposta somente à pressão hidrostática. Em seguida, o diafragma foi fixado em uma barra de nylon para ser colocada dentro do tanque. O tanque possui 1185 mm de altura, 85 mm de largura e 90 mm de profundidade.

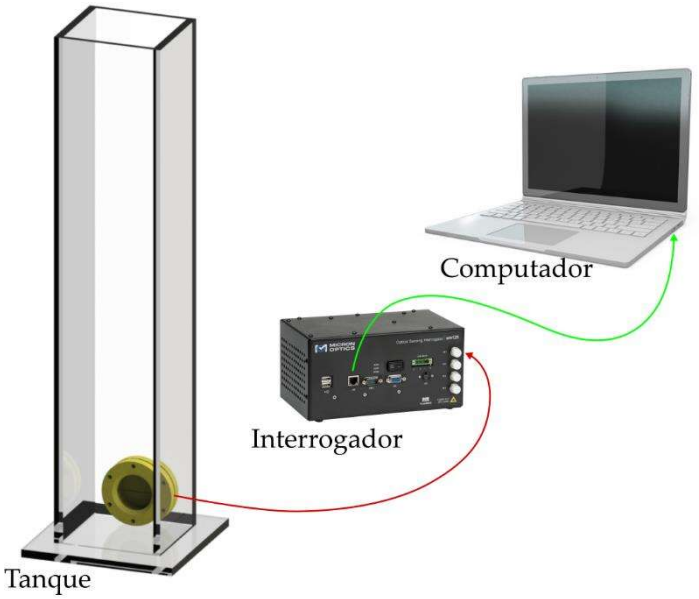


Figura 10. Representação esquemática da configuração experimental usada para caracterizações de teste de nível de líquido.

3.1.2 Fabricação do sensor

O sistema de monitoramento do nível de líquido é composto por duas FBGs que são inseridas em um diafragma de borracha silicone, conforme mostra a Figura 11. Na produção do diafragma com as FBGs, foi criado um molde onde as FBGs foram posicionadas em direções opostas, considerando como referência a linha neutra de flexão do diafragma e depois foi aplicada borracha de silicone. Afim de garantir a distância entre as FBGs, as mesmas foram inseridas em furos feitos na parede do molde. Após o posicionamento das FBGs, a resina foi levada à estufa a 60°C por 2 h e depois curada por 24 h. Isso resultou em um diafragma de cerca de 2,2 mm de espessura com 45 mm de diâmetro. As FBGs estavam aproximadamente 0,8 mm distantes umas das outras.

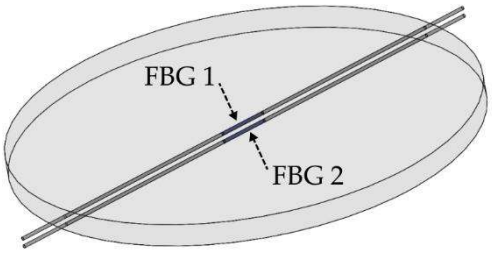
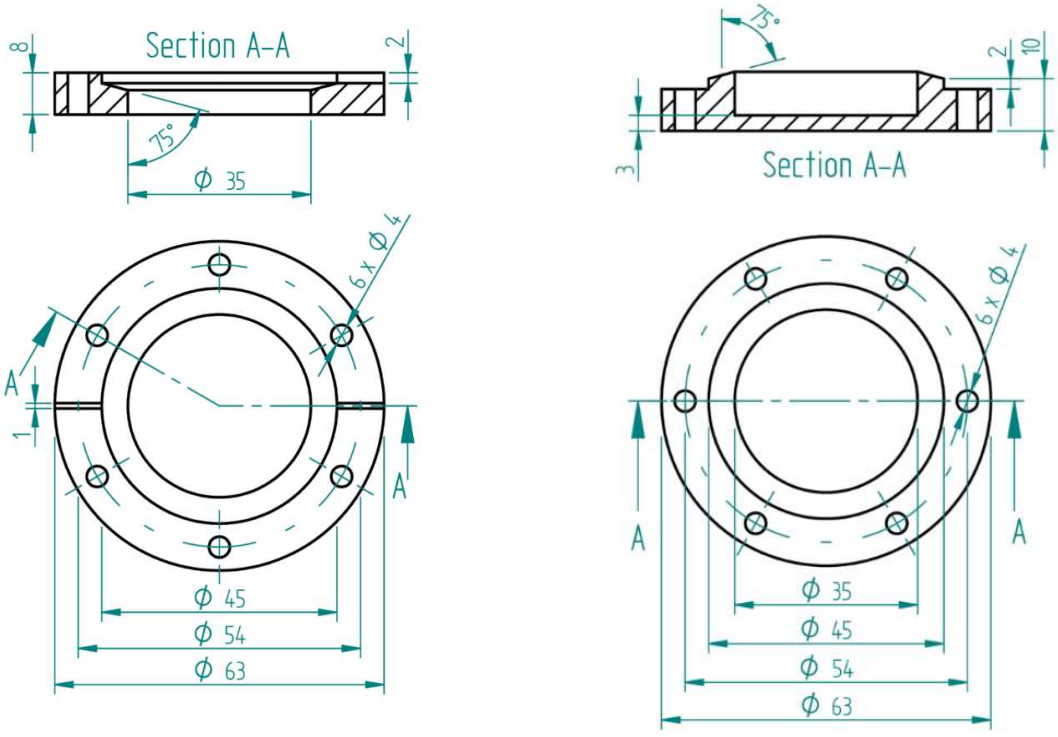


Figura 11. Estrutura do diafragma de borracha de silicone com duas FBGs inseridas.

O suporte para a fixação do diafragma foi fabricado em PLA, e possui duas partes. Como mostrado na Figura 12(a), a parte frontal do suporte possui uma espessura de 8 mm por 63 mm de diâmetro com um furo central de 35 mm de diâmetro, o que permite o contato do diafragma com do diafragma com o líquido. Nessa primeira parte do suporte foi feito um rebaixo de 2 mm de profundidade e 45 mm de diâmetro. No fundo do rebaixo (base de apoio para o diafragma) foi fabricado um ângulo negativo de 15° para o encaixe do diafragma, fazendo com que a face exposta ao líquido fique convexa. Também foi feito um sulco de 2 mm de profundidade e 1 mm de largura na direção radial do suporte para comportar a fibra óptica que chega ao diafragma.

Como mostrado na Figura 12(b), a segunda parte do suporte também possui 8 mm de espessura por 63 mm de diâmetro e possui um rebaixo central de 35 mm de diâmetro e 5 mm de profundidade. Foi feito um ressalto de 2 mm de altura com a parte superior em um ângulo de 15° positivo com o objetivo do diafragma seja pressionado na parte frontal. Em ambas partes do suporte foram feitos 6 furos de 4 mm para fixar o sensor.



(**a**) (**b**)

Figura 12. Estrutura da parte (a) frontal e (b) traseira do suporte do diafragma.

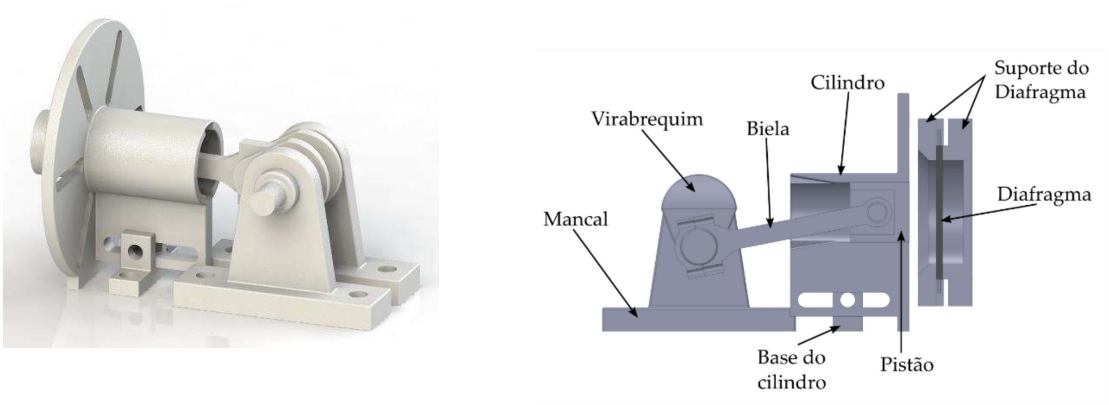
3.2 SENSOR BASEADO EM DIAFRAGMA DE BORRACHA NITRÍLICA

3.2.1 Setup experimental

Afim de realizar os testes de flexões nos diafragmas de forma constante e controlada, foi desenvolvido e construído uma máquina para a realização dos ensaios. Algumas partes desse equipamento foram construídas em PLA e as partes que sofriam maiores solicitações mecânicas foram fabricadas em resina (*Anycubic Basic Clear*).

A máquina de ensaio de flexão é constituída por uma estrutura que realiza o movimento de flexão no sensor. Essa estrutura é composta por um pistão que é responsável por realizar a deformação no sensor, um cilindro que tem a função de "guiar" o sensor em um movimento retilíneo e também atua como suporte para a estrutura de acoplamento do diafragma, apresentada na Figura 13. A base do cilindro é responsável pela fixação do cilindro e ajuste do avanço do pistão, enquanto a biela e virabrequim são responsáveis por transmitir o movimento de rotação do motor para o movimento linear do pistão. Além dessa estrutura, a máquina possui um motor de passo Nema 23 (12,6Kgf / 2,8A - JK57HS56-2804) para o acionamento do

sistema. O controle e captura dos dados da máquina de flexão foi adquirido usando uma placa Arduino UNO com uma placa de expansão Motor Shield L293D - Driver Ponte H. E para alimentar todo o sistema, foi utilizado uma fonte de corrente contínua (HIKARI HF-3205S).



(**a**) (**b**)

Figura 13. (a) Visão geral da máquina de ensaio de flexão de diafragmas. (b) Detalhamento dos elementos da máquina de ensaio de flexão de diafragmas.

Afim de determinar a deformação que os diafragmas sofreriam durante os testes de flexão, foram realizados testes destrutivos utilizando uma fibra de sílica sem a proteção de acrilato para simular as fibras com FBGs. A partir desses testes, foi obtido um valor de deformação máxima suportada de aproximadamente 2,2 mm. Com isso, visando uma margem de segurança para as FBGs, a deformação utilizada nos testes de flexão foi de aproximadamente de 1,7 mm.

A caracterização de flexão foi realizada, colocando o diafragma no suporte e fixando na máquina de flexão. A máquina foi então ajustada para realizar uma deformação axial no diafragma de aproximadamente 1,7 mm. Foram realizados 15 ciclos de flexão para cada configuração de diafragma apresentada. O ângulo de rotação do virabrequim da máquina foi dividido em 100 passos para obtermos pontos de avanço do pistão. Ou seja, a cada passo dado pela máquina, o eixo do virabrequim gira 3,6 graus.

Na caracterização da temperatura foi utilizado uma câmara climática (Quimis, Q315C21), com a temperatura variando de 22ºC a 40ºC para obtermos a sensibilidade à temperatura de cada FBG. Para a aquisição do comprimento de onda de Bragg para esse teste de flexão dos diafragmas de borracha nitrílica foi necessário usar um interrogador que possui uma taxa de aquisição de dados maior do que o usado nos testes para o diafragma de borracha de silicone.

Os espectros refletidos foram adquiridos pelo interrogador óptico HYPERION si255 (Luna, USA) com resolução de 1 pm e uma taxa de aquisição de 1 kHz.

3.2.2 Fabricação do sensor

O sistema de monitoramento de nível de líquido é composto por duas FBGs inseridas em um diafragma circular formado por três camadas de borracha nitrílica coladas, conforme mostrado na Figura 14. Cada FBG é inserida dentro de um tubo capilar de PTFE de diâmetro externo de 0,5 mm. Como mostrado na Figura 14(c), entre a primeira e a segunda camada de borracha, é posicionada um tubo de PTFE, e entre a segunda e a terceira é posicionada o segundo tubo de PTFE. Após colado, é inserido uma FBG em cada tubo e colado uma fita adesiva nas extremidades da fibra para evitar o deslizamento da mesma. Ou seja, a sequência de posicionamento é: camada de borracha - sensor FBG - camada de borracha - sensor FBG - camada de borracha. O posicionamento das FBGs é feito de forma que elas fiquem opostos em relação a linha neutra do diafragma.

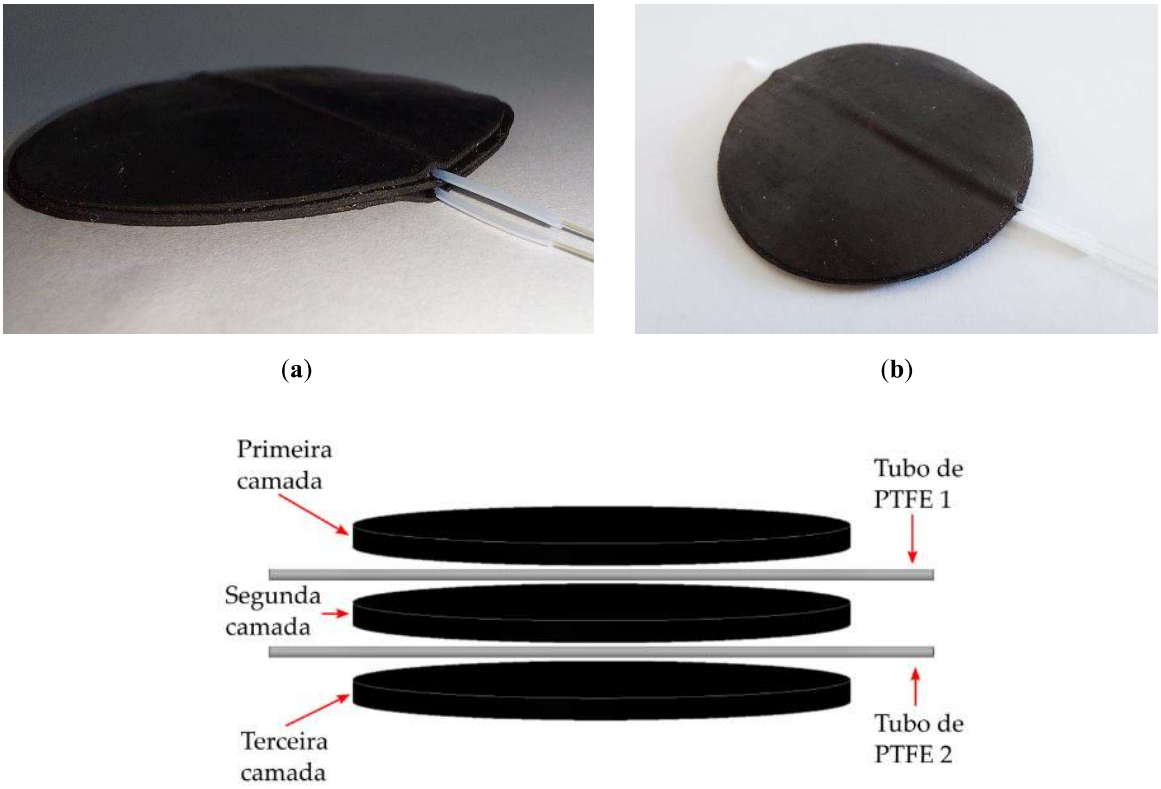
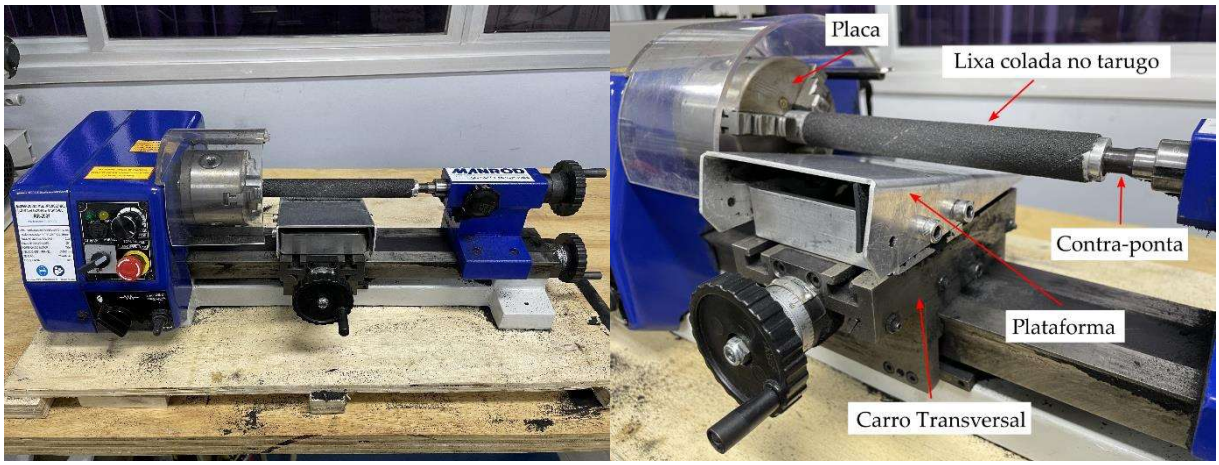


Figura 14. (a) Foto mostrando os tubos de PTFE inserido entre as camadas de borracha nitrílica do diafragma. (b) Foto da superfície superior do diafragma. (c) Desenho esquemático da construção do diafragma de borracha nitrílica.

Devido a limitação de quantidade de FBGs disponíveis, foram usadas somente duas FBGs para todas as configurações de diafragmas, ou seja, primeiro foi construído a configuração 1 com as duas FBGs inseridas e em seguida foram realizados os testes. Após isso, as FBGs foram retiradas e inseridas no diafragma da configuração 2 para a realização dos testes. Dá mesma forma foi feita para as configurações 3 e 4.

A borracha para a produção do diafragma com as FBGs foi usinada até atingir as dimensões desejadas utilizado a máquina apresentada na Figura 15. A máquina usada para o desgaste foi construída utilizando como base o torno (Mini Máquina Multifuncional - MANROD-MR-2001). A manta de borracha nitrílica foi desgastada por uma lixa de granulação 80 colada em um tarugo de alumínio de 20mm. Esse tarugo foi fixado na placa do torno e apoiado no suporte de contra-ponta. Uma plataforma de alumínio com uma inclinação de 15 graus foi construída para a realização de um desgaste uniforme. Essa plataforma foi montada no carro transversal do torno, permitindo fazer o ajuste fino da espessura do diafragma através da distância entre a tangente da superfície da plataforma com o tarugo.



(a) **(b)**

Figura 15. (a) Visão geral do torno equipado para realizar a usinagem da borracha nitrílica. (b) Detalhamento dos elementos que compõem a máquina de usinagem.

Afim de realizar a análise da influência da distância entre as FBGs no sensor, quatro diferentes configurações de diafragmas foram construídas, variando-se a espessura da camada que separa as duas FBGs, dessa forma a espessura total dos diafragmas também foi aumentada. Os diafragmas possuem um diâmetro de 45 mm, sendo que o diâmetro exposto do diafragma

quando inserido no suporte é de somente 35 mm. Na Tabela 1 são apresentadas as variações das espessuras das camadas de borracha e suas disposições no diafragma.

Tabela 1. Dimensões dos Diafragmas.

Configuração	Espessura inferior	Espessura do meio	Espessura superior
1	0,40 mm	0,70 mm	0,40 mm
2	0,40 mm	0,60 mm	0,40 mm
3	0,40 mm	0,50 mm	0,40 mm
4	0,40 mm	0,40 mm	0,40 mm

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das validações experimentais propostas nesse trabalho. Esse capítulo foi dividido em duas seções. Na seção 4.1 é analisado a linearidade e a sensibilidade do sensor baseado em diafragma de borracha de silicone quando submetido a testes de temperatura, compressão, flexão e de nível de líquido. Na seção 4.2 são analisadas as linearidades e sensibilidades dos sensores baseados em diafragmas de borracha nitrílica quando submetidos a testes de temperatura e flexão.

4.1 SENSOR BASEADO EM DIAFRAGMA DE BORRACHA DE SILICONE

Foram realizados testes de flexão, compressão e nível de líquido para verificar experimentalmente o sistema proposto. Além disso, foi realizado a caracterização da temperatura no sensor.

4.1.1 Caracterização de temperatura

Foi realizada uma caracterização de temperatura na qual foram colocados sensores dentro de uma estufa com variação de temperatura de 23,5°C a 45°C. Após atingir 25°C, a temperatura subiu em 5°C de cada vez até 45°C. Uma vez alcançada a temperatura desejada para a caracterização, era mantida por 5 minutos para estabilizar e assim fazer a aquisição da temperatura e dos dados de comprimento de onda adquiridos pelo interrogador. Na realização da regressão linear, para cada temperatura desejada, foram usados 100 dados de comprimento de onda de Bragg tiradas desse intervalo de tempo na qual a temperatura foi mantida constante.

As Figuras 16(a) e (b) mostram os espectros refletidos da FBG1 e da FBG2, respectivamente, sob diferentes temperaturas, onde é possível observar um deslocamento linear do comprimento de onda em função do tempo.

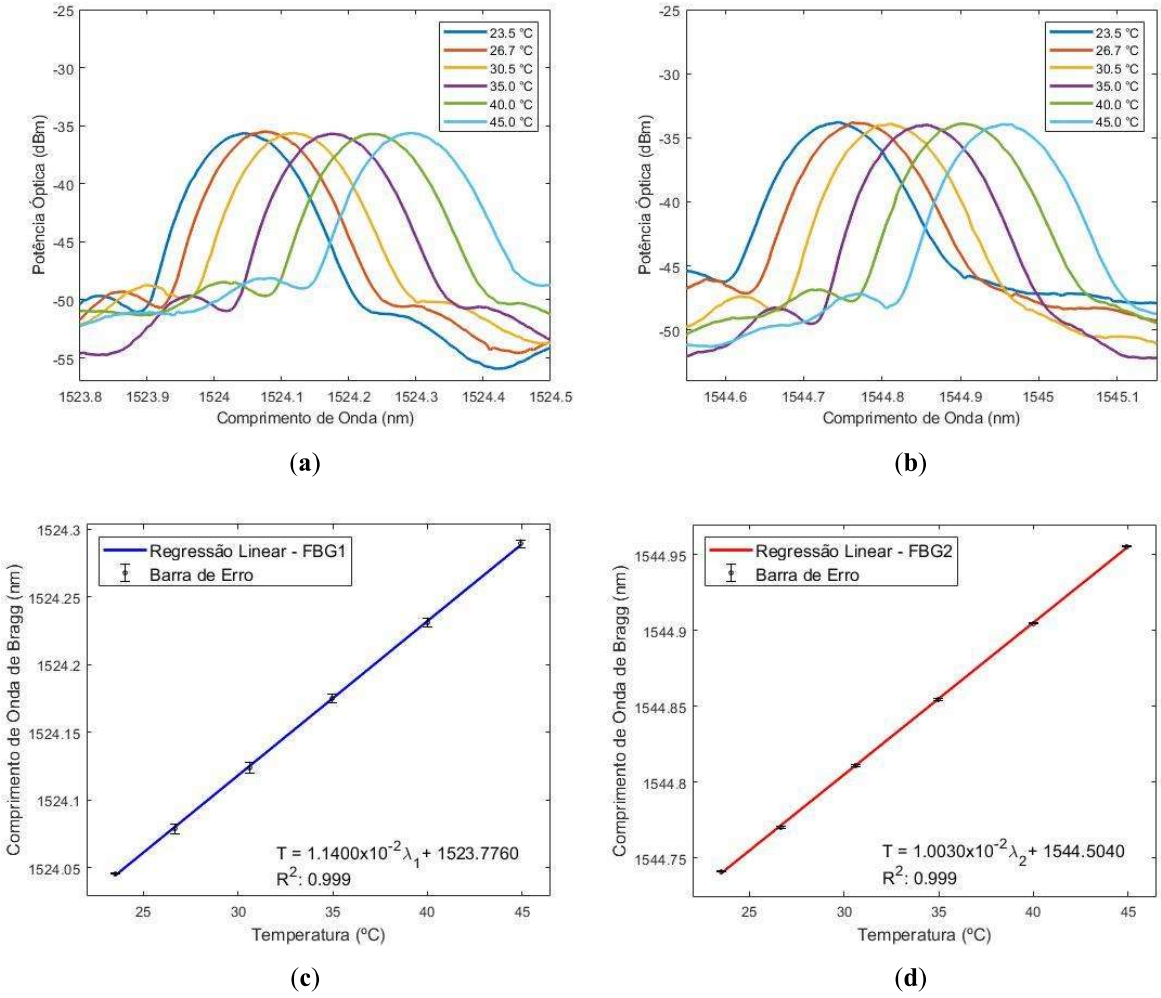


Figura 16. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para (a, c) FBG1 e a (b, d) FBG2.

As Figuras 16(c) e (d) mostram variações do comprimento de onda de Bragg à medida que a temperatura aumenta (de 23°C a 45°C) para ambas FBGs. O desvio padrão do teste foi obtido através da média dos desvios padrão de cada ponto utilizado na regressão linear. A partir desse cálculo foi obtido uma média de desvio padrão de aproximadamente 2,91 pm para FBG 1 e 0,53 pm para FBG 2. Da inclinação da curva, a sensibilidade à variação de temperatura para a FBG1 é de 11,40 pm/°C e a sensibilidade para a FBG2 é de 10,03 pm/°C. O coeficiente de determinação (R^2) é definido como a proporção da variação de uma variável (temperatura neste caso) da variável independente (deslocamento do comprimento de onda neste caso). Nos testes de temperatura, o R^2 foi de 0,999 para resposta FBG1 e 0,999 para resposta FBG2. Ambas FBGs tiveram maior sensibilidade à temperatura do que o normal para FBGs não revestidas (9,75 pm/°C [35]). Isso é causado por uma expansão térmica do material do diafragma, resultando em mais deformação (ou deslocamento) nas FBGs, além do deslocamento indicado

pela Equação (2). No entanto, a inserção de FBGs no diafragma de borracha de silicone não aumentou a sensibilidade tanto quanto em outros materiais, como poliuretano (19,5 pm/°C) e borracha nitrílica (49,8 pm/°C). Também foi um pouco menor do que no mesmo material (PDMS) (12,3 pm/°C), mostrado em [25]. Isso acontece porque nos sensores fabricados com só uma FBG dentro diafragma, as paredes de polímero entre a FBG e o ambiente são mais espessas. Como a condução térmica dentro do diafragma, vai da parede externa do diafragma pro meio, o tempo de resposta a temperatura é maior. Porém, toda essa parede está sofrendo expansão térmica. Por isso a sensibilidade à temperatura nesse caso é maior.

Um ponto importante que vale ressaltar é que muitas vezes essa configuração de diafragma com FBGs inseridas, é feita para medir pressão e outros parâmetros que são relacionados à pressão (força, deslocamento, nível de líquido). Porém, o grande problema dessa configuração é que o sensor é mais sensível à temperatura do que a pressão. No entanto, o fato de conseguir uma sensibilidade próxima à uma sensibilidade da FBG sem revestimento é algo interessante, pois as técnicas de compensação de temperatura em sensor baseado em diafragma, são difíceis de serem implementadas por causa dessa grande diferença entre os valores da sensibilidade à temperatura e a sensibilidade à pressão.

4.1.2 Caracterização de flexão

No teste de flexão, pesos calibrados foram usados para controlar a força que foi aplicada ao diafragma. Considerando a gravidade como 9,81 m/s^2, foram aplicadas forças entre 0 N e 4,905 N (500 g). Um peso de 0,491 N (50 g) foi adicionado a cada uma das duas primeiras etapas. Em seguida, para as seguintes aplicações de força, foram somados pesos de 0,981 N (100 g), até o último valor de força. A temperatura foi ajustada à temperatura ambiente e foi mantida constante. Para mostrar a repetibilidade do sensor, o experimento foi repetido duas vezes com força aumentada.

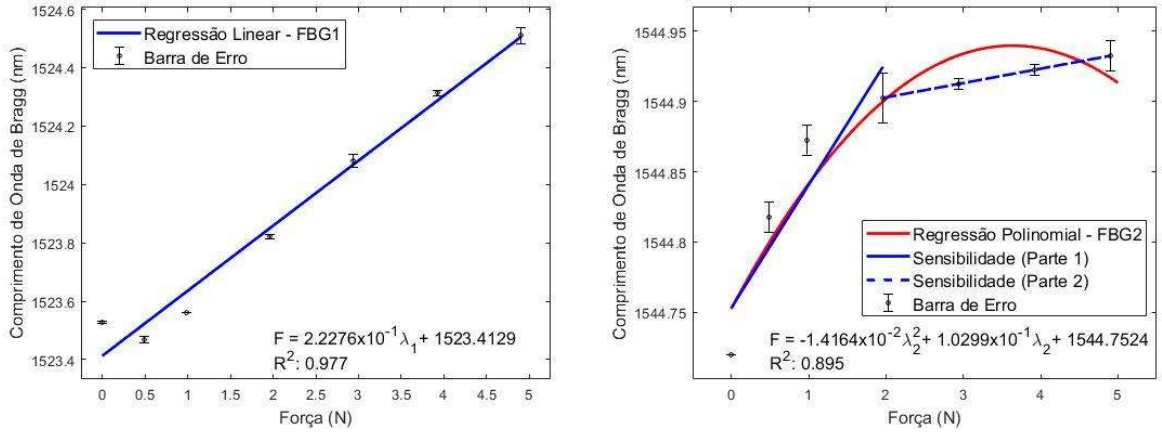
A Figura 17(a) mostra que o comprimento de onda de FBG1 tende a aumentar linearmente com maior força exercida sobre o diafragma, onde foi obtido um desvio padrão médio de 11,62 pm em uma análise de dois testes consecutivos. A Figura 17(b) mostra que o comprimento de onda de FBG2 tende a aumentar não linearmente. A curva obtida a partir da regressão linear para FBG2 possui um desvio padrão médio de 8,08 pm. Foram levantadas diferentes hipóteses para esse comportamento, dentre eles estão a diferença entre o módulo Young de fibra de sílica

e o diafragma de borracha de silicone, uma vez que o módulo Young de borracha de silicone (0,8 MPa [25]) é menor que o módulo Young de fibra (70 GPa [41]). A fibra restringe o diafragma do alongamento transversal exercendo maior força sobre ele e, assim, reduz o estresse nas regiões do diafragma e FBG. Outra hipótese é que a resposta não linear pode ser causada pela anisotropia do material. Quando o diafragma recebe maior força, pode sofrer uma deformação transversal, pois a tensão em torno do plano principal do tensor ao qual está submetido pode ser maior [41].

A partir da inclinação da curva da Figura 17(a), verificamos que a sensibilidade à força de FBG1 é de 222,77 pm/N. No entanto, como a FBG2 não possui uma tendência linear, sua sensibilidade à força foi dividida em duas partes. A Figura 17(b) mostra que a sensibilidade entre 0 N e 1,962 N (200 g) é 87,52 pm/N e a sensibilidade entre 1,962 N (200 g) e 4,905 N (500 g) é 10,19 pm/N. Assim, obtemos um sistema com capacidade de resolução de 4,49 mN para a FBG1, 11,43 mN e 98,10 mN, para a primeira e segunda faixas apresentadas anteriormente para a FBG2.

Afim de analisar a linearidade do sistema, foi utilizado o método de mínimos quadrados, que consiste em uma técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados [80]. Na análise da linearidade de cada FBG separada, foi utilizado o modelo de regressão linear simples para a FBG1 e o modelo de regressão polinomial para a FBG2. Esses modelos consistem em usar a variável que será estimada e uma única variável que tem poder de explicação sobre a que será estimada para criar um modelo de predição. Já na análise utilizando as duas FBGs para realizar a predição, foi utilizado o modelo de regressão polinomial múltipla. Onde são usadas a variável que será estimada e mais de uma variável que tem poder de explicação sobre a que será estimada para criar um modelo de predição.

A inserção de duas FBGs no diafragma resultou em um sistema com maior linearidade, pois as duas FBGs (0,995) tiveram um coeficiente de determinação ajustado (R_a^2) maior do que o R^2 com a FBG1 (0,977) e com a FBG2 (0,895) isoladamente.



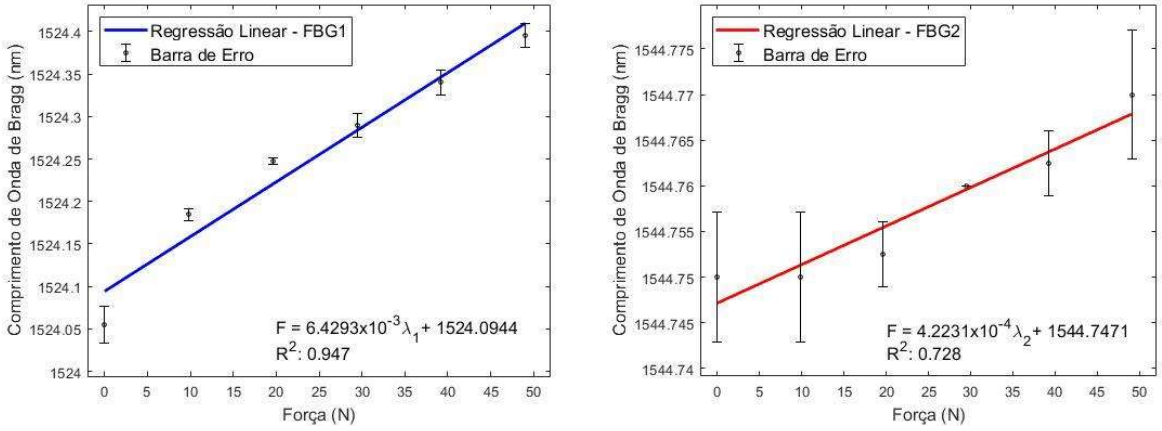
(a) (b)

Figura 17. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da força de flexão para (a) FBG1 e a (b) FBG2.

4.1.3 Caracterização de compressão

Testes de compressão também foram realizados em temperatura ambiente constante, e pesos calibrados entre 0 N e 49,05 N foram usados para controlar com precisão a força aplicada ao diafragma. Em cada etapa, foram adicionados 9,81 N.

A Figura 18 mostra que os comprimentos de onda de FBG1 e FBG2 aumentam linearmente com maior força aplicada ao diafragma, onde os desvios padrão médios de 12,37 pm e 4,71 pm foram encontrados para FBG1 e FBG2, respectivamente (em dois testes consecutivos). Isso ocorre porque a compressão axial aplicada em uma das superfícies do diafragma resulta em uma distorção radial da borracha, que então passa para as FBGs. Como resultado, a sensibilidade à força obtida a partir das inclinações da curva na Figura 18(a) e (b) são 6,43 pm/N para FBG1 e 0,42 pm/N para FBG2. Assim, obteve-se um sistema com capacidade de resolução de 155,52 mN para FBG1 e 2380,95 mN para FBG2. Em relação à linearidade, o R^2 da resposta de ambas FBGs (0,951) é maior que o R^2 da FBG1 (0,947) e da FBG2 (0,728).



(a) **(b)**

Figura 18. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da força de compressão para (a) FBG1 e a (b) FBG2.

4.1.4 Caracterização de nível de líquido

O teste de nível de água foi realizado em duas etapas à temperatura ambiente constante. Primeiro, o nível da água aumentou de 67 mm para 1100 mm, aumentando em etapas de 100 mm após atingir o nível de 100 mm. Após o término do primeiro estágio, o nível da água diminuiu de 1100 mm para 67 mm. Visando a confiabilidade do teste, em cada teste, o sensor de nível foi testado duas vezes com níveis crescentes e decrescentes. A Figura 19 mostra os espectros refletidos de FBG1 e FBG2, respectivamente, nos dois estágios de aumento e redução do nível de líquido do tanque.

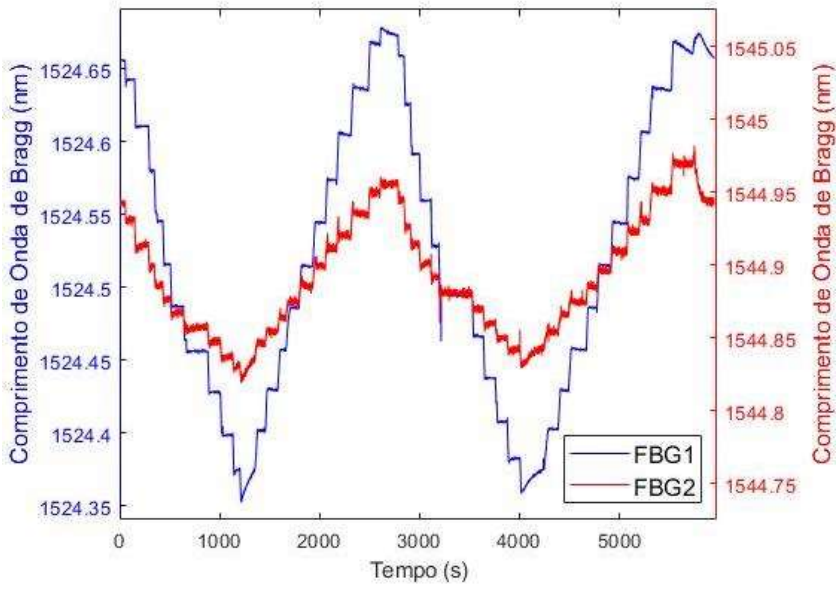
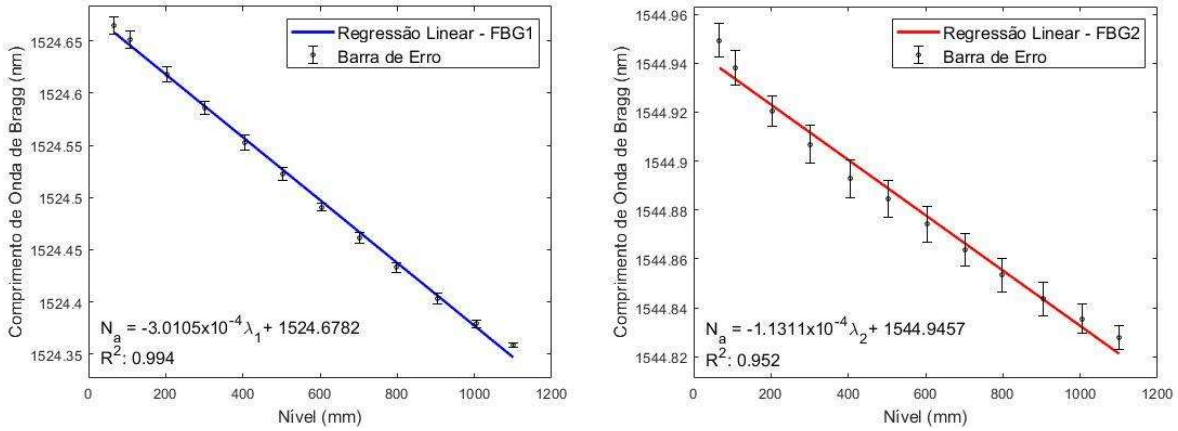


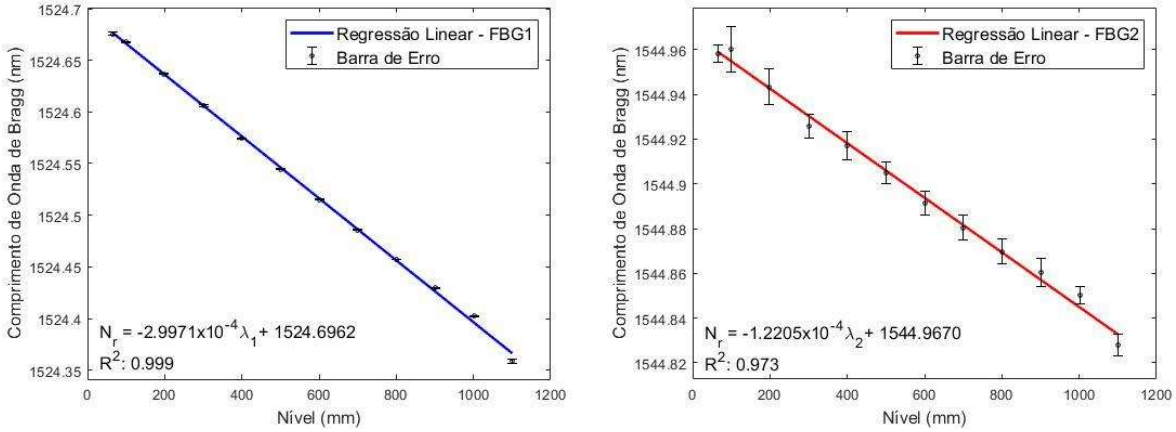
Figura 19. Respostas temporais durante a subida e descida do nível do líquido para FBG1 e FBG2.

As Figura 20 e 21 mostram que os comprimentos de onda da FBG1 e da FBG2 tendem a diminuir linearmente com níveis de líquido mais altos na fase de enchimento e esvaziamento. No aumento do nível de líquido, foram obtidos desvios padrão médios de 5,73 pm e 6,84 pm para FBG1 e FBG2, respectivamente, enquanto desvios padrão médios de 0,79 pm e 5,84 pm foram encontrados para o nível de líquido decrescente, para FBG1 e FBG2, respectivamente. Assim, para a variação crescente do nível de líquido, a sensibilidade é de -0,301 pm/mm para a variação do nível de FBG1 e -0,113 pm/mm para a variação do nível de FBG2. O sistema apresentou maior linearidade com duas FBGs, pois o R^2 da resposta de ambas FBGs (0,997) é maior que o R^2 da FBG1 (0,994) e da FBG2 (0,952) sozinhos. Por outro lado, para a variação decrescente do nível de líquido, a sensibilidade é de -0,300 pm/mm para a variação do nível de FBG1 e é de -0,122 pm/mm para a variação do nível de FBG2. Com duas FBGs no diafragma, resultou em um sistema com maior linearidade do que a FBG2 sozinho e menor linearidade do que a FBG1 sozinho, pois o R^2 da regressão usando ambas FBGs (0,999) é igual ao R^2 da FBG1 (0,999) e superior ao FBG2 (0,973). Isso pode estar relacionado a pequenos desvios na condição de embutimento, por exemplo, a fibra não é perfeitamente reta e pré-tensionada. Com os resultados deste e de testes anteriores, descobrimos que a FBG2 não é tão estável quanto a FBG1, isso pode ser resolvido substituindo o FGB2. Portanto, podemos ter um sistema com capacidade de estimar o nível de líquido e outros parâmetros mencionados anteriormente.



(**a**) (**b**)

Figura 20. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da elevação do nível do tanque para (a) FBG1 e a (b) FBG2.



(**a**) (**b**)

Figura 21. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da redução do nível do tanque para (a) FBG1 e a (b) FBG2.

Com base nas sensibilidades obtidas nos testes de nível, foi possível obter um sistema com capacidade de resolução de 3,32 mm para a FBG1 e 8,85 mm para a FBG2 para variação crescente do nível de líquido, e 3,33 mm para a FBG1 e 8,20 mm para a FBG2 para variação decrescente.

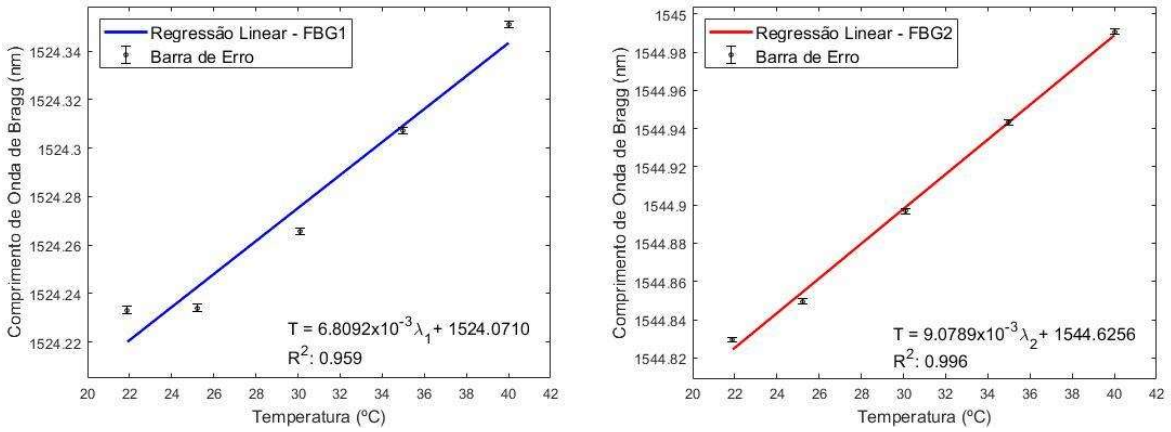
4.2 SENSOR BASEADO EM DIAFRAGMA DE BORRACHA NITRÍLICA

Nessa seção é abordado os resultados da caracterização de temperatura e flexão para cada configurações de diafragma de borracha nitrílica. Ao final da seção é realizada uma comparação entre as 4 configurações.

4.2.1 Caracterização de temperatura

Foi realizada a caracterização de temperatura na qual foram colocados os 4 sensores dentro de uma câmara climática com variação de temperatura de 22°C a 40°C. Após atingir 25°C, a temperatura subiu em 5°C de cada vez até 40°C. Uma vez alcançada a temperatura desejada para a caracterização, era mantida por 5 minutos para estabilizar e assim fazer a aquisição da temperatura e dos dados de comprimento de onda adquiridos pelo interrogador. Na realização da regressão linear, para cada temperatura desejada, foram usados 100 dados de comprimento de onda de Bragg tiradas desse intervalo de tempo na qual a temperatura foi mantida constante.

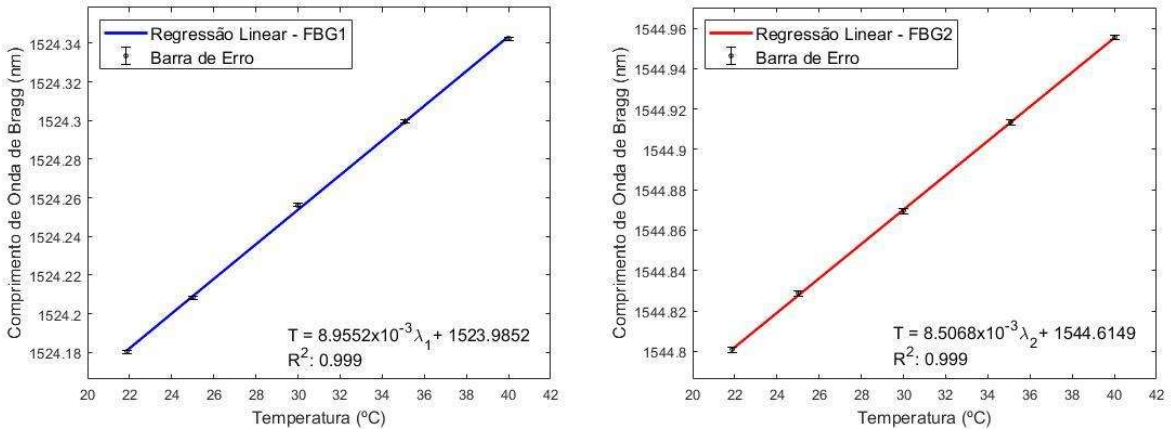
Analisando os dados obtidos na caracterização de temperatura para a configuração 1, obtemos a regressão linear para cada FBG inserida no diafragma. A Figura 22 mostra uma variação do comprimento de onda de Bragg à medida que a temperatura aumenta (de 22°C a 40°C) para ambas FBGs. O desvio padrão médio dos testes realizados é de aproximadamente 1,42 pm para FBG 1 e 1,40 pm para FBG 2. Da inclinação da curva, a sensibilidade de variação de temperatura de FBG1 é de 6,81 pm/°C e a sensibilidade de FBG2 é de 9,08 pm/° C. Nos testes de temperatura, o R^2 foi de 0,959 para FBG1 e 0,996 para FBG2.



(**a**) (**b**)

Figura 22. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para (a) FBG1 e a (b) FBG2 da configuração 1 do diafragma.

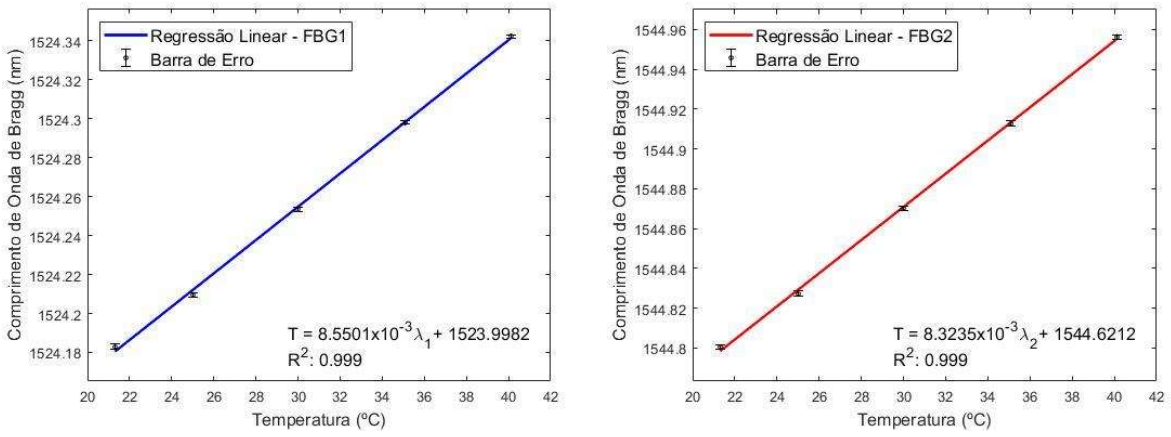
Os dados obtidos na caracterização de temperatura para a configuração 2, mostram na Figura 23 uma variação do comprimento de onda de Bragg à medida que a temperatura aumenta (de 22°C a 40°C) para ambas FBGs. O desvio padrão médio dos testes realizados é de aproximadamente 0,98 pm para FBG 1 e 1,34 pm para FBG 2. Da inclinação da curva, a sensibilidade de variação de temperatura de FBG1 é de 8,96 pm/°C e a sensibilidade de FBG2 é de 8,51 pm/° C. Nos testes de temperatura, o R^2 foi de 0,999 para FBG1 e 0,999 para FBG2.



(**a**) (**b**)

Figura 23. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para (a) FBG1 e a (b) FBG2 da configuração 2 do diafragma.

Na Figura 24 obtida através da regressão linear da configuração 3, podemos observar uma variação do comprimento de onda de Bragg à medida que a temperatura aumenta (de 22°C a 40°C) para ambas FBGs. O desvio padrão médio dos testes realizados é de aproximadamente 1,03 pm para FBG 1 e 1,28 pm para FBG 2. Da inclinação da curva, a sensibilidade de variação de temperatura de FBG1 é de 8,55 pm/°C e a sensibilidade de FBG2 é de 8,32 pm/° C. Nos testes de temperatura, o R^2 foi de 0,999 para FBG1 e 0,999 para FBG2.

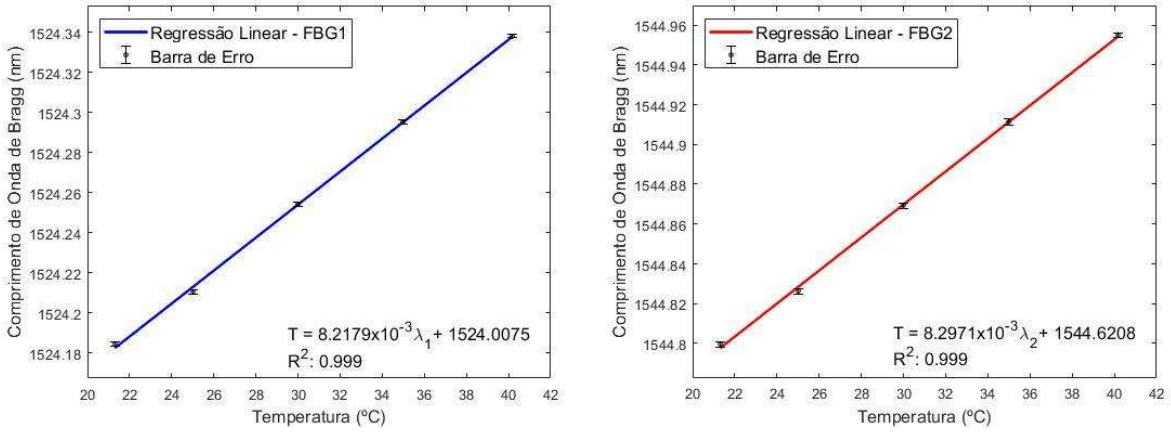


(**a**) (**b**)

Figura 24. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para (a) FBG1 e a (b) FBG2 da configuração 3 do diafragma.

E na Figura 25 obtida na configuração 4, observasse uma variação do comprimento de onda de Bragg à medida que a temperatura aumenta (de 22°C a 40°C) para ambas FBGs. O

desvio padrão médio dos testes realizados é de aproximadamente 1,17 pm para FBG 1 e 1,32 pm para FBG 2. Da inclinação da curva, a sensibilidade de variação de temperatura de FBG1 é de 8,22 pm/°C e a sensibilidade de FBG2 é de 8,30 pm/° C. Nos testes de temperatura, o R^2 foi de 0,999 para FBG1 e 0,999 para FBG2.



(**a**) (**b**)

Figura 25. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura para (a) FBG1 e a (b) FBG2 da configuração 4 do diafragma.

A Tabela 2 apresenta a sensibilidade a temperatura de cada configuração. Podemos observar que as sensibilidades de ambas FBGs ficaram próximas a sensibilidade de FBGs sem qualquer tipo de revestimento (9,75 pm/°C [35]). Devido ao fato de a fibra não estar colada no diafragma, a expansão térmica do material do diafragma não teve influência na expansão térmica da fibra, pois a fibra não estava colada ao diafragma, resultando somente o deslocamento indicado pela Equação (2). Assim, a inserção da fibra no diafragma não aumentou a sensibilidade a temperatura, o que é uma vantagem, uma vez que quanto maior a sensibilidade, maior serão os erros na medição quando a temperatura não for constante.

Tabela 2. Comparação da sensibilidade e linearidade no teste de temperatura entre as configurações de diafragma de borracha nitrílica.

Temperatura				
Configuração	**FBG1**		**FBG2**	
	Sensibilidade	**Linearidade**	**Sensibilidade**	**Linearidade**
1	6,81 pm/°C	0,959	9,08 pm/°C	0,996
2	8,96 pm/°C	0,999	8,51 pm/°C	0,999
3	8,55 pm/°C	0,999	8,32 pm/°C	0,999
4	8,22 pm/°C	0,999	8,30 pm/°C	0,999

4.2.2 Caracterização de flexão

Os testes de flexão foram realizados de forma que o diafragma sofresse uma deformação de 1,7 mm, onde tinha-se o controle das posições em que o pistão se encontrava. Para confiabilidade do teste, em cada teste, o sensor foi testado em 15 ciclos com deformações crescentes e decrescentes.

A Figura 26 mostra os espectros refletidos da FBG1 e FBG2, nos dois estágios de aumento e redução da deformação axial para todas as configurações de diafragmas. Foram feitos 15 ciclos de flexão, que são representados por cada pico na figura. Porém, podemos ver que nas Figuras 26(a), (c) e (d) os dois primeiros ciclos apresentaram um deslocamento do comprimento de onda de Bragg maior que os outros ciclos na região de máxima deformação (ponto máximo do pico), devido esse comportamento, foi retirado os 5 primeiros ciclos do ensaio para todas as configurações para reunir os dados dos experimentos com maior estabilidade.

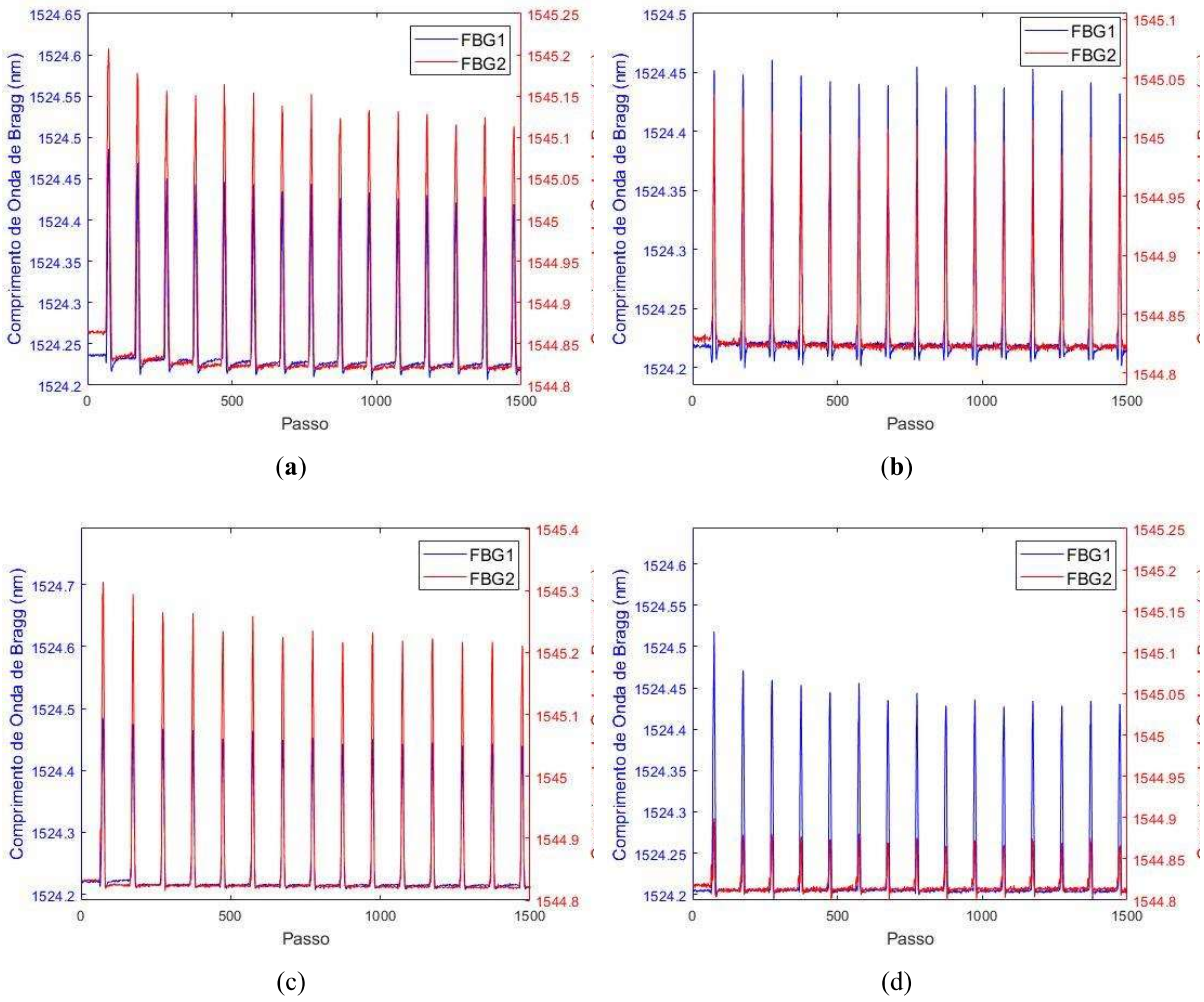
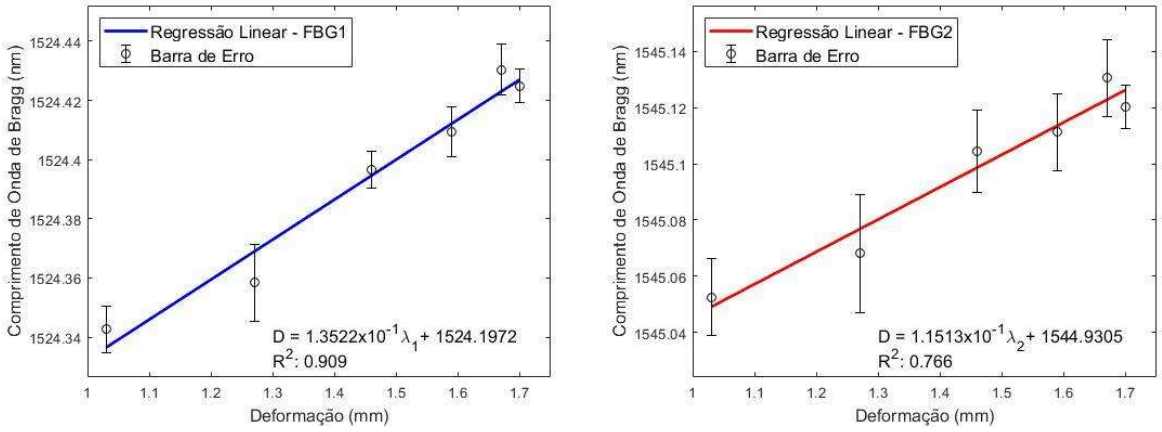


Figura 26. Resposta do comprimento de onda de Bragg durante o avanço e o recuo do pistão para a FBG1 e FBG2: (a) configuração 1, (b) configuração 2, (c) configuração 3 e (d) configuração 4 do diafragma.

Devido as FBGs não serem coladas ao diafragma, nos primeiros instantes da deformação (deformação de 0 a 1 mm), as FBGs 1 e 2 não sofreram alterações relevantes devido ao escorregamento das mesmas. Com isso, foram excluídos os primeiros pontos de avanço em todas as 4 configurações para a realização da regressão linear apresentada nas Figuras 27, 28, 29 e 30.

A Figura 27, obtida através da regressão linear da configuração 1, mostram que os comprimentos de onda da FBG1 e FBG2 tendem a aumentar linearmente com a deformação do diafragma. O desvio padrão médio dos testes realizados é de aproximadamente 8,26 pm para FBG 1 e 14,09 pm para FBG 2. Na variação crescente da deformação, a sensibilidade é de 135,22 pm/mm para a variação da deformação da FBG1 e 115,13 pm/mm para a variação da deformação da FBG2. O sistema apresentou maior linearidade com duas FBGs, pois o R^2 da

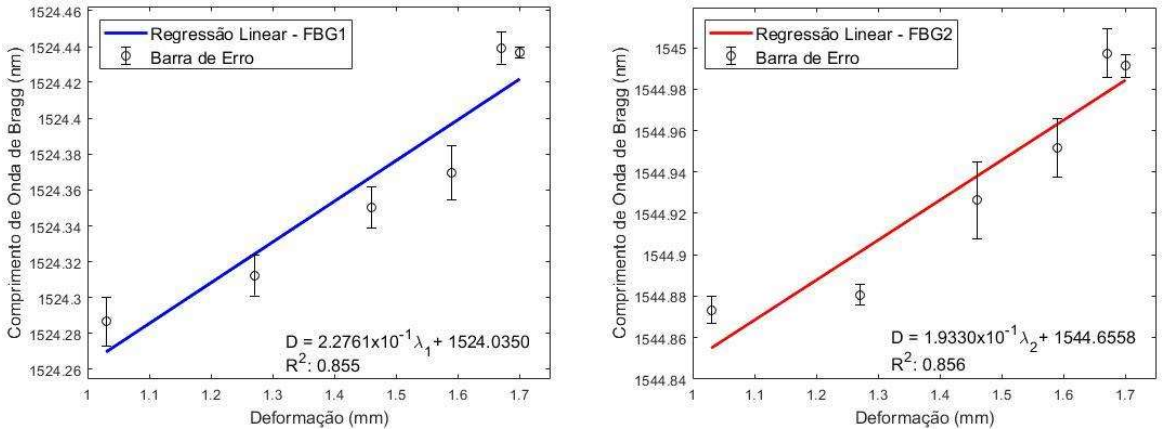
resposta de ambas FBGs (0,934) é maior que o R^2 da FBG1 (0,909) e da FBG2 (0,766) sozinhas. Assim, obteve-se um sistema com capacidade de resolução de 7,40 µm para FBG1 e 8,69 µm para FBG2.



(**a**) (**b**)

Figura 27. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função do aumento da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 1 do diafragma.

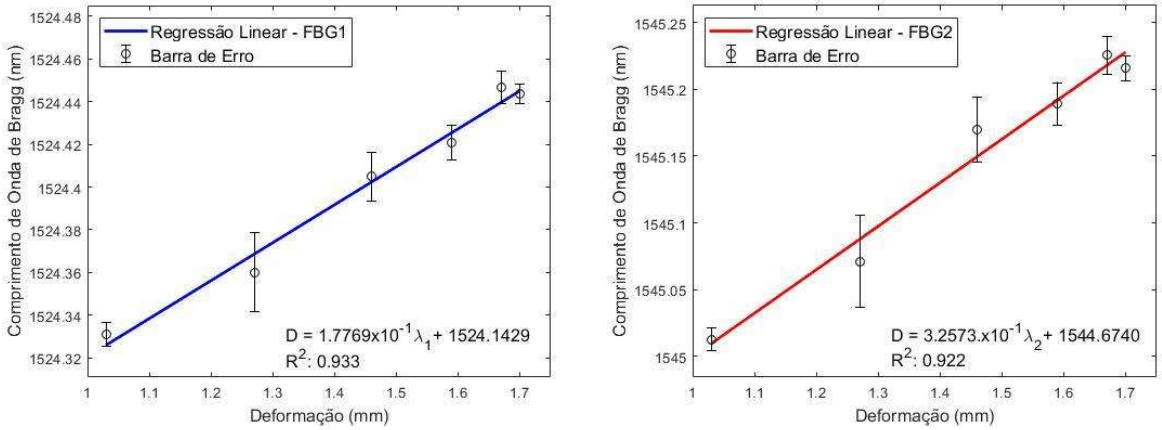
A Figura 28 mostra a regressão linear para a configuração 2, nela podemos observar que os comprimentos de onda da FBG1 e FBG2 tendem a aumentar linearmente com a deformação do diafragma. O desvio padrão médio dos testes realizados é de aproximadamente 10,57 pm para FBG 1 e 10,23 pm para FBG 2. Na variação crescente da deformação, a sensibilidade é de 227,61 pm/mm para a variação da deformação da FBG1 e 193,30 pm/mm para a variação da deformação da FBG2. O sistema apresentou maior linearidade com duas FBGs, pois o R^2 da resposta de ambas FBGs (0,859) é maior que o R^2 da FBG1 (0,855) e da FBG2 (0,856) sozinhas. Assim, obteve-se um sistema com capacidade de resolução de 4,39 µm para FBG1 e 5,17 µm para FBG2.



(**a**) (**b**)

Figura 28. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função do aumento da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 2 do diafragma.

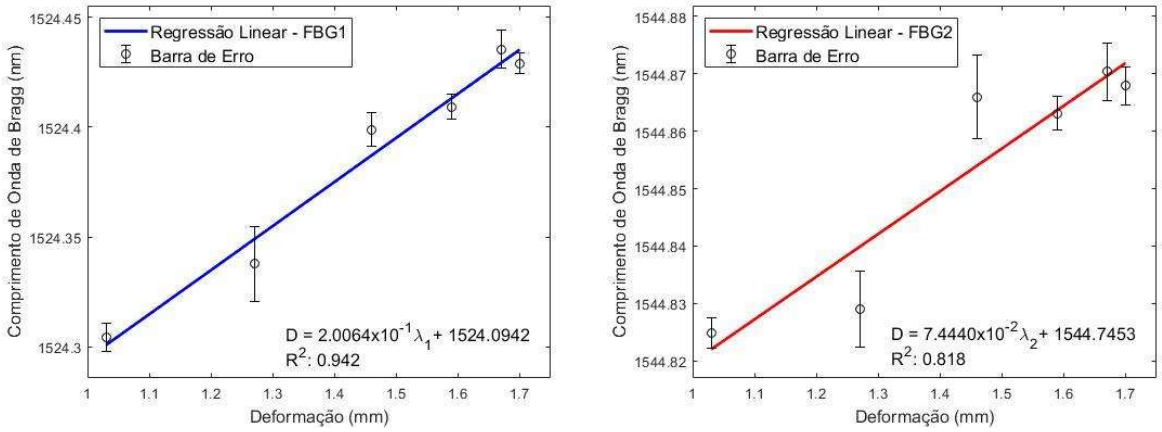
A Figura 29 obtida pela regressão linear da configuração 3, mostra que os comprimentos de onda da FBG1 e FBG2 tendem a aumentar linearmente com a deformação do diafragma. O desvio padrão médio dos testes realizados é de aproximadamente 9,35 pm para FBG 1 e 17,78 pm para FBG 2. Na variação crescente da deformação, a sensibilidade é de 177,69 pm/mm para a variação da deformação da FBG1 e 325,73 pm/mm para a variação da deformação da FBG2. O sistema apresentou maior linearidade com duas FBGs (0,931) do que a FBG2 (0,922) sozinha, e menor que o R^2 da FBG1 (0,933). Uma hipótese é que esse comportamento seja causado devido à má fixação das extremidades das fibras, causando o escorregamento da fibra e assim diminuindo a linearidade do diafragma. Obteve-se que o sistema apresenta uma capacidade de resolução de 5,63 μm para FBG1 e 3,07 μm para FBG2.



(**a**) (**b**)

Figura 29. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função do aumento da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 3 do diafragma.

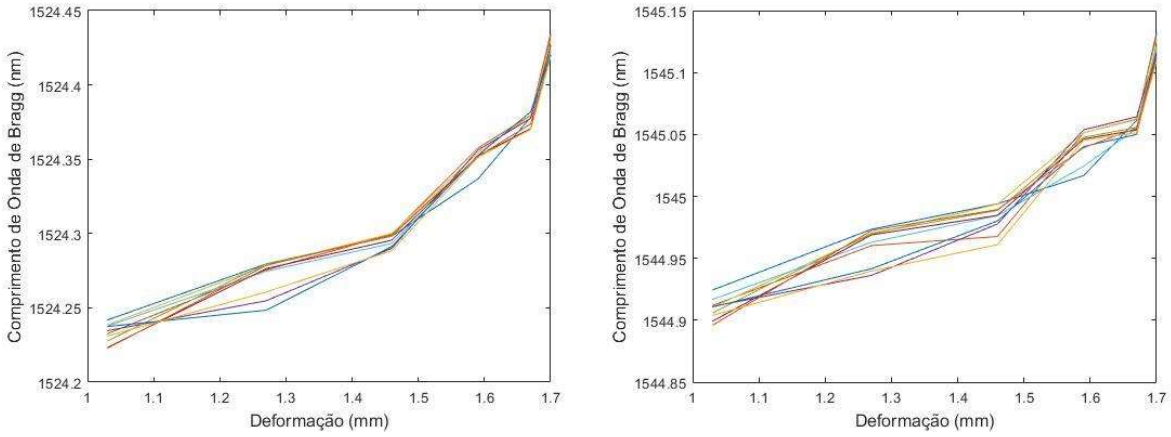
A regressão linear obtida na análise da configuração 4 é apresentada na Figura 30. Essas figuras mostram que os comprimentos de onda da FBG1 e FBG2 tendem a aumentar linearmente com a deformação do diafragma. O desvio padrão médio dos testes realizados é de aproximadamente 8,33 pm para FBG 1 e 4,63 pm para FBG 2. N variação crescente da deformação, a sensibilidade é de 200,64 pm/mm para a variação da deformação da FBG1 e 74,44 pm/mm para a variação da deformação da FBG2 O sistema apresentou maior linearidade com duas FBGs, pois o R^2 da resposta de ambas FBGs (0,952) é maior que o R^2 de FBG1 (0,942) e da FBG2 (0,818) sozinhas. Assim, obteve-se um sistema com capacidade de resolução de 4,98 µm para FBG1 e 13,43 µm para FBG2.



(**a**) (**b**)

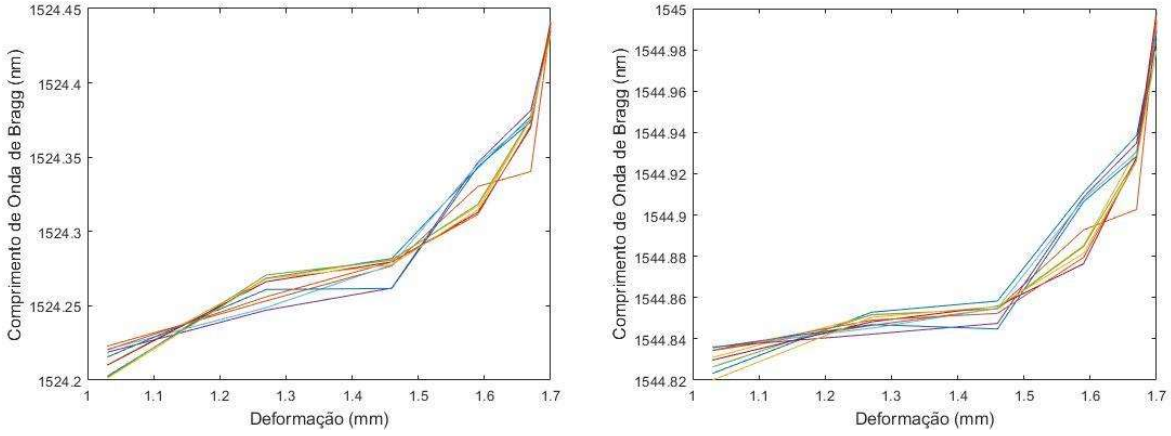
Figura 30. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função do aumento da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 4 do diafragma.

Nas Figuras 31, 32, 33 e 34 são apresentadas as respostas das FBGs 1 e 2 em relação a variação decrescente da deformação. Nelas são apresentados os 10 ciclos de deformação representados pelas curvas. Devido ao fato das curvas não apresentarem um perfil linear, não foi possível realizar a regressão para a variação decrescente da deformação. Foram levantadas diferentes hipóteses para esse comportamento, dentre elas estão a velocidade de retorno ao estado inicial da borracha e a escorregamentos causados pela má fixação da FBGs aos diafragmas, fazendo com que a resposta no recuo do pistão não seja igual à do avanço.



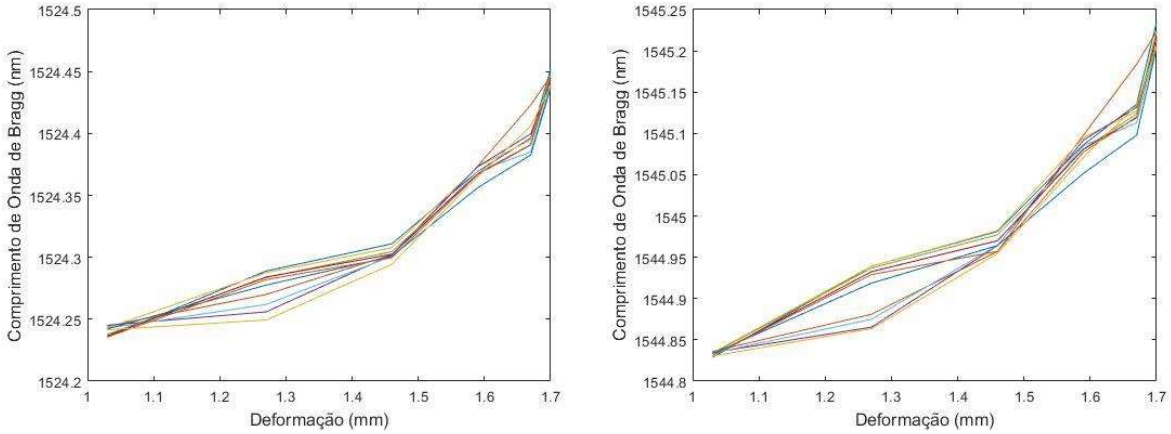
(a) (b)

Figura 31. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg dos ciclos de flexão em função da diminuição da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 1 do diafragma.



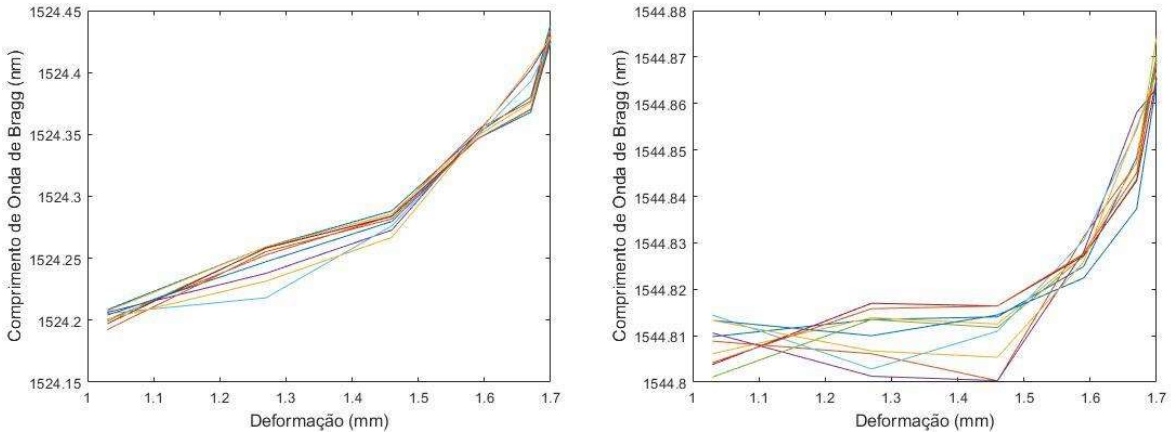
(a) (b)

Figura 32. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg dos ciclos de flexão em função da diminuição da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 2 do diafragma.



(a) (b)

Figura 33. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg dos ciclos de flexão em função da diminuição da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 3 do diafragma.



(a) (b)

Figura 34. Deslocamento do comprimento de onda de Bragg dos ciclos de flexão em função da diminuição da deformação axial do diafragma para a (a) FBG1 e (b) FBG2 da configuração 4 do diafragma.

Na Tabela 3 podemos observar que a FBG2 apresentou os melhores resultados da sensibilidade. Como esperado, teve-se um aumento da sensibilidade a medida em que a espessura total do diafragma diminuía. Isso ocorreu para as configurações 1, 2 e 3. Porém, como apresentado na Figura 34(b), a configuração 4, apresentou a pior resposta do comprimento de onda no momento do alivio da flexão. Isso mostra que o escorregamento da FBG2 na configuração 4 foi maior, afetando a resposta do sensor.

Na FBG1, o aumento da sensibilidade só ocorreu nas configurações 1 e 2. Nas configurações 3 e 4 também ocorreu um aumento, mas podemos observar que a sensibilidade da configuração 3 caiu quase pela a metade em comparação com a FBG2 da mesma

configuração. Mostrando assim, que a sensibilidade da FBG1 para as configurações 3 e 4 também foram reduzidas de forma significativa.

Comparando os resultados das configurações 1 e 2, podemos observar que a medida em que a camada de borracha nitrílica (camada do meio) que separa as FBGs diminui, a sensibilidade é aumentada. Entretanto, a sensibilidade da FBG1 aumenta mais que a sensibilidade da FBG2.

Tabela 3. Comparação da sensibilidade e linearidade no teste de flexão entre as configurações de diafragma de borracha nitrílica.

Flexão					
Configuração	**FBG1**		**FBG2**		**FBGs Combinadas**
	Sensibilidade	**Linearidade**	**Sensibilidade**	**Linearidade**	**Linearidade**
1	135,22 pm/mm	0,909	115,13 pm/mm	0,766	0,934
2	227,61 pm/mm	0,855	193,30 pm/mm	0,856	0,859
3	177,69 pm/mm	0,933	325,73 pm/mm	0,922	0,931
4	200,64 pm/mm	0,942	74,44 pm/mm	0,818	0,952

5 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs o desenvolvimento e caracterização de um sensor de nível de líquido baseado em um par de grades de Bragg de fibra (FBGs), embutidas em diafragmas circulares de borracha de silicone (PDMS) e de borracha nitrílica. Os sensores foram testados experimentalmente sob temperatura constante, em que a sua resposta foi caracterizada a partir dos vários testes executados. Testes de flexão realizados no diafragma de borracha de silicone utilizando pesos padrão resultaram em uma sensibilidade de 222,77 pm/N para FBG1. Na FBG2, foi obtido uma sensibilidade de 87,52 pm/N entre 0 N e 1,962 N, e 10,19 pm/N entre 1,962 N e 4,905 N. Os testes também mostraram que com duas FBGs no diafragma, o sistema teve linearidade 1,84% maior do que apenas com FBG1 e 11,17% maior do que apenas com FBG2, pois o uso de duas FBGs (0,995) aumentou o coeficiente de determinação ajustado (R_a^2). Assim, o sistema proposto possui uma resolução capaz de detectar uma força mínima de 4,49 mN para esforços de flexão.

Nos testes de compressão realizados no diafragma de borracha de silicone, as FBGs 1 e 2 apresentaram sensibilidades a força de 6,43 pm/N e 0,42 pm/N, respectivamente. Em relação à linearidade, a resposta de ambas FBGs foi 0,42% maior que apenas com a FBG1 e 30,63% maior que a FBG2. Assim, obteve-se um sistema com capacidade mínima de detecção de força de 155,52 mN para esforços de compressão.

Para o aumento do nível de líquido, a sensibilidade à variação do nível foi de -0,301 pm/mm para FBG1 e -0,113 pm/mm para FBG2. A linearidade das respostas combinadas das FBGs 1 e 2 (0,997) foi maior do que nas FBG1 e FBG2 analisadas individualmente. Por outro lado, para a diminuição do nível de líquido, a sensibilidade foi de -0,300 pm/mm para a variação do nível de FBG1 e -0,122 pm/mm para a variação do nível de FBG2. A linearidade do sistema com as FBG combinadas foi maior do que na FBG2 e igual a FBG1 separadamente. Com esta configuração, foi possível obter um sistema com capacidade mínima de detecção de nível de 3,32 mm.

A caracterização da temperatura resulta em sensibilidade à temperatura de 11,40 pm/°C para FBG1 e 10,03 pm/°C para FBG2. Ambas FBGs apresentaram sensibilidade à temperatura mais alta do que o normal para FBGs não revestidos (9,75 pm/°C). No entanto, quando comparados com o poliuretano, FBG1 e FBG2 diminuíram 41,54% e 48,56% na sensibilidade

à temperatura, respectivamente. Quando comparado com a borracha nitrílica, a FBG1 diminuiu 77,11% e a FBG2 diminuiu 79,86%. Portanto, o sistema proposto é um método viável para sensoriamento multiparamétrico utilizando sensores embutidos em diafragma, onde a Tabela 4 mostra a comparação do sensor proposto para medição de temperatura, força e nível de líquido, com sensores previamente propostos na literatura. A comparação é realizada em função da sensibilidade (S) e linearidade (L) de cada parâmetro. Apesar de alguns sensores apresentarem maiores sensibilidades para a análise de cada parâmetro, é importante mencionar que nenhum desses sensores apresentou a possibilidade de medir todos os parâmetros em um único sistema. Além disso, a possibilidade de medição de temperatura com outros parâmetros (como força e nível de líquido) leva à capacidade de compensação automática de temperatura, sem a necessidade de uma FBG adicional conforme mostrado em [41].

Tabela 4. Comparação entre sensores FBG embutidos em diafragma para avaliação multiparâmetros.

	Temperatura		**Força/Pressão**		**Nível de Líquido**	
	S	**L**	**S**	**L**	**S**	**L**
Este trabalho	11,40 pm/°C	0,999	6,43 pm/N	0,947	−0,301 pm/mm	0,994
[43]	Não reportado	Não reportado	175,5 pm/kPa	0,999	1,62 pm/mm	0,999
[41]	43,2 pm/°C	0,999	Não reportado	Não reportado	2,74 pm/mm	0,999
[81]	79,7 pm/°C	0,955	100,7 pm/kPa	0,997	Não reportado	Não reportado

Por fim, podemos afirmar que mesmo com os problemas construtivos encontrados, os diafragmas apresentaram um bom desempenho para a análise de deformações axiais. Além disso, outro benefício do modelo proposto foi a baixa sensibilidade a temperatura.

O sensor com borracha nitrílica foi testado experimentalmente sob temperatura constante, e teve sua resposta caracterizada através dos vários testes executados. A influência da distância entre as FBGs no diafragma de borracha nitrílica foi analisada. Na configuração 1, os testes de flexão resultaram em uma sensibilidade de 135,22 pm/mm para FBG1, enquanto para FBG2 a sensibilidade foi de 115,13 pm/mm. Os testes também mostraram que com duas FBGs no diafragma, o sistema teve linearidade 2,75% maior do que apenas com FBG1 e 21,93% maior

do que apenas com FBG2, pois o uso de duas FBGs (0,934) aumentou o coeficiente de determinação ajustado (R_a^2). Assim, o diafragma da configuração 1 possui uma resolução capaz de detectar uma deformação mínima de 7,40 μm para esforços de flexão.

Na configuração 2, as sensibilidades obtidas no teste de flexão foram 227,61 pm/mm e 193,30 pm/mm para FBG1 e FBG2, respectivamente. Em relação à linearidade, a resposta de ambas FBGs em uma análise combinada foi maior que a FBG1 e que a FBG2. Os testes também mostraram que com duas FBGs no diafragma, o sistema teve linearidade 0,46% maior do que apenas com FBG1 e 0,35% maior do que apenas com FBG2, pois o uso de duas FBGs aumentou o coeficiente de determinação ajustado (R_a^2) para 0,859. Assim, concluímos que o diafragma da configuração 2 possui uma resolução capaz de detectar uma deformação mínima de 4,39 μm para esforços de flexão.

Para a configuração 3, a sensibilidade à deformação foi de 177,69 pm/mm para FBG1 e 325,73 pm/mm para FBG2. A linearidade das respostas combinadas das FBGs 1 e 2 (0,931) foi 0,98% maior do que na FBG2, porém foi 0,21% menor em relação a FBG1 analisada individualmente. Assim, concluímos que o diafragma da configuração 3 possui uma resolução capaz de detectar uma deformação mínima de 3,07 μm para esforços de flexão.

Por fim, a configuração 4 apresentou uma sensibilidade de 200,64 pm/mm para a FBG1 e 74,44 pm/mm para a FBG2. A linearidade do sistema FBG combinado (0,952) foi 1,06% e 16,38% maior do que as FBG1 e FBG2 individuais, respectivamente. Assim, concluímos que o diafragma da configuração 4 possui uma resolução capaz de detectar uma deformação mínima de 4,98 μm para esforços de flexão.

A caracterização da temperatura para todas as configurações resultou em um valor menor que a sensibilidade normalmente encontrada em FBGs não revestidas (9,75 pm/°C).

Por fim, podemos afirmar que mesmo com os problemas de escorregamento da fibra, conseguimos verificar que a sensibilidade é aumentada à medida que a espessura e a distância entre as FBGs diminuem. Dessa forma, os sensores apresentaram alta sensibilidade para deformações axiais. Além disso, os sensores de borracha nitrílica apresentaram menor sensibilidade à temperatura do que o sensor de borracha de silicone. E assim como no sensor com borracha de silicone, esse sensor também possui a possibilidade de medição de temperatura com outros parâmetros.

5.1 CONTRIBUIÇÕES

As contribuições do trabalho desta dissertação de mestrado são:

- Desenvolvimento de uma máquina de desgaste superficial para a produção de diafragmas em diversas espessuras.
- Desenvolvimento de uma máquina de ensaio de flexão que permite um ajuste da deformação e repetibilidade aos testes.
- Demonstração do aumento da linearidade para diversos parâmetros ao usar duas FBGs embutidas no diafragma.
- Demonstração da influência da variação da distância entre as FGBs na sensibilidade do sensor.
- Demonstração de método viável para sensoriamento multiparamétrico utilizando sensores embutidos em diafragma.

5.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

A pesquisa desenvolvida nesta dissertação de mestrado permitiu a produção de um artigo publicado em periódico internacional:

1. MORAIS, Eliton et al. Liquid Level Sensor with Two FBGs Embedded in a PDMS Diaphragm: Analysis of the Linearity and Sensitivity. Sensors, v. 22, n. 3, p. 1268, 2022.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

- Estudos futuros incluem a aplicação destes sensores em tanques de óleo para analisar o comportamento do sensor quando exposto a outro tipo de líquido.
- A fadiga do material será investigada em diversos ciclos para estimar a vida em fadiga dos sensores e analisar a degradação do sinal das FBGs.
- A máquina de usinagem de borracha será melhorada em trabalhos futuros, buscando a otimização da escolha da granulação da lixa, alinhamento do tarugo e nivelamento da plataforma, para aumentar ainda mais a precisão do desgaste da borracha. A máquina de ensaio de flexão também será melhorada, com um melhor controle de avanço do pistão que

realiza a deformação, a obtenção dos dados de posição do pistão e a inclusão de uma célula de carga para a medição da força aplicada no diafragma.

REFERÊNCIAS

[1] LEAL-JUNIOR, Arnaldo G. et al. Optimizing linearity and sensitivity of 3D-printed diaphragms with chirped FBGs in CYTOP fibers. **IEEE Access**, v. 8, p. 31983-31991, 2020.

[2] DÍAZ, Camilo AR et al. Optical fiber sensing for sub-millimeter liquid-level monitoring: a review. **IEEE Sensors Journal**, v. 19, n. 17, p. 7179-7191, 2019.

[3] WÓJCICKI, Krzysztof et al. Internet of Things in Industry: Research Profiling, Application, Challenges and Opportunities—A Review. **Energies**, v. 15, n. 5, p. 1806, 2022.

[4] ALWIS, L.; SUN, T.; GRATTAN, K. T. V. Developments in optical fibre sensors for industrial applications. **Optics & Laser Technology**, v. 78, p. 62-66, 2016.

[5] RORIZ, Paulo et al. Review of fiber-optic pressure sensors for biomedical and biomechanical applications. **Journal of biomedical optics**, v. 18, n. 5, p. 050903, 2013.

[6] BROADWAY, Christian et al. CYTOP fibre Bragg grating sensors for harsh radiation environments. **Sensors**, v. 19, n. 13, p. 2853, 2019.

[7] ZHOU, Bin et al. Active fiber gas sensor for methane detecting based on a laser heated fiber Bragg grating. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 26, n. 11, p. 1069-1072, 2014.

[8] YAZDIZADEH, Z.; MARZOUK, H.; HADIANFARD, Mohammad Ali. Monitoring of concrete shrinkage and creep using Fiber Bragg Grating sensors. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 505-512, 2017.

[9] SUN, Chunran et al. Liquid level and temperature sensing by using dual-wavelength fiber laser based on multimode interferometer and FBG in parallel. **Optical Fiber Technology**, v. 41, p. 212-216, 2018.

[10] LEAL-JUNIOR, Arnaldo; FRIZERA, Anselmo; MARQUES, Carlos. A fiber Bragg gratings pair embedded in a polyurethane diaphragm: Towards a temperature-insensitive pressure sensor. **Optics & Laser Technology**, v. 131, p. 106440, 2020.

[11] MARQUES, C. A. F. et al. Fiber optic liquid level monitoring system using microstructured polymer fiber Bragg grating array sensors: performance analysis. In: **24th**

International Conference on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2015. p. 96345V.

[12] SHI, T. M. et al. Capacitance-based instrumentation for multi-interface level measurement. **Measurement Science and Technology**, v. 2, n. 10, p. 923, 1991.

[13] BUKHARI, Syed Faisal Ahmed; YANG, Wuqiang. Multi-interface level sensors and new development in monitoring and control of oil separators. **Sensors**, v. 6, n. 4, p. 380-389, 2006.

[14] HJERTAKER, Bjorn Tore; JOHANSEN, Geir Anton; JACKSON, Peter. Recent developments in hydrocarbon separator interface imaging. In: **Process Imaging for Automatic Control**. SPIE, 2001. p. 81-92.

[15] MERIBOUT, Mahmoud et al. Interface layers detection in oil field tanks: a critical review. In: **Expert Systems for Human, Materials and Automation**. IntechOpen, 2011.

[16] CHEN, Bao Dong et al. Water wave energy harvesting and self-powered liquid-surface fluctuation sensing based on bionic-jellyfish triboelectric nanogenerator. **Materials today**, v. 21, n. 1, p. 88-97, 2018.

[17] MAGNO, Michele et al. Wake-up radio receiver based power minimization techniques for wireless sensor networks: A review. **Microelectronics Journal**, v. 45, n. 12, p. 1627-1633, 2014.

[18] GU, Ping et al. Narrowband Light Reflection Resonances from Waveguide Modes for High-Quality Sensors. **Nanomaterials**, v. 10, n. 10, p. 1966, 2020.

[19] WRIGHT, Ruishu F. et al. Corrosion sensors for structural health monitoring of oil and natural gas infrastructure: A review. **Sensors**, v. 19, n. 18, p. 3964, 2019.

[20] LEE, Byeong Ha et al. Interferometric fiber optic sensors. **Sensors**, v. 12, n. 3, p. 2467-2486, 2012.

[21] HILL, Kenneth O.; MELTZ, Gerald. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of lightwave technology**, v. 15, n. 8, p. 1263-1276, 1997.

[22] LIANG, Min-fu et al. A fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation based on diaphragm-cantilever structure. **Optik**, v. 145, p. 503-512, 2017.

[23] LIANG, Minfu; FANG, Xinqiu; NING, Yaosheng. Temperature compensation fiber Bragg grating pressure sensor based on plane diaphragm. **Photonic Sensors**, v. 8, n. 2, p. 157-167, 2018.

[24] HUANG, Jun et al. A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation. **Measurement**, v. 46, n. 3, p. 1041-1046, 2013.

[25] LEAL-JUNIOR, Arnaldo G.; FRIZERA, Anselmo; MARQUES, Carlos. Thermal and mechanical analyses of fiber Bragg gratings-embedded polymer diaphragms. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 32, n. 11, p. 623-626, 2020.

[26] KINET, Damien et al. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: Challenges and solutions. **Sensors**, v. 14, n. 4, p. 7394-7419, 2014.

[27] AHMAD, Harith et al. High-sensitivity pressure sensor using a polymer-embedded FBG. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 50, n. 1, p. 60-61, 2008.

[28] LIU, Lihui et al. Temperature-independent FBG pressure sensor with high sensitivity. **Optical fiber technology**, v. 13, n. 1, p. 78-80, 2007.

[29] VILARINHO, Débora et al. POFBG-embedded cork insole for plantar pressure monitoring. **Sensors**, v. 17, n. 12, p. 2924, 2017.

[30] GRANDAL, Tania et al. Analysis of fiber optic sensor embedded in metals by automatic and manual TIG welding. **IEEE Sensors Journal**, v. 19, n. 17, p. 7425-7433, 2019.

[31] ZHAO, Yong et al. A practical FBG pressure sensor based on diaphragm-cantilever. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 279, p. 101-106, 2018.

[32] SRIMANNARAYANA, K. et al. FBG sensor for temperature-independent high sensitive pressure measurement with aid of a Bourdon tube. In: **Optical Sensing and Detection III**. International Society for Optics and Photonics, 2014. p. 91412E.

[33] SONG, Dongcao et al. Liquid-level sensor using a fiber Bragg grating and carbon fiber composite diaphragm. **Optical Engineering**, v. 50, n. 1, p. 014401, 2011.

[34] AL-FAKIH, Ebrahim A. et al. Development and validation of fiber Bragg grating sensing pad for interface pressure measurements within prosthetic sockets. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 4, p. 965-974, 2015.

[35] LI, Tianliang et al. A diaphragm type fiber Bragg grating vibration sensor based on transverse property of optical fiber with temperature compensation. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 4, p. 1021-1029, 2016.

[36] MARQUES, Carlos AF; PENG, Gang-Ding; WEBB, David J. Highly sensitive liquid level monitoring system utilizing polymer fiber Bragg gratings. **Optics express**, v. 23, n. 5, p. 6058-6072, 2015.

[37] ZHANG, Ya-nan et al. Recent advancements in optical fiber hydrogen sensors. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 244, p. 393-416, 2017.

[38] LI, Tianliang et al. Diaphragm based fiber Bragg grating acceleration sensor with temperature compensation. **Sensors**, v. 17, n. 1, p. 218, 2017.

[39] LI, Ruiya et al. A diaphragm-type highly sensitive fiber Bragg grating force transducer with temperature compensation. **IEEE Sensors Journal**, v. 18, n. 3, p. 1073-1080, 2017.

[40] AMEEN, Odai Falah et al. Graphene diaphragm integrated FBG sensors for simultaneous measurement of water level and temperature. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 252, p. 225-232, 2016.

[41] DIAZ, Camilo AR et al. Liquid level measurement based on FBG-embedded diaphragms with temperature compensation. **IEEE Sensors Journal**, v. 18, n. 1, p. 193-200, 2017.

[42] LEAL-JUNIOR, Arnaldo et al. Material features based compensation technique for the temperature effects in a polymer diaphragm-based FBG pressure sensor. **Optics Express**, v. 26, n. 16, p. 20590-20602, 2018.

[43] HER, Shiuh-Chuan; WENG, Shin-Zhong. Fiber Bragg Grating Pressure Sensor Integrated with Epoxy Diaphragm. **Sensors**, v. 21, n. 9, p. 3199, 2021.

[44] LEAL-JUNIOR, Arnaldo G. et al. FBG-embedded oblong diaphragms with extended dynamic range. **IEEE sensors letters**, v. 2, n. 2, p. 1-4, 2018.

[45] COROTTI, Raquel de Paiva. **Produção e caracterização de redes de Bragg gravadas em fibra multimodo e aplicadas ao setor de biocombustíveis**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

[46] AGRAWAL, Govind P. **Fiber-optic communication systems**. John Wiley & Sons, 2012.

[47] CHERIN, Al H. **An Introduction To Optical Fibers**. Japan, 1983.

[48] GOWAR, J. **Optical Communication Systems**. Prantice-Hall, 1984.

[49] ZIEMANN, Olaf et al. Optical short range transmission systems. **POF Handbook; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany**, 2008.

[50] BAO, Yi et al. Review of fiber optic sensors for structural fire engineering. **Sensors**, v. 19, n. 4, p. 877, 2019.

[51] GHOLAMZADEH, Bahareh; NABOVATI, Hooman. Fiber optic sensors. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 42, n. 3, p. 335-340, 2008.

[52] XU, M. G. et al. Optical in-fibre grating high pressure sensor. **Electronics letters**, v. 29, n. 4, p. 398-399, 1993.

[53] PEVEC, Simon; DONLAGIĆ, Denis. Multiparameter fiber-optic sensors: A review. **Optical Engineering**, v. 58, n. 7, p. 072009, 2019.

[54] CULSHAW, Brian. Optical fiber sensor technologies: opportunities and-perhaps-pitfalls. **Journal of lightwave technology**, v. 22, n. 1, p. 39, 2004.

[55] FUJIWARA, Eric et al. **Sistema de sensoriamento a fibra óptica para determinação da concentração de sacarose e etanol aplicado a amostras de usinas sucroalcooleiras**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Mecânica.

[56] MELTZ, Gerald; MOREY, William W.; GLENN, William H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. **Optics letters**, v. 14, n. 15, p. 823-825, 1989.

[57] VADDADI, Venkata Satya Chidambara Swamy et al. Design and development of pressure sensor based on Fiber Bragg Grating (FBG) for ocean applications. **The European Physical Journal Applied Physics**, v. 90, n. 3, p. 30501, 2020.

[58] SENGUPTA, Dipankar; KISHORE, Putha. Continuous liquid level monitoring sensor system using fiber Bragg grating. **Optical Engineering**, v. 53, n. 1, p. 017102, 2014.

[59] LEAL-JUNIOR, Arnaldo G. et al. Simultaneous measurement of pressure and temperature with a single FBG embedded in a polymer diaphragm. **Optics & Laser Technology**, v. 112, p. 77-84, 2019.

[60] KASHYAP, Raman. **Fiber bragg gratings**. Academic press, 2009.

[61] KORI, Tejasrikumar et al. A Study on Fiber Bragg Gratings and Its Recent Applications. In: **International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing**. Springer, Cham, 2019. p. 880-889.

[62] OTHONOS, Andreas. Fiber bragg gratings. **Review of scientific instruments**, v. 68, n. 12, p. 4309-4341, 1997.

[63] CAMPANELLA, Carlo Edoardo et al. Fibre Bragg grating based strain sensors: review of technology and applications. **Sensors**, v. 18, n. 9, p. 3115, 2018.

[64] BALL, Gary A.; GLENN, W. H. Design of a single-mode linear-cavity erbium fiber laser utilizing Bragg reflectors. **Journal of Lightwave Technology**, v. 10, n. 10, p. 1338-1343, 1992.

[65] BALL, G. A.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H. Standing-wave monomode erbium fiber laser. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 3, n. 7, p. 613-615, 1991.

[66] HILL, K. O. et al. Aperiodic in-fiber Bragg gratings for optical fiber dispersion compensation. In: **Optical Fiber Communication Conference**. Optical Society of America, 1994. p. PD2.

[67] KASHYAP, R. et al. 30 ps chromatic dispersion compensation of 400 fs pulses at 100 Gbits/s in optical fibres using an all fibre photoinduced chirped reflection grating. **Electronics Letters**, v. 30, n. 13, p. 1078-1080, 1994.

[68] HILL, K. O. et al. Variable-spectral-response optical waveguide Bragg grating filters for optical signal processing. **Optics letters**, v. 20, n. 12, p. 1438-1440, 1995.

[69] BAUMANN, Ingolf et al. Compact all-fiber add-drop-multiplexer using fiber Bragg gratings. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 8, n. 10, p. 1331-1333, 1996.

[70] KASHYAP, R.; WYATT, R.; MCKEE, P. F. Wavelength flattened saturated erbium amplifier using multiple side-tap Bragg gratings. **Electronics Letters**, v. 29, n. 11, p. 1025-1026, 1993.

[71] CAPMANY, José; PASTOR, Daniel; MARTÍ, Javier. EDFA gain equalizer employing linearly chirped apodized fiber gratings. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 12, n. 3, p. 158-160, 1996.

[72] SHIGEHARA, Masakazu et al. Optical fiber identification system using fiber Bragg gratings. In: **Optical Fiber Communications, OFC.** IEEE, 1996. p. 162-163.

[73] CHAN, Chun-Kit et al. A practical passive surveillance scheme for optically amplified passive branched optical networks. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 9, n. 4, p. 526-528, 1997.

[74] MORTON, P. A. et al. Mode-locked hybrid soliton pulse source with extremely wide operating frequency range. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 5, n. 1, p. 28-31, 1993.

[75] LORD, S. M.; SWITZER, G. W.; KRAINAK, M. A. Using fibre gratings to stabilise laser diode wavelength under modulation for atmospheric lidar transmitters. **Electronics Letters**, v. 32, n. 6, p. 561-563, 1996.

[76] SILVA, Artur A. et al. Hollow-core negative curvature fibers for application in optical gas sensors. **Optical Engineering**, v. 58, n. 7, p. 072011, 2019.

[77] SAHOTA, Jasjot K.; GUPTA, Neena; DHAWAN, Divya. Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: A comprehensive review. **Optical Engineering**, v. 59, n. 6, p. 060901, 2020.

[78] SUGINO, Motohiko et al. Development of zinc coating methods on fiber Bragg grating temperature sensors. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 26, n. 3, p. 1-6, 2016.

[79] SHAHRUBUDIN, Nurhalida; LEE, Te Chuan; RAMLAN, Rhaizan. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. **Procedia Manufacturing**, v. 35, p. 1286-1296, 2019.

[80] AGUIRRE, L. A. Introdução à Identificação de Sistemas, Técnicas Lineares e Não Lineares: Teoria e Aplicação. 4ª ed. Belo Horizonte: **Editora UFMG**, 2015.

[81] VORATHIN, E. et al. A natural rubber diaphragm based transducer for simultaneous pressure and temperature measurement by using a single FBG. **Optical Fiber Technology**, v. 45, p. 8-13, 2018.