

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

Sensores de Nível de Interface Água-Óleo em Fibra Óptica Baseados em Grades de Bragg

Fabio Giesen Ludke

Orientador: Dra. Maria José Pontes
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Coorientador: Dr. Anselmo Frizera-Neto
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

VITÓRIA-ES
27 DE MAIO DE 2020

Fabio Giesen Ludke

Sensores de Nível de Interface Água-Óleo em Fibra Óptica Baseados em Grades de Bragg

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 na área de concentração em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dra. Maria José Pontes
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Coorientador: Dr. Anselmo Frizera-Neto
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

VITÓRIA-ES
27 DE MAIO DE 2020

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

L944s Ludke, Fabio Giesen, 1992-
Sensores de Nível de Interface Água-Óleo em Fibra Óptica Baseados em Grades de Bragg / Fabio Giesen Ludke. - 2020. 98 f. : il.

Orientadora: Maria José Pontes.
Coorientador: Anselmo Frizera-Neto.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Diafragma. 2. Sensor. 3. Fibra Óptica. 4. Redes de Bragg. I. Pontes, Maria José. II. Frizera-Neto, Anselmo. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

Fabio Giesen Ludke

Sensores de Nível de Interface Água-Óleo em Fibra Óptica Baseados em Grades de Bragg

Sensores de Nível de Interface Água-Óleo em Fibra Óptica
Baseados em Grades de Bragg

Trabalho aprovado. Vitória-ES, 27 de Maio de 2020

Dra. Maria José Pontes
Orientador

Dr. Anselmo Frizera-Neto
Coorientador

Dr. Adilson Ribeiro Prado.
Examinador Externo

Dr. Arnaldo Gomes Leal-Junior
Examinador PPGE

VITÓRIA-ES

À minha família, minha namorada, meus amigos e colegas, meus professores.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha família que com muita disciplina e educação tornou essa realização possível. Meu pai, minha mãe e meu irmão são peças fundamentais que tornaram possível eu estar alcançando esse grande objetivo;

À minha namorada e futura esposa que sempre esteve ao meu lado me ajudando e me ouvindo nos momentos difíceis;

À todos da 2Solve que sempre estiverem auxiliando na produção de diversos elementos fundamentais para elaboração desse trabalho;

À todas as pessoas do meu convívio, minha família, meus amigos, que torceram por mais essa vitória;

Aos meus amigos do LabTel, que dia a dia estavam à disposição para ajudar no que era preciso. Principalmente o Dr. Arnaldo Gomes Leal-Junior e Dr. Camilo Díaz, que sempre estavam dispostos a ajudar;

Aos meus professores, que sempre estiveram de prontidão para ajudar, por mais que estivessem cheios de outras tarefas que movem o laboratório. Principalmente minha orientadora Dra Maria José Pontes e meu coorientador Dr. Anselmo Frizzera-Neto, que ajudaram o tempo todo nesse trabalho;

À Petrobrás que auxiliou meu trabalho através do projeto que participei;

À CAPES por me auxiliar durante esses anos com uma bolsa de estudos;

Ao NEMOG e o Prof. Dr Rogério Ramos, que foram fundamentais na execução do projeto. Essa parceria com a Eng. Mecânica foi fundamental para o sucesso do trabalho.

*“Não existe crescimento na zona do conforto,
como não existe conforto na zona do cresci-
mento.” (Jimmy Cygler)*

Resumo

Esta dissertação apresenta o estudo e aplicação de sensores baseados em grades de Bragg em fibra (FBG - *Fiber Bragg Grating*) na medição do nível de interface formada entre água e óleo em um tanque. Através de diafragmas feitos de borracha industrial, que possuem um segmento de fibra óptica com a grade de Bragg gravada, é possível realizar a medição de nível de interface devido a variação de pressão em cada diafragma ocasionada pela variação do nível de interface. Os sensores desse tipo não são condutores elétricos, são resistentes à interferência eletromagnética (EMI - *Electromagnetic Interference*) e não causam riscos em um ambiente explosivo, pois como propagam luz em seu interior, não causam explosão. As técnicas de gravação de grades de Bragg por Máscara de Fase e gravação direta foram utilizadas nos sensores. Com isso, utilizando um espectrômetro, pode-se analisar o espectro da luz acoplada nesse dispositivo. As análises são realizadas a partir do acompanhamento das frequências centrais para cada FBG utilizada que, com a deformação sofrida, provoca deslocamentos proporcionais ao nível da interface entre os fluidos distintos, por exemplo água e óleo. Isso ocorre porque a água e o óleo possuem densidades diferentes e dependendo do nível de cada fluido que está no tanque, os diafragmas que contém as FBG sofrerão menor ou maior deformação devido a variação de pressão hidrostática e provocarão a variação das frequências centrais das FBGs. Os principais materiais utilizados na produção dos sensores aqui estudados são a fibra óptica de sílica, poliuretano termoplástico e a borracha nitrílica. A borracha nitrílica possui uma alta durabilidade ao petróleo e derivados. Desenvolveu-se a metodologia de produção dos sensores em grades de Bragg com diafragmas impressos em impressora 3D e produzidos através da vulcanização da borracha nitrílica. O sensor desenvolvido através da vulcanização de diafragmas de borracha nitrílica com FBG, foi produzido utilizando um sistema de prensa hidráulica com controle de temperatura. No caso dos testes com os diafragmas impressos em impressora 3D, observa-se a influência causada pela variação da espessura do diafragma. Essa variação não altera a linearidade do sistema, mas sua sensibilidade. Uma sensibilidade de 7,5pm / kPa e 5,2 pm / kPa para o diafragma de 1,2 mm e 2 mm, respectivamente, foi determinada experimentalmente. O intervalo de medição desse sensor de nível de interface varia de 0 a 78 cm. Nos testes com os diafragmas de borracha nitrílica, foi possível identificar o nível de interface entre água e óleo. Como resultado, obteve-se uma equação onde é possível medir a interface do sistema de acordo com a variação de deformação dos diafragmas, mostrando que é possível utilizar esse sistema para futuramente produzir um produto. A resolução de sistema é de 2 casas decimais, aproximadamente 0,01 cm. Para níveis de interface variando entre 0 cm e 78 cm, o desvio padrão variou de 0,13 a 0,28, respectivamente. As diferenças médias calculadas para níveis de interface variando entre 0 cm e 78 cm, o desvio padrão variou de 1,09 a 0,43, respectivamente.

Palavras-chave: Diafragma. Sensor. Fibra Óptica. Redes de Bragg.

Abstract

This Master Thesis presents the study of fiber Bragg grating (FBG) sensors applied in the measurement of water and oil interface level. Using industrial rubber diaphragms, which has a fiber Bragg grating installed inside, it is possible to measure the level of interface water-oil. The measurement is performed by monitoring the pressure change on each diaphragm caused by the variation in the interface level. The FBG sensors are non-conductive, resistant to electromagnetic interference (EMI) and they are intrinsically safe to be installed in explosive environments. Techniques of FBG inscription known as phase mask and plane-by-plane have been used to manufacture the fiber sensors. Using a spectrometer, the coupled light propagating through the fiber sensor can be interrogated. The analyzes are performed searching for the central wavelength for each FBG used. The stress on the FBG causes a shift in the central wavelength proportional to the level of the interface between the different fluids, for example water and oil. Thus, as water and oil have different densities and depending on the amount of material that is inside the tank, the diaphragms with FBG undergoing higher or lower deformation and causing a proportional wavelength shift variation of the FBG peak. The main materials used in the production of the FBG sensors are silica optical fiber, thermoplastic polyurethane and nitrile rubber. Nitrile rubber corrosion resistant, including use in the oil industry. A methodology was developed for production of FBG sensors with diaphragms printed on the 3D printer and using the nitrile rubber vulcanization. The sensor developed through the vulcanization of nitrile diaphragms with FBG inside was produced using a press system with temperature control. The influence caused by the variation in the diaphragm thickness is observed in the tests with diaphragms produced on 3D printer. This variation doesn't change the linearity of the system, but change its sensitivity. The measured sensitivities were 7.5 pm/kPa and 5.2 pm/kPa for the diaphragm of 1.2 mm and 2 mm, respectively. The operating range of this interface level sensor varies from 0 to 78 cm. The resolution of the system is approximately 0.01 cm. For interface levels ranging from 0 cm to 78 cm, the standard deviation varied from 0.13 to 0.28, respectively. The average differences calculated for interface levels varying between 0 cm and 78 cm, resulted in standard deviation ranging from 1.09 to 0.43, respectively. It was possible to identify the oil and water interface level in the tests with nitrile diaphragms. As a result, an equation was obtained, where it is possible to determine the interface level through the diaphragm deformation, showing this system has potentiality to evolve to a product in the near future.

Keywords: Diaphragm. Sensor. Optical fiber. Fiber Bragg grating.

Lista de Figuras

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Representação esquemática do separador multifásico por gravidade. | 2 |
| Figura 2 – Representação esquemática da separação das fases em um tanque contendo água, óleo e gás. | 3 |
| Figura 3 – Corte transversal de uma fibra de sílica monomodo padrão com suas partes descritas. Imagem fora de escala. | 7 |
| Figura 4 – Curvas de perda de transmissão para várias fibras. | 8 |
| Figura 5 – Variação periódica do índice de refração em relação ao comprimento da fibra (Eixo z), com o período de modulação Λ | 9 |
| Figura 6 – Configuração típica de gravação de FBG utilizando a técnica de máscara de fase. | 12 |
| Figura 7 – Imagem em microscópio da modulação gerada na fibra. O espaçamento entre as linhas na imagem correspondem ao período de modulação (Λ) de 3.213 mm. | 13 |
| Figura 8 – Representação esquemática da configuração experimental usada na inscrição das grades através da Técnica de Plano a Plano. Os quadros da imagem mostram a fibra sem e com as gravações. | 14 |
| Figura 9 – Processo de fabricação do sensor de deformação com FBG utilizando impressora 3D. | 15 |
| Figura 10 – (a) estrutura do sensor de deformação produzido na impressora 3D; (b) Processo de impressão do encapsulamento do sensor; (c) sensor já conectorizado a fibra óptica. | 16 |
| Figura 11 – Estrutura de plástico para produção do diafragma. | 17 |
| Figura 12 – Estrutura do sensor proposto. | 18 |
| Figura 13 – Arranjo experimental do dispositivo. | 19 |
| Figura 14 – (a) Vista esquemática do sensor de pressão e (b) fotografia da estrutura do sensor. | 20 |
| Figura 15 – Diagrama esquemático do sensor de nível de líquido. | 21 |
| Figura 16 – Componentes do sensor FBG à base de diafragma de polímero e dimensões do diafragma. A figura mostra a vista explodida do conjunto sensor. | 21 |
| Figura 17 – Montagem experimental utilizado na caracterização do elemento sensor, formada pelo tubo de PTFE, diafragma, anel de vedação e estrutura de metal. | 26 |
| Figura 18 – Montagem experimental utilizado na caracterização do elemento sensor. | 27 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 19 – Impressão do sensor utilizando a impressora 3D Sethi S3. (a) observe e impressora em funcionamento; (b) aproximação no bico extrusor da impressora em funcionamento. | 28 |
| Figura 20 – Foto da prensa utilizada para montagem do sistema de vulcanização. | 30 |
| Figura 21 – Matriz de aquecimento utilizada para montagem do sistema de vulcanização. Imagem 3D do projeto da matriz para produção (a) e a matriz em funcionamento (b). | 31 |
| Figura 22 – Controlador de temperatura e relê utilizados para montagem do sistema de vulcanização. | 32 |
| Figura 23 – Sistema de exaustão dos gases tóxicos provenientes do processo de vulcanização. | 33 |
| Figura 24 – Esquema com as medidas do tanque de testes do projetado para medições de nível de interface. Alguns pontos principais do tanque foram destacados. | 33 |
| Figura 25 – Estrutura para fixação dos diafragmas para medição de nível. | 34 |
| Figura 26 – (a) tanque sendo içado pelo guindaste para a colocação da haste contendo sensores; (b) tanque é inclinado para que haste contendo sensores seja inserido; (c) tanque posicionado após inserir haste contendo sensores. | 35 |
| Figura 27 – Estação de trabalho preparada para os testes com os sensores. | 36 |
| Figura 28 – Caracterização de temperatura da FBG. | 39 |
| Figura 29 – Nível de referência que corresponde a zero centímetros dos testes no tanque contendo água e óleo. | 40 |
| Figura 30 – Detalhes do diafragma em produção na impressora 3D. Na imagem é possível observar os poros devido a metodologia de impressão do aparelho. | 42 |
| Figura 31 – O deslocamento do comprimento de onda do pico característico da FBG em função da pressão aplicada no sensor de fibra. | 43 |
| Figura 32 – Detalhes do diafragma produzido através do sistema de vulcanização. Esse diafragma é oriundo do teste 2. | 45 |
| Figura 33 – Detalhes do diafragma produzido através do sistema de vulcanização. Esse diafragma é oriundo do teste 4. | 45 |
| Figura 34 – Monitoramento da resposta em frequência da FBG no teste 8 da produção do sensor utilizando a técnica de vulcanização para montagem de sensor com FBG. | 46 |
| Figura 35 – Monitoramento da resposta em frequência da FBG no teste 16 da produção do sensor utilizando a técnica de vulcanização para montagem de sensor com FBG. | 47 |
| Figura 36 – Dados para caracterização das FBG dos Sensores de Temperatura 1 e 2. Observe a reta característica da resposta com a equação de caracterização. | 48 |
| Figura 37 – Dados para caracterização das FBG dos Sensores de Temperatura 3 e 4. Observe a reta característica da resposta com a equação de caracterização. | 49 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 38 – Curvas de caracterização da FBG dos Diafragmas 1 e 2 em relação a influência da temperatura sobre o sensor. | 50 |
| Figura 39 – Curvas de caracterização da FBG dos Diafragmas 3 e 4 em relação a influência da temperatura sobre o sensor. | 50 |
| Figura 40 – Resposta obtida no interrogador após instalação dos diafragmas no tanque de testes. | 51 |
| Figura 41 – Resposta do espectro óptico refletido pela FBG obtida após compensar a variação de temperatura e normalizar no Diafragama 2. | 52 |
| Figura 42 – Resposta do perfil de temperatura do tanque durante os testes. | 53 |
| Figura 43 – Resposta dos valores de pico da curva característica da FBG corrigidos em relação a temperatura e normalizados do sensor Diafragma 3. | 54 |
| Figura 44 – Resposta dos valores de pico da curva característica da FBG corrigidos em relação a temperatura e normalizados do sensor Diafragma 4. | 54 |
| Figura 45 – Resultado dos dados obtidos a partir da equação de caracterização do sistema. Foram utilizados os dados obtidos em dois diafragmas para validar a equação. | 56 |

Lista de Tabelas

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Metodologia para Produção Diafragmas Vulcanizados | 37 |
| Tabela 2 – Parâmetros Utilizados nos Testes 15 e 16 | 38 |
| Tabela 3 – Descrição do Posicionamento e Especificações dos Sensores Diafragmas | 39 |
| Tabela 4 – Descrição do Posicionamento e Especificações dos Sensores de Temperatura | 39 |
| Tabela 5 – Resultados Testes Diafragmas Impressos na Impressora 3D | 42 |
| Tabela 6 – Dados da Variação da Frequência de Bragg no Diafragma 3 | 55 |
| Tabela 7 – Dados da Variação da Frequência de Bragg no Diafragma 4 | 55 |

Lista de Abreviaturas e Siglas

- ACN *Acrylonitrile* (Acrilonitrila)
- EMI *Electromagnetic Interference* (Interferência Eletromagnética)
- FBG *Fiber Bragg Grating* (Grades de Bragg em Fibra)
- FDM *Fused Deposition Modeling* (Modelagem por Deposição através de Fusão)
- NBR *Nitrile-butadiene Rubber* (Borracha de Nitrila Butadieno)
- NEMOG *Oil and Gas Flow and Measurement Study Group* (Núcleo de Estudos em Escoamento e Medição de Óleo e Gás)
- PLA *Polylactic Acid* (Ácido Polilático)
- POF *PolymerOptical Fiber* (Fibra Óptica Polimérica)
- PTFE *Polytetrafluoroethylene* (Politetrafluoretileno)
- PVC *Polyvinyl Chloride* (Policloreto de Vinila)
- Tg *Glass Transition Temperature* (Temperatura de Transição Vítrea)
- UV *UltravioletRadiation* (Laser Ultravioleta)
- WDM *Wavelength Division Multiplexing* (Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda)

Sumário

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 – Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação | 1 |
| 1.2 Objetivos | 4 |
| 1.3 Justificativas | 4 |
| 1.4 Organização do Texto | 6 |
| 2 – Fundamentação Teórica | 7 |
| 2.1 Fibra Óptica | 7 |
| 2.2 Grades de Bragg | 8 |
| 2.2.1 Breve Histórico sobre as Grades de Bragg | 10 |
| 2.2.2 Efeitos de Tensão e Temperatura | 10 |
| 2.3 Técnicas de Gravação de Grades de Bragg Existentes | 11 |
| 2.3.1 Gravação de Grades de Bragg através da Técnica de Máscara de Fase e Plano a Plano | 12 |
| 2.4 Sensores em Diafragmas com Grades de Bragg | 13 |
| 2.4.1 Técnicas de Fabricação em Impressora 3D | 14 |
| 2.4.2 Sensor com Diafragma Produzido com Cura de Resinas | 16 |
| 2.4.3 Fibra com Grades de Bragg Colados na face de um Diafragma Único | 18 |
| 2.4.4 Sensor em Fibra com Grades de Bragg Embutida Entre Diafragmas | 19 |
| 2.5 Materiais | 22 |
| 2.5.1 Borracha Nitrílica | 22 |
| 2.5.2 Óleo Hidráulico | 23 |
| 3 – Desenvolvimento Experimental | 25 |
| 3.1 Diafragma Impresso em Impressora 3D | 25 |
| 3.1.1 Construção do Sensor | 25 |
| 3.1.2 Montagem Experimental | 27 |
| 3.1.3 Metodologia | 27 |
| 3.1.3.1 Produção do Diafragma em Impressora 3D | 27 |
| 3.1.3.2 Medição de Pressão com Diafragma Impresso em Impressora 3D | 29 |
| 3.2 Diafragma Vulcanizado | 29 |
| 3.2.1 Construção do Sensor | 29 |
| 3.2.2 Montagem Experimental | 32 |
| 3.2.3 Metodologia | 36 |
| 3.2.3.1 Produção do Diafragma Vulcanizado | 36 |

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.3.2 | Medição de Interface com Diafragma Vulcanizado | 38 |
| 4 | Resultados e Discussões | 41 |
| 4.1 | Diafragma Impresso na Impressora 3D | 41 |
| 4.1.1 | Produção dos Diafragmas Impressos | 41 |
| 4.1.2 | Medição de Pressão com Diafragmas Poliméricos Impressos em Impressora 3D | 42 |
| 4.2 | Diafragma Vulcanizado | 44 |
| 4.2.1 | Produção dos Diafragmas Vulcanizados | 44 |
| 4.2.2 | Medição de Interface Água/Óleo com Diafragmas Vulcanizados | 48 |
| 5 | Conclusão | 59 |
| 5.1 | Trabalhos futuros | 61 |
| | Referências | 63 |
| | | |
| | Apêndices | 69 |
| | APÊNDICE A–Testes Produção Diafragmas | 71 |

1 Introdução

1.1 Motivação

A motivação principal para a realização deste trabalho está no grande interesse da comunidade científica em desenvolver sensores para áreas industriais que operam em áreas classificadas, potencialmente explosivas. Os sensores de fibra óptica têm recebido atenção significativa em ambientes industriais agressivos, como o monitoramento *offshore* de oleodutos e gasodutos, principalmente as tecnologias baseadas em Fibras com grades de Bragg em fibra (FBG - *Fiber Bragg Grating*) [1]. As empresas que atuam nesses setores possuem tanques com líquidos, muitas vezes inflamáveis, com variáveis que precisam ser monitoradas, como por exemplo pressão, nível do líquido e nível de interface entre líquido e água. Essas medidas exigem alta precisão para aperfeiçoamento do sistema de produção das empresas através dos sistemas de controle [2]. Os níveis dos líquidos e das interfaces de fluídos em tanques são parâmetros importantes nas indústrias agrícolas, químicas, médicas, petrolíferas e de gás [3].

Sensores em fibras ópticas que não são condutores elétricos, resistentes à interferência eletromagnética (EMI - *Electromagnetic Interference*) e não causam explosão em ambientes explosivos se tornaram importantes para o monitoramento do nível de líquidos em sistemas de armazenamento água e combustível. Essas vantagens dos sensores de fibra óptica apresentadas no seu amplo uso nas indústrias, tornam os sensores com FBG uma opção interessante para o sensoriamento de interface em tanques de indústrias que possuem áreas potencialmente explosivas e com materiais agressivos a outros componentes [4]. No sensor FBG, o deslocamento relativo do comprimento de onda de Bragg é sensível tanto à pressão hidrostática induzida pelo nível de líquido quanto à temperatura ambiente simultaneamente. Assim, é essencial a utilização de uma técnica de compensação de temperatura para neutralizar a temperatura para uma medição mais precisa do nível de líquido e, no nosso caso, medição de nível interface [4].

Na indústria de óleo e gás, um dos principais processos é a separação do petróleo, da água, do gás e sedimentos. Essa separação é feita aproveitando a diferença de densidades desses materiais. Uma dificuldade de implementação desta etapa é que as interfaces entre esses materiais não são bem definidas, pois existe uma certa camada de espuma e emulsão, que pode introduzir erros na medição dos sensores de interface [5]. Essa imprecisão na medição, força as empresas a criarem vários processos subsequentes de separação dos materiais para garantir a qualidade do produto, inserindo um maior custo na produção [6]. Além desta dificuldade, existem limitações nas tecnologias utilizadas atualmente na medição do nível de várias interfaces, ou interface entre materiais diferentes

que não se misturam mas que estão presentes nos ambientes citados. Outros desafios se devem à variedade de fluidos que podem estar dentro do tanque, à operação em ambientes corrosivos e à segurança [7]. Na Fig. 1 é possível observar um esquema ilustrativo de um desses tanques separadores multifásicos, que nesse caso é um separador trifásico, que possui como princípio de funcionamento a força da gravidade e separará fluidos imiscíveis com densidades diferentes [6]. Esses tanques geralmente estão localizados em ambientes potencialmente explosivos e possuem em seu interior líquidos e gases inflamáveis [7]. Por causa disso, os dispositivos de instrumentação utilizados não podem ultrapassar certos níveis de potência, tensão, capacitância e corrente [8]. Os sensores que utilizam FBG podem ser considerados intrinsecamente seguros para uso em ambientes potencialmente explosivos, principalmente quando comparados às tecnologias eletrônicas convencionais, uma vez que existe apenas luz se propagando no elemento sensor. Esses sensores têm sido utilizados em processos industriais para medir diferentes parâmetros como temperatura [9], nível de líquido [10], aceleração [11], pressão [12], efeito acústico [13] e índice de refração [14].

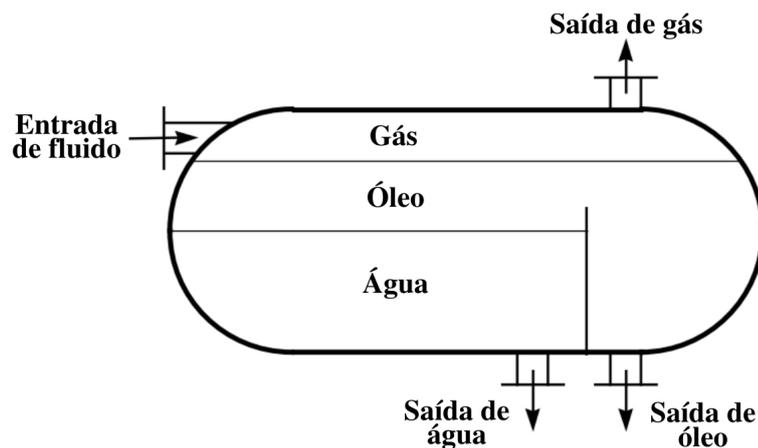


Figura 1 – Representação esquemática do separador multifásico por gravidade.
Adaptado da Ref. [6]

A Fig. 1 mostra um separador de água/óleo. Neste equipamento, uma placa obstrui o fluxo de entrada da mistura e redireciona o fluido para a parte esquerda do separador mostrado na Fig. 1. Também pode existir um visualizador de areia e bocais de lavagem de areia no separador ou próximo ao estágio do separador [6]. A fase oleosa coletada na saída de óleo apresenta uma certa quantidade de água, que é posteriormente separada nas próximas etapas de separação da linha do processo. Cada separador de gravidade é capaz de separar cerca de 90-95 % de água do óleo [7, 15].

Como já foi mencionado o óleo e a água são fluidos imiscíveis. O processo de separação desses fluidos é realizado em grandes tanques com a obtenção inicialmente de uma camada de água no fundo do tanque, uma camada de óleo no meio e gás no topo [16]. No entanto, na grande maioria dos processos industriais haverá a formação de emulsão, que é uma camada originada da mistura de água e óleo, localizada entre esses dois fluidos [5].

Geralmente existirá também uma camada de espuma, que é uma camada formada entre o óleo e o gás. [17]. A mistura multifásica também inclui areia ou outros sólidos, que estão presentes no poço de onde o óleo é extraído e formam um lodo no fundo do separador com o tempo. Essas fases formadas dentro do separador podem ser observadas na Fig. 2 e em [7] é observado que no interior do separador multifásico também existe essa formação.

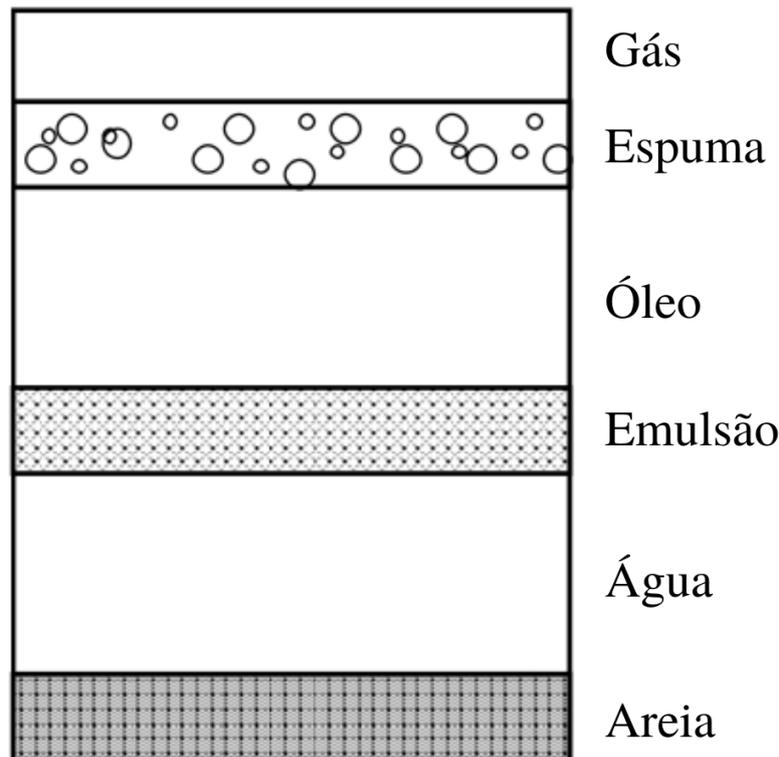


Figura 2 – Representação esquemática da separação das fases em um tanque contendo água, óleo e gás.

Adaptado da Ref. [6]

Como visto, existe a necessidade de sensores de interface nessas indústrias que sejam adequados as normas da área que devem ser instalados. Devido aos argumentos evidenciados, os objetivos foram traçados [Seção 1.2], sendo justificados na Seção 1.3.

Uma forma simples e rápida para a realização de testes iniciais, com o objetivo de validar os fundamentos teóricos, é produzir sensores com diafragmas fabricados em impressora 3D. Esse dispositivo é perfeitamente funcional para situações onde o meio em contato não é agressivo, como por exemplo na medição de pressão em uma indústria que não emite gases considerados agressivos aos materiais utilizados na impressão 3D. Algo parecido foi realizado por [18]. A validação pode ser realizada por um circuito de pressão, onde a variação é incidida sobre o conjunto diafragmas e FBG e o pico do espectro de interferência analisado através de um interrogador. O arranjo utilizado para testes de medição de pressão pode ser utilizado também para medição de nível e nível de interface,

pois o princípio físico é o mesmo.

Para medição de nível de interface entre água-óleo é necessário a produção de um diafragma que resista ao contato com o óleo que estará presente nesse sistema. O material utilizado nesses diafragmas é a borracha nitrílica. Foi desenvolvido então um sistema para realizar a colagem entre dois diafragmas de borracha nitrílica com a FBG no meio em parceria com a empresa 2Solve [19]. O sistema impõe pressão aos diafragmas com a FBG no interior ao mesmo tempo que a temperatura de contato das faces do dispositivo é elevada. Controlando esses dois parâmetros é possível definir os aspectos físicos desse dispositivo.

Posteriormente o projeto foi realizado através de experimentos práticos em um tanque com água e óleo. A medição foi feita através de diafragmas com grades de Bragg inseridas no meio de dois diafragmas, formando assim a estrutura do sensor. O diafragma é importante para evitar o contato do material com a fibra e também para obter deformação da fibra considerável e mensurável. Além desse diafragma contendo a FBG que permite a medição da pressão exercida sobre ele, foi implementado também um outro mecanismo para compensar a variação de temperatura do material.

1.2 Objetivos

Com isso, pode-se afirmar que o objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um sensor de interface entre água e óleo utilizando grades de Bragg entre diafragmas vulcanizados. Para alcançar o objetivo geral, alguns objetivos específicos foram definidos:

- Definir processos de produção de dispositivos sensores com grades de Bragg fixados entre diafragmas produzidos com impressora 3D e vulcanizados;
- Implementar um método de compensação da influência da variação de temperatura no sistema de medição;
- Elaborar uma solução analítica do problema de medição de interface água e óleo com diafragmas vulcanizados.

1.3 Justificativas

Devido aos pontos salientados na Seção 1.1, as fibras ópticas são conhecidas como promissoras na utilização de sensores de nível de líquido, pois possuem baixo consumo de energia, a capacidade de suportar ambientes corrosivos e de alta temperatura, imunidade a EMI, permite distâncias da ordem de quilômetros entre o ponto de sensoriamento e a detecção de sinal e alta sensibilidade [20]. Esses sensores podem ser considerados intrinsecamente seguros para utilização em ambientes potencialmente explosivos, especialmente

quando comparados às tecnologias eletrônicas convencionais, porque percorre apenas luz em seu interior [20].

Sensores em fibra óptica têm sido utilizados em processos industriais na medição de diferentes parâmetros, como temperatura, nível de líquido, aceleração, pressão, acústica e índice de refração [7]. Os sensores de fibra óptica utilizando redes de fibra Bragg (FBG) foram bastantes evidenciados no campo científico devido à alguns fatores como medição codificada por comprimento de onda, alta sensibilidade, resposta rápida, grande faixa dinâmica, auto-referência, capacidade de multiplexação de vários sensores em uma mesma fibra e compatibilidade com redes de fibra óptica [21–24].

Com isso, esse trabalho traz contribuições para a solução dos problemas citados na Seção 1.1. Os dispositivos produzidos podem resolver os problemas relacionadas à medição de nível, pressão, nível interface e temperatura. A produção desses sensores, em relação aos diafragmas no qual irão acomodar as FBG, pode ser realizada de forma mais simples através de impressoras 3D ou de forma industrial, através da colagem de 2 diafragmas comerciais com a fibra óptica inserida entre eles.

Em ambientes corrosivos, existe a necessidade dos materiais em contato com o ambiente possuírem resistência a esse meio. Por isso um dos materiais indicados para essa situação é a borracha nitrílica, que é resistente ao petróleo e derivados [25]. Técnicas de produção de diafragmas de borracha nitrílica são fundamentais com o objetivo de produzir o sensor para medição de nível de interface. As misturas de borracha são amplamente usadas na indústria por diversas razões, que incluem melhoria das propriedades físicas, vida útil, processamento mais fácil e redução do custo de produtos [25]. O tipo de borracha pode oferecer um conjunto de propriedades específicas para cada aplicação. A borracha nitrílica (NBR) é comercializada como uma borracha resistente a óleo [25].

Visto que esse trabalho é desafiador, principalmente nessa área de produção do diafragma de borracha nitrílica com a FBG, diversos testes tiveram que ser realizados para serem encontrados os melhores parâmetros para a produção de sensores. Diversos testes deram errado até ser fabricado o diafragma funcional. Alguns problemas também foram encontrados no processo de produção que foram resolvidos, como por exemplo a emissão de gases tóxicos no processo e a deformação da borracha nitrílica com o excesso de temperatura.

Após ser alcançado o domínio dessa produção, um tanque para testes do protótipo foi projetado e produzido pela 2Solve. Com o tanque em operação, o protótipo foi instalado e os testes foram realizados para medição da interface entre água e óleo. Diversos problemas técnicos foram enfrentados e os mesmos serão explicitados nesta dissertação. Com os resultados em mãos é possível observar que o sistema é funcional, só que possui, como todo protótipo inicial, diversos ajustes e aprimoramentos que devem ser executados a fim de se obter um sensor mais preciso e robusto.

Consequentemente o trabalho contribui para o avanço no desenvolvimento de dispositivos para medição de interface água e óleo, que utilizem o princípio de medição por FBG entre diafragmas. É mostrado nos capítulos que o sistema é capaz de medir o nível de interface e é possível produzir dispositivos comerciais, tanto para medição de nível interface, como também de nível e de pressão.

Foi desenvolvido nesta Dissertação de Mestrado dois sistemas que podem ser implementados em plantas operacionais. O primeiro de baixo custo, baixa complexidade na produção e menor robustez e o segundo com um custo maior, maior complexidade na produção e maior robustez, ideal para áreas industriais que são altamente degradantes e corrosivas.

1.4 Organização do Texto

Após uma breve introdução aos tópicos em discussão nessa dissertação, vale destacar a definição da sua estrutura. Apresenta-se, a seguir, no Cap. 2, a fundamentação teórica sobre sensores em fibra óptica baseados em FBG, necessária para a compreensão das configurações e análises realizadas ao longo do texto. O desenvolvimento experimental e a metodologia são discutidos no Cap. 3. Os resultados e discussões estão no Cap. 4 e, em seguida, as conclusões no Cap. 5.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Fibra Óptica

As fibras ópticas têm uma seção circular com basicamente duas camadas: o núcleo e a casca, além do revestimento, que pode ser de acrilato, conhecido como casca. Além disso, as fibras comerciais também têm um revestimento extra de um polímero específico. A maior parte do sinal óptico é propagada através do núcleo, que possui um índice de refração maior do que o da casca. As perdas de intensidade de luz ao longo da propagação na fibra ocorrem devido à absorção material ou por espalhamento. Por esse motivo, o núcleo é concêntrico à casca com um índice de refração menor do que o encontrado no núcleo, impedindo que a luz "escape" do núcleo pelo efeito de reflexão interna total. O revestimento fornece proteção mecânica para a fibra. A Fig. 3 mostra a área de seção transversal da fibra de sílica [26].

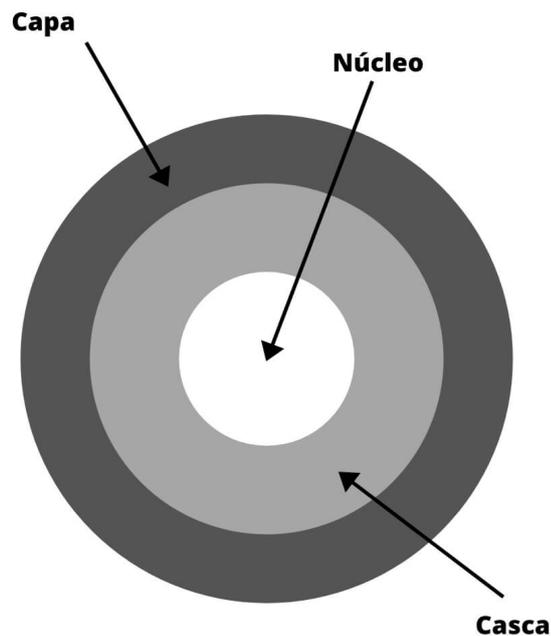


Figura 3 – Corte transversal de uma fibra de sílica monomodo padrão com suas partes descritas. Imagem fora de escala.

Adaptado da Ref. [27]

Existem diferentes tipos de fibras ópticas, mas muitos sensores em fibra utilizam fibras ópticas de sílica e fibras fabricadas a partir de polímeros (POF - *Polymer Optical Fiber*) [28]. Por mais que as POFs apresentem vantagens sobre as fibras de sílica relacionadas às suas características materiais, como por exemplo maior flexibilidade, menor módulo de

Young, limites de tensão mais altos, tenacidade à fratura e maior resistência ao impacto, as fibras POFs possuem uma maior atenuação e é mais difícil gravar a FBG nesse tipo de fibra [29].

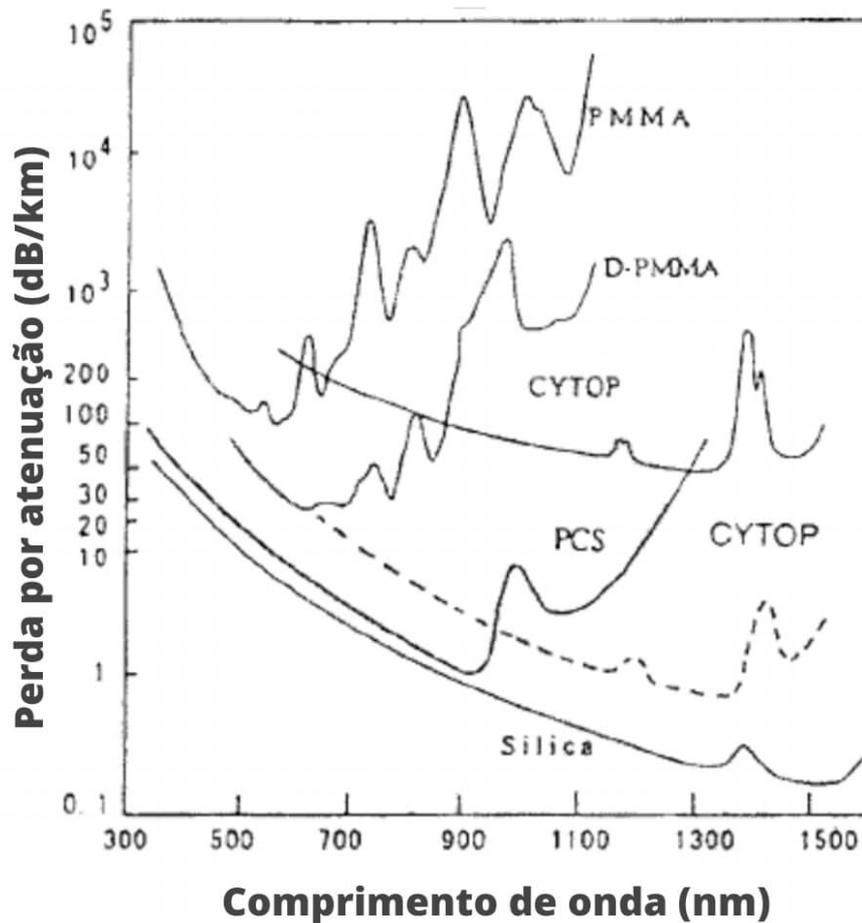


Figura 4 – Curvas de perda de transmissão para várias fibras.
Adaptado da Ref. [28]

Na Fig. 4 é possível identificar a perda por atenuação da fibra de sílica. Devido a atenuação mínima ocorrer em 1550 nm, as FBG em fibras de sílica são gravadas na região de 1550 nm. Como já dito, através da Fig. 4 percebe-se que as fibras de sílica possuem uma atenuação inferior às outras fibras produzidas a partir de polímeros.

Por ser mais fácil gravar redes de Bragg e realizar as medições utilizando um interrogador comercial e também pela perda da fibra de sílica ser menor comparada as POFs, as fibras de sílica são preferencialmente utilizadas.

2.2 Grades de Bragg

Uma FBG é um dispositivo gravado em fibra óptica que é criado através da modulação do índice de refração quando a fibra é exposta a um laser. É uma perturbação

inserida na fibra para que a onda ali propagada sofra reflexão. Com isso, o princípio de operação de sensores baseados em FBG baseiam-se no monitoramento do deslocamento do comprimento de onda do sinal refletido, em função de alguma variável, como temperatura ou tensão aplicada a FBG [30]. Essa estrutura de grade pode ser obtida usando lasers para modificar a fibra óptica e isso pode ser feito de várias formas, como por exemplo irradiação com laser através de técnicas holográficas, máscara de fase ou gravação direta do padrão de grade plano a plano, linha a linha e ponto a ponto [31]. Como resultado dessas técnicas, o índice de refração do núcleo é modulado periodicamente de maneira a criar uma reflexão de banda estreita na onda propagada nessa fibra. As FBG têm uma modulação periódica (ou quase periódica) do índice de refração, conforme ilustrado na Fig. 5, ao longo do núcleo da fibra. A FBG reflete a luz com um comprimento de onda de Bragg, λ_B , que é determinado pela condição de Bragg na Eq. 1 [29].

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

Onde o λ_B depende do índice de refração efetivo do material (n_{eff}) e do período de modulação (Λ), como mostrado na Equação 1. As FBG são muito úteis para aplicações em sensores que podem ser criados a partir da detecção da variação de temperatura ou da deformação da fibra. Qualquer uma dessas mudanças alteram o período, o índice de refração da grade, resultando em uma mudança de λ_B [31], como é mostrado na Subseção 2.2.2. As FBG utilizadas nesse trabalho foram gravadas através das técnicas de Máscara de Fase e Gravação Direta Plano a Plano com laser femtosegundo, logo essas técnicas serão mais exploradas abaixo.

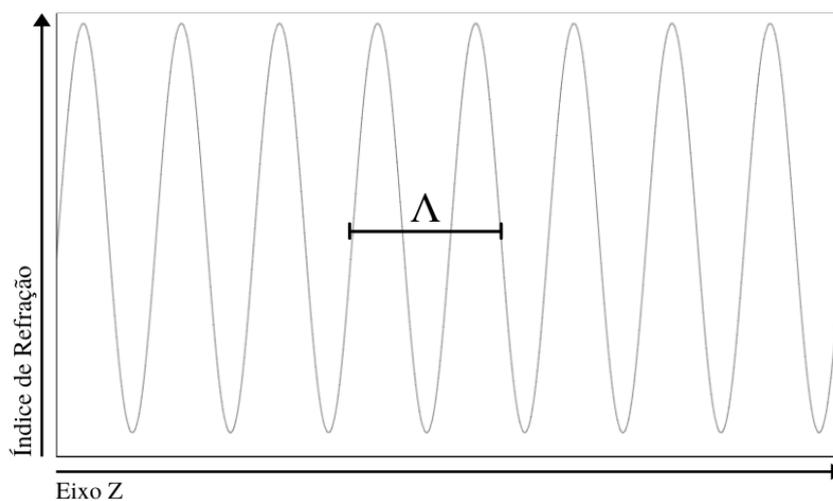


Figura 5 – Variação periódica do índice de refração em relação ao comprimento da fibra (Eixo z), com o período de modulação Λ .

Os sensores baseados em FBG apresentam possibilidade de multiplexação incluindo múltiplas fontes de sinal em comprimentos de ondas diferentes, o que permite sua aplicação

na medição simultânea de diferentes parâmetros como pressão [32], vibração [33], nível de líquido [10], umidade [34] e concentração de alguns compostos químicos [35].

2.2.1 Breve Histórico sobre as Grades de Bragg

Uma FBG é uma perturbação periódica do índice de refração ao longo do eixo z da fibra (ao longo do seu comprimento), sendo formada pela incidência de luz laser pulsada com alta potência de pico no núcleo da fibra. A gravação de grades na fibra de forma permanente foi demonstrada pela primeira vez em 1978 por [36, 37]. Hill e colaboradores lançaram uma radiação à laser de íon argônio intenso em uma fibra dopada com germânio e observaram que após alguns minutos ocorreu um aumento na intensidade da luz refletida, que cresceu até quase toda a luz ser refletida pela fibra. As medições espectrais, feitas indiretamente por ajuste de tensão e temperatura da grade em fibra, confirmaram que um filtro de grade Bragg de banda muito estreita havia sido formado em todo o comprimento de 1 m de fibra. Essa conquista, posteriormente denominada “grades de Hill”, foi resultado de uma pesquisa sobre as propriedades não lineares da fibra de sílica dopada com germânio. Estabeleceu uma fotossensibilidade desconhecida da fibra dopada com germânio, o que levou a outras investigações, vários anos depois, sobre a causa da refratividade induzida por fibras e sua dependência do comprimento de onda da luz que era usada para formar as grades [38].

Estudos detalhados [39] mostraram que a largura de banda espectral e a perturbação induzida no índice de refração são proporcionais ao quadrado da potência do laser aplicada na gravação da FBG. [40] mostraram que essa radiação poderia ser usada para formar redes que refletissem qualquer comprimento de onda, iluminando a fibra através do lado do revestimento com dois feixes de luz UV. Com isso o período dos máximos de interferência e a alteração do índice foram definidos pelo ângulo entre os feixes e o comprimento de onda UV, e não pela radiação visível que foi lançada no núcleo da fibra. Além disso, verificou-se que a formação da grade era mais eficiente.

2.2.2 Efeitos de Tensão e Temperatura

Como a FBG é sensível tanto à deformação quanto à temperatura, é necessário utilizar uma técnica para compensar os efeitos da temperatura sobre a medição. Para compensar os efeitos da temperatura, um sensor de temperatura em FBG é geralmente utilizado como sensor de referência para obter a resposta de temperatura do sistema. Com a caracterização dos sensores em FBG com diafragmas, é possível saber qual a influência da temperatura naquele sistema, com isso, torna-se possível realizar essa compensação de temperatura com o valor obtido nesse sensor [41].

A variação do comprimento de onda ocorre devido aos efeitos da temperatura (Δ

T) e deformação (ϵ) representados pelos coeficientes elasto-ópticos (P_e) e termo-ópticos (ξ). Além disso, a expansão térmica da fibra (α) também causa variação no comprimento de onda de Bragg. A Eq. 2 mostra a variação do comprimento de onda ($\Delta\lambda_B$) causada pelos efeitos da temperatura e deformação na FBG [27]:

$$\Delta\lambda_B = [(1 - P_e)\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T]\lambda_B \quad (2)$$

Além dos efeitos combinados de temperatura e pressão sobre diafragma, que influenciam diretamente os resultados da Eq. 2, a dinâmica da condutividade térmica no diafragma também pode afetar a resposta do sensor FBG [27]. A separação entre o pico característico da FBG e o seu deslocamento em comprimento de onda é proporcional à intensidade de temperatura ou pressão aplicados sobre a FBG. Nesse caso, a temperatura é considerada um fenômeno de baixa frequência com baixa condução de calor no diafragma, enquanto a pressão ocorre em alta frequência [42]. O termo $(\alpha + \xi)\Delta T$ na Eq. 2 está relacionado à mudança no comprimento de onda de Bragg devido aos efeitos da temperatura na FBG, ou a sensibilidade da FBG à temperatura [27].

Essa equação pode ser utilizada em uma situação onde as temperaturas não são tão elevadas (inferiores a 80 °C). Em um cenário onde o sistema está exposto a altas temperaturas (maiores que 100 °C), outros termos devem ser considerados, como a dilatação do material do diafragma e também da estrutura do sensor.

2.3 Técnicas de Gravação de Grades de Bragg Existentes

As Fibras Ópticas precisam passar por um processo de gravação para que seja possível a obtenção das FBGs. Essas estruturas podem ser obtidas utilizando lasers para modificar internamente a fibra óptica. Essa gravação pode ser realizada de várias maneiras, como por exemplo através da irradiação com laser ultravioleta (UV - *Ultraviolet Radiation*) por meio de técnicas holográficas [29, 40], interferômetro de Talbot [43], Máscara de Fase [31, 44] ou gravação direta Plano a Plano [45] ou Ponto a Ponto [46] do padrão de grade no núcleo da fibra utilizando um laser femtosegundo.

Na dissertação foram utilizadas FBG gravadas através das técnicas de Máscara de Fase e Plano a Plano. Isso ocorreu primeiramente porque as FBG que estavam disponíveis para o projeto foram gravadas através dessas duas técnicas. E o outro motivo é com a gravação das grades Plano a Plano não é necessário retirar a proteção da fibra, deixando a mesma mais resistente. Por isso, na Subseção 2.3.1 essas técnicas serão evidenciadas.

2.3.1 Gravação de Grades de Bragg através da Técnica de Máscara de Fase e Plano a Plano

Na Fig. 6 é possível observar uma configuração típica de gravação de FBG através da Técnica de Máscara de Fase. Logo no início, quando essa técnica começou a ser explorada, as FBG eram gravadas na região de 1550 nm devido à disponibilidade de equipamentos associados às aplicações de telecomunicações [29]. Na imagem identifica-se o equipamento que gera o Laser Pulsado, que se propaga através dos diversos aparatos reflexivos (espelhos), lentes cilíndricas, Máscara de Fase e finalmente é acoplada à fibra óptica. A fibra fica acoplada a posicionadores que podem mover a fibra nas 3 dimensões, a fim de posicioná-la da maneira que precisar. A cada gravação movimenta-se a fibra de acordo com as configurações de projeto de produção da FBG.

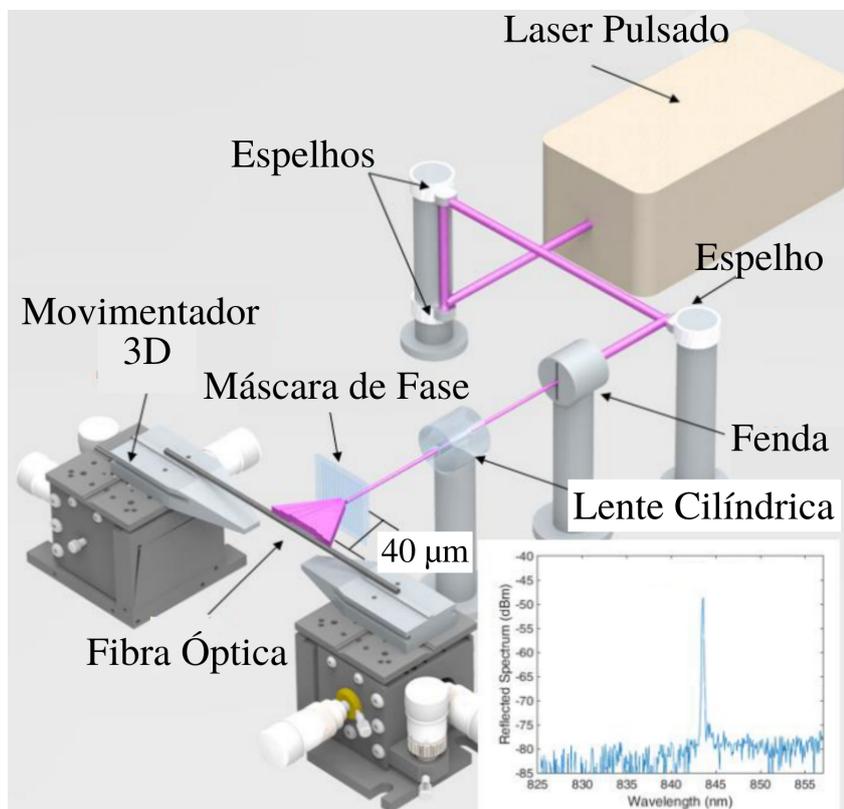


Figura 6 – Configuração típica de gravação de FBG utilizando a técnica de máscara de fase.

Adptado da Ref. [29]

Nesse caso específico, uma fibra fotossensível de sílica monomodo padrão (SMF - *Single-mode Fiber*) com diâmetro externo de $125 \mu\text{m}$ (ThorLabs GF1B) foi usada para gravar o sensor FBG usando a Técnica de Máscara de Fase com um laser KrF UV Excimer emitindo a 248 nm (modelo BraggStar Industrial da Coherent). Os parâmetros utilizados durante o processo de inscrição foram pulsos de energia de 5mJ com uma frequência de repetição de 500 Hz. A tempo de exposição foi de 15 segundos e o espectro de FBG foi

monitorado com o interrogador Micron optics SM125. O comprimento físico da FBG é de aproximadamente 10 mm.

Na Fig. 7 é possível observar a foto de uma FBG ampliada através de um microscópio. Observe as estruturas gravadas na fibra que irão causar a reflexão na propagação da radiação ao longo do núcleo.

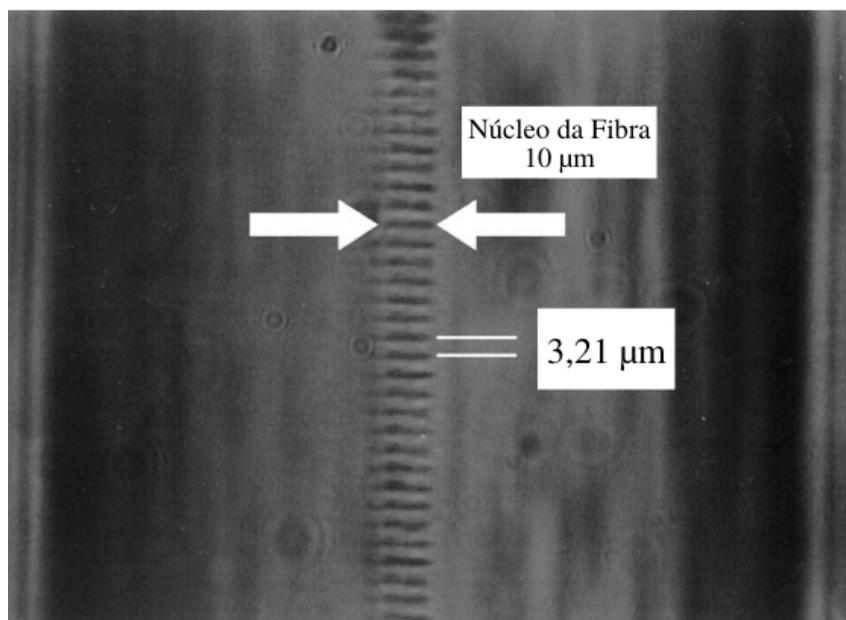


Figura 7 – Imagem em microscópio da modulação gerada na fibra. O espaçamento entre as linhas na imagem correspondem ao período de modulação (Λ) de 3.213 mm. Adaptado da Ref. [47]

A técnica de gravação direta Plano a Plano do padrão de grade no núcleo da fibra usando um laser femtosegundo consiste em incidir diretamente sobre a fibra um laser desse tipo com o objetivo de modificar a sua estrutura interna da fibra e produzir modulações periódicas do índice de refração do núcleo de fibra [45].

As FBGs gravadas através da técnica Plano a Plano (Fig. 8) utilizadas nesse projeto foram inscritas na Universidade de Tecnologia de Chipre (CUT) usando um laser femtosegundo operando a 517 nm com duração de pulso de 220 fs (laser HighQ femtoREGEN) em uma fibra de sílica monomodo padrão SMF com diâmetro externo de 125 mm. Conforme mostrado na Fig. 8, o feixe de laser é focado em uma extensão de 5 m do núcleo da fibra, usando uma lente objetiva x50 cuidadosamente posicionada para garantir as modificações do índice de refração no centro do núcleo da fibra [29].

2.4 Sensores em Diafragmas com Grades de Bragg

Os sensores que são constituídos basicamente de fibra óptica com FBG, diafragmas e uma estrutura de fixação possuem como finalidade principal medir as variáveis pressão,

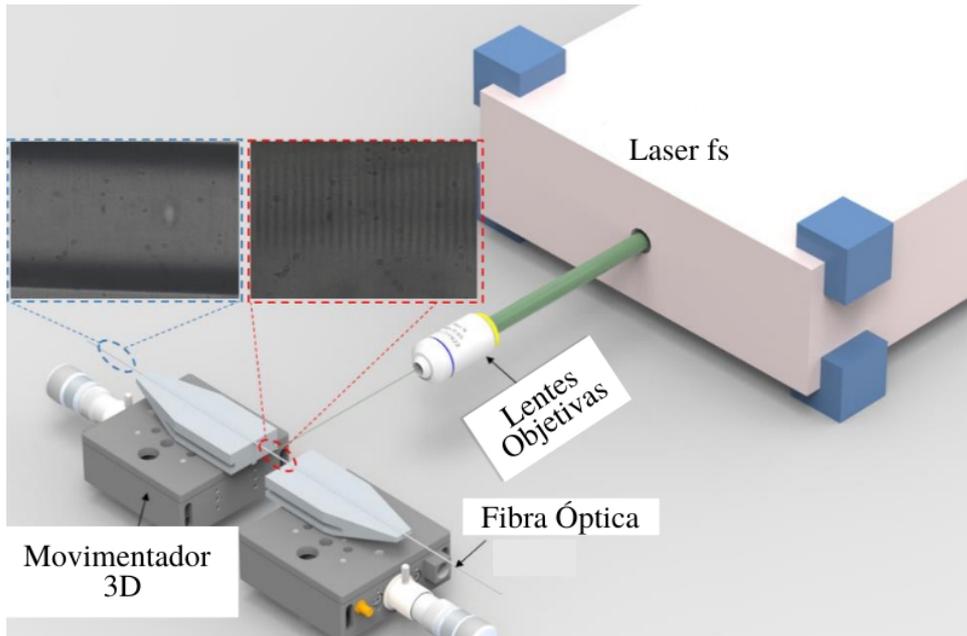


Figura 8 – Representação esquemática da configuração experimental usada na inscrição das grades através da Técnica de Plano a Plano. Os quadros da imagem mostram a fibra sem e com as gravações.

Adaptado da Ref. [29]

nível e nível de interface. Para medição de nível de interface existe a necessidade da utilização de mais de um sensor, ao contrário dos parâmetros de nível e pressão, onde pode-se utilizar apenas um sensor.

A abordagem para usar a FBG na medição de pressão, nível do fluido e o nível de interface entre fluidos é posicionar essa fibra no interior de um diafragma, onde o deslocamento do comprimento de onda de Bragg é causado pela tensão da fibra devido à pressão imposta no diafragma [10]. No caso esse posicionamento pode ser realizado já na produção do diafragma (Seções 2.4.1 e 2.4.2), através de uma colagem da fibra no diafragma (Seção 2.4.3) ou no encaixe da FBG entre dois diafragmas (Seção 2.4.4), que podem ser transformados em apenas um diafragma através da vulcanização (3.2.3.1).

2.4.1 Técnicas de Fabricação em Impressora 3D

No estudo de [18], um novo sensor de deformação circunferencial por FBG foi projetado através da tecnologia de Modelagem por Deposição através de Fusão (FDM - *Fused Deposition Modeling*). Esse processo é o método utilizado pelas impressoras 3D para impressão de objetos. O esquemático do processo de fabricação do novo sensor FBG é mostrado na Fig. 9. O FDM utiliza o princípio de aquecimento de um material, que pode ser um filamento de Ácido Poliláctico (PLA - *Polylactic Acid*) ou outro material mais flexível, até seu ponto de fusão para então realizar a deposição do material camada por camada com o objetivo de formar estruturas 3D para produção rápida de peças para

dispositivos. O processo é necessário para proteger o sensor FBG de danos externos.

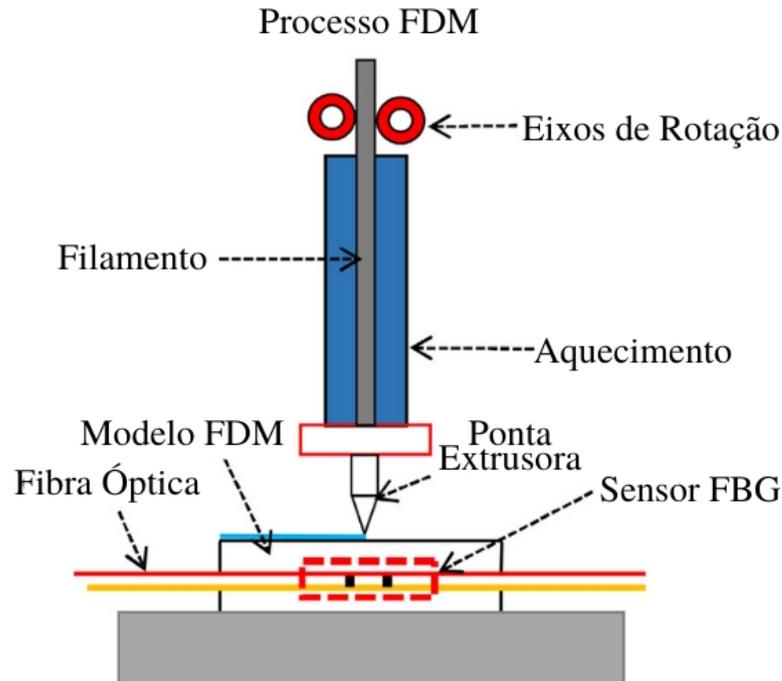


Figura 9 – Processo de fabricação do sensor de deformação com FBG utilizando impressora 3D.

Adaptado da Ref. [18]

Esse sensor foi produzido para monitoramento de dutos. A medição de deformação circunferencial é frequentemente utilizada nessa área. Levando em consideração o rápido e constante desenvolvimento e aplicação do transporte por dutos em vários setores, os problemas de segurança dos oleodutos e gasodutos não podem ser ignorados, pois os danos e envelhecimento dos oleodutos e causas externas podem enfraquecer as estruturas e causar acidentes. Portanto, é essencial monitorar essas linhas de dutos em tempo real para evitar esses problemas. O rastreamento em tempo real de tubulações pode ser realizado utilizando esse sensor de fibra óptica, que é de grande importância para o estudo da deformação de tubulações [18].

A Fig. 10(a) mostra o projeto desse novo tipo de sensor FBG, destacando as partes do sensor FBG, invólucro protetor em PLA e placa de transmissão de deformação. A FBG é conectada a placa de transmissão de tensão e ao material da impressora ao mesmo tempo. A Fig. 10(b) mostra o uso da técnica FDM para imprimir o invólucro em PLA. No processo FDM, o sensor FBG foi incorporado ao material do PLA com espaço reservado quando 50% do tamanho foi concluído. Em seguida, o processo de impressão foi reiniciado, para que o dispositivo fosse finalizado. A densidade de preenchimento selecionada foi de 80%. Todo o processo de impressão durou 14 minutos. O comprimento de onda do sensor é 1543,001 nm. A Fig. 10(c) mostra o projeto completo do sensor de deformação circunferencial FBG para medição e calibração. O novo sensor de tensão circunferencial FBG foi montado em

um cilindro para medir sua tensão circunferencial e validar o projeto [18].

O projeto de [18] não utilizou um diafragma em si para a elaboração do dispositivo. Mas a estrutura produzida possui o mesmo princípio de produção do diafragma com a FBG no seu interior.

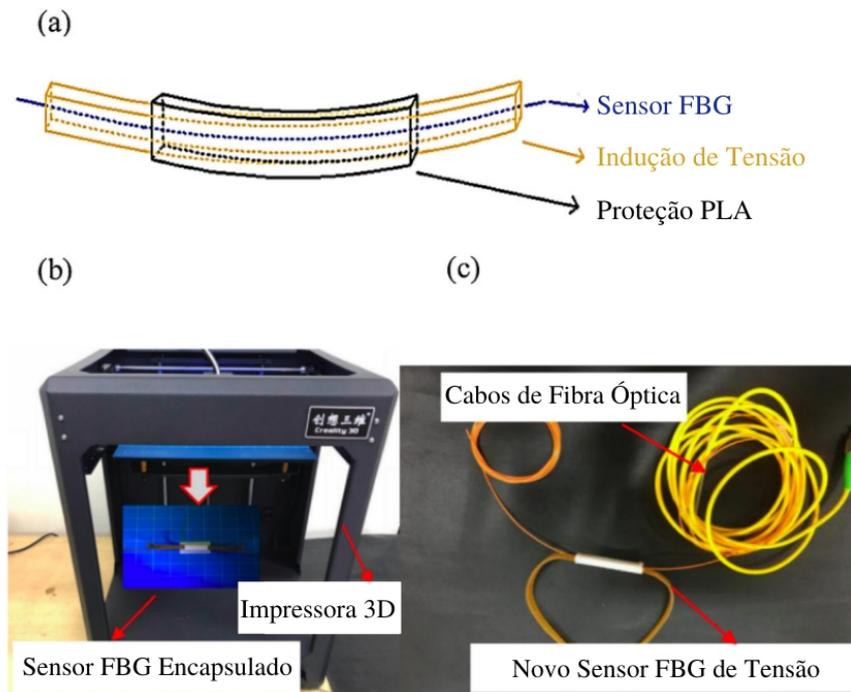


Figura 10 – (a) estrutura do sensor de deformação produzido na impressora 3D; (b) Processo de impressão do emcapsulamento do sensor; (c) sensor já conectorizado a fibra óptica.

Adaptado da Ref. [18]

2.4.2 Sensor com Diafragma Produzido com Cura de Resinas

Um dos modos que possibilitam a produção de sensores em FBG com diafragmas é a utilização da cura de resinas com a fibra no seu interior. Em [48] e [10] são desenvolvidos diafragmas através dessa técnica.

O diafragma produzido em [10] é uma borracha de silicone preparada misturando homogeneamente líquidos de borracha de silicone (base SILASTIC® T-4 da Dow Corning Corporation) e um agente de cura (catalisador SILASTIC® T-4) em uma proporção de 100:10 em volume. Para garantir uma mistura completa da base e do agente de cura, a mistura foi realizada em pequenas quantidades. A mistura foi colocada em uma câmara de vácuo para remover o ar retido e após 2-3 minutos a mistura foi inspecionada para verificar se estava livre de bolhas de ar. Em seguida, a solução de borracha de silicone foi derramada em um recipiente circular de plástico com 50 mm de diâmetro e 1,1 mm de altura, no qual também foi colocada a fibra com a FBG. A Fig. 11 mostra o *design* do recipiente de plástico usado para a fabricação do diafragma e o posicionamento da FBG.

Para garantir uma uniformidade do diafragma, uma peça de metal foi colocada no topo do recipiente para exercer uma leve carga sobre o silicone. Em relação à uniformidade, os diafragmas foram obtidos com espessura entre 1,04 mm e 1,10 mm. O molde foi mantido por 24 horas à temperatura ambiente para permitir que a borracha de silicone secasse. Posteriormente, o excesso de borracha de silicone foi cortado para dar ao diafragma um tamanho específico, de acordo com cada configuração do sensor de nível de líquido [10].

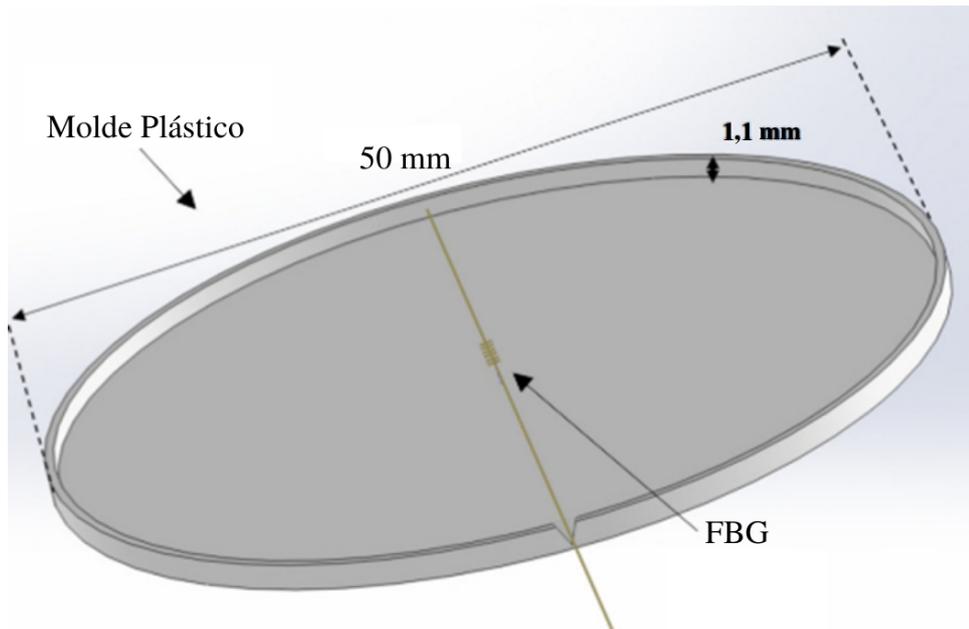


Figura 11 – Estrutura de plástico para produção do diafragma.
Adaptado da Ref. [10]

Na Fig. 12 pode-se observar o sensor com um diafragma que foi fabricado utilizando essa técnica de cura de materiais, neste caso a resina epóxi. Para produzir esse sensor, primeiramente, a proteção do acrilato de fibra foi removida em torno de 45 mm na seção de fibra FBG, a fim de melhorar a adesão da resina epóxi à fibra. No entanto, próximo à transição da resina para o exterior, a proteção de acrilato foi preservada para melhorar a resistência mecânica entre o diafragma e as extremidades fixas da fibra. Posteriormente o sensor FBG foi centralizado e fixado em um recipiente (molde plástico) que tem as mesmas dimensões do diafragma de resina epóxi (1,1 mm de altura e 50 mm de diâmetro interno). Finalmente, a resina epóxi (*Liquid lens - Advanced 2*) foi aplicada, mantendo o molde intacto por 24 horas. O suporte do sensor, feito de *Nylon*, tem uma espessura de 3,1 mm por 50 mm de diâmetro e um orifício central de 19 mm de diâmetro, o que permite o contato do diafragma com o meio circundante. Oito furos de 3,8 mm e separados por 13,2 mm permitem fixar o sensor sobre uma superfície plana com 8 parafusos [48].

Esse sensor foi testado em um sistema composto por dois tanques metálicos fechados, onde a água é bombeada entre os dois tanques utilizando uma bomba. No tanque que o sensor está localizado existe uma régua externa utilizada como referência para medir o nível da água. A Fig. 13 mostra a configuração do experimento. O sensor do diafragma é

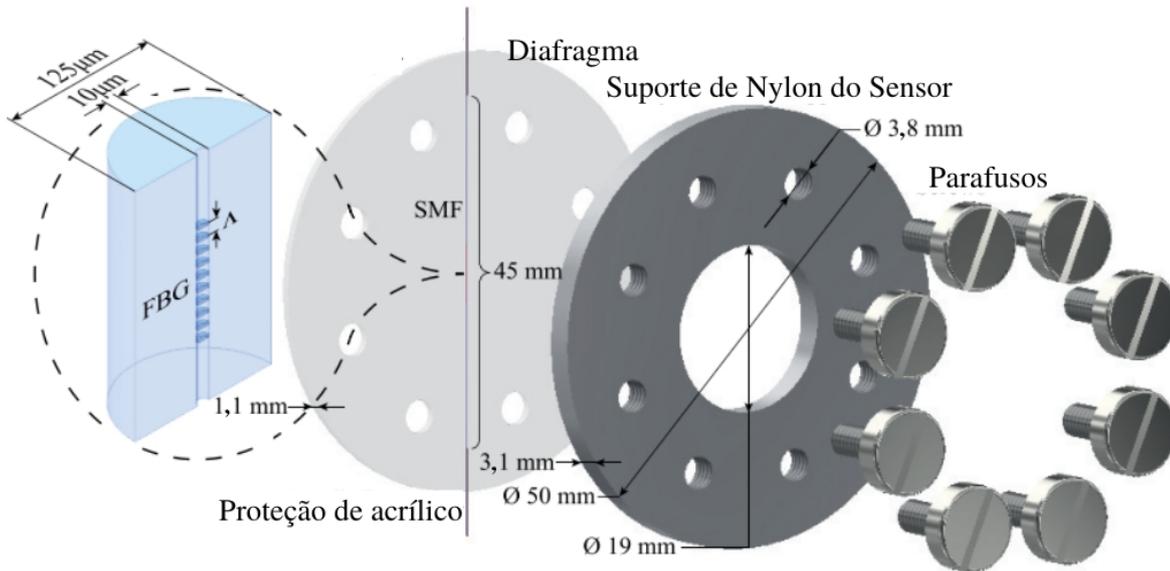


Figura 12 – Estrutura do sensor proposto.
Adaptado da Ref. [48]

fixado em uma estrutura oca de aço inoxidável ao lado do sensor FBG de temperatura de referência e é submerso no líquido. O sensor FBG de temperatura é utilizado para medir as mudanças de temperatura da água e posteriormente compensar o efeito da temperatura no diafragma. Um lado do diafragma está em contato direto com a água, enquanto o outro é exposto ao ar externo à pressão atmosférica. A diferença do nível do líquido causa uma diferença de pressão no diafragma e essa pressão é convertida em tensão na fibra óptica, onde pode ser monitorada pelo sensor [48].

2.4.3 Fibra com Grades de Bragg Colados na face de um Diafragma Único

Na Fig. 14 é possível observar um sensor onde a FBG fica fixa em uma das faces do diafragma. Na Fig. 14(a) é mostrado a estrutura esquemática do sensor, sendo bem evidenciado a FBG no centro do diafragma metálico. Já em Fig. 14(b) encontra-se a fotografia da estrutura do sensor. A estrutura do sensor consiste em três partes principais: placa superior, bloco de metal inferior e diafragma de metal fino. O bloco de metal é feito de aço inoxidável com dimensões 50 x 50 x 10 mm, possui uma cavidade circular de 5 mm de profundidade e mede 30 mm de diâmetro [49]. O diafragma de metal possui 0,5 mm de espessura e é fixado entre a placa superior e o bloco de metal com a ajuda de um anel e parafusos. A placa superior também fabricada em aço inoxidável e com uma espessura de 3 mm, é perfurada no centro, medindo 30 mm de diâmetro, permitindo que o diafragma se

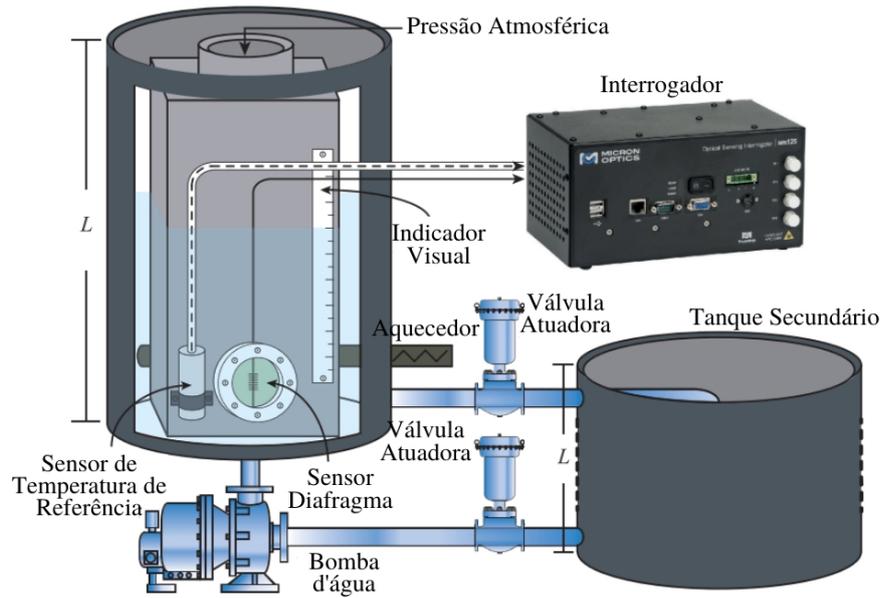


Figura 13 – Arranjo experimental do dispositivo.
Adaptado da Ref. [48]

flexione sob pressão [49].

Uma válvula circular com diâmetros interno e externo de 5 mm e 9 mm, respectivamente, é usada como uma entrada de pressão conectada na parte inferior do bloco de metal, possibilitando conectar o sensor de pressão ao compressor. A fibra óptica é inserida através de ranhuras de 0,1 mm na placa superior, posicionada ao longo do diafragma. A fibra na região da FBG é firmemente colada ao diafragma usando adesivo de cianoacrilato. Uma FBG com comprimento de onda de pico em 1551,45 nm, gravada utilizando a técnica de máscara de fase, é usada para detecção de pressão. Uma extremidade da FBG é clivada e imersa em um gel de correspondência de índice para evitar reflexão da luz enquanto a outra extremidade está conectada a uma fibra óptica [49].

2.4.4 Sensor em Fibra com Grades de Bragg Embutida Entre Diafragmas

Neste tipo de estrutura a FBG é posicionada entre dois diafragmas que são apertados sobre a FBG comprimindo-a e impossibilitando-a de se movimentar. Todo o esforço que o diafragma sofre é transmitido diretamente para a FBG. Nos trabalhos de [50], [42] e [27] é possível observar diversas formas de montagem desse tipo de estrutura.

Na Fig. 15 é apresentado o sensor FBG de nível proposto por [50] com diafragma em folha de fibra de carbono. A água ou o óleo entra no sensor pelo orifício do sensor e atua na superfície do diafragma composto de fibra de carbono. O diafragma, fabricado a partir de fibra de carbono e resina, é fixado na circunferência de uma estrutura de metal. Uma tampa de metal é usada para proteger o diafragma. O diafragma se deforma sob a pressão externa e uma FBG é posicionada no centro do diafragma composto de fibra de

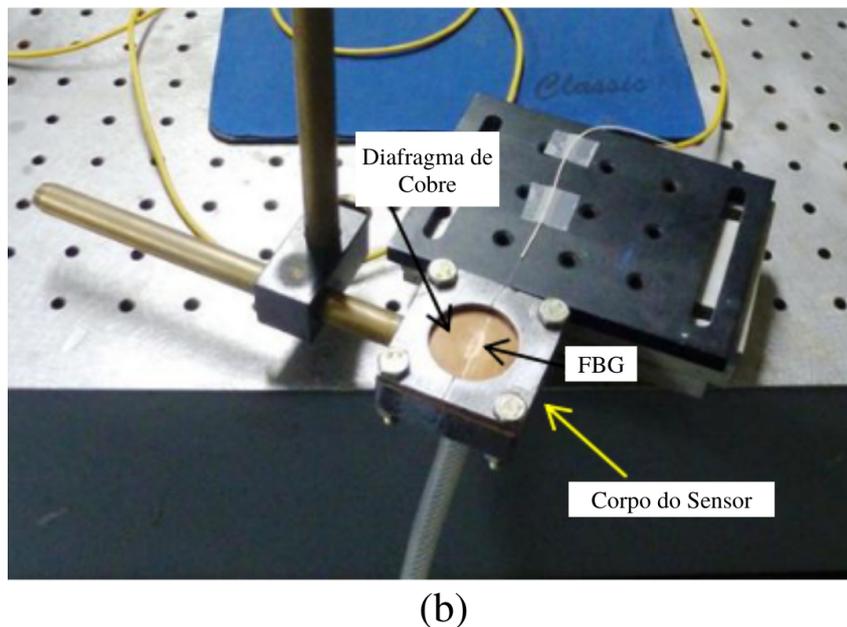
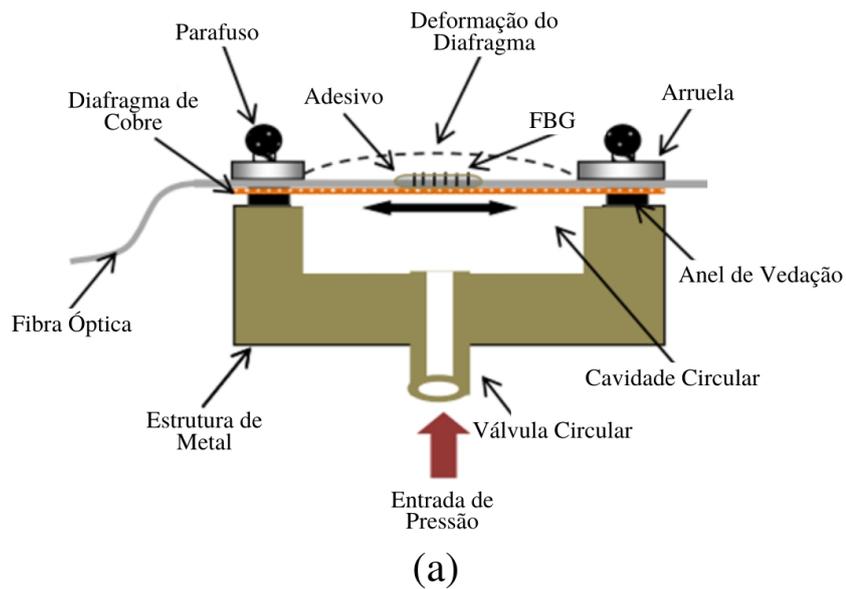


Figura 14 – (a) Vista esquemática do sensor de pressão e (b) fotografia da estrutura do sensor.

Adaptado da Ref. [49]

carbono com epóxi. Primeiro, uma extremidade da FBG é colada no diafragma usando epóxi e, em seguida esticada para garantir que a FBG esteja sempre sob tensão. Depois a epóxi é aplicada na outra extremidade da FBG. Como resultado, a FBG terá a mesma tensão que o diafragma. Em relação a posição de da FBG no diafragma, o centro da FBG se sobrepõe ao centro do diafragma, e a disposição da FBG é na direção radial. Portanto, apenas a tensão radial é aplicada a FBG quando o diafragma composto de fibra de carbono se deforma sob a pressão do líquido [50].

O sensor FBG baseado em diafragma de polímero proposto compreende uma FBG inscrita em uma fibra monomodo padrão posicionada dentro de um tubo capilar de

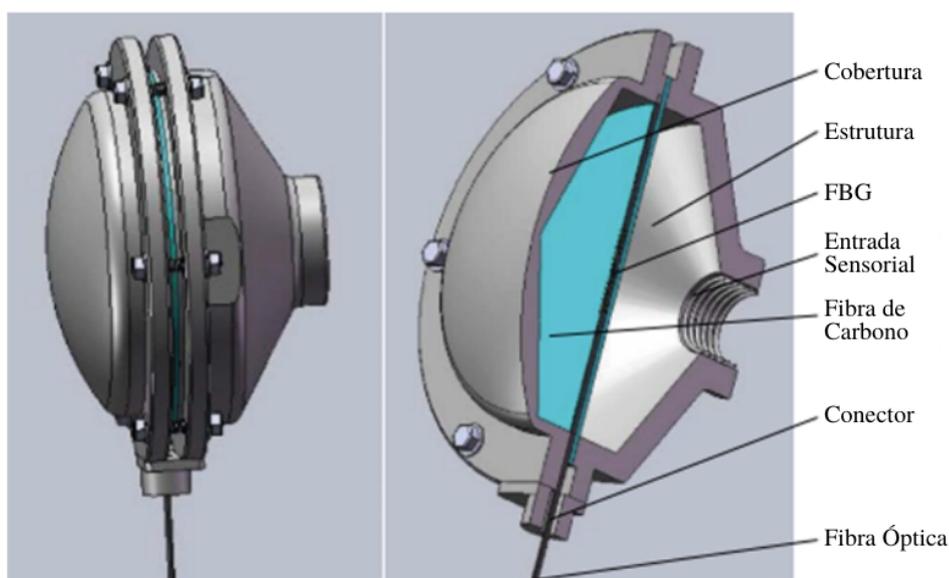


Figura 15 – Diagrama esquemático do sensor de nível de líquido.
Adaptado da Ref. [50]

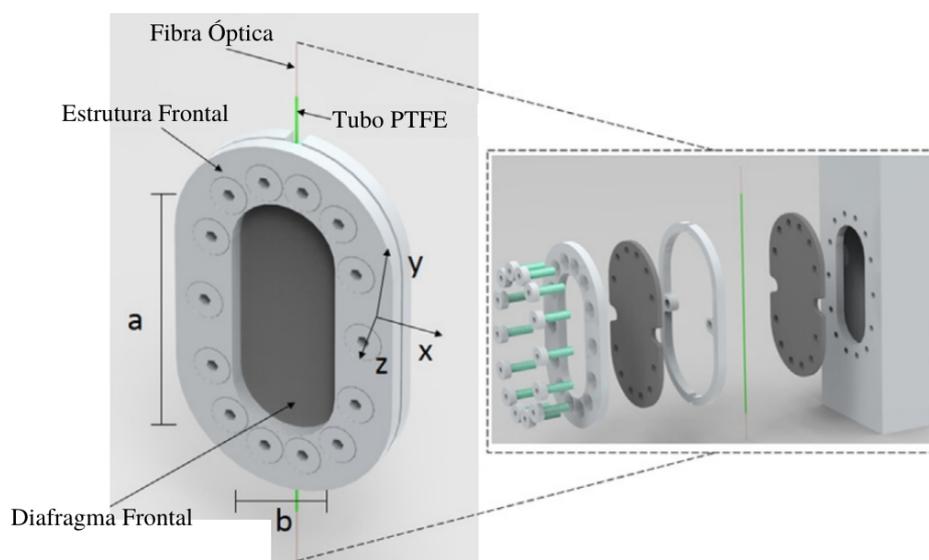


Figura 16 – Componentes do sensor FBG à base de diafragma de polímero e dimensões do diafragma. A figura mostra a vista explodida do conjunto sensor.
Adaptado da Ref. [27]

politetrafluoretileno (PTFE - *Polytetrafluoroethylene*), que é colocado entre dois diafragmas oblongos com 1,8 mm de espessura cada. Os diafragmas são feitos de borracha nitrílica. Um retentor lateral de alumínio é posicionado para limitar a deflexão dos diafragmas nas direções x e y , conforme ilustrado na Fig. 16. O sensor é fixado nos diafragmas através de uma placa frontal com conexão a parafuso. Conforme apresentado na Fig. 16, a FBG é colocada entre dois diafragmas com a mesma dimensão, onde um retentor lateral garante

o posicionamento da fibra nos diafragmas. Em seguida, uma placa frontal é posicionada e o diafragma é fixado no tubo de pressão através de uma série de parafusos. A Fig. 16 apresenta os componentes do sensor [27].

2.5 Materiais

Um material essencial no trabalho é a borracha nitrílica, posto que o ambiente em que os sensores com esse material vão atuar são corrosivos, deve-se provar a sua resistência a esses ambientes. O outro material é o óleo que será utilizado nos testes no tanque.

2.5.1 Borracha Nitrílica

A borracha de nitrila butadieno (NBR - *Nitrile-butadiene Rubber*), também conhecida por borracha nitrílica, por suas resistências a óleo e combustíveis, é amplamente utilizada em automóveis, aeronaves, tanques e outras aplicações militares em vedações, gaxetas, *orings* etc. No entanto, a composição dessa borracha apresenta problemas devido à aderência baixa, estabilidade limitada a altas temperaturas e baixa vida útil [51]. A borracha nitrílica é usada em muitas aplicações que exigem resistência ao óleo [52].

A NBR é um copolímero de butadieno e acrilonitrila (ACN - Acrylonitrile) descoberta na Alemanha em 1930 e comercializada pela primeira vez em 1937. A ACN adiciona boa resistência a óleos devido a sua alta resistência e baixa permeabilidade. O butadieno modifica a elasticidade geral e a elasticidade em baixas temperaturas. A NBR é sensível a oxigênio, ozônio e luz ultravioleta [53]. Devido à sua resistência aos derivados de petróleo e seu preço competitivo, a NBR é amplamente utilizada em diversas aplicações de vedação, acabamentos e revestimentos [53].

Os fabricantes de elementos que utilizam a borracha nitrílica como matéria prima adicionam materiais chamados plastificantes no momento da fabricação com o objetivo de modificar as propriedades do elemento final produzido (no caso dos diafragmas), melhorando assim sua flexibilidade e processabilidade, ajudando assim em processos de mistura e extrusão dos materiais. Quando esses plastificantes são adicionados, a temperatura de transição vítrea (T_g - *Glass Transition Temperature*) do polímero é reduzida acentuadamente. Isso ocorre porque esse material ocasiona uma diminuição das forças coesivas entre as cadeias poliméricas [53].

A elasticidade da borracha vulcanizada diminui com a diminuição da temperatura até mudar para a elasticidade do aço na elasticidade mínima ou até a temperatura de transição de segunda ordem [53]. A T_g da NBR é de aproximadamente $-43\text{ }^\circ\text{C}$. Acima dessa temperatura a NBR se comporta como um material borrachudo. Abaixo dela, o material tem uma característica vítrea. Daqui resulta que a borracha vulcanizada com alta elasticidade inicial à temperatura ambiente não congela até que seja atingida uma temperatura bastante

baixa, demonstrando assim uma boa flexibilidade a baixas temperaturas. Como a borracha vulcanizada com um grau de cura bastante alto normalmente possui alta elasticidade, também possui boa flexibilidade para baixas temperaturas [53].

2.5.2 Óleo Hidráulico

Nos testes do tanque, para a formação de uma interface a ser medida, foi utilizado como fluidos a água e o óleo hidráulico industrial Aw 460. A água utilizada é a disponível no sistema de abastecimento local. O óleo hidráulico industrial 460, que é um óleo com viscosidade igual ao de um óleo para câmbio automotivo, possui as seguintes características: densidade a 20/4 °C de 0,873 kg/L; viscosidade de 46,0 ISO VG; Ponto de fulgor mínimo 200 °C.

Esse óleo forma uma quantidade considerável de emulsão quando agitado com água e/ou o ar. O óleo quando passa pela bomba hidráulica forma emulsão com o ar que é injetado junto com ele. A emulsão é um agravante para as medições de nível de interface.

3 Desenvolvimento Experimental

Neste capítulo são apresentados os procedimentos de montagem dos sistemas para a realização dos testes práticos do presente projeto. Toda a rotina de montagem dos diafragmas com FBG inserida, desde a seleção dos materiais até o início dos testes, será explicada aqui. Isso tornará possível a reprodução desse trabalho posteriormente focando em avanços aos resultados obtidos.

3.1 Diafragma Impresso em Impressora 3D

Para a construção do elemento sensor (conjunto Diafragma + Fibra) foram utilizadas duas técnicas: a técnica FDM, descrita na Seção 2.4.1 e desenvolvida por [18, 29], que produz o conjunto através da impressora 3D para utilização em ambientes não agressivos.

3.1.1 Construção do Sensor

Esse primeiro conjunto foi construído com o objetivo de validar a proposta, verificando se realmente esse sistema funciona para medição de pressão e conseqüentemente de nível. Visto que a utilização de impressoras 3D, principalmente em laboratórios de pesquisa, está se tornando comum, a construção da estrutura desse sensor torna-se viável para praticamente qualquer um que deseje trabalhar com esse assunto construindo seu próprio sensor.

O autor [18] desenvolveu o sensor com FBG utilizando a técnica FDM, muito semelhante ao que foi feito nesta dissertação, a técnica também consiste em iniciar a impressão de uma estrutura de acomodação da FBG, como por exemplo um sulco na peça, para que ela sofra a deformação que é imposta nessa estrutura. A diferença básica entre os dois sistemas é que nesta dissertação temos essa estrutura em forma de diafragma.

O sistema consiste em uma fibra de sílica monomodo padrão SMF28 com revestimento de 125 μm . A FBG apresenta um comprimento de onda central de 1575 nm com um comprimento físico de 10 mm, inferior ao diâmetro do diafragma (57 mm), onde esse comprimento não irá atrapalhar a operação do sensor. A inscrição da FBG foi produzida na Universidade de Aveiro com técnica de máscara de fase, conforme descrito na Seção 2.3.1. O elemento sensor FBG é colocado dentro de um tubo capilar de PTFE (politetrafluoretileno), com diâmetro externo de 0,7 mm, que é posicionado dentro do diafragma durante a impressão na Impressora 3D (Sethi3D S3, Sethi Brasil).

A Fig. 17 mostra a estrutura preparada para acomodar a FBG no diafragma. O diafragma e a FBG atuam como elemento sensor do dispositivo sensor. Esta estrutura foi

produzida a partir de um pressostato de compressor, que é um instrumento de medição de pressão utilizado como um sistema proteção em equipamentos industriais. A partir dessa estrutura, o diafragma foi projetado no software de modelagem *Autodesk Inventor*. Dois diafragmas, um com 1,2 mm e outros de 2,0 mm de espessura, foram testados no sensor.

O princípio de operação é o mesmo utilizado por [48] e está descrito na Seção 2.2. A aquisição de sinal da FBG é realizada através de um interrogador comercial (SM125, Micron Optics) com resolução de 1 pm e taxa de aquisição de 2 Hz. O sinal da curva característica da FBG é lido e é identificado o ponto central desse espectro óptico (comprimento de onda de Bragg). A FBG sofre uma deformação devido à pressão imposta no diafragma e a resposta é proporcional à variação/deslocamento no comprimento de onda de pico da FBG. Assim, através do deslocamento em relação ao pico é possível identificar a pressão imposta no sensor.

O sensor baseado em FBG é sensível à tensão causada pela pressão no diafragma. No entanto, tem a desvantagem de ser simultaneamente sensível à temperatura ambiente. Consequentemente, é necessária uma técnica de compensação de temperatura para corrigir o valor de pressão lido, sem que ocorra a contaminação por efeito de temperatura no valor medido [1]. O princípio da técnica de compensação de temperatura foi a mesma utilizada por [54].

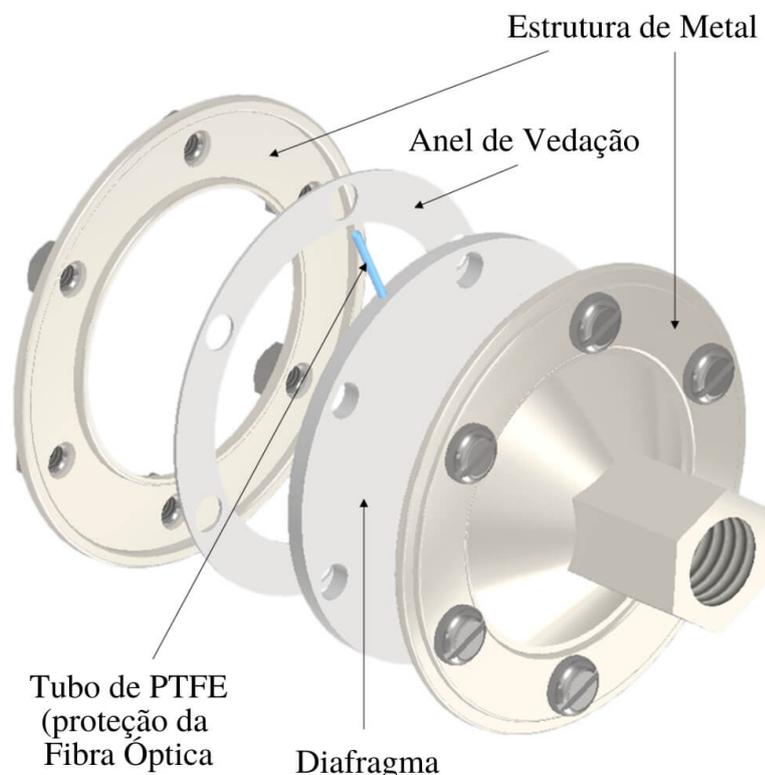


Figura 17 – Montagem experimental utilizado na caracterização do elemento sensor, formada pelo tubo de PTFE, diafragma, anel de vedação e estrutura de metal.

3.1.2 Montagem Experimental

Esse primeiro arranjo experimental montado para a medição de pressão foi produzido dentro do próprio LabTel. A Fig. 18 mostra a configuração experimental utilizada na caracterização e testes do sensor. O compressor de ar portátil *Air Hawk Pro* foi usado para alterar a pressão aplicada no dispositivo sensor composto pela FBG embutida no diafragma. Utilizou-se uma tanque de ar para a pressão variar lentamente no sistema. A fibra óptica localizada dentro do tubo de PTFE é conectada diretamente ao Interrogador das FBG, o qual foi conectado a um computador para análise e armazenamento de dados. O tubo de PTFE e a fibra óptica foram ancorados em dois pontos. O interrogador faz aquisição do espectro óptico refletido e a partir desse espectro é detectado o pico central, que é o ponto principal a ser analisado para a execução das medidas, conforme ilustrado na tela do computador mostrado na Fig. 18.

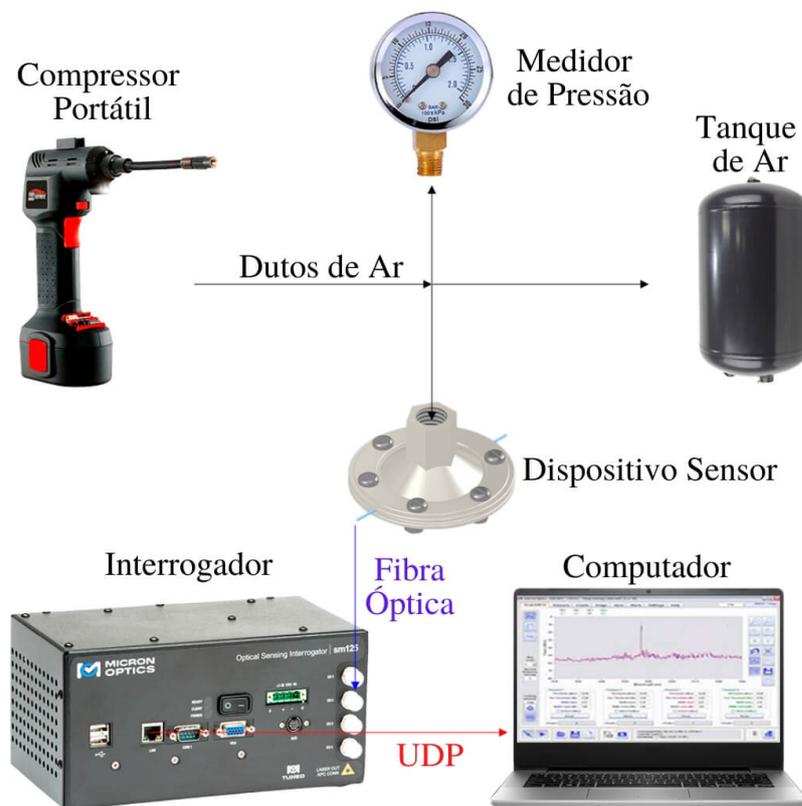


Figura 18 – Montagem experimental utilizado na caracterização do elemento sensor.

3.1.3 Metodologia

3.1.3.1 Produção do Diafragma em Impressora 3D

A produção do diafragma em impressora 3D consiste em inserir a FBG em etapa específica da impressão em 3D. A fixação da fibra é um ponto chave para garantir bons resultados no processo de produção. O processo apresenta boa repetibilidade e pode ser

replicado por laboratórios da área que possuam equipamentos similares/equivalentes. O projeto do diafragma foi elaborado através do software *Autodesk Inventor* versão estudante para ser exportado para o software próprio da impressora da fabricante Sethi3D modelo S3. A Fig. 19 mostra a foto do momento em que o diafragma começa a ser impresso.

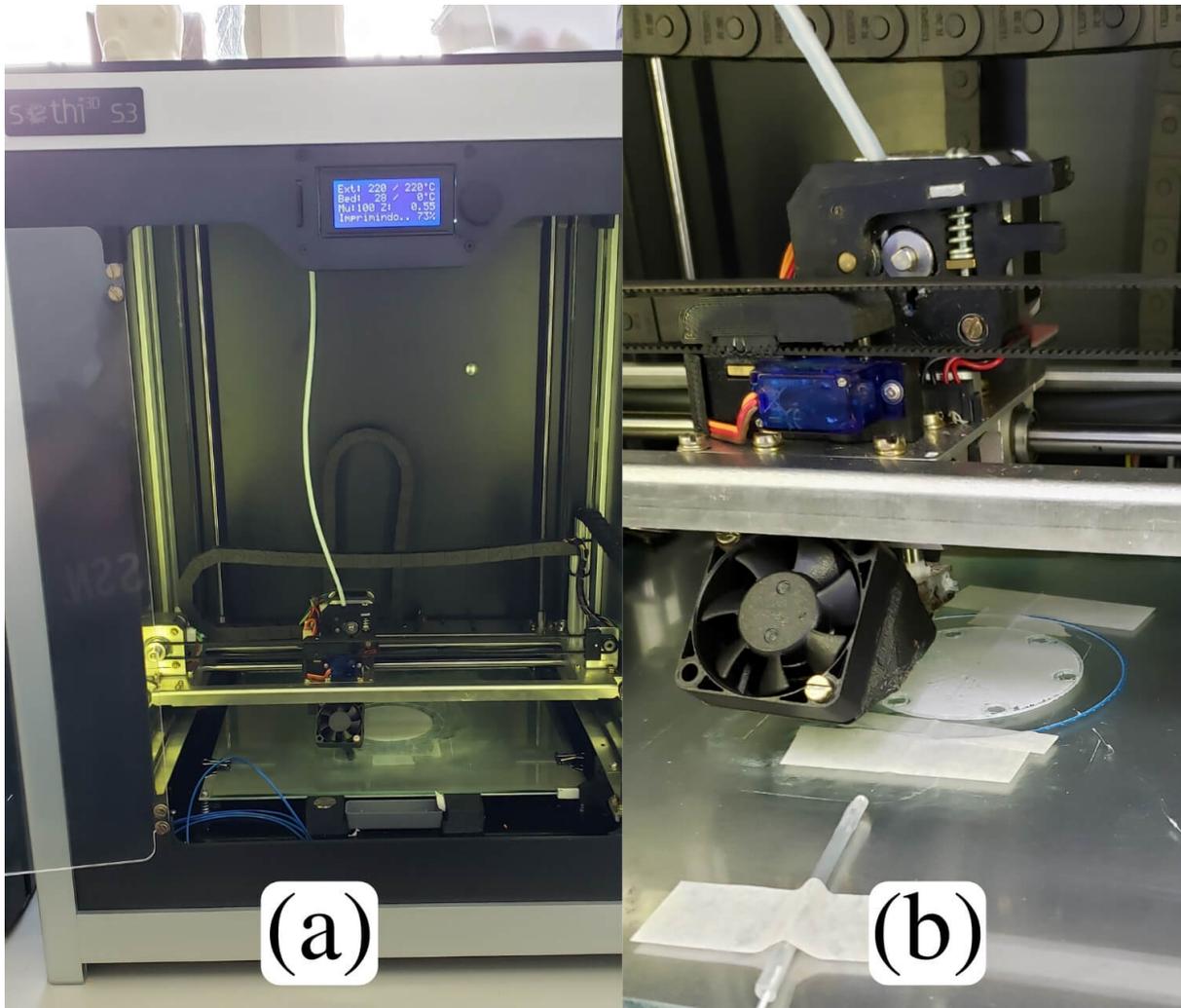


Figura 19 – Impressão do sensor utilizando a impressora 3D Sethi S3. (a) observe e impressora em funcionamento; (b) aproximação no bico extrusor da impressora em funcionamento.

A impressão do diafragma é iniciada e quando atinge 50% aproximadamente, é pausada para o posicionamento da FBG inserida no tubo capilar de PTFE. Esse posicionamento foi realizado de forma muito rigorosa e precisa, para que o bico de extrusão da impressora não encostasse na fibra, evitando que se quebrasse. Inicialmente o grande problema que ocorreu foi exatamente isso, o bico de extrusão da impressora encostava na fibra e a quebrava. Por isso foi adicionado ao projeto o tubo de PTFE e também o espaço específico para fibra no projeto de impressão. Observa-se na Fig. 19(a) a impressão do diafragma contendo a FBG na impressora Sethi S3. Na Fig. 19(b) observa-se a fixação da fibra com a FBG. A mesma foi posicionada junto aos dois lados do diafragma de forma que

ficasse no limite da superfície do diafragma. O diafragma foi produzido com poliuretano termoplástico flexível (TPU - *Thermoplastic Polyurethane*), tornando-o flexível e suscetível à deformação quando uma variação de pressão é imposta. A FBG foi posicionada dentro do tubo de PTFE no centro do diafragma.

3.1.3.2 Medição de Pressão com Diafragma Impresso em Impressora 3D

Com o auxílio de um manômetro analógico, foram impostos a cada 1 minuto variações de 5 PSI (ou 34,47 kPa), variando de 0 PSI a 25 PSI (172,27 kPa). O ar é armazenado em um tanque de 2 litros, sendo que todos os elementos são interligados através de dutos de ar. A variação da pressão ocorre no diafragma. A fibra óptica localizada dentro do tubo de PTFE é conectada diretamente ao Interrogador, acoplado a um computador para análise e armazenamento de dados, salvando dados a cada 500 ms. Foi adicionado uma cola de conexões de tubulações na face do diafragma para evitar pequenos vazamentos entre os filetes do processo de impressão em 3D.

Vários ciclos de compressão e descompressão foram realizados antes do início do teste principal. Após vários ciclos, o diafragma apresentou um leve relaxamento. O teste definitivo foi realizado somente após esse relaxamento atingir um limite. Apenas um teste com cada espessura foi realizado para obter os dados presentes neste trabalho. Testes exaustivos foram realizados com o mesmo objetivo.

Uma média foi calculada para cada 120 amostras na análise do sistema com o objetivo de se obter um valor médio do comprimento de onda de Bragg para cada etapa da pressão aplicada. O desempenho do sensor FBG é avaliado em termos de desvio do comprimento de onda de pico da FBG com a variação de pressão. Um comportamento linear é desejável nesta análise. Além disso, um gráfico com esses valores foi plotado para verificar a linearidade do sistema.

3.2 Diafragma Vulcanizado

A técnica de vulcanização de diafragmas de borracha nitrílica, se baseando nos estudos de [10, 27, 42, 48, 50] e abordado nas Seções 2.4.2, 2.4.3 e 2.4.4, indicado para ambientes agressivos, como o ambiente industrial em geral.

3.2.1 Construção do Sensor

A borracha nitrílica, como especificado na Seção 2.5, possui a característica de se fundir quando é aquecida e prensada contra outro pedaço também de borracha nitrílica. Isso possibilita a vulcanização entre dois diafragmas desse material através de um equipamento que adicione essas duas condições. Conforme estudo apresentado em [54, 55], os sensores em FBG funcionam quando a FBG é apenas posicionada entre esses dois diafragmas sem

realizar a colagem ou vulcanização desses materiais. Só que essa metodologia possui a desvantagem de não apresentar repetibilidade na reprodução do sistema. Manter a FBG posicionada perfeitamente, é um desafio em qualquer caso ou técnica. Outro problema que pode ocorrer também, caso a FBG não esteja colada ou bem colada ao diafragma, é que o diafragma pode sofrer deformação e não passar toda essa deformação para a FBG, responsável pelo monitoramento preciso da deformação.

O processo de vulcanização proposto e que será descrito a seguir, torna possível a criação de um método com repetibilidade e maior confiança. Foram diversos desafios a serem vencidos para alcançar a metodologia que tornasse possível a utilização desses diafragmas nos testes. As variáveis força, temperatura e tempo tiveram que ser testadas e modificadas de acordo com os resultados obtidos na produção do diafragma com a FBG inserida. Todo o sistema descrito, a seguir, foi desenvolvido em parceria com a empresa 2Solve.

Na Fig. 20 observa-se a prensa utilizada para execução da vulcanização, com força máxima de 15 toneladas. A prensa, fabricada pela empresa Bovenau, é responsável por variar a força de contato aplicada entre os dois diafragmas. A mesma possui um atuador hidráulico manual responsável por impor a força ao sistema.



Figura 20 – Foto da prensa utilizada para montagem do sistema de vulcanização.

Outro elemento importante do sistema é a matriz de aquecimento. Na Fig. 21 observa-se o projeto da matriz aberto de um lado (a) e a matriz pronta do outro (b). No espaço circular na peça circular que fica evidente no projeto, é posicionado um resistor de 121 ohms conectado aos eletrodos para aquecimento. Nessa matriz existe um orifício

usinado na lateral da peça circular para encaixe do medidor de temperatura. Com isso é possível fazer uma malha fechada de controle de temperatura através do controlador da Fig. 22. Para retardar a oxidação do equipamento, foi adicionada uma placa de PTFE (4 cm x 4 cm) na face de contato do pistão da prensa com a matriz de aquecimento. Outra placa de PTFE (20 cm x 20 cm) foi adicionada na parte inferior, impedindo a troca de calor da matriz de aquecimento com a base da prensa. O sistema é formado por duas matrizes iguais, como é possível verificar na Fig. 21(b), uma superior e a outra inferior.

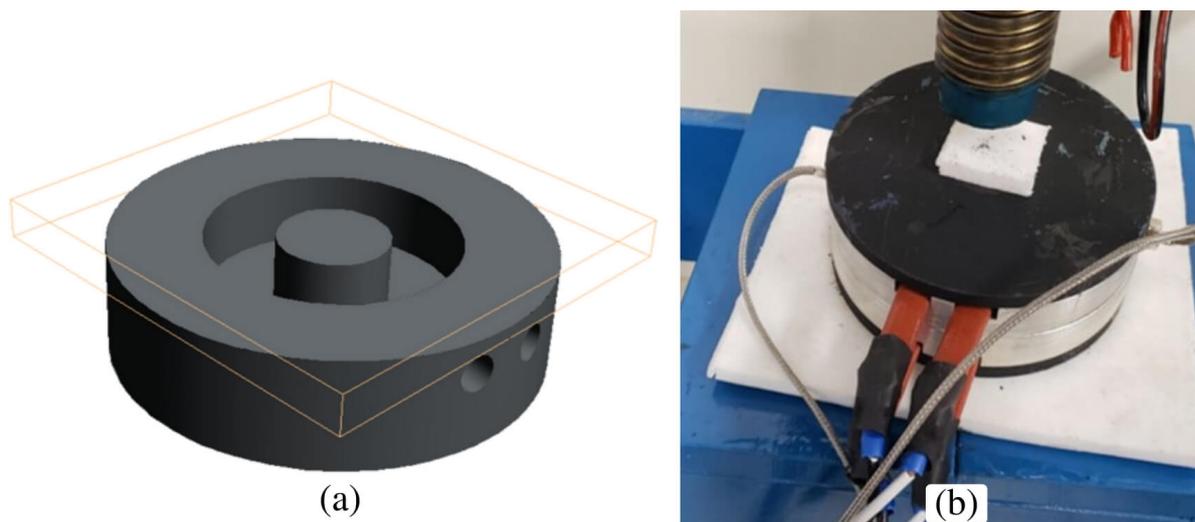


Figura 21 – Matriz de aquecimento utilizada para montagem do sistema de vulcanização. Imagem 3D do projeto da matriz para produção (a) e a matriz em funcionamento (b).

Como já mencionado sobre a temperatura, na Fig. 22 identifica-se o sistema de controle de temperatura. Nesses controladores (Rex-C 100, do fabricante CKCTinner) é possível escolher a temperatura do sistema. Os 2 controladores foram acondicionados na caixa contendo adicionalmente 2 relés, sendo um conjunto (relé + controlador) para cada matriz. A caixa utilizada possui como função isolar a parte elétrica do ambiente, impossibilitando a entrada de sujeira e água. Na Fig. 22 nota-se esses dispositivos ampliados para visualização de maiores detalhes.

Durante os testes foi constatado um grande problema que teve que ser resolvido. O processo de vulcanização liberava gases tóxicos, contaminando toda a sala. De acordo com a composição da borracha nitrílica, é muito provável que a maior parte desses gases tóxicos seja enxofre. Com isso foi desenvolvido um sistema de exaustão para não deixar esses gases poluírem a sala. Como são poucos gases, não é problema encaminhar esse material para o ambiente externo. Esse sistema de exaustão é composto de um cooler de computador (12 cm x 12 cm) e canos de policloreto de vinila (PVC - *Polyvinyl Chloride*). Na Fig. 23 é possível observar o sistema de exaustão já instalado. Após a instalação do sistema foi possível realizar todos os testes sem risco.



Figura 22 – Controlador de temperatura e relê utilizados para montagem do sistema de vulcanização.

A metodologia completa para produção dos diafragmas será descrita na Seção 3.2.3.1, a seguir.

3.2.2 Montagem Experimental

A montagem desenvolvida para a medição de interface utilizando o diafragma vulcanizado é um pouco mais complexa que a usada na medição de interface com o diafragma impresso em impressora 3D. Esta montagem também contou com a cooperação da empresa 2Solve e do Núcleo de Estudos em Escoamento e Medição de Óleo e Gás (NEMOG), laboratório parceiro. Mas depois de montado, o processo de testes é simples. Os testes nessa fase do trabalho são realizados em um tanque projetado pela empresa 2Solve. A parceria com a 2Solve foi realizada através de um trabalho de cooperação mútua, onde as duas partes obtiveram um alto ganho de aprendizado e produtividade. O tanque de testes é mostrado no esquema na Fig. 24.

Para acomodar a estrutura do sensor de FBG inserido no diafragma, foi desenvolvido um duto retangular em aço galvanizado terminado em flange circular contendo 6 furos equidistantes com locais adequados para a instalação do conjunto diafragma contendo



Figura 23 – Sistema de exaustão dos gases tóxicos provenientes do processo de vulcanização.



Figura 24 – Esquema com as medidas do tanque de testes do projetado para medições de nível de interface. Alguns pontos principais do tanque foram destacados.

a FBG. Esses locais são compostos por dois anéis com a mesma dimensão (diâmetro = 63 mm) e formato dos diafragmas. Abaixo dessa estrutura metálica foi adicionado um diafragma de borracha nitrílica para garantir a vedação da parte inferior do diafragma, assegurando o diferencial de pressão a ser medido no sensor. Os locais para fixação dos diafragmas estão espaçados em 26 cm entre eles. As dimensões da estrutura de fixação dos diafragmas podem ser conferidas na Fig. 25.

A instalação dessa haste no tanque foi um processo que demandou o trabalho em equipe com auxílio de uma ponte rolante. Os diafragmas com os sensores foram montados previamente, antes da haste ser encaixada no tanque. Devido a isso um processo robusto de locomoção da haste teve que ser realizado com muito cuidado, para não quebrar a fibra contendo as FBG.

No projeto da estrutura da haste original, o sistema suportaria uma face com 7 diafragmas, espaçados 26 cm de distância de centro a centro e outra face com 6 diafragmas, espaçados de 26 em 26 cm. Essas duas faces estão deslocadas uma da outra em 13 cm. Com isso, é como se a haste tivesse uma face com 13 sensores espaçados 13 centímetros de centro a centro, aumentando significativamente a resolução do sensor de interface.

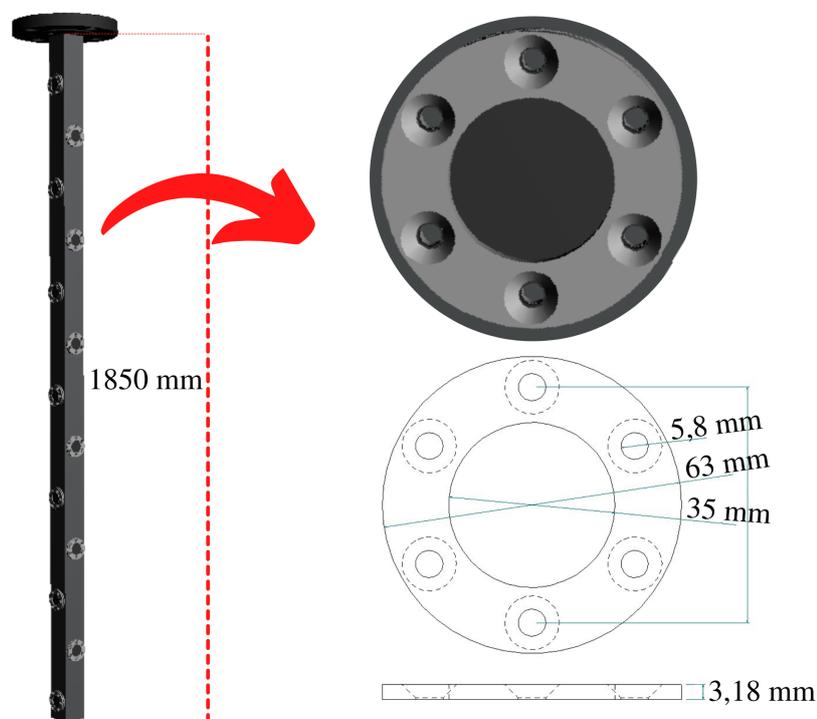


Figura 25 – Estrutura para fixação dos diafragmas para medição de nível.

Na Fig. 26 observa-se as etapas para montagem do sensor no tanque. A haste com os sensores foi montada apenas com os 4 diafragmas contendo FBG obtidos pelo processo de vulcanização disponíveis. Deve-se evidenciar que para medição de nível de interface existe a necessidade de 2 ou mais diafragmas no sistema. Não é possível medir nível de interface em um sistema multifásico com apenas 1 diafragma. Os 4 diafragmas foram produzidos no processo de vulcanização com a FBG, conforme apresentado na Seção 3.2.1. Ao lado de cada diafragma contendo a FBG, foi posicionado também as FBG em outras fibras acopladas ao longo da haste para medição de temperatura e compensação da variação de temperatura do sistema. Como a FBG é sensível tanto à deformação quanto à

temperatura, conforme apresentado na Eq. 2, é necessária uma técnica para desacoplar os efeitos da temperatura sobre a medição de interface. Após a haste montada com os sensores, conforme ilustrado na Fig. 26(b), o tanque foi virado para então realizar o acoplamento da estrutura ao tanque. Após isso, o tanque já com a haste contendo os sensores foi içado e posicionado no local correto de testes (Fig. 26(c)). A montagem em escala experimental só foi possível ser realizada devido a parceria com a 2Solve e o Laboratório NEMOG. A parceria foi fundamental para o avanço da pesquisa.

Além disso foram conectados ao tanque tubulações para realizar o enchimento e esvaziamento dos fluidos do tanque. Essa estrutura possui duas bombas para mover os fluidos de acordo com a necessidade do momento. Um conjunto de válvulas e tubulações foram projetadas para dar liberdade ao manuseio dos fluidos para o tanque. Com a estrutura montada no tanque, foi adicionada uma mesa para posicionamento dos computadores e interrogador para realizar a medição e aquisição dos dados.



Figura 26 – (a) tanque sendo içado pelo guindaste para a colocação da haste contendo sensores; (b) tanque é inclinado para que haste contendo sensores seja inserido; (c) tanque posicionado após inserir haste contendo sensores.

Na Fig. 27 observa-se a estação de trabalho completamente montada e pronta para a utilização. Essa estação de trabalho possui um computador, conectado ao interrogador, onde são conectadas as FBG. Além disso existe também toda a estrutura do tanque com as fibras. O princípio de operação pode ser encontrado em [48] e 2.2. A aquisição de sinal de todas as FBG é realizada através de um interrogador comercial Modelo SM125 do fabricante *Micron Optics*, com resolução de 1 pm e taxa de aquisição de aquisição de 2 Hz.

O interrogador permite levantar a curva característica da FBG, onde o ponto central ou valor de pico corresponde ao comprimento de onda de Bragg.

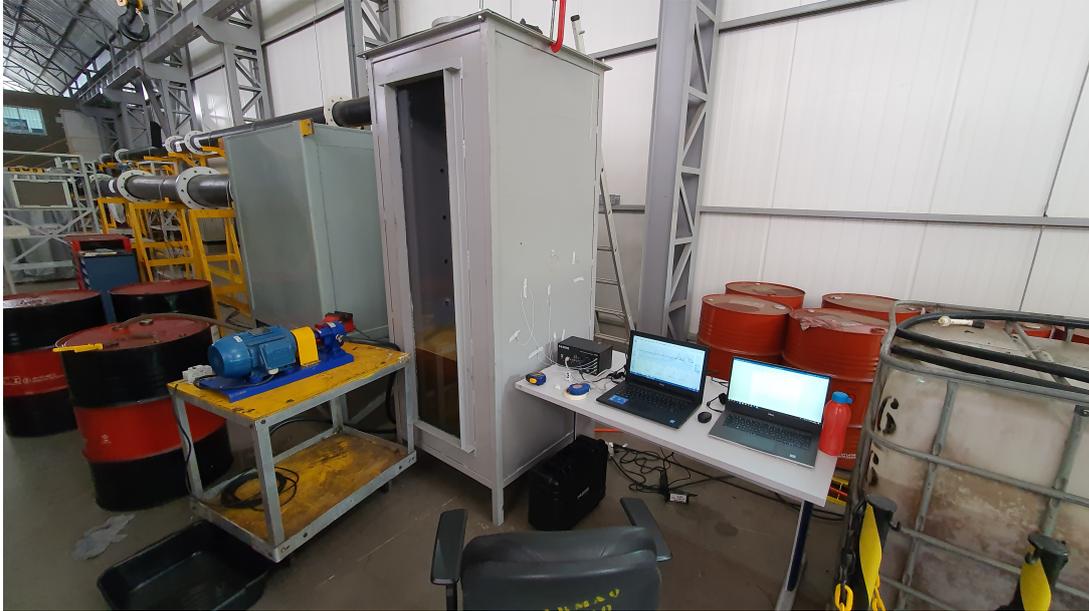


Figura 27 – Estação de trabalho preparada para os testes com os sensores.

3.2.3 Metodologia

3.2.3.1 Produção do Diafragma Vulcanizado

Esse processo envolve variáveis diferentes que precisam de ajuste comparado ao anterior. Para a produção desse sensor, como já mencionado nos capítulos anteriores, são utilizados equipamentos específicos adaptados para a vulcanização. O grande desafio nessa parte do trabalho foi definir a metodologia de produção dos diafragmas definitivos para os testes no tanque. Para encontrar essa metodologia aperfeiçoada, inúmeros testes foram realizados anteriormente sem a adição da FBG, pois existiria o risco de inúmeras FBG serem quebradas. Optou-se por preservar as FBG nesta etapa.

Na metodologia de produção de diafragmas vulcanizados com a FBG inserida entre dois diafragmas circulares, ao menos, três variáveis que devem ser consideradas e analisadas com o objetivo de definir o processo de vulcanização mais adequado. Essas variáveis são: força aplicada da prensa, temperatura das faces da matriz de contato e o tempo de prensagem. A força aplicada é regulada manualmente através da prensa utilizada no sistema, enquanto a temperatura é definida no controlador antes do teste iniciar. Já o tempo é marcado quando o sistema atinge a temperatura selecionada.

Antes de iniciar o processo, deve-se posicionar os dois diafragmas. Primeiro o diafragma de baixo é posicionado em seu local específico na matriz inferior. Após isso, a FBG é posicionada e centralizada no meio do diafragma de forma que a fibra fique bem

esticada. Posteriormente o outro diafragma deve ser posicionado sobre a fibra. Com os diafragmas posicionados em conjunto com a fibra que possui a FBG, posiciona-se a matriz superior sobre eles. Com isso o arranjo estará pronto para o processo de produção ser iniciado.

Como nesse processo não foi encontrado nenhuma referência para se basear, definiu-se a metodologia a partir de uma sequência de testes. Foram traçados valores iniciais para as variáveis de teste, dadas por espessura, temperatura, força aplicada na prensa e tempo de prensagem, para uma primeira análise no sistema. As variáveis de teste foram alteradas e combinadas em diferentes sequencias, de modo a avaliar quais valores seriam os mais adequados para a produção dos diafragmas vulcanizados. Os testes realizados estão resumidos no Apêndice A. Posteriormente, na Seção (4.2.1) de resultados, serão mencionados alguns diafragmas produzidos nos testes.

Com esses testes realizados e analisados, foi definido uma metodologia padrão e consequentemente a metodologia definitiva de produção dos diafragmas que foram utilizados nos testes no tanque para medição de interface. Na Tabela 1 observa-se um resumo com as grandezas consideradas para produção dos diafragmas.

Tabela 1 – Metodologia para produção do sensor com Diafragma em Borracha Nitrílica Vulcanizada .

| Espessura (mm) | Temperatura (°C) | Força (ton) | Tempo (min) |
|----------------|------------------|-------------|-------------|
| 0,2 | 170 | 0,2 | 3,5 |
| 0,4 | 175 | 0,2 | 3,5 |
| 0,6 | 180 | 0,2 | 3,5 |
| 0,8 | 185 | 0,2 | 3,5 |
| 1,0 | 190 | 0,2 | 3,5 |
| 1,2 | 195 | 0,2 | 3,5 |
| 1,4 | 200 | 0,2 | 3,5 |
| 1,6 | 205 | 0,2 | 3,5 |

Caso haja a necessidade de espessuras maiores dos diafragmas, pode-se aumentar a temperatura na proporção linear até 220 °C. Acima disso a temperatura deforma demais a borracha e o diafragma. Então, para espessuras maiores, aumentar a variável tempo é uma opção interessante. A força aplicada é a variável que menos influencia na produção dos diafragmas vulcanizados.

Através desta análise, a metodologia para produção dos diafragmas utilizados nos testes foi definida pelas variáveis consideradas no Teste 15 e no Teste 16 (Tabela 2). Utilizou-se os dois sensores já produzidos (Teste 7 e Teste 8) e foram produzidos 2 sensores para os testes: 0,2 mm (15) e 0,6 (16). Esses sensores foram escolhidos porque foram os que apresentaram o melhor resultado na produção. Os diafragmas ficaram uniformes e com uma fixação considerada satisfatória. Com os sensores conectorizados ao interrogador,

foi possível observar que os diafragmas estavam com uma boa resposta quando foi imposta pressão sobre eles.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros utilizados nos Teste 15 e Teste 16, sendo que os testes foram iniciados com a força já aplicada.

| Testes | Espessura (mm) | Temperatura (°C) | Força (ton) | Tempo (min) |
|--------|----------------|------------------|-------------|-------------|
| 15 | 0,2 | 170 | 0,2 | 2,5 |
| 16 | 0,6 | 180 | 0,2 | 3,5 |

Resumindo, o passo a passo para produção é: aplicar força, aumentar temperatura, esperar estabilizar, deixar o tempo de acordo com a Tabela 1 na temperatura estabilizada, diminuir a temperatura até 120 graus e retirar a pressão. Ao completar essas etapas, o sensor em FBG com Diafragma com Borracha Nitrílica está finalizado.

3.2.3.2 Medição de Interface com Diafragma Vulcanizado

A partir do ponto em que os diafragmas estão prontos e funcionais, a caracterização desses sensores é necessária para realizar a compensação de temperatura nas medições. A caracterização consistiu em posicionar a FBG em uma câmara térmica com água contendo um termostato de imersão (LAUDA ECO Silver). A cada valor de temperatura ajustado, o sinal refletido pela FBG foi medido com o interrogador (Micron Optics SM125), o mesmo utilizado nos testes. Esse é um procedimento importante para obter o comportamento da FBG sob diferentes temperaturas. Neste teste, foi escolhida a água como material para imersão das FBG em uma faixa de temperatura entre 20 a 50 °C, com incrementos de 5 °C. A curva de resposta da FBG foi levantada em função da temperatura, e foi realizado o ajuste utilizando o método de regressão linear (com $R^2 = 0,9999$), como mostra a Fig. 28. Toda a regressão linear realizada neste trabalho empregou o método dos mínimos quadrados, conforme rotina de cálculo utilizada em [56].

Como o resultado da regressão linear é uma reta, pode-se caracterizar a resposta da FBG em função da temperatura, através de uma equação de primeiro grau. Todas as FBG utilizadas no projeto são caracterizadas e possuem a sua equação característica.

Foram utilizados 4 diafragmas de borracha nitrílica nesse teste, denominados Diafragma 1, 2, 3 e 4, com as espessuras de 1,4, 1,0, 0,6 e 0,2 mm, respectivamente. Além dessas FBG inseridas nos diafragmas, como descrito anteriormente, existem ainda os sensores FBG de temperatura denominados como Sensor de temperatura 1, 2, 3 e 4. Os diafragmas e sensores de temperatura foram posicionados conforme descrição das Tabelas 3 e 4, respectivamente, sendo listados as características posição, canal do interrogador e comprimento de onda de Bragg. Seguindo a referência 0 definida na Fig. 29, os diafragmas foram posicionados nos níveis 0, 26, 52 e 75 cm. Os sensores de temperatura foram posicionados nas posições 0, 33, 52 e 75 cm em relação a referência.

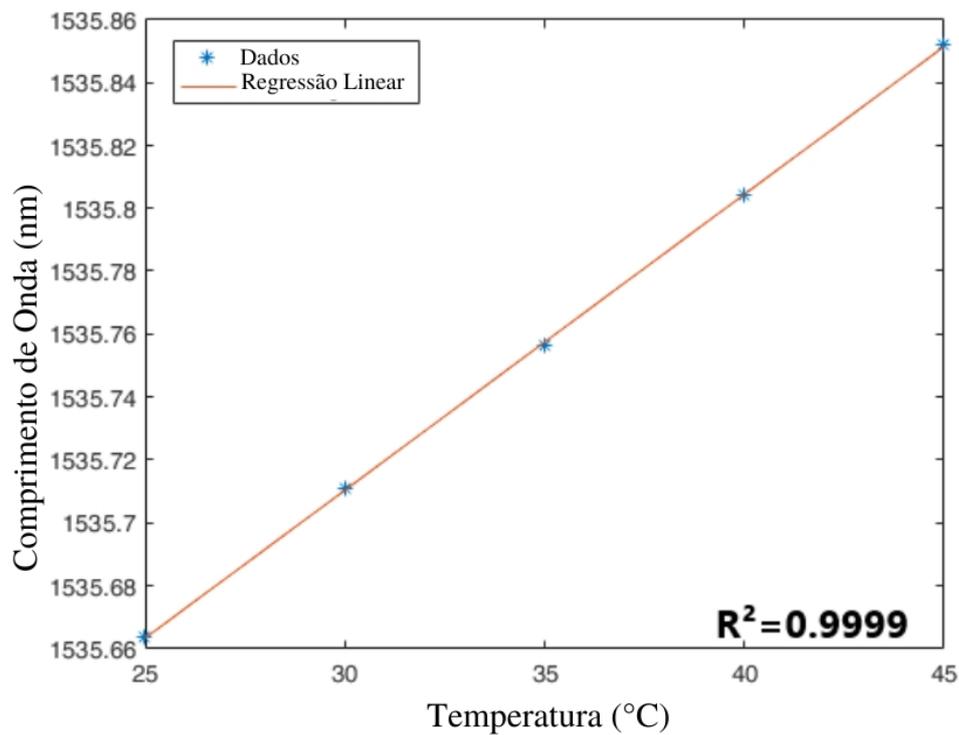


Figura 28 – Caracterização de temperatura da FBG.
[56]

Tabela 3 – Descrição do posicionamento e especificações dos Sensores baseados em Diafragmas .

| Diafragma | Espessura (mm) | Posição (cm) | Canal | Comprimento de onda de Bragg (nm) |
|-----------|----------------|--------------|-------|-----------------------------------|
| 1 | 1,4 | 0 | 4 | 1574,2 |
| 2 | 1,0 | 26 | 4 | 1568,7 |
| 3 | 0,6 | 52 | 3 | 1569,2 |
| 4 | 0,2 | 75 | 3 | 1579,9 |

Tabela 4 – Descrição do posicionamento e especificações dos Sensores de Temperatura .

| Sensor de Temperatura | Posição (cm) | Canal | Comprimento de onda de Bragg (nm) |
|-----------------------|--------------|-------|-----------------------------------|
| 1 | 0 | 1 | 1547 |
| 2 | 33 | 2 | 1547 |
| 3 | 52 | 2 | 1538 |
| 4 | 75 | 2 | 1535 |

Na Fig. 29 observa-se a régua graduada utilizada como referência para as medidas de nível de interface. O nível de referência zero está marcada por uma régua, utilizada para definir o nível de interface entre os fluidos.

Antes dos testes serem iniciados, foi adicionado água no tanque até alcançar a marcação zero da régua. Em seguida, o óleo foi injetado por uma bomba em intervalos de



Figura 29 – Nível de referência que corresponde a zero centímetros dos testes no tanque contendo água e óleo.

13 em 13 centímetros, sendo que nessas marcações o sistema ficou sem qualquer inserção de água ou óleo por 5 minutos. Durante esse tempo, os dados continuaram sendo salvos. Com isso, nas análises foi possível obter um valor médio dos dados obtidos nesse período de 5 minutos, eliminando interferências ou minimizando oscilações do sistema. Posteriormente o óleo foi inserido até a altura máxima de 78 cm. Como formou-se emulsão devido ao ar que a bomba inseriu no sistema e também à água que estava no fundo, foi decidido deixar o sistema sem qualquer intervenção ou manobra durante dois dias para reduzir drasticamente a emulsão. Após esse prazo, a interface água-óleo formada foi elevada de 13 em 13 centímetros até atingir a marca de 78 cm. O processo inverso também foi realizado.

4 Resultados e Discussões

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no trabalho. As discussões serão realizadas também analisando todos os detalhes de cada resultado. Foram obtidos dados que podem evoluir para aplicações práticas e ao mesmo tempo alguns pontos precisam ser destacados a fim de evoluir a pesquisa em trabalhos futuros.

4.1 Diafragma Impresso na Impressora 3D

4.1.1 Produção dos Diafragmas Impressos

O diafragma produzido é funcional para a finalidade no qual foi desenvolvido. O sistema possui como finalidade realizar a medição de pressão de sistemas. Os testes se provaram perfeitamente funcionais, como será possível observar na Seção 4.1.2. Na Fig. 30 observa-se que os diafragmas produzidos na impressora 3D possuem pequenos furos, isso foi motivo de um problema que será comentado mais abaixo. Esses furos são consequência da metodologia utilizada pelas impressora 3D na impressão. Como explicado em 2.4.1, o processo adotado por esses sistemas é a extrusão de um material plástico que é derretido e depositado sobre a superfície. Na medida que essa deposição vai acontecendo, torna-se possível a impressão de objetos em 3D.

Esses pequenos furos, como nesse teste foi utilizado ar comprimido com um sistema de pressurização, trouxeram um pequeno problema que foi resolvido com uma cola para materiais plástico. Devido a esses furos, pequenos vazamentos estavam ocorreram nos testes. Essa cola não alterou as características do sistema, tornando possível a continuação dos testes. Só que para resolver esse problema, basta que nas próximas produções de diafragmas configure a impressora de uma forma que as linhas de extrusão se tornam ainda mais finas e a velocidade de extrusão ainda menor.

Na Fig. 17 nota-se o diafragma já alinhado para ser encaixado no sistema. Na imagem também encontra-se um anel de vedação que também foi produzido na impressora 3D. Antes da utilização dessa anel de vedação, o ar estava vazando, impossibilitando os testes. Isso ocorreu porque a peça de metal da estrutura do sensor possui uma cavidade, como é possível observar na Fig. 17.

Mesmo com todas essas medidas, pequenos vazamentos ocorreram nos testes definitivos. Esses vazamentos não foram significativos a ponto de invalidar os testes. Na próxima subseção encontra-se todos os resultados dos testes com este diafragma.

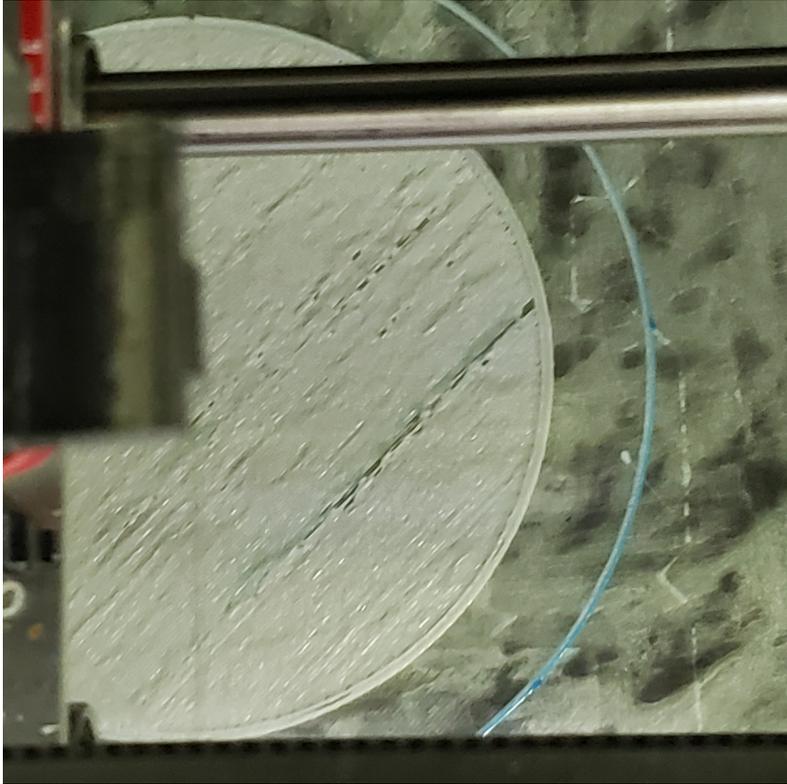


Figura 30 – Detalhes do diafragma em produção na impressora 3D. Na imagem é possível observar os poros devido a metodologia de impressão do aparelho.

4.1.2 Medição de Pressão com Diafragmas Poliméricos Impressos em Impressora 3D

Foram realizados dois testes, o primeiro com o diafragma de espessura de 1,2 mm e o último com diafragma de 2 mm espessura. Os valores médios para cada etapa imposta ao sistema é observado na Tabela 5. A cada passo, o valor médio da variação foi aproximadamente o mesmo em cada diafragma, sugerindo que este sistema é linear. Os testes foram realizada a uma temperatura ambiente de aproximadamente 24 °C.

Tabela 5 – Média dos dados no intervalo definido (Resultados) .

| Intervalos | Pressão (kPa) | 1,2 mm | 2,0 mm |
|------------|---------------|---------|---------|
| 1 | 0 | 1575,07 | 1574,65 |
| 2 | 34,47 | 1575,47 | 1574,71 |
| 3 | 68,95 | 1575,75 | 1574,88 |
| 4 | 103,42 | 1575,93 | 1575,06 |
| 5 | 137,89 | 1576,09 | 1575,31 |
| 6 | 172,37 | 1576,36 | 1575,54 |

A Fig. 31 mostra o deslocamento do comprimento de onda do pico característico da FBG em função da pressão aplicada na fibra sensor. O comportamento observado nos dois diafragmas, isto é, 1,2 mm e 2,0 mm, é aproximadamente linear, com coeficiente de

determinação (R^2) de 0,975 e 0,972, respectivamente. Segundo R^2 , o primeiro diafragma com 1,2 mm, apresenta maior linearidade de que o de 2,0 mm.

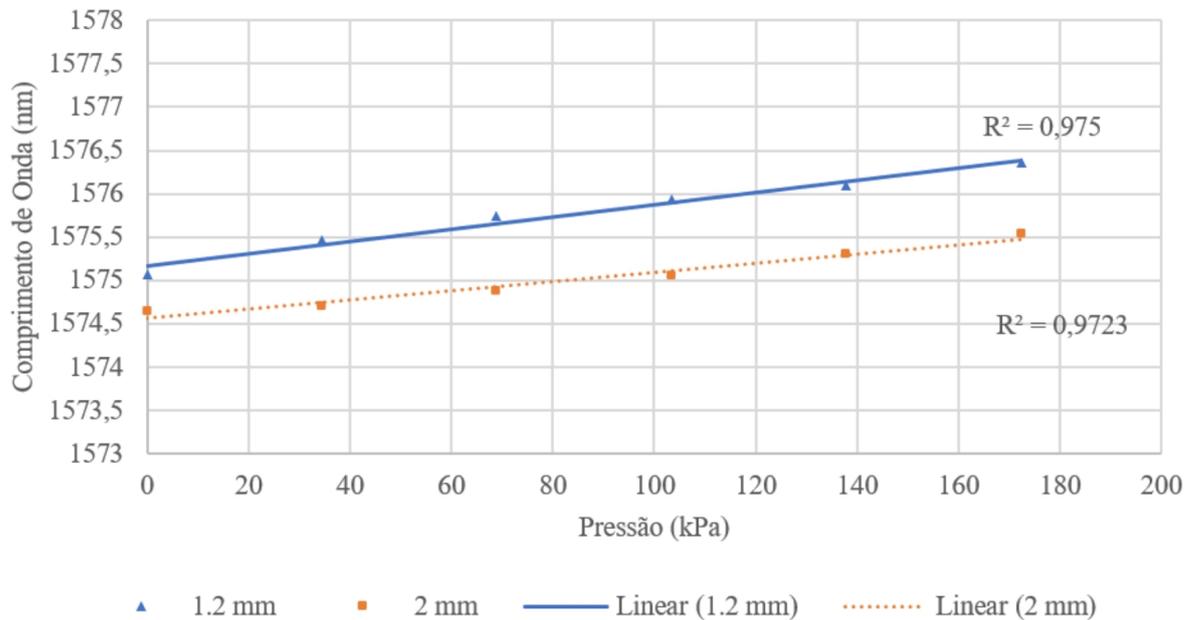


Figura 31 – O deslocamento do comprimento de onda do pico característico da FBG em função da pressão aplicada no sensor de fibra.

A análise do deslocamento máximo do comprimento de onda para os diferentes diafragmas mostrou maior variação para menor espessura. Significa que o diafragma de 1,2 mm apresentou desvio de comprimento de onda de 1,29 nm, enquanto o diafragma de 2,0 mm teve uma variação de 0,89 nm. A pressão variou de 0 Pa para 172,4 kPa durante o teste, com passos de 5 PSI (34,47 kPa). Com isso constata-se que cada variação de 5 PSI (34,47 kPa) impõe uma variação do comprimento de onda diferente para cada espessura do diafragma. Conseqüentemente as sensibilidades obtidas foram de 7,5 pm / kPa e 5,2 pm / kPa para o diafragma de 1,2 mm e 2 mm, respectivamente.

O comprimento de onda inicial é diferente nos dois casos, devido às diferentes deformações causadas pela espessura dos diafragmas e pelos parafusos na configuração do sensor.

A deformação do primeiro diafragma a cada variação de pressão é maior do que o outro diafragma por causa de sua espessura. O diafragma com espessura menor tem uma deformação maior e, conseqüentemente, uma maior mudança no comprimento de onda da resposta do espectro óptico da FBG. Ao usar um diafragma com menor espessura, a sensibilidade será maior e, conseqüentemente, sua pressão de trabalho será menor, pois suporta menor pressão antes da ruptura.

Um pequeno relaxamento no material do diafragma foi observado durante os testes. Tal relaxamento ocorreu quando o sistema estava no degrau da pressão durante o intervalo

de 1 minuto, observando os dados brutos dos testes, o que deve ser observado nos próximos estudos e analisados. Isso ficou claro na variação negativa do comprimento de onda central ao longo do tempo, embora a pressão permanecesse constante.

4.2 Diafragma Vulcanizado

4.2.1 Produção dos Diafragmas Vulcanizados

A produção dos sensores com diafragmas de borracha nitrílica é um desafio. Primeiro devido a questão de que a FBG é um elemento muito sensível. Os diafragmas utilizados na produção do sensor foram confeccionados pela empresa Vedaflex, especialista na produção de diafragmas no Espírito Santo. Os primeiros produtos produzidos não foram considerados satisfatórios e funcionais. Isso ocorreu devido a carência de referências sobre esse assunto. Para a produção de um sensor que tornasse possível a medição do nível de interface, teve-se que desenvolver uma metodologia de testes e modificações nos parâmetros para alcançar o resultado esperado. Logo abaixo será possível observar os primeiros diafragmas produzidos.

Através da metodologia desenvolvida, o primeiro diafragma produzido não foi considerado funcional. Como era um diafragma mais espesso, com 2,7 mm de espessura cada um, totalizando no sistema final 5,4 mm, a baixa temperatura aplicada (180 °C) para a espessura fez com que os dois diafragmas com a fibra no meio não se fundissem. Com isso, para o próximo teste, decidiu-se aumentar a temperatura e força aplicada. Observe na Fig. 32 o resultado do teste 2.

A alta força aplicada sobre os diafragmas em conjunto com a alta temperatura deformou completamente o diafragma. O diafragma ficou inutilizável nesse teste. Mas com isso notou-se que o aumento do parâmetro força não era o correto a ser feito.

No teste 3 decidiu-se diminuir para 3 toneladas a força aplicada, mantendo a temperatura, visto que a espessura era muito parecida com teste anterior. Com isso o diafragma obtido não ficou deformado igual o anterior. Os mesmos parâmetros foram repetidos no teste 4. Observa-se através da Fig. 33 que o diafragma ficou mais uniforme em relação ao teste 2 e 3. Mas ainda percebe-se claramente que não existe a necessidade de uma força tão alta aplicada. Devido a isso, nos próximos testes utilizou-se uma força de 1,5 toneladas. Os testes 5 e 6 ainda foram realizados apenas com a fibra, com a força aplicada de 1,5 toneladas menor comparado aos anteriores, tendo como resultado um processo com o diafragma uniforme e colado. Devido a isso, o teste 7 já foi realizado com a FBG. Com esses parâmetros obteve-se sucesso na produção. Mas ainda observa-se que a metodologia pode ser melhorada.

O teste 8 foi realizado com outra FBG, que foi conectada ao interrogador com o objetivo de monitorar o processo. A resposta em frequência foi gravada em 3 etapas



Figura 32 – Detalhes do diafragma produzido através do sistema de vulcanização. Esse diafragma é oriundo do teste 2.



Figura 33 – Detalhes do diafragma produzido através do sistema de vulcanização. Esse diafragma é oriundo do teste 4.

distintas: antes de iniciar o processo, com pressão e alta temperatura e após finalizar o processo. Segue abaixo o resultado do experimento na Fig. 34.

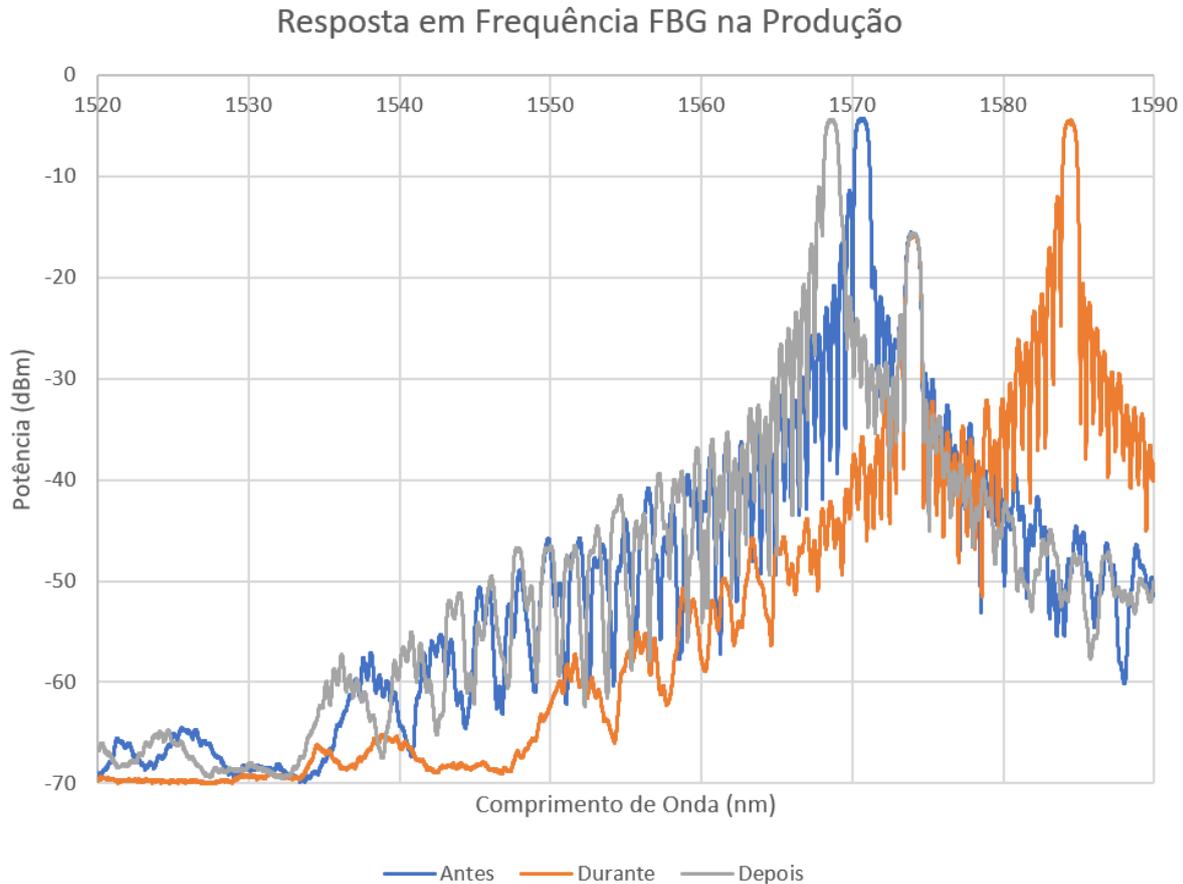


Figura 34 – Monitoramento da resposta em frequência da FBG no teste 8 da produção do sensor utilizando a técnica de vulcanização para montagem de sensor com FBG.

No gráfico da Fig. 34, em azul, encontra-se a resposta em frequência da FBG antes do processo. A frequência central desse FBG antes do processo estava localizada em aproximadamente 1570,5 nm. A curva em laranja representa a resposta quando o sistema está com a força e com a temperatura no máximo. Percebe-se com isso que a curva desloca-se para a direita aproximadamente 13 nm, o ponto central dessa FBG passa a ser em aproximadamente 1584 nm. Após a finalização do processo, sem força e na temperatura ambiente, o espectro óptico torna-se o que está representado na cor cinza da figura, com o pico central da FBG localizada em torno de 1568 nm. Com esse resultado nota-se que o processo causa uma grande deformação na FBG.

Nos testes seguintes, diafragmas mais finos foram testados. Percebeu-se que a força poderia ser menor ainda do que os parâmetros definidos até o momento, algo em torno de 1 tonelada. Dos testes 9 ao 14, foram obtidos diafragmas sem deformações e funcionais. Mas a partir desses testes, percebeu-se que o parâmetro força aplicada de 1 tonelada ainda está bem acima do necessário. Com isso, os testes 15 e 16 foram realizados praticamente

sem força aplicada, algo em torno de 0,3 toneladas, ocasionando em resultados muito satisfatórios.

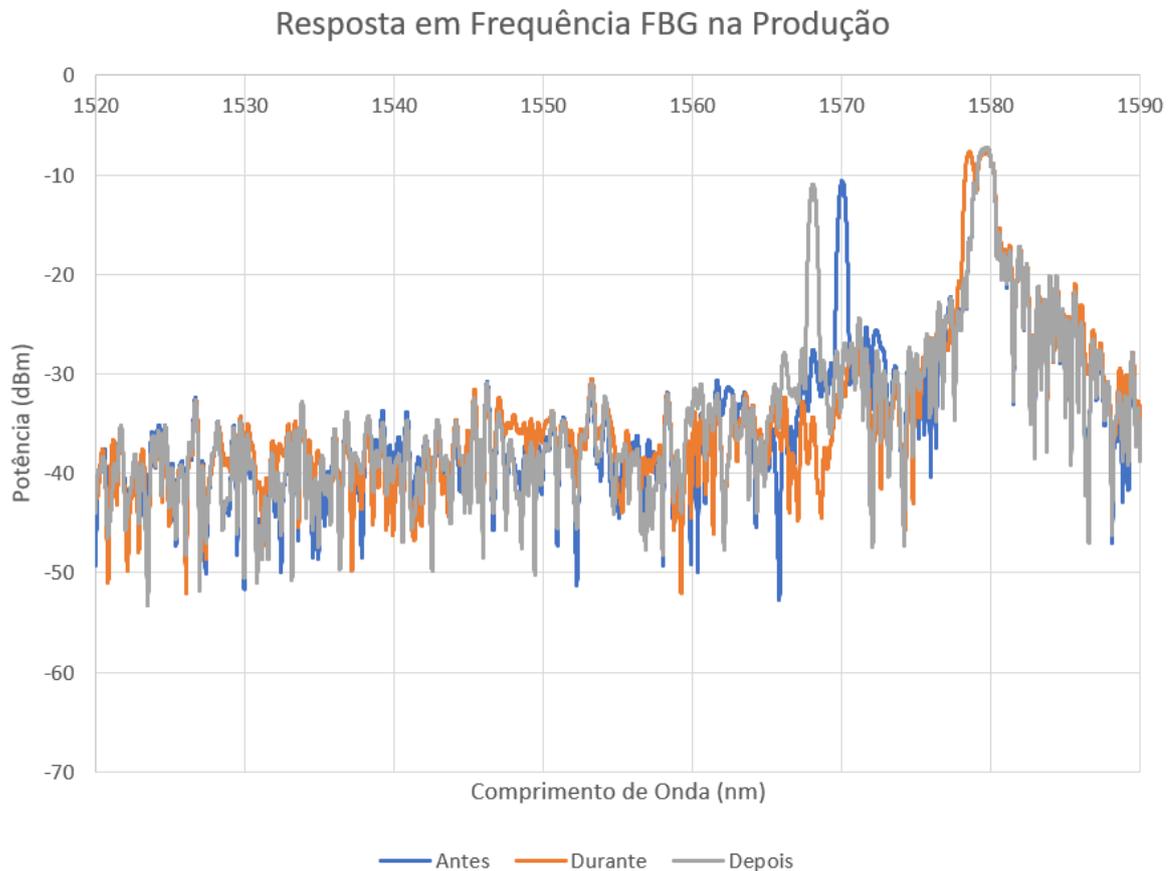


Figura 35 – Monitoramento da resposta em frequência da FBG no teste 16 da produção do sensor utilizando a técnica de vulcanização para montagem de sensor com FBG.

Na Fig. 35 nota-se a resposta em frequência das etapas do teste de produção 16. Esse diafragma foi utilizado nos testes definitivos do trabalho no tanque de água e óleo. Em azul no gráfico é identificado a curva característica da FBG antes do processo iniciar, com o pico em torno de 1570 nm. No ápice do processo, quando a força está aplicada e a temperatura máxima é alcançada, o pico da FBG desloca-se para aproximadamente 1578 nm. No final do processo, esse ponto central da FBG retorna para aproximadamente 1568 nm.

Verifica-se com esses testes que o processo de produção do sistema através da vulcanização modifica a estrutura da FBG, deslocando o seu pico. Os resultados obtidos são bem satisfatórios, tornando possível a implementação do sistema na prática. Os resultados dos testes práticos com esses sistemas se serão exibidos logo abaixo.

4.2.2 Medição de Interface Água/Óleo com Diafragmas Vulcanizados

Como já dito, foi adicionado água primeiramente até o nível zero da marcação de referência. Após isso, o óleo foi injetado até alcançar a marca de 78 cm. Essa elevação de nível foi realizada através de steps de 13 cm, com 5 minutos em cada degrau. O processo de enchimento do óleo também foi monitorado. Só que a emulsão (observe a Fig. 29 formada atrapalhou completamente a leitura dos sensores. Com os dados obtidos durante a emulsão, não foi possível monitorar o nível de interface. Por isso foi decidido aguardar 2 dias para a realização dos testes de interface, para que não exista emulsão.

A partir do ponto em que os diafragmas estão prontos e funcionais, a caracterização dessas FBGs é necessária. A caracterização consistiu em posicionar a FBG em um termostato de imersão (LAUDA ECO Silver) contendo água, variar sua temperatura e relacioná-lo com o comprimento de onda refletido da FBG, medido em um interrogador FBG (Micron Optics SM125), o mesmo utilizado nos testes até aqui. Com isso, no gráfico das Fig. 36 e Fig. 37 é possível observar o resultado da caracterização desses sensores de temperatura.

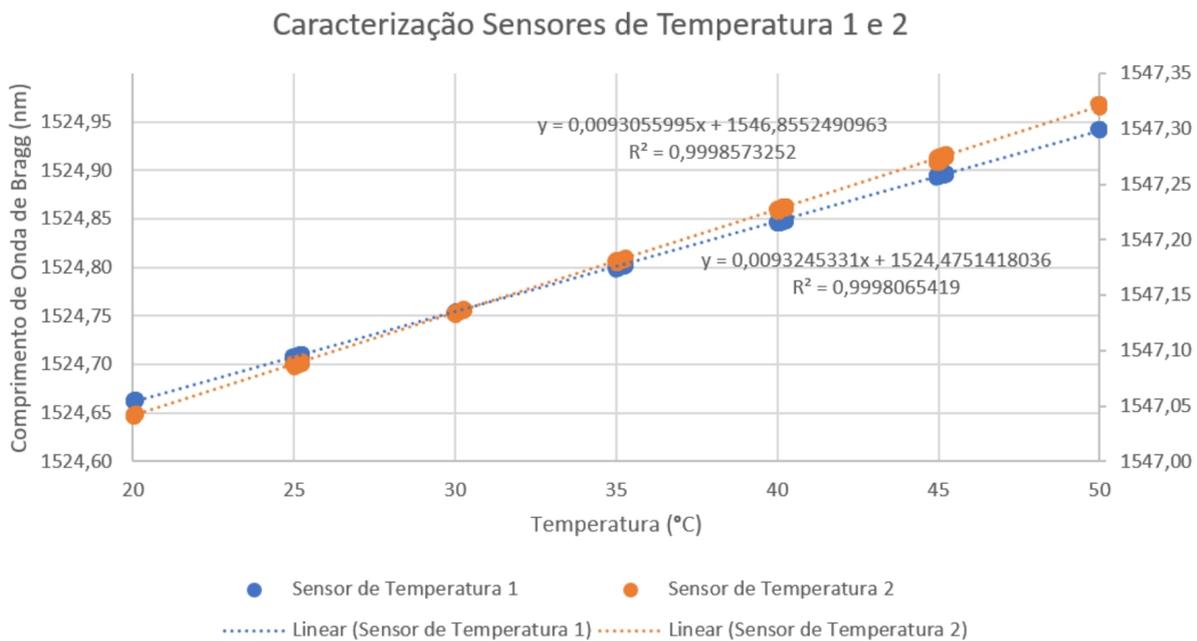


Figura 36 – Dados para caracterização das FBG dos Sensores de Temperatura 1 e 2. Observe a reta característica da resposta com a equação de caracterização.

Através dos gráficos apresentados nas Fig. 36 e Fig. 37, foi possível realizar a regressão linear e definir a equação linear originada da resposta à temperatura dessas FBGs. Para obter uma equação que seja possível inserir a variável temperatura e obter a variável comprimento de onda, basta calcular a inversa dessas equações. Com isso, o resultado da caracterização está logo abaixo.

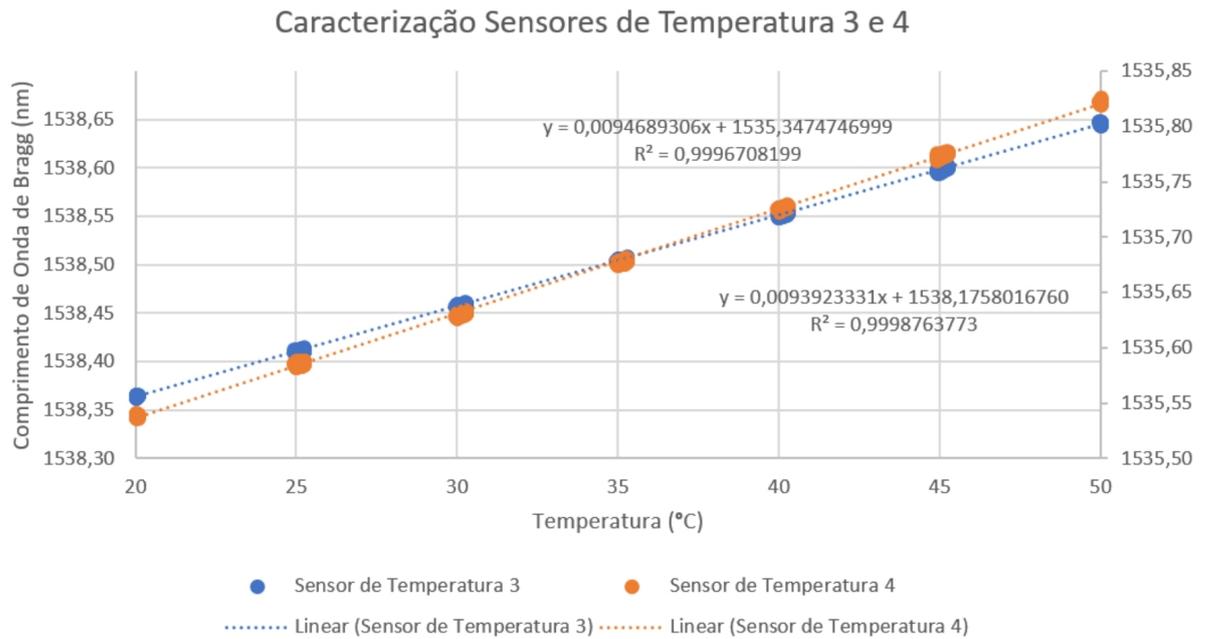


Figura 37 – Dados para caracterização das FBG dos Sensores de Temperatura 3 e 4. Observe a reta característica da resposta com a equação de caracterização.

- Sensor de temperatura 1:

$$T = 107,2439755724\lambda_B - 163490,7749 \quad (3)$$

- Sensor de temperatura 2:

$$T = 107,4621790891\lambda_B - 166228,4358 \quad (4)$$

- Sensor de temperatura 3:

$$T = 107,1543406439\lambda_B - 164822,2138 \quad (5)$$

- Sensor de temperatura 4:

$$T = 105,6085467561\lambda_B - 162145,8156 \quad (6)$$

Agora será apresentado a caracterização dos Diafragmas. A caracterização desses elementos também foi realizada no termostato de imersão (LAUDA ECO Silver). Observe nas imagens abaixo a reta característica dos sensores.

A partir disso, é possível definir as equações características dos diafragmas, com o objetivo de compensar o efeito da temperatura nas medições de interface do sistema.

- Diafragma 1 (1,4 mm):

$$\lambda_B = 0,0110130446T + 1573,9449403155 \quad (7)$$

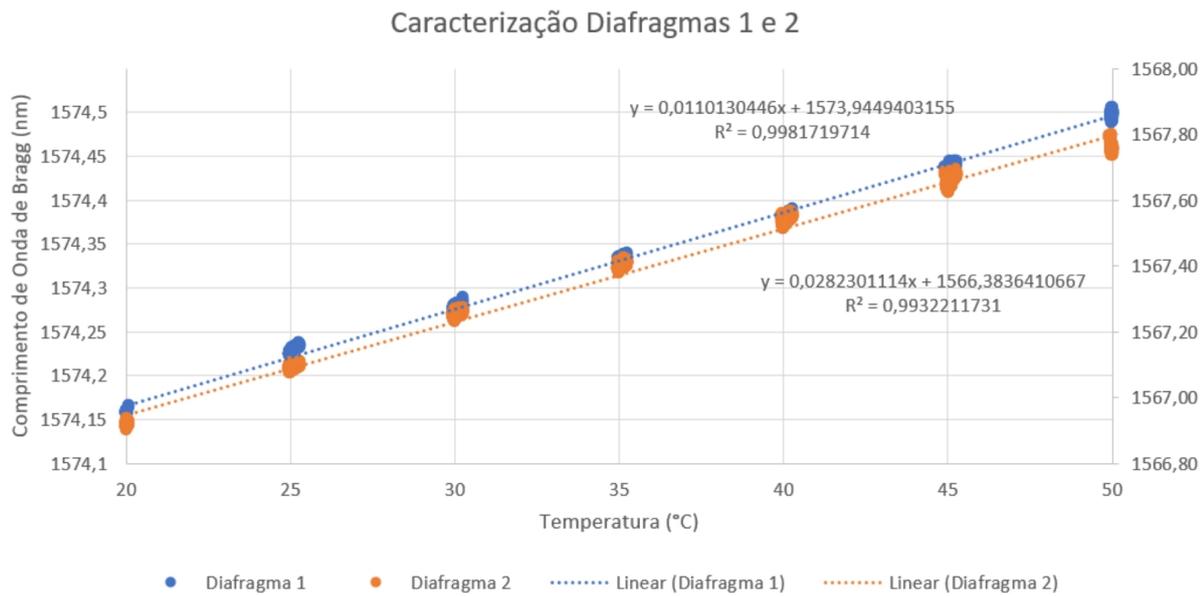


Figura 38 – Curvas de caracterização da FBG dos Diafragmas 1 e 2 em relação a influência da temperatura sobre o sensor.

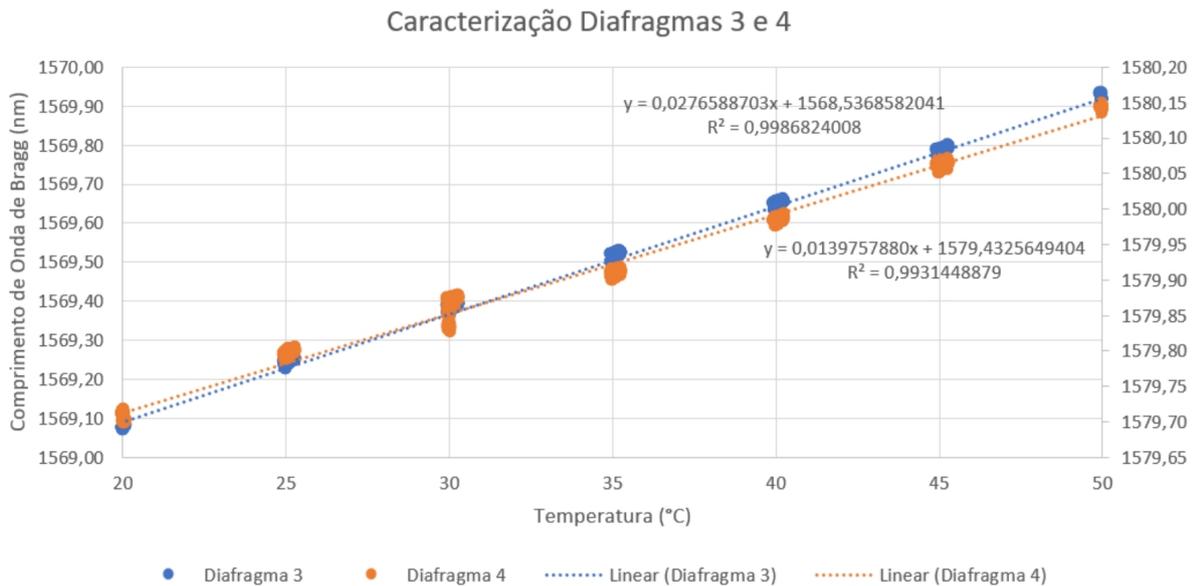


Figura 39 – Curvas de caracterização da FBG dos Diafragmas 3 e 4 em relação a influência da temperatura sobre o sensor.

- Diafragma 2 (1,0 mm):

$$\lambda_B = 0,0282301140T + 1566,3836410667 \quad (8)$$

- Diafragma 3 (0,6 mm):

$$\lambda_B = 0,0276588703T + 1568,5368582041 \quad (9)$$

- Diafragma 4 (0,2 mm):

$$\lambda_B = 0,0139757880T + 1579,4325649404 \quad (10)$$

Essas equações (7 a 10) tornam possível a realização das medições de interface entre água e óleo no tanque de testes desenvolvido. A montagem do arranjo experimental dessa etapa do trabalho apresentou vários desafios, conforme mencionado na Seção 3.2.3.2, mas os problemas foram contornados e isto não inviabilizou a realização da medida de interface.

O primeiro problema ocorrido, foi detectado no espectro observado na Fig. 40. O pico da FBG do Diafragma 1 desapareceu. Esse pico era para estar conectado ao CH4 (canal 4 do interrogador), junto com o pico do Diafragma 2. A FBG referente a esse diafragma provavelmente quebrou durante a movimentação brusca executada na montagem do sistema. Posteriormente, essa forma de montar deve ser estudada melhor para evitar este tipo de situação. Outro problema na montagem ocorreu com o sensor para monitorar a temperatura do Diafragma 1 (isto é, diafragma + FBG1). Ambos foram danificados e excluídos da análise na montagem final.

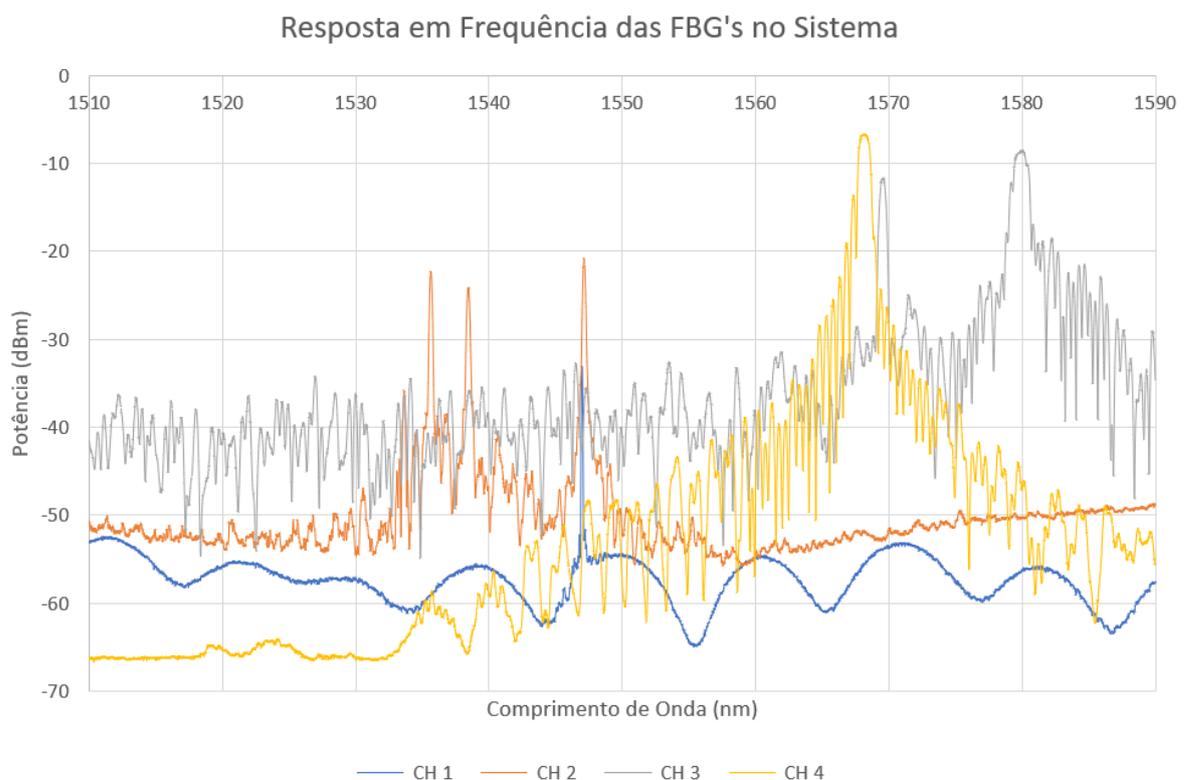


Figura 40 – Resposta obtida no interrogador após instalação dos diafragmas no tanque de testes.

Como já citado na metodologia dessa etapa, os testes tiveram início e os dados foram registrados. Foram obtidos os dados de todas as FBG interrogadas e os comprimentos

de onda de Bragg foram salvos para posterior análise. Analisando os picos centrais de cada onda na Fig. 41, observa-se que o Diafragma 2 apresenta algum problema construtivo, pois a resposta está saturando. Acredita-se que isso ocorreu devido a algum parâmetro na construção do sensor vulcanizado. Esse diafragma foi um dos primeiros construídos com FBG em diafragma pela técnica de vulcanização. Os primeiros diafragmas foram vulcanizados aplicando muita força, ocasionando um esmagamento da FBG. Mas posteriormente, com a utilização sistemática, percebeu-se que o processo não necessita de tanta força na produção.

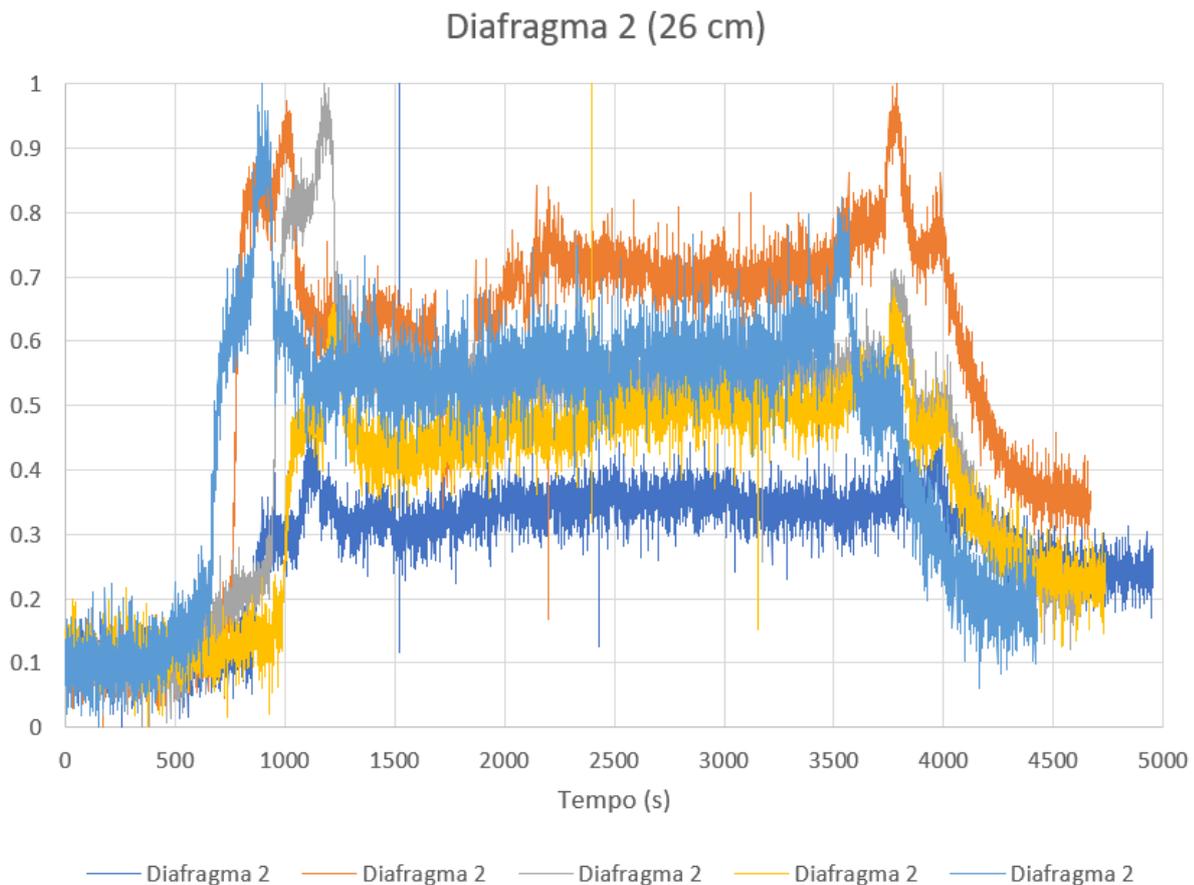


Figura 41 – Resposta do espectro óptico refletido pela FBG obtida após compensar a variação de temperatura e normalizar no Diafragma 2.

Na Fig. 42 observa-se o perfil de temperatura em quatro testes. Percebe-se em alguns pontos destas curvas o momento em que a interface alcança a altura equivalente ao diafragma. Na verdade, quando existe uma troca de material nesse sensor, no caso óleo/água, existe uma oscilação brusca no valor de da temperatura. Essas mudanças bruscas são mais evidentes nos testes 3 e 4, aproximadamente nos tempos 1200 segundos, 1800 segundos e 2500 segundos, nos Sensores de Temperatura 2, 3 e 4 respectivamente.

Ao final das medições, foram realizados 5 testes no tanque. Sendo que os dois primeiros ficaram um pouco diferentes dos 3 últimos, devido a erros nas etapas do processo

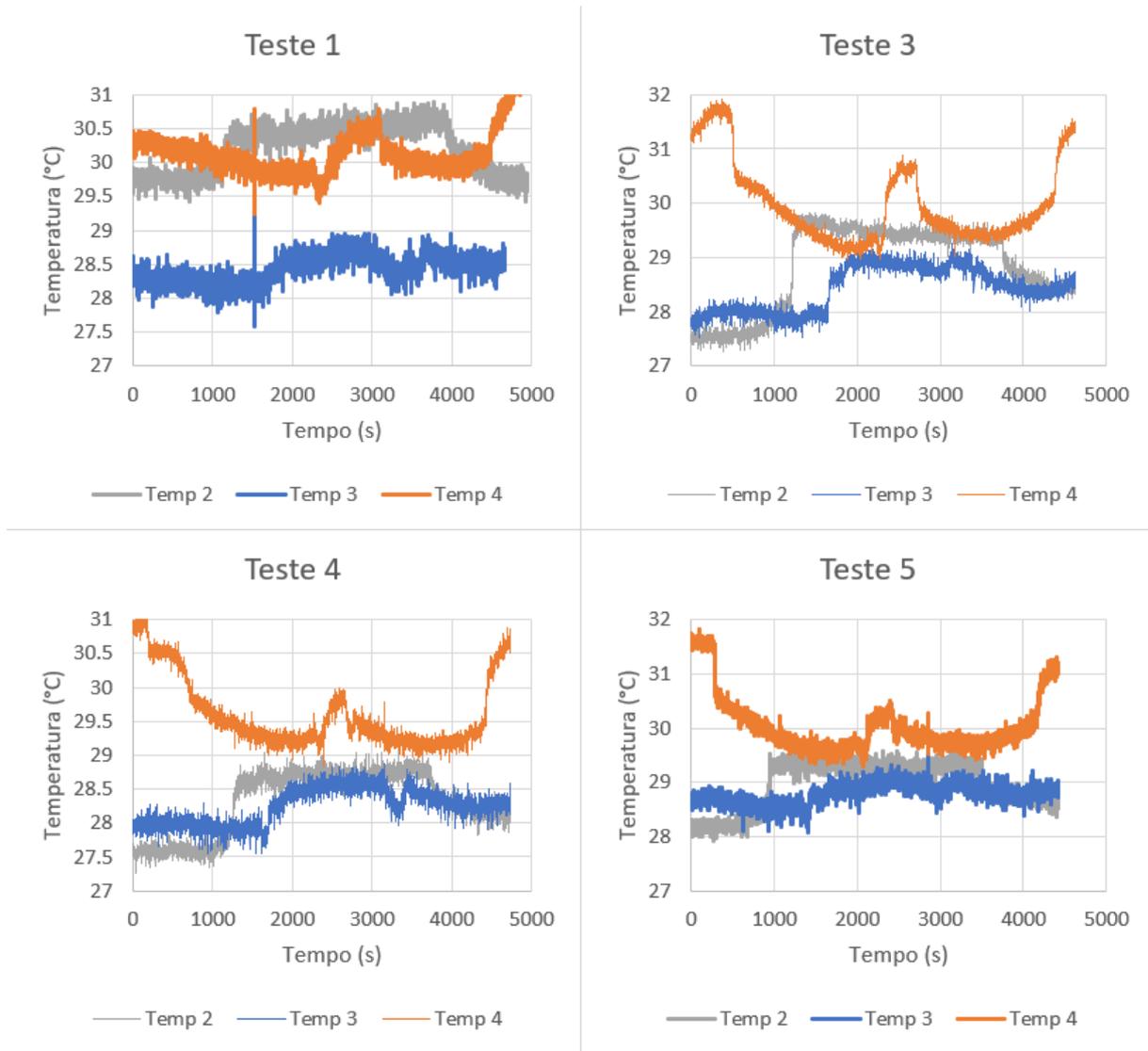


Figura 42 – Resposta do perfil de temperatura do tanque durante os testes.

de testes. Decidiu-se então ignorar os 2 primeiros. O resultado dos 3 testes para cada diafragma é observado nas Fig. 43 e Fig. 44. Esses resultados foram normalizados e já ajustados compensando a temperatura que foi medida no diafragma pela FBG adicional inserida para monitorar exatamente a temperatura e permitir realizar essa compensação. A temperatura obtida através dos sensores de temperatura foram utilizados na Eq. 11, sendo que cada diafragma possui sua equação característica, conforme Eq. 7 a 10. Na Eq. 11, como exemplo, tem-se a equação característica do Diafragma 3. Essa equação ajusta a variação causada pela temperatura no Diafragma 3.

$$\lambda_{BCorrigido} = \lambda_B - (0,0276588703T + 1568,5368582041) \quad (11)$$

Após a correção de temperatura, foi realizado um ajuste nos valores, normalizando os dados. Este ajuste facilita as comparações entre os testes e diafragmas. Nas Fig. 43 e 44 identificam-se as respostas dos Diafragmas 3 e 4 em função do tempo nos testes 3, 4

e 5, que foram escolhidos para realização da caracterização do sistema. A normalização aconteceu de acordo com a Eq. 12, utilizando os máximos e mínimos de cada série de dados.

$$X = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \quad (12)$$

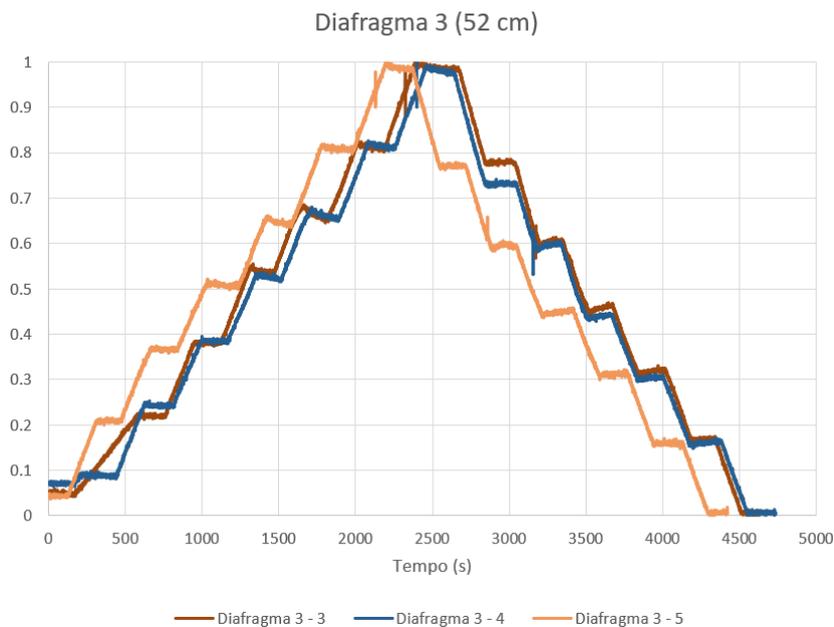


Figura 43 – Resposta dos valores de pico da curva característica da FBG corrigidos em relação a temperatura e normalizados do sensor Diafragma 3.

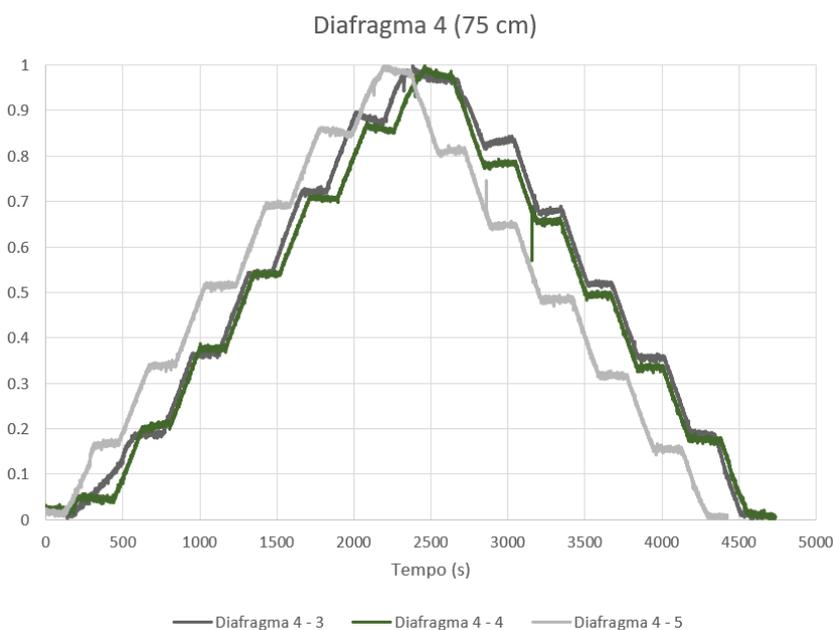


Figura 44 – Resposta dos valores de pico da curva característica da FBG corrigidos em relação a temperatura e normalizados do sensor Diafragma 4.

Como as curvas apresentam comportamento similar (Fig. 43 e 44), fica evidente a repetibilidade do sistema. Por mais que exista uma diferença entre os gráficos, o deslocamento observado no eixo vertical é razoável, pois não interfere na medição do nível de interface no tanque. Essa diferença ocorreu devido a um pequeno erro que ocorria no momento de abrir ou fechar a válvula de enchimento. E a diferença no eixo horizontal (tempo) ocorreu devido a um início de um dos testes em um momento prematuro em relação aos outros.

Nas Tab. 6 e Tab. 7 verificam-se os dados obtidos após a normalização e compensação de temperatura do sensor. Esses dados são utilizados na elaboração do sistema que irá originar a equação de cálculo de interface a partir dos valores de comprimento de onda de pico do sinal refletido pela FBG, e característico de cada FBG de cada diafragma.

Tabela 6 – Dados obtidos após a normalização e ajuste em relação a temperatura da variação do comprimento de onda de pico do sinal refletido pela FBG, e característico de cada FBG do Diafragma 3 nos testes 3, 4 e 5 .

| Nível de Interface (cm) | Teste 3 | Teste 4 | Teste 5 | Média |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 52 | 0,662474123 | 0,661340818 | 0,640083776 | 0,654632906 |
| 65 | 0,812986216 | 0,815569437 | 0,810206443 | 0,812920699 |
| 78 | 0,987170580 | 0,981780471 | 0,985753737 | 0,984901596 |

Tabela 7 – Dados obtidos após a normalização e ajuste em relação a temperatura da variação do comprimento de onda de pico do sinal refletido pela FBG, e característico de cada FBG do Diafragma 4 nos testes 3, 4 e 5.

| Nível de Interface (cm) | Teste 3 | Teste 4 | Teste 5 | Média |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 52 | 0,721965383 | 0,707017043 | 0,672306194 | 0,70042954 |
| 65 | 0,882728878 | 0,861524852 | 0,856190064 | 0,866814598 |
| 78 | 0,970146304 | 0,981283696 | 0,985744131 | 0,979058044 |

Como já mencionado, para realizar a elaboração dessa equação dos sensores que tem como resultado o nível de interface, foram utilizados apenas os diagramas 3 e 4. Percebe-se na Fig. 45, nessa região na parte superior do tanque que está marcada com um círculo vermelho e que estão localizados esses dois diafragmas, que o sensor foi mais preciso.

A partir dos diafragmas disponíveis e que se mantiveram em boas condições de operação até o final da análise experimental, pode-se afirmar que a medição de nível de interface com melhor desempenho foi obtida na região com os Diafragmas 3 e 4.

A precisão, o intervalo de medição e a resolução obtidas com os Diafragmas 3 e 4 mostram a viabilidade de medir nível de interface com FBG inseridas em diafragmas, tanto pela técnica de vulcanização como por impressão dos diafragmas em impressora 3D.

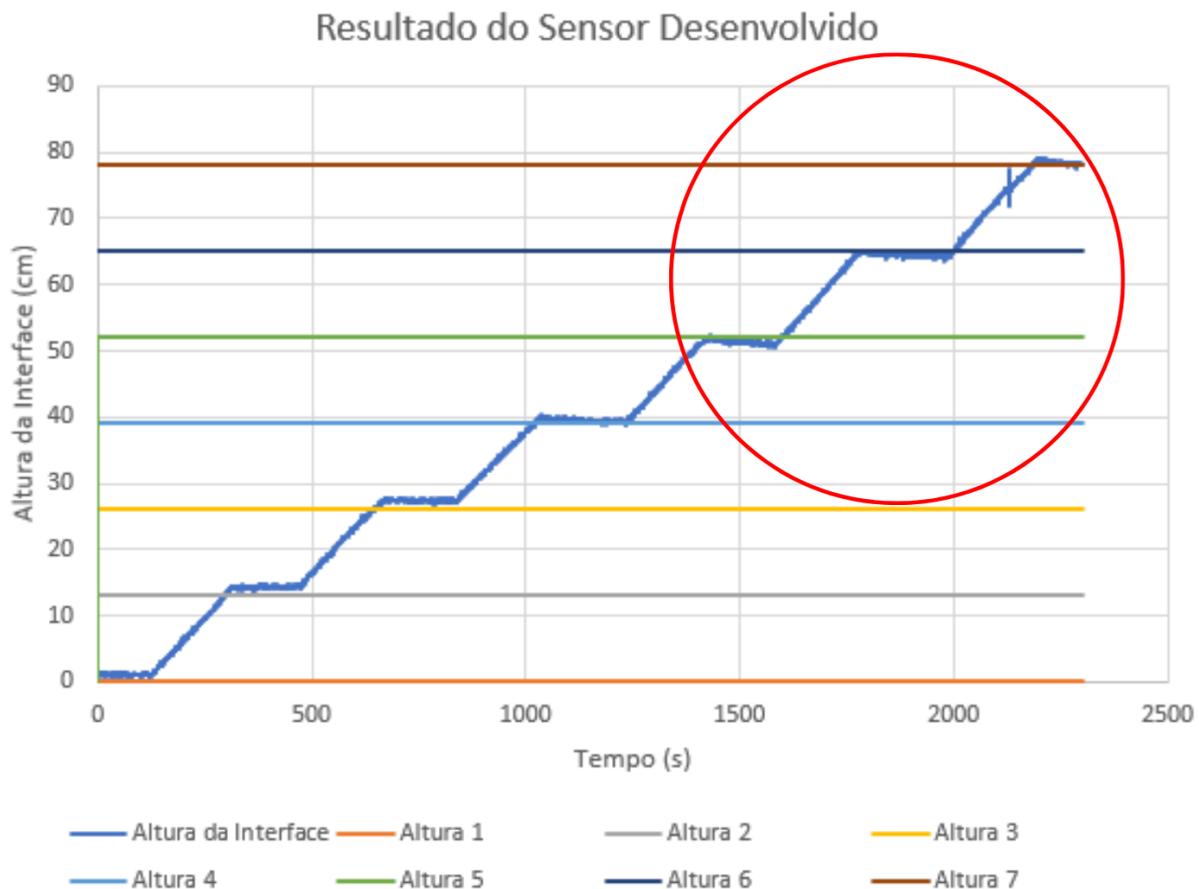


Figura 45 – Resultado dos dados obtidos a partir da equação de caracterização do sistema. Foram utilizados os dados obtidos em dois diafragmas para validar a equação.

A Eq. 13 apresenta o resultado incluindo a correção de temperatura. Essa equação converte os valores normalizados e corrigidos pela temperatura em valores do nível de interface no tanque. A Eq. 13 foi obtida a partir das Tab. 6 e Tab. 7, utilizando os valores médios dos 3 testes em cada diafragma. Então, um sistema foi montado para ter como resultado a equação que prediz o nível de interface em função do deslocamento do comprimento de onda de pico da FBG inserida na mistura água-óleo presente no tanque de medição. Os coeficientes dessa equação precisam ser calculados novamente toda vez que os fluidos alterem suas propriedades.

$$H = 64,88039441\lambda_{BnormD3} + 16,40907899\lambda_{BnormD4} - 1,966244786 \quad (13)$$

O intervalo de medição desse sensor de nível de interface varia de 0 a 78 cm. A resolução de sistema é de 2 casas decimais, aproximadamente 0,01 cm, devido a limitação do interrogador que é utilizado para leitura dos dados do espectro óptico da FBG. Precisão está diretamente relacionada ao desvio padrão da série de dados em cada altura do nível de interface. Em torno do nível 0, 13, 26, 39, 52, 65 e 78 o desvio padrão é respectivamente

0,13, 0,15, 0,15, 0,22, 0,25, 0,25 e 0,28. Outro fator que está diretamente ligado a precisão do sistema é a diferença entre as médias encontradas em torno do nível de interface real. Nos níveis de interface de 0, 13, 26, 39, 52, 65 e 78, foram medidas as diferenças em relação a esses pontos de 1,09, 1,31, 1,37, 0,46, 0,73, 0,48 e 0,43 cm respectivamente.

5 Conclusão

Em um primeiro momento, para medição de pressão, foi desenvolvido um sensor com uma FBG inserida em um diafragma produzido através da utilização de uma impressora 3D. A produção do sensor de pressão através da impressora 3D SethiS3, como já dito, foi muito satisfatório. Para isso ser possível primeiramente é necessário a criação de um projeto em 3D através do software específico, configurar a impressora, iniciar o processo de impressão, pausar e posicionar a fibra no diafragma.

Para produzir os diafragmas de borracha nitrílica com FBG no seu interior é necessário aplicar força sobre eles, aumentar a temperatura e controlar o tempo de compressão. Combinando esses parâmetros e analisando-os, é possível desenvolver uma metodologia para a sua produção.

O arranjo experimental de testes para medição de pressão desenvolvido foi satisfatório para testes de validação. Um pequeno problema a ser corrigido são os vazamentos que geralmente ocorrem porque está sendo utilizado ar comprimido em alta pressão para os testes. Pode ser utilizado colas de vedação para evitar isso ou alterar as configurações de impressão da impressora 3D.

Já a montagem do arranjo experimental para medição de interface água/óleo em um tanque prático foi realmente bastante complicado. São estruturas muito robustas que podem danificar as fibras ópticas que são sensíveis. Isso fica evidente já que um dos sensores quebrou após montado e outro não estava funcionando. Então deve-se avaliar melhor essa montagem, de uma forma que fique mais seguro para ser executado. A menos deste problema, o setup ficou muito bem estruturado, como foi possível observar nas imagens. A ideia foi produzir um setup que pode ser utilizado permanentemente a qualquer momento por outros pesquisadores, colaborando também com outras pesquisas.

O grande desafio na construção dos sensores em impressora 3D está na sensibilidade da FBG. Muitas FBG quebraram na hora da produção devido ao bico de extrusão. O bico acaba encostando na FBG na hora da impressão. Para resolver isso, como já foi falado, no projeto do diafragma foi adicionado uma canaleta no diafragma onde a FBG fica posicionada. Isso minimizou o problema. Esse diafragma é muito simples de produzir e possui uma característica muito promissora para produção e aperfeiçoamento. Como esses testes foram realizados em um ambiente com temperatura controlada e também foram realizados apenas com o objetivo de validar a teoria, não foi implementada a correção de temperatura.

O sensor desenvolvido através da colagem de diafragmas de borracha nitrílica com FBG, foi produzido com sucesso utilizando um sistema de prensa com controle de

temperatura. O sistema se mostrou eficiente para a produção desses sensores. Durante os testes, o problema apresentado foi a produção de gases tóxicos no processo. Isso foi facilmente resolvido através da instalação de um sistema de exaustão. Após a instalação desse sistema, os gases passaram a ser escoados para o meio externo sem contaminação do ambiente. Essa questão continuará a ser monitorada, mas aparentemente o problema foi totalmente resolvido. Através dos parâmetros para a produção, diafragmas foram produzidos com boa qualidade. Realmente a fabricação desse sensor se mostrou muito efetiva. Esse processo de produção de sensores com FBG e diafragmas de borracha nitrílica pode ser utilizado posteriormente para diversos outros estudos, inclusive para produzir mais diafragmas para outros testes. Não existe a necessidade de aplicar muita força na produção. Na verdade os últimos testes demonstraram que uma pequena força aplicada se mostrou muito mais eficiente na produção. Através dos diversos testes, como um dos resultados deste trabalho, uma metodologia foi definida para produção desse sensor posteriormente.

No caso dos testes com os diafragmas impressos em impressora 3D, devido aos dados apresentados, observa-se a influência causada pela variação da espessura do diafragma. Essa variação não altera a linearidade do sistema, mas sua sensibilidade. Uma sensibilidade de $7,5\text{pm} / \text{kPa}$ e $5,2\text{ pm} / \text{kPa}$ para o diafragma de $1,2\text{ mm}$ e 2 mm , respectivamente, foi determinada experimentalmente. O sensor foi testado experimentalmente e foi observada uma resposta altamente linear ao nível de pressão. A pressão máxima medida e testada foi de $172,37\text{ kPa}$, limitada pela configuração experimental; no entanto, espera-se que o sensor funcione para níveis mais altos de pressão. O sistema é aproximadamente linear, com coeficiente de determinação (R^2) de $0,975$ e $0,972$, respectivamente para diafragmas de espessura de $1,2\text{ mm}$ e espessura de diafragmas de $2,0\text{ mm}$. O sistema avaliado pode ser otimizado e utilizado em diversos processos industriais. Portanto, é um método potencialmente simples e robusto para medir a pressão usando diafragmas FBG impressos em impressoras 3D para aplicações em altas pressões. Essa configuração pode ser usada com sucesso em diferentes aplicações industriais, validando a teoria apresentada.

Os testes utilizando os sensores de borracha nitrílica foram realizados no NEMOG, com o auxílio da empresa 2Solve. Esses testes foram realizados através do monitoramento e gerenciamento dos níveis de interface no tanque. Em um primeiro momento ficou bem evidente o problema da emulsão. Fica claro as diferentes cores entre os líquidos e na emulsão. Observou-se também uma espuma na parte superior. Comparado a figura apresentada anteriormente (Fig. 2), neste caso prático só não foi encontrado gases e areia no fundo, porque todos os outros componentes existiram no teste prático. Com isso decidiu-se não processar os dados da elevação de nível do óleo, porque a quantidade elevada de emulsão entre água/óleo tornou inviável a análise desses dados. Realmente é um grande desafio essa questão da emulsão. Após aguardar 2 dias para a emulsão se desfazer, os testes tiveram em início. De 5 em 5 minutos os níveis da interface eram elevados. Foram 5 ciclos (subida e descida). Os resultados nesses testes foram realmente promissores. Obteve-se no final

uma equação onde é possível medir a interface do sistema de acordo com a variação de deformação dos diafragmas, mostrando que é possível utilizar esse sistema para futuramente produzir um produto.

Percebe-se também claramente um padrão no perfil de temperatura quando a interface passa pelos sensores. Essa é uma questão muito interessante que tem que ser mais estudada. Fica evidente nos gráficos uma brusca variação na medição dos sensores quando têm essa passagem da interface. Isso ocorre porque o material que está sendo injetado no tanque estava em outro meio e também materiais diferentes possuem gradientes de temperatura diferentes.

Os dois tipos de sensores funcionaram de forma que foi possível alcançar o objetivo, cada um com sua funcionalidade específica. O sensor produzido em impressora 3D é mais indicado para ser utilizado em áreas não agressivas e o sensor de borracha nitrílica em locais corrosivos. Alguns ajustes devem ser realizados para melhorar os aspectos de produção e testes. Trabalhos futuros serão sugeridos logo abaixo com o objetivo de contribuir com o direcionamento da pesquisa.

5.1 Trabalhos futuros

Como perspectivas e trabalhos futuros, destacam-se a implementação de técnica para a compensação de temperatura no arranjo experimental de medição de pressão. Os sensores produzidos com a impressora 3D seriam o foco inicial. Paralelamente, a análise e verificação de vazamentos dos diafragmas impressos em 3D seria implementada. Alguns ajustes devem ser realizados na metodologia de produção desses sensores para garantir que a FBG não quebrará.

No processo de vulcanização é necessário a implementação de uma metodologia que melhore a forma com que a fibra é fixada e posicionada no momento do processo. É recomendado analisar a viabilidade de automatizar esse processo de vulcanização, tornando o projeto desse sensor um possível produto para produção em escala para as empresas, tendo em visto que essa etapa seria um gargalo para a produção do sistema de medição de nível de interface entre água e óleo.

Como observado nos resultados, a implementação de um sistema no tanque de testes com uma maior quantidade de sensores ao longo do eixo y é fundamental para o aumento da resolução e precisão do sistema. Tornando assim o sistema de medição um protótipo inicial para um possível produto futuramente. Conseqüentemente, com essa maior quantidade de sensores, deve-se realizar uma análise do gradiente de temperatura na dinâmica da interface do tanque.

Um último ponto a ser salientado é que a montagem do tanque com a haste que

serve de suporte aos sensores deve ser aperfeiçoada posteriormente para evitar que a fibra se quebre.

Referências

- [1] E. Vorathin, Z. Hafizi, A. Aizzuddin, and K. Lim, “A natural rubber diaphragm based transducer for simultaneous pressure and temperature measurement by using a single FBG,” *Optical Fiber Technology*, vol. 45, pp. 8–13, nov 2018. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 26.
- [2] E. Molina Flores, R. B. López Flores, J. A. Dávila Píntle, E. Reynoso Lara, Y. E. Bravo García, M. Rendon Marin, and L. Cortéz Georgevna, “Discrete optical fiber microsensors of immiscible liquid interfaces,” *Proceedings of CAOL 2008: 4th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers*, no. 1, pp. 313–315, 2008. Citado na página 1.
- [3] A. Tondon, M. Singh, B. S. Sandhu, and B. Singh, “A Compton scattering technique for concentration and fluid-fluid interface measurements using NaI(Tl) detector,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 403, pp. 21–27, jul 2017. Citado na página 1.
- [4] E. Vorathin, Z. M. Hafizi, A. M. Aizzuddin, M. K. Zaini, and K. S. Lim, “A Novel Temperature-Insensitive Hydrostatic Liquid-Level Sensor Using Chirped FBG,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 157–162, 2019. Citado na página 1.
- [5] A. M. Al-Naamany, M. Meribout, and K. Al Busaidi, “Design and implementation of a new nonradioactive-based machine for detecting oil-water interfaces in oil tanks,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, no. 5, pp. 1532–1536, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- [6] B. T. Hjertaker, G. A. Johansen, and P. Jackson, “Recent developments in hydrocarbon separator interface imaging,” *Process Imaging for Automatic Control*, vol. 4188, p. 81, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 1, 2 e 3.
- [7] A. G. Leal-Junior, C. Marques, A. Frizera, and M. J. Pontes, “Multi-interface level in oil tanks and applications of optical fiber sensors,” *Optical Fiber Technology*, vol. 40, no. October 2017, pp. 82–92, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 2, 3 e 5.
- [8] M. Meribout, A. Al, and K. Al, “Interface Layers Detection in Oil Field Tanks: A Critical Review,” *Expert Systems for Human, Materials and Automation*, 2011. Citado na página 2.
- [9] R. da Silva Marques, A. R. Prado, P. F. da Costa Antunes, P. S. de Brito André, M. R. Ribeiro, A. Frizera-Neto, and M. J. Pontes, “Corrosion resistant FBG-based

- quasi-distributed sensor for crude oil tank dynamic temperature profile monitoring,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 12, pp. 30693–30703, 2015. Citado na página 2.
- [10] C. A. F. Marques, G.-D. Peng, and D. J. Webb, “Highly sensitive liquid level monitoring system utilizing polymer fiber Bragg gratings,” *Optics Express*, vol. 23, no. 5, p. 6058, 2015. Citado 6 vezes nas páginas 2, 10, 14, 16, 17 e 29.
- [11] T. Li, Y. Tan, P. Xia, and Z. Zhou, “Paralleled Structure-Based String-Type Fiber Bragg Grating Acceleration Sensor,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 5, pp. 1325–1332, 2017. Citado na página 2.
- [12] J. Zhu, M. Wang, L. Chen, X. Ni, and H. Ni, “An optical fiber Fabry–Perot pressure sensor using corrugated diaphragm and angle polished fiber,” *Optical Fiber Technology*, vol. 34, no. 1, pp. 42–46, 2017. Citado na página 2.
- [13] M. Vidakovic, C. McCague, I. Armakolas, T. Sun, J. S. Carlton, and K. T. Grattan, “Fibre bragg grating-based cascaded acoustic sensors for potential marine structural condition monitoring,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 19, pp. 4473–4478, 2016. Citado na página 2.
- [14] M. F. Domingues, P. Antunes, N. Alberto, R. Frias, R. A. Ferreira, and P. André, “Cost effective refractive index sensor based on optical fiber micro cavities produced by the catastrophic fuse effect,” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 77, pp. 265–268, 2016. Citado na página 2.
- [15] O. Isaksen, A. S. Dico, and E. A. Hammer, “A capacitance-based tomography system for interface measurement in separation vessels,” *Measurement Science and Technology*, vol. 5, no. 10, pp. 1262–1271, 1994. Citado na página 2.
- [16] Guirong Lu, Hao Hu, Suolin Duan, and Hongyuan Wang, “A simple and valuable method for detecting levels of interface of oil -water and oil layer,” in *2009 ICCAS-SICE*, pp. 1836–1839, 2009. Citado na página 2.
- [17] T. M. Shi, C. G. Xie, S. M. Huang, R. A. Williams, and M. S. Beck, “Capacitance-based instrumentation for multi-interface level measurement,” *Measurement Science and Technology*, vol. 2, no. 10, pp. 923–933, 1991. Citado na página 3.
- [18] Y. Yang, C. Hong, Z. Ahmed Abro, L. Wang, and Z. Yifan, “A new Fiber Bragg Grating sensor based circumferential strain sensor fabricated using 3D printing method,” *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 295, pp. 663–670, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 3, 14, 15, 16 e 25.
- [19] 2Solve, “No Title.” Citado na página 4.

- [20] J. E. Antonio-Lopez, D. A. May-Arriolja, and P. LiKamWa, “Fiber-Optic Liquid Level Sensor,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, pp. 1826–1828, dec 2011. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- [21] W. Morey, G. Meltz, and H. Glenn, “Paper Describes,” 1989. Citado na página 5.
- [22] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, “Fiber grating sensors,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1442–1462, 1997. Citado na página 5.
- [23] A. Othonos, K. Kalli, and G. E. Kohnke, “Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing,” *Physics Today*, vol. 53, no. 5, pp. 61–62, 2000. Citado na página 5.
- [24] J. Chen, B. Liu, and H. Zhang, “Review of fiber Bragg grating sensor technology,” *Frontiers of Optoelectronics in China*, vol. 4, no. 2, pp. 204–212, 2011. Citado na página 5.
- [25] Z. Yang, H. Peng, W. Wang, and T. Liu, “Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 116, no. 5, pp. 2658–2667, 2010. Citado na página 5.
- [26] G. P. Agrawal, *Sistemas De Comunicação Por Fibra Óptica*. Rio de Janeiro: Elsevier, 4. ed. ed., 2014. Citado na página 7.
- [27] A. G. Leal-Junior, C. A. Díaz, A. Frizzera, C. Marques, M. R. Ribeiro, and M. J. Pontes, “Simultaneous measurement of pressure and temperature with a single FBG embedded in a polymer diaphragm,” *Optics and Laser Technology*, vol. 112, no. July 2018, pp. 77–84, 2019. Citado 6 vezes nas páginas 7, 11, 19, 21, 22 e 29.
- [28] J. Zubia and J. Arrue, “Plastic optical fibers: An introduction to their technological processes and applications,” *Optical Fiber Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 101–140, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- [29] A. G. Leal-junior, “Polymer Optical Fiber Sensors for Healthcare Devices: from Material Analysis to Practical Applications,” p. 201, 2018. Citado 7 vezes nas páginas 8, 9, 11, 12, 13, 14 e 25.
- [30] Y. Chen, M. Vidakovic, M. Fabian, M. Swift, L. Brun, T. Sun, and K. T. V. Grattan, “A temperature compensated fibre Bragg grating (FBG)-based sensor system for condition monitoring of electrified railway pantograph,” p. 103236T, 2017. Citado na página 9.

- [31] Y. Luo, B. Yan, Q. Zhang, G. D. Peng, J. Wen, and J. Zhang, “Fabrication of polymer optical fibre (POF) gratings,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 3, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 11.
- [32] A. E. Al-Fakih, N. A. Abu Osman, F. Rafiq, M. Adikan, A. Eshraghi, and P. Jahanshahi, “Development and Validation of Fiber Bragg Grating Sensing Pad for Interface Pressure Measurements,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 965–974, 2016. Citado na página 10.
- [33] T. Li, C. Shi, Y. Tan, R. Li, Z. Zhou, and H. Ren, “A Diaphragm Type Fiber Bragg Grating Vibration Sensor Based on Transverse Property of Optical Fiber with Temperature Compensation,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 1021–1029, 2017. Citado na página 10.
- [34] L. Alwis, T. Sun, and K. T. Grattan, “[INVITED] Developments in optical fibre sensors for industrial applications,” *Optics and Laser Technology*, vol. 78, pp. 62–66, 2016. Citado na página 10.
- [35] Y. nan Zhang, H. Peng, X. Qian, Y. Zhang, G. An, and Y. Zhao, “Recent advancements in optical fiber hydrogen sensors,” *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 244, pp. 393–416, 2017. Citado na página 10.
- [36] D. C. J. K. O. Hill, Y. Fujii and B. S. Kawasaki, “Photo-sensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, pp. 647–649, 1978. Citado na página 10.
- [37] D. C. J. B. S. Kawasaki, K. O. Hill and Y. Fujii, “Narrow-band Bragg reflectors in optical fiber,” *Opt. Lett.*, vol. 3, pp. 66–68, 1978. Citado na página 10.
- [38] K. O. Hill and G. Meltz, “Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1263–1276, 1997. Citado na página 10.
- [39] D. K. W. Lam and B. K. Garside, “Characterization of single-mode optical fiber filters,” *Applied Optics*, vol. 20, no. 3, pp. 440–445, 1981. Citado na página 10.
- [40] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, “Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method,” *Optics Letters*, vol. 14, no. 15, p. 823, 1989. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- [41] V. Neeharika and P. K. Pattnaik, “Optical MEMS Pressure Sensors Incorporating Dual Waveguide Bragg Gratings on Diaphragms,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 681–687, 2016. Citado na página 10.

- [42] A. G. Leal-Junior, A. Frizera, C. R. Diaz, M. R. N. Ribeiro, and M. J. Pontes, “FBG-Embedded Oblong Diaphragms with Extended Dynamic Range,” *IEEE Sensors Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 1–4, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 11, 19 e 29.
- [43] A. I. Gribaev, I. V. Pavlishin, A. M. Stam, R. F. Idrisov, S. V. Varzhel, and K. A. Konnov, “Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer,” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 48, no. 12, pp. 1–7, 2016. Citado na página 11.
- [44] R. B. Walker, S. Yun, H. Ding, M. Charbonneau, D. Coulas, P. Lu, S. J. Mihailov, and N. Ramachandran, “High resolution temperature mapping of gas turbine combustor simulator exhaust with femtosecond laser induced fiber Bragg gratings,” p. 103238O, 2017. Citado na página 11.
- [45] A. Theodosiou, S. Member, A. Lacraz, A. Stassis, C. Koutsides, M. Komodromos, S. Member, and K. Kalli, “Plane-by-Plane Femtosecond Laser Inscription Method for Single-Peak Bragg Gratings in Multimode CYTOP Polymer Optical Fiber,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 24, pp. 5404–5410, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 13.
- [46] Y. Yu, J. Shi, F. HAN, W. Sun, and X. Feng, “High-precision fiber bragg gratings inscription in axially symmetric fibers by infrared femtosecond laser direct-writing method assisted with image recognition,” *Optics Express*, vol. 28, 03 2020. Citado na página 11.
- [47] S. J. Mihailov, C. W. Smelser, P. Lu, R. B. Walker, D. Grobnic, H. Ding, and J. Unruh, “Fiber Bragg gratings (FBG) made with a phase mask and 800 nm femtosecond radiation,” *Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series*, vol. 86, no. August 2017, pp. 890–892, 2003. Citado na página 13.
- [48] C. A. Diaz, A. G. Leal-Junior, P. S. Andre, P. F. Antunes, M. J. Pontes, A. F. Neto, and M. R. Ribeiro, “Liquid level measurement based on FBG-embedded diaphragms with temperature compensation,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 193–200, 2017. Citado 7 vezes nas páginas 16, 17, 18, 19, 26, 29 e 35.
- [49] V. R. P., S. K., S. S. M., and K. P., “Diaphragm based high sensitive FBG pressure sensor,” *Precision Engineering*, vol. 8769, no. June 2013, p. 876927, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.
- [50] D. Song, “Liquid-level sensor using a fiber Bragg grating and carbon fiber composite diaphragm,” *Optical Engineering*, vol. 50, no. 1, p. 014401, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 21 e 29.

- [51] V. Nigam, D. K. Setua, and G. N. Mathur, “Hybrid filler system for nitrile rubber vulcanizates,” *Journal of Materials Science*, vol. 36, no. 1, pp. 43–47, 2001. Citado na página 22.
- [52] S. Anandhan and A. K. Bhowmick, “Thermoplastic vulcanizates from post consumer computer plastics/nitrile rubber blends by dynamic vulcanization,” *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 15, no. 3, pp. 300–309, 2013. Citado na página 22.
- [53] D. Y. Kim, G. H. Kim, G. M. Nam, D. G. Kang, and K. H. Seo, “Oil resistance and low-temperature characteristics of plasticized nitrile butadiene rubber compounds,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 136, no. 32, pp. 1–7, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- [54] A. Leal-Junior, A. Frizera, C. Díaz, C. Marques, M. Ribeiro, and M. J. Pontes, “Material features based compensation technique for the temperature effects in a polymer diaphragm-based FBG pressure sensor,” *Optics Express*, vol. 26, p. 20590, aug 2018. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 29.
- [55] A. G. Leal-Junior, A. Frizera, C. R. Diaz, M. R. N. Ribeiro, and M. J. Pontes, “FBG-Embedded Oblong Diaphragms with Extended Dynamic Range,” *IEEE Sensors Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 1–4, 2018. Citado na página 29.
- [56] C. Lazaro, C. E. S. Castellani, M. J. Pontes, and A. Leal-Junior, “Fiber Bragg gratings sensor for thermal conductivity measurements in liquids,” *Imoc 2019*, pp. 1–3, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

Apêndices

APÊNDICE A – Testes Produção Diafragmas

As espessuras dos diafragmas aqui especificados são dos diafragmas separados antes do processo de aquecimento. Logo, se for utilizado dois diafragmas de 1,6 mm para produção, no final do processo será obtido um diafragma de 3,2 mm com a FBG já embutida.

- Teste 1:
 - Espessura: 2.7 mm;
 - Temperatura: 180 °C;
 - Força Aplicada: 3 toneladas;
 - Tempo na Temperatura: 5 minutos;
 - Obs.: O teste foi iniciado com a força já aplicada.

- Teste 2:
 - Espessura: 1.8 mm;
 - Temperatura: 220 °C;
 - Força Aplicada: 6 toneladas;
 - Tempo na Temperatura: 5 minutos;
 - Obs.: O teste foi iniciado sem aplicar a força. A força foi aplicada quando a temperatura foi alcançada.

- Teste 3:
 - Espessura: 1.8 mm;
 - Temperatura: 220 °C;
 - Força Aplicada: 3 toneladas;
 - Tempo na Temperatura: 5 minutos;
 - Obs.: O teste foi iniciado com a força já aplicada.

- Teste 4:
 - Espessura: 1.6 mm;

- Temperatura: 220 °C;
 - Força Aplicada: 3 toneladas;
 - Tempo na Temperatura: 5 minutos;
 - Obs.: O teste foi iniciado com a força já aplicada.
- Teste 5:
 - Espessura: 1.6 mm;
 - Temperatura: 200 °C e aumentada para 220 °C durante o processo;
 - Força Aplicada: 1.5 toneladas e aumentada quando a temperatura foi atingida para 3 toneladas;
 - Tempo na Temperatura: 10 minutos;
 - Obs.: O teste foi iniciado com a força já aplicada.
- Teste 6:
 - Espessura: 1 mm;
 - Temperatura: 220 °C;
 - Força Aplicada: 1.5 toneladas;
 - Tempo na Temperatura: 5 minutos;
 - Obs.: O teste foi iniciado com a força já aplicada.
- Teste 7:
 - Espessura: 1.4 mm;
 - Temperatura: 220 °C;
 - Força Aplicada: 1.5 toneladas;
 - Tempo na Temperatura: 5 minutos;
 - Obs.: O teste foi iniciado com a força já aplicada. E este teste já foi realizado com a FBG
- Teste 8:
 - Espessura: 1 mm;
 - Temperatura: 220 °C;
 - Força Aplicada: 1.5 toneladas;
 - Tempo na Temperatura: 5 minutos;

- Obs.: O teste foi iniciado com a força já aplicada. E especificamente nesse teste, a fibra com FBG foi ligada ao interrogador e os dados foram gravados durante o processo de fabricação. Imagens da resposta em frequência foram salvas nos 3 principais momentos do processo: antes de iniciar, com pressão e temperatura e após finalizar.
- Teste 9:
 - Espessura: 0.4 mm;
 - Temperatura: 220 °C;
 - Força Aplicada: 1.5 toneladas;
 - Tempo na Temperatura: 5 minutos;
 - Obs.: O teste foi iniciado com a força já aplicada. Este teste foi realizado com FBG.
- Teste 10:
 - Espessura: 0.2 mm;
 - Temperatura: 200 °C;
 - Força Aplicada: 1.5 toneladas;
 - Tempo na Temperatura: 5 minutos;
 - Obs.: O teste foi iniciado com a força já aplicada.
- Teste 11:
 - Espessura: 0.2 mm;
 - Temperatura: 190 °C;
 - Força Aplicada: 1 tonelada;
 - Tempo na Temperatura: 5 minutos;
 - Obs.: O teste foi iniciado com a força já aplicada.
- Teste 12:
 - Espessura: 0.2 mm;
 - Temperatura: 170 °C;
 - Força Aplicada: 1 tonelada;
 - Tempo na Temperatura: 3 minutos;
 - Obs.: O teste foi iniciado com a força já aplicada.
- Teste 13:

- Espessura: 0.6 mm;
- Temperatura: 180 °C;
- Força Aplicada: 1 tonelada;
- Tempo na Temperatura: 3.5 minutos;
- Obs.: O teste foi iniciado com a força já aplicada.

- Teste 14:

- Espessura: 0.6 mm;
- Temperatura: 190 °C;
- Força Aplicada: 1 tonelada;
- Tempo na Temperatura: 4 minutos;
- Obs.: O teste foi iniciado com a força já aplicada.