

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ADEMIR CARLOS NICOLINI JUNIOR

**SENSOR DE NÍVEL DE LÍQUIDOS UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRA
ÓPTICA EM FIBRA DE CARBONO**

PATO BRANCO

2023

ADEMIR CARLOS NICOLINI JUNIOR

**SENSOR DE NÍVEL DE LÍQUIDOS UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRA
ÓPTICA EM FIBRA DE CARBONO**

**LIQUID LEVEL SENSOR USING CARBON FIBER OPTICAL FIBER BRAGG
NETWORKS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de Concentração: Sistemas e Processamento de Energia.

Orientador(a): Prof. Dr. Kleiton Morais Sousa
Coorientador(a): Prof. Dr. Uilian José Dreyer

PATO BRANCO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ADEMIR CARLOS NICOLINI JUNIOR

SENSOR DE NÍVEL DE LÍQUIDOS UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA EM FIBRA DE CARBONO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Sistemas E Processamento De Energia.

Data de aprovação: 25 de Novembro de 2022

Dr. Kleiton De Moraes Sousa, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Gustavo Gomes Kuhn, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Ivo De Lourenco Junior, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Jesse De Pelegrin, Doutorado - Instituto Federal Catarinense

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 25/11/2022.

Dedico este trabalho à minha esposa Rosana, pelos
momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

A realização do trabalho foi possível devido a colaboração de algumas pessoas e instituições, e a quem eu desejo exprimir o meu agradecimento.

Agradeço ao Professor Doutor Kleiton Morais Sousa e ao Professor Doutor Uilian José Dreyer, meu orientador e coorientador, respectivamente, por me terem proposto este trabalho, e pelo apoio e disponibilidade que sempre demonstraram.

Agradeço ao apoio das Instituições: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); Fundação Araucária (FA) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

Agradeço ao Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco e Campus Curitiba, por me conceder a possibilidade de realizar este trabalho.

O sucesso consiste em ir de fracasso em
fracasso sem perder o entusiasmo.
(Winston Churchill, 1953)

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de demonstrar o desenvolvimento de um sensor de nível para líquidos utilizando redes de Bragg em fibra óptica (FBG). A motivação para o desenvolvimento do sensor é a necessidade de uma alternativa para medição do nível de coluna de líquidos em sistemas que utilizam medidores convencionais, em ambientes cuja imunidade à interferência eletromagnética seja um requisito bem como em ambientes classificados, que possuem riscos de explosão, possuindo uma boa precisão para garantir a alta produtividade e segurança do processo. O encapsulamento utilizado neste projeto está baseado na inserção da FBG em compósito de carbono do tipo PRFC (Polímeros Reforçados por Fibras de Carbono), formando um diafragma rígido, que irá sofrer interferência do peso da coluna de água durante os ensaios do sensor. A validação dos resultados dos ensaios é apresentada, e eles são considerados promissores, sendo constatado uma variação de 24 pm no comprimento de onda de Bragg corresponde a uma alteração de 60 cm de coluna de água. A variação do nível foi realizada em degraus, cada um com 10 cm e correspondendo a 4 pm de deslocamento do comprimento de onda de Bragg. A sensibilidade média para variação de pressão verificada foi de 41,603 pm/kPa e a sensibilidade média para variação de nível de 0,408 pm/cm. O monitoramento da temperatura da água no interior do dispositivo foi realizado com a instalação de uma segunda FBG encapsulada em tubo polietileno e posicionada a aproximadamente 5 cm acima do diafragma no qual o sensor está inserido. Os ensaios foram realizados em laboratório, com temperatura do ambiente controlada. A temperatura da água no interior do dispositivo manteve-se praticamente constante, com pequenas variações que corresponderam a um comprimento de onda de Bragg de aproximadamente 4 pm para a segunda FBG, não provocando interferências na resposta do sensor de nível.

Palavras-chave: Rede de Bragg (FBG). Sensor de Nível. Fibra de Carbono.

ABSTRACT

This paper aims to demonstrate the development of a level sensor for liquids using optical fiber Bragg gratings (FBG). The motivation for the development of the sensor is the need for an alternative for measuring the liquid column level in systems that use conventional meters, in environments where immunity to electromagnetic interference is a requirement, as well as in classified environments, which have risks of explosion, having a good precision to guarantee the high productivity and safety of the process. The encapsulation used in this project is based on the insertion of the FBG in carbon composite of the PRFC type (Polymers Reinforced by Carbon Fibers), forming a rigid diaphragm, which will suffer interference from the weight of the water column during the sensor tests. The validation of the test results is presented, and they are considered promising, with a variation of 24 pm in the Bragg wavelength corresponding to a change of 60 cm in the water column. The level variation was performed in steps, each with 10 cm and corresponding to a 4 pm shift in the Bragg wavelength. The average sensitivity for the verified pressure variation was 41.603 pm/kPa and the average sensitivity for the level variation was 0.408 pm/cm. The monitoring of the water temperature inside the device was performed with the installation of a second FBG encapsulated in a polyethylene tube and positioned approximately 5 cm above the diaphragm in which the sensor is inserted. The tests were carried out in the laboratory, with controlled ambient temperature. The temperature of the water inside the device remained practically constant, with small variations that corresponded to a Bragg wavelength of approximately 4 pm for the second FBG, not causing interference in the response of the level sensor.

Keywords: Bragg Gratings (FBG). Level Sensor. Carbon Fiber.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Medição de Nível por Método Direto	19
Figura 2 - Medição de Nível por Método Indireto (Sensor Ultrassônico).....	20
Figura 3 - Medição de Nível por Método Indireto (Sensor Capacitivo)	21
Figura 4 - Medição de Nível por Método Indireto (Sensor por Condutividade)..	22
Figura 5 - Medição de Nível por Método Indireto (Sensor Hidrostático)	22
Figura 6 - Aplicação de um cordão FBG multiplexado	24
Figura 7 - Esquemático do Funcionamento de uma FBG	25
Figura 8 - Gravação por Máscara de Fase.....	26
Figura 9 - Interrogador Óptico SM130 - Micron Optics	30
Figura 10 - Vista da parte superior do Suporte de Aço Inoxidável	31
Figura 11 - Vista da parte inferior do Suporte de Aço Inoxidável	32
Figura 12 - Vista 3D do Diafragma integrado com a FBG e o Suporte de Aço..	32
Figura 13 - Diafragma PRFC integrado com a FBG e o Suporte de Aço	33
Figura 14 - Esquemático do sistema proposto para ensaios	34
Figura 15 - <i>Layout</i> do sistema montado para ensaios do sensor FBG	34
Figura 16 - Posicionamento da FBG1 e FBG2 no dispositivo para ensaios	35
Figura 17 - FBG para Monitoramento da temperatura da água	36
Figura 18 - Nível da Água – FBG1 – Ensaio Preliminar 1	37
Figura 19 - Sensor FBG1 – Ensaio Preliminar 1 – Enchimento	38
Figura 20 - Sensor FBG1 – Ensaio Preliminar 1 – Esvaziamento.....	38
Figura 21 - Nível da Água – FBG1 – Ensaio Preliminar 2.....	39
Figura 22 - Sensor FBG1 – Ensaio Preliminar 2 - Enchimento.....	40
Figura 23 - Sensor FBG1 – Ensaio Preliminar 2 - Esvaziamento	40
Figura 24 - Nível da Água – FBG1 – Ensaio Preliminar 3.....	41
Figura 25 - Sensor FBG1 – Ensaio Preliminar 3 - Enchimento.....	41
Figura 26 - Sensor FBG1 – Ensaio Preliminar 3 - Enchimento.....	42
Figura 27 - Sensor FBG1 – Curva de enchimento do dispositivo	44
Figura 28 - Sensor FBG1 – Curva de esvaziamento do dispositivo.....	44
Figura 29 - Sensor FBG1 – Enchimento do dispositivo.....	45
Figura 30 - Sensor FBG1 – Esvaziamento do dispositivo.....	45
Figura 31 - Nível da Água – FBG1 – Ensaio Final 1	46
Figura 32 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 1 - Enchimento	47
Figura 33 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 1 - Esvaziamento.....	47
Figura 34 - Nível da Água – FBG1 – Ensaio Final 2	48
Figura 35 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 2 – Enchimento	49
Figura 36 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 2 - Esvaziamento.....	49
Figura 37 - Nível da Água – FBG1 – Ensaio Final 3.....	50
Figura 38 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 3 - Enchimento	50
Figura 39 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 3 - Esvaziamento.....	51
Figura 40 - Nível da Água – FBG1 – Ensaio Final 4.....	51
Figura 41 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 4 - Enchimento	52
Figura 42 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 4 - Esvaziamento.....	52
Figura 43 - Sensor FBG2 (Temperatura) durante Ensaio Final 1	53
Figura 44 - Comparativo dos resultados - FBG1 e FBG2 - Ensaio Final 1.....	54
Figura 45 - Sensor FBG2 (Temperatura) durante Ensaio Final 2	54
Figura 46 - Comparativo dos resultados - FBG1 e FBG2 - Ensaio Final 2.....	55
Figura 47 - Sensor FBG2 (Temperatura) durante Ensaio Final 3	55

Figura 48 - Comparativo dos resultados - FBG1 e FBG2 - Ensaio Final 3.....	56
Figura 49 - Sensor FBG2 (Temperatura) durante Ensaio Final 4	56
Figura 50 - Comparativo dos resultados - FBG1 e FBG2 - Ensaio Final 4.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Enchimento da coluna de água – Ensaio Preliminar	42
Tabela 2 - Esvaziamento da coluna de água – Ensaio Preliminar.....	42
Tabela 3 - Enchimento da coluna de água – Ensaio Final	57
Tabela 4 - Esvaziamento da coluna de água – Ensaio Final.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FBG	Fiber Bragg Grating
BPM	Beam Propagation Method
PRFC	Polímeros Reforçados por Fibras de Carbono
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo Geral.....	16
1.2	Objetivos Específicos	16
1.3	Estrutura do Trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Medição de Nível de Líquidos	18
2.1.1	Medição por Métodos Diretos.....	18
2.1.2	Medição por Métodos Indiretos	19
2.2	Fibra Óptica como Sensor.....	23
2.3	Redes de Bragg em Fibra Óptica	24
2.4	Medição de Nível de Líquidos Utilizando Fibra Óptica	27
3	DESENVOLVIMENTO	30
3.1	Características da FBG utilizada no projeto	30
3.2	Características do Interrogador utilizado no projeto	30
3.3	Desenvolvimento do Diafragma.....	31
3.4	Desenvolvimento do Dispositivo para Ensaios	33
3.5	Calibração do Sensor.....	35
4	DISCUSSÃO E RESULTADOS	37
4.1	Ensaios Preliminares	37
4.2	Calibração do Sensor.....	43
4.3	Ensaios Finais do Sensor de Nível	46
4.4	Caracterização da Sensibilidade Cruzada.....	53
4.5	Comparativo dos Resultados dos Ensaios Realizados	57
5	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

A utilização de sensores em fibra óptica tem se destacado em vários ramos de aplicação, entre eles, na indústria em diversos seguimentos, na área médica em várias especialidades e em ambientes classificados, com risco de incêndio e explosões (HILL et al., 1997).

Essa tecnologia possui características que agregam vantagens significativas ao sistema onde implementado, citando sua capacidade de multiplexação, tamanho reduzido, com alta sensibilidade e apresentar imunidade à interferência eletromagnética. Dessa forma, quando comparado com sensores convencionais que utilizam eletricidade, tornam-se uma boa opção para ambientes classificados, que possuem riscos de explosão (ZHOU et al., 2014).

Esses tipos de sensores podem ser aplicados em instalações offshore, onde existem tanques com líquidos inflamáveis que necessitam de monitoramento de variáveis como pressão, nível e interface entre fluidos. Essas medições exigem alta precisão para garantir a alta produtividade e segurança do processo (FLORES et al., 2008).

No ramo industrial, merece destaque os sensores para medição de nível de líquidos utilizando a tecnologia em fibra óptica do tipo interferométricos e os sensores do tipo Redes de Bragg em fibra óptica (FBG). Na aplicação da FBG como sensor para medição de pressão, devem ser utilizadas técnicas para detecção indireta, como a deformação, na qual a fibra é integrada em madeiras, ligas metálicas ou até mesmo em polímeros ou compósitos, formando estruturas do tipo hastes ou diafragmas (HILL, 1997). A utilização de diafragmas com FBG integrada para medição de nível está baseada na pressão hidrostática que a coluna do líquido exerce sobre a membrana (AHMAD, 2008).

Os sensores em FBG atendem a todos os requisitos necessários em comparação com os sensores de nível elétricos convencionais. O comprimento de onda de Bragg é sensível tanto a deformação provocada pela pressão hidrostática da coluna de líquido, quanto pela variação de temperatura do ambiente monitorado. Dessa forma, é necessário a realização de uma compensação de temperatura para filtrar este parâmetro que pode causar interferências nas medições (VORATHIN et al., 2018).

Essas interferências devidas à variação de temperatura são indesejáveis quando estamos medindo o nível de uma coluna de líquido. Em sistemas com temperatura constante, pode até não representar erros de medição, porém para temperaturas variáveis, deve ser prevista uma segunda FBG instalada de forma isolada das variações de pressão, de forma a medir somente a alteração de temperatura, e desta forma ser compensada a sensibilidade cruzada (DIAZ, 2017).

Vários os tipos de materiais foram utilizados para o desenvolvimento de sensores utilizando FBGs integradas em diafragmas, como a resina epóxi, borracha nitrílica, compósitos de carbono, grafeno e borracha natural. Em SONG et al. (2011), os autores apresentaram um sensor baseado em um diafragma composto de fibra de carbono cujo princípio de detecção e o resultado da análise utilizaram elementos finitos. Leal-Junior et al. (2018), apresentaram um sensor possuindo duas FBGs embutidas em diafragma desenvolvido em poliuretano, onde as FBGs ficaram em posições opostas em relação a linha neutra, apresentando alta sensibilidade e linearidade com compensação de temperatura, sem realizar análise de todos os parâmetros. Em HER et al. (2021), os autores desenvolveram um sensor FBG para medição de pressão e nível de água, sendo a fibra aderida em um diafragma de epóxi de forma que a espessura do diafragma interferia na sensibilidade do sensor, sendo apresentado os efeitos nas medições com 3 diafragmas com espessuras diferentes, e o estudo não contemplou a compensação de temperatura do ambiente. Em Morais-E et al. (2022), os autores desenvolveram um sensor possuindo duas FBGs embutidas em um diafragma de borracha de silicone circular (PDMS), sendo o dispositivo submetido a testes de compressão, carga e descarga de nível de líquido apresentando boa sensibilidade e linearidade, possuindo também uma boa caracterização de temperatura. Ameen et al. (2016) apresentaram um sensor utilizando um diafragma de grafeno integrado com uma FBG que tinha capacidade de monitorar o nível da água e a temperatura de forma simultânea, de forma que, quando a coluna do nível de líquido aumentava acarretava um peso maior sobre o diafragma de grafeno tensionando a FBG e provocando uma resposta no sinal.

Considerando os materiais compósitos de carbono, GALVÃO (2019) desenvolveu um sensor em fibra óptica baseados em redes de Bragg (FBG) para área biomecânica a ser utilizado em humanos e animais. Na área humana, foram desenvolvidas próteses para indivíduos amputados utilizando como material compósitos de carbonos com os sensores FBG integrados, com objetivo de verificar

avaliar o projeto e desempenho destas próteses quando utilizadas por atletas em treinamentos e competições. Com os resultados obtidos foi verificado uma sensibilidade média dos sensores de 10 pm/N. Na área animal foram desenvolvidas ferraduras em material compósitos de carbono com sensores FBG integrados com objetivo de monitorar a andadura de equinos e evitar patologias relacionadas com o casco do animal.

Em DE PELEGRIN et al. (2020) os autores desenvolveram um sensor utilizando fibra ótica integrado em material compósito de fibra de carbono para medições dinâmicas de deformação e temperatura em estator de máquinas elétricas rotativas, sendo analisado os resultados em espectro de frequência e identificado os picos de frequências relacionados com defeitos em rolamentos neste tipo de máquinas elétricas.

Neste trabalho pretende-se demonstrar a sensibilidade para detecção do nível de forma indireta, com base na pressão exercida pela coluna de líquido no diafragma, sendo que os resultados foram interpretados por degraus. Este sensor poderá ser utilizado para fins industriais em processos de controle de nível de diversos tipos de equipamentos e fluidos.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sensor para medição de nível de líquidos, utilizando uma FBG inserida em um diafragma em fibra de carbono (PRFC) possuindo uma segunda FBG instalada no dispositivo suporte para compensação da temperatura.

1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar os objetivos propostos serão realizadas as etapas citadas abaixo:

- Realizar o projeto e montagem do dispositivo suporte para o sensor;
- Realizar o encapsulamento da FBG do sensor utilizando Polímero Reforçado por Fibras de Carbono (PRFC);
- Realizar a caracterização do sensor de nível;
- Realizar o encapsulamento da FBG para compensação de temperatura utilizando tubo de polietileno;

- Realizar a caracterização da sensibilidade cruzada devido a variação de temperatura no interior do dispositivo;
- Realizar os ensaios com o sensor e validar os resultados encontrados.

1.3 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 1 é apresentada a Introdução, a motivação e os objetivos desta dissertação. O Capítulo 2 contempla a Fundamentação Teórica do trabalho, demonstrando tipos de sensores de nível, conceitualizando as redes de Bragg em fibras ópticas e técnicas de encapsulamento.

O desenvolvimento do projeto, com detalhamento da montagem do sensor, descrevendo os materiais e métodos empregados estão apresentados no Capítulo 3, que também detalha os ensaios realizados para coleta dos dados, e caracterização do funcionamento do sensor.

No Capítulo 4 é apresentada a análise, as discussões e as conclusões acerca dos resultados alcançados. Neste capítulo também são expostas as propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica sobre os métodos de medição de nível de líquidos, bem como os conceitos sobre o funcionamento das redes de Bragg em fibra óptica, as equações que regem a propagação dos feixes de luz no núcleo da fibra e as alterações do comprimento de onda de Bragg devido as perturbações externas como temperatura e deformação por tensão longitudinal.

2.1 Medição de Nível de Líquidos

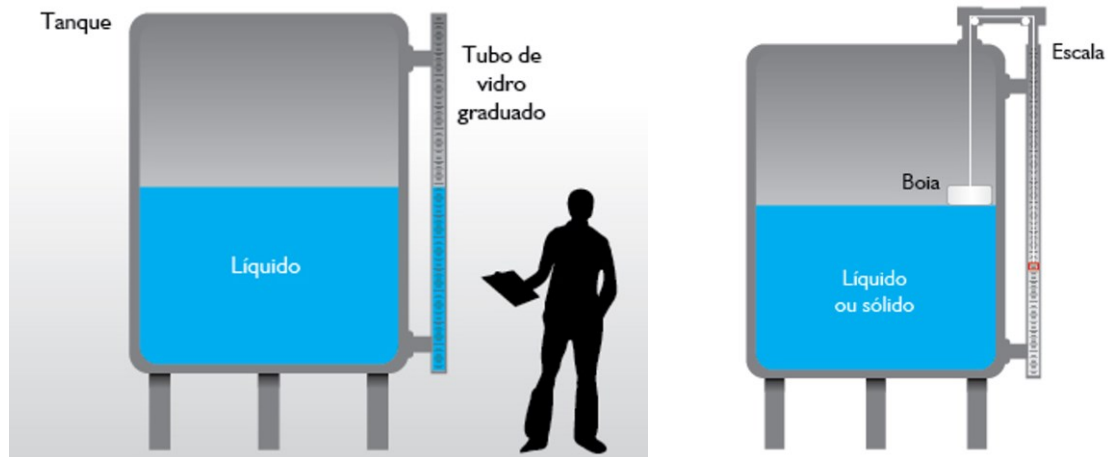
A medição de nível de líquidos pode ser realizada por dois métodos: diretos e indiretos. O método direto é baseado na aferição entre a distância entre a superfície do líquido e o fundo do tanque. No método indireto são utilizadas técnicas de medição de grandezas que possuem relacionamento com nível, entre elas capacitância, condutância, pressão, empuxo, dentre outras (MORRIS; LANGARI, 2012).

Em algumas aplicações, o contato do sensor com o líquido pode interferir na leitura, devido alterações nas características do sensor provocadas pelo contato. Nestes casos devem ser desenvolvido um método para encapsulamento, utilizando material que seja inerte ao líquido mensurado (LOIZOU; KOUTROULIS, 2016).

2.1.1 Medição por Métodos Diretos

Um método tradicional utilizado para medição de nível de forma direta é a utilização de uma régua graduada, adotando como referência o fundo do reservatório como ponto zero e a marca provocada pela superfície do líquido na régua corresponde a leitura do nível. Outra forma de realizar a medição de forma direta e com baixo custo é utilizando uma vareta metálica graduada, que deve ser inserida e retirada do reservatório, ficando o corpo da vareta marcada pelo líquido. Esta técnica é utilizada para medição de nível de reservatórios de pequena profundidade, como no caso de óleo de motores automobilísticos (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011). Um exemplo deste método é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Medição de Nível por Método Direto



Fonte: Adaptado de IMD (2022)

Estes métodos diretos e de baixo custo não possuem interface com circuitos de medição, sendo uma limitação importante, que impede a utilização em monitoramento e controle remoto de sistemas complexos (LOIZOU; KOUTROULIS, 2016). Um tipo de sensor adotado para monitoramento de nível é baseado na utilização de flutuadores, que consiste na emissão de um sinal elétrico proporcional a variação da superfície do líquido, método utilizado para medição de nível de tanques de combustíveis de veículos e no controle de processos quando conectados às chaves mecânicas ou magnéticas para emissão de sinais discretos. Os pontos negativos destes sensores são a manutenção frequente e sensibilidade às variações das superfícies provocadas por turbulências (ROSENBERRY, 1990).

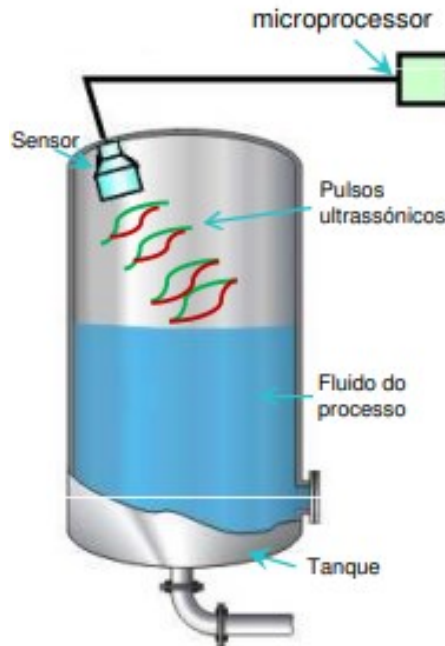
2.1.2 Medição por Métodos Indiretos

Diferente dos sensores que utilizam métodos diretos que necessitam estar em contato com o líquido, a medição indireta utiliza meios de aferição não invasivos ao fluido.

Um exemplo deste método é o sensor ultrassônico, que possui elementos emissor e receptor de sinal, cujo princípio de funcionamento está baseado no tempo que o sinal ultrassônico leva para percorrer a distância entre emissor e receptor, adotando a velocidade do som e a posição do sensor como parâmetros para cálculo do nível do líquido (TERZIC; NAGARAJAH; ALAMGIR, 2010). Estes sensores ultrassônicos apresentam desvantagens, no caso de ocorrer formação de espuma na superfície do líquido que pode ocasionar erro na leitura bem como as turbulências no líquido podem causar flutuações nas medições, além do fato desses sensores serem

sensíveis a alterações de temperatura do líquido (MEL'NIKOV; IVANOV; TEPLYASHIN, 2016). Na Figura 2 é exibida o desenho esquemático para medição utilizando método indireto ultrassônico.

Figura 2 - Medição de Nível por Método Indireto (Sensor Ultrassônico)



Fonte: Adaptado de UFF (2022)

Como alternativa ao ultrassom existe a tecnologia que utiliza o radar, possuindo o princípio de funcionamento semelhante ao ultrassom, porém com a emissão de onda eletromagnética de alta frequência, que torna este tipo de sensor pouco sensível à presença de espuma e a variação de temperatura. As desvantagens deste método é o alto custo, baixa precisão e a dificuldade de instalação (STATECZNY, 2016).

Outro tipo de sensor que utiliza o método indireto é o capacitivo. São largamente aplicados, devido ao baixo custo, ampla faixa de medição, fácil construção e instalação. O princípio de funcionamento está baseado na capacitância, onde as paredes do tanque tornam-se uma placa do capacitor e uma haste metálica instalada no centro do tanque atua como a segunda placa, com a variação do líquido no interior do tanque provocando a variação da constante dielétrica, sendo este sinal transformado em informação referente ao nível do líquido no interior do sistema (LOIZOU; KOUTROULIS, 2016).

Estes tipos de sensores capacitivos possuem uma resposta linear, estabilidade, alta sensibilidade, baixo custo e simples instalação, porém apresentando desvantagens como, sensibilidade a variações na densidade do líquido e na temperatura, e o acúmulo de resíduos na haste provoca erros de medição além do fato de não funcionar para líquidos semicondutores (CHETPATTANANONDH et al., 2014). Na Figura 3 é apresentado o desenho esquemático para medição utilizando método indireto capacitivo.

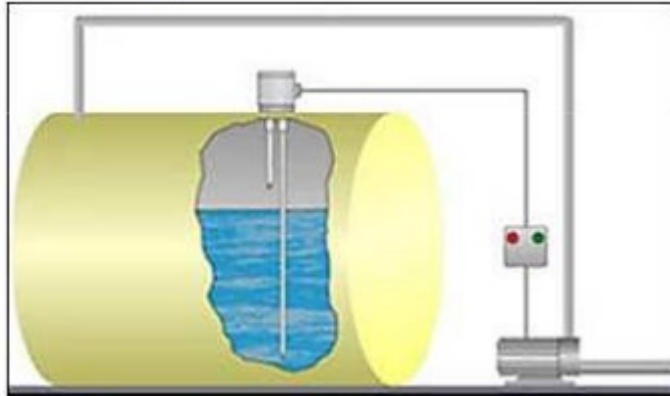
Figura 3 - Medição de Nível por Método Indireto (Sensor Capacitivo)



Fonte: Adaptado de UFF (2022)

Um tipo de sensor utilizado que possui a característica de ser insensível à variação de temperatura e ser de fácil construção com baixo custo é a medição de nível por condutividade, sendo o funcionamento baseado na condutividade de um sinal elétrico entre eletrodos de diferentes tamanhos que são instalados na tampa do reservatório. Conforme os eletrodos entram em contato com líquido, passam a conduzir corrente elétrica. A desvantagem deste tipo de sensor está na necessidade do líquido ser condutor de eletricidade e as leituras ocorrem por sinais discretos (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011). Na Figura 4 é apresentado o desenho esquemático para medição utilizando método indireto por condutividade.

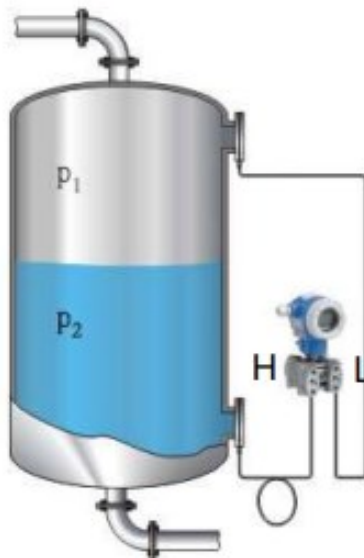
Figura 4 - Medição de Nível por Método Indireto (Sensor por Condutividade)



Fonte: Adaptado de UFF (2022)

No setor industrial, destaca-se a aplicação de outro tipo de sensor que utiliza o método indireto, o sensor hidrostático. Neste caso, a variação da pressão da coluna de água no fundo do tanque sobre o sensor provoca um sinal elétrico que se refere ao valor do nível do líquido. Esta pressão hidrostática é dependente da densidade do líquido, da aceleração da gravidade e da altura da coluna do líquido (YULIZA et al., 2016). Na Figura 5 é demonstrado o desenho esquemático para medição utilizando método indireto do tipo hidrostático.

Figura 5 - Medição de Nível por Método Indireto (Sensor Hidrostático)



Fonte: Adaptado de UFF (2022)

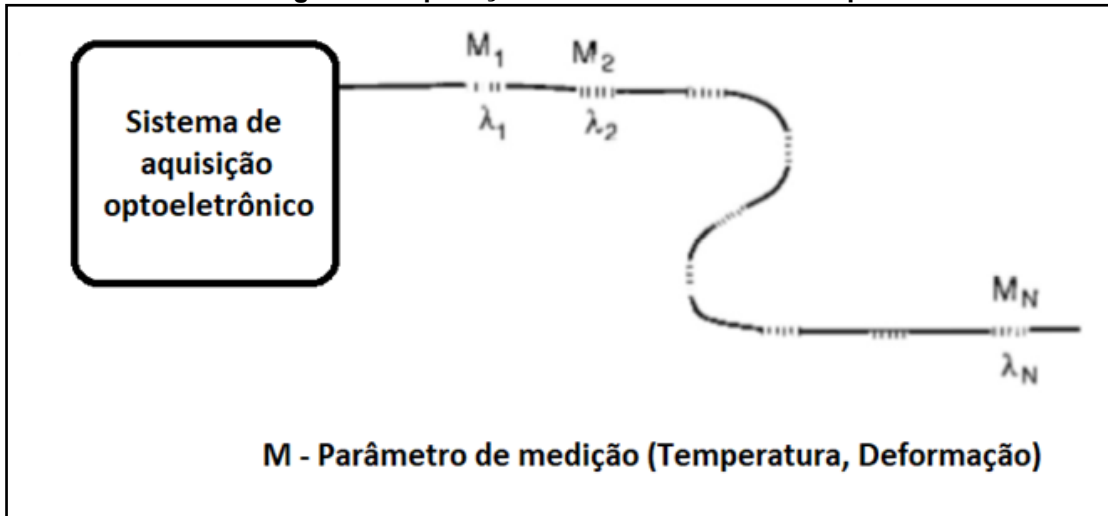
2.2 Fibra Óptica como Sensor

São vários os segmentos da indústria nos quais as redes de Bragg em fibra óptica (FBG) são aplicadas, como exemplo, utilizadas para sensoriamento embarcado de estruturas, onde os dados de temperatura e esforços mecânicos são coletados e monitorados em tempo real. Nesta aplicação, as FBGs multiplexadas, acoplando-as aos materiais constituintes da estrutura. Podem ser aplicadas para a realização do sensoriamento de fenômenos químicos, de pressão e até mesmo acelerômetro em processos de medição de deslocamento e vibração (KERSEY, 1997).

A multiplexação de FBGs é possível devido a características do seu comprimento de onda, o que permite que cada sensor seja atribuído a uma faixa diferente do espectro disponível da fonte óptica, e que esta faixa possa ser atribuída a um local espacial específico (OTHONOS, 1997). Esta multiplexação pode ser usada para suprir umas das maiores limitações dos sensores a FBG, a sensibilidade simultânea à temperatura e às deformações. A sensibilidade pode ocasionar problemas em sensores criados para monitorar deformações, já que a mudança de temperatura ao longo da fibra também interfere no comprimento de Bragg (KERSEY, 1997).

Um método para diferenciar os efeitos ocorridos devido a mudança de temperatura ou deformação é a utilização de um cordão de FBG multiplexado, conforme demonstrado na Figura 6. Nesta aplicação, o cordão pode ser instrumentado de tal forma que os dois sensores (M1 e M2) possam sofrer variação de temperatura semelhante, o que compensaria a consequente variação do comprimento de onda de Bragg λ_1 e λ_2 . Mantendo-se uma delas estável, é possível usar a diferença entre elas como indicador de deformação (KERSEY, 1997).

Figura 6 - Aplicação de um cordão FBG multiplexado



Fonte: Adaptado de KERSEY (1997)

2.3 Redes de Bragg em Fibra Óptica

Com a descoberta da fotossensibilidade em fibras ópticas em 1978 por Hill e sua equipe (HILL et al., 1978), ocorreu um grande avanço no estudo e desenvolvimento dos sensores em fibras classificadas como Redes de Bragg em fibras ópticas (FBG).

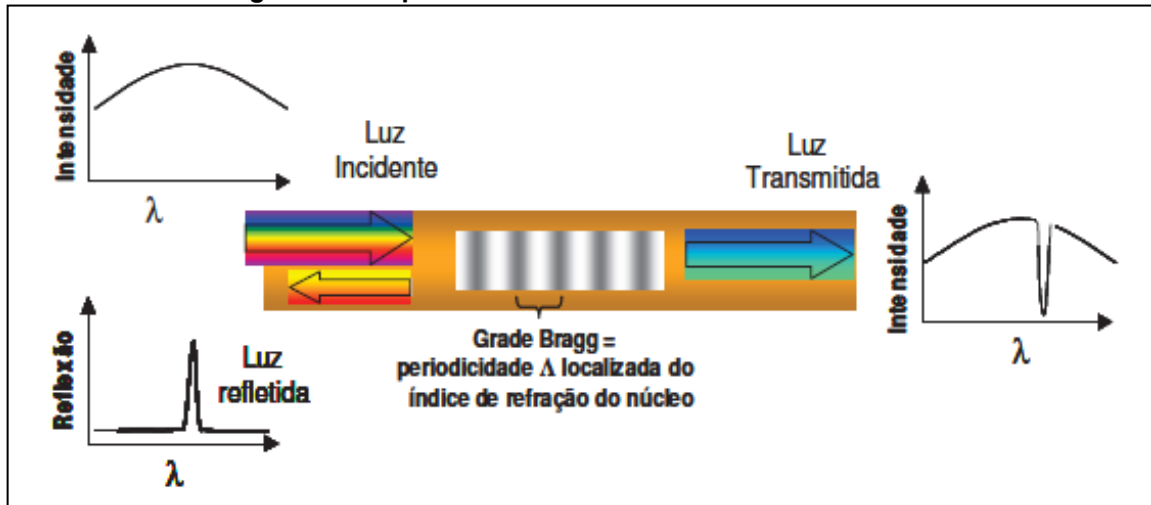
As Redes de Bragg em fibra óptica são caracterizadas por uma alteração periódica no índice de refração do núcleo da fibra de forma perpendicular ao longo do eixo longitudinal da fibra, com um período constante. Desta forma, o sensor FBG possui seu princípio de funcionamento baseado na modulação deste índice de refração que ocorre devido a perturbações de natureza térmicas ou por esforços mecânicos (HILL et al., 1978).

O comprimento de onda próximo ao centro do espectro refletido, chamado de comprimento de onda de Bragg, é dado pela equação:

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

Na Figura 7 podemos visualizar uma fibra óptica que possui uma FBG gravada em seu núcleo. Na mesma figura também está representada os espectros refletidos e transmitidos do feixe de luz ao incidir sobre a rede de Bragg. (OTHONOS, 1997).

Figura 7 - Esquemático do Funcionamento de uma FBG



Fonte: Adaptado de OTHONOS (1997)

Quando a condição de Bragg é satisfeita, ocorre uma contribuição da luz refletida em cada plano da rede em direção contra o feixe de luz propagante formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central, se comportando de forma similar à um filtro seletivo e o espectro de luz transmitido comporta-se como um filtro rejeita faixa (OTHONOS, 1997).

Em 1993, Hill e sua equipe reconheceram que a sensibilidade das redes de Bragg dependia das condições do ambiente, sobretudo às variações de temperatura e aos esforços mecânicos aplicados sobre a fibra.

Contudo, o comprimento de onda de Bragg λ_B apresenta dependência de dois parâmetros, o índice de refração efetivo e do período da rede. A mudança de um desses dois parâmetros pode ser causada por deformações mecânicas Δl e pela variação da temperatura ΔT , sendo regida pela Equação 2 (KERSEY, 1997):

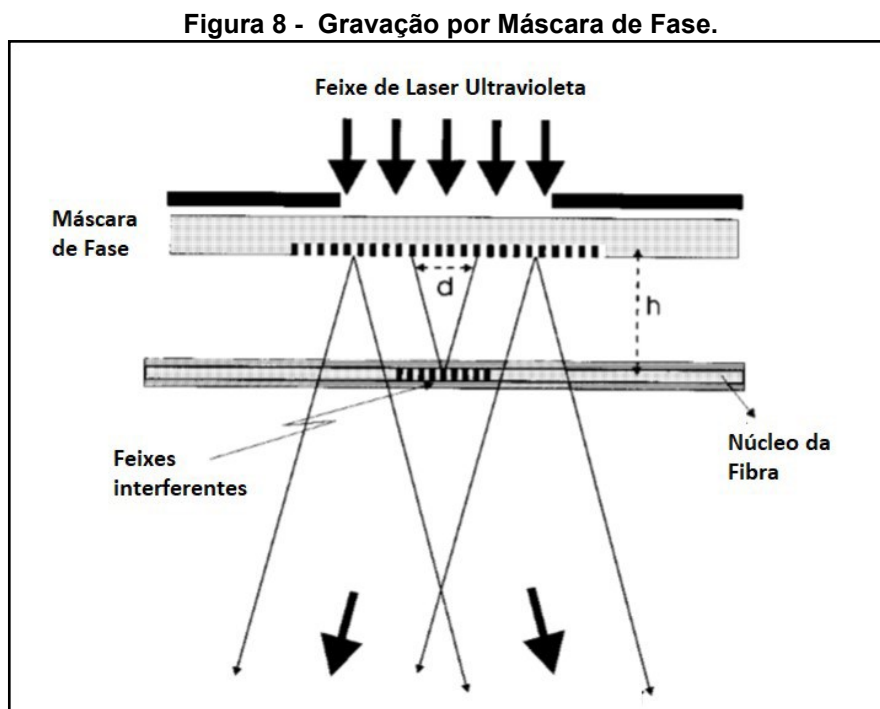
$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial \eta_{eff}}{\partial l} + \eta_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial \eta_{eff}}{\partial T} + \eta_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2)$$

O primeiro termo em (2) está associado ao deslocamento de devido à alteração do índice de refração, denominada de constante fotoelástica, e do comprimento da FBG ocasionado por deformação mecânica. Para o segundo termo em (2) o deslocamento está associado ao coeficiente de expansão térmica da fibra e ao coeficiente termo ótico, sendo que o coeficiente termo ótico é predominante sobre o coeficiente de expansão térmica da fibra.

Desta forma, a FBG apresenta sensibilidade cruzada à deformação mecânica e à temperatura. Sendo assim, quando a FBG está sujeita tanto a variações de temperatura quanto deformação não é possível dissociar qual a parcela de contribuição de cada uma dessas variáveis sobre o valor de λ_B quando é utilizada apenas uma FBG. Devido a esta característica, quando o interesse é medir apenas temperatura, deve-se utilizar alguma forma para que a FBG não sofra deformações mecânicas. Logo, deve-se utilizar algum tipo de encapsulamento para que a FBG não fique sujeita a deformações mecânicas, sendo necessária a utilização de algum tipo de encapsulamento.

A gravação de redes de Bragg é realizado com a modulação e inscrição de forma periódica no núcleo da fibra em uma escala micrométrica. Dentre as técnicas de gravação destaca-se as técnicas ponto a ponto, a interferométrica e a de máscara de fase (HILL et al., 1993; OTHONOS, 1997).

O método de gravação por máscara de fase utiliza a radiação ultravioleta (UV) de um feixe de luz emitido pelo laser que atravessa uma máscara de fase e incide no núcleo da fibra. Após a modulação, dois feixes de ordens -1 e +1 irão se sobrepor causando uma interferência sobre o núcleo da fibra. Na figura 8 é apresentada o desenho esquemático de gravação por máscara de fase.



Fonte: Adaptado de OTHONOS (1997)

Das vantagens da utilização de FBG como sensores óticos destacam-se: a baixa perda na transmissão, imunidade a interferência eletromagnética, passividade elétrica, dimensão e peso reduzido. Devido as estas características, estes tipos de sensores podem ser utilizados para monitoramento de sistemas em ambientes agressivos (áreas classificadas, ambientes com interferência eletromagnética etc.) bem como na construção civil e diversos ramos da indústria (OTHONOS, 1997).

2.4 Medição de Nível de Líquidos Utilizando Fibra Óptica

A utilização das fibras ópticas na medição de nível está sendo difundida nos trabalhos acadêmicos. Esta tecnologia utiliza um emissor e um receptor de luz, uma fibra óptica e uma unidade para processamento do sinal. O feixe de luz ao percorrer a fibra entre emissor e receptor pode sofrer atenuação devido variações de parâmetros físicos, como temperatura e pressão, que tem capacidade de causar mudança na sensibilidade da fibra, sendo esta atenuação interpretada pela unidade de processamento (LAI et al., 2012).

Em 1997, RAATIKAINEN et al. desenvolveram o primeiro sensor de nível com utilização de fibra óptica como o princípio de funcionamento baseado na variação do índice de refração do meio.

Em 2014, GONG et al. desenvolveram um sensor interferométrico modal de fibra óptica utilizando o princípio da polarização do sinal de luz. Os resultados apresentaram um sensor com alta sensibilidade e robustez, possuindo uma fabricação simples, porém sensível à variação de temperatura.

Um método utilizando a autoimagem de interferência multimodal (MMI) foi proposto por RAN et al. (2016) através de simulação baseada em BPM (Beam Propagation Method). Com os resultados verificou-se que o sensor possuía alta linearidade e resolução, sendo sensível a variações no índice de refração do líquido.

No sensor desenvolvido por HER et al. (2021), foi utilizado a FBG para medição de pressão e nível de água, sendo a fibra aderida em um diafragma de epóxi, e os ensaios foram realizados com três espessuras diferentes para o diafragma.

Em 2022, MORAIS et al, desenvolveram um sensor de nível de líquido utilizando fibra ótica baseado em um par de redes de Bragg de fibra (FBG), embutidas em um diafragma circular de borracha de silicone. Os testes de aumento de pressão e nível de líquido mostraram que a inserção de duas FBGs no diafragma resultou em um sistema com maior linearidade do que um sensor com FBG individual.

Uma alteração na modulação do índice de refração efetivo η_{eff} e no período Λ causado por uma tensão externa ε e por variação da temperatura ΔT , causa uma mudança no comprimento de onda de Bragg λ_B conforme a Equação (3):

$$\Delta\lambda_B = [(1 - p_e) \varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T]\lambda_B \quad (3)$$

onde p_e corresponde a constante de tensão ótica, α é o coeficiente de dilatação térmica e ζ representa o coeficiente óptico-térmico da fibra ótica.

O comprimento de onda de Bragg do sensor FBG sofre alteração devido à temperatura e deformação, e considerando temperatura constante, desta forma respeitando a relação:

$$\Delta\lambda = \lambda_B (1 - p_e) \quad (4)$$

Utilizando-se de um diafragma circular fixado em suporte e submetido a uma pressão uniforme proveniente de uma coluna de água, como realizado nos trabalhos apresentados por HER et al. (2021) e MORAIS et al. (2022), verifica-se que a tensão sofrida pelo diafragma pode ser transferida para o sensor FBG, respeitando a equação:

$$(\varepsilon_r)_{r=0} = \frac{3p}{8Et^2} (1 - \nu^2)R^2 \quad (5)$$

onde E corresponde ao módulo de Young, ν a razão de Poisson, R e t são o raio e espessura do diafragma, respectivamente.

Substituindo a equação (5) na equação (4) verifica-se que a mudança do comprimento de onda de Bragg no sensor FBG respeita a equação:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) \frac{3p}{8Et^2} (1 - \nu^2)R^2 \quad (6)$$

Desta forma, a pressão pode ser determinada por meio da medição do deslocamento do comprimento de onda de Bragg usando a seguinte relação.

$$P = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \frac{8Et^2}{3(1-\nu_e)(1-\nu^2)R^2} \quad (7)$$

Contudo, a sensibilidade do sensor FBG depende da deflexão do diafragma causada pela pressão hidrostática (p) causada pelo peso do líquido, que é em função da altura (h) e densidade do líquido (ρ), conforme a equação:

$$p = \rho gh \quad (8)$$

A sensibilidade do sensor FBG para a pressão referente a coluna de água é definido com base na equação:

$$p_s = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta p} \quad (9)$$

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é apresentado o detalhamento da montagem do sensor, os materiais utilizados e a metodologia dos ensaios realizados para caracterização do sensor. O encapsulamento ocorreu com a inserção da FBG em fibra de carbono do tipo PRFC (Polímeros Reforçados por Fibras de Carbono) formando um diafragma rígido, que sofrerá interferência do peso da coluna de água durante os ensaios do sensor.

3.1 Características da FBG utilizada no projeto

A FBG utilizada neste projeto foi gravada pelo método de máscara de fase, com comprimento de onda de Bragg na faixa de 1.531 nm a 1.552 nm, refletividade de aproximadamente 70 %, largura a meia altura de 0,5 nm, diâmetro da casca de 125 + 1,5 μm e diâmetro externo com revestimento (acrilato) de 250 + 20 μm .

3.2 Características do Interrogador utilizado no projeto

O interrogador utilizado para aquisição do sinal óptico referente ao comprimento de onda de Bragg (λ_B) foi o modelo SM130 da Micron Optics apresentado na Figura 9. Este equipamento possui resolução de 1 pm, faixa de operação de 1510-1590 nm, precisão absoluta de 2 pm, faixa dinâmica de ganho de 25 dB e frequência de amostragem de 100hz (KAVITHA et al, 2021). Os dados medidos foram interpretados e gravados pelo software Catman Easy da HBM.

Figura 9 - Interrogador Óptico SM130 - Micron Optics .



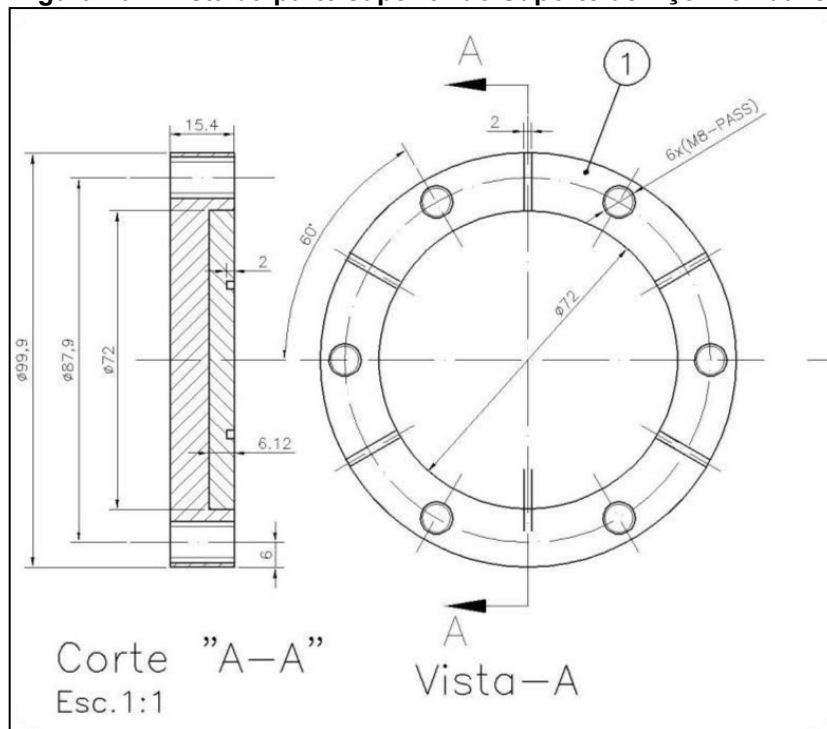
Fonte: Adaptado de KAVITHA et al (2021)

3.3 Desenvolvimento do Diafragma

O diafragma utilizado neste projeto foi fabricado em polímero reforçado por fibras de carbono (PRFC), um compósito que possui características de transferência de energia mecânica apropriadas para medição de temperatura e deformação mecânica. Estes dispositivos formam um composto altamente resistente à tração, podendo ser utilizado como uma membrana em sensores de deformação (CARNEIRO, 2004). O PRFC possui um baixo coeficiente de expansão térmica, aproximadamente $1,10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e o coeficiente de elasticidade depende do número de camadas (MACHADO, 2002).

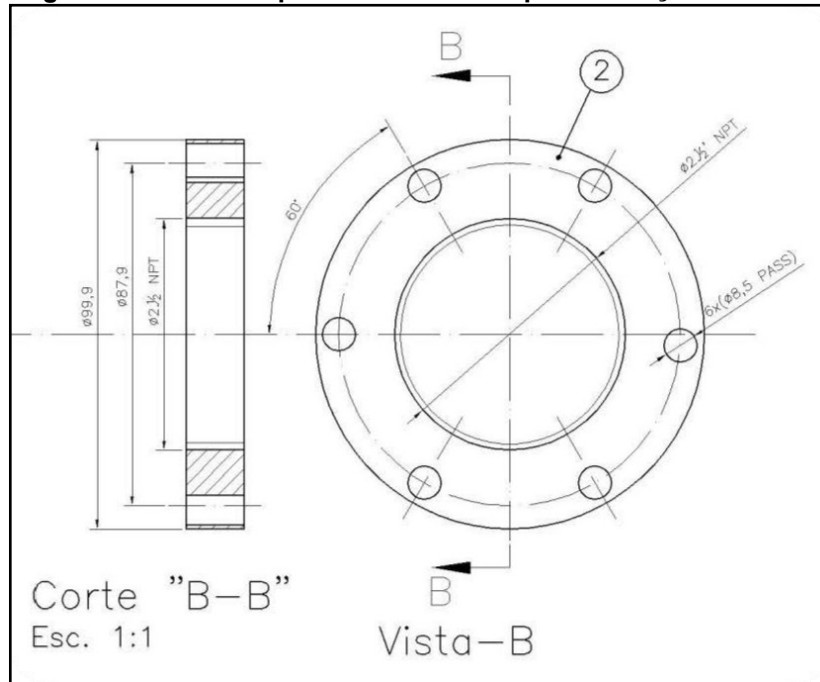
A FBG foi integrada entre as duas camadas de compósito de fibra de carbono do tipo sarja de tecido com utilização de resina epóxi e termo endurecedor. A primeira camada da fibra de carbono foi impregnada com resina epóxi, selada hermeticamente e aquecida para realizar o processo de cura. Uma bomba de vácuo foi usada para remover partículas de ar enquanto o composto foi curado a 120°C por 8 horas. Após montagem das duas camadas, o diafragma com o sensor inserido apresentou uma espessura aproximada de 3 mm. Para fixar o diafragma com a FBG integrada foi utilizado um suporte de aço inoxidável bipartido conforme Figuras 10 e 11:

Figura 10 - Vista da parte superior do Suporte de Aço Inoxidável



Fonte: Autoria própria

Figura 11 - Vista da parte inferior do Suporte de Aço Inoxidável

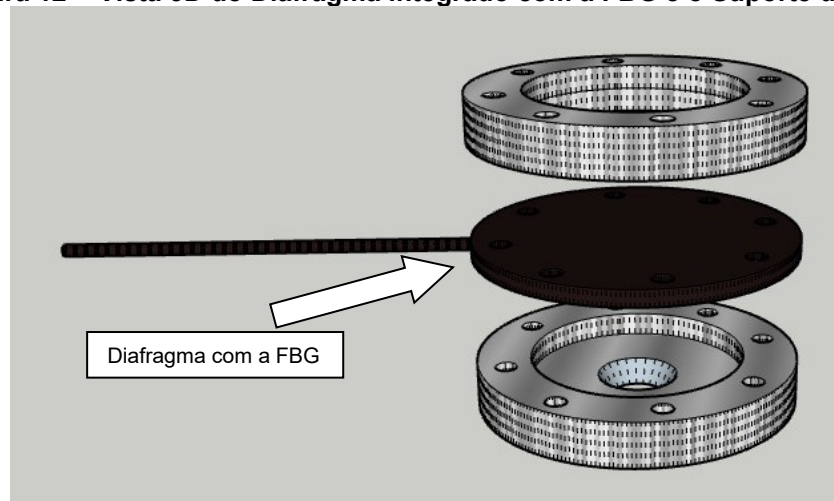


Fonte: Autoria própria

O diafragma foi fixado no suporte utilizando 6 parafusos (M8), constituindo uma célula de carga, a qual estará sujeita a pressão exercida pela coluna de água.

Na Figura 12 é apresentada uma vista em 3D do Sensor FBG e a montagem no suporte de aço.

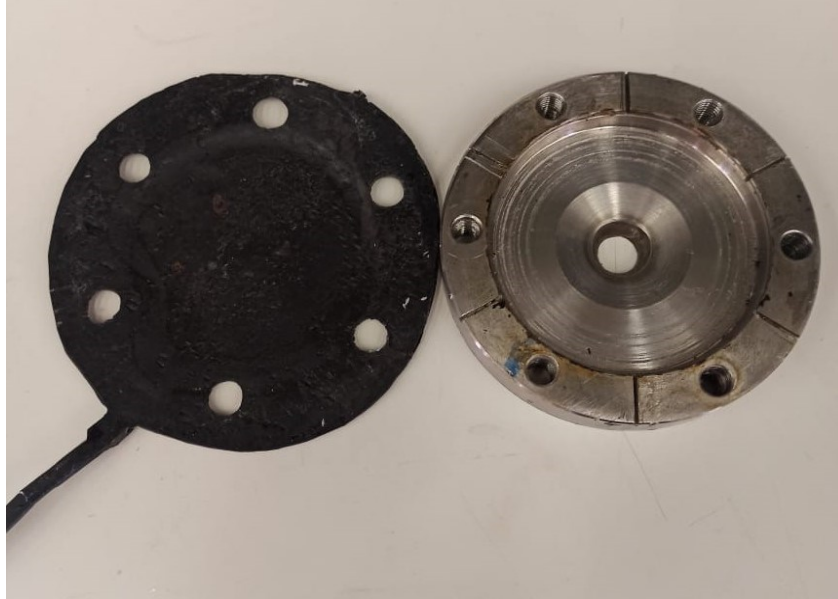
Figura 12 - Vista 3D do Diafragma integrado com a FBG e o Suporte de Aço



Fonte: Autoria própria

Na Figura 13 é apresentado o diafragma fabricado com a FBG inserida e o suporte de aço anterior a montagem do conjunto de teste, aqui denominado de dispositivo.

Figura 13 - Diafragma PRFC integrado com a FBG e o Suporte de Aço



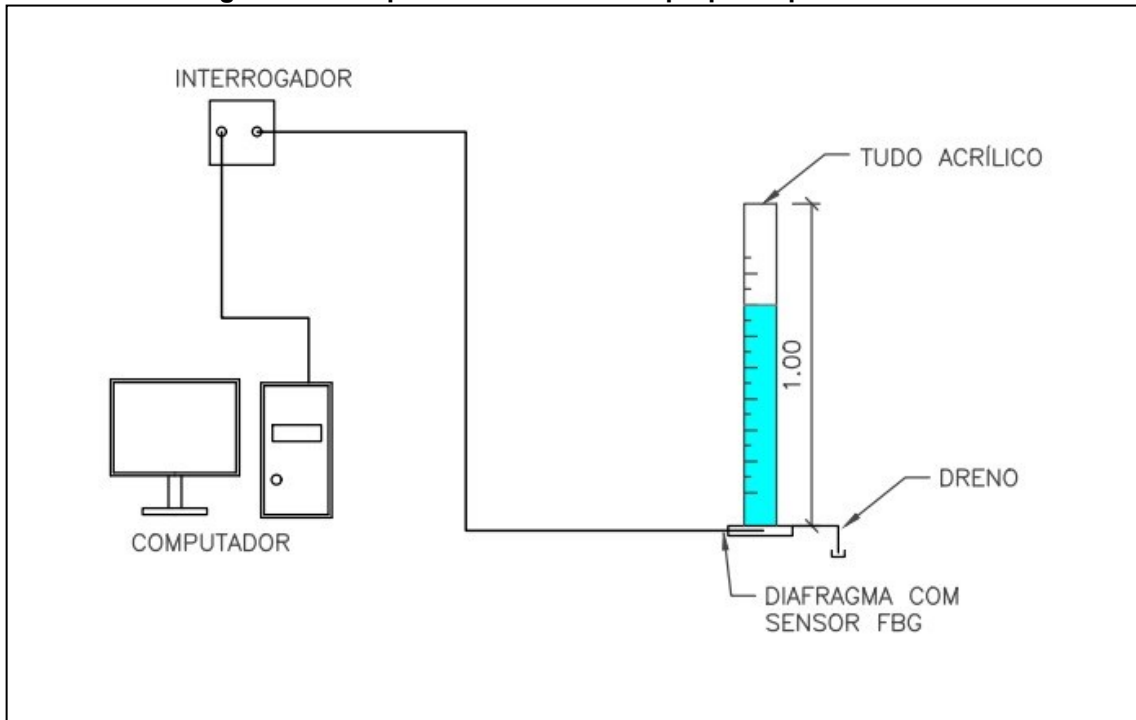
Fonte: Autoria propria

3.4 Desenvolvimento do Dispositivo para Ensaios

Para a realização dos ensaios com o sensor FBG, foi desenvolvido um dispositivo utilizando um tubo acrílico com as dimensões: diâmetro interno de 62 mm e comprimento de 1 m.

Na parte inferior do dispositivo foi instalada uma válvula de dreno e o suporte de aço para alojar o diafragma com a FBG inserida. Desta forma, o sensor irá monitorar a deformação causada pela variação da pressão da coluna de água no interior do dispositivo. Para realizar a compensação da temperatura do sistema, foi instalado uma segunda FBG encapsulada em tubo polietileno na parte inferior do dispositivo, posicionada a aproximadamente 5 cm acima do diafragma contendo o sensor. Na Figura 14 é apresentado o esquemático do sistema proposto.

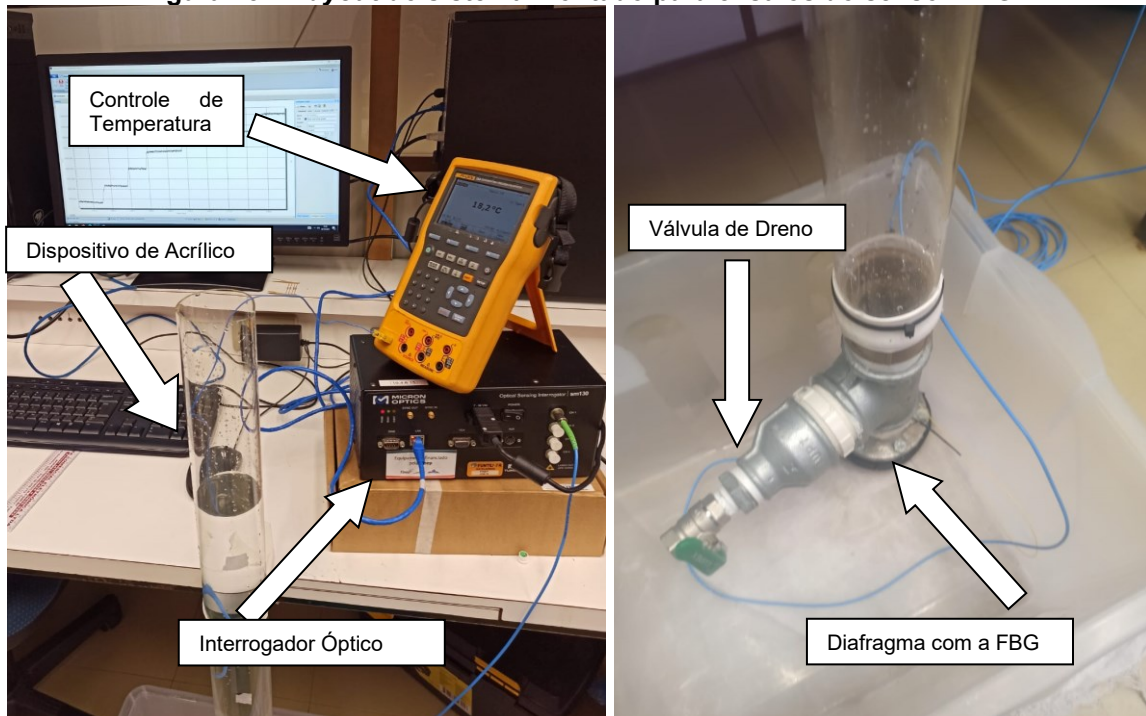
Figura 14 - Esquemático do sistema proposto para ensaios



Fonte: Autoria própria

Na Figura 15 é apresentado o layout do sistema montado para realização dos ensaios do sensor.

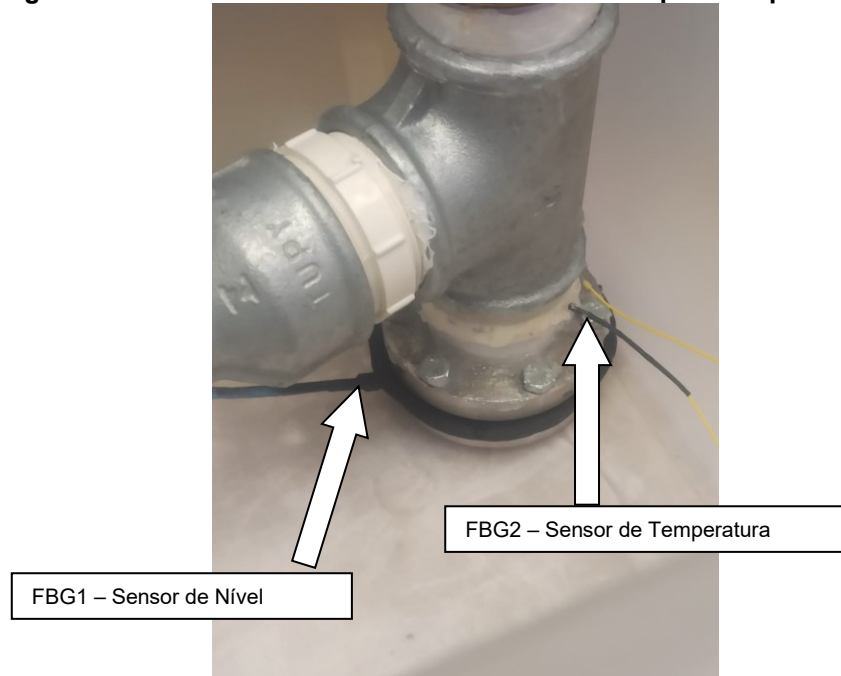
Figura 15 - Layout do sistema montado para ensaios do sensor FBG



Fonte: Autoria própria

Na Figura 16 é apresentado o detalhamento do posicionamento da FBG1 (Sensor de Nível) e FBG2 (Sensor para Compensação da Temperatura).

Figura 16 - Posicionamento da FBG1 e FBG2 no dispositivo para ensaios



Fonte: Autoria própria

3.5 Calibração do Sensor

No processo de calibração foi possível perceber a sensibilidade e o tempo de resposta do sensor, bem como verificar a existência de histerese após os procedimentos de enchimento e esvaziamento do sistema.

Para realizar a mensuração da pressão exercida pelo líquido (utilizado água) no diafragma, foi adotado um padrão de medida, no qual a cada degrau de 10 cm de coluna de água havia uma correspondência com um volume de 300 ml. O preenchimento com água foi realizado de forma controlada, medindo o volume de água com um Becker graduado. Para auxiliar na métrica do experimento foi utilizado uma balança de precisão, onde o volume de 300 ml de água correspondia a um peso de 300 g, sendo necessário considerar um acréscimo de 50 g referente ao peso do Becker, totalizando um peso de 350 g, conforme verificado na Figura 17.

Figura 17 - FBG para Monitoramento da temperatura da água



Fonte: Autoria própria

A temperatura da sala foi controlada por um sistema de ar-condicionado ajustado em 22°C. O processo de calibração foi realizado até ser constatado uma resposta linear do sensor e o equilíbrio da temperatura no interior do dispositivo em aproximadamente 19,2°C.

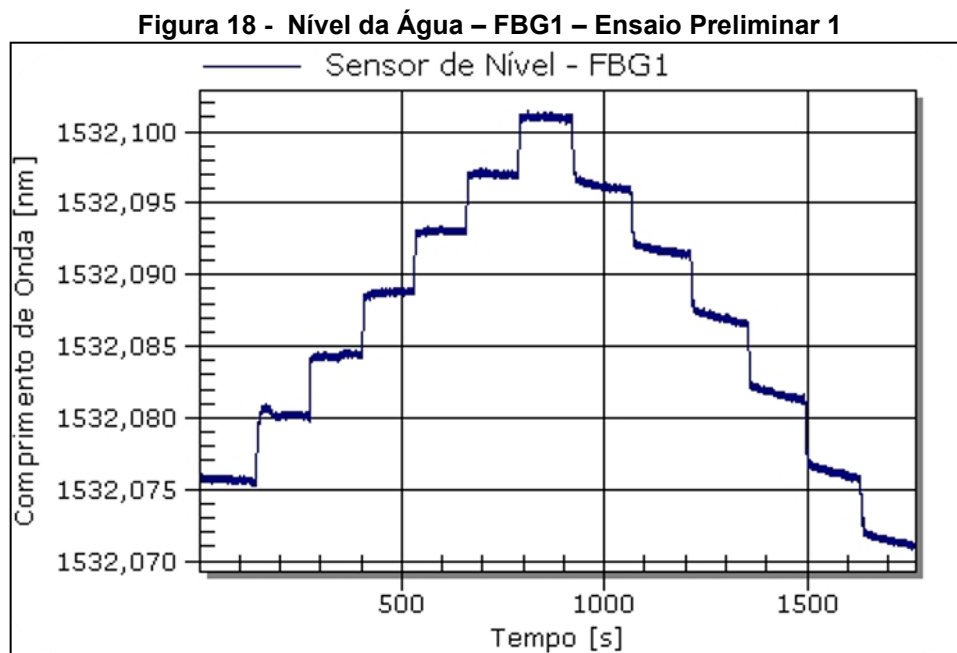
4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos na calibração do sensor de nível (FBG1), avaliando a relação da sensibilidade da força aplicada relativo à coluna de água no dispositivo e a resposta do sensor. Também serão analisados os resultados dos testes com a coluna de água e a constatação de ocorrência de sensibilidade cruzada provocada por alteração de temperatura no interior do dispositivo. Estes ensaios foram realizados em 3 etapas: Ensaios Preliminares, Ensaios de Calibração e Ensaios Finais do Sensor de Nível.

4.1 Ensaios Preliminares

Nesta etapa foram realizados 3 ensaios. Para implementação da vedação entre a conexão do diafragma e as partes superior e inferior do suporte de aço inox, foi utilizado uma borracha (anel oring) com espessura de 5 mm.

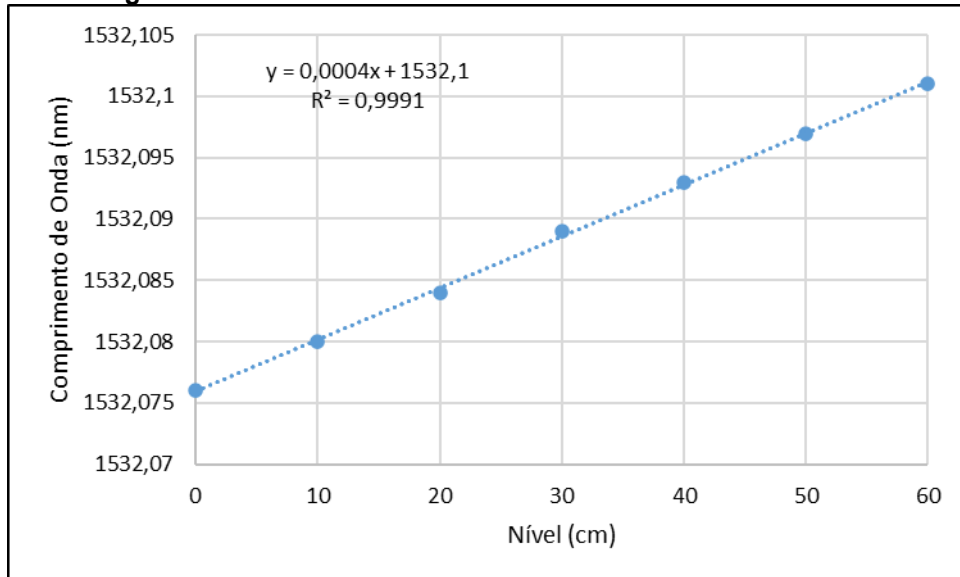
No gráfico da Figura 18 é visualizado o resultado do primeiro experimento considerando as etapas de enchimento e esvaziamento do dispositivo, sendo que os degraus correspondem aos níveis da coluna de água, usando a referência de 10 cm, com estabilização da resposta do sensor por um período de 120s.



Fonte: Autoria própria

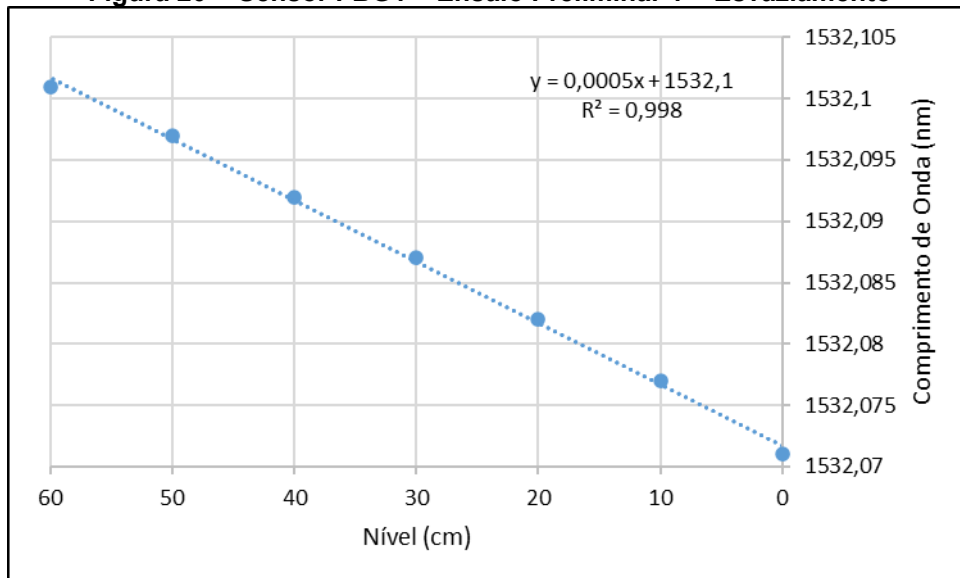
Nos gráficos das Figuras 19 e 20 é possível visualizar que a resposta do sensor de nível (FBG1) em comprimento de onda de Bragg varia de acordo com o aumento e diminuição da coluna de água sobre o diafragma.

Figura 19 - Sensor FBG1 – Ensaio Preliminar 1 – Enchimento



Fonte: Autoria própria

Figura 20 - Sensor FBG1 – Ensaio Preliminar 1 – Esvaziamento

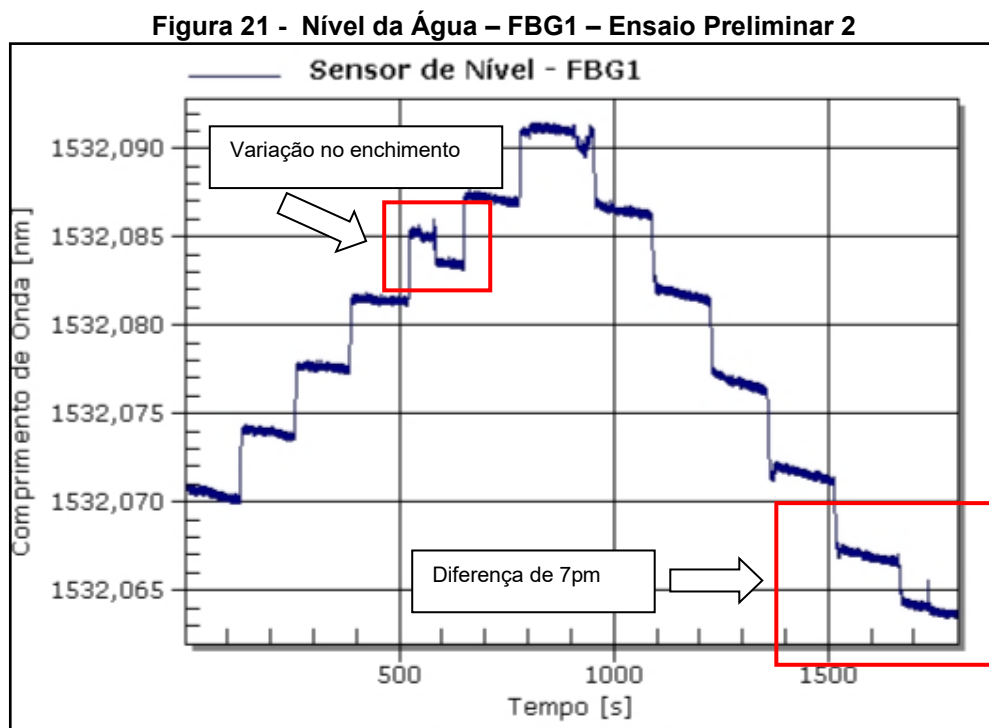


Fonte: Autoria própria

A sensibilidade obtida a partir da variação da pressão sobre o diafragma foi de 0,4 pm/cm durante a manobra de enchimento do dispositivo com água e 0,5 pm/cm durante a manobra de esvaziamento do dispositivo com água. Em relação à linearidade, o R^2 (coeficiente de Pearson) encontrado foi 0,9991 no processo de

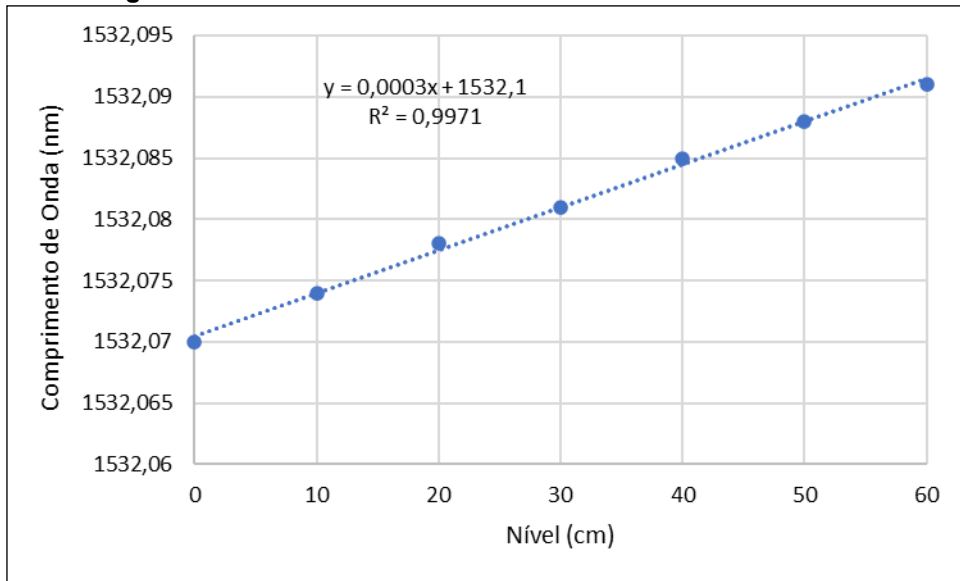
enchimento e 0,9980 no processo de esvaziamento, ambos correspondendo à uma relação linear positiva.

No gráfico da Figura 21 é apresentado resultado do segundo ensaio considerando as etapas e parâmetros adotados no primeiro ensaio preliminar. Verifica-se uma variação no quarto degrau no processo de enchimento proveniente de um erro humano durante a manobra de descarga do líquido no dispositivo, ocasionando a necessidade de drenagem do volume de água excedente para depois retornar o processo de enchimento. Também foi constatado uma diferença de aproximadamente 7 pm entre o ponto inicial do ensaio e o ponto final após a manobra de esvaziamento do dispositivo.



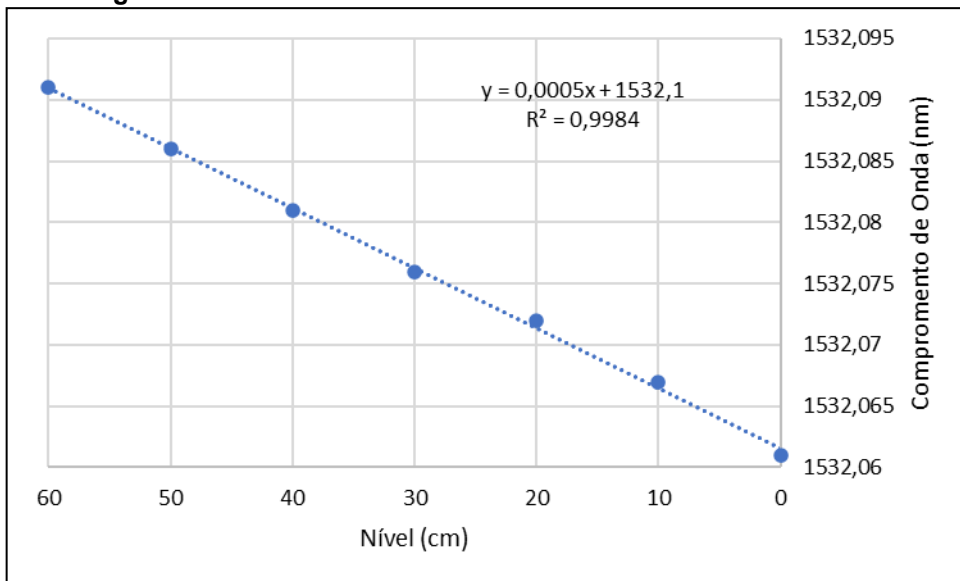
Nos gráficos das Figuras 22 e 23 é possível visualizar que a resposta do sensor de nível (FBG1) em comprimento de onda de Bragg varia conforme ocorre aumento e diminuição da coluna de água de forma semelhante ao ocorrido no primeiro ensaio preliminar.

Figura 22 - Sensor FBG1 – Ensaio Preliminar 2 - Enchimento



Fonte: Autoria própria

Figura 23 - Sensor FBG1 – Ensaio Preliminar 2 - Esvaziamento

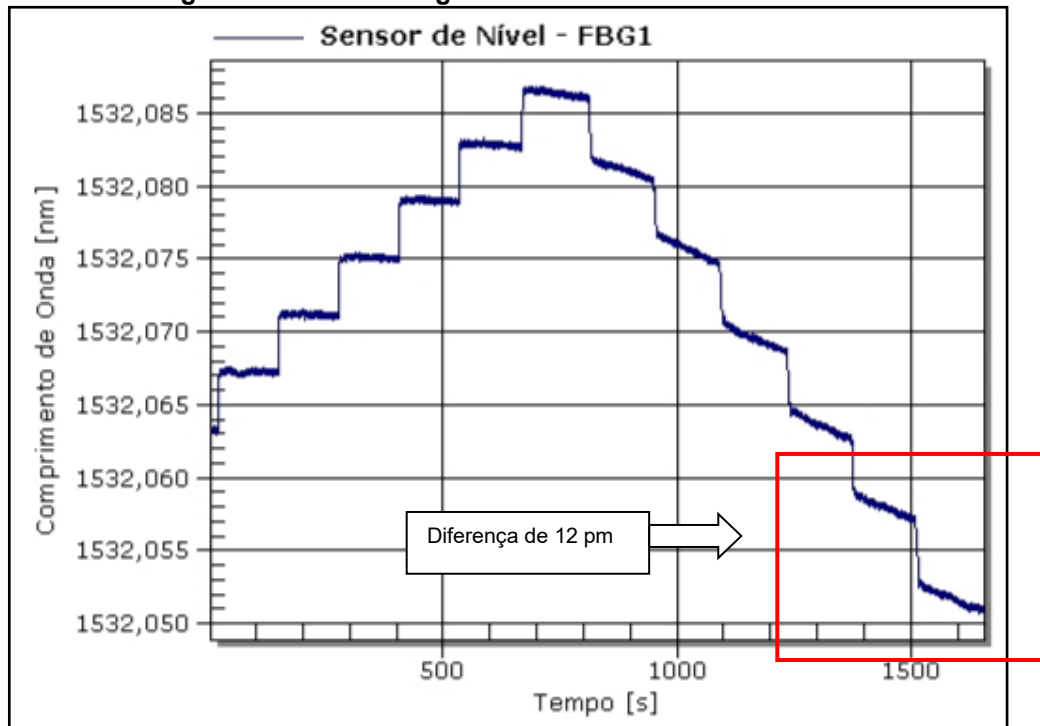


Fonte: Autoria própria

A sensibilidade verificada no segundo ensaio foi de 0,3 pm/cm durante a manobra de enchimento do dispositivo com água e 0,5 pm/cm durante a manobra de esvaziamento do dispositivo com água. Em relação à linearidade, o R^2 (coeficiente de Pearson) encontrado foi 0,9971 no processo de enchimento e 0,9984 no processo de esvaziamento, ambos correspondendo à uma relação linear positiva.

No gráfico da Figura 24 é apresentado resultado do terceiro ensaio considerando as etapas e parâmetros adotados nos ensaios anteriores. Novamente foi constatado uma diferença entre o ponto inicial do ensaio e o ponto final após a manobra de esvaziamento do dispositivo, desta vez na ordem de 12 pm.

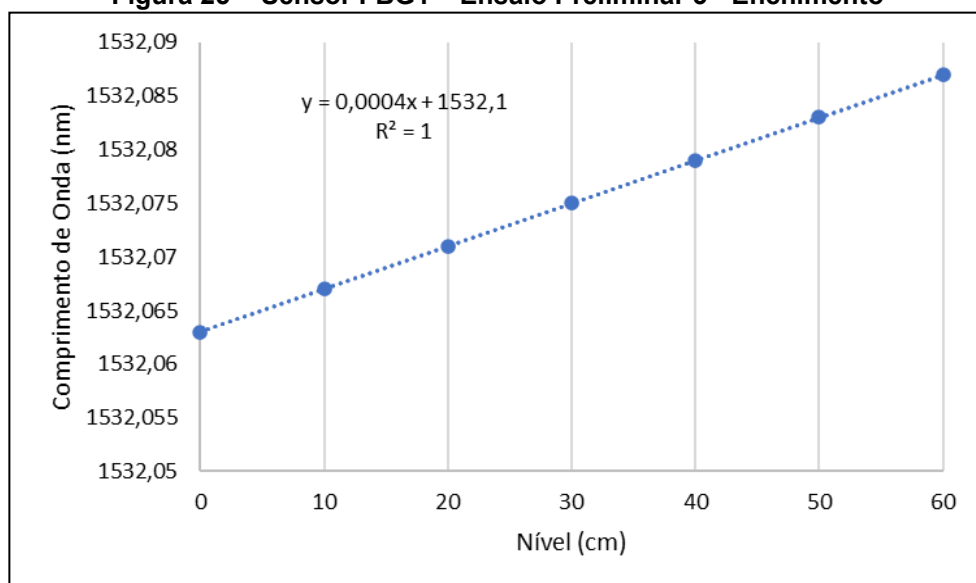
Figura 24 - Nível da Água – FBG1 – Ensaio Preliminar 3



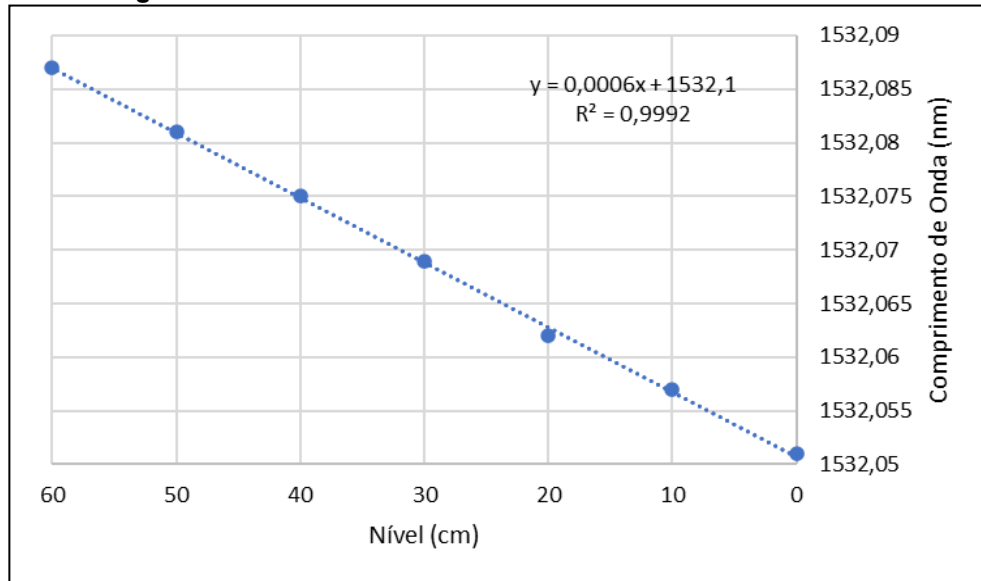
Fonte: Autoria própria

Nos gráficos das Figuras 25 e 26 é possível visualizar que a resposta do sensor de nível (FBG1) em comprimento de onda de Bragg varia conforme ocorre aumento e diminuição da coluna de água de forma semelhante ao ocorrido nos ensaios preliminares anteriores.

Figura 25 - Sensor FBG1 – Ensaio Preliminar 3 - Enchimento



Fonte: Autoria própria

Figura 26 - Sensor FBG1 – Ensaio Preliminar 3 - Enchimento

Fonte: Autoria própria

A sensibilidade verificada no terceiro ensaio foi de 0,4 pm/cm durante a manobra de enchimento do dispositivo com água e 0,6 pm/cm durante a manobra de esvaziamento do dispositivo com água. Em relação à linearidade, o R^2 (coeficiente de Pearson) encontrado foi igual a 1 no processo de enchimento e 0,9992 no processo de esvaziamento, ambos correspondendo à uma relação linear positiva.

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os resultados dos ensaios preliminares, comparando os valores de sensibilidade, coeficiente de correlação linear e desvio padrão para os ensaios durante o procedimento de enchimento e esvaziamento de água no dispositivo.

Tabela 1 - Enchimento da coluna de água – Ensaio Preliminar

Ensaio	Sensibilidade (pm/cm)	Coefficiente de Correlação Linear	Desvio Padrão (pm)
E1	0,4	0,9991	9,10
E2	0,3	0,9971	7,57
E3	0,4	1,0000	8,64

E1 = Primeiro Ensaio; E2 = Segundo Ensaio; E3 = Terceiro Ensaio

Fonte: Autoria própria

Tabela 2 - Esvaziamento da coluna de água – Ensaio Preliminar

Ensaio	Sensibilidade (pm/cm)	Coefficiente de Correlação Linear	Desvio Padrão (pm)
E1	0,5	0,9980	10,81
E2	0,5	0,9984	10,57
E3	0,6	0,9992	13,04

E1 = Primeiro Ensaio; E2 = Segundo Ensaio; E3 = Terceiro Ensaio

Fonte: Autoria própria

O desvio padrão representa uma medida que, quanto maior for o seu valor, maior será a dispersão dos dados, não podendo assumir valores negativos (MARTINS, 2013).

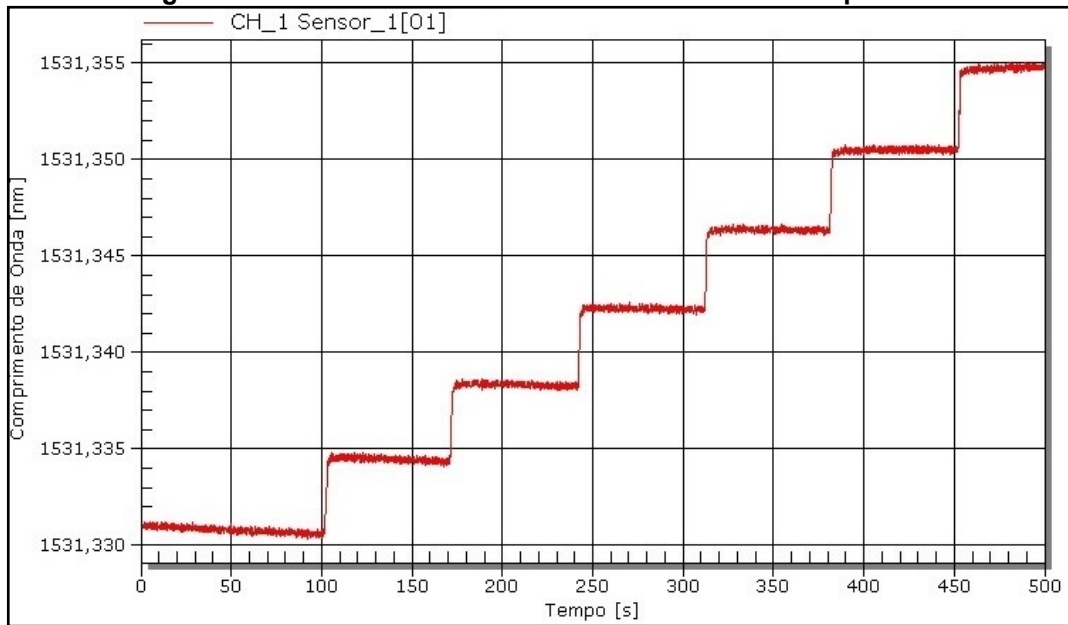
Já o coeficiente de correlação de Pearson (R^2) varia entre os valores de -1 a 1, no qual o sinal na frente do coeficiente representa a direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor do coeficiente indica a força da relação entre as variáveis. Uma correlação de valor igual a zero não teremos relação linear entre as variáveis. Desta forma, quanto mais perto de 1 (independente do sinal) for o valor do coeficiente, maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis, sendo o oposto verdadeiro, quanto mais próximo de zero, menor é a força dessa relação (FIGUEIREDO, 2009).

4.2 Calibração do Sensor

Visando corrigir a diferença encontrada nas leituras de esvaziamento do dispositivo durante os ensaios preliminares, foi alterada a forma de realizar a vedação entre a conexão do diafragma e a parte superior e inferior do suporte de aço inox, utilizando silicone e cola adesiva multiuso do modelo PUFIX.

Na figura 27 é apresentada a resposta do sensor em função do tempo no ensaio de calibração do sensor com aplicação da força peso referente a coluna de água no diafragma utilizando a vedação com silicone e cola adesiva. Neste procedimento, a cada variação da coluna de água em 10 cm corresponde a uma massa de 350 g, o que equivale a um acréscimo de pressão de aproximadamente 98,063 Pa sobre o sensor FBG1. O deslocamento em comprimento de onda de Bragg máximo observado foi de 24 pm após 6 degraus, correspondendo a uma pressão máxima de 588,378 Pa.

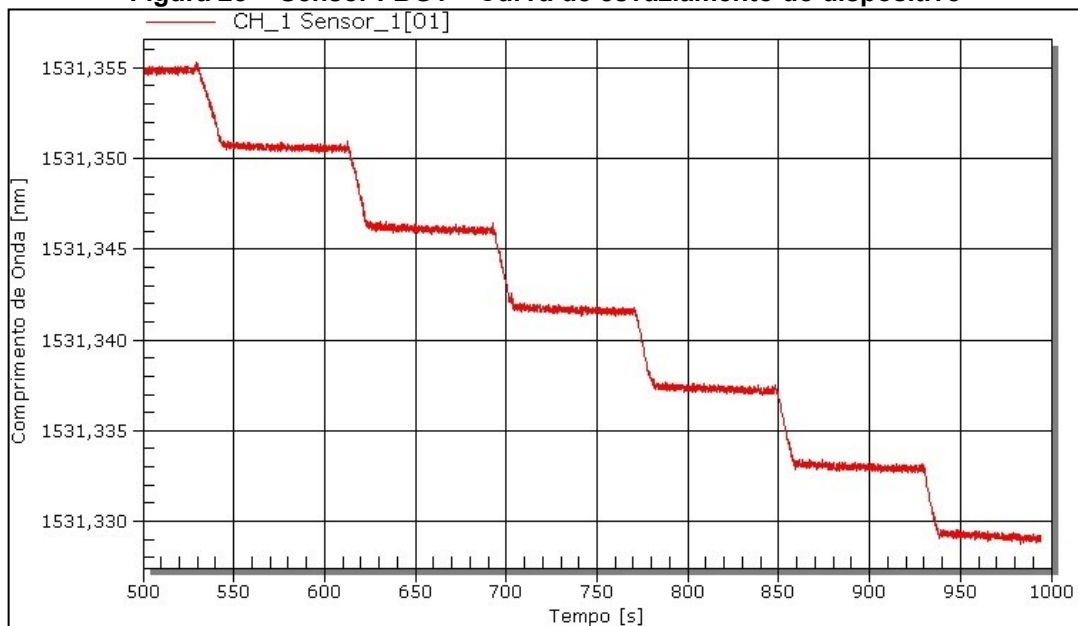
Figura 27 - Sensor FBG1 – Curva de enchimento do dispositivo



Fonte: Autoria própria

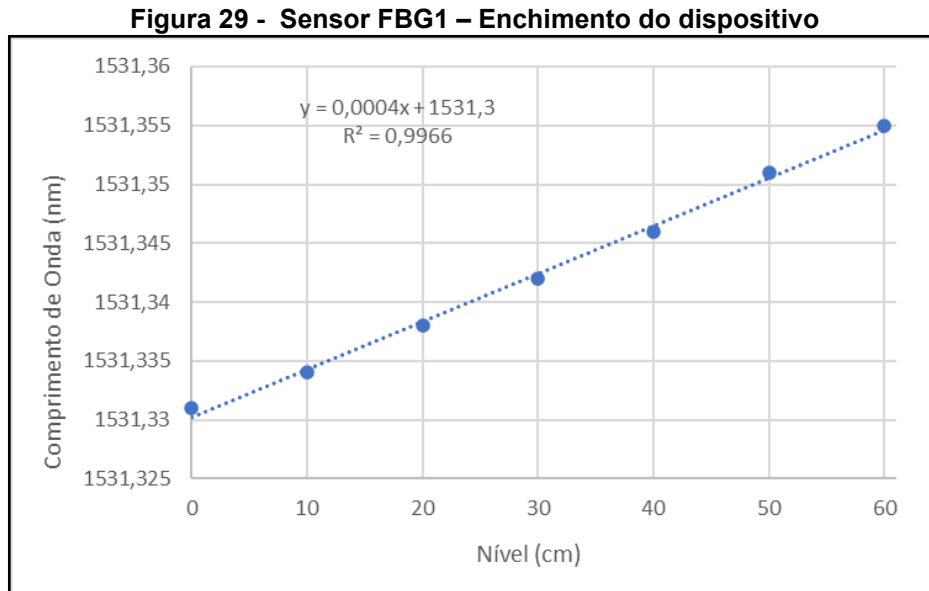
Na figura 28 é observado a resposta do sensor em função do tempo no ensaio de retirada da água da coluna. O deslocamento em comprimento de onda Bragg máximo observado foi de 26 pm após 6 degraus. A diferença de 2 pm no comprimento de onda neste procedimento corresponde a histerese no processo de fechamento da válvula de dreno do dispositivo.

Figura 28 - Sensor FBG1 – Curva de esvaziamento do dispositivo



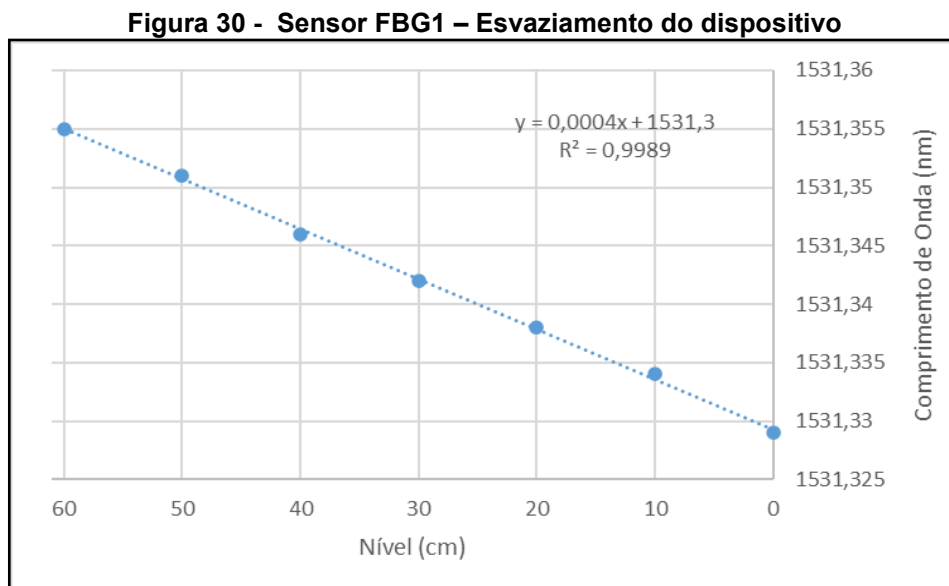
Fonte: Autoria própria

O comprimento de onda de Bragg variou linearmente com o aumento do nível de água no dispositivo, apresentando um coeficiente de Pearson de 0,9966 e sensibilidade de 0,4 pm/cm, correspondendo à deformação longitudinal causada no sensor FBG1, conforme verificado na figura 29.



Fonte: Autoria própria

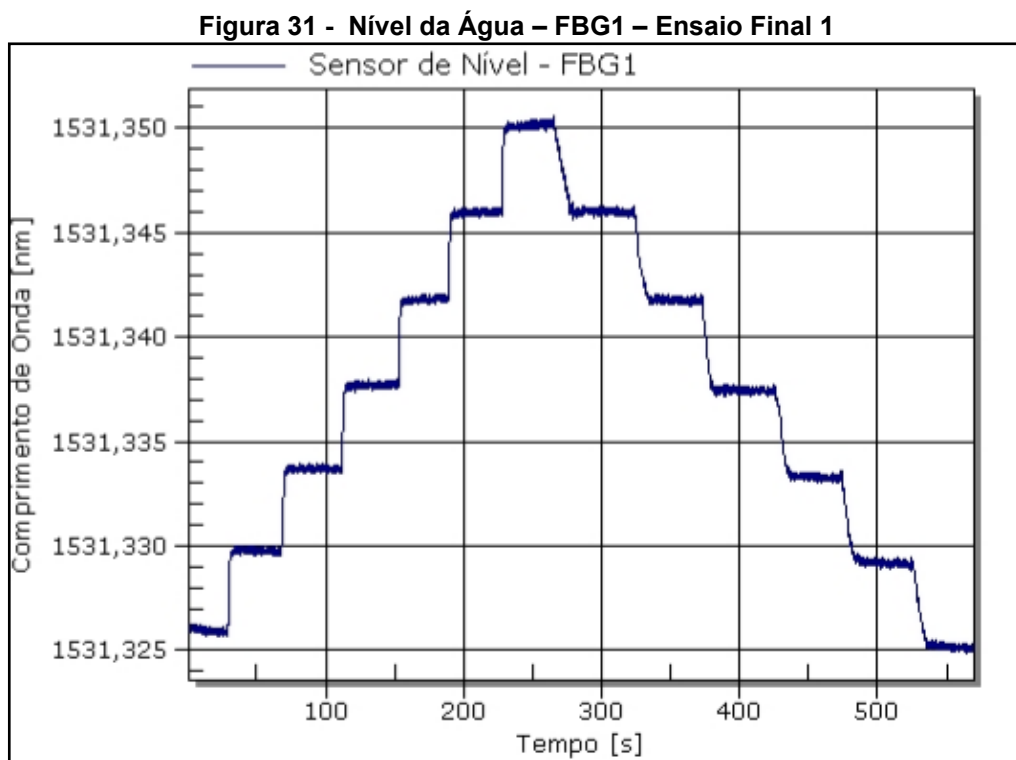
O mesmo comportamento linear foi constatado durante o procedimento de diminuição do nível de água no dispositivo, com um coeficiente de Pearson de 0,9989 e sensibilidade de 0,4 pm/cm, corresponde à deformação longitudinal causada pela deformação no diafragma com a FBG1 integrada, conforme verificado na figura 30.



Fonte: Autoria própria

4.3 Ensaio Final do Sensor de Nível

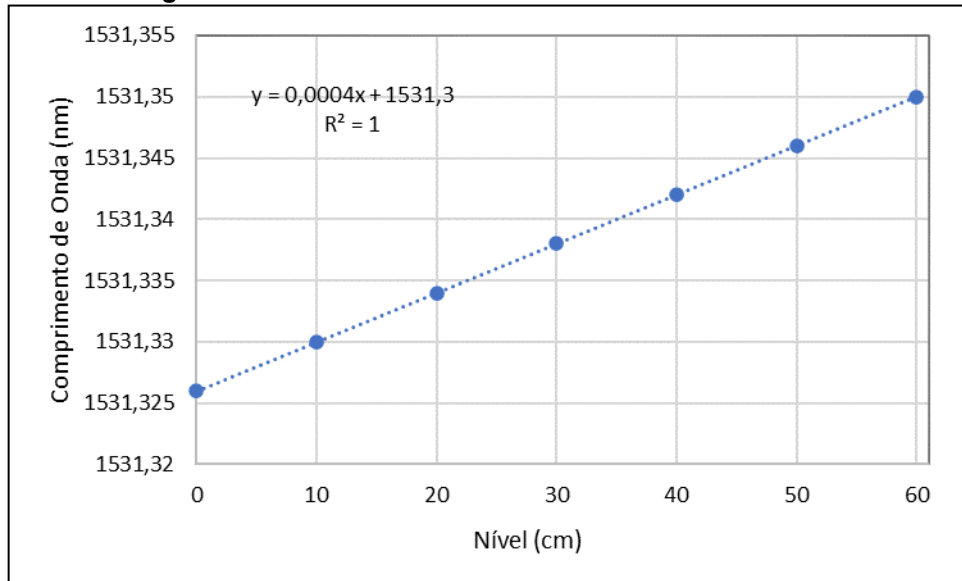
Na figura 31 é apresentada a resposta do sensor em função do tempo no primeiro ensaio realizado após o procedimento de calibração, variando o nível da coluna de água. Foi definido como o ponto zero (0 cm) o início do tubo de acrílico transparente. O nível foi elevado despejando 300 ml de água através da parte superior do dispositivo, e ao atingir o diafragma no centro da coluna de testes, a água provocou uma deformação captada pelo sensor FBG1. Cada degrau possui uma altura de 10 cm e o tempo de repouso em cada degrau foi de aproximadamente 30 segundos.



Fonte: Autoria própria

A resposta do sensor em função da altura da coluna de água foi obtida de forma semelhante à utilizada no ensaio de calibração. A figura 32 demonstra o comportamento do comprimento de onda de Bragg do sensor FBG1 em função da variação da altura do nível de água no dispositivo. Assim como no ensaio de calibração, a resposta foi linear com sensibilidade de 0,4pm/cm. O deslocamento máximo em comprimento de onda observado para este ensaio foi de 24 pm e altura máxima do nível de água utilizado foi 60 cm.

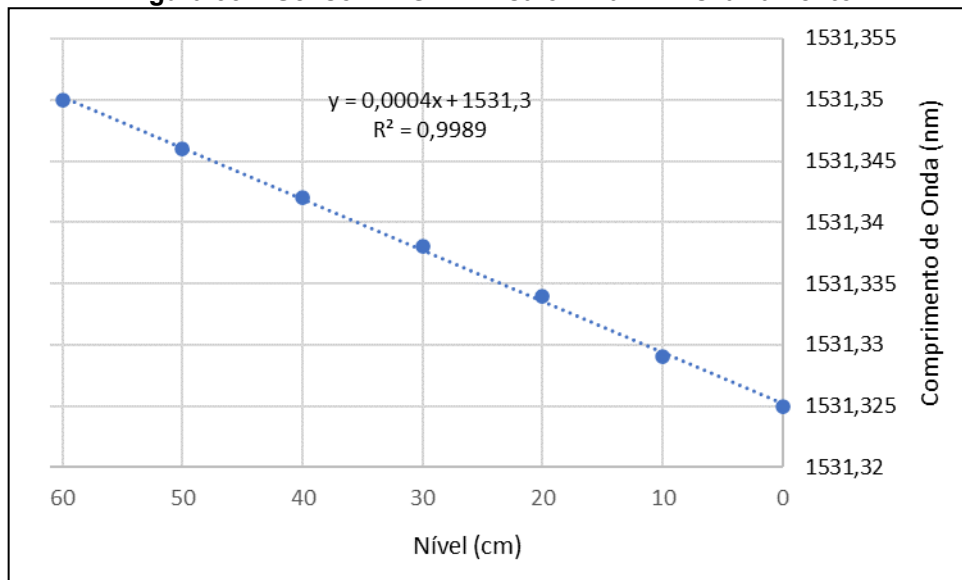
Figura 32 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 1 - Enchimento



Fonte: Autoria própria

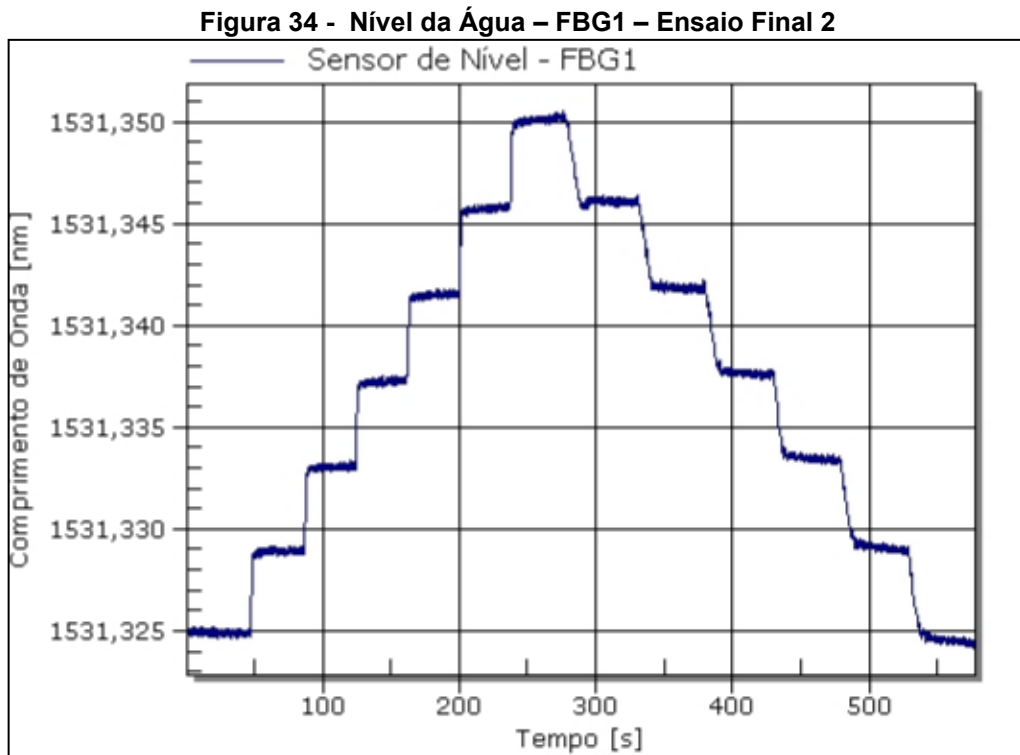
A resposta do sensor no processo de esvaziamento do dispositivo ocorreu em função da diminuição do nível de água. A figura 33 apresenta o comprimento de onda de Bragg do sensor FBG1 em função da variação da altura da coluna de água. A resposta do sensor foi linear, com sensibilidade de 0,4 pm/cm.

Figura 33 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 1 - Esvaziamento



Fonte: Autoria própria

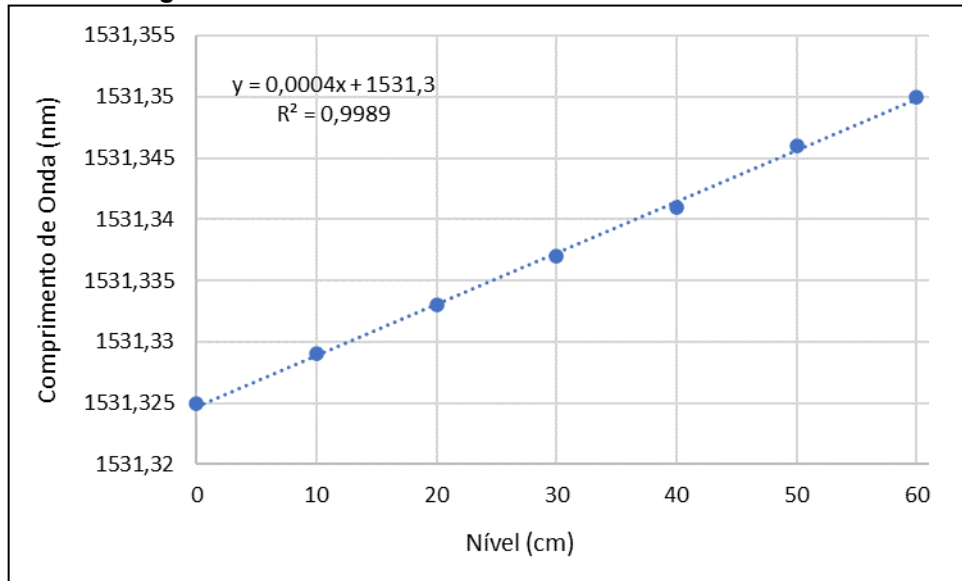
Na figura 34 é verificado a resposta do sensor FBG1 em função do tempo no segundo ensaio variando o nível da coluna de água. Assim como ocorreu no primeiro ensaio, o nível foi elevado despejando 300 ml de água através da parte superior do dispositivo, com cada degrau correspondendo a uma altura de 10 cm e o tempo de repouso em cada degrau foi de aproximadamente 30 segundos.



Fonte: Autoria própria

A resposta do sensor FBG1 em função da altura da coluna de água foi obtida de forma semelhante ao primeiro ensaio. A figura 35 demonstra o comprimento de onda de Bragg do sensor em função da variação do nível da coluna de água no dispositivo. A resposta do sensor foi linear, com sensibilidade 0,4 pm/cm. O deslocamento máximo em comprimento de onda observado para este ensaio foi de aproximadamente 25 pm e altura máxima do nível de água utilizado foi 60 cm.

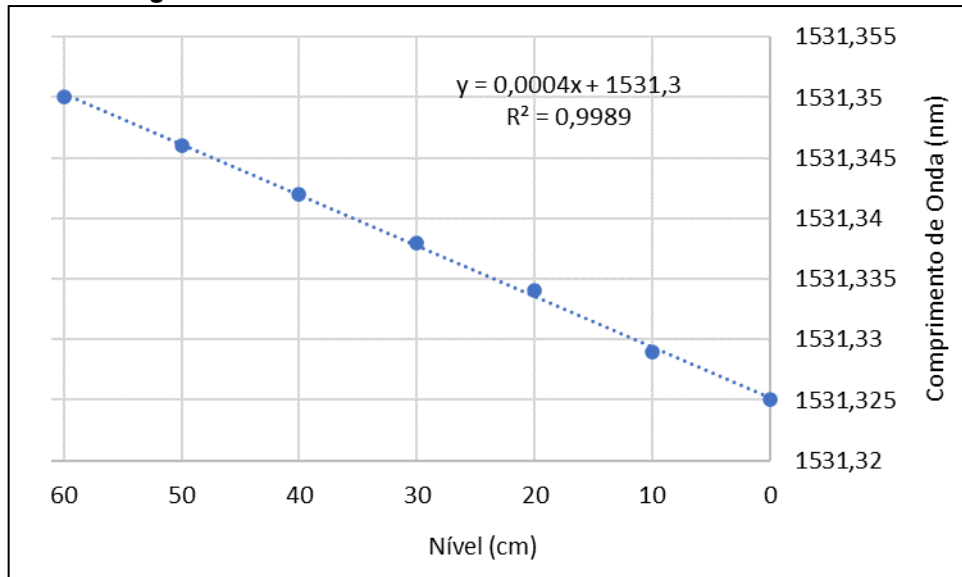
Figura 35 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 2 – Enchimento



Fonte: Autoria própria

A figura 36 mostra o comprimento de onda do sensor em função da diminuição da altura da coluna de água. A resposta do sensor foi linear, mantendo a sensibilidade de 0,4pm/cm.

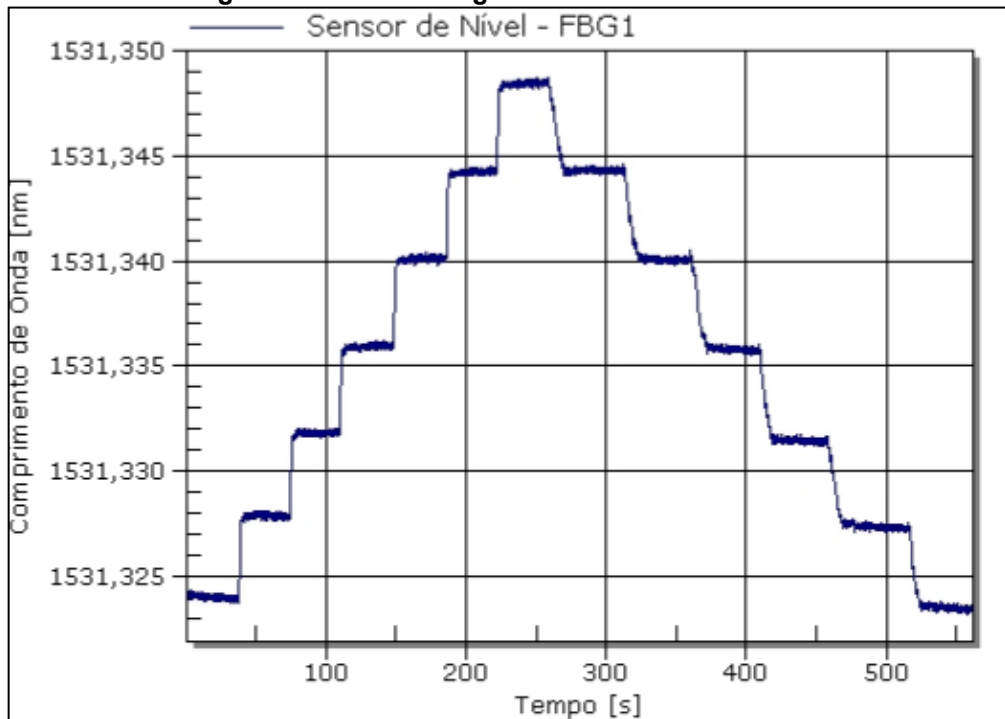
Figura 36 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 2 - Esvaziamento



Fonte: Autoria própria

Na figura 37 é apresentada a resposta do sensor em função do tempo no terceiro ensaio, com a variação do nível da coluna de água. Assim como ocorreu nos ensaios anteriores, o nível foi elevado despejando 300 ml de água através da parte superior do dispositivo, com cada degrau possuindo uma altura de 10 cm e o tempo de repouso em cada degrau de aproximadamente 30 segundos.

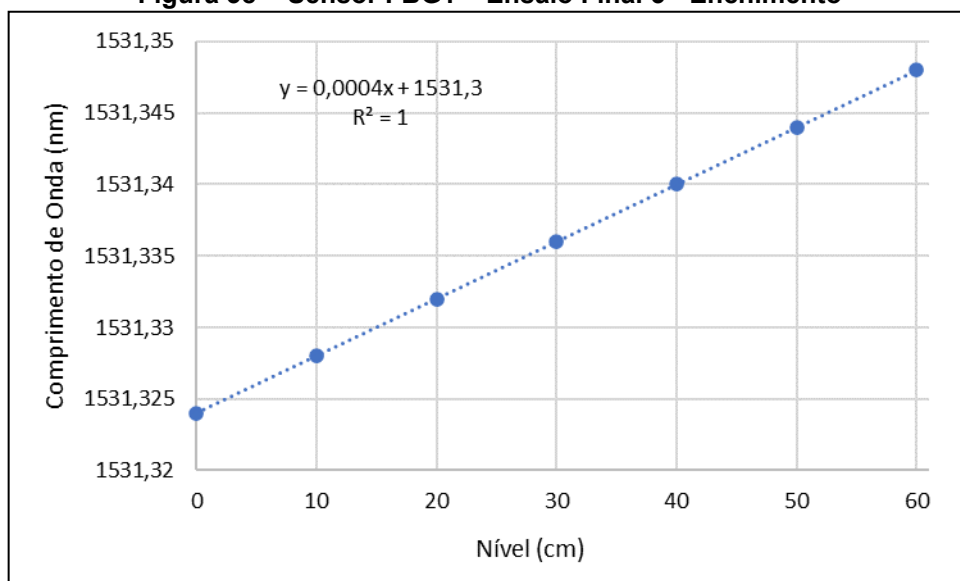
Figura 37 - Nível da Água – FBG1 – Ensaio Final 3



Fonte: Autoria própria

A resposta do sensor em função da altura da coluna de água foi obtida de forma semelhante aos ensaios anteriores. A figura 38 demonstra o comprimento de onda de Bragg do sensor em função da variação do nível de água no dispositivo. A resposta do sensor foi linear, mantendo a sensibilidade de 0,4 pm/cm. O deslocamento máximo em comprimento de onda observado para este ensaio foi de aproximadamente 25 pm e altura máxima do nível de água utilizado foi 60cm.

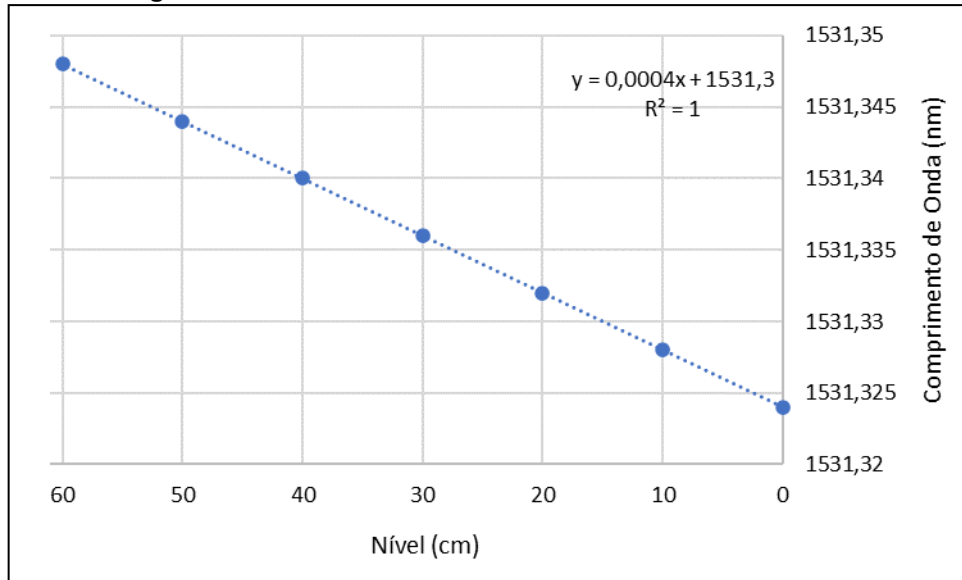
Figura 38 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 3 - Enchimento



Fonte: Autoria própria

Na figura 39 verifica-se o comportamento do comprimento de onda de Bragg do sensor em função diminuição da altura do nível de água na coluna, onde a resposta linear do sensor e sensibilidade foram semelhantes aos demais ensaios, com um valor de 0,4pm/cm.

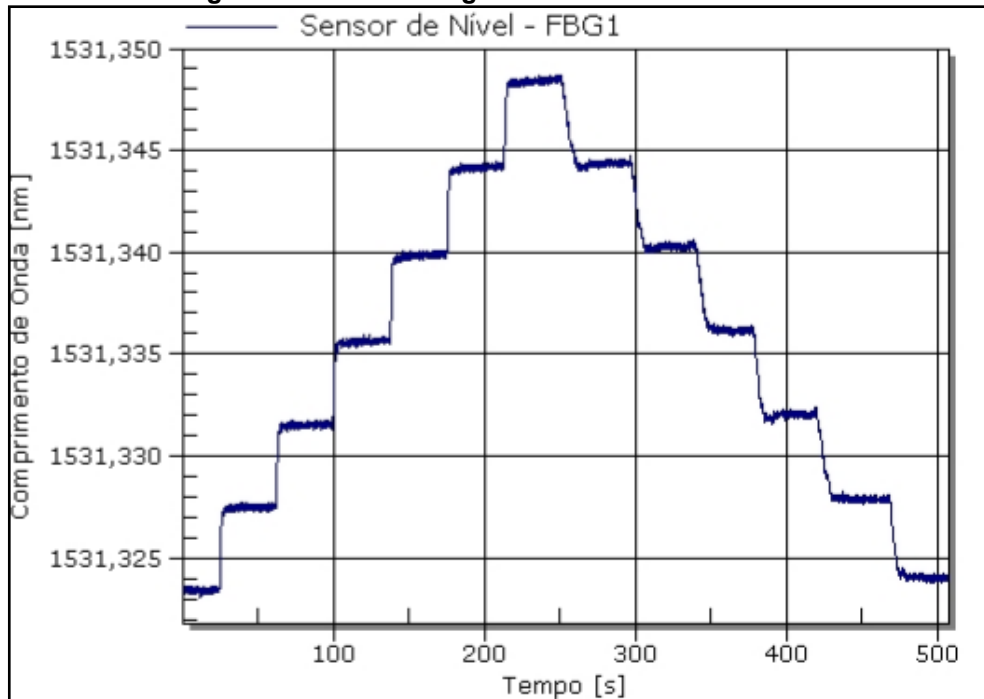
Figura 39 - Sensor FBG1 – Ensaio Final 3 - Esvaziamento



Fonte: Autoria própria

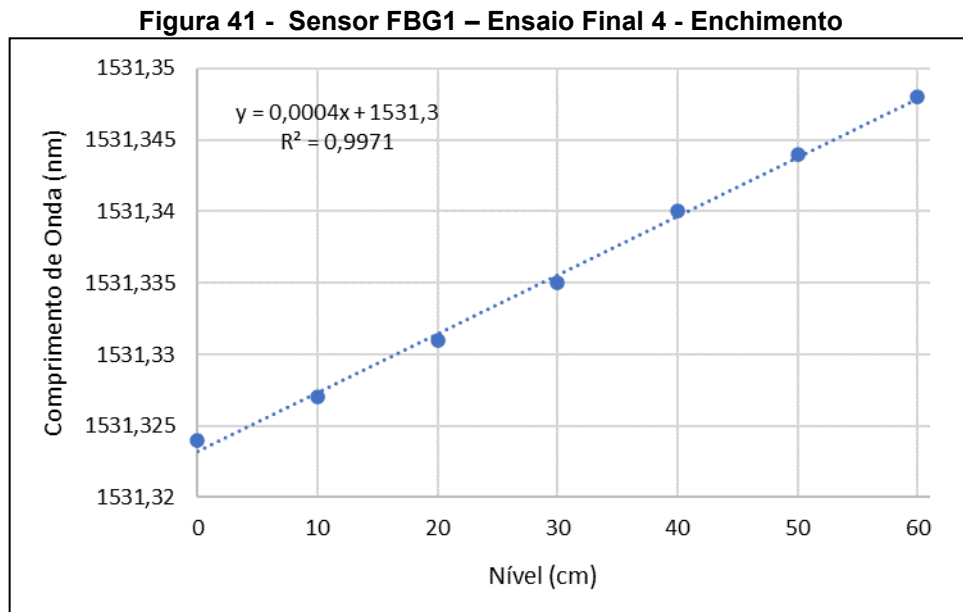
Na figura 40, é demonstrado a resposta do sensor FBG1 durante o quarto ensaio com a variação do nível da coluna de água, semelhante aos ensaios anteriores.

Figura 40 - Nível da Água – FBG1 – Ensaio Final 4



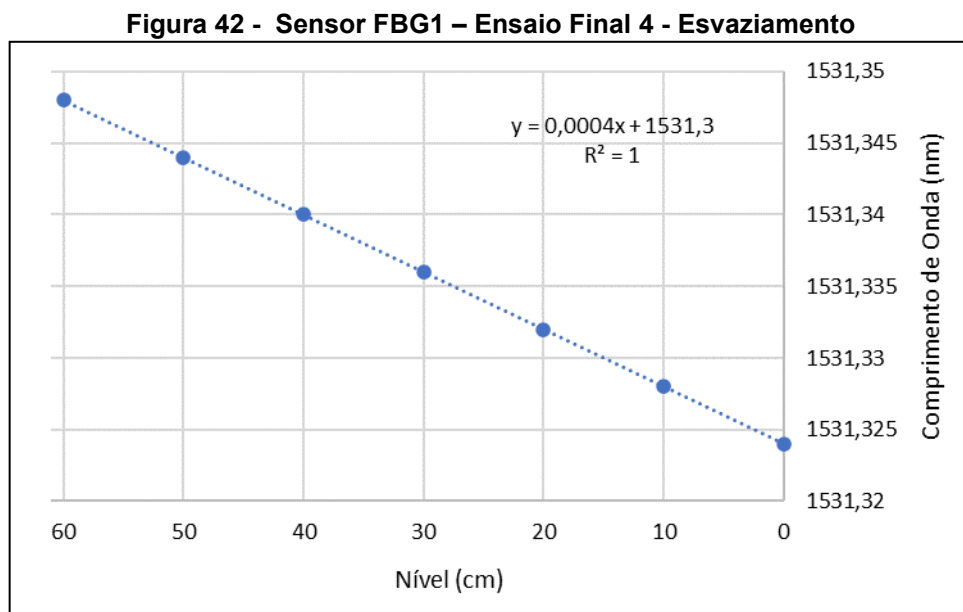
Fonte: Autoria própria

Na figura 41 verifica-se que o comprimento de onda de Bragg do sensor variou em função da altura do nível de água na coluna, com uma resposta do sensor de forma linear, mantendo a sensibilidade de 0,4 pm/cm. O deslocamento máximo observado para este ensaio foi de aproximadamente 26 pm e altura máxima do nível de água utilizado foi 60 cm.



Fonte: Autoria própria

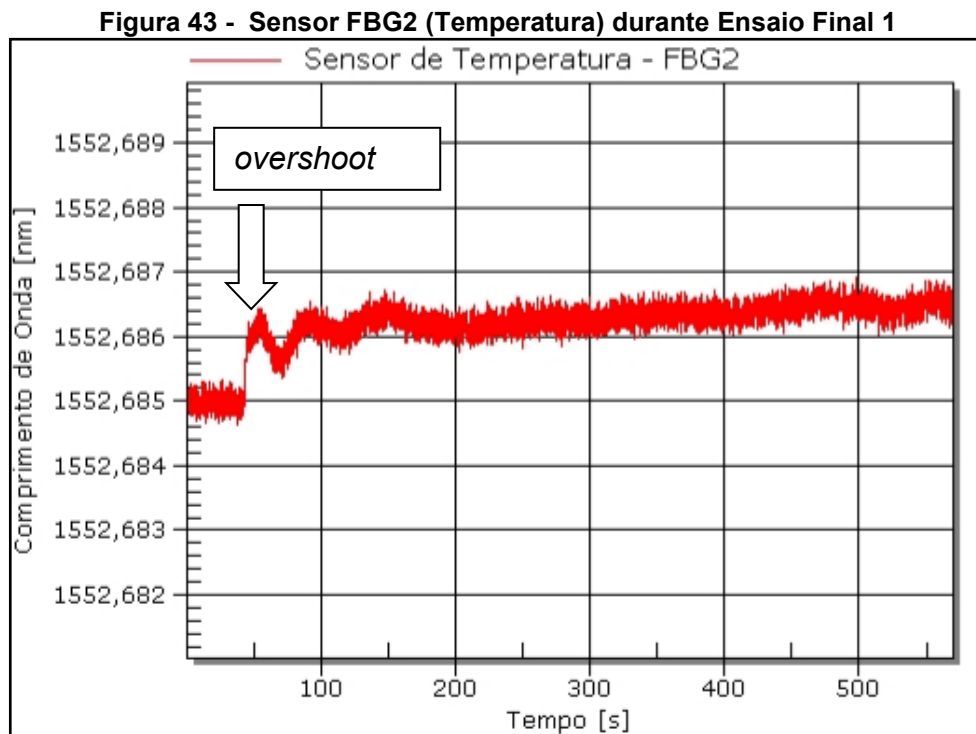
Na figura 42 pode ser verificado o comportamento linear do comprimento de onda de Bragg do sensor em função da diminuição do nível de água na coluna, com a sensibilidade permanecendo em 0,4 pm/cm.



Fonte: Autoria própria

4.4 Caracterização da Sensibilidade Cruzada

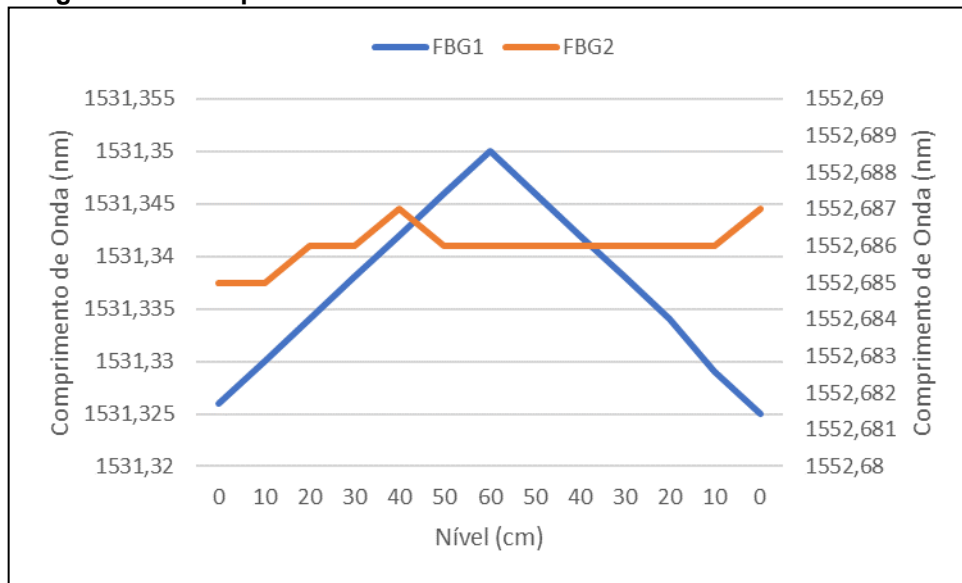
Na Figura 43 é exibido o gráfico correspondente a variação da temperatura no interior do diafragma durante a realização do primeiro ensaio após processo de calibração do sensor, considerando as etapas de enchimento e esvaziamento do dispositivo. Foi constatado uma pequena alteração no comprimento de onda de Bragg na FBG2, valor de aproximadamente 2 pm. Para redes de Bragg com comprimento de onda na faixa de 1550 nm, a sensibilidade média da FBG é considerada igual 10 pm/°C. Desta forma, uma variação de 2 pm indica que o sensor se manteve estável durante a realização dos ensaios. Foi constatado um pequeno overshoot no sinal do sensor da FBG2 durante o processo de enchimento de água no dispositivo.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 44 observa-se que a pequena variação no comprimento de onda de Bragg na FBG2 correspondente a temperatura da água no interior do dispositivo sobre o diafragma não interferiu na resposta do sensor de nível (FBG1) durante o processo de enchimento e esvaziamento da água na realização do primeiro ensaio.

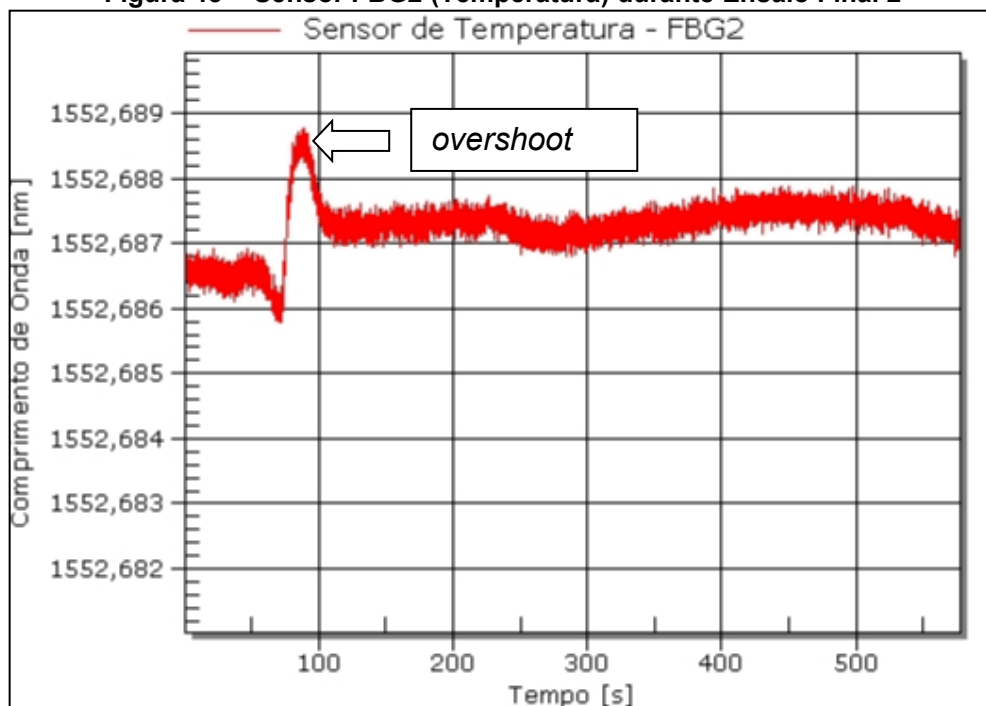
Figura 44 - Comparativo dos resultados - FBG1 e FBG2 - Ensaio Final 1



Fonte: Autoria própria

Na Figura 45 é exibido o gráfico correspondente a variação da temperatura no interior do diafragma durante a realização do segundo ensaio considerando as etapas de enchimento e esvaziamento do dispositivo. Constatado que a variação no comprimento de onda de Bragg na FBG2 continuou muito pequena, aproximadamente 3 pm. Novamente ocorreu um pequeno *overshoot* durante o processo de enchimento do dispositivo proveniente do impacto da água no sensor FBG2.

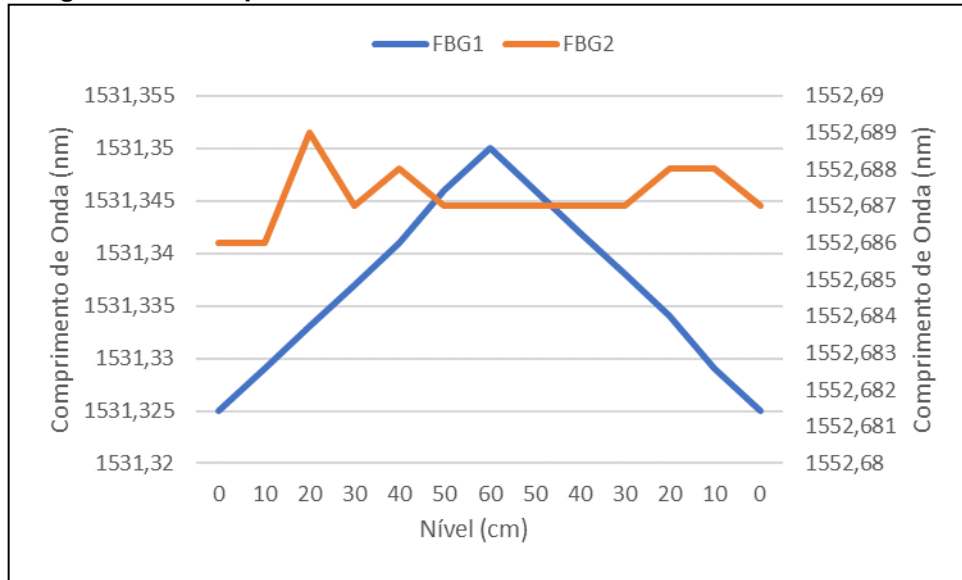
Figura 45 - Sensor FBG2 (Temperatura) durante Ensaio Final 2



Fonte: Autoria própria

Na Figura 46 verifica-se que a pequena variação no comprimento de onda de Bragg na FBG2, não interferiu na resposta do sensor FBG1 no segundo ensaio.

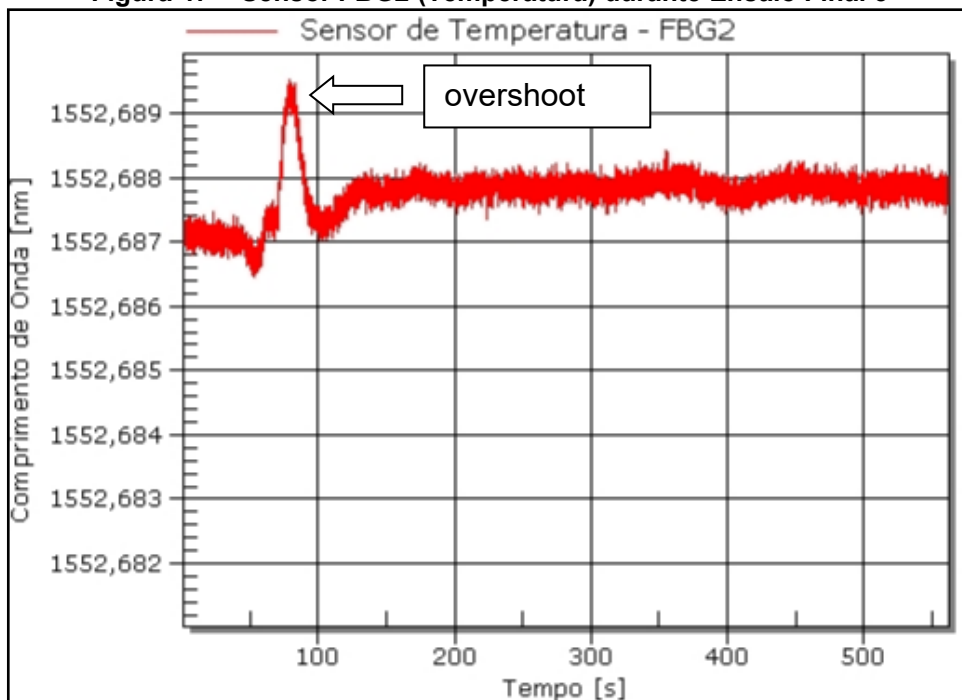
Figura 46 - Comparativo dos resultados - FBG1 e FBG2 - Ensaio Final 2



Fonte: Autoria própria

Na Figura 47 é exibido o gráfico correspondente a variação da temperatura durante a realização do terceiro ensaio considerando as etapas de enchimento e esvaziamento do dispositivo, onde verificou-se uma pequena variação no comprimento de onda de Bragg na FBG2 de aproximadamente 3 pm e um pequeno *overshoot*.

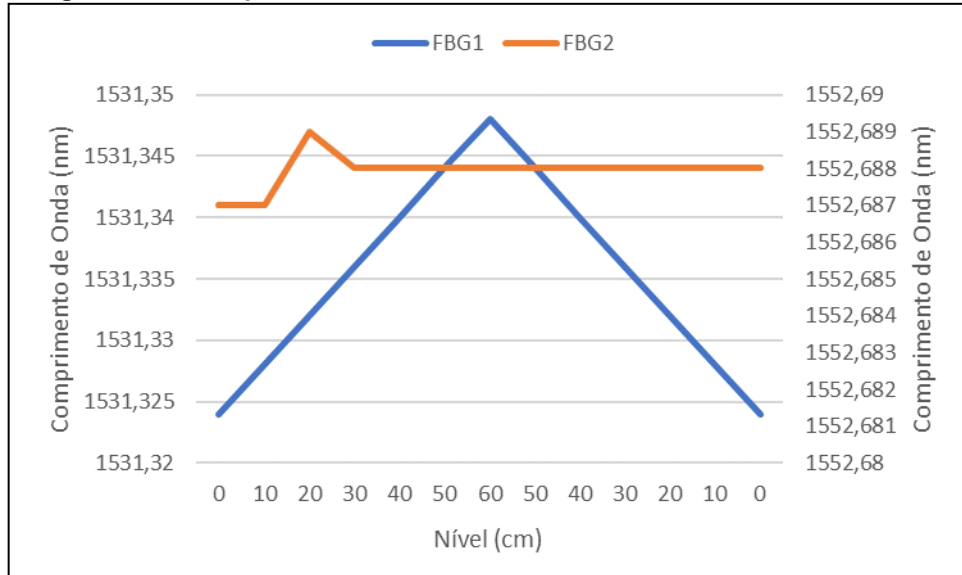
Figura 47 - Sensor FBG2 (Temperatura) durante Ensaio Final 3



Fonte: Autoria própria

Na Figura 48 verifica-se que a pequena variação no comprimento de onda de Bragg na FBG2, não interferiu na resposta do sensor FBG1 no terceiro ensaio.

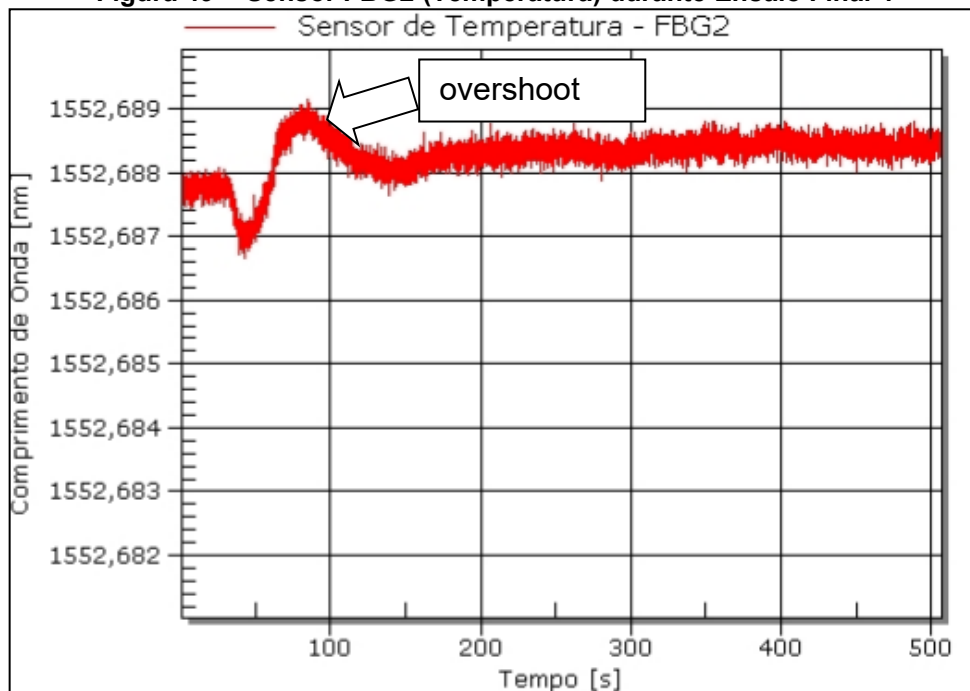
Figura 48 - Comparativo dos resultados - FBG1 e FBG2 - Ensaio Final 3



Fonte: Autoria própria

Na Figura 49 é exibido o gráfico correspondente a variação da temperatura durante a realização do terceiro ensaio considerando as etapas de enchimento e esvaziamento do dispositivo, onde verificado uma pequena variação no comprimento de onda de Bragg na FBG2 de aproximadamente 2 pm e um pequeno *overshoot*.

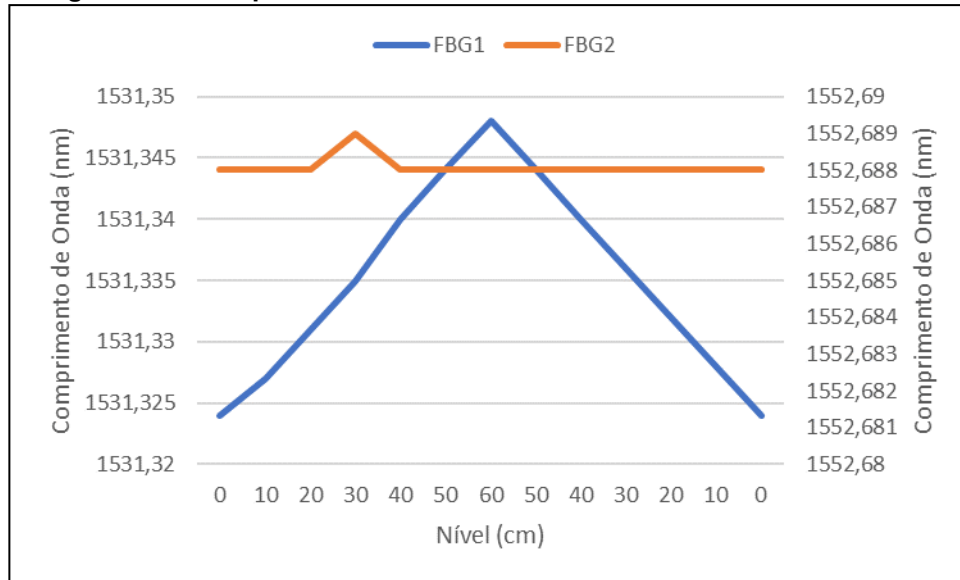
Figura 49 - Sensor FBG2 (Temperatura) durante Ensaio Final 4



Fonte: Autoria própria

Na Figura 50 verifica-se que a pequena variação no comprimento de onda correspondente a temperatura da água no interior do dispositivo sobre o diafragma não interferiu na resposta do sensor FBG1 durante o processo de enchimento e esvaziamento do dispositivo na realização do quarto ensaio.

Figura 50 - Comparativo dos resultados - FBG1 e FBG2 - Ensaio Final 4



Fonte: Autoria própria

4.5 Comparativo dos Resultados dos Ensaio Realizados

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os resultados dos ensaios finais, comparando os valores de sensibilidade, coeficiente de *Pearson* e desvio padrão para os ensaios durante o procedimento de enchimento e esvaziamento de água no dispositivo.

Tabela 3 - Enchimento da coluna de água – Ensaio Final

Ensaio	Sensibilidade (pm/cm)	Sensibilidade (pm/ kPa)	Coefficiente de Correlação Linear	Desvio Padrão (pm)
E1	0,400	40,816	1,0000	7,73
E2	0,418	42,638	0,9989	8,61
E3	0,400	40,816	1,0000	8,11
E4	0,411	41,910	0,9971	8,05

E1 = Primeiro Ensaio; E2 = Segundo Ensaio; E3 = Terceiro Ensaio; E4 = Quarto Ensaio

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 - Esvaziamento da coluna de água – Ensaio Final

Ensaio	Sensibilidade (pm/cm)	Sensibilidade (pm/ kPa)	Coefficiente de Correlação Linear	Desvio Padrão (pm)
E1	0,418	42,638	0,9989	7,32
E2	0,418	42,638	0,9989	7,40
E3	0,400	40,816	1,0000	7,13
E4	0,400	40,816	1,0000	6,93

E1 = Primeiro Ensaio; E2 = Segundo Ensaio; E3 = Terceiro Ensaio; E4 = Quarto Ensaio

Fonte: Autoria própria

Constatado que a sensibilidade do sensor FBG1 manteve-se estável no valor aproximado de 0,4 pm/cm durante os ensaios finais, o coeficiente de correlação *Pearson* permaneceu próximo ao valor unitário e o desvio padrão apresentou uma diminuição na etapa de esvaziamento de água do dispositivo quando comparado com os valores dos ensaios preliminares.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento e caracterização de um sensor de nível utilizando redes de Bragg (FBG) inserida em um diafragma de fibra de carbono.

O objetivo foi demonstrar a sensibilidade para detecção do nível de forma indireta, com base na pressão exercida pela coluna de líquido no diafragma, sendo que os resultados foram interpretados por degraus.

Constatou-se uma estabilidade nos degraus de subida, reflexo do maior controle no enchimento do dispositivo utilizando um recipiente graduado. As pequenas variações percebidas foram reflexo da queda do líquido até alcançar a parte inferior do dispositivo e entrar em contato com a parte superior do diafragma. Já para os degraus de descida, o processo de retirada da água ocorreu com a abertura da válvula de dreno e disposição deste líquido no recipiente graduado, sendo todo este processo manual e visual, sujeito a pequenos erros de leitura devido histerese do operador na manobra da válvula de dreno.

Foram realizados ensaios em laboratório com temperatura controlada, e verificados resultados interessantes. Considerando a resolução de 1 pm do interrogador SM130 utilizado neste projeto, e a sensibilidade média do sensor de nível FBG1 igual a 0,408 pm/cm, a resolução do encapsulamento verificado foi de 2,5 $\mu\epsilon$ (microstrain) e uma sensibilidade média para pressão igual 41.603 pm/kPa.

Nos ensaios preliminares foi constatado que a vedação de borracha utilizada entre o diafragma de fibra de carbono e o suporte de aço inoxidável provocou alteração na leitura do sensor FBG1 durante o procedimento de esvaziamento de água do dispositivo, com um erro máximo de 12 pm, que corresponde a aproximadamente 50% da altura da coluna de água (30 cm) utilizada no experimento.

Para sanar o problema referente a vedação e distorção na leitura no procedimento de esvaziamento do dispositivo, foi utilizado silicone e cola adesiva multiuso do modelo PUFIX, com resultados satisfatórios. Foi possível acompanhar a variação dos degraus da coluna de água com um deslocamento máximo em comprimento de onda de aproximadamente 24 pm, adotando como altura máxima do nível de água em 60 cm.

O sensor desenvolvido apresentou boa linearidade, com coeficiente de correlação de Pearson na faixa de 0,9971 a 1,0000 durante os ensaios de enchimento e esvaziamento do dispositivo com água. O desvio padrão constatado nos ensaios finais variou entre 6,93 pm a 8,61 pm comprovando a ocorrência de uma baixa dispersão dos valores mensurados pelo sensor de nível.

Com os resultados obtidos, trabalhos futuros são sugeridos, que incluem a utilização de outros tipos de líquidos e a aplicação em tanques fechados, onde a pressão no interior do tanque será diferente da pressão atmosférica. Desta forma, vai ser possível verificar o comportamento do sensor nestas condições e analisar a sua aplicabilidade.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, Harith et al. High-sensitivity pressure sensor using a polymer-embedded FBG. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 50, n. 1, p. 60-61, 2008.
- AMEEN, Odai Falah et al. Graphene diaphragm integrated FBG sensors for simultaneous measurement of water level and temperature. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 252, p. 225-232, 2016.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. Instrumentação e Fundamentos de Medidas–Volume 2, 2ª Edição. **Rio de Janeiro: LTC/Grupo Gen**, 2011.
- CARNEIRO, L. A. V. Reforço de Vigas e Pilares de Concreto com Materiais Compósitos de Resina e Fibras”. **Doutorado, COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil**, 2004.
- CHETPATTANANONDH, Kanadit et al. A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 209, p. 175-182, 2014.
- DE PELEGRIN, Jesse, et al. Optical fiber sensor encapsulated in carbon fiber reinforced polymer for fault detection in rotating electrical machines. **IEEE Sensors Journal**, 2020, 20.19: 11364-11371.
- DIAZ, Camilo AR et al. Liquid level measurement based on FBG-embedded diaphragms with temperature compensation. **IEEE Sensors Journal**, v. 18, n. 1, p. 193-200, 2017.
- FLORES, E. Molina et al. Discrete optical fiber microsensors of immiscible liquid interfaces. In: **2008 4th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers**. IEEE, 2008. p. 313-315.
- GALVÃO, José Rodolfo et al. Aplicações de sensores a fibra ótica integrada em materiais compósitos. 2019.
- GONG, Huaping et al. An optical liquid level sensor based on polarization-maintaining fiber modal interferometer. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 205, p. 204-207, 2014.
- HER, Shih-Chuan; WENG, Shin-Zhong. Fiber Bragg Grating Pressure Sensor Integrated with Epoxy Diaphragm. **Sensors**, v. 21, n. 9, p. 3199, 2021.
- HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., KAWASAKI, B. S., Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication, **Applied Physics Letters**, vol. 32, 1978.
- HILL, K.O., MALO, B., BILODEAU, F., JOHNSON, D.C., Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask, **Applied Physics Letters**, vol. 62, p. 1035-1037, 1993.
- HILL, Kenneth O.; MELTZ, Gerald. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of lightwave technology**, v. 15, n. 8, p. 1263-1276, 1997.

KAVITHA, B. S. et al. Highly sensitive and Rapid detection of mercury in water using functionalized etched fiber Bragg grating sensors. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 333, p. 129550, 2021.

KERSEY, A. D., DAVIS, M. A., PATRICK, H. J., LEBLANC, M., Koo, KOO., K., P., ASKINS, C. G., PUTNAN, M. A., FRIEBELE, E. J., "Fiber Grating Sensor," **Journal of Lightwave Technology**, vol. 15, p. 1442-1462, 1997.

IMD METRÓPOLE DIGITAL. **Instrumentação e Sensores** / Aula 07. Disponível em: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/1/52/7/4>. Acesso em: 18/12/2022.

UFF. **Aula de Instrumentação** / Aula 06. Disponível em: <https://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2017/08/>. Acesso em: 18/12/2022.

LAI, C.-W. et al. Application of fabry-pérot and fiber bragg grating pressure sensors to simultaneous measurement of liquid level and specific gravity. **Measurement**, Elsevier, v. 45, n. 3, p. 469–473, 2012.

LEAL-JUNIOR, Arnaldo G. et al. Compensation method for temperature cross-sensitivity in transverse force applications with FBG sensors in POFs. **Journal of Lightwave Technology**, v. 36, n. 17, p. 3660-3665, 2018.

LOIZOU, K.; KOUTROULIS, E. Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system. **Measurement**, Elsevier, v. 89, p. 204–214, 2016.

MACHADO, A. de P. Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono. **São Paulo: Pini**, 2002.

MARTINS, Maria Eugénia Graça. Desvio padrão amostral. **Revista de ciência elementar**, v. 1, n. 1, 2013.

MEL'NIKOV, V.; IVANOV, V.; TEPLYASHIN, I. The study of ultrasonic reflex-radar waveguide coolant level gage for a nuclear reactor. **Nuclear Energy and Technology**, Elsevier, v. 2, n. 1, p. 37–41, 2016.

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

MORRIS, A. S.; LANGARI, R. Measurement and instrumentation: theory and application. [S.l.]: **Academic Press**, 2012.

OTHONOS, A., Fiber Bragg gratings, **Review of Scientific Instruments**, vol. 68, p. 4309-4341, 1997.

RAATIKAINEN, P. et al. Fiber-optic liquid-level sensor. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 58, n. 2, p. 93–97, 1997.

ROSENBERRY, D. O. Effect of sensor error on interpretation of long-term water-level data. **Groundwater**, Wiley Online Library, v. 28, n. 6, p. 927–936, 1990.

SONG, Dongcao et al. Liquid-level sensor using a fiber Bragg grating and carbon fiber composite diaphragm. **Optical Engineering**, v. 50, n. 1, p. 014401-014401-5, 2011.

STATECZNY, A. Radar water level sensors for full implementation of the river information services of border and lower section of the order in poland. In: **IEEE. Radar Symposium (IRS)**, 2016 17th International. [S.l.], 2016.

TERZIC, J.; NAGARAJAH, C.; ALAMGIR, M. Fluid level measurement in dynamic environments using a single ultrasonic sensor and support vector machine (svm). **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 161, n. 1-2, p. 278–287, 2010.

VORATHIN, E. et al. A novel temperature-insensitive hydrostatic liquid-level sensor using chirped FBG. **IEEE Sensors Journal**, v. 19, n. 1, p. 157-162, 2018.

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

YULIZA, E. et al. Characterization of a water level measurement system developed using a commercial submersible pressure transducer. In: **IEEE. Instrumentation, Control and Automation (ICA), 2016 International Conference on**. [S.l.], 2016. p.