

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E ASTRONOMIA

GILBER GUSTAVO DE ALMEIDA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO
DO NÍVEL DE ÁGUAS DE RIOS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2018

GILBER GUSTAVO DE ALMEIDA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO
DO NÍVEL DE ÁGUAS DE RIOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Física – Área de concentração: Física da Matéria Condensada.

Orientado: Prof. Dr. Ricardo Canute Kamikawachi.

Coorientador(a): Prof. Dr. Keli Seidel.

CURITIBA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

A447d Almeida, Gilber Gustavo de
2018 Desenvolvimento de um sistema de monitoramento do nível de
águas de rios / Gilber Gustavo de Almeida.-- 2018.
64 f.: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.
Texto em português com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal
do Paraná. Programa de Pós-graduação em Física e Astronomia.
Área de Concentração: Física. Linha de Pesquisa: Física da
Matéria Condensada, Curitiba, 2018.
Bibliografia: f. 62-64.

1. Nível das águas - Medição. 2. Redes de Bragg. 3. Fibras
ópticas. 4. Detectores de fibra óptica - Desenvolvimento. 5.
Indicadores de nível. 6. Controle de inundações. 7. Catástrofes
naturais - Prevenção. 8. Física - Dissertações. I. Kamikawachi,
Ricardo Canute, orient. II. Seidel, Keli, coorient. III. Universidade
Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação
em Física e Astronomia. IV. Título.

CDD: Ed. 23 – 530



Ministério da Educação

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 003

A Dissertação de Mestrado intitulada “: **Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento do Nível de Águas de Rios**” defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Gilber Gustavo De Almeida**, no dia 23 de outubro de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Física, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, Área de Concentração Física e Linha de Pesquisa: Física da Matéria Condensada.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ricardo Canute Kamikawachi - Presidente – (UTFPR)

Prof. Dr. Ney Pereira Mattoso Filho - (UFPR)

Prof. Dr. Alexandre de Almeida Prado Pohl - (UTFPR)

Prof. Dr. Marlos de Oliveira Ribas - (UTFPR)

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 23 de outubro de 2018.

*Dedico este trabalho à minha mãe legítima Ivonete
que faleceu em 1997 e ao meu avó Pedro Alves
também falecido.*

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Minha mãe Dona Alda Dias de Almeida, que sempre acreditou em mim e por todos os esforços que fez para mim ajudar a chegar até aqui.

Aos amigos Maycow Freitas, Túlio Pinho, Caio Henrique, Carlos Augusto e Marcos Vinícios.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia e do Departamento Acadêmico de Física em especial ao meu Orientador Ricardo Canute Kamikawachi.

A todos os colegas de trabalho, pelas informações e pela ajuda nos experimentos, em especial ao doutorando Jean Filipe Kuhne e ao Professor Valmir.

Ao programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia em especial ao Professor Emilson por ter tirado todas as minhas dúvidas e por ajudar e apoiar na fase de admissão do Mestrado.

À UTFPR, CNPq, Fundação Araucária e Finep que ao longo dos anos financiaram os projetos que possibilitaram a implementação da infraestrutura na UTFPR.

E um especial agradecimento ao CEPED, à FUNESPAR e à SANEPAR pelo apoio ao projeto através do auxílio financeiro e da concessão da bolsa.

RESUMO

ALMEIDA, Gilber Gustavo de, Desenvolvimento de um sistema de monitoramento do nível de águas de rios. 2018 64 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018

Nesse trabalho é proposto um sistema de monitoramento do nível de água de rios baseado em redes de Bragg (FBG – *Fiber Bragg Gratings*) e no princípio da força hidrostática. O sistema consiste em uma boia cilíndrica, protegida por uma coluna, que produz uma tensão longitudinal em uma FBG embebida em uma borracha de silicone devido a força de empuxo exercida pela água. A calibração do sensor mostrou que é possível sintonizar o nível máximo de água que o sistema pode medir através aumento da profundidade da rede na borracha de silicone. O aumento da profundidade da rede na borracha também aumenta a não linearidade na resposta do sensor, mas os resultados obtidos mostram que é possível aproximar a resposta da rede a retas em diferentes regiões. Os resultados dos testes na coluna de água mostraram que vibrações mecânicas podem ser distinguidos do aumento do nível da água por serem eventos de curta duração. Os ensaios também mostraram que o sistema pode medir níveis até um limite de aproximadamente 12 metros de altura do nível de água. O problema da sensibilidade cruzada pode ser contornado com o uso de uma segunda rede encapsulada em uma agulha para distinguir o efeito da temperatura do aumento do nível da água. As respostas das duas redes podem ser utilizadas para diminuir o efeito da temperatura na resposta da rede utilizada para medir o nível da água e também para identificar que há uma variação de temperatura. Adicionalmente a rede encapsulada na agulha apresentou uma sensibilidade à força aplicada muito pequena, praticamente nula se comparada com a sensibilidade da rede inserida no silicone. Esta característica aliada a resposta térmica das redes permite facilmente a distinção de efeitos de temperatura do aumento do nível dos rios. Os resultados desse trabalho mostram o potencial do uso de sensores baseados em rede de Bragg no desenvolvimento de sistemas de monitoramento do nível dos rios em áreas de riscos por enchentes.

Palavras-chave: Redes de Bragg. Sensores. Fibras óticas. Inundações. Desastres naturais.

ABSTRACT

ALMEIDA, Gilber Gustavo de, Development of an water river level monitoring system. 2018 64 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018

This work proposes a system for monitoring the water level of rivers based on fiber Bragg gratings and the hydrostatic force's principle. The system consists of a cylindrical buoy, protected by a column, which produces a longitudinal tension in a FBG embedded in a silicone rubber, as result of the buoyancy force exerted by the water. The calibration of the sensor showed that it is possible to tune the maximum water level that the system can measure by increasing the grating depth in the silicone rubber. The increase of the depth also increases the non-linearity in the sensor response, but the results obtained show that it is possible to use linear approximations in different regions of the sensor response. The results of the tests in the water column showed that mechanical vibrations can be distinguished from the increase in water level because they are short duration events. The tests also showed that the system can measure levels up to a limit of approximately 12 meters high from the water level. The cross-sensitivity problem can be overcome by the use of a second grating encapsulated in a needle to distinguish the temperature effect from increasing water level. The responses of the gratings can be used to decrease the effect of the temperature on the sensor response used to measure the water level and to identify that there is a temperature variation. In addition, the needle encapsulated grating showed an applied force sensitivity very small, practically nil when compared with the sensitivity of the grating inserted in the silicone. This feature allied to the thermal response of the gratings allows the distinction of temperature effects from the increase of the level of the rivers. The results of this work show the potential of the use of fiber Bragg gratings sensors in the development of river level monitoring systems in flood risk areas.

Palavras-chave: Fiber Bragg gratings. Sensors. Optical fibers. Floods. Natural disasters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático da cabeça do sensor desenvolvido por Segupta e Kishore (D. Sengupta and P. Kishore, 2014).....	20
Figura 2 – Fibra de índice degrau, com uma variação abrupta do índice de refração do núcleo em relação à casca que o reveste e representação da propagação da luz no núcleo.....	24
Figura 3 – Sistema de coordenadas cilíndricas adotado no estudo da propagação em fibras.....	26
Figura 4 – Estrutura da rede de Bragg.....	30
Figura 5 – Representação esquemática do método de gravação por máscara de fase.....	30
Figura 6 – Diagrama da cabeça do sensor indicando a direção da força de empuxo e a da deformação da rede.....	33
Figura 7 – (a) Foto da guia utilizada para posicionar a boia no centro do sistema e (b) diagrama do sistema mostrando a cabeça do sensor, a guia e a coluna de proteção.....	35
Figura 8 – Suporte usado para calibrar a cabeça do sensor.....	36
Figura 9 – Foto da extremidade superior da coluna de testes mostrando os parafusos de fixação do sistema.....	37
Figura 10 – Coluna de teste de imersão em água com o sistema inserido em seu interior.....	38

Figura 11 – Diagrama esquemático indicando as posições das redes utilizadas para as medidas de temperatura e nível de água.....	39
Figura 12 – Comprimento de onda em função do tempo da cabeça sensores com a rede imersa a 5 mm de profundidade, variando o peso de 50 a 1200 gramas. As regiões destacadas com círculos vermelhos foram utilizadas para determinar o tempo de estabilização.....	40
Figura 13 – (a) Variação exponencial do comprimento de onda em função do tempo após a aplicação e (b) após a remoção de uma força de 1200 gf.....	42
Figura 14 – Comprimento de onda em função da força aplicada da cabeça do sensor com a rede imersa 5 mm na borracha de silicone.....	42
Figura 15 – Comprimento de onda em função da altura estimada com a equação (32) da cabeça do sensor com a rede imersa 5 mm na borracha de silicone.....	43
Figura 16 – Comprimento de onda em função do tempo da cabeça sensores com a rede imersa a 10 mm de profundidade, variando o peso de 50 a 1400 gramas.....	44
Figura 17 – (a) Variação exponencial do comprimento de onda em função do tempo após a aplicação e (b) após a remoção de uma força de 1400 gf.....	44
Figura 18 – Comprimento de onda em função da força aplicada da cabeça do sensor com a rede imersa 10 mm na borracha de silicone.....	45
Figura 19 – Comprimento de onda em função da altura estimada com a equação (32) da cabeça do sensor com a rede imersa 5 mm na borracha de silicone.....	46
Figura 20 – Comprimento de onda em função do tempo da cabeça sensores com a rede imersa a 15 mm de profundidade, variando o peso de 200 a 3200 gramas de 200 g em 200 g.....	46

Figura 21– (a) Variação exponencial do comprimento de onda em função do tempo, da cabeça do sensor com a rede imersa 15 mm na borracha de silicone, após a aplicação e (b) após a remoção de uma força de 3200 gf.....47

Figura 22 – Gráfico do comprimento de onda em função da força aplicada da cabeça do sensor com a rede imersa 15 mm na borracha de silicone.....47

Figura 23 – Comprimento de onda em função da altura estimada com a equação (32) da cabeça do sensor com a rede imersa 15 mm na borracha de silicone.....49

Figura 24 – (a) Comprimento de onda em função do tempo no teste da coluna de água, para o sensor com a rede imersa em 5 mm na borracha de silicone. (b) Resposta do sensor após tratamento com filtro FFT com frequência de corte de 0,1 Hz.....50

Figura 25 – Comprimento de onda do sensor, com a rede imersa 5 mm na borracha de silicone, em função da altura do nível de água na coluna de testes.....51

Figura 26 – (a) Comprimento de onda em função do tempo no teste da coluna de água, para o sensor com a rede imersa em 10 mm na borracha de silicone. (b) Resposta do sensor após tratamento com filtro FFT com frequência de corte de 0,1 Hz.....51

Figura 27 – Comprimento de onda do sensor, com a rede imersa 10 mm na borracha de silicone, em função da altura do nível de água na coluna de testes.....52

Figura 28 – (a) Comprimento de onda em função do tempo no teste da coluna de água, para o sensor com a rede imersa em 17 mm na borracha de silicone. (b) Resposta do sensor após tratamento com filtro FFT com frequência de corte de 0,1 Hz.....53

Figura 29 – Comprimento de onda do sensor, com a rede imersa 15 mm na borracha de silicone, em função da altura do nível de água na coluna de testes.....	53
Figura 30 – Comprimento de onda do sensor, com a rede imersa 15 mm na borracha de silicone, em função do tempo.....	54
Figura 31 – Comprimento de onda do sensor das redes inseridas na agulha e no silicone em função da variação de temperatura.....	54
Figura 32 – Comprimento de onda do sensor das redes inseridas na agulha e no silicone e a correção do efeito da temperatura em função da variação de temperatura.....	55
Figura 33 – Comprimento de onda do sensor das redes inseridas na agulha e no silicone em função do tempo em ciclos de aplicação de forças.....	56
Figura 34 – Deslocamento em comprimento de onda do sensor das redes inseridas na agulha e no silicone em função da força aplicada.....	57
Figura 35 – Sensibilidade da rede inserida no silicone.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS

CEGRD	Centro Estadual e Regionais de Gestão de Risco de Desastres
FBG	rede de Bragg em fibra
LPFG	sensores baseados em redes de período longo
OFS	sensores em fibra ótica
POF	sensores de fibra ótica plástica
PVC	Policloreto de polivinila
SIGRisco	Sistema Paranaense de Informações para a Gestão dos Riscos a Desastres Naturais
SISDC	Sistema Informatizado de Defesa Civil
UV	Ultravioleta
ZEE	Zoneamento Ecológico-econômico

LISTA DE SÍMBOLOS

- α Raio da Fibra ótica
- β Constante de Propagação no eixo z
- Λ Período de Modulação da Rede de Bragg
- n_2 Índice de Refração da Casca
- n_1 Índice de Refração do Núcleo
- n_{eff} Índice de refração efetivo
- ν Frequência Normalizada
- Δn Amplitude da Modulação do Índice de Refração
- λ_0 Comprimento de Onda no Vácuo
- λ_B Comprimento de Onda de Bragg

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	MOTIVAÇÃO.....	16
1.2	ESTADO DA ARTE.....	18
1.3	OBJETIVOS.....	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	FIBRA ÓTICA.....	23
2.2	FOTOSENSIBILIDADE EM FIBRAS ÓTICAS.....	28
2.3	REDES DE BRAGG.....	29
2.4	SENSIBILIDADE DA FBG Á TENSÃO E TEMPERATURA.....	31
2.5	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR.....	32
3	METODOLOGIA.....	34
3.1	PRODUÇÃO DAS REDES.....	34
3.2	O SISTEMA SENSOR E CABEÇA DO SENSOR.....	34
3.3	CALIBRAÇÃO DO SENSOR.....	36
3.4	TESTE DE IMERSÃO EM ÁGUA.....	37
3.5	CARACTERIZAÇÃO DA SENSIBILIDADE CRUZADA.....	39
4	RESSULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1	CALIBRAÇÕES DAS CABEÇAS DOS SENSORES.....	40
4.2	TESTE DA COLUNA DE ÁGUA.....	49
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA SENSIBILIDADE CRUZADA.....	54
5	CONCLUSÕES.....	59
5.1	CONCLUSÕES.....	59
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	61
5.3	PUBLICAÇÕES.....	61
	REFERÊNCIAS.....	62

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o contexto que motivou a proposta de pesquisa e levou ao desenvolvimento desta dissertação de mestrado. O estado da arte da aplicação de sensores em fibra ótica para medidas do nível de líquidos será apresentado com foco nos principais trabalhos que deram suporte a presente proposta. E finalmente é apresentado o objetivo deste projeto que foi desenvolvido no contexto da chamada pública 01/2016 REDESASTRE.

1.1 MOTIVAÇÃO

O Brasil é um país tropical caracterizado por chuvas intensas com maior predominância no verão. Como consequência desta característica, inundações causadas por essas chuvas intensas são uns dos maiores desastres naturais que atinge as cidades brasileiras. Dados obtidos da Defesa Civil do Estado do Paraná apontam que apenas em 2017, 42 cidades foram atingidas por enchentes, resultando em 69 ocorrências diferentes, afetando 47.219 pessoas (Curitiba. Casa Militar. Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil. 2018, Mar. 05). Esses dados indicam que houve mais de uma ocorrência em algumas cidades do estado, sendo Francisco Beltrão uma das cidades frequentemente atingidas pela inundação do rio Marrecas.

As inundações, aliadas à ocupação desordenada das margens dos rios contribuem para o aumento do impacto social e financeiro que tais eventos ocasionam às cidades. As populações que residem às margens dos rios geralmente em maior situação de vulnerabilidade são as mais atingidas sofrendo com danos materiais e riscos à saúde. Em Santa Catarina as chuvas ocorridas no início do mês de junho em 2017 causaram danos estimados em quarenta milhões de reais (Santa Catarina. Diário Catarinense, 2017). Além dos danos materiais há sérios riscos à saúde das populações afetadas devido a transmissão de doenças tais como o Cólera, Febre Tifoide, Hepatite A e

Leptospirose. Dados do governo do Espírito Santo apontam que em 2011 e 2012 houveram respectivamente 115 e 103 casos de Leptospirose no estado (Secretaria do Estado da Saúde do Espírito Santo, Marcos Bonn, 2015).

Os governos brasileiros, tanto em nível estadual quanto federal, tem adotado uma série de ações para tornar as cidades mais resilientes a desastres naturais. Exemplos desses tipos de ações são a preparação e a estruturação no combate aos desastres, bem como o estudo da gestão dos riscos por contaminação pelo contato com água e o desenvolvimento de sistema de monitoramento que podem alertar moradores e agentes do estado de uma provável inundação. Uma importante ação adotada em 2014, foi a criação da Redesastre, uma rede estadual de pesquisa, ensino, extensão e inovação tecnológica voltada à redução de riscos e desastres no Estado do Paraná. Instituída sob o Decreto Estadual nº 12445/14, foi a primeira rede brasileira oficialmente com finalidade de tratar o tema. A Redesastre é atualmente composta por 16 instituições em todo o estado. No final de 2016, houve uma chamada pública para seleção de propostas nas áreas de interesse da Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil, onde 15 projetos foram selecionados e desde 2017 estão em execução, totalizando R\$ 1,115 milhão em investimento com recursos oriundos da Sanepar (Transparência UNESPAR, 2018). Ainda dentro desta temática várias ações tem sido colocadas em prática, sendo algumas delas a implementação do Sistema Informatizado de Defesa Civil (SISDC), a elaboração do Plano de Contingência *On-line*, implementação do Sistema Paranaense de Informações para a Gestão dos Riscos e Desastres Naturais (SIGRisco), da Comissão Estadual P2R2 (CEP2R2), do Radar Meteorológico Oeste, do Centro Estadual e Regionais de Gestão de Risco de Desastres (CEGRD), da Rede Paranaense de Monitoramento, do Sistema Informatizado de Alerta, do Sistema de Georreferenciamento, do Plano Estadual de Proteção e Defesa Civil, do Desenvolvimento Urbano Resiliente, do Zoneamento Ecológico-econômico (ZEE), do mapeamento das ameaças Geológicas-geotécnicas e mapeamento das áreas susceptíveis a Desastres no Litoral do Paraná.

Neste contexto o desenvolvimento de um sistema de alarme que monitore áreas de risco por enchentes, pode ajudar tanto no trabalho dos bombeiros quanto alertar os moradores dessas regiões de risco. Portanto, um

sistema de monitoramento que seja capaz de processar informação em um intervalo de tempo da ordem de segundos ou poucos minutos do nível dos rios, pode contribuir significativamente, ajudando na gestão dos riscos e prevenindo a vida das pessoas dos riscos que as enchentes oferecem.

1.2 ESTADO DA ARTE

Os sensores em fibra ótica (OFS – *Optical Fiber Sensor*) são uma interessante tecnologia para o desenvolvimento de sistemas de monitoração devido as suas características intrínsecas tais como a passividade elétrica e a capacidade de monitoração remota, tendo em vista que o sinal pode ser transmitido, por quilômetros, do ponto de monitoramento até o local da análise dos dados através da fibra. Sistemas para o monitoramento de enchentes baseado na tecnologia dos sensores em fibra têm sido demonstrados na literatura. Em 2008, Kuang e colaboradores desenvolveram um sistema de monitoramento remoto de inundação baseado em sensores de fibra ótica plástica (POF) e uma rede sem fio (KUANG; QUEK; MAALEJ, 2008). A rede sem fio, composta por uma rede de microcontroladores (MICA2DOTTM), foi utilizada como plataforma para monitorar e registrar o sinal dos sensores baseados em fibras óticas plásticas (POF – *Plastic Optical Fiber*) e transmitir esta informação para uma estação base sem fio. Um protótipo do sensor POF sem fio integrado com quatro unidades foi construído, tornando possível implantar a unidade autônoma remotamente em múltiplos pontos de monitoramento. Uma simulação de monitoramento de inundação foi realizada em uma cuba de ondas com dimensões de 24 m x 10 m x 0,9 m, onde quatro desses sensores de fibra ótica sem fio foram utilizados para detectar o aumento do nível da água na bacia. Os testes realizados mostram que o sensor POF é capaz de detectar a variação do nível do fluido com uma boa estabilidade do sinal, o sensor detecta o nível do líquido de forma confiável quando o líquido sobe ou desce até um nível predeterminado. A capacidade de resposta do sensor POF foi avaliada simulando diferentes taxas nas quais o líquido sobe imergindo a ponta do sensor em várias velocidades entre 1 mm/min a 500 mm/min.

A rede de Bragg em fibra (FBG) é um OFS que agrega algumas características interessantes no estudo de sistemas de monitoramento, tal como

o baixo tempo de resposta e a capacidade de monitoramento *quasi*-distribuído, além das vantagens intrínsecas às fibras tais como passividade elétrica, imunidade eletromagnética e peso e tamanho reduzidos (CUSANO *et al.*, 2005). Nos últimos anos muitos trabalhos têm sido feitos usando FBG para medida do nível de líquido (LAI *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2015; JIANG; HU; YANG, 2011; OBATONA *et al.*, 2013; LI *et al.* 2016(a); LI *et al.*, 2016(b)). Em 2009 Sohn e Shim propuseram um sensor em fibra ótica para medida do nível de líquido baseado na flexão da FBG (SOHN; SHIM, 2009). Nesse trabalho os autores desenvolveram um sistema que, quando o nível da água aumentava ou diminuía, uma haste flexível presa a uma boia na vertical curvava. A FBG foi fixada na parte superior da haste. Observou-se que quando o nível da água aumentava a haste curvava para cima e o comprimento de onda aumentava, quando o nível da água diminuía a haste curvava para baixo e o comprimento de onda diminuía. Esse experimento foi feito variando o nível do líquido de 0 a 100 cm.

Ameen *et al.* desenvolveram um sensor baseado em um diafragma de grafeno integrado com uma FBG monitorando simultaneamente o nível da água e a temperatura. Nesse sistema o diafragma de grafeno foi colocado na parte inferior do recipiente que comportava a água, com dimensões de 135 cm x 9,8 cm x 9,8 cm. Quanto o nível do líquido aumentava o peso sobre o diafragma de grafeno também aumentava e com isso a FBG era tensionada, alterando sua resposta. A operação do sensor de pressão é baseada na deflexão do diafragma, que surge para diferentes pressões devido ao aumento do líquido. A sensibilidade do sensor depende da deflexão do diafragma causada pelo aumento do líquido aumentando também a pressão hidrostática, que é função da altura do líquido e da densidade. O aumento da pressão no tanque é proporcional à altura da coluna do líquido. A sensibilidade para a temperatura medida pelo sensor foi de 13,31 pm/°C variando a temperatura de 27 °C a 77 °C. O sistema proposto apresentou uma resposta linear com uma sensibilidade de 24,84 pm/cm sendo que o nível de água testado variou de 0 a 100 cm (AMEEN; YOUNUS, 2016).

Segupta e Kishore desenvolveram um sensor pequeno, simples e de baixo custo para medida do nível do líquido usando o princípio da força hidrostática (SENGUPTA; KISHORE, 2014). Nesse trabalho uma FBG corroída foi embebida em uma borracha de silicone e colocada dentro de um tubo

cilíndrico, *cap.* O projeto do protótipo proposto para medir o nível do líquido foi construído de forma que a FBG corroída ficasse posicionada no centro do tubo cilíndrico. O desenho da cabeça do sensor consiste de um cilindro oco de aço inoxidável com um lado aberto e uma tampa para proteger esta extremidade superior aberta. O diâmetro interno do cilindro oco é de 7,5 cm. Um orifício de 1 mm é perfurado no centro da face oposta a extremidade aberta. Isso foi feito para facilitar a passagem da FBG pelo eixo central do cilindro. A figura 1 mostra um diagrama do sistema. Uma mistura da solução da borracha de silicone foi preparada usando agente de cura (CX-32-1417-40) numa proporção de 100:5 em peso. A solução foi despejada no cilindro oco pela sua extremidade aberta e mantida sem perturbações por 48 horas à temperatura ambiente, para a borracha se ajustar dentro do cilindro. Após ter feito isso, a fibra foi passada pelo orifício de 1 mm e fixada. Com isso, devido ao aumento do nível do líquido a pressão hidrostática causa uma compressão na borracha e uma tensão na direção radial é aplicada sobre a FBG embebida na borracha de silicone. Quando corroída a FBG torna-se mais sensível as variações de deformações mecânicas e temperatura, com isso a sensibilidade encontrada foi de 23 pm/cm da altura da coluna de água para uma variação do líquido de 0 a 100 cm.

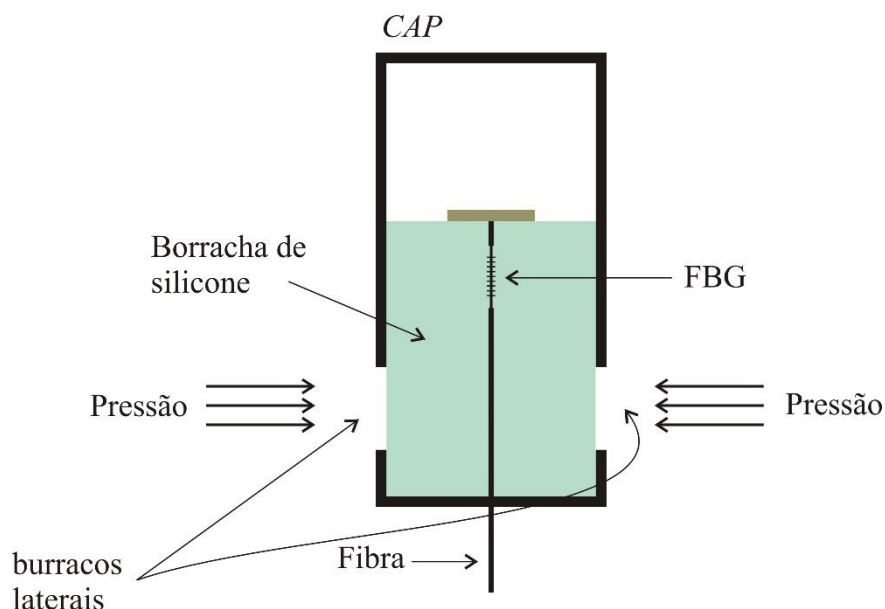


Figura 1 – Diagrama esquemático da cabeça do sensor desenvolvido por Segupta e Kishore (SENGUPTA; KISHORE, 2014).

Consales e colaboradores propuseram um sensor simples e versátil baseado no princípio de Arquimedes (CONSALES *et al*, 2018). O sistema proposto é composto por um corpo cilíndrico no qual uma fibra com uma FBG é fixada passando pelo seu centro. Após atravessar o corpo cilíndrico a fibra é presa ao fundo de um tanque. A fibra ao sair do corpo pela parte superior passa por uma roldana e é presa em um suporte horizontal. A fibra é pré-tensionada, desta forma quando o nível do líquido aumenta o volume do corpo imerso também aumenta e a força de empuxo que o líquido exerce sobre o corpo diminui a tensão na fibra resultando em um deslocamento em comprimento de onda da FBG. Em seu trabalho Consales *et al* obtiveram uma sensibilidade de 27 pm/cm em uma faixa de 25 cm.

Medidas do nível do líquido e da velocidade do fluido também têm sido demonstradas usando uma rede de período longo com uma faixa dinâmica de medida do nível do líquido de 100 cm. Em seu trabalho os autores apresentam o desenvolvimento e avaliação de dois tipos de sensores baseados em redes de período longo (LPFG), incluindo um sensor de nível de líquido móvel e um sensor reflexivo para a medição do nível do líquido e da velocidade do fluxo do fluido. Os resultados mostraram que todas as medidas estavam dentro dos limites de controle, assim, este sensor móvel era confiável e exibia pelo menos 100 cm de capacidade de medição do nível do líquido. Além disso, um sensor reflexivo composto por cinco LPFGs em série com uma extremidade refletora foi desenvolvido para avaliar o nível do líquido e a velocidade do fluxo do fluido. Depois de cada experiência de nível de líquido ter sido realizada cinco vezes, os valores médios dos desvios de comprimento de onda de ressonância para as LPFG estavam na faixa de 1,35 a 9,14 nm. Os resultados experimentais mostram que o sensor reflexivo poderia ser usado para monitorar automaticamente cinco níveis fixos de líquido. O mecanismo do sensor de velocidade de fluxo de fluido foi baseado na análise da relação entre a potência ótica, o tempo e o comprimento da LPFG. As diferenças entre as velocidades de fluxo de fluido baseados em LPFG e as velocidades médias de fluxo do fluido foram encontradas na faixa de 8,7 a 12,6% (WANG; LUO, 2012).

Díaz *et al*, propuseram um sistema com sensor em fibra para medida do nível do líquido baseado em uma FBG inserida em um diafragma de uma resina epóxi acoplado a um sensor de referência para a temperatura. O comprimento

físico da FBG foi de 3 mm e foi incorporado em um diafragma cilíndrico de resina epóxi de 1,1 mm de espessura e 50 mm de diâmetro. Na construção do protótipo a proteção de acrilato da fibra foi removida em torno de 45 mm na região da FBG, a fim de melhorar a aderência da resina epóxi à fibra, porém, perto da transição da resina para o exterior, a proteção de acrilato foi preservada para melhorar a resistência mecânica entre o diafragma e a extremidade fixas da fibra. Em segundo lugar, o sensor FBG foi centrado e pré-tensionado em um recipiente (molde de plástico) que tem as mesmas dimensões do diafragma da resina epóxi. Finalmente, a resina epóxi (*Liquid lens – Advanced 2*) foi aplicada mantendo o molde inalterado por 24 horas. Um lado do diafragma está em contato direto com a água, enquanto o outro está exposto ao ar externo à pressão atmosférica. A diferença de nível do líquido causa uma diferença de pressão no diafragma e esta pressão é convertida em tensão na fibra ótica. Para tratar os dados foi usado o método da sensibilidade cruzada para compensar a mudança do comprimento de onda devido a variação da temperatura, levando a medida exata da variação do comprimento de onda devido a deformação, com isso obteve uma sensibilidade de 28 pm/cm com alta linearidade (DIAZ *et al.*, 2018). A resina epóxi é um plástico que pode ter a sua rigidez aumentada ou diminuída através da reação com elementos catalisadores no seu processo de produção.

1.3 OBJETIVOS

Nesse trabalho é proposto um sistema de monitoramento do nível de água de rios baseado em redes de Bragg. São apresentados os resultados do projeto do sistema sensor, da calibração para análise da altura do líquido baseado no princípio da força hidrostática, dos testes em uma coluna de água e dos ensaios para solucionar a questão da sensibilidade cruzada. O sistema consiste em uma boia cilíndrica, protegida por uma coluna, que produz uma tensão longitudinal em uma FBG embebida em uma borracha de silicone devido a força de empuxo exercida pela água. Esse trabalho foi desenvolvido para aplicações práticas da medida do nível dos rios em áreas de riscos de enchentes.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos básicos do funcionamento das redes de Bragg em fibra ótica, assim como as equações que regem a propagação dos modos do campo eletromagnético no núcleo da fibra. Também trata da dependência do comprimento de onda de Bragg às perturbações externas como temperatura e deformação por tensão longitudinal. Tal dependência permite que esses dispositivos possam atuar como um sensor ótico, a partir da mudança das condições de guiamento da fibra.

2.1 FIBRA ÓPTICA

As fibras óticas são guias de onda dielétricos cilíndricos cujo material do núcleo é geralmente formado de sílica (SiO_2) dopada com germânio (Ge). A presença do germânio altera as propriedades do vidro tais como a viscosidade, o ponto de fusão e o índice de refração. A principal característica da sílica, que a torna um excelente guia de onda, é a baixa atenuação na região do infravermelho do espectro eletromagnético. O núcleo da fibra ótica possui um índice de refração maior que o índice de refração da casca que o reveste, permitindo assim o fenômeno da reflexão interna total na interface núcleo e casca (KASHYAP;1999), como mostrado na figura 2. Sendo n_1 o índice de refração do núcleo da fibra e n_2 o índice de refração da casca, com $n_1 > n_2$, o ângulo de incidência no qual se observa a reflexão interna total, obtida através da Lei de Snell, são os ângulos maiores que o ângulo crítico,

$$\theta_1 = \arcsen \left(\frac{n_2}{n_1} \right). \quad (1)$$

A fibra ótica é revestida por um material, em geral um plástico flexível, que confere a fibra maior robustez mecânica.

As fibras óticas podem ser classificadas quanto aos modos de propagação do campo elétrico ao longo do seu núcleo e também quanto ao perfil de índice de refração do núcleo da fibra (AGRAWAL, 1997). As chamadas fibras monomodo permitem que apenas um modo se propague pelo seu núcleo, enquanto que as fibras multimodo permitem que mais de um modo se propague em seu núcleo. O núcleo das fibras óticas pode apresentar uma variação de índice de refração da forma degrau ou gradual, razão pela qual também são classificadas desta forma. As fibras monomodo com o perfil de índice degrau são caracterizadas por um aumento abrupto do índice de refração, na interface núcleo e casca, em direção ao centro da fibra. A figura 2 ilustra uma fibra de índice degrau. Esta variação abrupta aliada ao pequeno diâmetro do núcleo (~10 μm) permite que, para uma certa região de frequências, apenas um modo se propague no núcleo da fibra, devido a sua baixa frequência de corte.

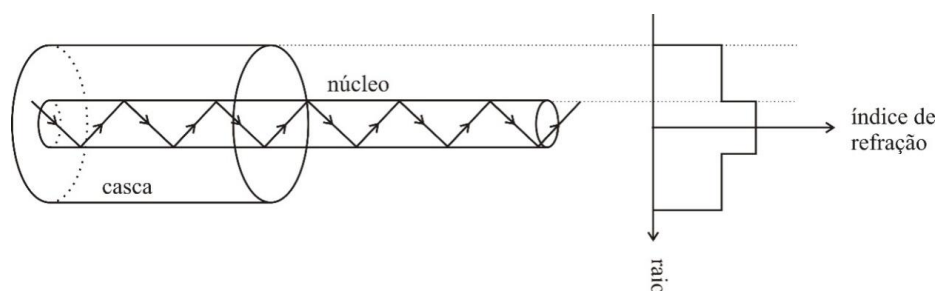


Figura 2 - Fibra de índice degrau, com uma variação abrupta do índice de refração do núcleo em relação à casca que o reveste e representação da propagação da luz no núcleo (Autoria própria).

A propagação dos modos no núcleo da fibra ótica é descrita pelas soluções da equação de onda para os campos elétricos e magnéticos propagando-se em uma fibra ótica, que é um dielétrico. Tal equação pode ser obtida a partir das equações de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0. \quad (5)$$

Nestas equações \vec{E} é o campo elétrico, \vec{H} é o campo magnético, \vec{D} é a densidade de fluxo elétrico e \vec{B} é a densidade de fluxo magnético. Supondo que o meio é dielétrico, isotrópico e linear, sem cargas livres e correntes a relação entre os quatro vetores de campo é escrita como,

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad (6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (7)$$

onde ε é a permissividade elétrica e μ é a permeabilidade magnética. Aplicando o rotacional na equação (2), usando a identidade vetorial $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$ e tomando a equação (4) obtém-se a equação de onda para o campo elétrico \vec{E} (HECHT, 2002),

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (8)$$

O mesmo princípio pode ser aplicado para obter a equação da onda para o campo magnético,

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}, \quad (9)$$

onde a velocidade de fase da luz no meio dielétrico é,

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon}}. \quad (10)$$

Considerando uma geometria cilíndrica para o guia de onda como a representada na figura 3, podemos supor soluções para as equações (8) e (9) na forma (CHERIN, 1983),

$$\vec{E} = E(r, \varphi) e^{i(\omega t - \beta z)} \hat{z}, \quad (11)$$

$$\vec{H} = H(r, \varphi) e^{i(\omega t - \beta z)} \hat{z}, \quad (12)$$

onde ω é a frequência angular e β é a constante de propagação que assume valores discretos determinados a partir das condições de fronteira dos campos elétrico e magnético na interface núcleo-casca.

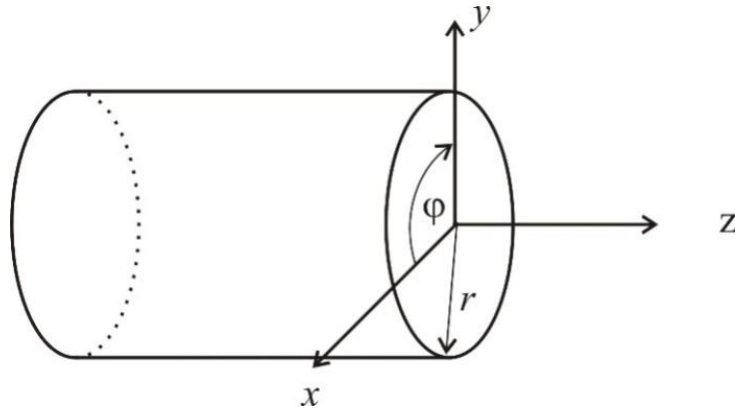


Figura 3 - Sistema de coordenadas cilíndricas adotado no estudo da propagação em fibras (Autoria própria).

As componentes transversais r e φ dos campos elétricos e magnéticos podem ser expressas em termos da componente longitudinal z . Desta forma o problema se reduz a encontrar a solução da componente longitudinal da equação de onda. A partir deste ponto será apresentada a discussão apenas para o campo elétrico tendo em mente que o desenvolvimento para o campo magnético é similar. Para encontrar essas expressões podemos substituir a equação (11) em (2), resolvendo o produto vetorial e utilizando a relação dada pela equação (7) obtém-se,

$$E_r = -\frac{i}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\mu \omega}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} \right), \quad (13)$$

$$E_\varphi = -\frac{i}{\kappa^2} \left(\frac{\beta}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \mu \omega \frac{\partial H_z}{\partial r} \right), \quad (14)$$

onde $\kappa^2 = \varepsilon \mu \omega^2 - \beta^2$. Com isso, conhecidas as componentes E_z e H_z todas as outras podem ser determinadas.

A equação de onda para o campo elétrico em coordenadas cilíndricas é,

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} + q^2 E_z = 0. \quad (15)$$

Usando o método de separação de variáveis, é possível supor uma solução para a equação (15) na forma,

$$E_z = A F_1(r) F_2(\varphi) F_3(z). \quad (16)$$

A propagação no tempo e ao longo do eixo z deve ser harmônica de forma que,

$$F_3(z) = e^{j(\omega t - \beta z)}. \quad (17)$$

A simetria cilíndrica leva a uma solução para F_2 periódica em φ ,

$$F_2(\varphi) = e^{iv\varphi}. \quad (18)$$

As soluções apresentadas nas equações (17) e (18) permitem separar a componente longitudinal da equação (15), obtendo-se

$$\frac{d^2 F_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF_1}{dr} + \left(q^2 - \frac{v^2}{r^2} \right) F_1 = 0. \quad (19)$$

A equação (19) é uma equação diferencial conhecida, tendo como solução as funções cilíndricas. Devido ao seu comportamento oscilatório os modos de propagação da onda eletromagnética no núcleo da fibra ótica são descritos pelas funções de Bessel. Na casca o campo deve apresentar um comportamento de decaimento exponencial com o aumento do raio r , portanto, as funções de Hankel são a escolha adequada nessa região. A continuidade do campo elétrico, na interface núcleo-casca (raio do núcleo a) leva à equação característica da fibra ótica,

$$\left[\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \frac{a\gamma^2}{\kappa^2} \frac{J'_v(\kappa a)}{J_v(\kappa a)} + i\gamma\alpha \frac{H_v^{(1)}(i\gamma a)}{H_v^{(1)}(i\gamma a)} \right] \left[\frac{a\gamma^2 J'_v(\kappa a)}{\kappa J_v(\kappa a)} + i\gamma\alpha \frac{H_v^{(1)}(i\gamma a)}{H_v^{(1)}(i\gamma a)} \right] = \left[\nu \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \frac{\beta\kappa_2}{\kappa^2} \right]^2. \quad (20)$$

sendo, ε_1 e ε_2 a permissividade elétrica do material do núcleo e da casca da fibra ótica respectivamente.

A solução desta equação permite encontrar a constante de propagação que caracteriza os modos existentes no guia.

2.2 FOTOSSENSIBILIDADE EM FIBRAS ÓTICAS

A fotossensibilidade em fibras óticas é um efeito não linear que refere-se a uma mudança permanente no índice de refração do núcleo da fibra quando exposto a uma luz com comprimento de onda e intensidade característicos que depende do material do núcleo. Inicialmente, esperava-se que a fotossensibilidade fosse observada apenas em fibras óticas com uma grande concentração de germânio no núcleo e fotoexcitado por uma luz no UV em vários comprimentos de onda, mas atualmente sabe-se que a fotossensibilidade pode ser observada em outras condições.

O efeito da fotossensibilidade em fibras de sílica dopadas com germânio, é devido a um defeito conhecido como deficiência de oxigênio-germânio (GeO), que ocasiona uma mudança na absorção após a exposição da fibra a radiação UV. Hand e Russel (OTHONOS, 1997 & NETO, 2007) desenvolveram um modelo para entender a relação entre a mudança no índice de refração e a mudança na absorção, utilizando as relações de Kramers-Kronig (AGRAWAL, 2001). Neste modelo foi proposto a quebra de ligações de GeO, com uma absorção da energia maior que 5 eV, sendo essa obtida através de dois fótons de 488 nm de um laser de argônio.

O núcleo da fibra é dopado com germânio para aumentar o índice de refração. A concentração de germânio no núcleo da fibra é aproximadamente 3% a 5%. O germânio no núcleo da fibra favorece a formação de ligações deficientes de oxigênio como as ligações Si-Ge, Si-Si e Ge-Ge. O defeito mais comum dentro do núcleo da fibra é o GeO, e a energia necessária para quebrar

essa ligação é de 5 eV. O rompimento dessas ligações libera elétrons, posteriormente esses elétrons são aprisionados em buracos formando centros conhecidos como Ge(1) e Ge(2), alterando o índice de refração do núcleo da fibra. Portanto, a exposição das fibras de sílica dopada com germânio à radiação UV gera centros de cor que alteram o índice de refração devido à quebra de ligações químicas Ge-SiO₂.

2.3 REDES DE BRAGG

A descoberta da fotossensibilidade em fibras óticas, em 1978 (HILL *et al.*, 1978), proporcionou o desenvolvimento de uma nova classe de sensores em fibras que tem se tornado objeto de grande interesse da comunidade científica, denominadas redes de Bragg em fibras óticas (*Fiber Bragg Grating- FBG*). Uma importante característica desse dispositivo é a baixa perda por inserção possibilitando sua aplicação em sistemas de telecomunicações o que proporcionou uma intensificação nas pesquisas sobre este componente. Como resultados logo surgiram propostas de aplicações no campo dos sensores em fibras óticas. As vantagens oferecidas pelas fibras óticas, tal como baixa perda na transmissão, imunidade a interferência eletromagnética, tamanho e peso reduzidos, passividade elétrica, tornaram as redes de Bragg um sensor ótico versátil em diversas aplicações como por exemplo, no sensoriamento remoto em ambientes hostis. As fibras óticas são úteis para o monitoramento de estruturas, como construções civis, por apresentarem sensibilidade direta a parâmetros externos como, variação da temperatura e tensão mecânica.

As FBGs consistem na modulação periódica do índice de refração da fibra ao longo do eixo de propagação no núcleo da fibra. Essa modulação funciona como um filtro espectral reflexivo, permitindo que uma pequena faixa de comprimentos de onda seja refletida em função de um espalhamento coerente e sucessivo nas interfaces das estruturas periódicas (HILL; METZ, 1997), como mostra a figura 4.

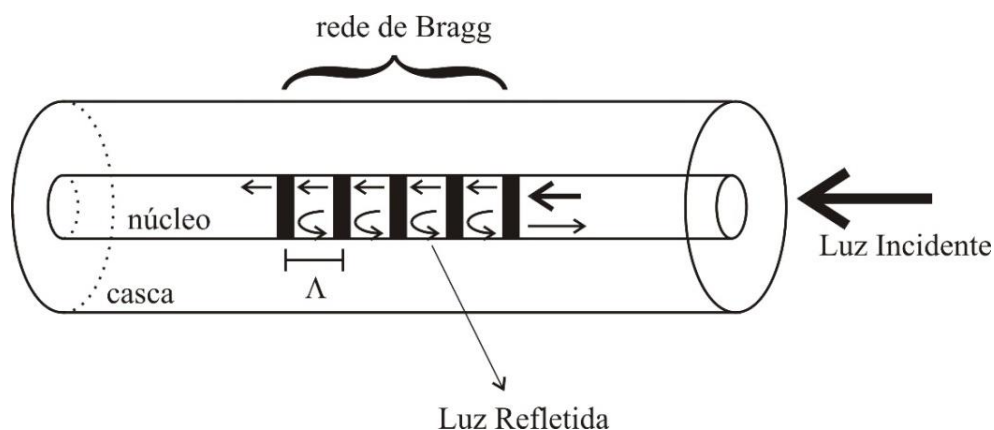


Figura 4 – Estrutura da rede de Bragg (Autoria própria).

Tipicamente as redes de Bragg são gravadas através de radiação ultravioleta (UV) de um feixe de luz emitido pelo laser que atravessa uma máscara de fase e incide no núcleo da fibra. A técnica de exposição direta à máscara de fase é o processo mais utilizado na gravação das grades de Bragg, como mostra a figura 5. Nesse caso, um laser excímero de Argônio (ArF) emitindo em 193 nm, é usado para gerar pulsos que ao atravessar a máscara de fase produzem um padrão de interferência logo após a máscara, local onde é posicionada a fibra. A energia do fóton incidente rompe as ligações do silício com germânio, no núcleo da fibra, mudando a estrutura do núcleo e alterando o índice de refração. Uma lente cilíndrica é utilizada para gerar um padrão alongado dos pulsos do laser ao longo da fibra otimizando o processo de gravação.

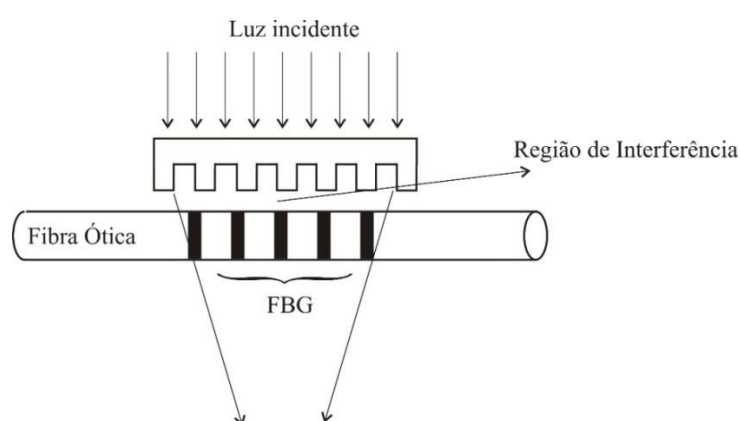


Figura 5 - Representação esquemática do método de gravação por máscara de fase (Autoria própria).

As FBGs têm como o princípio de funcionamento o fenômeno da reflexão de Fresnel, esse mostra como um raio de luz sofre reflexão ao atravessar de um

meio para outro com índice de refração diferente (HECHT, 2002). Quando a luz chega à região do núcleo da fibra, onde está a rede de Bragg, ela sofre sucessivas reflexões. Para que a luz seja refletida em um comprimento de onda específico, denominado comprimento de onda de Bragg, ela deve satisfazer a condição de Bragg que é a conservação do momento e energia do feixe de luz ao incidir na estrutura periódica. A condição da conservação do momento é dada por (OTHONOS; KALLI, 1999),

$$2 \left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda}. \quad (21)$$

Esta condição de conservação leva à condição de Bragg em primeira ordem:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (22)$$

onde λ_B é o comprimento de onda ressonante de Bragg, Λ é o período da modulação de índice causada pelo feixe laser e n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo de núcleo que está associado à constante de propagação.

Caso a condição de Bragg não seja satisfeita o feixe fica fora de fase e se cancela por interferência destrutiva. Portanto, a rede de Bragg permite que a radiação seja transmitida em todos os comprimentos de onda exceto o comprimento de onda de Bragg.

2.4 SENSIBILIDADE DA FBG Á TENSÃO E TEMPERATURA

O comprimento de onda ressonante depende do índice de refração efetivo do modo fundamental e da periodicidade da rede. Tanto o índice de refração efetivo como o período da rede podem ser afetados por uma variação na tensão longitudinal aplicada sobre a fibra e/ou pela mudança da temperatura. A variação do comprimento de onda refletido pela grade de Bragg devido a uma perturbação da tensão e temperatura é representada por (OTHONOS; KALLI, 1999):

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T. \quad (23)$$

O primeiro e o segundo termo da equação (23) representam os efeitos da variação da tensão na fibra ótica, sendo o primeiro devido ao efeito elástico e o segundo a variação na periodicidade da rede. O terceiro e quarto termo representam o efeito da variação da temperatura sobre a fibra ótica, sendo o terceiro o efeito termo-ótico e o quarto a expansão térmica. Portanto, o primeiro e segundo termos da equação (23) correspondem a uma variação no período da rede e também no índice de refração efetivo, com isso, uma tensão longitudinal aplicada sobre a FBG induz uma mudança no índice de refração efetivo. Tipicamente, em um comprimento de onda de 1,5 μm a resposta da tensão é aproximadamente 1 pm/ $\mu\epsilon$ (pico-metro por micro-strain) e sensibilidade a temperatura é de 15 pm/ $^\circ\text{C}$ (OTHONOS; KALLI, 1999).

O efeito da tensão sobre a fibra ótica também pode ser expresso como,

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\epsilon_z, \quad (24)$$

onde ϵ_z é a tensão aplicada e p_e é a constante de tensão ótica definida como,

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (25)$$

p_{11} e p_{12} são componentes do tensor de tensão ótica, e ν é o raio de Poisson's.

2.5 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR

O princípio básico do sensor proposto é o uso da força de empuxo devido a uma boia cilíndrica para produzir uma tensão longitudinal em uma FBG

embebida em borracha de silicone. A rede de Bragg é inserida na cabeça do sensor, uma peça cilíndrica com uma extremidade aberta e outra fechada. A rede é então recoberta por borracha de silicone e posicionada no topo do sistema que ficará parcialmente imerso no rio. No centro do sistema haverá uma boia que terá sua extremidade superior em contato direto com a borracha. A figura 6 mostra um diagrama da cabeça do sensor. O aumento do nível de água fará com que a porção imersa da boia aumente e conseqüentemente haverá um aumento da força de empuxo sobre a boia e conseqüentemente aumento da força aplicada sobre a borracha, aumentando a deformação da rede e causando um deslocamento em comprimento de onda.

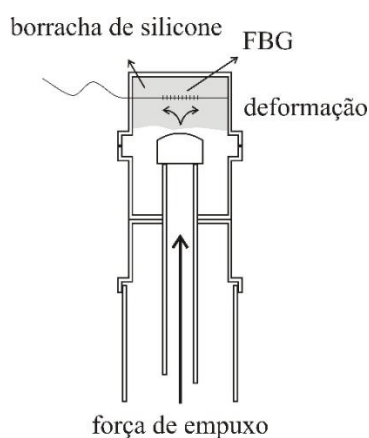


Figura 6- Diagrama da cabeça do sensor indicando a direção da força de empuxo e a da deformação da rede (Autoria própria).

A força de empuxo é proporcional ao volume da boia imerso na água. Para uma área de seção reta circular constante o volume depende apenas da altura da boia imersa na água e, portanto, a força de empuxo será dada por:

$$E = \rho.V.g = \rho.Ahg, \quad (26)$$

onde ρ é a densidade da água, A é a área de seção reta, g é a aceleração da gravidade e h é a altura da boia imersa na água.

Portanto a altura do nível da água em função da força de empuxo é dado por:

$$h = \frac{E}{\rho Ag}. \quad (27)$$

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os métodos para o desenvolvimento do trabalho e os equipamentos utilizados. Inicialmente será descrito o processo de gravação das redes, em seguida a montagem da cabeça do sensor e o processo de calibração e, por fim, os ensaios de imersão na coluna de água e de sensibilidade cruzada.

3.1 PRODUÇÃO DAS REDES

As FBGs utilizadas neste trabalho foram gravadas em uma fibra monomodo padrão de telecomunicações da marca Draka, modelo G.652 através da técnica de exposição direta à máscara de fase. Um laser excímero de argônio (ArF, Xantos XS, Coerente) emitindo em um comprimento de onda de 193 nm com uma taxa de repetição de 250 Hz e com energia de 2,5 mJ por pulso, foi usado para escrever as FBGs no núcleo da fibra. A máscara de fase utilizada possui um passo de 1064,9 nm e, portanto, as redes produzidas apresentavam comprimento de onda na região de 1540,9 nm. No total foram gravadas 7 redes para o desenvolvimento dos trabalhos, sendo que duas redes se romperam na montagem do protótipo cabeça do sensor.

3.2 O SISTEMA SENSOR E CABEÇA DO SENSOR

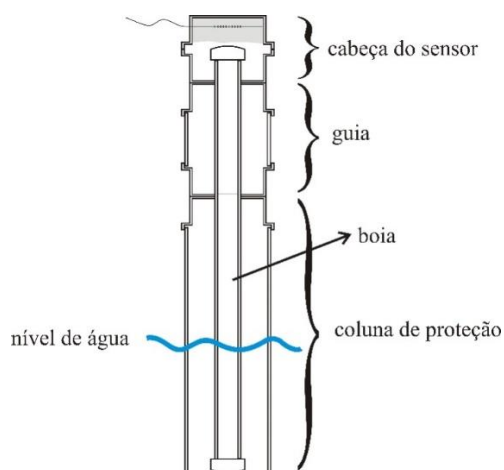
A cabeça do sensor é formada por um *cap* de tubos para água, de PVC cilíndrico com 4 cm de diâmetro. A fibra com a FBG foi inserida através do cano PVC, posicionada no centro do cano e fixada nas extremidades com adesivo a base de cianoacrilato. Após a inserção da fibra, todo o interior do *cap* que contém a FBG foi preenchido com uma borracha de silicone, sendo que a quantidade de borracha foi inserida de tal forma que a rede ficasse a uma determinada

profundidade. O preenchimento com borracha foi realizado três vezes de forma que o sensor apresentou três diferentes profundidades 5 mm, 10 mm e 15 mm. As diferentes profundidades têm por objetivo avaliar a máxima força que pode ser exercida sobre a rede em função da profundidade de forma a possibilitar a sintonia da altura máxima da coluna de água que o sistema pode monitorar.

A cabeça do sensor está acoplada a uma guia também confeccionado com cano PVC de 15 cm de comprimento e 4 cm de diâmetro. Em cada uma das extremidades desta guia são acoplados 2 caps unidos por parafusos possuindo furos circulares de 2,3 cm de diâmetros que permitem a passagem da boia. A figura 7(a) mostra a foto da guia e a figura 7(b) um diagrama do sistema completo. No sistema completo a guia é conectada a um cano de PVC de 4 cm de diâmetro que possui um comprimento de 2,15 m, ao final deste cano uma outra guia é conectada e um segundo cano é ligado a esta guia, as guias tem o objetivo de alinhar a boia no centro do sistema e os canos de 4 cm tem o objetivo de conferir proteção a boia que passa pela guia. A boia consiste de um cano de PVC de 2 cm de diâmetro e 2,20 m de comprimento cujas extremidades são fechadas com dois caps de 2 cm de diâmetro. Esta boia está livre para se mover verticalmente no interior do sistema.



(a)



(b)

Figura 7 – (a) Foto da guia utilizada para posicionar a boia no centro do sistema e (b) diagrama do sistema mostrando a cabeça do sensor, a guia e a coluna de proteção (Autoria própria).

3.3 CALIBRAÇÃO DO SENSOR

A calibração do sensor permite, através de um processo controlado, determinar a sensibilidade e o tempo de resposta do sensor. Nesta etapa também é possível verificar se há alguma histerese na resposta do sensor após a aplicação e remoção da força.

Para se obter a resposta da rede em função da força aplicada na cabeça do sensor foram utilizados um braço mecânico e um cano de PVC com 15 cm com as mesmas características da boia cilíndrica, como mostra a figura 8. Diferentes massas são colocadas no gancho na extremidade da alavanca resultando em diferentes forças aplicadas a cabeça do sensor. As massas utilizadas variaram de 50 g a 1200 g, de 50g a 1450 g e de 200 g a 3200 g, respectivamente nas medidas com a FBG inserida na borracha de silicone a 5 mm, 10 mm e 15 mm de profundidade. A cabeça do sensor foi mantida sobre a ação da força por um intervalo de tempo de algumas dezenas de segundos. Após isso, o peso foi removido e após o comprimento de onda estabilizar, outro valor diferente de massa foi inserido no suporte. O procedimento foi repetido cinco vezes com a temperatura constante de 22°C medida com um termômetro com uma resolução de $\pm 1^\circ\text{C}$. As três configurações do sensor, profundidade do sensor de 5 mm, 10 mm e 15 mm da borracha de silicone, foram submetidas a este ensaio.



Figura 8- Suporte usado para calibrar a cabeça do sensor (Autoria própria).

Durante todo o ensaio a resposta da rede foi monitorada utilizando um interrogador SM125 da Micronoptics com taxa de aquisição de 1Hz e resolução em comprimento de onda de 1 pm.

3.4 TESTE DE IMERSÃO EM ÁGUA

Após a calibração da cabeça do sensor todo o sistema representado na figura 7(b) foi submetido a um ensaio de imersão em água. Este ensaio tem por objetivo comparar os resultados obtidos no processo de calibração com os resultados obtidos em uma situação na qual a força aplicada a cabeça do sensor é devida a força de empuxo sobre a boia.

Neste ensaio foi desenvolvida uma coluna de testes usando um cano PVC de 7,5 cm de diâmetro com 2 metros de altura. Na parte superior do cano de 7,5 cm foram inseridos três parafusos na direção radial para fixação do sistema no centro da coluna de testes, como mostra a figura 9. A extremidade inferior da coluna é vedada com um *cap* de PVC de 7,5 cm de diâmetro. O ensaio consiste em medir a resposta do sensor ao longo do tempo enquanto a coluna de testes é preenchida com água.



Figura 9 - Foto da extremidade superior da coluna de testes mostrando os parafusos de fixação do sistema (Autoria própria).

Durantes os testes, foram escolhidos passos de 10 cm, 15 cm e 20 cm de altura na coluna de água, para as profundidades da rede de 5 mm, 10 mm e 15 mm, respectivamente. Para os sensores com a rede imersa em 10 mm e 15 mm na borracha de silicone foi necessário aumentar o passo da coluna de água pois o passo de 10 cm causava variações no comprimento de onda muito pequenas ou inexistentes. Para variar a altura do nível da água em 10 cm foram feitas marcações no guia de 10 cm em 10 cm, e em seguida a coluna foi

preenchida com água até o nível das marcações. O preenchimento com água foi feito de forma controlada medindo o volume de água com um Becker de 600 ml. As peças utilizadas para fixar o guia no centro do cano PVC de 7,5 cm, causaram uma pequena variação da quantidade de água para aumentar a altura do líquido em 10 cm e foram desprezadas. As quantidades usadas para variar a altura do líquido em 10, 15 e 20 cm foram de aproximadamente 350, 525 e 700 ml, respectivamente.

Conhecendo o volume de água correspondente a cada altura na coluna de água o sistema foi montado e fixado na vertical, de forma que a boia ficasse encostada tanto na extremidade inferior do cano PVC quanto na cabeça do sensor, onde está a FBG embebida na borracha de silicone, a figura 10 mostra a coluna de testes montada com o sistema inserido em seu interior. Usando o becker de 600 ml a coluna de testes foi preenchida com água até uma altura de 200 cm em passos de 10, 15 e 20 cm dependendo da profundidade da rede e o comprimento de onda da rede foi monitorado ao longo do tempo. Cada experimento foi repetido cinco vezes.



Figura 10. Coluna de teste de imersão em água com o sistema inserido em seu interior (Autoria própria).

3.5 CARACTERIZAÇÃO DA SENSIBILIDADE CRUZADA

As redes de Bragg também são sensíveis a variações de temperatura, portanto uma segunda rede, isolada de deformações mecânicas, foi utilizada para discriminar a resposta do sensor devido a variações deste parâmetro com o aumento do nível de água. Esta segunda rede foi encapsulada em uma agulha metálica de seringa e inserida na cabeça do sensor em uma região próxima à rede utilizada para medir o nível de água como mostra a figura 11.

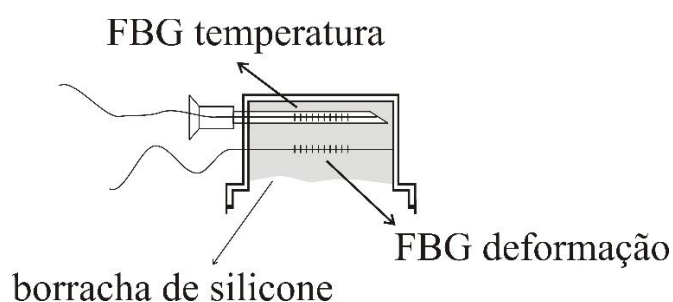


Figura 11. Diagrama esquemático indicando as posições das redes utilizadas para as medidas de temperatura e nível de água (Autoria própria).

Este sistema foi submetido aos ensaios de calibração utilizando o braço mecânico e de variação de temperatura. Nas caracterizações térmicas o sistema foi inserido em uma estufa à temperatura ambiente e aquecido lentamente até uma temperatura de 62 °C.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na calibração da cabeça do sensor ao avaliar a dependência da sensibilidade com força aplicada e a profundidade da rede na borracha de silicone. Também serão apresentados e discutidos os resultados dos testes na coluna de água e os resultados do estudo da sensibilidade cruzada.

4.1 CALIBRAÇÕES DAS CABEÇAS DOS SENSORES

A figura 12 mostra a resposta do sensor em função do tempo nos ensaios cíclicos de aplicação e remoção da força utilizando o braço mecânico para a cabeça do sensor com a rede à inserida à 5 mm de profundidade na borracha de silicone. Neste ensaio a cada aplicação a força é aumentada em 50 gf, iniciando em 50 gf e finalizando em 1200 gf. O deslocamento em comprimento de onda máximo observado foi de 720 pm quando uma força de 1200 gf é aplicada. Para forças aplicadas superiores a 1200 gf observou-se uma forte atenuação e uma deformação do sinal refletido, provavelmente devido à deformação transversal da fibra induzindo uma birrefringência.

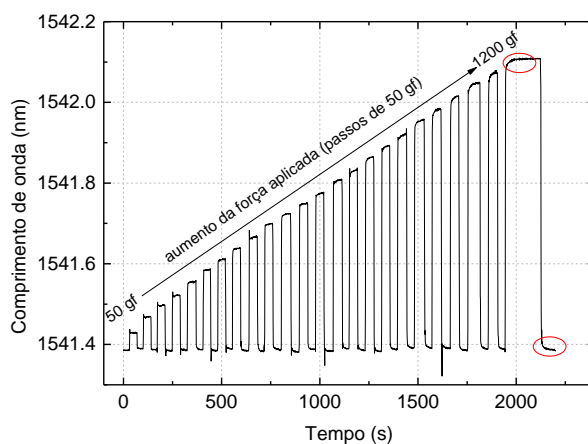


Figura 12. Comprimento de onda em função do tempo da cabeça sensores com a rede imersa a 5 mm de profundidade, variando o peso de 50 a 1200 gramas. As regiões destacadas com círculos vermelhos foram utilizadas para determinar o tempo de estabilização (Autoria própria).

Após a aplicação da força observa-se um deslocamento abrupto do comprimento de onda para maiores valores seguido de uma estabilização. Quando a força é removida o comprimento de onda retorna ao seu valor inicial também de forma abrupta. Pode-se notar também que com o aumento da força o comprimento não se desloca diretamente para seu valor de estabilização. Assim que a força é aplicada ou removida há um deslocamento abrupto seguido de uma variação exponencial levando o comprimento de onda atingir seu valor de estabilização. Esse comportamento é mais evidente quando uma força de 1200 gf é aplicada ao sistema. No último ciclo de aplicação e remoção da força esse comportamento está destacado como uma elipse, como mostra a figura 12. Esse comportamento exponencial do comprimento de onda causa um aumento no tempo de resposta do sensor. A maior constante de tempo observada foi para a massa de 1200 g, quando a força foi aplicada e quando a força foi removida. Os valores das constantes de tempo foram determinados utilizando equações empíricas, sendo a equação (28) utilizada quando a força é aplicada e a equação (29) quando a força é removida.

$$\lambda_a = \lambda_a^0 + A_a e^{-(t-t_0)/\tau_a} \quad (28)$$

$$\lambda_r = \lambda_r^0 + A_r \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau_r}}\right) \quad (29)$$

onde os sub-índices a e r referem-se a aplicada e removida, λ^0 é o comprimento de onda de estabilização, A é a amplitude do deslocamento e τ é a constante de tempo. A constante de tempo média foi de aproximadamente 11 segundos. Os resultados dos ajustes podem ser observados nas figuras 13 (a) e (b).

A sensibilidade é obtida a partir da dependência do comprimento de onda com a força aplicada. O comprimento de onda em função da força aplicada foi obtido dos dados apresentados no gráfico da figura 12 considerando os erros aleatórios e instrumentais, figura 14. O comprimento de onda variou linearmente com a força aplicada com um coeficiente de Pearson's de 0,9988 e o dispositivo apresentou uma sensibilidade de $(0,59 \pm 0,06)$ pm/gf. Esta resposta linear corresponde à deformação longitudinal causada pela deformação da borracha de silicone.

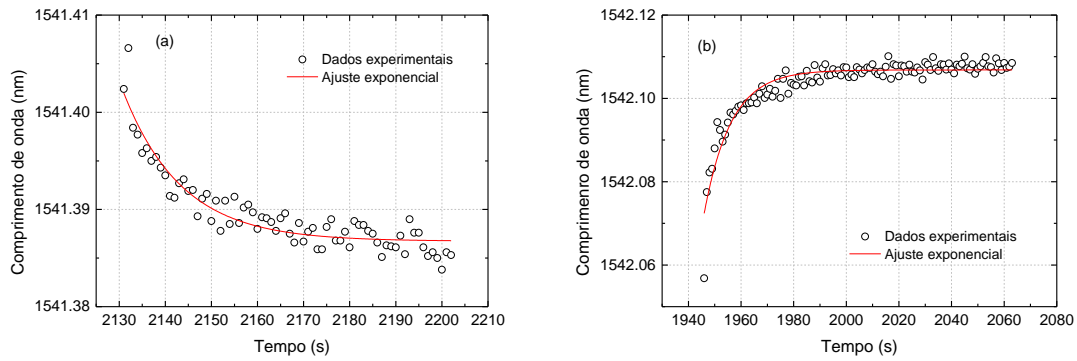


Figura 13. (a) Variação exponencial do comprimento de onda em função do tempo após a remoção e (b) após a aplicação de uma força de 1200 gf (Autoria própria).

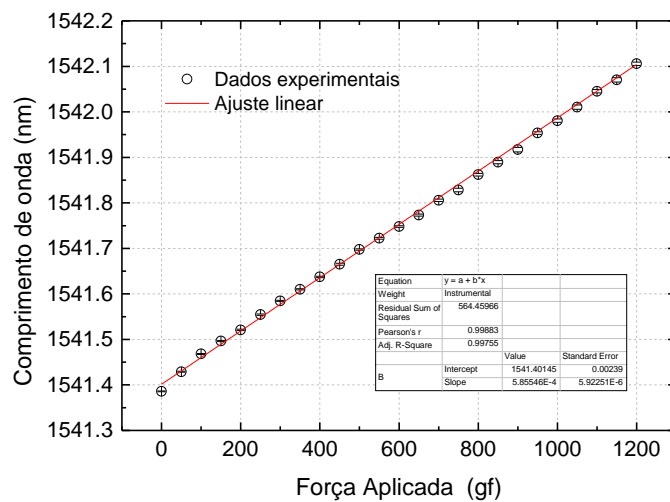


Figura 14. Comprimento de onda em função da força aplicada da cabeça do sensor com a rede imersa 5 mm na borracha de silicone (Autoria própria).

A altura h da coluna de água correspondente a força aplicada no ensaio de calibração pode ser estimada igualando a equação do empuxo (27) com a equação da força peso:

$$E = P \quad (30)$$

$$\rho g h A = m g \quad (31)$$

$$h = \frac{m}{\rho A} \quad (32)$$

onde m é a massa em gramas (g), ρ é a densidade do líquido em g/cm^3 e A é a área transversal da boia em cm^2 .

O comprimento de onda em função da altura estimada utilizando a equação (32) e os dados do gráfico da figura 14 é apresentado na figura 15. A sensibilidade obtida foi de $(1,84 \pm 0,02)$ pm/cm e a altura máxima que o sistema que o sistema pode mensurar foi estimada em aproximadamente 381 cm. A sensibilidade obtida é pequena comparada com os trabalhos disponíveis na literatura, mas para a aplicação proposta, não é necessária uma alta sensibilidade, pois pequenas variações da ordem de centímetros no nível dos rios não é o foco do problema abordado. Levando em conta a resolução de 1 pm do interrogador SM 125 o sistema apresenta uma resolução em altura da coluna de água de aproximadamente 0,3 cm.

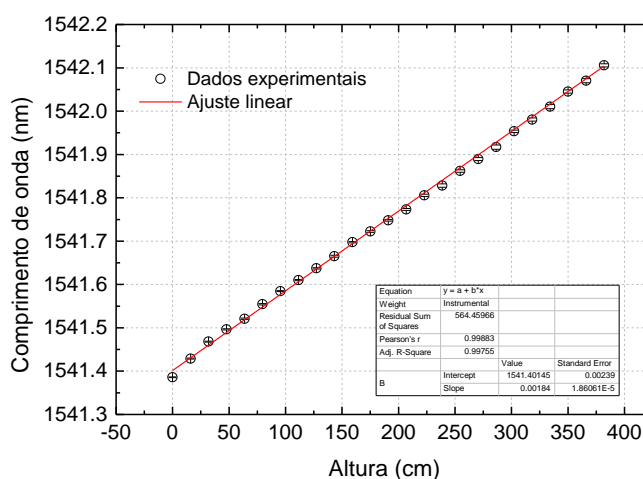


Figura 15. Comprimento de onda em função da altura estimada com a equação (32) da cabeça do sensor com a rede imersa 5 mm na borracha de silicone (Autoria própria).

Os resultados do estudo da dependência da força máxima que pode ser exercida sobre a rede em função da profundidade de forma a possibilitar a sintonia máxima da coluna de água que o sistema pode monitorar, são apresentados nas figuras 16 a 23.

A figura 16 mostra a resposta do sensor em função do tempo nos ensaios de aplicação e remoção da força utilizando o braço mecânico para a cabeça do sensor com a rede inserida à 10 mm de profundidade na borracha. Neste ensaio a cada aplicação a força também é aumentada em 50 gf, iniciando em 50 gf. Para essa nova configuração a cabeça do sensor suportou um peso

de 1450 gf, após esse valor novamente observou-se uma forte atenuação e uma deformação do sinal refletido. Também houve um aumento no deslocamento máximo em comprimento de onda que neste caso foi de 572 pm quando uma força de 1450 gf é aplicada. Além do aumento da força máxima que o dispositivo pode suportar e do deslocamento máximo também é possível notar que o comportamento exponencial na resposta em comprimento de onda quando a força é aplicada ou removida também tornou mais evidente.

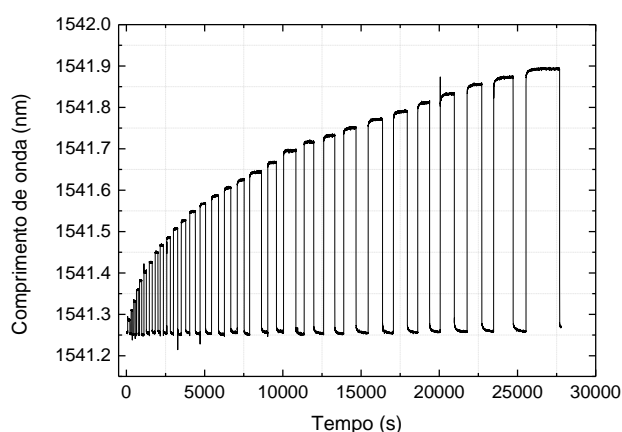


Figura 16. Comprimento de onda em função do tempo da cabeça sensores com a rede imersa a 10 mm de profundidade, variando o peso de 50 a 1400 gramas (Autoria própria).

A constante de tempo média para a estabilização da resposta do sensor imerso 10 mm na borracha de silicone apresentou um valor médio de aproximadamente 160 segundos.

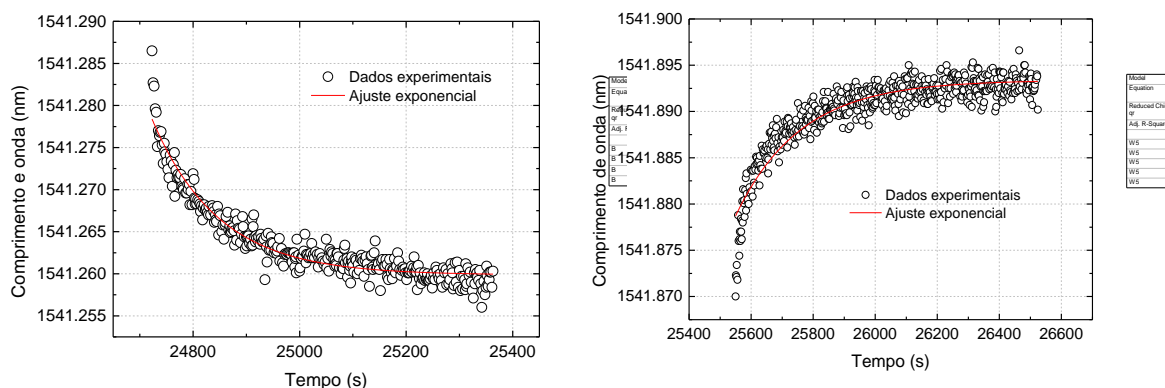


Figura 17. (a) Variação exponencial do comprimento de onda em função do tempo após a remoção e (b) após a aplicação de uma força de 1450 gf (Autoria própria).

A sensibilidade do sensor com a rede de Bragg imersa 10 mm na borracha de silicone foi obtida a partir da dependência do comprimento de onda com a força aplicada, mostrada no gráfico da figura 18. O comprimento de onda também variou linearmente neste caso com um coeficiente de Pearson's de 0,99918 e o dispositivo apresentou uma sensibilidade de $(0,41 \pm 0,02)$ pm/gf. Para esta cabeça do sensor a incerteza na determinação do comprimento de onda foi maior, pois o aumento da constante de tempo foi acompanhado de uma maior dispersão em torno do comprimento de onda de estabilização.

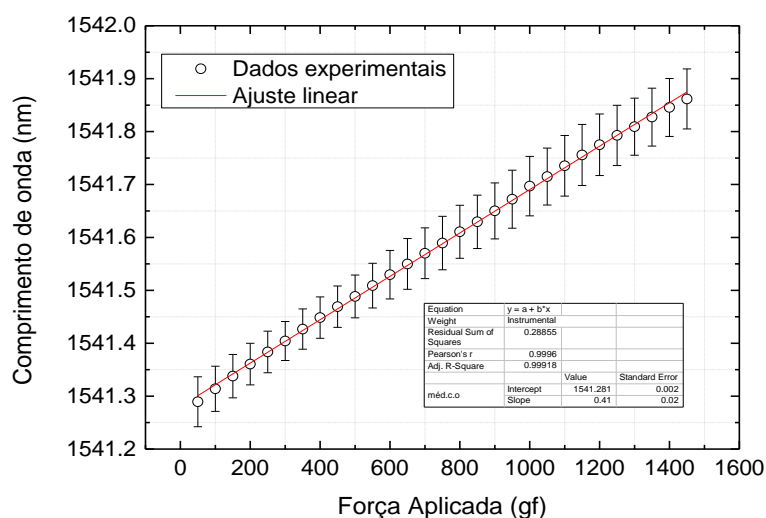


Figura 18. Comprimento de onda em função da força aplicada da cabeça do sensor com a rede imersa 10 mm na borracha de silicone (Autoria própria).

O comprimento de onda em função da altura estimado utilizando a equação (32) e os dados do gráfico da figura 18 é apresentado na figura 19. A sensibilidade obtida para este caso foi de $(1,29 \pm 0,01)$ pm/cm e a altura máxima que o sistema pode mensurar foi estimada em aproximadamente 465 cm. O aumento na altura máxima que o sistema é capaz de mensurar também foi acompanhado de um aumento na resolução em altura da coluna de água para aproximadamente 0,8 cm, novamente levando em conta a resolução de 1 pm do interrogador SM 125.

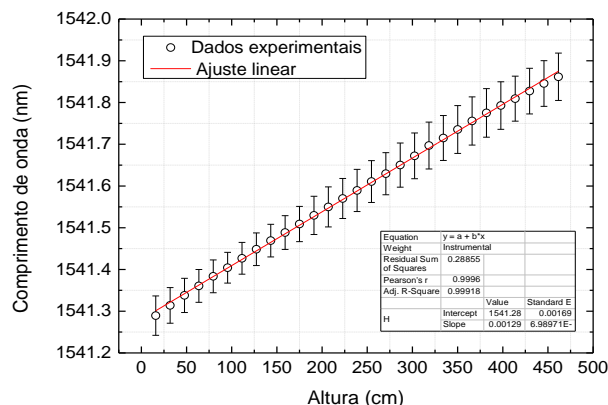


Figura 19. Comprimento de onda em função da altura estimada com a equação (32) da cabeça do sensor com a rede imersa 10 mm na borracha de silicone (Autoria própria).

A resposta do sensor em função do tempo nos ensaios de aplicação e remoção da força com a cabeça do sensor tendo a rede imersa na maior profundidade, 15 mm na borracha de silicone, é mostrada na figura 20. Para este caso o sensor não respondeu até que a força aplicada fosse de aproximadamente 200 gf devido a espessa camada de borracha de silicone recobrando a rede de Bragg. Portanto o passo na variação da massa aplicada na alavanca mecânica foi aumentado para 200 g. O deslocamento máximo em comprimento de onda obtido através do ensaio de calibração foi de 508 pm quando uma força de 3200 gf é aplicada, mas esta não é a força máxima que o sistema suporta. Nos ensaios não foram utilizadas forças maiores principalmente devido a limitações de tempo, pois cada ensaio leva aproximadamente dez horas de duração e cada ensaio é repetido pelo menos cinco vezes.

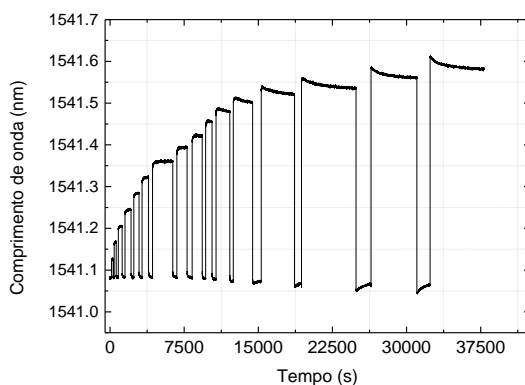


Figura 20. Comprimento de onda em função do tempo da cabeça dos sensores com a rede imersa a 15 mm de profundidade, variando o peso de 200 a 3200 gramas de 200 g em 200 g (Autoria própria).

Outra consequência do aumento da profundidade da rede de Bragg na borracha de silicone foi o aumento da constante de tempo na resposta do sensor. Neste caso a constante de tempo para a maior força aplicada chegou a aproximadamente 1000 segundos, as figuras 21 (a) e (b) mostram os ajustes para a obtenção da constante de tempo no último ciclo do ensaio mostrado na figura 20.

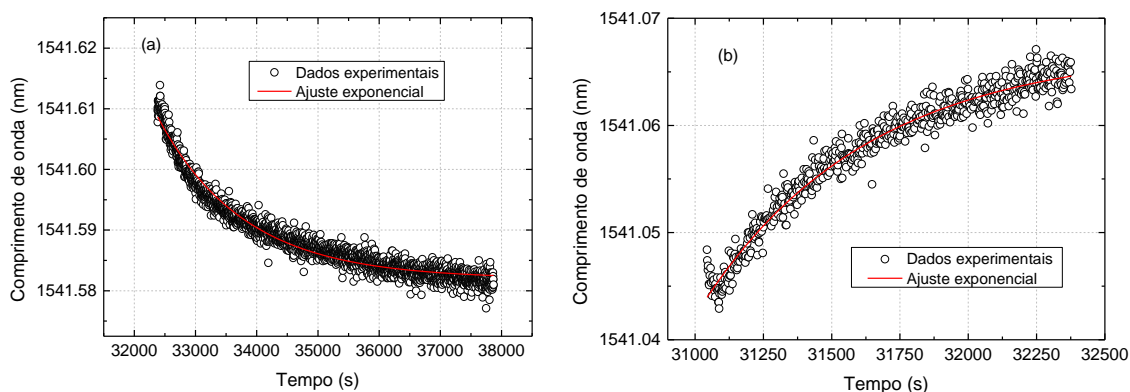


Figura 21. (a) Variação exponencial do comprimento de onda em função do tempo, da cabeça do sensor com a rede imersa 15 mm na borracha de silicone, após a aplicação e (b) após a remoção de uma força de 3200 gf (Autoria própria).

A resposta da rede em comprimento de onda em função da força aplicada também apresentou um comportamento diferente dos casos anteriores. O aumento da força resultou em uma resposta não linear da rede, figura 22.

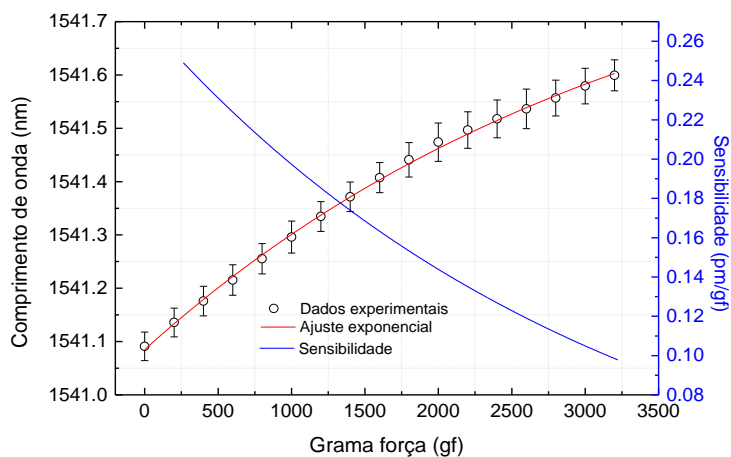


Figura 22. Gráfico do comprimento de onda em função da força aplicada da cabeça do sensor com a rede imersa 15 mm na borracha de silicone (Autoria própria).

Para obter mais informações sobre o comportamento não linear e a sensibilidade, sobre os dados do gráfico da figura 22 foi ajustada a equação (33):

$$\lambda = \lambda_0 - Ae^{-(F-F_0)/\tau}. \quad (33)$$

Esta equação mostra que o aumento da força faz com que o comprimento de onda tenda assintoticamente para 1541,94 nm, sendo este um valor limite. Não foi observada a forte atenuação e deformação do sinal de reflexão. Este comportamento pode ser explicado pela espessa camada de silicone que recobre a fibra e está confinada no *cap*. O aumento da força causa uma deformação da borracha de silicone que pressiona as paredes do *cap*, como neste caso esta camada possui uma grande espessura a deformação é menos transmitida para a fibra e chega ao seu limiar antes que a rede atinja sua deformação máxima. Neste ponto as paredes do *cap* impedem que o aumento da força continue a causar uma deformação longitudinal ou transversal sobre a fibra.

A sensibilidade deste sensor com a rede de Bragg imersa 15 mm na borracha de silicone foi obtida a partir da derivada do ajuste sobre os dados do comprimento de onda em função da força aplicada, e também é mostrada no gráfico da figura 22. A sensibilidade também variou não linearmente diminuindo com o aumento da força, neste caso com um coeficiente de Pearson's de 0,99918. Apesar da não linearidade a resposta é monotônica e, portanto, não apresenta resposta ambígua característica indesejável para aplicações em sensores.

Para este sensor o comprimento de onda em função da altura, estimada utilizando a equação (32) e os dados do gráfico da figura 22, foi aproximado por ajustes lineares em duas regiões distintas e o resultado é apresentado na figura 23. As sensibilidades obtidas foram $(0,61 \pm 0,01)$ pm/cm e $(0,33 \pm 0,01)$ pm/cm. A altura máxima que o sistema pode mensurar foi estimada em aproximadamente 1000 cm. O aumento na altura máxima que o sistema é capaz de mensurar também foi acompanhado de um aumento na resolução em altura da coluna de água sendo de aproximadamente 1,6 cm e 3,0 cm, novamente levando em conta a resolução de 1 pm do interrogador SM 125.

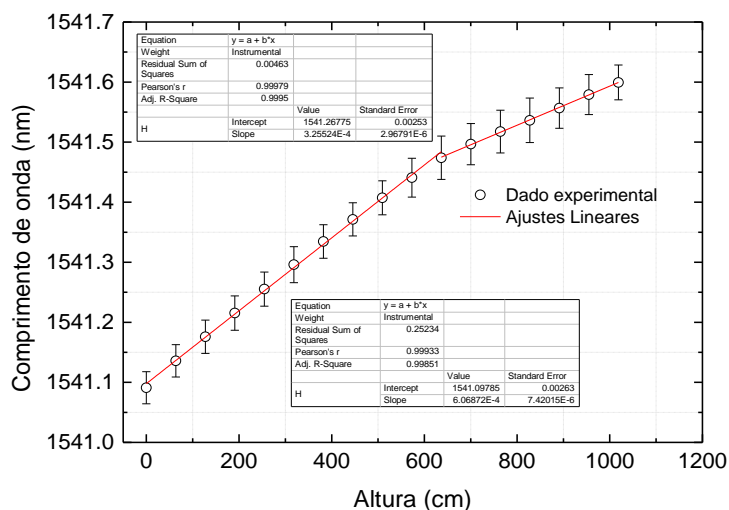


Figura 23. Comprimento de onda em função da altura estimada com a equação (32) da cabeça do sensor com a rede imersa 15 mm na borracha de silicone (Autoria própria).

4.2 TESTE DA COLUNA DE ÁGUA

A figura 24(a) mostra a resposta do sensor em função do tempo no ensaio utilizando a coluna de água, no qual a rede está imersa 5 mm na borracha de silicone. A figura 24(b) mostra os mesmos dados após o tratamento utilizando um filtro FFT passa baixa com frequência de corte de 0,1 Hz para remover o ruído da resposta do sensor. Este tratamento foi realizado após a coleta dos dados. O sensor não apresentou variação no comprimento de onda até que a altura do nível de água chegasse à aproximadamente 0,90 m. Isso acontece porque o peso da boia supera a força de empuxo quando o comprimento da boia imerso é inferior a 0,90 m. Nesta condição a boia não comprime a borracha de silicone e não há deformação da fibra. Após 0,90 m de altura da coluna de água a força de empuxo supera a força peso da boia e o sensor começa a responder ao aumento do nível de água. As flutuações no comprimento de onda observadas em função do tempo são devidas a forma que a coluna de água é preenchida. O nível de água é aumentado despejando 350 ml de água através da parte superior da coluna, durante a descida e ao atingir um anel de fixação no centro da coluna de testes a água causa uma vibração na estrutura e essa vibração é captada pelo sensor. Contudo a variação em comprimento de onda

devido ao aumento do nível de água pode ser facilmente distinguida da flutuação devido à vibração.

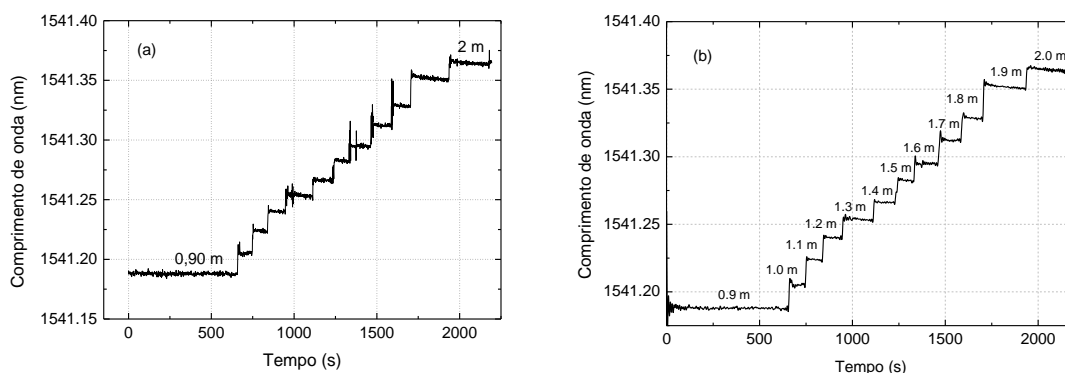


Figura 24. (a) Comprimento de onda em função do tempo no teste da coluna de água, para o sensor com a rede imersa em 5 mm na borracha de silicone. (b) Resposta do sensor após tratamento com filtro FFT com frequência de corte de 0,1 Hz (Autoria própria).

A curva de resposta do sensor em função da altura do nível de água foi obtida de forma semelhante àquela utilizada nos ensaios de calibração da cabeça do sensor. A figura 25 mostra o comprimento de onda do sensor em função da altura do nível de água na coluna de testes. Assim como nos ensaios de calibração, a resposta foi linear, mas com uma sensibilidade menor do que a estimada, sendo neste teste de $(1,57 \pm 0,02)$ pm/cm e na calibração $(1,84 \pm 0,01)$ pm/cm. O deslocamento máximo em comprimento de onda observado para esta cabeça de sensor foi de aproximadamente 720 pm a altura máxima do nível de água calculada com a sensibilidade obtida neste ensaio foi de 459 cm, considerando os 90 cm iniciais.

A figura 26(a) mostra a resposta do sensor, com a rede imersa 10 mm na borracha de silicone, em função do tempo no ensaio com a coluna de água. Novamente um filtro FFT passa baixas com frequência de corte de 0,1 Hz foi utilizado para remover o ruído da resposta do sensor, figura 26(b). Para este sensor a variação no comprimento de onda foi observada quando a altura do nível de água chegou em aproximadamente 0,95 m. Esse pequeno aumento é esperado devido ao aumento da profundidade da rede na borracha de silicone, um comportamento semelhante foi observado nos ensaios de calibração.

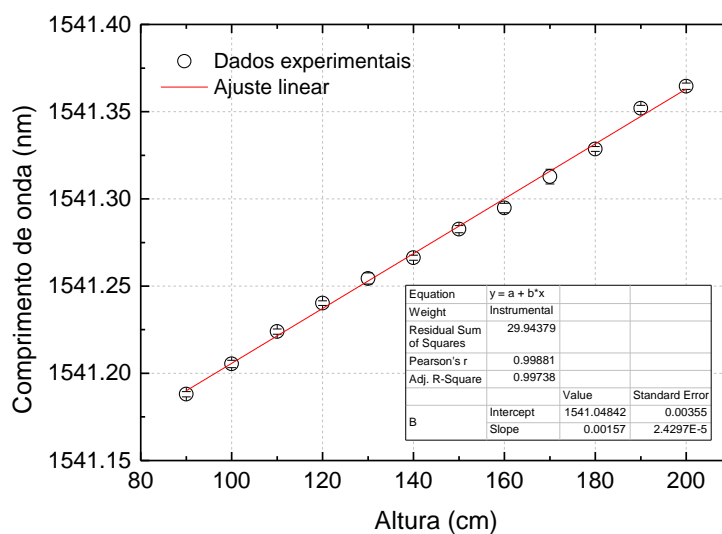


Figura 25. Comprimento de onda do sensor, com a rede imersa 5 mm na borracha de silicone, em função da altura do nível de água na coluna de testes (Autoria própria).

Para este caso o nível de água é aumentado despejando 525 ml de água através da parte superior da coluna, o que resulta em um aumento de 15 cm no nível de água a cada inserção. Novamente durante a descida da água e ao atingir o anel de fixação da coluna de testes é observado os efeitos da vibração na estrutura.

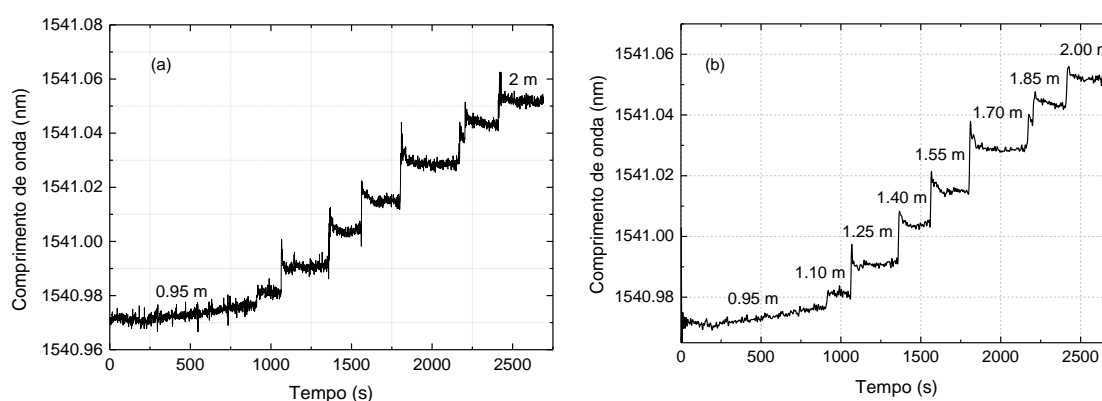


Figura 26. (a) Comprimento de onda em função do tempo no teste da coluna de água, para o sensor com a rede imersa em 10 mm na borracha de silicone. (b) Resposta do sensor após tratamento com filtro FFT com frequência de corte de 0,1 Hz (Autoria própria).

A figura 27 mostra o comprimento de onda do sensor em função da altura do nível de água na coluna de testes para este sensor. Novamente a resposta

foi linear, mas com a uma sensibilidade menor, sendo neste teste de $(0,75 \pm 0,03)$ pm/cm e na calibração $(1,29 \pm 0,01)$ pm/cm. Como o deslocamento máximo em comprimento de onda que esta cabeça de sensor suporta é de aproximadamente 572 pm a altura máxima do nível de água que este sensor é capaz de medir é de aproximadamente 762 cm, considerando os 95 cm iniciais.

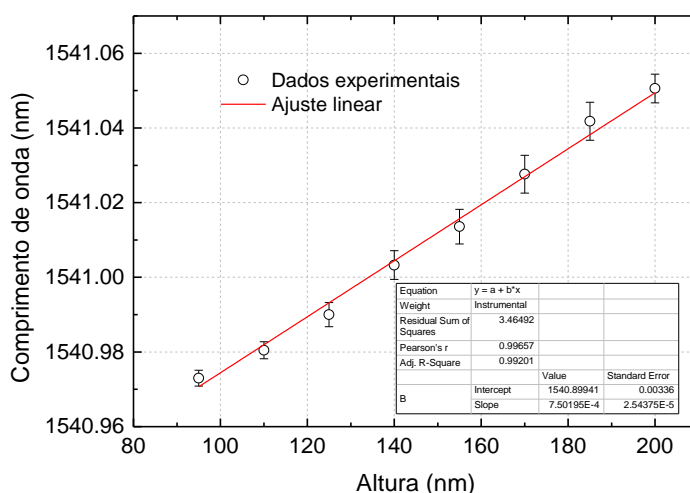


Figura 27. Comprimento de onda do sensor, com a rede imersa 10 mm na borracha de silicone, em função da altura do nível de água na coluna de testes (Autoria própria).

O aumento da profundidade da rede na borracha de silicone para 10 mm resultou em um aumento significativo da altura máxima que o sensor é capaz de mensurar. Este novo limite é compatível com casos reais observados em inundação do Rio Marrecas no município de Francisco Beltrão no Paraná.

A resposta do sensor, com a rede imersa 15 mm na borracha de silicone, em função do tempo no ensaio com a coluna de água é mostrada na figura 28(a) e a resposta após o tratamento com o filtro FFT (0,1 Hz) é mostrada na figura 28(b). Para este sensor a altura do nível de água mínima necessária para que o sensor iniciasse as medições foi de aproximadamente 1,00 m. Para este caso a sensibilidade é menor e, portanto, o nível de água é aumentado despejando 700 ml de água através da parte superior da coluna, o que resulta em um aumento de 20 cm no nível de água a cada inserção. Neste ensaio é possível observar alguns deslocamentos abruptos no comprimento de onda antes do nível de água alcançar 1 m, isso se deve ao fato de que o volume de água despejado na coluna ser maior e provoca uma perturbação maior.

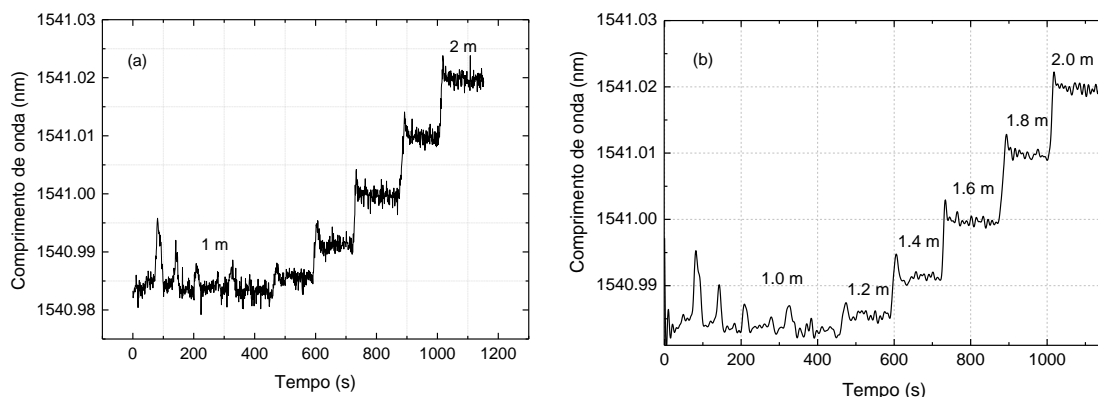


Figura 28. (a) Comprimento de onda em função do tempo no teste da coluna de água, para o sensor com a rede imersa em 17 mm na borracha de silicone. (b) Resposta do sensor após tratamento com filtro FFT com frequência de corte de 0,1 Hz (Autoria própria).

A figura 29 mostra o comprimento de onda do sensor em função da altura do nível de água na coluna de testes para este sensor. Para a faixa de variação de altura na coluna de água a resposta pode ser aproximada por uma reta. Quando comparados com os resultados da calibração o comportamento não linear deveria ser observado apenas quando deslocamento em comprimento de onda fosse superior a 300 pm. A sensibilidade deste dispositivo foi de $(0,40 \pm 0,03)$ pm/cm e na calibração $(0,61 \pm 0,01)$ pm/cm. Como o deslocamento máximo em comprimento de onda, observado, para esta cabeça de sensor foi de aproximadamente 501 pm este sensor é capaz de medir pelo menos 1250 cm, considerando os 100 cm iniciais.

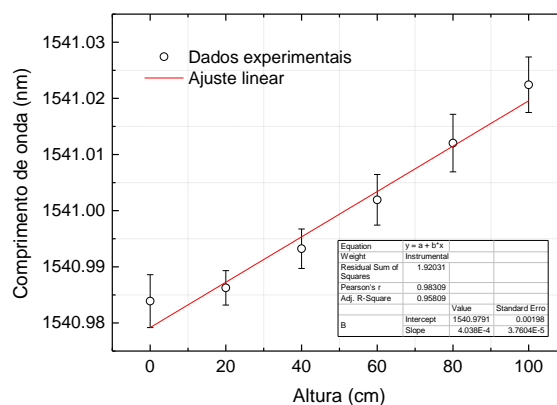


Figura 29. Comprimento de onda do sensor, com a rede imersa 15 mm na borracha de silicone, em função da altura do nível de água na coluna de testes (Autoria própria).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA SENSIBILIDADE CRUZADA

A figura 30 mostra as respostas das duas redes inseridas na cabeça do sensor com a FBG imersa 15 mm na borracha de silicone em função do tempo quando submetidas a uma variação linear de temperatura com passo de 5 °C.

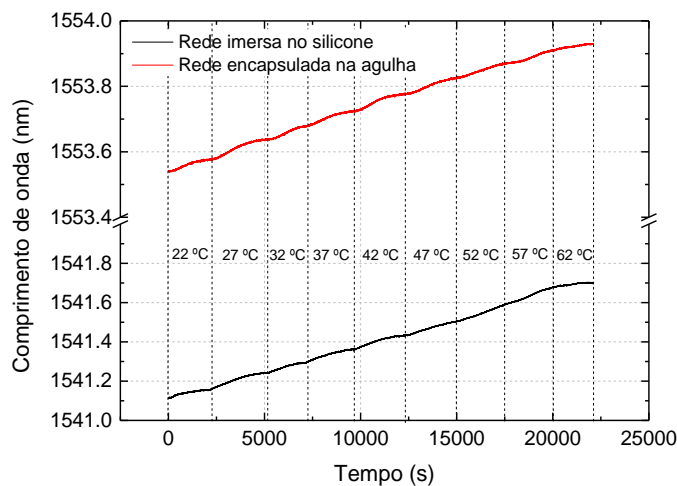


Figura 30. Comprimento de onda do sensor, com a rede imersa 15 mm na borracha de silicone, em função da altura do nível de água na coluna de testes (Autoria própria).

As sensibilidades térmicas da rede encapsulada na agulha e da rede inserida na borracha silicone foram de $(9,96 \pm 0,04)$ e $(14,6 \pm 0,5)$ pm/°C, respectivamente. Essas sensibilidades foram obtidas da resposta das redes em função da temperatura, figura 31.

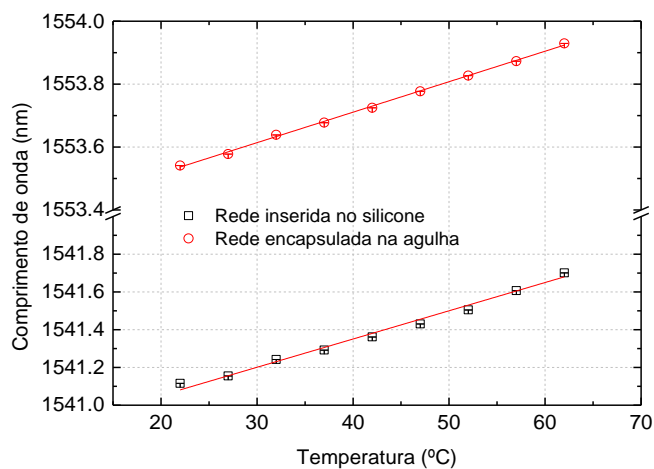


Figura 31. Comprimento de onda do sensor das redes inseridas na agulha e no silicone em função da variação de temperatura (Autoria própria).

A rede inserida apenas no silicone apresenta uma sensibilidade térmica maior devido à expansão térmica da cabeça do sensor que causa uma deformação longitudinal na fibra. Como a fibra inserida na agulha não está fixada nas duas paredes do *cap* de silicone e está isolada da borracha de silicone ela apresenta a sensibilidade típica das redes de Bragg.

A compensação de temperatura pode ser realizada a partir das equações obtidas dos ajustes lineares para a rede inserida na agulha (λ_1) e para a rede inserida na borracha de silicone (λ_2):

$$\lambda_1 = \lambda_{01} + \alpha_1 T \quad (34)$$

$$\lambda_2 = \lambda_{02} + \alpha_2 T \quad (35)$$

onde λ_n são os comprimentos de onda medidos, λ_{0n} são os comprimentos de onda a 0 °C, α_n é a sensibilidade térmica e T é a temperatura e $n=1$ ou 2 .

Isolando a temperatura na equação (34) e substituindo na equação (35) pode-se obter o valor de λ_{02} que é a resposta do sensor inserido no silicone sem o efeito da temperatura:

$$\lambda_{02} = \lambda_2 - \alpha_2 \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_{01}}{\alpha_1} \right) \quad (36)$$

A figura 31 mostra a resposta da rede inserida no silicone após a correção do efeito da temperatura utilizando a equação 35.

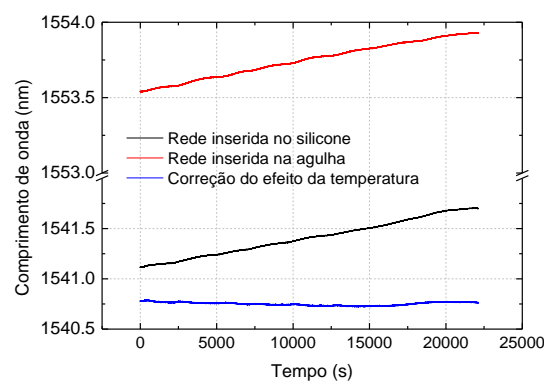


Figura 32. Comprimento de onda do sensor das redes inseridas na agulha e no silicone e a correção do efeito da temperatura em função da variação de temperatura (Autoria própria).

O comprimento de onda médio da resposta corrigida foi de $(1540,75 \pm 0,03)$ nm que é próximo do valor obtido pelo ajuste mostrado na figura 32 de $(1540,11 \pm 0,02)$ nm, e este deslocamento pode ser corrigido. A inclinação da curva corrigida, de $(-0,00086 \pm 0,00002)$ pm/°C, indica que a correção resulta em um valor praticamente constante. Outro aspecto importante é o desvio padrão em torno do valor médio 0,016 nm, que corresponderia uma variação de 40 cm na altura do nível de água para a cabeça do sensor com a rede imersa 15 mm, mas que pode ser distinguida da elevação do nível de água analisando a resposta da rede inserida na agulha.

A figura 32 mostra as respostas das duas redes inseridas na cabeça do sensor em função do tempo quando submetidas a uma variação linear da força aplicada com um passo de 200 gf. A rede inserida no silicone apresentou o comportamento característico com um deslocamento para maiores comprimentos de onda enquanto a rede inserida na agulha também apresenta uma variação no comprimento de onda, mas com uma magnitude muito inferior.

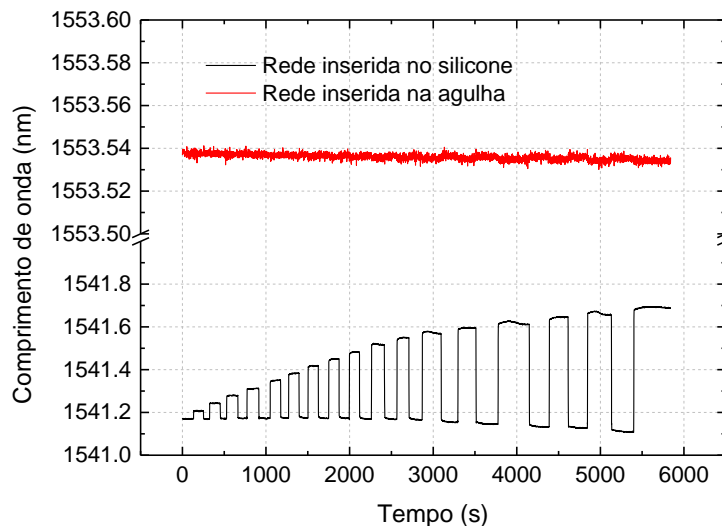


Figura 33. Comprimento de onda do sensor das redes inseridas na agulha e no silicone em função do tempo em ciclos de aplicação de forças (Autoria própria).

As sensibilidades foram obtidas a partir da resposta em comprimento de onda utilizando um ajuste linear para a rede inserida na agulha e um ajuste exponencial utilizando a equação 33 para a rede inserida no silicone.

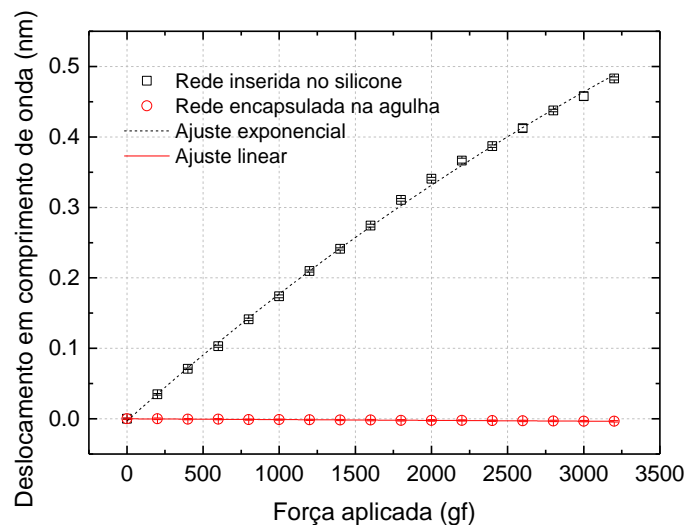


Figura 34. Deslocamento em comprimento de onda do sensor das redes inseridas na agulha e no silicone em função da força aplicada (Autoria própria).

A rede inserida na agulha apresentou uma sensibilidade obtida pelo ajuste linear de $(-0,00110 \pm 0,00003)$ pm/gf enquanto que a rede inserida no silicone apresentou uma sensibilidade variável que é apresentada na figura 34.

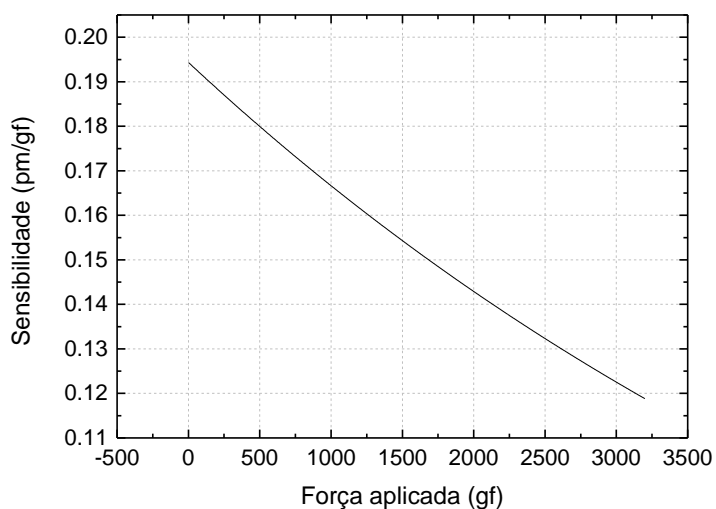


Figura 35. Sensibilidade da rede inserida no silicone (Autoria própria).

Os resultados das medidas da resposta das redes inseridas na agulha e no silicone mostram que a rede inserida na agulha tem uma sensibilidade à deformação muito pequena podendo ser considerada nula se comparada com a rede inserida na borracha de silicone. Esses resultados combinados com

aqueles obtidos na caracterização térmica mostram que a sensibilidade cruzada entre variação de temperatura e deformações mecânicas podem facilmente ser distinguidas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi proposto um sistema de monitoramento do nível das águas de rios baseado em redes de Bragg. O projeto do sensor baseou-se no princípio da força de empuxo que um líquido exerce sobre um corpo submerso. O sistema consiste em uma boia cilíndrica que produz uma tensão longitudinal em uma FBG embebida em uma borracha de silicone devido ao volume da boia imerso na água. O sistema possui um cano cilíndrico entorno da boia para conferir proteção mecânica e este cano possui duas guias para manter a boia no centro do sistema.

Na cabeça do sensor foram inseridas duas redes de Bragg embebidas na borracha de silicone, sendo que uma delas foi inserida em uma agulha para evitar a deformação mecânica e desta forma utilizá-la para distinguir variações de temperatura e variações no nível da água.

O sensor foi calibrado em função da força aplicada e a correspondente altura da coluna de água foi calculada. Também foi estudada a possibilidade de sintonizar a sensibilidade do sistema, e conseqüentemente a altura máxima do nível de água, variando a profundidade da rede na borracha de silicone. A calibração do sensor mostrou que é possível sintonizar o nível máximo de água que o sistema pode medir, sendo que nos ensaios realizados neste trabalho mostraram a possibilidade de o sistema atingir um limite de aproximadamente 12 metros de altura do nível de água. O aumento da profundidade da rede na borracha de silicone causa um aumento no tempo de resposta para o sistema acomodar, que para o caso de a rede estar inserida a 15 mm de profundidade este tempo chegou a aproximadamente 16 minutos. Este não é um problema para a aplicação proposta tendo em vista que a acomodação é posterior ao deslocamento do comprimento de onda até um máximo, indicando a variação do nível de água, e este primeiro deslocamento é da ordem de poucos segundos. O aumento da profundidade da rede na borracha também aumenta a não

linearidade na resposta do sensor, mas os resultados obtidos mostram que é possível aproximar a resposta da rede a retas em diferentes regiões.

Os resultados dos testes na coluna de água mostraram que vibrações mecânicas, por exemplo devido a impactos ou pequenas oscilações na água, podem ser distinguidos do aumento do nível da água por serem eventos de curta duração. Para uma altura de dois metros todas as configurações utilizadas (5, 10 e 15 mm de profundidades) apresentaram uma resposta aproximadamente linear. Também foi observado que é necessário um comprimento de aproximadamente um metro de uma boia de dois metros deve estar imerso para que a força de empuxo se iguale a força peso da boia e a partir deste equilíbrio o sistema seja capaz de medir variações do nível da água.

Os ensaios para solucionar o problema da sensibilidade cruzada mostraram que o uso de uma segunda rede encapsulada em uma agulha pode ser utilizado para distinguir o efeito da temperatura do aumento do nível da água. A sensibilidade da rede inserida no silicone e fixada nas paredes do *cap* de PVC apresenta uma sensibilidade térmica maior devido aos efeitos de expansão térmica quando comparada com a rede encapsulada. As respostas das duas redes podem ser utilizadas para diminuir o efeito da temperatura na resposta da rede utilizada para medir o nível da água e também para identificar que há uma variação de temperatura. Adicionalmente a rede encapsulada na agulha apresentou uma sensibilidade à força aplicada muito pequena, praticamente nula se comparada com a sensibilidade da rede inserida no silicone. Esta característica aliada à resposta térmica das redes permite facilmente a distinção de efeitos de temperatura do aumento do nível dos rios.

Os resultados desse trabalho mostram o potencial do uso de sensores baseados em rede de Bragg no desenvolvimento de sistemas de monitoramento do nível dos rios em áreas de riscos por enchentes. Características intrínsecas aos sensores em fibra tais como alta capacidade de multiplexação e monitoramento remoto tornam esta tecnologia ainda mais atraente.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista o curto período destinado ao desenvolvimento deste estudo, que foi financiado na Chamada Publica 01/2016 – REDESASTRE ao longo de dezoito meses, ainda há algumas questões a serem estudadas para completo desenvolvimento do sistema.

Durante os ensaios notou-se que a pré-tensão é um parâmetro que influencia a sensibilidade do dispositivo, um estudo minucioso de como este parâmetro afeta a resposta do sensor pode ajudar a projetar a cabeça do sensor para diferentes situações.

Os resultados do estudo da sintonia da sensibilidade mostram que o aumento da profundidade também altera a resposta do sensor. Neste trabalho foram verificadas experimentalmente três situações (5, 10 e 15 mm de profundidade), um estudo teórico permitirá através de uma simulação numérica entender melhor como a relação entre a profundidade e a sensibilidade e consequentemente auxiliará o projeto do sistema.

Por fim a capacidade de multiplexação permite que o sistema monitore outros parâmetros simultaneamente. Um parâmetro importante na aplicação proposta é a medida da vazão/fluxo das águas, pois o aumento do nível das águas dos rios é precedido de um aumento neste parâmetro. Desta forma essa seria uma forma adicional de antecipar o aumento do nível dos rios, auxiliando também no alerta de correnteza em regiões onde há intensa atividade turística podendo evitar afogamentos.

5.3 PUBLICAÇÕES

ALMEIDA, G. G.; FIORIN, R.; ABE, I.; ROSSI, L. ; LOPES, S. R. ; SEIDEL, K. F. ; KAMIKAWACHI, R. C. . Design and Calibration of an optical fiber head sensor for measuring water levels of rivers. In: MOMAG 2018: 13º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo - 18º SBMO - Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, 2018, Santa Rita do Sapucaí - MG. Anais do MOMAG 2018. São Caetano do Sul: SBMO, 2018. v. único. p. 31-34.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems**. 2ª Edição John Wiley & Sons, 1997.

AMEEN O. F., YOUNUS M. H. Graphene diaphragm integrated FBG sensors for simultaneous measurement of water level and temperature. **Sensor and Actuators A: Physical**, v. 252, p. 225-232, 2016.

CHERIN, A. H. **An introduction to optical fibers**. International student edition, McGraw-Hill, 1983.

CONSALES M., *et al.* A fiber bragg grating liquid level sensor based on the archimedes' law of buoyancy. *Journal of Lightwave Technology*, aceito para publicação, DOI: 10.1109/JLT.2018.2866130.

Curitiba. Casa Militar. **Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil**. Disponível em:
<<http://www.ceped.pr.gov.br/arquivos/File/ContruindoEstadoResiliente.pdf>>.
Acesso em 28 set. 2018

CUSANO, A. *et al.* Thinned and Micro-structured fibre Bragg gratings: towards new all-fibre high-sensitivity chemical sensors. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 7, p. 734-741, 2005.

DIAZ C. A. R., *et al.* Liquid level measurement based on FBG-embedded diaphragms with temperature compensation. **IEEE Sensors Journal**, v. 18, p. 193-200, 2018.

HECHT, E. **Optics**. Addison-Wesley, 2002

HILL, K. O. *et al.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. **Applied Physics Letters**. V. 32, n. 10, p. 647-649, 1978.

HILL, K. O.; MELTZ, G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8p. 1263-1276, 1997.

JIANG, Q., HU, D., and Yang, M. Simultaneous measurement of liquid level and surrounding refractive index using tilted fiber Bragg grating. **Sensors and Actuators A**, v. 170, p. 62–65, 2011.

KASHYAP R.. **Fiber Bragg Gratings**. Academic Press, Nov.1999.

KUANG K. S. C., QUEK S.T. and MAALEJ M. Remote flood monitoring system based on plastic optical fibres and wireless motes. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 147, p. 449-455, 2008.

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**, v. 45, p. 469–473, 2012.

LI, C. *et al.*(a). Liquid level and temperature sensor based on an asymmetrical fiber Mach–Zehnder interferometer combined with a fiber Bragg grating. **Optics Communications**, v. 372, p. 196–200, 2016.

LI, C. *et al.*(b). Liquid level measurement based on a no-core fiber with temperature compensation using a fiber Bragg grating,” **Sensors and Actuators A**, v. 245, p. 49–53, 2016.

OBATONA A. F., *et al.* Tilted Fibre Bragg Gratings and Phase Sensitive-Optical Low Coherence Interferometry for refractometry and liquid level sensing. **Sensors and Actuators A**, v. 189, p. 451–458, 2013.

OTHONOS A.; KALLI K. **Fiber bragg gratings: Fundamentals and applications in telecommunications and sensing**. Artech House, 1999.

Santa Catarina. **Diário Catarinense**, 2017. Disponível em:

<<http://dc.clicrbs.com.br/sc/noticias/noticia/2017/06/apos-chuvas-governo-de-sc-estima-prejuizos-na-ordem-de-r-40-milhoes-9814059.html>> Acesso em 28 set. 2018

Secretaria do Estado da Saúde do Espírito Santo, Marcos Bonn, 2015. Disponível em:

<<http://saude.es.gov.br/enchentes-e-alagamentos-podem-causar-doencas>>.

Acesso em 28 set. 2018

SENGUPTA D., KISHORE P. Continuous liquid level monitoring sensor system using fiber Bragg grating. **Optical Engineering**, v. 53, p.7, Jan. 2014.

SOHN K. R., SHIM J. H.. Liquid-level monitoring sensor systems using fiber Bragg grating embedded in catilever. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 152, p. 248-251, 2009.

Transparência UNESPAR, 2018. Disponível em:

<<http://www.unespar.edu.br/noticias/unespar-conta-com-centro-universitario-de-estudos-e-pesquisas-sobre-desastres>>. Acesso em: 28 set. 2018

ZHANG W., et al. A fiber laser sensor for liquid level and temperature based on two taper structures and fiber Bragg grating. **Optics Communications**, v. 342, p. 243–246, 2015.

WANG J. N., LUO C. Y. Long-period fiber grating sensors for the measurement of liquid level and fluid-flow velocity. **Sensors**, v. 12, p. 4578-93, Apr. 2012.