

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

MARTIM BANDT NETO

**SENSOR DE DEFORMAÇÃO BASEADO EM FBG COM
COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA ENCAPSULADO EM
ALUMÍNIO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA
2018

MARTIM BANDT NETO

**SENSOR DE DEFORMAÇÃO BASEADO EM FBG COM
COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA ENCAPSULADO EM
ALUMÍNIO**

Dissertação de Mestrado, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Ciências”. Área de concentração: Fotônica em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Valmir de Oliveira

CURITIBA
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

B214s Bandt Neto, Martim
Sensor de deformação baseado em FBG com compensação de temperatura encapsulado em alumínio / Martim Bandt Neto.-- 2018.
56 f.: il.

Disponível via World Wide Web.

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de concentração: Fotônica em Engenharia, Curitiba, 2018.

Bibliografia: f. 53-55.

1. Engenharia elétrica - Dissertações. 2. Medidores de tensão. 3. Detectores de fibra óptica. 4. Redes de Bragg. 5. Fibras ópticas. 6. Alumínio. 7. Aparelhos e materiais eletrônicos – Embebimento de plástico. 8. Controle de temperatura. 9. Métodos de simulação. I. Oliveira, Valmir de, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.3

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba – UTFPR
Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 813

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Sensor de Deformação Baseado em FBG com Compensação de Temperatura Encapsulado em Alumínio**” defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Martim Bandt Neto** no dia 12 de dezembro de 2018, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração Engenharia de Automação e Sistemas, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). Valmir de Oliveira - Presidente – (UTFPR)

Prof(a). Dr(a). Mauren Abreu de Souza - (PUCPR)

Prof(a). Dr(a). Rodolfo Luiz Patyk - (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, 12 de dezembro de 2018.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Priscila que durante estes anos, sempre apoiou meus sonhos e objetivos.

Às minhas filhas Maria Clara e Ana Laura por entenderem as minhas ausências.

Ao meu pai David (em memória) que sempre me incentivou e me direcionou a ser a pessoa que eu sou.

À minha mãe Irma que sempre fez tudo o possível para ajudar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que fez os céus e a terra por esta oportunidade e por me conceder sabedoria.

Agradeço a minha esposa Priscila e as minhas filhas Maria Clara e Ana Laura por terem entendimento e paciência nos momentos em que necessitei estar ausente.

Agradeço aos professores do CPGEI, que dispenderam tempo e conhecimento em meu crescimento educacional e pessoal. Em especial ao professor Valmir por acreditar e me orientar neste projeto.

Agradeço aos colegas de turma e laboratório pelo conhecimento e experiência transmitidos a mim.

RESUMO

BANDT NETO, Martim. **Sensor de Deformação Baseado em FBG com Compensação de Temperatura Encapsulado em Alumínio**. 2018. 56 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2018.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento, testes e resultados de um sensor de deformação longitudinal (*Strain Gage*) baseado nas redes de Bragg em fibra ótica monomodo padrão de telecomunicações, G-652. Utiliza encapsulamento em corpo de alumínio e apresenta compensação de temperatura na mesma cápsula por meio de uma segunda FBG para monitoramento térmico. O projeto e simulação estrutural foram concebidos pelo *software* de modelagem tridimensional Catia™, posteriormente o encapsulamento foi confeccionado a partir de uma chapa de alumínio 1200 H14. Por meio da caracterização de temperatura do sensor, foi definida a sensibilidade térmica da FGB sensora de deformação e da FBG de compensação de temperatura, com base nas curvas de sensibilidade de ambas as FBGs, foi definida a equação de compensação de temperatura. Um segundo teste foi realizado na caracterização em temperatura, a fim de definir o tempo de resposta do sensor em função da variação de temperatura. Foram realizados testes de tração longitudinal até 8 kg (78,3 N), com passos de 1 kg (9,79 N), por meio da utilização de massas padrão. Em cada patamar foi realizado o monitoramento da variação do comprimento de onda, juntamente com o monitoramento da variação do comprimento de onda, foi realizada a medição do deslocamento obtido no sensor por meio de um relógio micrométrico apalpador. Para o sistema de interrogação foi utilizado o interrogador SM125 da Micron Optics. Em função da metodologia de testes, os resultados obtidos apresentam valores para medições de deformação diretamente ou medição de força aplicada e apresentam razoável sensibilidade e linearidade em função do carregamento/descarregamento aplicado.

Palavras chave: Sensor de Deformação. Encapsulamento em Alumínio. FBG. Compensação de Temperatura.

ABSTRACT

BANDT NETO, Martim. **Deformation Sensor Based on FBG with Temperature Compensation Encapsulated in Aluminum**. 2018. 56 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2018.

This work presents the development, confection, tests and results of a longitudinal deformation sensor (Strain Gage) based on Bragg gratings in standard single-mode telecommunications fiber, G-652. It uses encapsulation in aluminum body and presents temperature compensation in the same capsule by means of a second FBG for thermic monitoring. The design and structural simulation were made by Catia™ three-dimensional modeling software, later the encapsulation was made from a 1200 H14 aluminum plate. By means of the sensor temperature characterization, the thermal sensitivity of strain sensor FGB and of the compensation temperature FBG was defined, based on the sensitivity curves of both FBGs, the temperature compensation equation was defined. A second test was carried out in the characterization in temperature, in order to define the response time of the sensor as a function of the temperature variation. Longitudinal traction tests were performed up to 8 kg (78.3 N), with steps of 1 kg (9.79 N), using standard masses. At each step wavelength variation monitoring was performed, along with the monitoring of the wavelength variation, the displacement obtained in the sensor was measured by means of a micrometer gauge. For the interrogation system, the SM125 interrogator from Micron Optics was used. By the test methodology, the results obtained shows values for measurements of deformation directly or measurement of applied force and present reasonable sensitivity and linearity as a function of applied loading/unloading.

Keywords: Strain Gage. Aluminum Encapsulation. FBG. Temperature Compensation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - (a) Exemplo de sensor extrínseco. (b) Exemplo de sensor intrínseco.	16
Figura 2 - (a) Apresenta o número de artigos desenvolvidos em sensores baseados em FBG entre 1991 e 2011. (b) Demonstra o percentual dos artigos desenvolvidos em sensores com base em FBG dentre todos os artigos desenvolvidos de sensores em fibra ótica entre 1991 e 2011.	18
Figura 3 - Esquemático de representação de funcionamento da FBG, onde parte da intensidade incidente é refletida em determinado comprimento de onda, onde o comprimento de onda central é o comprimento de onda de Bragg (λ_B). O λ_B é dado pela periodicidade (Λ) e pelo índice de refração efetivo do núcleo (n_{eff}).	20
Figura 4 - Esquemático de gravação de FBG por meio da técnica interferométrica apresentada por Meltz.	21
Figura 5 - Esquemático de incidência do feixe difratado nas ordens principais $m = \pm 1$ e remanescente na ordem $m = 0$, quando a máscara de fase incidida por feixe UV à normal. ...	22
Figura 6 - Esquemático de gravação da FBG no núcleo da fibra ótica utilizando o método de gravação direta por máscara de fase.	23
Figura 7 – Esquemático de gravação de FBG por meio da técnica interferométrica com máscara de fase, onde a movimentação dos espelhos giratórios pode alterar o λ_B gerado na rede inscrita na fibra ótica.	24
Figura 8 - Representação esquemática mostrando o período e o sinal refletido pela FBG em repouso e sob tração.	27
Figura 9 - (a) Strain gage utilizando FBG. (b) Strain gage resistivo convencional.	29
Figura 10 – (a) Projeto de confecção e montagem do sensor desenvolvido utilizando o software Catia™, apresentando os principais pontos do encapsulamento. (b) Demonstra a posição de implementação das FBGs no encapsulamento.	32
Figura 11 – Gráfico de tensão em função da deformação de determinada liga de alumínio....	33
Figura 12 – (a) Representação da deformação obtida no corpo do sensor em função da área transversal. (b) Simulação de deformação realizada pelo software, utilizando o método de análise por elementos finitos.	34
Figura 13 – Corpo do sensor em alumínio após a usinagem.	35
Figura 14 – Passo a passo para a montagem do encapsulamento do sensor. (a) aplicação da cola na região do tubo capilar. (b) preparação do tubo capilar. (c) colagem do tubo capilar ao	

corpo de alumínio. (d) reposição de parte da capa de proteção da fibra ótica. (e) posicionamento da fibra ótica no sensor. (f) colagem do primeiro ponto de fixação da fibra ótica. (g) colagem da saída da fibra ótica ao corpo do sensor. (h) colagem do segundo ponto de fixação da fibra ótica no corpo do sensor.	36
Figura 15 – Deslocamento do λ_{FBG2} após a finalização da montagem devido a tração durante a colagem.....	37
Figura 16 – Sensor finalizado após todas etapas de confecção e montagem.	37
Figura 17 – (a) esquemático do sistema de interrogação utilizado nas caracterizações em temperatura. (b) esquemático do sistema de interrogação utilizado nas caracterizações em deformação.	38
Figura 18 – Equipamento utilizado para caracterização da FBG nua em função da deformação por deslocamento controlado.....	39
Figura 19 – Equipamento utilizado para caracterização do sensor em temperatura.	40
Figura 20 – Representação esquemática do teste de deformação do sensor por carregamento com massas padrão.	41
Figura 21 – (a) Detalhe da montagem dos testes de deformação do sensor. (b) Montagem experimental com máxima carga.	42
Figura 22 – Sensibilidade à deformação da FBG em fibra ótica nua em função do carregamento com massas padrão e em função do deslocamento controlado.....	44
Figura 23 – Resposta à variação de temperatura da FBG1 e FBG2 encapsuladas.....	45
Figura 24 – Curva de resposta para variação de temperatura do encapsulamento de 50 °C à temperatura ambiente.	46
Figura 25 – Gráfico de resposta da variação do comprimento de onda da FGB2 sensora de deformação, em função do carregamento com massas padrão.....	47
Figura 26 – Gráfico de resposta da variação do comprimento de onda da FGB2 sensora de deformação, em função da deformação sobre o encapsulamento.	48
Figura 27 – Tempo de resposta do encapsulamento em carregamento e descarregamento (Δt) em máxima carga.....	49

LISTA DE SIGLAS

CNC	Comando Numérico Computadorizado (<i>Computer Numerical Control</i>)
CPGEI	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
FBG	Redes de Bragg em Fibra Ótica (<i>Fiber Bragg Grating</i>)
SHM	Monitoramento de Integridade de Estruturas (<i>Structural Health Monitoring</i>)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UV	Ultravioleta (<i>Ultraviolet</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

λ_B	Comprimento de onda de Bragg
λ_{uv}	Comprimento de onda da fonte UV
$\Delta\lambda_B$	Varição do comprimento de onda de Bragg
Λ	Periodicidade da rede de Bragg
Λ_{pm}	Periodicidade da máscara de fase
L	Comprimento inicial
ΔL	Varição do comprimento
ΔT	Varição de temperatura
n_{casca}	Índice de refração da casca da fibra ótica
n_{eff}	Índice de refração efetivo da rede de Bragg
$n_{núcleo}$	Índice de refração do núcleo da fibra ótica
n_{uv}	Índice de refração da sílica sob uma fonte UV
$\mu\epsilon$	Unidade relativa a deformação (<i>microstrain</i>)
μm	Unidade relativa a deslocamento (micro metro)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 SENSORES BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA - FBG.....	14
1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivos Específicos	15
1.3 ESTADO DA ARTE	16
1.3.1 Sensores em Fibras Óticas.....	16
1.3.2 Sensores em Redes de Bragg - FBG.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 REDES DE BRAGG	19
2.2 TÉCNICAS DE GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG	20
2.2.1 Técnica Interferométrica.....	21
2.2.2 Gravação direta sobre máscara de fase.....	22
2.2.3 Técnica Interferométrica com máscara de fase	24
2.3 SENSIBILIDADE CRUZADA.....	25
2.4 SENSORES DE DEFORMAÇÃO (<i>STRAIN</i>) BASEADOS EM FBG	26
2.4.1 Sensibilidade cruzada e compensação de temperatura.....	27
2.4.2 Vantagens e aplicações dos sensores de deformação com base em FBG	28
3 METODOLOGIA.....	30
3.1 DESENVOLVIMENTO DO SENSOR	30
3.1.1 Seleção de materiais	30
3.1.2 Produção das redes de Bragg.....	31
3.1.3 Projeto e simulação do sensor	31
3.1.4 Fabricação mecânica.....	35
3.2 TESTES	38
3.2.1 Caracterização das FBGs em fibra ótica nua.....	39
3.2.2 Caracterização do sensor em temperatura	40
3.2.3 Caracterização do sensor em deformação	41
4 RESULTADOS	43
4.1 FBG EM FIBRA ÓTICA NUA.....	43
4.2 SENSOR DE DEFORMAÇÃO	44
4.2.1 Sensibilidade em temperatura.....	44

4.2.2 Sensibilidade em deformação	47
4.3 ESPECIFICAÇÕES DO SENSOR	49
5 CONCLUSÕES.....	51
REFERÊNCIAS	53
ANEXO – PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTE TRABALHO	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 SENSORES BASEADOS EM REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA - FBG

Na atualidade e principalmente com o crescimento da chamada “Indústria 4.0”, onde pretende ter o controle total dos equipamentos por meios remotos, o sensoriamento dos equipamentos se tornou de vital importância, principalmente no monitoramento das grandezas físicas como pressão, temperatura, deformação, vazão, nível, entre outros (GILCHRIST, 2016).

A tecnologia de sensores com base eletrônica mostra-se satisfatória à maioria das aplicações, exceto quando fatores externos ou de projeto podem interferir diretamente na aplicabilidade do sensor, como por exemplo: em aplicações com interferência elétrica ou eletromagnética; a distância do ponto a ser mensurado ao sistema de aquisição de dados; número de pontos a serem mensurados; tamanho do sensor; volume e peso dos cabos de comunicação. Tais aplicações onde os sensores eletrônicos possuem deficiências, os sensores óticos ou sensores com base em fibra ótica complementam as necessidades das aplicações e podem ser substitutos viáveis para os sensores convencionais.

Sensores em fibra ótica surgiram a partir da década de 1960 e com o aumento da utilização de fibras óticas em telecomunicações, diversos tipos de sensores e diversas aplicações foram desenvolvidas. Durante o período de desenvolvimento, em 1978 surgiram as primeiras redes em fibra ótica geradas por gravação interna, então chamadas de “Grades de Hill”, que são a base para os sensores conhecidos como “*Fiber Bragg Grating*” (FBG). Meltz em 1989, demonstrou ser possível gravar redes periódicas no núcleo da fibra ótica formando as chamadas “Redes de Bragg” ou FBG, desde então as FBGs estão sendo largamente implementadas como sensores intrínsecos de parâmetros físicos, químicos e biomédicos (SANTOS e FARAHI, 2015).

Sensores de deformação ou extensômetros (*strain gage*), são elementos que efetuam a conversão de uma variação dimensional, em uma peça sob ensaio ou monitoração, em uma diferente grandeza física, por exemplo uma proporcional variação de resistência elétrica. De tal forma pode-se efetuar processamento eletrônico e obter a correspondente variação dimensional. Sensores de deformação em FBG são largamente utilizados em monitoramentos de estruturas civis, monitoramento de grandes pontes, monitoramento de plataformas

marítimas, até mesmo embebidos em materiais compósitos ou em concreto (MAJUMDER, GANGOPADHYAY, *et al.*, 2008).

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Sensores de deformação em FBG são comerciais e muito utilizáveis em no monitoramento de estruturas inteligentes, apesar de não ser amplamente exploradas as aplicações nas mais diversas áreas. O presente trabalho pretende desenvolver um sensor de deformação uniaxial com base em FBG com compensação de temperatura, cuja a aplicação principal seria voltada à indústria automotiva.

1.2.1 Objetivos Específicos

O presente trabalho descreve os procedimentos e métodos utilizados para produzir um extensômetro ótico com base nas redes de Bragg em fibra ótica, para tal finalidade pretende-se:

- Definir os materiais adequados à confecção do sensor;
- Realizar o projeto estrutural e a simulação de deformação por meio do software de modelagem tridimensional;
- Realizar a confecção mecânica e montagem do sensor;
- Realizar a caracterização do sensor em temperatura;
- Definir a equação de compensação de temperatura;
- Realizar a caracterização do sensor em deformação;
- Definir as especificações do sensor;

1.3 ESTADO DA ARTE

1.3.1 Sensores em Fibras Óticas

Um sensor em fibra ótica é constituído por um elemento ótico transdutor, que modula a luz em função da grandeza a ser mensurada e fibras óticas para guiar a luz entre a fonte geradora e o elemento transdutor. Menadier em 1967, demonstrou a utilização da fibra ótica como sensor de deslocamento, onde era mensurado o espectro de luz refletida, por uma superfície, para a fibra ótica, este trabalho chamado de “*The Fotonic Sensor*” (MENADIER, KISSINGER e ADKINS, 1967), ficou reconhecido como o primeiro trabalho de pesquisa de sensores em fibra ótica. Desde então diferentes técnicas foram desenvolvidas, possibilitando diversas aplicações, além de que foram estabelecidas diferentes categorias e classificações (SANTOS e FARAHI, 2015).

Quando o elemento transdutor também consiste de fibras óticas, o dispositivo é denominado sensor intrínseco. Já quando as fibras são utilizadas apenas para guiar a luz entre a fonte geradora ou um detector e o elemento sensor (que é externo à fibra), o sensor é denominado como sensor extrínseco. A Figura 1 (a) apresenta a configuração de um sensor extrínseco, já na Figura 1 (b), é apresentado um exemplo de um sensor intrínseco. Uma terceira categoria pode ser mencionada como sensores eletrônicos acionados óticamente ou sensores híbridos (SOHLSTROM, 1993).

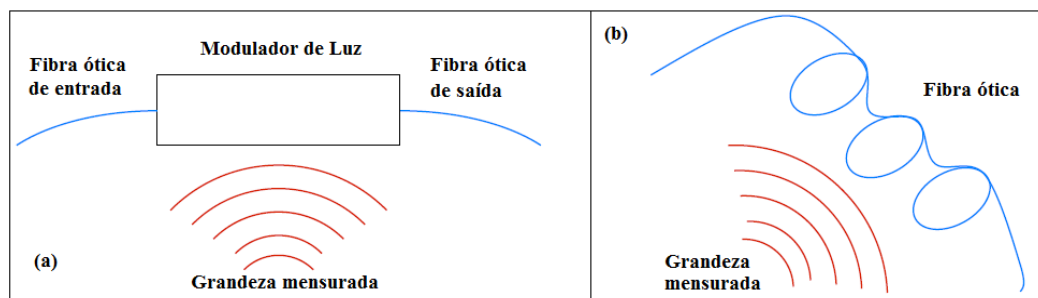


Figura 1 - (a) Exemplo de sensor extrínseco. (b) Exemplo de sensor intrínseco. Adaptado de (UDD, 1995).

Além da classificação dos sensores óticos como intrínsecos ou extrínsecos, existem outras possíveis classificações (GHOLAMZADEH e NABOVATI, 2008):

- Baseado no processo de modulação e demodulação, podendo ser classificados em: intensidade; fase; frequência; polarização.
- Baseados nas grandezas a serem mensuradas, podendo ser: sensores de grandezas físicas; sensores químicos; sensores biomédicos.
- Uma última classificação pode ser adotada em função da distribuição espacial do sensor na fibra ótica, podendo ser: sensoriamento pontual; sensoriamento quase distribuído (vários sensores pontuais); sensoriamento distribuído.

1.3.2 Sensores em Redes de Bragg - FBG

Desde o desenvolvimento do primeiro sensor em fibra ótica, surgiram diversas variações e técnicas, com tais desenvolvimentos diferentes aplicações foram propostas e implementadas nas mais diversas áreas. Apesar das redes de Bragg (FBG) terem sido descobertas em 1978 e os sensores óticos em FBG começarem a ser desenvolvidos somente no início da década de 90, atualmente são um dos sensores óticos de maior difusão. Farahi apresenta a evolução dos trabalhos em sensores óticos baseados em FBG, demonstrando na Figura 2 (a) o número de publicações entre 1991 e 2011, já na Figura 2 (b), é apresentado o percentual dos trabalhos desenvolvidos em sensores em FBG, comparando com todos os sensores óticos em fibra no mesmo período (SANTOS e FARAHI, 2015).

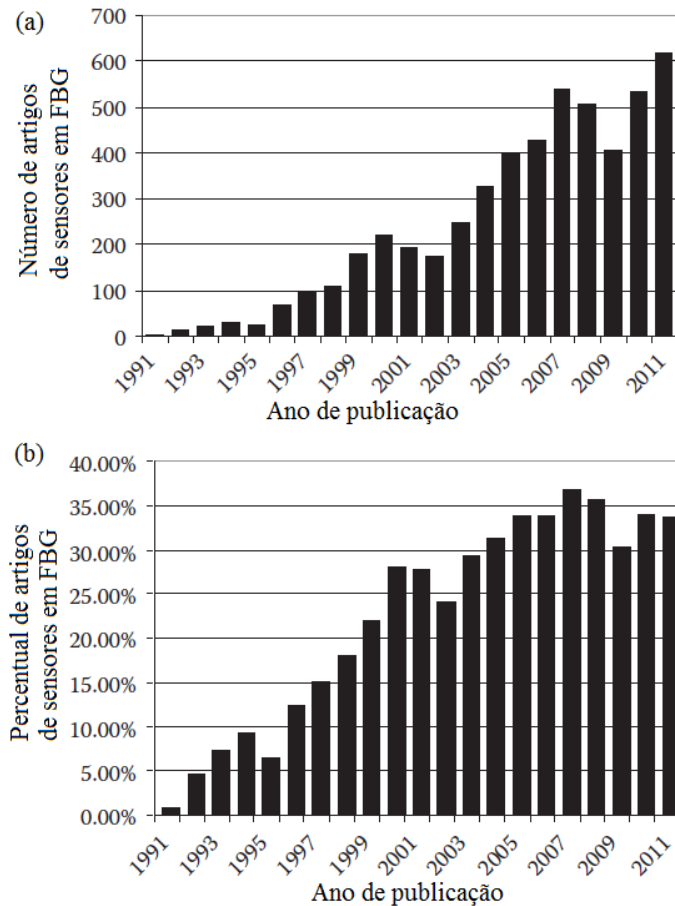


Figura 2 - (a) Apresenta o número de artigos desenvolvidos em sensores baseados em FBG entre 1991 e 2011. (b) Demonstra o percentual dos artigos desenvolvidos em sensores com base em FBG dentre todos os artigos desenvolvidos de sensores em fibra ótica entre 1991 e 2011. Adaptado de (SANTOS e FARAHI, 2015).

Os sensores baseados em redes de Bragg são classificados como sensores intrínsecos e possuem características únicas tais como: baixa perda ótica; possibilidade de multiplexação; tamanho extremamente pequeno; imunidade a interferências eletromagnéticas; linearidade; precisão; alta resolução. Tais características fazem com que os sensores em FBG estejam implementados nas mais diversas áreas, dentre as quais pode-se destacar (GHOLAMZADEH e NABOVATI, 2008), (KERSEY, DAVIS, *et al.*, 1997):

- Monitoramento de estruturas em materiais compósitos.
- Monitoramento de estruturas em concreto.
- Indústria de energia.
- Sensores em biomedicina.
- Sensoriamento químico.
- Indústria petrolífera de gás e óleo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 REDES DE BRAGG

Em 1978, Hill demonstrou ser possível alterar o índice de refração do núcleo de uma fibra ótica, fotossensível dopada com germânio, lançando diretamente ao núcleo da fibra o laser de Argon-Ion formando grades, então denominadas de “Grades de Hill”. Nesta experiência, foi observado que após alguns minutos, um filtro de banda muito estreita foi formado no interior da fibra ótica, fazendo com que parte da banda do sinal aplicado fosse refletido. Tal fato, inicialmente foi tratado apenas como uma curiosidade científica, tornou-se um grande passo no desenvolvimento de sensores em fibras óticas (HILL e MELTZ, 1997). Cerca de 10 anos após a descoberta de Hill, Meltz demonstrou ser possível alterar o índice de refração do núcleo externamente à fibra ótica, sendo possível criar um padrão de grades de interferência periódicas, que refletiriam em comprimento de onda dependente do espaçamento entre tais grades. Tais estruturas foram então chamadas de “Grades de Bragg ou Redes de Bragg” (MELTZ, MOREY e GLENN, 1989).

O comprimento de onda de Bragg (λ_B) varia em função de condições ambientais, ou esforços aplicados à fibra. As redes de Bragg funcionam como um sensor intrínseco, cuja qualquer variação em temperatura ou deformação (*strain*), faz com que haja a variação do comprimento de onda de Bragg. Dessa forma a *Fiber Bragg Grating* (FBG) pode ser utilizada como sensor de temperatura ou deformação, entre outras grandezas físicas (OTHONOS e KALLI, 1999). A Figura 3 mostra uma representação esquemática do núcleo da fibra ótica, onde são produzidas as redes de Bragg, demonstrando o princípio de funcionamento de uma FBG, mostrando os espectros da luz incidente, transmitida e refletida. A correlação entre a variação do parâmetro físico sob medição, está na alteração do comprimento de onda de Bragg (λ_B), que pode ser monitorado no espectro de reflexão ou de transmissão.

As fibras óticas são guias de onda formadas por um núcleo constituído de sílica dopada e de uma casca, constituída de sílica pura. Na Figura 3, foi desenhado um esquemático de representação da fibra ótica, com destaque para o núcleo, onde as redes de Bragg são geradas.

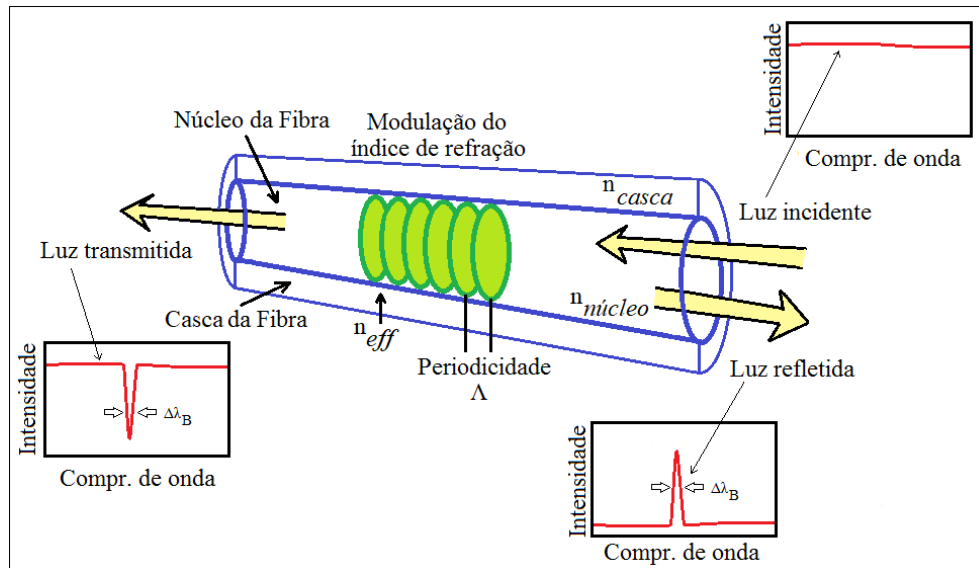


Figura 3 - Esquemático de representação de funcionamento da FBG, onde parte da intensidade incidente é refletida em determinado comprimento de onda, onde o comprimento de onda central é o comprimento de onda de Bragg (λ_B). O λ_B é dado pela periodicidade (Λ) e pelo índice de refração efetivo do núcleo (n_{eff}). Adaptado de (OTHONOS e KALLI, 1999).

Quando a alteração no índice de refração do núcleo da fibra ótica é gerada de forma periódica, são formadas as grades ou redes periódicas. Tais redes, fazem com que uma pequena faixa do espectro de luz incidente seja refletida. A maior intensidade de reflexão é obtida, quando o espalhamento sucessivo é coerente devido a variação do índice de refração, formando um modo de acoplamento contra propagante cujo o comprimento de onda central é o comprimento de onda de Bragg (λ_B), demonstrado pela equação 1:

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

onde n_{eff} se refere ao índice de refração efetivo do núcleo da fibra ótica e Λ se refere a periodicidade da rede gerada (HILL e MELTZ, 1997).

2.2 TÉCNICAS DE GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG

Após a técnica de gravação de redes de Bragg apresentada por Hill em 1978, considerada como uma técnica de gravação interna, surgiram diversas técnicas de gravação externa, sendo a primeira apresentada por Meltz. As técnicas de gravação externas podem ser classificadas como interferométrica ou não interferométrica. Dentre estas duas classificações existem diversas técnicas e variações, mas as principais técnicas são definidas como: técnica

interferométrica; interferométrica com máscara de fase; gravação direta por máscara de fase (KASHYAP, 1999).

2.2.1 Técnica Interferométrica

A técnica de gravação externa apresentada por Meltz então chamada como técnica interferométrica, posteriormente ficou conhecida como holográfica. A Figura 4 apresenta o esquemático básico para gravação, onde utiliza-se de um divisor de feixe para criar dois feixes iguais que posteriormente se recombinam para formar um padrão de interferência na região onde a fibra óptica está posicionada e que será gravada a rede.

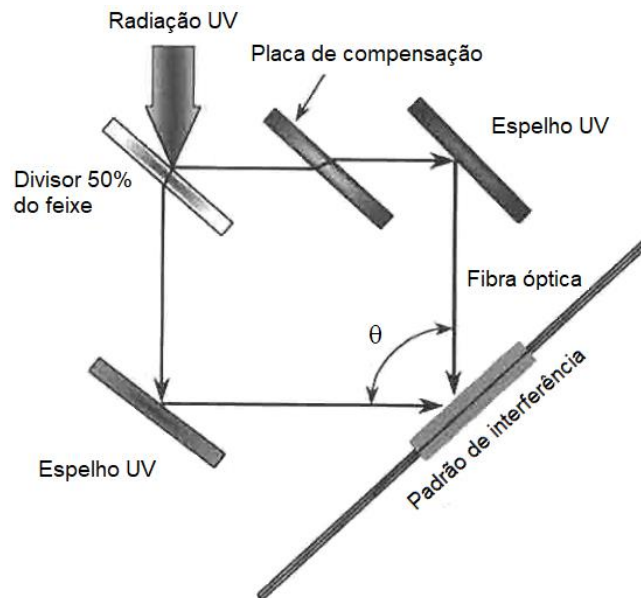


Figura 4 - Esquemático de gravação de FBG por meio da técnica interferométrica apresentada por Meltz. Adaptado de (KASHYAP, 1999).

O comprimento de onda de Bragg (λ_B) da FBG gerada na técnica interferométrica, é dado pela Equação 2 e depende do comprimento de onda do laser a ser utilizado (λ_{uv}), do índice de refração da sílica sob o feixe UV (n_{uv}), além do ângulo de cruzamento (θ) entre ambos os feixes, dada por:

$$\lambda_B = \frac{n_{eff} \lambda_{uv}}{n_{uv} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2)$$

Esta técnica apresenta vantagens quando comparada à técnica de gravação apresentada por Hill, pois é possível gravar redes de Bragg em comprimentos de onda do visível e infravermelho próximo, além da redução da energia utilizada na gravação (KASHYAP, 1999).

Uma desvantagem da gravação interferométrica é a elevada instabilidade mecânica do sistema de gravação, onde pequenas vibrações ou desalinhamentos podem prejudicar a gravação, provocando desvios em Λ e θ .

2.2.2 Gravação direta sobre máscara de fase

A gravação direta sobre máscara de fase, utiliza-se da aplicação de um feixe ultravioleta (UV) com incidência normal sobre uma máscara de fase. A máscara de fase é utilizada como um elemento óptico para difratar o feixe incidente nas ordens $m = 0$ e $m = \pm 1$, onde as ordens $m = \pm 1$ geram o padrão de superposição espacial dos feixes, o que resulta num padrão de interferência na região de gravação no núcleo da fibra ótica. As máscaras de fase são fabricadas a partir de placas de sílica pura, onde são criadas depressões periódicas (periodicidade da máscara de fase - Λ_{pm}). No processo de fabricação das máscaras de fase são utilizados procedimentos de forma a minimizar ao máximo a ordem $m = 0$ (KASHYAP, 1999). A Figura 5, apresenta o esquemático de difração da máscara de fase quando iluminada por feixe UV à normal.

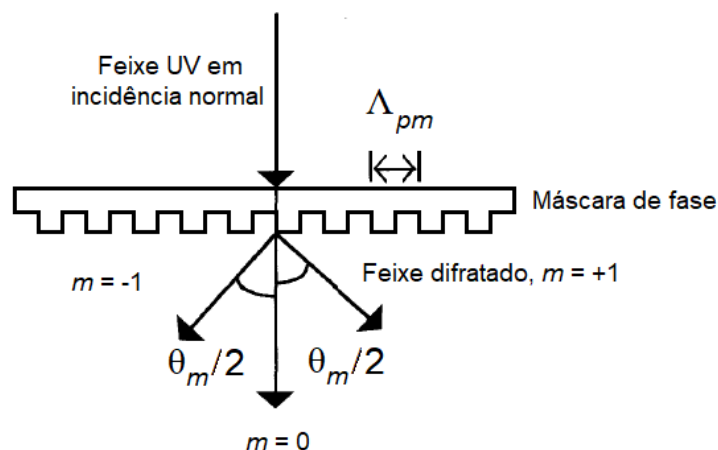


Figura 5 - Esquemático de incidência do feixe difratado nas ordens principais $m = \pm 1$ e remanescente na ordem $m = 0$, quando a máscara de fase é incidida por feixe UV à normal. Adaptado de (KASHYAP, 1999).

Na gravação da FBG por iluminação direta sobre máscara de fase, o comprimento de onda de Bragg λ_B é dependente do índice de refração efetivo do núcleo (n_{eff}) e da periodicidade da máscara de fase. A Λ da rede de Bragg inscrita na fibra ótica terá a metade da periodicidade da máscara de fase (Λ_{pm}), ou seja, a periodicidade da rede de Bragg será dada como mostra a Equação 3:

$$\Lambda = \Lambda_{pm}/2 \quad (3)$$

Substituindo a Equação 3 na Equação 1, é possível definir o λ_B em função da periodicidade da máscara de fase pela Equação 4, dada como:

$$\lambda_B = n_{eff}\Lambda_{pm} \quad (4)$$

Para executar a gravação da FBG pelo método de iluminação direta sobre máscara de fase, a fibra ótica (sem a camada protetora de acrilato) é posicionada próxima à máscara de fase. O feixe UV ilumina a máscara de fase e as franjas geradas pelas ordens $m = \pm 1$, geram o padrão de interferência que imprimem o padrão de modulação do índice de refração no núcleo da fibra ótica. A Figura 6 exemplifica o esquemático de gravação das FBGs por meio do método de gravação direta com máscara de fase, onde o feixe UV ilumina perpendicularmente a máscara de fase e são geradas as ordens $m = \pm 1$, responsáveis pela inscrição da rede no núcleo da fibra ótica.

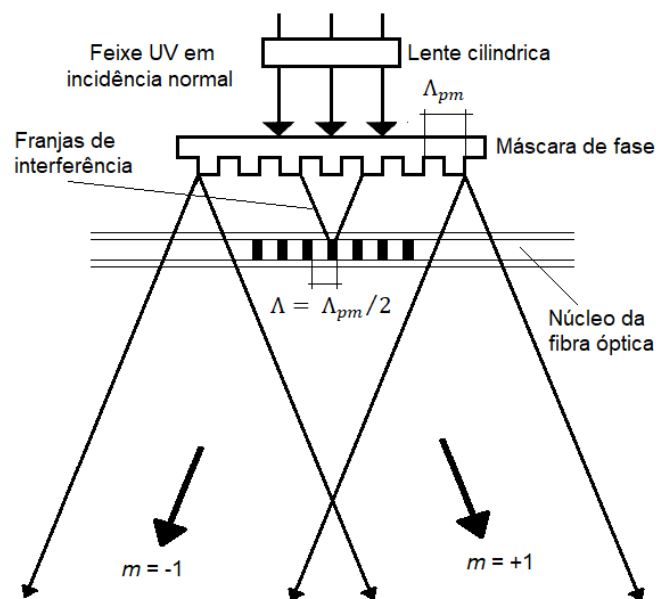


Figura 6 - Esquemático de gravação da FBG no núcleo da fibra ótica utilizando o método de gravação direta por máscara de fase.
Adaptado de (OTHONOS e LEE, 1995).

A técnica de gravação por máscara de fase apresenta a vantagem de ter o alinhamento do sistema de gravação relativamente facilitado, o que gera um alto grau de reprodutibilidade. Outra vantagem são as possíveis variações de gravação da FBG, podendo gerar redes com gorjeio, redes inclinadas ou redes longas, através de máscaras de fase específicas (CORADIN, 2011). Uma desvantagem deste método de gravação se dá pela invariância do λ_B obtido, pois a periodicidade obtida na FBG inscrita na fibra ótica será sempre a mesma.

As redes de Bragg utilizadas para o desenvolvimento do extensômetro ótico (*optic strain-gage*) descrito neste trabalho, foram produzidas utilizando a técnica de gravação direta sobre máscara de fase.

2.2.3 Técnica Interferométrica com máscara de fase

A técnica de gravação interferométrica sobre máscara de fase, utiliza a base da técnica de gravação interferométrica com a junção da máscara de fase. Nesta técnica o divisor de feixe é substituído pela máscara de fase e ao invés de ter dois feixes divididos, são utilizadas as ordens $m = \pm 1$ geradas pela máscara de fase para gerar o padrão de interferência no núcleo da fibra ótica.

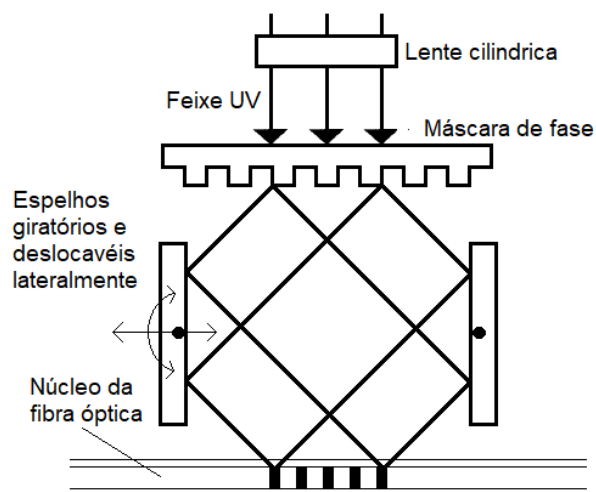


Figura 7 – Esquemático de gravação de FBG por meio da técnica interferométrica com máscara de fase, onde a movimentação dos espelhos giratórios pode alterar o λ_B gerado na rede inscrita na fibra ótica. Adaptado de (KASHYAP, 1999).

As franjas geradas pela máscara de fase são refletidas por dois espelhos giratórios posicionados de forma que refletem as franjas na região de gravação da fibra ótica e determinam a periodicidade da rede inscrita no núcleo da fibra. Ao efetuar o giro dos espelhos, de forma simétrica, através de sistemas de controle computadorizados, ocorre variação do λ_B da rede gravada. Nesta configuração apresentada na Figura 7, ainda é possível a utilização de uma lente cilíndrica a fim de focalizar o feixe UV sobre a máscara de fase e consequentemente focalizar o padrão de interferência sobre a fibra ótica (KASHYAP, 1999).

Essa técnica possui a vantagem de o sistema ser altamente flexível quanto ao λ_B gravado na FBG mas apresenta a desvantagem do sistema ser de difícil alinhamento, principalmente da posição/rotação dos espelhos.

2.3 SENSIBILIDADE CRUZADA

A FBG além de ser sensível a variações mecânicas por deformação e variações de temperatura, ela também é susceptível as variações de pressão. A sensibilidade à pressão pode ser desprezada, pois para haver um pequeno deslocamento do λ_B é necessário que a rede sensora seja submetida a enormes pressões (sensibilidade de aproximadamente -3 pm/Mpa) (MOYO, BROWNJOHN, *et al.*, 2005).

A correlação entre a variação no comprimento de onda de Bragg (λ_B) em função da variação da deformação ou em função da variação de temperatura, foi definida por Kersey (KERSEY, DAVIS, *et al.*, 1997). Esta correlação pode ser escrita como a Equação 5 (OTHONOS e KALLI, 1999):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial L} \right) \Delta L + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (5)$$

onde Λ é a periodicidade da rede de Bragg, ΔL é a variação de deformação e ΔT é a variação de temperatura. O primeiro termo do lado direito da igualdade, representa a dependência da variação do comprimento de onda em função da deformação sobre a rede sensora, já o segundo termo apresenta a dependência em função da variação de temperatura. Como a $\Delta\lambda_B$ está sujeita a variação da temperatura e à deformação simultaneamente, surge uma condição conhecida como sensibilidade cruzada. Para um sensor de deformação (*strain*) obter puramente a variação do λ_B em função da deformação, se faz necessário a aplicação de uma

técnica de compensação de temperatura e para sensores de temperatura é necessário garantir que a FBG não esteja submetida a deformação (OTHONOS e KALLI, 1999).

2.4 SENSORES DE DEFORMAÇÃO (*STRAIN*) BASEADOS EM FBG

Sensores de deformação com base em FBG possuem a característica de serem sensíveis a temperatura e deformação simultaneamente, característica esta chamada de sensibilidade cruzada. Como já demonstrado pela Equação 5, o comprimento de onda de Bragg (λ_B) varia em função da alteração do índice de refração do núcleo da fibra ótica e da alteração da periodicidade da rede sensora.

O primeiro termo (do lado direito da igualdade) da Equação 5, apresenta a dependência da variação do comprimento de onda em função da deformação sobre a rede sensora e pode ser reescrito como a Equação 6, sendo:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon_z \quad (6)$$

onde ε_z representa a componente de deformação relativa por unidade de comprimento, dada por $\varepsilon_z = \Delta L/L$, e p_e , representa a constante foto elástica, definida pela Equação 7:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (7)$$

em que p_{11} e p_{12} estão relacionados ao tensor foto elástico e ν define o coeficiente de Poisson. Para uma fibra ótica com núcleo de sílica, são admissíveis os seguintes parâmetros: $p_{11} = 0,113$; $p_{12} = 0,252$; $\nu = 0,16$; $n_{eff} = 1,482$. Substituindo estes parâmetros na Equação 7, pode-se obter a sensibilidade a deformação de uma rede sensora com comprimento de onda de Bragg na região de 1550 nm, como sendo 1,2 pm/ $\mu\varepsilon$, em que $\mu\varepsilon$ é a unidade de deformação relativa das FBGs e 1 $\mu\varepsilon$ corresponde a 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ (MOREY, MELTZ e WEISS, 1995).

A Figura 8 mostra a representação do núcleo de uma fibra com a presença de uma FBG. Pode-se ver na mesma Figura o período da rede e o correspondente espectro refletido nas condições sem tração e com tração. O estiramento da fibra provoca aumento no período da rede de Bragg e conseqüentemente deslocamento espectral ($\Delta\lambda_B$) para comprimento de onda superior, conforme a relação dada na Equação 6.

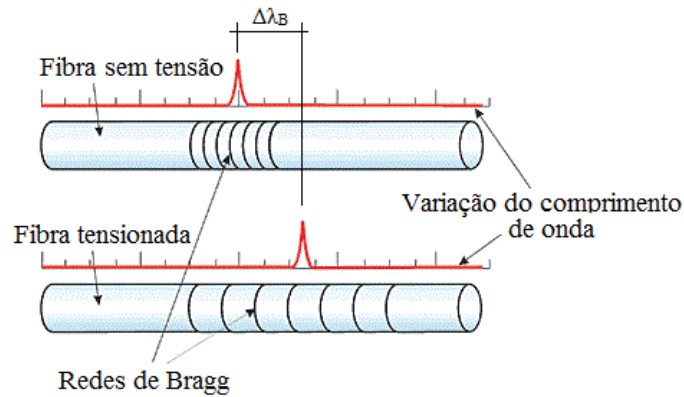


Figura 8 - Representação esquemática mostrando o período e o sinal refletido pela FBG em repouso e sob tração.

Adaptado de (CHAVEZ-PIRSON, 2004).

O segundo termo da Equação 5, apresenta a dependência da variação do comprimento de onda de Bragg em função da variação de temperatura e pode ser reescrita como a Equação 8, sendo:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \delta)\Delta T \quad (8)$$

onde α representa a expansão térmica da fibra óptica e δ representa o coeficiente termo óptico. Para a fibra óptica de sílica dopada com germânio são admitidos os seguintes parâmetros: $\alpha = 0,55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\delta = 8,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Substituindo os parâmetros na Equação 8, obtemos a sensibilidade térmica para uma rede sensora com comprimento de onda de Bragg na região de 1550 nm, de aproximadamente 13,7 pm/ $^\circ\text{C}$ (MOREY, MELTZ e WEISS, 1995).

2.4.1 Sensibilidade cruzada e compensação de temperatura

Como já mencionado, um sensor em FBG é simultaneamente sensível a deformação e a temperatura (sensibilidade cruzada). Para um sensor de deformação em FBG obter puramente a variação do comprimento de onda de Bragg em função da deformação, se faz necessária a utilização de uma técnica de compensação de temperatura (SANTOS e FARAHI, 2015).

Dentre as várias técnicas de compensação de temperatura, pode-se destacar as seguintes:

- Compensação de temperatura por meio do encapsulamento com duplo metal com coeficientes de dilatação térmica diferentes.
- Compensação de temperatura por meio da utilização de duas FBGs em fibras óticas de diâmetros diferentes concatenadas, onde a sensibilidade a deformação é diferente para cada FBG.
- Compensação de temperatura por meio da utilização de um metal com coeficiente de dilatação térmica negativo.
- Compensação de temperatura por meio de duas FBGs, encapsuladas no mesmo corpo de forma que as duas estejam sensíveis a variação de temperatura, mas somente uma esteja sujeita a variação de deformação. Essa foi a solução aplicada neste trabalho, com tal procedimento é separada a leitura da deformação, parâmetro de interesse.

2.4.2 Vantagens e aplicações dos sensores de deformação com base em FBG

Sensores de deformação baseados em FBG, quando comparados ao compatível com base eletrônica, são mais interessantes nos seguintes aspectos (BETZ, THURSBY , *et al.*, 2006), (SANTOS e FARAHI, 2015):

- Menor quantidade de cabos e menor peso;
- Imunidade eletromagnética;
- Maior estabilidade, maior resistência comparado ao elétrico compatível;
- Passível de implementação em materiais compósitos sem alteração da estrutura;
- Possibilidade de multiplicação de vários sensores em uma mesma fibra ótica;

- Maior precisão na medição de *strain*.
- Propriedades direcionais, usando tecnologias de montagens adequadas, a fibra ótica é sensível somente a deformação axial.

Devido as vantagens dos sensores de deformação em FBG, tais sensores estão sendo amplamente utilizados no Monitoramento de integridade de estruturas, do inglês *Structural Health Monitoring* (SHM). O SHM está amplamente utilizado no monitoramento de estruturas como: em pontes; estruturas metálicas; estruturas civis até mesmo embebidos em estruturas de concreto; monitoramento de estruturas em altas temperaturas. (MOYO, BROWNJOHN, *et al.*, 2005), (TU e TU, 2014), (ZHOU, GRAVER, *et al.*, 2003), (BISWAS, BANDYOPADHYAY, *et al.*, 2010), (MAJUMDER, GANGOPADHYAY, *et al.*, 2008), (SILVA-MUÑOZ e LOPEZ-ANIDO, 2009).

Outras aplicações podem ser desenvolvidas, como por exemplo em aplicações biomédicas (AL-FAKIH, OSMAN e ADIKAN, 2012).

Na Figura 9 são mostradas fotos de sensores de *strain*, em (a) *strain gage* com base em FBG e em (b) *strain gage* resistivo convencional.

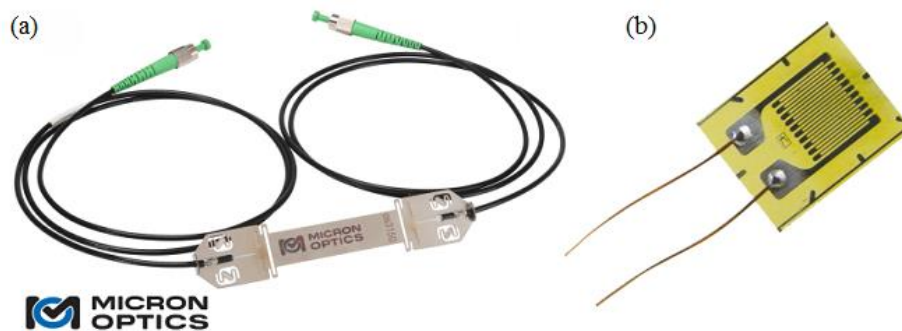


Figura 9 - (a) Strain gage utilizando FBG. (b) Strain gage resistivo convencional.

Para facilitar a visualização, as figuras estão fora de escala, (a) retirado de (MICRON OPTICS, 2018), (b) retirado de (KIOWA, 2018).

3 METODOLOGIA

3.1 DESENVOLVIMENTO DO SENSOR

O desenvolvimento do sensor teve como premissa obter a maior sensibilidade à deformação e um sistema de fácil fixação. Outros pontos observados foram: a conectividade do cabo ótico ao corpo do sensor e a proteção mecânica da fibra ótica na região onde a mesma se encontra nua. Para se obter o melhor modelo o encapsulamento foi projetado e simulado em um *software* de modelagem tridimensional, posteriormente foi realizada a confecção mecânica por meio de um centro de usinagem (CNC).

3.1.1 Seleção de materiais

Existem diversos materiais que podem ser implementados para o desenvolvimento do sensor de deformação, em especial, o alumínio. O alumínio apresenta algumas vantagens que o tornam interessante para a aplicação proposta, dentre elas podem-se destacar: baixo módulo de Young ou módulo de elasticidade, o que permite que haja uma boa deformação com cargas relativamente pequenas; densidade extremamente baixa comparada a outros metais (cerca 3 vezes mais leve que o aço); possibilidade de tratamento térmico, o que possibilita elevar a resistência mecânica; elevada resistência a corrosão, o que pode ser importante para aplicações em ambientes hostis (HERTZBERG, 1996).

O alumínio pode apresentar uma desvantagem comparado a outros metais, que se dá pelo fato da baixa resistência à tração. Esta desvantagem pode ser compensada pela adição de outros metais, formando ligas metálicas com cerca de até 10 vezes a capacidade de tração comparada ao alumínio puro (ASM INTERNATIONAL, 1984).

Para o desenvolvimento deste projeto foi definida a utilização da liga de alumínio “1200 H14”, com isso se obtém um aumento considerável na sua resistência a tração. A liga “1200” possui cerca de 99% de alumínio e adição de metais como Silício e Ferro, entre outros. O complemento “H14”, refere-se ao tratamento realizado no material, sendo “H” tratamento mecânico para encruamento, “1” é o número de operações realizadas (neste caso 1 operação) e “4” refere-se a intensidade da operação, sendo ½ duro.

Após testes com diversas colas, foi definida a utilização da resina epóxi bi componente UHU Plus endfest 300 para fixação da fibra ótica nos pontos de ancoragem do corpo de alumínio do sensor. Segundo manual do fabricante, a temperatura de trabalho é - 40 a 80 °C, apresenta alta resistência a tração, além de alto poder de adesão com a fibra ótica (Sílica) e o alumínio. Uma desvantagem desta cola é referente ao tempo de colagem, em torno de 24 horas.

3.1.2 Produção das redes de Bragg

As fibras óticas monomodo padrão de telecomunicações (SMF G-652 ou SMF-28[®]) são largamente utilizadas para receberem gravações de FBG e posteriormente serem aplicadas como sensores. Tais redes de Bragg apresentam excelente fator de sensibilidade a deformação (JULICH, AULBACH, *et al.*, 2013).

Neste projeto foi utilizado um cordão ótico com 3 m de comprimento com conector FC-PC, em fibra ótica monomodo padrão telecom (G-652).

As FBGs foram produzidas localmente pelo Grupo de Pesquisa em Dispositivos Fotônicos e Aplicações, vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - CPGEI da UTFPR, no Laboratório de Fotônica.

Foi utilizado o método de gravação direta sobre máscara de fase (Ibsen[®], pitches 1058,9 nm e 1073,5 nm), resultando nos comprimentos de onda de Bragg, FBG1 em λ_{B1} de 1532,43 nm para a rede sensora de compensação de temperatura e FBG2 em λ_{B2} de 1553,05 nm para a rede sensora de deformação. A gravação foi realizada utilizando *laser* de excímero – Coherent Xantos XS, 193 nm, operando na taxa de repetição de 250 Hz, energia de 3 mJ/pulso, tempo de exposição de 3 minutos. As Redes de Bragg apresentam cerca de 3 mm de comprimento e foram gravadas diretamente no cordão ótico.

3.1.3 Projeto e simulação do sensor

Para o projeto mecânico e simulação do encapsulamento foi utilizado o *software* de modelagem tridimensional, Catia[™]. No projeto foram adotadas as seguintes premissas: fixação facilitada no local a ser instrumentado; resistência a impactos; elevada sensibilidade à deformação; proteção mecânica para as redes sensora e de compensação térmica.

O encapsulamento foi desenvolvido e simulado adotando os dados de fabricante do alumínio “1200 H14”. Para a proteção da fibra ótica na região onde está posicionada a FBG sensora de deformação, foi instalado um tubo capilar em aço inoxidável com diâmetro externo de 1,7 mm e diâmetro interno de 0,45 mm a fim de mitigar a fragilidade da rede sensora. Para evitar que o tubo capilar ofereça resistência à tração, reduzindo a sensibilidade do sensor, tomou-se o cuidado de envolver em filme plástico as extremidades do tubo e aplicar a cola sobre tais regiões. O procedimento garante razoável estabilidade ao capilar e ao mesmo tempo facilita o estiramento ou contração do encapsulamento de alumínio sob variação de carga.

Utilizando o *software* de modelagem, foi realizado o projeto do encapsulamento do sensor e verificado a disposição dos componentes. A Figura 10 apresenta na parte (a), o formato do encapsulamento projetado, onde os principais pontos são destacados: primeiro e segundo pontos de ancoragem da fibra ótica ao corpo da cápsula; tubo capilar de proteção da fibra ótica na região da FBG2; cola de alta flexibilidade; posição de entrada do cordão ótico; pontos de fixação do sensor, os quais são utilizados para fixação do sensor aos componentes que serão mensurados. Já na Figura 10 (b), são mostradas as posições onde foram inscritas as FBGs de compensação de temperatura (FBG1) e da sensora de deformação (FBG2).

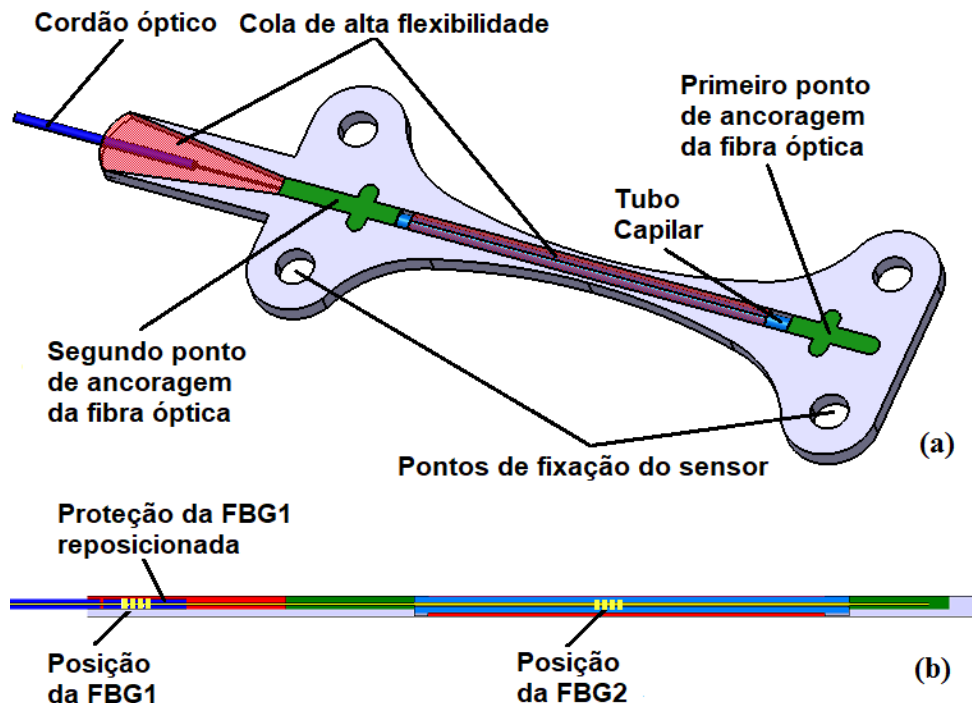


Figura 10 – (a) Projeto de confecção e montagem do sensor desenvolvido utilizando o software Catia™, apresentando os principais pontos do encapsulamento. (b) Demonstra a posição de implementação das FBGs no encapsulamento.

Retirado de (BANDT NETO e OLIVEIRA, 2018a, no prelo).

A lei de Hooke define o comportamento de um determinado material quando submetido a deformação dentro da região elástica (Na qual o material tem a capacidade de deformar-se e voltar as dimensões iniciais após a retirada do carregamento/tensão). O gráfico apresentado na Figura 11, demonstra a curva de tensão/deformação de uma determinada liga de alumínio, onde σ_e define a máxima tensão de carga para a região de deformação elástica, também chamada de tensão de escoamento inicial.

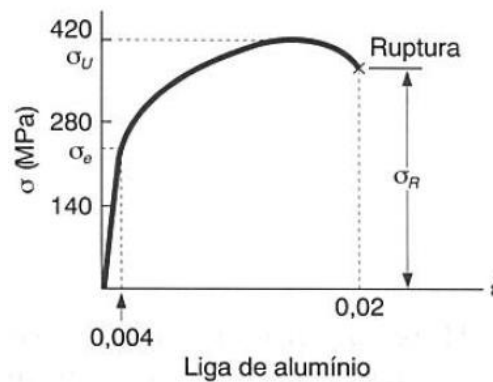


Figura 11 – Gráfico de tensão em função da deformação de determinada liga de alumínio. Retirado de (BEER e JONHSTON JR, 1996).

A lei de Hooke define o comportamento dos metais na região de deformação elástica, onde a tensão sobre o material pode ser expressa como $\sigma = E \cdot \varepsilon$, sendo “ σ ” a tensão aplicada ao material, “ E ” o módulo de Young e “ ε ” a deformação. Uma segunda forma de expressar a tensão aplicada ao material (σ), pode ser expressa em função da força aplicada (F) e da área da seção transversal (A) pela equação $\sigma = F/A$. Desta maneira é possível dizer que a deformação do material está relacionada à força, à área da seção transversal e à constante elástica, podendo ser escrita como a Equação 9, sendo:

$$\varepsilon = \frac{F}{A \cdot E} \quad (9)$$

Sabendo que o sensor foi projetado a fim de trabalhar na região elástica, a força de carregamento possui uma distribuição uniforme entre os pontos de fixação do sensor e o módulo de Young é constante em todo o metal, pode-se concluir que a deformação ao longo do encapsulamento se dará em função da área transversal do corpo do sensor. Sendo assim, a maior deformação está localizada na região central, entre os pontos de fixação desta FBG, onde o corpo do sensor é mais delgado, conforme representado na Figura 12 (a).

A fim de definir a máxima força aplicada ao corpo do sensor e trabalhar dentro da faixa de deformação elástica, foi realizada a simulação pelo *software* de desenvolvimento utilizando o método de análise por elementos finitos, apresentada na Figura 12 (b). Para tal simulação foram incluídos no *software* as especificações do material, neste caso o alumínio “1200 H14”, fornecida pelo datasheet do fabricante. Ainda na Figura 12 (b) obtém-se a tensão de $9,07 \cdot 10^7$ N/m² ou 90,7 Mpa na região fina da cápsula, relativo ao carregamento com 8 kg ou 78,3 N.

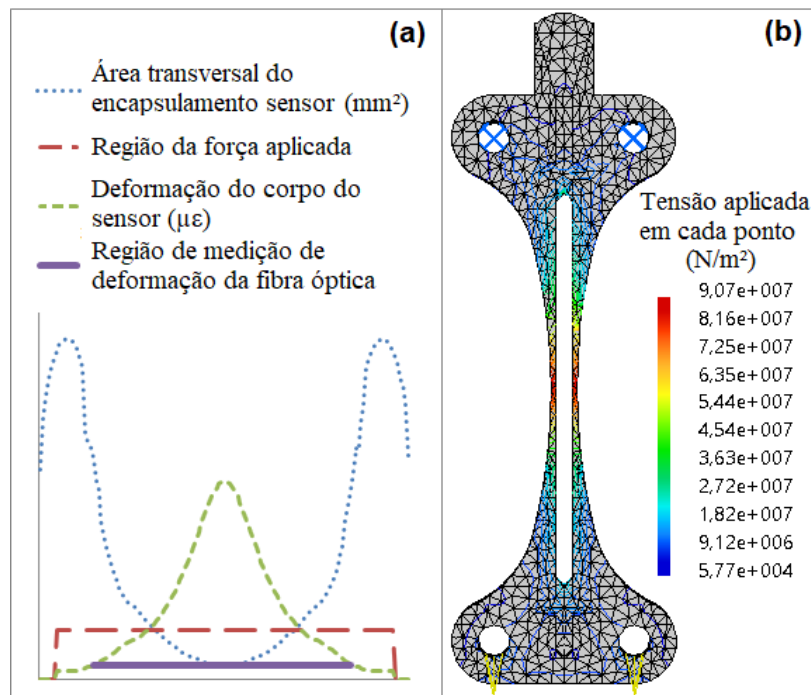


Figura 12 – (a) Representação da deformação obtida no corpo do sensor em função da área transversal. (b) Simulação de deformação realizada pelo software, utilizando o método de análise por elementos finitos.

Retirado de (BANDT NETO e OLIVEIRA, 2018a, no prelo).

O fabricante da chapa de alumínio especifica como limite inicial de escoamento a tensão de 95 Mpa, utilizando esta informação na simulação realizada por elementos finitos no software de desenvolvimento, verificou-se que máxima carga aplicada ao corpo do sensor deve ser de 8,4 kg ou aproximadamente 82,3 N. Com este limite de carga definido pela simulação, foi admitido como limite de carregamento a carga de 8 kg ou 78,3 N para garantir o trabalho dentro da faixa de deformação elástica.

3.1.4 Fabricação mecânica

O primeiro passo para a confecção do encapsulamento se deu pela usinagem do material utilizando uma chapa de alumínio com espessura de 2,00 mm na liga já especificada, a fim de moldar o corpo do sensor às medidas de projeto. Tal procedimento foi realizado por meio de um centro de usinagem da marca Romi, modelo discovery 360. A Figura 13 apresenta o corpo do sensor usinado, apresentando dimensões 90 x 25 x 2 mm.

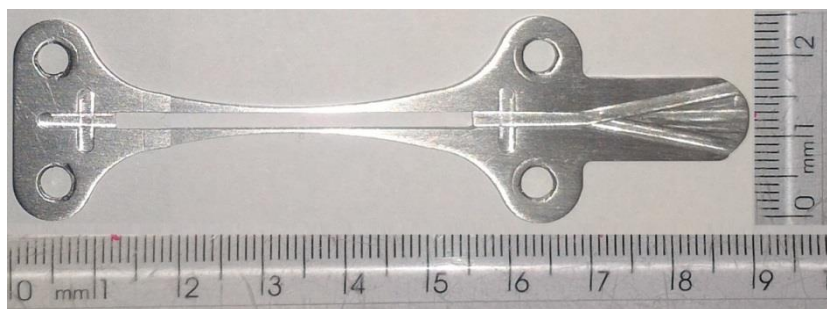


Figura 13 – Corpo do sensor em alumínio após a usinagem.
Retirado de (BANDT NETO e OLIVEIRA, 2018b, no prelo).

A montagem do encapsulamento seguiu a sequência descrita abaixo e apresentado na Figura 14.

- a) Aplicação da cola de alta flexibilidade na região de fixação do tubo capilar ao corpo sensor.
- b) Preparação do tubo capilar com microfilme nas pontas e um fio metálico na região de montagem da fibra ótica, a fim de manter íntegro o orifício de passagem da fibra ótica.
- c) Posicionamento e colagem do tubo capilar ao corpo do sensor.
- d) Posicionamento de parte de capa da fibra ótica sobre a FBG1 de compensação de temperatura.
- e) Retirada do fio metálico e posicionamento da fibra ótica na posição de colagem.
- f) Colagem do primeiro ponto de fixação da fibra ótica ao corpo do sensor, com tempo de cura em torno de 24 horas.
- g) Colagem da saída da fibra ótica ao corpo do sensor por meio da cola de alta flexibilidade. A partir deste momento a fibra ótica foi mantida sob uma tensão de cerca de 0,2 N até a finalização do processo de montagem.
- h) Colagem do segundo ponto de fixação da fibra ótica ao corpo do sensor, com tempo de espera para cura de aproximadamente 24 horas.

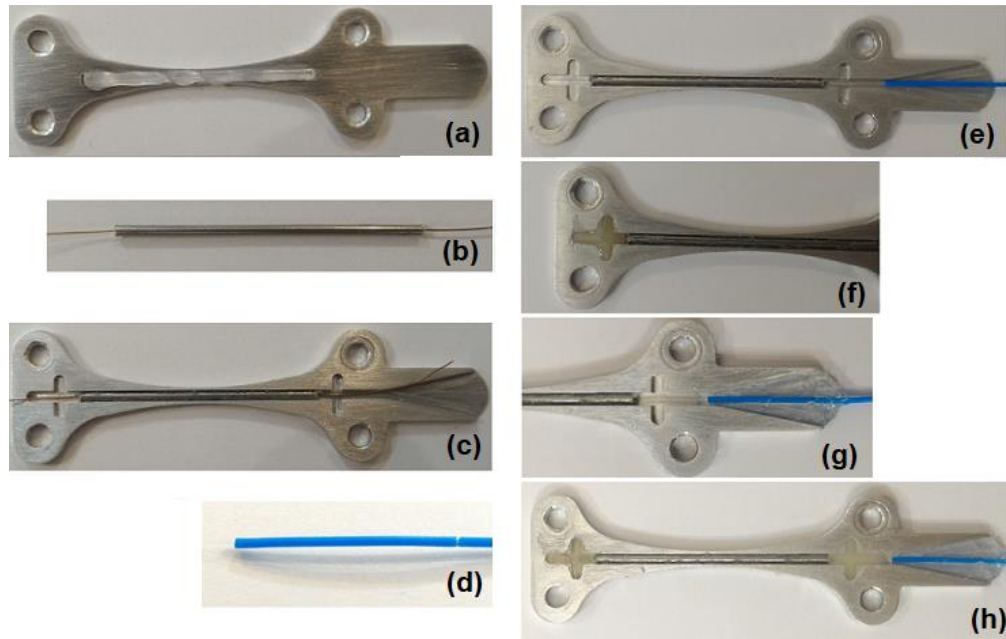


Figura 14 – Passo a passo para a montagem do encapsulamento do sensor. (a) aplicação da cola na região do tubo capilar. (b) preparação do tubo capilar. (c) colagem do tubo capilar ao corpo de alumínio. (d) reposição de parte da capa de proteção da fibra ótica. (e) posicionamento da fibra ótica no sensor. (f) colagem do primeiro ponto de fixação da fibra ótica. (g) colagem da saída da fibra ótica ao corpo do sensor. (h) colagem do segundo ponto de fixação da fibra ótica no corpo do sensor. Adaptado de (BANDT NETO e OLIVEIRA, 2018a, no prelo).

Com o procedimento de manter a fibra ótica esticada (cerca de 0,2 N) durante a montagem a partir da etapa apresentada na Figura 14 (g), após a finalização da montagem do sensor, houve um deslocamento no λ_{FBG2} de aproximadamente 160 pm. A Figura 15 apresenta o deslocamento obtido na FBG2 sensora de deformação, tal procedimento foi realizado a fim de eliminar possíveis erros de medição do sensor na faixa inicial de medição. A diferença de nível nas linhas de base nos dois espectros (~ -39 dBm e $\sim -32,5$ dBm), na Figura 15, está correlacionada somente a reflexão do sinal em conectores e de tal forma não afetam a determinação do comprimento de onda (λ_B).

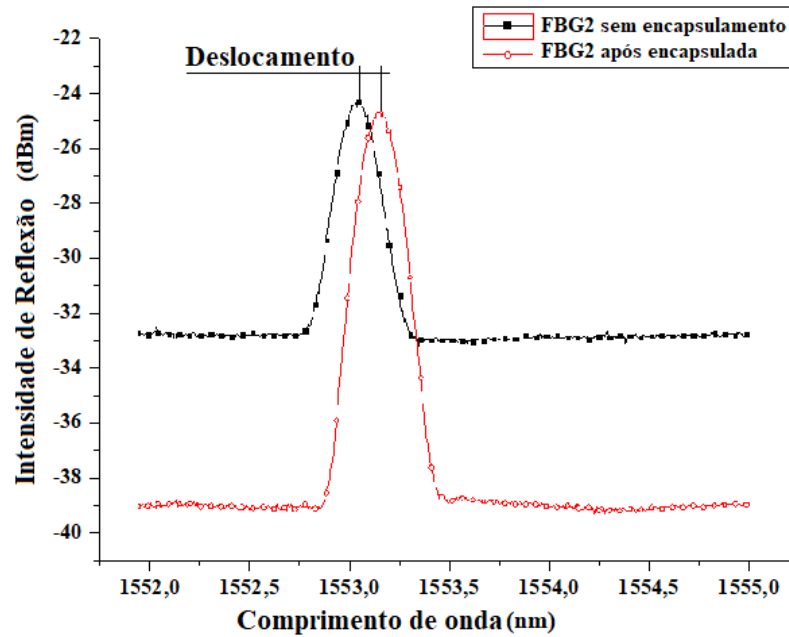


Figura 15 – Deslocamento do λ_{FBG2} após a finalização da montagem devido a tração durante a colagem. Autoria Própria.

Após a realização de todas as etapas de montagem o sensor foi finalizado conforme apresenta a Figura 16. Na mesma figura pode ser observado o cordão óptico com conector FC-PC, através do qual efetua-se a conexão ao interrogador óptico (SM 125).

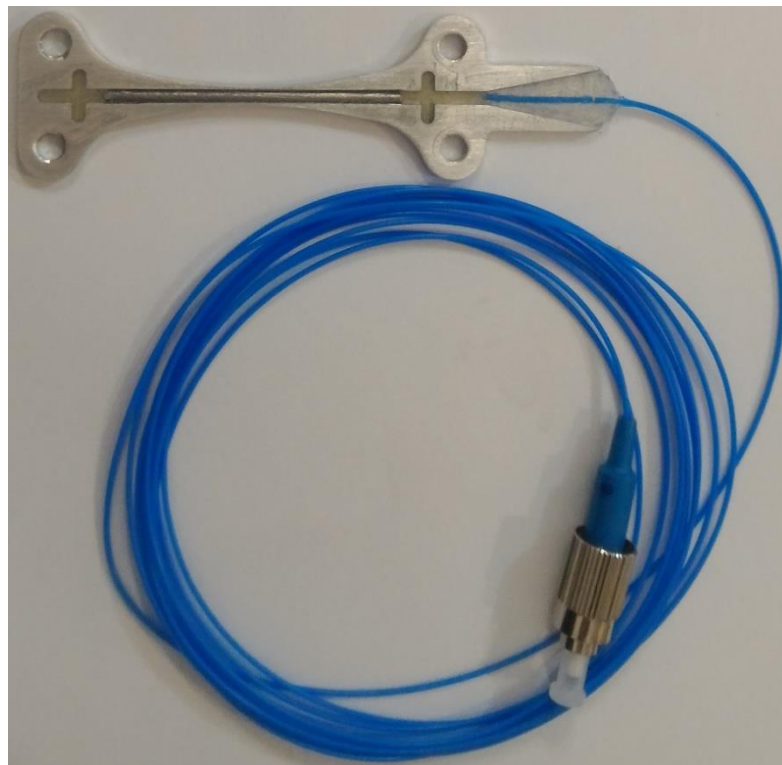


Figura 16 – Sensor finalizado após todas etapas de confecção e montagem. Retirado de (BANDT NETO e OLIVEIRA, 2018b, no prelo).

3.2 TESTES

Inicialmente foram realizados testes para determinar as sensibilidades para deformação e para temperatura, na fibra nua e na fibra encapsulada. Os testes foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa foram realizadas as caracterizações das sensibilidades (temperatura e deformação) das FBGs em fibra ótica nua, em uma segunda etapa foram realizadas as caracterizações das mesmas sensibilidades para o sensor produzido.

O sistema de interrogação para aquisição do comprimento de onda de Bragg (λ_B) das duas FBGs, foi o interrogador SM125 da Micron Optics[®], utilizado em todas as etapas de testes. Este interrogador possui resolução 5 pm e banda de operação 1510 até 1570 nm, os dados medidos foram gravados pelo *software* do interrogador (SM125_V1.04) a cada 1 segundo. A Figura 17 (a) apresenta o esquemático do sistema de interrogação utilizado nas caracterizações em temperatura, já na Figura 17 (b), é apresentado o esquemático utilizado nas caracterizações em deformação.

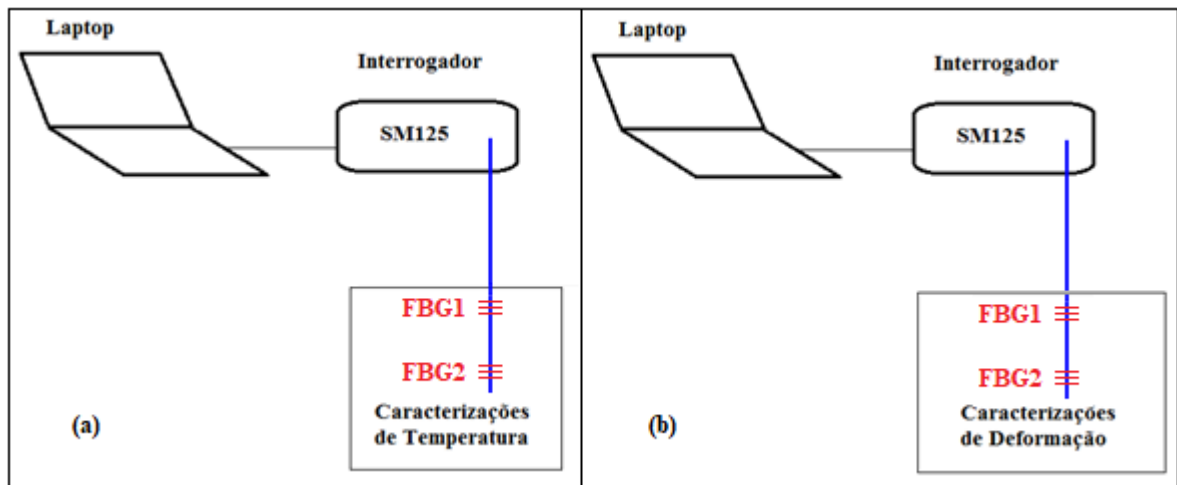


Figura 17 – (a) esquemático do sistema de interrogação utilizado nas caracterizações em temperatura. (b) esquemático do sistema de interrogação utilizado nas caracterizações em deformação.

Autoria Própria.

3.2.1 Caracterização das FBGs em fibra ótica nua

A sensibilidade da FBG quanto à deformação foi determinada em dois processos distintos: medição da variação do comprimento de onda de Bragg ($\Delta\lambda_B$) em função de estiramento controlado (tração) e em função da tração por carregamento com massas padrão. O estiramento controlado foi realizado por aparato composto de motor de deslocamento linear, controlado eletronicamente por meio de botões de comando e um indicador micrométrico de deslocamento, mostrados na Figura 18.

Ainda na Figura 18, a fibra ótica está fixada (colada) em duas bases de ancoragem, de tal forma que a FBG sob caracterização esteja posicionada entre elas. Uma das bases é fixa e a outra é deslocada por um controlador que aciona um motor de deslocamento linear. Conforme é executado o deslocamento, o monitoramento é realizado por meio de um micrômetro. Na caracterização por deslocamento controlado, foram executados ciclos de tração e relaxação entre 0 e 150 μm (ΔL), com passos 30 μm . O comprimento inicial (L) da fibra a ser tracionada é de aproximadamente 83 mm (0,083 m), o que representa uma deformação de 0 a 1807 $\mu\epsilon$ (definida por: $\epsilon = \Delta L/L$), onde $\mu\epsilon$ refere-se à deformação relativa de 1 $\mu\text{m}/\text{m}$.

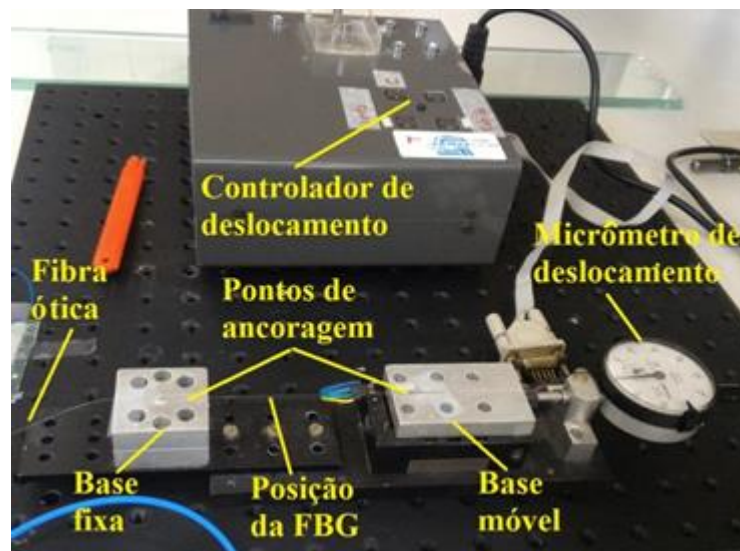


Figura 18 – Equipamento utilizado para caracterização da FBG nua em função da deformação por deslocamento controlado.
Autoria Própria.

A segunda caracterização de deformação em fibra ótica nua, foi realizada por meio de carregamentos com massas padrão. Neste procedimento foram executados os testes

fixando a fibra ótica a um dispositivo estático e carregando as massas calibradas na ponta solta da fibra ótica de forma que a FBG deformasse em função da força gravitacional. Para esta caracterização foram executados carregamentos com as massas padrão, cuja tração estava entre 0 e 100 g (ou 0 e 0,979 N), com passos de 10 g (ou 0,0979 N).

3.2.2 Caracterização do sensor em temperatura

A caracterização por temperatura do sensor foi realizada para se obter os coeficientes de sensibilidade térmica da FBG1 de compensação de temperatura e da FBG2, sensora de deformação após encapsuladas. Os testes foram executados utilizando o banho térmico da marca Lauda, modelo RE212, mostrado na Figura 19. Neste processo, o sensor permaneceu submerso em água para realizar a troca térmica. Para a caracterização, os testes foram executados entre 5 e 50 °C, com passos de 5 °C.



Figura 19 – Equipamento utilizado para caracterização do sensor em temperatura. Autoria Própria.

Para monitorar o tempo de resposta do sensor quanto à variação de temperatura, foi realizado um segundo teste. Neste teste foi retirado o sensor da água a 50 °C e deixado em temperatura ambiente (aproximadamente 20 °C) até a estabilização da temperatura (monitorada pela $\Delta\lambda_B$).

3.2.3 Caracterização do sensor em deformação

Para determinar a sensibilidade à deformação do sensor, o dispositivo foi submetido a testes de tração uniaxial com a utilização de massas padrão a favor da força da gravidade. Foram realizados diversos ciclos de carga e descarga entre 0 e 8 kg, com passos de 1 kg. Em cada patamar de carga/descarga, foram executadas medições de deslocamento exercida sobre o sensor utilizando um relógio apalpador micrométrico da marca Mitotoyo (com resolução de $2\ \mu\text{m}$), medindo o deslocamento em μm . Juntamente com o deslocamento, foram registrados os comprimentos de onda das FBGs por meio do sistema de interrogação já mostrado na Figura 17.

A Figura 20 apresenta o esquemático da caracterização de deformação do sensor em função do carregamento com massas padrão. Neste esquemático é representada a montagem do sensor, a posição de carregamento com as massas padrão e o local de medição da deformação pelo relógio apalpador.

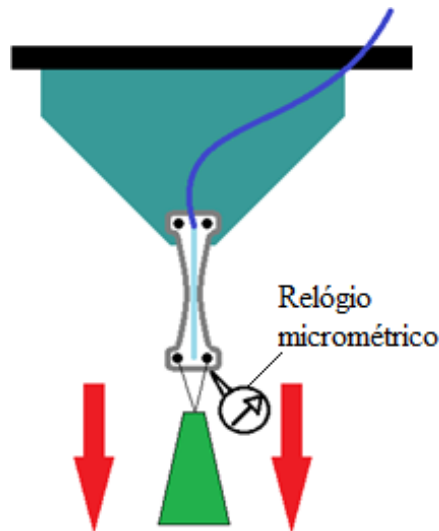


Figura 20 – Representação esquemática do teste de deformação do sensor por carregamento com massas padrão.

Adaptado de (BANDT NETO e OLIVEIRA, 2018a, no prelo).

Um segundo teste de deformação foi executado carregando e descarregando o encapsulamento com a máxima carga (8 kg) a fim de mensurar o tempo de resposta do sensor em função da variação de carga. A Figura 21 (a) apresenta a montagem experimental com o relógio apalpador micrométrico realizando a medição do deslocamento exercido sobre o encapsulamento em determinado passo, já na Figura 21 (b), é apresentada a realização da montagem dos testes de deformação do sensor, utilizando as massas padrão em plena carga.

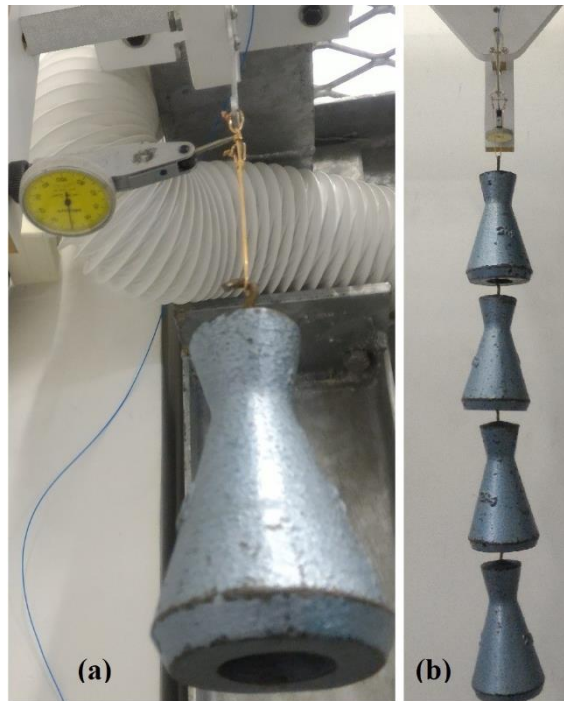


Figura 21 – (a) Detalhe da montagem dos testes de deformação do sensor. (b) Montagem experimental com máxima carga.

Retirado de (BANDT NETO e OLIVEIRA, 2018b, no prelo).

4 RESULTADOS

Para o tratamento dos dados aquiridos pelo interrogador das redes de Bragg e geração dos resultados foi utilizado o *software* Origin®.

Os valores das massas padrão utilizadas para carregamento, foram convertidos de kg para força em Newton (N), utilizando aceleração gravitacional (g). Como a aceleração gravitacional é variável em função da latitude e da altitude, foi assumido g como $9,79 \text{ m/s}^2$, para a região de desenvolvimento deste trabalho (LOPEZ, 2008). Os deslocamentos obtidos em μm foram convertidos em deformação, onde são expressos em *microstrain* ($\mu\epsilon = \Delta L/L_0$). Sendo ΔL a variação no comprimento, expresso em μm e L_0 o comprimento inicial, expresso em metros.

Na caracterização do sensor em função do carregamento com massas padrão, tal deformação concentra-se na região delgada do encapsulamento onde a FBG2 sensora de deformação está colada, para o cálculo da deformação sobre o sensor é considerada a distância inicial (L_0) em função da distância entre os pontos de fixação, assim $L_0 = 60 \text{ mm}$.

4.1 FBG EM FIBRA ÓTICA NUA

A sensibilidade à deformação das FBGs em fibra ótica nua foi caracterizada por dois processos distintos: carregamento com massas padrão e deslocamento controlado. Na caracterização da FBG nua por deslocamento controlado, foi obtida uma sensibilidade de $1,13 \text{ pm}/\mu\epsilon$. Já em relação a deformação por carregamento com massas padrão, a sensibilidade obtida foi de $1,35 \cdot 10^3 \text{ pm/N}$. O gráfico mostrado na Figura 22 apresenta as retas obtidas pela ferramenta de ajuste linear do *software* Origin® e as marcas são os valores obtidos por medição. Os ajustes lineares representam respectivamente a sensibilidade à deformação da FBG em fibra ótica nua em função do carregamento com massas padrão, marcas fechadas, e pelo deslocamento controlado, marcas abertas.

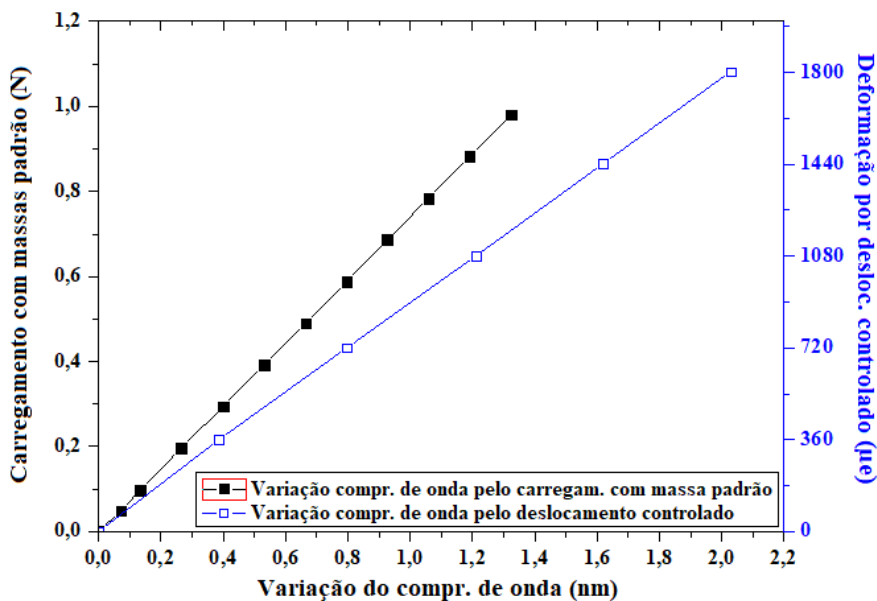


Figura 22 – Sensibilidade à deformação da FBG em fibra ótica nua em função do carregamento com massas padrão e em função do deslocamento controlado.
Autoria Própria.

4.2 SENSOR DE DEFORMAÇÃO

O sensor de deformação foi inicialmente caracterizado em temperatura a fim de se obter a equação de compensação térmica. Em seguida foi caracterizado em deformação de modo a definir a sensibilidade do sensor desenvolvido. Nesta seção são demonstrados os resultados obtidos em cada caracterização.

4.2.1 Sensibilidade em temperatura

A técnica de compensação de temperatura aplicada ao sensor foi baseada na utilização de duas FBGs com comprimentos de onda diferentes. Uma FBG monitora a temperatura do encapsulamento (não sujeita a deformação sofrida pela cápsula do sensor) e a segunda fornece o parâmetro de interesse, neste caso a deformação do encapsulamento (sensor). Através da caracterização por temperatura foi determinada a sensibilidade da FBG1 (compensação de temperatura, em 1532,43 nm) e da FBG2 (sensora de deformação, em 1553,05 nm), com tal procedimento foi possível definir a equação de resposta do sensor quanto a variação de temperatura.

Durante a caracterização foram obtidos os λ_{FBG1} e λ_{FBG2} em cada patamar de temperatura e por meio da análise de dados, foram obtidas as retas de resposta de cada rede de Bragg.

O gráfico apresentado na Figura 23, apresenta os resultados obtidos na caracterização por temperatura do sensor, onde são apresentados os valores de comprimento de onda da FBG1 e FBG2 em cada patamar de temperatura, além das retas que definem a sensibilidade térmica das FBGs, obtidas pelo ajuste linear.

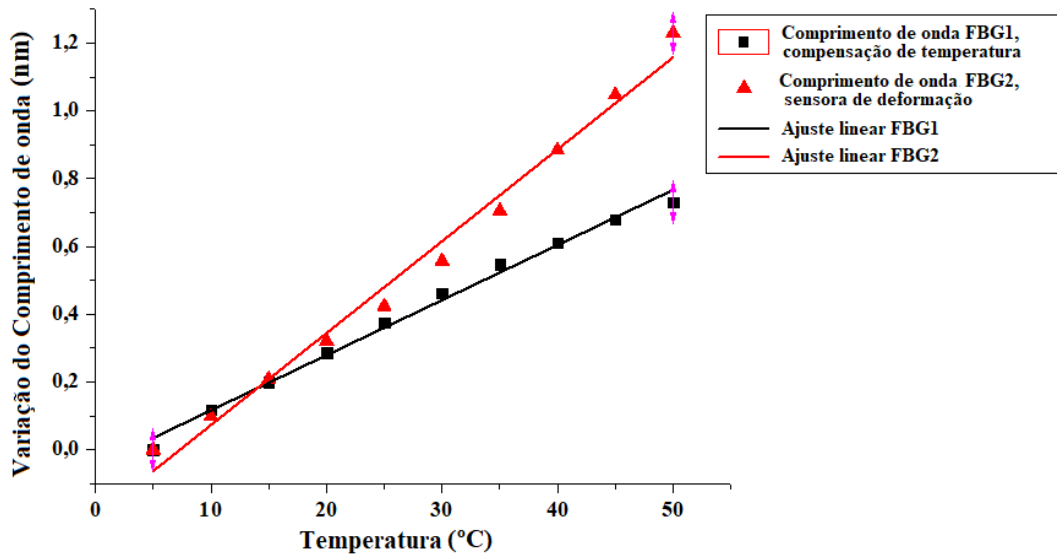


Figura 23 – Resposta à variação de temperatura da FBG1 e FBG2 encapsuladas. Autoria Própria.

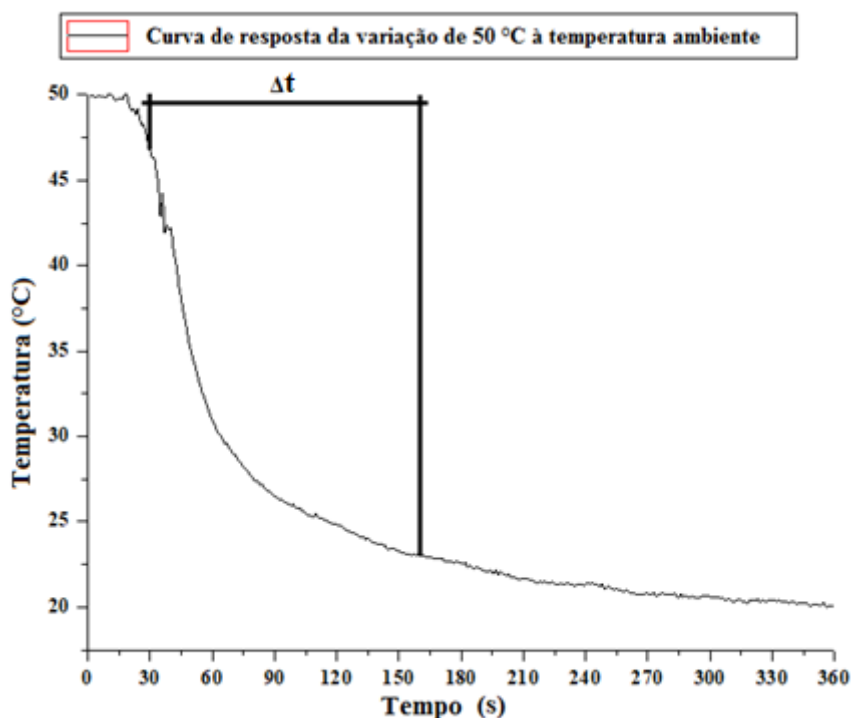
A sensibilidade térmica da FBG1 foi definida pelo ajuste linear como $16,27 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ e para a FBG2 foi obtida uma sensibilidade de $27,14 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. A maior sensibilidade térmica apresentada pela FBG2 se dá pela variação dimensional do encapsulamento frente às variações de temperatura. Por meio das retas de resposta da FBG1 e FBG2, é possível determinar a equação que rege a compensação de temperatura. A Equação 10, foi desenvolvida e define qual o comprimento de onda da FBG2 sem carga (λ_{FBG2}) em função da temperatura do encapsulamento mensurada pela FBG1 (λ_{FBG1}), dada como:

$$\lambda_{FBG2} = \lambda_{FBG2}^{5^\circ\text{C}} + \left(\left(\frac{\lambda_{FBG1} - \lambda_{FBG1}^{5^\circ\text{C}}}{\alpha_{FBG1}} \right) \cdot \alpha_{FBG2} \right) \quad (10)$$

onde $\lambda_{FBG1}^{5^\circ\text{C}}$ é o comprimento de onda da FBG1 e $\lambda_{FBG2}^{5^\circ\text{C}}$ é o comprimento de onda da FBG2, ambas a 5°C , α_{FBG1} e α_{FBG2} é sensibilidade térmica da FBG1 e FBG2 respectivamente.

Como mencionado anteriormente, a sensibilidade térmica da FBG1 é diferente da sensibilidade térmica da FBG2, desta maneira a Equação 10 é utilizada para definir o comprimento de onda ou mesmo sob a influência de qual temperatura a FBG2 está submetida. Nesta Equação é calculada a temperatura do sensor pelo comprimento de onda e sensibilidade térmica da FBG1 e aplicada esta temperatura sobre a sensibilidade térmica da FBG2, definindo qual é o comprimento de onda esperado para a FBG2 sem carregamento em qualquer temperatura da faixa de trabalho.

No segundo teste da caracterização do sensor em temperatura, onde foi monitorado o tempo de resposta à variação de temperatura do sensor, retirando da água a 50 °C e deixando esfriar naturalmente em temperatura ambiente (aproximadamente 20 °C), o sensor apresentou um tempo total para estabilização de aproximadamente 360 segundos. Considerando uma variação entre 10 e 90 % da amplitude total de temperatura, o tempo de resposta obtido foi de 130 segundos. O gráfico apresentado na Figura 24, apresenta a curva de resposta da variação de temperatura de 50 °C à temperatura ambiente, onde Δt representa o tempo de resposta em resfriamento natural para a faixa de temperatura indicada. Considerando a variação entre 10 e 90 % da amplitude total de temperatura e o tempo de resposta de 130 segundos, obtém-se uma variação máxima de aproximadamente 0,18 °C/s.



**Figura 24 – Curva de resposta para variação de temperatura do encapsulamento de 50 °C à temperatura ambiente.
Autoria Própria.**

4.2.2 Sensibilidade em deformação

Como os testes realizados para caracterização de deformação do encapsulamento foram realizados utilizando as massas padronizadas e monitorando a deformação, os resultados obtidos de sensibilidade do sensor foram divididos em variação do comprimento de onda em função do carregamento (Figura 25) e variação do comprimento de onda em função da deformação obtida sobre o sensor (Figura 26). Em ambos os casos, os gráficos gerados, apresentam: os valores de comprimento de onda obtido em cada patamar de carga; as retas de ajuste, obtidas por meio da utilização da ferramenta de ajuste linear do *software* Origin®; as barras de erro obtidas em cada passo de carregamento, onde são consideradas as incertezas em relação aos equipamentos de medição, incertezas referentes as massas padrão, além das incertezas obtidas na repetibilidade e na precisão intermediária.

O gráfico apresentado na Figura 25, demonstra a sensibilidade do sensor obtida em função do carregamento pelas massas padrão, onde foi definida como $7,91 \text{ pm/N}$, $\pm 0,02 \text{ N}$.

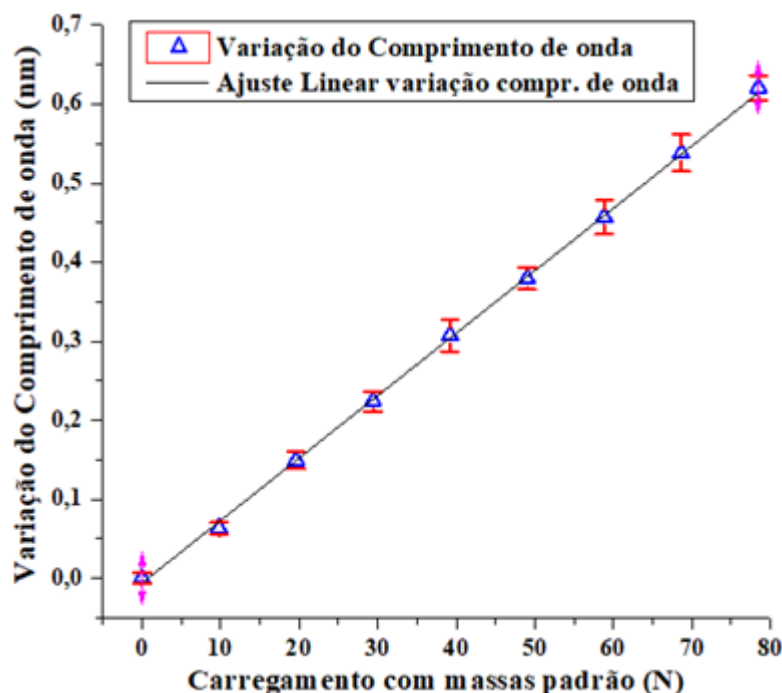


Figura 25 – Gráfico de resposta da variação do comprimento de onda da FGB2 sensora de deformação, em função do carregamento com massas padrão.

Adaptado de (BANDT NETO e OLIVEIRA, 2018b, no prelo).

O gráfico apresentado na Figura 26, demonstra a sensibilidade do sensor obtida em função da deformação sobre o encapsulamento, sendo de $1,71 \text{ pm}/\mu\epsilon, \pm 0,03 \mu\epsilon$.

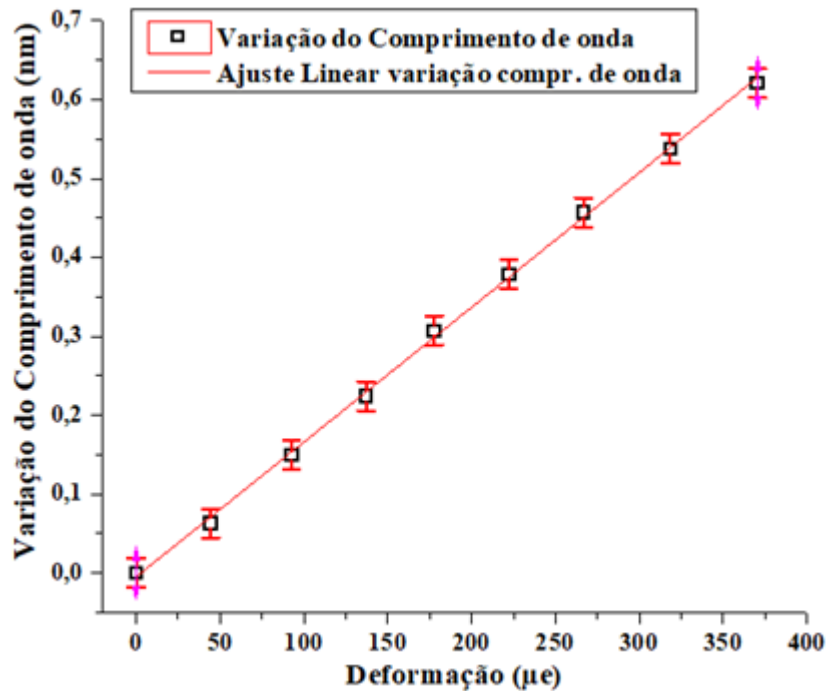
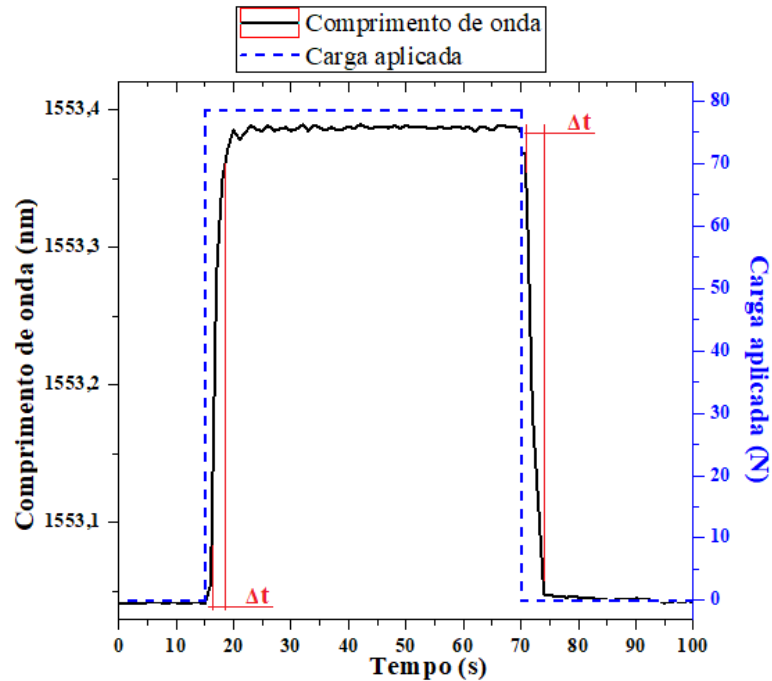


Figura 26 – Gráfico de resposta da variação do comprimento de onda da FGB2 sensora de deformação, em função da deformação sobre o encapsulamento. Adaptado de (BANDT NETO e OLIVEIRA, 2018b, no prelo).

Um segundo teste foi realizado a fim de definir a máxima frequência de funcionamento do sensor em plena carga. Pelos testes realizados de carregamento e descarregamento com a máxima carga do sensor, foi obtido um tempo de resposta de 2 s para o carregamento e 3 s para o descarregamento, considerando a variação de 10 a 90 % da amplitude total. Desta forma, considerando 5 s como o tempo de resposta para carregamento/descarregamento, foi definida a frequência máxima de resposta do sensor como $0,2 \text{ Hz}$ ($f = 1/T$). A Figura 27 apresenta o gráfico de resposta do sensor em carregamento/descarregamento em plena carga, onde os tempos de resposta do encapsulamento são representados por Δt .



**Figura 27 – Tempo de resposta do encapsulamento em carregamento e descarregamento (Δt) em máxima carga.
Autoria Própria.**

4.3 ESPECIFICAÇÕES DO SENSOR

O sensor de deformação produzido e encapsulado em alumínio, utilizando fibra ótica monomodo padrão de telecomunicações e compensação de temperatura por meio do monitoramento de temperatura do encapsulamento, foi submetido a diversos ciclos de carregamento e descarregamento por meio das massas padronizadas. Pela metodologia de testes aplicada, foi possível determinar as especificações do sensor para utilização como sensor de deformação ou como sensor de carga aplicada, sendo possível até mesmo monitorar a temperatura de trabalho da cápsula. Os resultados obtidos pelas caracterizações definiram as especificações de trabalho do sensor, tais definições estão declaradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações do sensor em deformação ou força aplicada.

	Deformação	Força aplicada
Sensibilidade	1,71 pm/ $\mu\epsilon$	7,91 pm/N
Exatidão	$\pm 0,03 \mu\epsilon$	$\pm 0,02 \text{ N}$
Resolução	2,94 $\mu\epsilon$	0,62 N
Frequência de trabalho	0,20 Hz	0,20 Hz
Linearidade	4,21 %	2,04 %
Faixa de medição	0 a 355,5 $\mu\epsilon$	0 a 78,3 N
Temperatura de trabalho	5 a 50 °C	5 a 50 °C
Máxima variação térmica	0,18 °C/s	0,18 °C/s

As sensibilidades e exatidões definidas para a medição de deformação e carga aplicada, foram obtidas por meio das curvas de calibrações do sensor, sendo 1,71 pm/ $\mu\epsilon$ $\pm 0,03 \mu\epsilon$ quando o sensor aplicado à medição de deformação e 7,96 pm/N $\pm 0,02 \text{ N}$ para medições de cargas.

A resolução de um equipamento define qual é a menor medida possível mensurar, no caso do sensor a resolução é dada em função da resolução do interrogador dividida pela sensibilidade do sensor. Neste caso é considerado a incerteza da posição espectral do interrogador como sendo 5 pm, logo a resolução do encapsulamento em função da deformação é de 2,94 $\mu\epsilon$ e para o carregamento com carga aplicada é de 0,62 N.

A máxima frequência de trabalho foi definida pelo tempo de resposta no carregamento e descarregamento em plena carga. Considerando o tempo de resposta de 2 s no carregamento e 3 s no descarregamento, a máxima frequência de trabalho foi definida como 0,2 Hz.

Já a linearidade ou a não linearidade foi definida considerando o maior desvio experimental em relação as retas de calibração, tais valores são expressos em percentual do fundo de escala. A linearidade para a deformação do encapsulamento foi obtida como 4,21 % e para a carga aplicada o valor de linearidade obtido é de 2,04 %.

Os valores de faixa de medição e temperatura de trabalho foram definidos baseados nos valores arbitrados durante as caracterizações do sensor. Para a faixa de medição de deformação os valores são referentes a mínima e a máxima carga aplicada ao sensor, sendo de 0 a 355,5 $\mu\epsilon$ ou 0 a 78,3 N. A faixa de temperatura de trabalho do sensor foi definida como a temperatura de caracterização, ou seja, de 5 a 50 °C.

5 CONCLUSÕES

Sensores óticos, em especial os sensores baseados em FBG, estão sendo cada vez mais utilizados nas mais diversas aplicações. Sensores de deformação ou *strain* em FBG estão presentes em diversas aplicações de monitoramento de estruturas inteligentes, aplicações industriais, entre outras. Desde o seu surgimento algumas técnicas de compensação de temperatura e encapsulamento foram desenvolvidas, fato este que propiciou o grande crescimento e a aplicações nas mais diversas áreas. Devido a abordagem utilizada neste trabalho, diversas vantagens podem ser destacadas frente a outros sensores de deformação, como por exemplo: versatilidade, em que se pode medir uma força aplicada diretamente ao sensor como uma célula de carga ou a deformação exercida sobre o encapsulamento; monitoramento simultâneo dos parâmetros de interesse e temperatura do sensor; o encapsulamento em alumínio torna o sensor leve, versátil e de fácil fixação; a técnica de compensação de temperatura proporciona que o sensor seja implementado em aplicações com variações de temperatura, o que é extremamente importante em aplicações reais; devido o projeto ser desenvolvido por meio de um *software* de modelagem tridimensional, pode ser facilmente adequado e confeccionado para aplicações reais, além de possibilitar a criação de versões do encapsulamento em polímeros por meio de impressão 3D.

O sensor quando aplicado em medições diretas de cargas, apresenta uma sensibilidade de $7,91 \text{ pm/N} \pm 0,02 \text{ N}$, com uma linearidade de 2,04 % em relação ao fundo de escala. Já nas medições em deformação, a sensibilidade obtida foi de $1,71 \text{ pm}/\mu\epsilon \pm 0,03 \mu\epsilon$, com uma linearidade de 4,21 %. Em ambos os casos se observa uma boa sensibilidade e uma baixa incerteza, já a linearidade em torno de 4 % na deformação se dá pela resolução do relógio apalpador utilizado na caracterização ser de $2 \mu\text{m}$, o que poderia ser melhorado na utilização de equipamento com maior precisão. A frequência de trabalho obtida como 0,2 Hz, permite a utilização do sensor em aplicações dinâmicas e a caracterização em temperatura demonstrou ser possível a utilização do sensor em variações de até $0,18 \text{ }^\circ\text{C/s}$. O parâmetro de maior interesse, que é a sensibilidade em deformação, apresentou um valor de $1,71 \text{ pm}/\mu\epsilon$, uma excelente sensibilidade visto que existem sensores comerciais similares com sensibilidade de $1,4 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

Um ponto não trivial na confecção mecânica do sensor foi a montagem/colagem das FBGs na cápsula juntamente com o tubo capilar de proteção, fato este que necessitou diversas tentativas de montagem do sensor.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram uma boa sensibilidade e linearidade do sensor, a compensação de temperatura permite a aplicação do sensor em uma vasta gama de aplicações dentro da faixa de temperatura de trabalho (5 a 50 °C).

REFERÊNCIAS

- AL-FAKIH, E.; OSMAN, N. A. A.; ADIKAN, F. R. M. The Use of Fiber Bragg Grating Sensors in Biomechanics and Rehabilitation Applications: The State-of-the-Art and Ongoing Research Topics. **Sensors**, v. 12, p. 12890-12926, 2012.
- ASM INTERNATIONAL. **Aluminum Properties and Physical Metallurgy**. USA: Hatch, J. E., 1984.
- BEER, F. P.; JONHSTON JR, E. R. **Resistência dos Materiais**. Terceira. ed. São Paulo: Makron Books, 1996.
- BETZ, D. C. et al. Advanced Layout of a Fiber Bragg Grating Strain Gauge Rosette. **Journal of Lightwave Technology**, v. 24, n. 2, p. 1019-1026, February 2006.
- BISWAS, P. et al. Investigation on Packages of Fiber Bragg Grating for use as Embeddable Strain Sensor in Concrete Structure. **Elsevier - Sensors and Actuators A: Physical**, v. 157, p. 77-83, 2010.
- CHAVEZ-PIRSON, A. The Basics of Fiber Bragg Gratings. **Sensor Technology and Design**, Tucson, August 2004. Disponível em: <archive.sensorsmag.com/articles/0804/17/main.shtml>. Acesso em: 01 Novembro 2018.
- CORADIN, F. K. **Redes de Bragg para Aplicações em Sensoriamento e Telecomunicações**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.
- GHOLAMZADEH, B.; NABOVATI, H. Fiber Optic Sensors. **International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering**, v. 2, n. 6, p. 1107-1117, 2008.
- GILCHRIST, A. **Industry 4.0: The Industrial Internet of Things**. Bangken, Nonthaburi: Apress, 2016.
- HERTZBERG, R. W. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. 4th. ed. USA/Canada: Jhon Wiley & Sons Inc., 1996.
- HILL, K. O.; MELTZ, G. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. **Journal of Lightwave Technology**, 15, August 1997. 1263-1276.
- JULICH, F. et al. Gauge Factors of Fibre Bragg Grating Strain Sensors in Different Types of Optical Fibres. **Measurement Science and Technology**, v. 24, p. 1-7, 2013.
- KASHYAP, R. **Fiber Bragg Gratings**. London: Academic Press, 1999.
- KERSEY, A. D. et al. Fiber Grating Sensors. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1442-1463, August 1997.

- KIOWA. Strain Gages. **Kiowa**, 2018. Disponível em: <http://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gages/kfv/index.html>. Acesso em: 02 November 2018.
- LOPEZ, W. Variação da Aceleração da Gravidade com a Latitude e Altitude. **Cad. Bras. Ens. Fís. - UFSC**, v. 25, n. 3, Dezembro 2008. 561-568.
- MAJUMDER, M. et al. Fibre Bragg Gratings in Structural Health Monitoring—Present Status and Applications. **Elsevier - Sensors and Actuators A: Physical**, 147, 22 April 2008. 150-164.
- MELTZ, G.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. **Optics Letters**, 14, August 1989. 823-825.
- MENADIER, C.; KISSINGER, C.; ADKINS, H. The fotonic sensor. **Instruments and Control Systems**, v. 40, p. 114-120, 1967.
- MICRON OPTICS. Sensing Solutions. **Micron Optics**, 2018. Disponível em: <<http://www.micronoptics.com/products/sensing-solutions/sensors/>>. Acesso em: 02 November 2018.
- MOREY, W. W.; MELTZ, G.; WEISS, J. M. Recent Advances in Fiber Grating Sensors for Utility Industrial Application. **Calibrated Intelligent Optical Sensors and Systems**, 2594, 1995. 90-98.
- MOYO, P. et al. Development of Fiber Bragg Grating Sensors for Monitoring Civil Infrastructure. **Elsevier - Engineering Structures**, 11 July 2005. 1828-1834.
- OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. Boston/London: Artech House, 1999.
- OTHONOS, A.; LEE, X. Novel and Improved Methods of Writing Bragg Gratings with Phase Masks. **Photonics Technology Letters**, v. 7, n. 10, p. 1183-1185, 10 October 1995.
- SANTOS, J. L.; FARAH, F. **Handbook of Optical Sensors**. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- SILVA-MUÑOZ, R. A.; LOPEZ-ANIDO, R. A. Structural Health Monitoring of Marine Composite Structural Joints Using Embedded Fiber Bragg Grating Strain Sensors. **Elsevier - Composite Structures**, v. 89, p. 224-234, 2009.
- SOHLSTROM, H. **Fibre Optic Magnetic Field Sensors Utilizing Iron Garnet Materials**. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 1993.
- TU, Y.; TU, S. T. Fabrication and characterization of a metal-packaged regenerated fiber Bragg grating strain sensor for structural integrity monitoring of high-temperature components. **Smart Materials and Structures**, n. 23, p. 1-11, January 2014.
- UDD, E. An overview of fiber-optic sensors. **Review of Scientific instruments**, v. 66, n. 8, p. 4015-4030, Agosto 1995.

ZHOU, Z. et al. Techniques of Advanced FBG Sensors: Fabrication, Demodulation, Encapsulation and their Application in the Structural health Monitoring of Bridges. **Pacific Science Review**, v. 5, p. 116-121, 2003.

ANEXO – PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTE TRABALHO

BANDT NETO, M.; OLIVEIRA, V. Sensor de Deformação Baseado em FBG com Compensação de Temperatura. **Momag**, Santa Rita do Sapucaí, 2018a, no prelo.

BANDT NETO, M.; OLIVEIRA, V. Sensor de Deformação Baseado em FBG com Compensação de Temperatura. **CBECIMat**, Foz do Iguaçu, 2018b, no prelo.