

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA**  
**ENGENHARIA ELETRÔNICA**

**TALITA PAES DE BASTOS**

**REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA: ANÁLISE DE  
ENCAPSULAMENTOS EM RESPOSTA À VIBRAÇÃO E  
TEMPERATURA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2016**

**TALITA PAES DE BASTOS**

**REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA: ANÁLISE DE  
ENCAPSULAMENTOS EM RESPOSTA À VIBRAÇÃO E  
TEMPERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica, do Departamento de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - câmpus Ponta Grossa.

Orientador: Prof. MSc. Felipe Mezzadri  
Co-Orientador: Prof. MSc. Guilherme Dutra

**PONTA GROSSA**

**2016**



---

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA: ANÁLISE DE ENCAPSULAMENTOS EM RESPOSTA À VIBRAÇÃO E TEMPERATURA

Desenvolvido por:

TALITA PAES DE BASTOS

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado em 11 de novembro de 2016, como requisito parcial para obtenção do título de Engenharia Eletrônica. Os candidatos foram arguidos pela banca examinadora composta pelos professores abaixo assinado. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Felipe Mezzadri, Msc.  
Professor Orientador

---

Prof. Frederic Conrad Janzen, Dr.  
Membro titular

---

Prof. Max Mauro Dias Santos, Dr.  
Membro titular

Aos meus pais (In memoriam), por terem me  
dado o dom da vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Neste espaço gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço imensamente ao meu orientador professor MSc. Felipe Mezzadri pela confiança e orientação neste trabalho, exigência, apoio e presteza em todas as minhas dúvidas.

Ao meu co-orientador, e amigo, professor MSc. Guilherme Dutra por sua amizade de quase 10 anos, inspiração, motivação, auxílio e ideias que muito colaboraram para conclusão deste trabalho. Muito Obrigada!

Ao professor Dr. Cícero Martelli, por sua cobrança e inspiração, e inteligência motivadora. Muitíssimo obrigada, professor!

Ao colega Uilian Dreyer pela oportunidade de pesquisa dentro do seu projeto e por seu companheirismo.

Aos colegas André e Daciuk pelo auxílio no laboratório e pelos momentos de companheirismo: Meu muitíssimo obrigada!

Aos colegas Bazzo e Kleiton, pela ajuda na elucidação desse trabalho. Muito Obrigada!

Finalmente agradeço aos Laboratórios de Tecnologia de Sistemas Sensores (LTSS) e de Engenharia de Sistemas Optoeletrônicos (LabESO) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus de Curitiba pela oportunidade e estrutura física para o desenvolvimento deste trabalho.

“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva por toda a humanidade.”

“Eu nunca vejo o que já foi feito. Eu somente vejo o que ainda falta para ser feito.”

— Marie Curie

## RESUMO

BASTOS, Talita Paes de. **Redes de bragg em fibra óptica: Análise de encapsulamentos em resposta à vibração e temperatura.** 2016.46 f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Eletrônica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

Os sensores baseados em redes de Bragg em fibras ópticas apresentam características relevantes tais como sua pequena dimensão e a possibilidade de medição com precisão em um grande número de parâmetros em diversas condições. Este trabalho tem por objetivo analisar as perspectivas do estudo para diferentes encapsulamentos para as redes de Bragg nas medições de vibrações e de temperatura, vistas separadamente. São apresentadas comparações entre Gel de petróleo, água, óleo mineral e ar. Os resultados demonstram a capacidade dos sensores em monitorar os efeitos vibracionais entre 100 Hz e 450Hz e de temperatura entre 20°C e 70°C, apontando para o encapsulamento a gel como sensor mais estável e com maior clareza de sinal. Gerando oportunidade de estudo mais aprofundado para os tipos de encapsulamentos e suas aplicações nos diversos ambientes de medição.

**Palavras-chave:** Sensores Ópticos. Redes de Bragg em Fibra Óptica. Instrumentação.

## **ABSTRACT**

BASTOS, Talita Paes de. Fiber Bragg Gratings: Encapsulations analysis in response to vibration and temperature. 2016. 46 p. Work of Conclusion Course Graduation in Electronic Engineering - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2016.

The sensors based on Bragg gratings in optical fibers have relevant characteristics such as their small size and the possibility of measuring accurately in a large number of parameters under various conditions. This work aims to analyze the study perspectives for different tunnels for the Bragg networks in the vibration and temperature measurements, seen separately. Comparisons are presented between Gel of oil, water, mineral oil and air. The results demonstrate the ability of the sensors to monitor the vibrational effects between 100 Hz and 450 Hz and temperature between 20 °C and 70 °C, pointing to gel encapsulation as a more stable sensor with greater signal clarity. Generating more in-depth study opportunity for the types of encapsulations and their applications in the various measurement environments.

Keywords: Optical Sensors. Fiber Bragg Gratings. Instrumentation.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Rede de Bragg e seus espectros associados .....	17
Figura 2 - Representação do índice de modulação de uma FBG uniforme.....	20
Figura 3 - Espectros de reflexão FBG: uniforme e apodizada.....	20
Figura 4 - Gravação de FBG em fibra óptica por método de Máscara de fase. ....	24
Figura 5 - Desenho esquemático de interferômetro com Máscara de fase, na UTFPR. .....	25
Figura 6 - Fotografia de interferômetro com máscara de fase.....	26
Figura 7 - Relação da temperatura e deformação com o deslocamento do comprimento de onda de Bragg .....	29
Figura 8 - Desenho do esquemático de montagem do sistema de medição de temperatura nos sensores FBGs.....	33
Figura 9 - Tela do software de calibração e aquisição de temperatura de sensores ópticos .....	34
Figura 10 - Desenho do esquemático de montagem do sistema de medição vibracional dos sensores FBGs.....	34
Figura 11- Fotografias com vistas da montagem experimtnal dos encapsulamen- tos no autofalante, usado como gerador de ondas mecânicas .....	35
Figura 12 - Curva de caracterização térmica de subida (20°C- 70°C) das FBGs.....	36
Figura 13 - Curva de caracterização térmica de descida (70°C- 20°C) das FBGs...	37
Figura 14 - Resposta para encapsulamento AR à 100 Hz. (a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3 .....	38
Figura 15 - Resposta para encapsulamento AR à 450 Hz. (a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3 .....	38
Figura 16 - Resposta para encapsulamento GEL à 100 Hz. (a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3. ....	38
Figura 17 - Resposta para encapsulamento GEL à 450 Hz. (a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3. ....	39
Figura 18 - Resposta das FBGs para variações de frequência de 100- 450Hz .....	40
Figura 19 - Resposta para encapsulamento a GEL à 150 Hz- 0,5V.(a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3. ....	40

Figura 20 - Resposta para encapsulamento a GEL à 150Hz- 5V. (a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3 .....	41
Figura 21 - Relação Tensão de Entrada x Amplitude da FFT para vibração em 150Hz .....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comprimentos de onda de Bragg dos encapsulamentos.....	30
Tabela 2 - Tabela de densidades dos materiais encapsulados.....	32
Tabela 3 - Frequência X Amplitude FFT .....	39
Tabela 4 - Tensão de Entrada X Amplitude FFT em 150 Hz.....	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPGEI	Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
dB	Decibel
FBG	do inglês <i>fiber Bragg grating</i> , ou rede de Bragg em fibra óptica
FWHM	do inglês <i>Full Width at Half Maximum</i> , ou largura de banda à meia altura
UTFPR-CT	Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba
LabESO	Laboratório de Engenharia de Sistemas Optoeletrônicos
LTSS	Laboratório de Tecnologia de Sistemas Sensores
$m$	ordem de difração
OSA	do inglês <i>Optical Spectrum Analyzer</i> , ou Analisador de espectro óptico
PM	do inglês <i>Phase Mask</i> , ou Máscara de Fase
PBT	Polibutileno Tereftalato
UV	Ultra-Violeta
$\beta_d$	constante de propagação modal contrapropagante
$\beta_i$	constante de propagação modal incidente
$\bar{K}$	vetor de onda da rede
$\bar{K}_d$	vetor de onda da radiação espalhada (difratada)
$\bar{K}_i$	vetor de onda incidente
$\lambda$	comprimento de onda
$\lambda_B$	comprimento de onda de Bragg
$\lambda_e$	comprimento de onda do laser de gravação
$A$	Periodicidade
$A_{pm}$	Periodicidade da rede de difração da máscara de fase
$\mu$	Microstrain, unidade de deformação relativa, um microstrain é a deformação de um micrometro em um metro
$n$	índice de refração
$n_{co}$	índice de refração do núcleo da fibra óptica
$n_{cl}$	índice de refração da casca da fibra óptica
$n_{eff}$	índice de refração efetivo da fibra
$n_{eff,d}$	índice de refração efetivo difratado

$n_{eff,i}$	índice de refração efetivo incidente
$\theta_d$	ângulo do feixe UV difratado
$\theta_i$	ângulo do feixe UV incidente
$\theta_m$	ângulo de cruzamento entre os feixes difratados
$\Omega$	coeficiente de acoplamento

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1 MOTIVAÇÃO .....	13
1.2 OBJETIVOS .....	14
1.2.1 Objetivo Geral .....	14
1.2.2 Objetivos Específicos .....	14
1.3 JUSTIFICATIVA .....	14
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	16
2.1 SENSORES A FIBRA ÓPTICA BASEADOS EM REDES DE BRAGG .....	16
2.2 CONDIÇÃO DE BRAGG .....	17
2.3 TIPOS DE FBGs .....	18
2.4 REFLETIVIDADE EM REDE DE BRAGG UNIFORME .....	19
2.4.1 Largura De Banda À Meia Altura (FWHM) .....	22
2.5.1 Máscara De Fase .....	24
2.5.2 Interferômetro Com Máscara De Fase .....	25
2.6 PROPRIEDADES DAS REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA .....	27
2.6.1 Efeitos Termo-Óptico E Foto-Elástico .....	27
2.6.2 Sensores Ópticos No Monitoramento De Vibração .....	28
2.6.3 Sensores Óticos No Monitoramento De Temperatura .....	28
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	30
3.1 GRAVAÇÃO DAS REDES .....	30
3.2 ACOPLAMENTO DO FBG AO SISTEMA DE MEDIÇÃO .....	30
3.3 ENCAPSULAMENTO .....	31
3.4 SISTEMA TERMO-ÓPTICO .....	32
3.4.1 Interrogador e Método de Interrogação .....	33
3.5 SISTEMA FOTO-ELÁSTICO .....	34
<b>4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO E RESULTADOS</b> .....	36
4.1 RESPOSTAS À TEMPERATURA .....	36
4.2 RESPOSTAS À VIBRAÇÃO .....	37
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	43
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	43
5.2 TRABALHOS FUTUROS .....	43
<b>REFERENCIAS</b> .....	45

## 1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo é apresentada uma visão geral das aplicações de sensores ópticos abordando os desafios e motivações para esta pesquisa, bem como os objetivos deste trabalho e sua estrutura.

A fibra óptica é um fino capilar formado por materiais dielétricos cristalinos e homogêneos (sílica). E a estrutura mais simplificada de uma fibra óptica consiste de um núcleo envolto por uma casca com índice de refração menor. Esse meio condutor do feixe luminoso sofre alteração de suas propriedades de transmissão e reflexão conforme variações no meio no qual está inserido, sendo assim possível atuar como sensor.

Como temática principal abordada ao longo deste trabalho tem-se a análise da influência quanto ao tipo de encapsulamento, contendo redes de Bragg em fibra óptica, para sensoriamento de temperatura e vibração. Sendo para tanto realizadas comparações entre 4 tipos de encapsulamentos: gel de petróleo, ar, água e óleo mineral. Todos inseridos em tubos poliméricos de Polibutileno Tereftalato (PBT), próprios para proteção da fibra óptica, sendo estes já costumeiramente utilizados no mercado.

### 1.1 MOTIVAÇÃO

A fibra óptica encontra-se inserida num invólucro plástico composto por resina de Polibutileno Tereftalato (PBT) no qual em seu núcleo é disposto um gel de petróleo, que tem funções de acomodação para ela e também de impermeabilização. Contudo para a gravação das redes de Bragg é necessário retirar todo o material envolvente, procedimento que será abordado *a posteriori* no decorrer deste trabalho.

A maioria dos cabos de fibra óptica existentes no mercado é do tipo: núcleo geleado, ou seja, com gel, havendo também outro tipo chamado de núcleo seco.

Após o processo de gravação, e proteção desta, durante o trabalho de doutorado do aluno Uillian José Dreyer, do CPGEI-UTFPR, ainda em percurso, observaram-se diferenças nas leituras dos sensores FBG (*Fiber Bragg Grating*). Tais leituras eram diferentes conforme o meio no qual se encontravam inseridos. Diante dessa notória

constatação vem a motivação para o presente trabalho: Existe melhor meio de preenchimento de encapsulamento para fibra óptica, com finalidade de detecção/precisão para observar vibração mecânica e temperatura?

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Comparar as respostas em vibração, submetendo o sensor à perturbação acústica e também comparar as respostas em temperatura dos sensores FBG em fibra óptica para diferentes encapsulamentos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Encapsular as FBG's (*Fiber Bragg Grating*) em: gel de petróleo, água, óleo e ar;
- b) Comparar as respostas para os testes em vibração para os diferentes encapsulamentos;
- c) Comparar as curvas de caracterização de temperatura para os diferentes encapsulamentos.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Entre a multiplicidade de tipos de sensores, os sensores baseados em FBG, mais do que qualquer outro tipo de sensor em particular, estão tornando-se cada vez mais conhecidos e populares. Dada a sua intrínseca capacidade para medir um grande número de parâmetros, tais como tensão mecânica, temperatura, pressão, agentes químicos e biológicos, dentre outros, juntamente com sua flexibilidade, dada pelo seu design, e seu custo relativamente reduzido, fazem dos FBGs dispositivos ideais a serem adotados para uma variedade de detecções em diferentes aplicações



que podem ser implementadas em grande variedade de campos e indústrias (MÉNDEZ, 2007).

Ainda, segundo Méndez, no entanto, alguns obstáculos técnicos e entraves ao mercado precisam ser superados para que essa tecnologia venha a ganhar impulso comercial e alcançar um crescimento ainda maior. Necessidades tais como: normas sobre FBGs e sensores baseados em FBGs, designs de encapsulamentos adequadas, bem como a treinamento dos clientes e usuários finais, se destacam.

Sabe-se que as variações das grandezas físicas: temperatura (troca de calor), e vibração são interações que pressupõem presença de partículas para que tal efeito se propague e dessa forma, medido. Isto posto, é bastante pertinente observar que a mudança na densidade entre os materiais (gel, água, óleo e ar) faz com que o sinal se propague de forma diferente, bem como a viscosidade.

O foco deste trabalho será avaliar a influencia dos tipos de preenchimento dos encapsulamentos na captação do sinal óptico medido via interrogador, utilizando os sensores FBG, por ocorrência do deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da variação de temperatura e/ou compressão/tração da fibra óptica.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste Capítulo são apresentados os fundamentos teóricos que sustentam este trabalho. São tratados aqui princípios físicos envolvendo as redes de Bragg, refletividade em redes de Bragg e os efeitos termo-óptico e foto-elástico presentes em tais estruturas.

### 2.1 SENSORES A FIBRA ÓPTICA BASEADOS EM REDES DE BRAGG

A propriedade de fotossensibilidade das fibras ópticas permite a fabricação de estruturas de fase, ou redes de difração, que são obtidas pela alteração periódica e permanente do índice de refração ao longo do eixo núcleo.

As Redes de Bragg em fibras ópticas (FBGs, do inglês *Fiber Bragg Gratings*) foram descobertas em 1978, por Ken Hill e colaboradores. Desde então, nas últimas décadas, com o avanço da tecnologia de sistemas ópticos, tornou-se possível a utilização das fibras ópticas como dispositivos sensores. Dentre as técnicas mais utilizadas no desenvolvimento de tais sensores, destaca-se a baseada nas propriedades das redes de Bragg (HILL et. al., 1978).

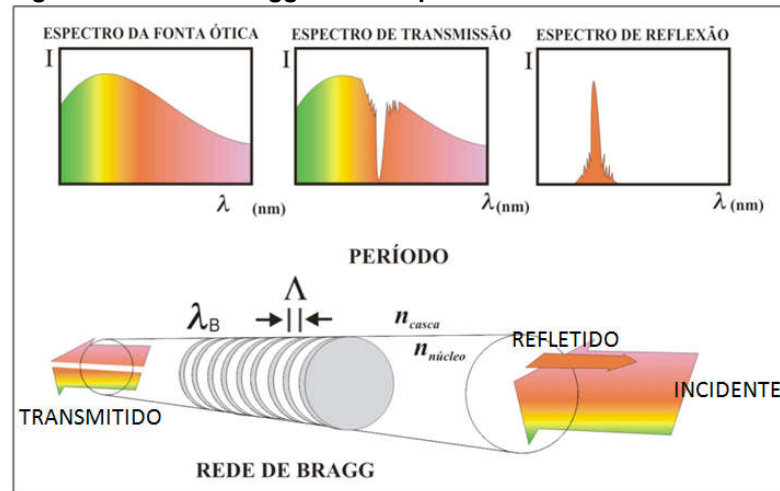
Essas redes são formadas por uma modulação periódica no índice de refração do núcleo da fibra óptica,  $n_{co}$ , ao longo da direção longitudinal. A existência dessa modulação provoca uma reflexão seletiva de parte de um espectro de um sinal com grande largura espectral transmitido através dessa fibra. A luz é guiada ao longo do núcleo da fibra óptica sendo refletida por cada plano da rede, e centrada em um comprimento de onda específico (HILL, 1978; OTHONOS e KALLI, 1999).

Em termos de funcionamento, as redes de Bragg têm comportamento semelhante a um filtro eletrônico rejeita faixa. Tendo aplicação em, por exemplo, sensores, filtros espectrais, espelhos de realimentação em lasers de largura de linha estreita, dispositivos multiplexadores em comprimento de onda (WDM) e geração de pulsos curtos (KASHYAP, 1999; OTHONOS e KALLI, 1999; KERSEY *et al.*, 1997).

Na figura 1 encontra-se o detalhamento estrutural básico e os espectros transmitidos e refletidos. Conforme o período de modulação da rede de Bragg,  $\Lambda$ , no

núcleo da fibra monomodo,  $n_{co}$ , existe um comprimento de onda de Bragg,  $\lambda_B$ , regido pela condição de Bragg associado a esta estrutura.

**Figura 1- Rede de Bragg e seus espectros associados**



Fonte: Bazzo, 2010.

## 2.2 CONDIÇÃO DE BRAGG

Quando a condição de Bragg é satisfeita a luz refletida por cada plano contribui construtivamente na direção contra propagante, formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede, conhecido como comprimento de onda de Bragg. Do contrário, se a condição não for satisfeita, a luz refletida em cada plano subsequente torna-se progressivamente fora de fase e eventualmente a intensidade da luz refletida pode ser cancelada (HILL, 1978; OTHONOS e KALLI, 1999).

A condição de Bragg requer que sejam satisfeitas as conservações: de energia e de momento. Sendo assim a frequência da radiação incidente e da radiação refletida devem ser as mesmas. E a conservação do momento requer que o vetor de onda incidente,  $\vec{k}_i$ , somado ao vetor de onda da rede,  $\vec{K}$ , seja igual ao vetor da radiação difratada ou espalhada,  $\vec{k}_d$  (OTHONOS e KALLI, 1999):

$$\vec{k}_i + \vec{K} = \vec{k}_d \quad (1)$$

Onde o vetor de onda da rede,  $\bar{K}$ , tem direção normal aos planos da rede e magnitude  $2\pi/\Lambda$ , onde  $\Lambda$  é o período da rede esquematizado na figura 1. O vetor de onda difratado  $\bar{k}_d$  é igual em magnitude, mas oposto em sentido, ao vetor de onda incidente  $\bar{k}_i$ . Logo, a condição de conservação de momento leva a (SILVA, 2005):

$$\frac{2\pi n}{\lambda} \text{sen}\theta_d = \frac{2\pi n}{\lambda} \text{sen}\theta_i + m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2)$$

onde  $m$  é a ordem da difração, sendo  $m = \pm 1$  para redes em fibra óptica. Como a constante de propagação modal,  $\beta$  é simplesmente  $\beta = (2\pi/\lambda)n_{eff}$  onde  $n_{eff}$  é o índice de refração para cada modo de propagação ( $n_{eff} = n_{co} \text{Sen}\theta$ ) a equação 2 pode ser reescrita da seguinte forma (SILVA, 2005):

$$\beta_d = \beta_i \pm \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (3)$$

Para a situação esquematizada na figura 1, o modo final se propaga na direção oposta ao modo incidente,  $\beta_d < 0$ , o comprimento de onda para a reflexão de um modo de índice de refração efetivo  $n_{eff,i}$  em um modo de índice de refração  $n_{eff,d}$  é  $\lambda = (n_{eff,i} + n_{eff,d})\Lambda$ . Se os dois modos são, a menos do sentido de propagação, idênticos, como no caso de fibras monomodo, chega-se à condição de Bragg (SILVA, 2005):

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (4)$$

### 2.3 TIPOS DE FBGs

Os tipos de FBGs diferem-se na sua estrutura, ou seja na forma como se dá a periodicidade da rede. São eles: FBG (*Commom Bragg reflector*), FBG inclinada (*blazed Bragg grating*), e FBG com gorjeio (*Chirped Bragg grating*).

De forma resumida a FBG inclinada - *blazed Bragg grating*- difere-se da *Common*, ou simplesmente FBG, por uma inclinação das redes de Braggs, deixando assim de serem perpendiculares ao eixo longitudinal. E a FBG com gorjeio trata-se de uma estrutura onde há variação tanto da largura da periodicidade,  $\Lambda$ , assim como mudança do índice de refração no sentido do crescimento da rede, aplicadas principalmente na área de telecomunicações. (OTHONOS e KALLI, 1999).

No presente trabalho o tipo estudado é o *Common Bragg Reflector*, ou simplesmente FBG. Estas redes são chamadas de uniformes por possuírem período de modulação constante. Mesmo sendo este o mais simples e o tipo mais amplamente utilizado das FBGs, são considerados excelentes para aplicações de sensoriamento de deformação e temperatura, devido suas medições serem codificadas em torno de comprimentos de ondas. Esse tipo permite que se trabalhe como transmissor de banda estreita (*narrowband transmission*) ou filtro reflexivo (reflection filter) ou espelho de banda larga (broadband mirror). E ainda em composição com outras FBGs, funciona como um filtro passa-faixa (OTHONOS e KALLI, 1999).

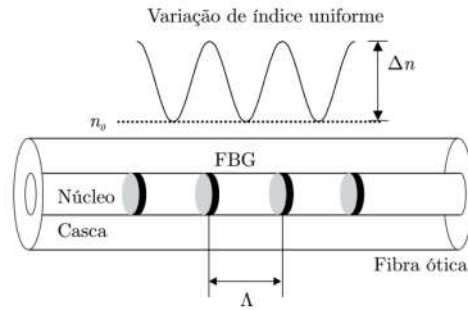
Há, ainda, os tipos de categorização quanto à sua fotossensibilidade, que dependem das condições de gravação (energia do laser e comprimento de onda, luz pulsada) os quais não serão abordados e nem são o objeto de estudo nesse trabalho.

## 2.4 REFLETIVIDADE EM REDE DE BRAGG UNIFORME

Uma FBG é dita uniforme quando a variação em seu índice de refração com amplitude e periodicidade  $\Lambda$ , são constantes durante toda a extensão longitudinal da gravação na fibra óptica. Redes com esse tipo de variação apresentam uma resposta no espectro refletido acompanhada de lóbulos laterais, devido ao fim abrupto na modulação de índice nos extremos da rede (SOUZA, 2011).

A figura 2, a seguir, apresenta essa característica de uniformidade:

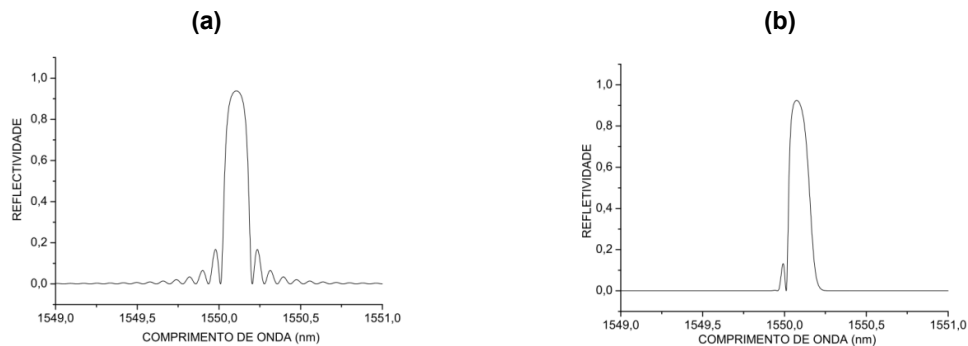
**Figura 2- Representação do índice de modulação de uma FBG uniforme.**



**Fonte: Souza, 2011.**

A figura 3(a) ilustra um espectro de reflexão com lóbulos laterais, típico de uma FBG uniforme. O espectro de uma FBG apodizada pode ser observado na figura 3(b).

**Figura 3- Espectros de reflexão FBG: uniforme e apodizada.**



**Fonte: Paterno, 2006.**

A característica senoidal, observada na figura 2, da variação do índice de refração se dá por conta da forma da gravação da rede que imprime essa forma gradual. Observa-se que se houvessem somente dois índices de refração presentes a forma de onda seria do tipo quadrada.

O núcleo da fibra óptica mostrado na figura 2 possui um índice de refração  $n_0$ . Podemos escrever o perfil do índice de refração da FBG uniforme induzido no núcleo, com direção de propagação em  $z$ , e  $\Delta n$  sendo a amplitude do índice de refração induzido ou, ainda variação do índice de refração da FBG na forma (OTHONOS e KALLI, 1999):

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (5)$$

Segundo Lam e Garside (1981), a partir da teoria de modos acoplados obtém-se uma expressão analítica para uma FBG uniforme, dada pela equação :

$$R(l, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sin^2(sl)}{\Delta k^2 \sin^2(sl) + s^2 \cos^2(sl)} \quad (6)$$

onde  $R(l, \lambda)$  é a refletividade em função do comprimento  $l$  da FBG e do comprimento de onda  $\lambda$  incidente.

Na equação 6, o termo  $\Delta k$  representa o vetor de descasamento de fase para um dado comprimento de onda denotado por:

$$\Delta k = k - \frac{\pi}{\lambda} \quad (7)$$

E a constante de propagação é dada por  $k = 2\pi n_0 / \lambda$ . Por fim, o valor de  $s$  é definido por:

$$s = \sqrt{\Omega^2 - \Delta k^2} \quad (8)$$

O coeficiente de acoplamento,  $\Omega$ , entre as ondas copropagantes e contrapropagantes e para uma variação senoidal da perturbação do índice de refração pode ser expresso por:

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} M_p \quad (9)$$

Sendo  $M_p$  a fração da potência do modo contido no núcleo da fibra. Como a rede de Bragg é gravada uniformemente no núcleo da fibra,  $M_p$  pode ser aproximado

por  $1 - V^{-2}$  (OTHONOS e KALLI, 1999). Onde  $V$  é a frequência normalizada da fibra,  $V = (2\pi/\lambda)a(n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}$ ,  $a$  é o raio do núcleo e  $n_{co}$  e  $n_{cl}$  os índices de núcleo e casca, respectivamente.

No comprimento de onda central da FBG há um casamento de fase, sendo assim  $\Delta k = 0$ , e a expressão (6) pode ser simplificada para (KASHYAP, 1999; OTHONOS e KALLI, 1999):

$$R(l, \lambda) = \tan^{-2}(l\Omega) \quad (10)$$

Dessa forma compreende-se que a refletividade aumenta conforme é incrementado o  $\Delta n$ , variação induzida do índice de refração  $n_{co}$ , assim como o aumento do tamanho da rede  $l$ .

#### 2.4.1 Largura De Banda À Meia Altura (FWHM)

O termo largura de banda à meia altura (FWHM, do inglês Full Width at Half Maximum) relaciona a largura do pulso  $\Delta\lambda$  quando ocorre a atenuação de 50%, ou 3db, do sinal. FWHM é utilizado em fenômenos como duração de pulso de ondas e largura espectral de fontes em comunicações e resolução de espectrômetros.

Segundo Othonos e Kalli (1999), podemos obter uma expressão geral, aproximada, para largura de banda máxima a meia altura da rede por:

$$\Delta\lambda = \lambda_{BS} \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (11)$$

Onde  $N$  é número de planos contidos na rede (FBG).

Neste trabalho utiliza-se a FWHM na análise das respostas à vibração. Para, principalmente, distinguir sinal de ruído. São aqui, portanto, relevantes os sinais que possuam diferença de 3db do sinal de base, ou ruído detectado.



## 2.5 GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG

Nesta seção descrevem-se os processos de fabricação das redes de Bragg em fibra óptica, utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. Os procedimentos de gravação foram realizados e disponibilizadas pelo Laboratório de Tecnologia de Sistemas Sensores (LTSS) e Laboratório de Engenharia de Sistemas Optoeletrônicos (LabESO) da UTFPR-CT.

A gravação de redes de Bragg em fibras ópticas trata-se de uma tarefa que exige alta precisão. Para tanto a estabilidade do sistema de gravação é uma das características mais relevantes, pois é necessário absoluto controle tanto de comprimentos, quanto de deslocamentos da fibra, sendo estes da ordem de micrometros ( $\mu\text{m}$ ) (KASHYAP, 1999; SILVA, 2005).

Para a fabricação das FBGs é necessário o monitoramento da evolução do índice efetivo e da amplitude de modulação do índice em função do tempo de exposição. Esta dependência pode ser bastante complexa, pois está sujeita a numerosos parâmetros, como: a natureza da fibra, as características da fonte laser UV, a densidade de energia, a visibilidade e estabilidade do padrão espacial de exposição e do histórico térmica da fibra (SILVA, 2005).

Os métodos de fabricação de uma FBG podem ser divididos em duas categorias: Holográficos e não-interferométricos. Sendo este último baseado na exposição da fibra aos raios UV, e o primeiro com um único feixe UV dividido em dois e que se interferem na fibra (KASHYAP, 1999).

Ou ainda, podemos chamar tais técnicas de interferométricas e não-interferométricas (SILVA, 2005).

Ressalta-se, ainda, que há muitos tipos de fonte laser que podem ser usados nesse processo de gravação. O método e a fonte mais adequada devem ser escolhidos de acordo com os seguintes parâmetros: tipo da fibra utilizada, tipo da rede a ser gravada e intenção da aplicação. Neste trabalho estão descritos os dois tipos de gravação os quais foram utilizados nas FBGs alvo do estudo: Máscara de fase, e interferômetro com máscara de fase (KASHYAP, 1999).

### 2.5.1 Máscara De Fase

Hill e colaboradores apresentaram uma técnica de gravação de redes com máscara de fase [HILL *et al.*, 1993b]. A técnica de máscara de fase, atualmente a mais difundida, foi adaptada na fabricação de redes de Bragg a partir de métodos utilizados na fabricação de lasers semicondutores monomodo com cavidade distribuída. Essa técnica é, provavelmente, a mais simples e reproduzível das técnicas de fabricação de redes de Bragg.

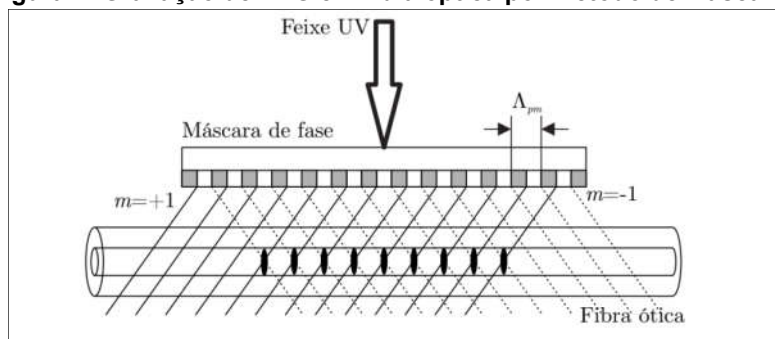
De acordo com Souza (2011) essa técnica é amplamente utilizada, comparada a outras, devido principalmente à: simplicidade, capacidade de reprodutibilidade e reduzida coerência da emissão laser necessária para formar interferência. O método emprega um elemento difrator (máscara de fase) para modular espacialmente o feixe de um laser UV.

A máscara de fase pode ser constituída de duas maneiras, por inscrição holográfica ou inscrição por varredura de feixe de elétrons (SOUZA, 2011). Neste trabalho somente será abordada forma por inscrição holográfica que é a mais utilizada.

O sutil processo é descrito abaixo e a seguir a figura 4 traz uma ilustração da gravação por máscara de:

A máscara é formada por uma base de substrato de sílica polido com alta qualidade óptica, plana e transparente. Posteriormente, a base de substrato de sílica é coberta por uma camada metálica muito fina, na ordem de grandeza de algumas centenas de Angstroms de espessura, onde o verniz fotossensível é depositado. A sílica é então gravada por ataque químico, sendo posteriormente removida a camada metálica residual. Assim, é gravada uma rede de difração no substrato de sílica com capacidade de difratar o feixe transmitido. (SOUZA, 2011. p.56).

**Figura 4- Gravação de FBG em fibra óptica por método de Máscara de fase.**



Fonte: Souza, 2011.

Onde  $\Lambda_{pm}$  é período da rede de difração da máscara de fase e  $m$  a ordem de difração do feixe UV. Ordem de difração é um número inteiro que representa o ângulo de refração do feixe que é transmitido pela máscara de fase. Os sinais positivo (+) e negativo (-) indicam a simetria com a normal.

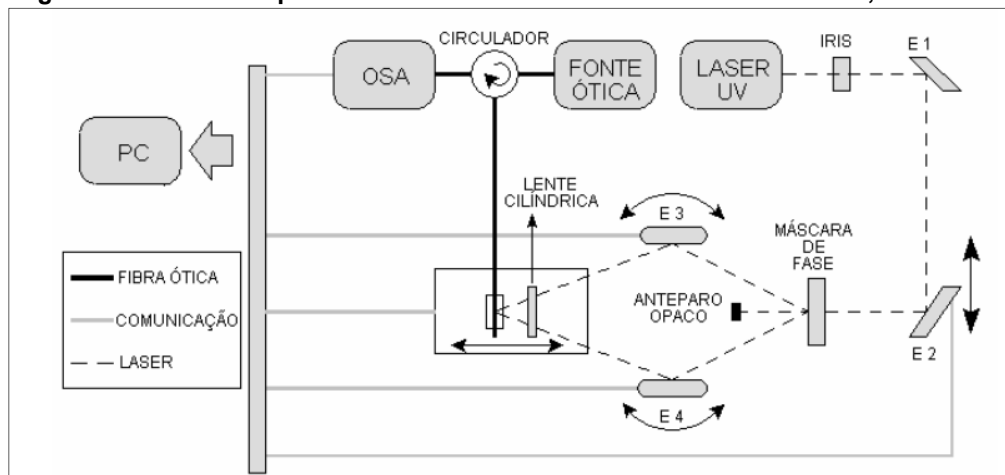
Este processo de gravação apresenta a necessidade de troca de máscara quando se desejar obter uma rede com outros  $\Lambda$ , desvantagem reduzida no item descrito a seguir no método interferométrico com máscara de fase.

### 2.5.2 Interferômetro Com Máscara De Fase

Este método, igualmente eficaz quanto o anterior, no entanto requer maior sofisticação sendo necessário um programa/software para realizar os ajustes de posicionamento da fibra, espelhos e controle da íris. Pois sempre que houver uma alteração no ângulo dos espelhos, o programa de controle atua corrigindo a posição da fibra para o ponto de focagem (SILVA, 2005).

Na figura 5 está ilustrado o esquemático do interferômetro com máscara de fase presente na UTFPR, câmpus Curitiba.

**Figura 5- Desenho esquemático de interferômetro com Máscara de fase, na UTFPR.**



Fonte: Silva, 2005

A fibra óptica encontra-se sobre anteparo com deslocamento horizontal,

ajustado por um motor CC. O diâmetro do feixe pode ser alterado pela íris, posicionada logo após a saída do laser, para definir o comprimento da rede a ser gravada e selecionar a região do feixe laser com melhor padrão espacial (SILVA, 2005).

A máscara de fase é utilizada para dividir o feixe em 2, que serão refletidos pelos espelhos E3 e E4, passando pela lente cilíndrica e interferindo-se na fibra óptica.

Nessa montagem, o comprimento de onda refletido pela rede gravada,  $\lambda_B$ , demonstrado na equação 12, é determinado pela metade do ângulo de cruzamento entre os feixes,  $\theta_m$ , e pelo comprimento de onda do laser de gravação,  $\lambda_e$ . [Meltz, Morey e Glenn, 1989, apud SOUZA, 2005].

$$\lambda_B = \frac{\lambda_e n_{eff}}{\text{sen} \frac{\theta_m}{2}} \quad (12)$$

A figura 6 trata-se de uma fotografia da bancada contendo o interferômetro com máscara de fase, presente na UTFPR-CT.

**Figura 6- Fotografia de interferômetro com máscara de fase**



**Fonte: Autoria Própria.**

## 2.6 PROPRIEDADES DAS REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

Perturbações externas como compressão, tração e variação de temperatura alteram o comprimento de onda central refletido, e essa é uma das características mais importantes das redes de Bragg em fibra óptica. Essa variação espectral diminui problemas derivados de ruídos de intensidade que afetam outros tipos de sensores e facilita a calibração (SILVA, 2005; OTHONOS e KALLI, 1999):

O monitoramento de redes de Bragg em fibra óptica pode ser feita mediante diferentes técnicas. A leitura do comprimento de onda da FBG oferece uma série de vantagens, tais como: alta precisão; independência de calibração em intensidade óptica; e a capacidade de multiplexação de vários sensores. (SILVA, 2005)

### 2.6.1 Efeitos Termo-Óptico E Foto-Elástico

Os efeitos termo-óptico e foto-elástico presentes na estrutura da fibra são os responsáveis para que as características das redes de Bragg gravadas nas fibras, sejam afetadas pela variação de temperatura ou pela aplicação de tensão mecânica. Isso faz com que tais efeitos provoquem mudanças na periodicidade espacial,  $\Lambda$ , e no índice de refração efetivo,  $n_{eff}$ , resultando em um deslocamento do comprimento de onda de Bragg,  $\lambda_B$ , com variação conhecida e precisa em função da temperatura ou deformação mecânica.

O deslocamento de  $\lambda_B$  é dado pela equação 12, onde o primeiro termo relaciona o efeito da deformação mecânica e o segundo termo o efeito da temperatura (KERSEY, 1997).

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (13)$$

A variação de  $\lambda_B$ , de acordo com a equação 13, sofre influência simultânea da temperatura e deformação, porém tais efeitos podem ser observados de forma isolada. Filtros computacionais podem ser empregados para tratar o sinal refletido, e visto que a fibra responde para a temperatura de forma mais lenta, forma de onda

com menor frequência, e com resposta mais dinâmica quanto à deformação, apresentando elevada frequência no sinal, é de fácil identificação a contribuição de cada grandeza mensurada no sinal resultante.

### 2.6.2 Sensores Ópticos No Monitoramento De Vibração

Os sensores ópticos têm grande variedade de aplicações onde é necessário medir ou monitorar vibrações com precisão. Embora existam outros sensores, os elétricos, baseados em transdutores capacitivos e piezoelétricos, seu uso em ambientes de alta-tensão ou com forte campo eletromagnético recebe interferências indesejadas.

Linhas de transmissão, motores de grande porte, indústrias petroquímicas, e geradores de alta potência em plantas elétricas são exemplos clássicos para aplicações de sensores ópticos para medidas de vibração. Devido à imunidade a campos eletromagnéticos, potencial para transmissão de sinais a longas distâncias, flexibilidade e tamanho reduzido, dispositivos sensores à base de fibra óptica demonstram ser uma excelente ferramenta para inspeção de estruturas (SILVA, 2005).

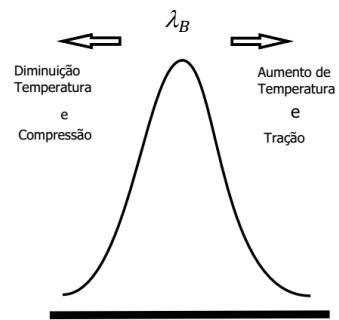
Além disso, acrescenta-se a segurança de operação para utilização em ambientes explosivos, visto que não é necessário alimentar o sensor com nenhum tipo de corrente ou tensão.

### 2.6.3 Sensores Ópticos No Monitoramento De Temperatura

Esse tipo de sensor óptico permite realizar medidas de forma direta. Podendo-se obter resultados confiáveis sobre variação de temperatura e características térmicas da estrutura (BAZZO *et al.*, 2010).

A figura 7 traz uma ilustração de como se dá o comportamento do  $\lambda_B$ , quando a fibra óptica sofre variação de temperatura ou sobre deformação. Quando a fibra se estica, seja por aumento de temperatura ou por tração o  $\lambda_B$  se desloca para a direita, o correndo o contrário, o  $\lambda_B$  refletido, será deslocado para a esquerda.

**Figura 7- Relação da temperatura e deformação com o deslocamento do comprimento de onda de Bragg**



**Fonte: Autoria Própria.**

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo será abordado todo o procedimento prático e experimental que envolve o presente trabalho, desde a gravação das redes, encapsulamento, montagens experimentais e tratamento dos dados.

#### 3.1 GRAVAÇÃO DAS REDES

As FBGs cedidas para o presente trabalho foram gravadas e fornecidas pelos Laboratórios LTSS e LabESO, da UTFPR câmpus Curitiba. Os métodos de gravação utilizados nos laboratórios acima citados foram: máscara de fase e interferômetro com máscara de fase. Segundo Hill et. al., (1993, apud Silva, 2005 p.33) ambos são considerados estáveis para aplicações tais como nas que serão aqui expostas. Neste trabalho não se fará distinção de tais técnicas nas análises.

Na Tabela 1 estão dispostos os valores dos comprimentos de onda de Bragg em cada encapsulamento:

**Tabela 1 - Comprimentos de onda de Bragg dos encapsulamentos**

	$\lambda_B$ em 25°C			
	GEL	ÁGUA	ÓLEO	AR
nm	1532,459	1526,947	1527,073	1540,946

#### 3.2 ACOPLAMENTO DO FBG AO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Para realizar as medições é necessário acoplar a fibra óptica contendo a FBG à outra parte que será conectada ao equipamento interrogador. O método de fusão da fibra é o mais utilizado, pois gera uma menor perda de atenuação em relação ao método por emendas mecânicas, garantindo assim a eficiência em toda a rede [ZTT, 2016].

O procedimento de fusão é precedido, primeiramente, da retirada de todo o invólucro e acrilato, uma espécie de cobertura plástica, contidos na fibra. Seguido de



clivagem à 90° nas duas terminações a serem acopladas, assim como o adequado posicionamento destas no dispositivo de fusão.

Na fusão da fibra ocorre o alinhamento e junção entre 2 fibras desconectadas por meio de um aquecimento, gerando um arco voltaico que ocasiona a união e o alinhamento núcleo/casca das partes. As perdas por fusões, de acordo com a norma ANSI/TIA 568, devem ter um valor máximo de 0,3 dB/km [FURUKAWA, 2016].

### 3.3 ENCAPSULAMENTO

As fibras ópticas comerciais encontram-se envoltas por tubos poliméricos de pequeno diâmetro, feitos de polibutileno tereftalato (PBT), os quais possuem certa flexibilidade conferindo-lhe proteção à rupturas na fibra. Dentro destes tubos pode haver, ainda, gel hidrorrepelente, que é resíduo de petróleo, cuja função também é proteção, neste caso ao sinal. Pois ao mudar o entorno da fibra permite-se aumentar o campo evanescente e causar, portanto, perda de sinal.

De acordo com a empresa Repsol, fabricante de compostos para fibra óptica, o gel de petróleo:

“Graças às suas características especiais, pode ser aplicada a frio (25°C) por uma bomba simples, de modo que, quando o enchimento vai assentar no interior do cabo, géis formando uma barreira de proteção eficaz. Estes compostos também exibem excelente desempenho a baixa temperatura, mantendo a penetração praticamente inalterada e fluidez suficiente para medir a sua viscosidade, de modo que facilitam o posicionamento correto de pequenas fibras ópticas, evitando perigoso microrrupturas.”

Os encapsulamentos a gel de petróleo hidrorrepelente, ou somente gel, água, óleo mineral, que adiante será denominado simplesmente óleo, e ar, foram realizados de forma manual.

De tais tubos poliméricos, de 3 foram retirados o gel e substituídos por óleo, água mineral, e ar à pressão de 1 atm. Apenas um dos invólucros permaneceu com o gel original. Tais materiais foram retirados com auxílio de ar comprimido.

Na tabela 2 constam os valores das densidades para cada material de preenchimento:

**Tabela 2- Tabela de densidades dos materiais encapsulados**

DENSIDADES				
	GEL	ÁGUA	ÓLEO	AR
g/cm <sup>3</sup>	0,86	1	0,87	0,001225

Após a retirada do gel de petróleo hidrorrepelente as fibras contendo as FBGs foram inseridas em cada tubo polimérico já preenchido com seu respectivo conteúdo para realização dos ensaios de vibração e caracterização de temperatura. Na quadro 1 estão descritos os equipamentos utilizados nesta etapa, assim como marca/modelo:

**Quadro 1- Equipamentos utilizados para realização dos ensaios**

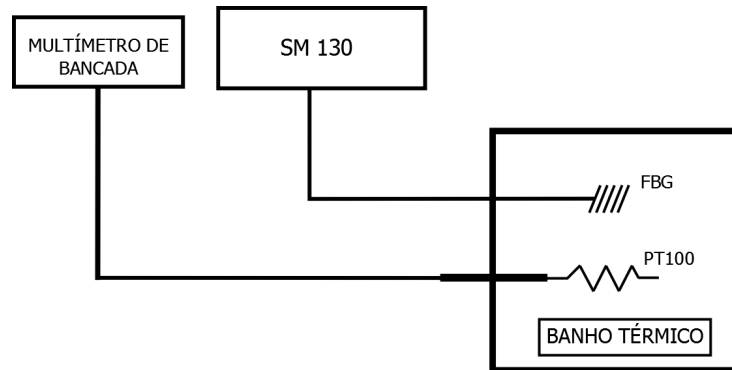
Equipamento	Marca	Modelo
1.Cabos de fibra Óptica	Furukawa	Cabo geleado 4 vias
2.Máquina de Fusão	Furukawa	S178A Versão 2
3.Interrogador	Micron Optics	SM 130- 4
4.Multímetro de bancada	Agilent	34420A
5.Gerador de funções	Keysight	81150A
6.Circulador refrigerado à água para banho térmico	Lauda Brinkmann	Eco RE415
7.Termo resistência	Fluke	PT 100 5609

### 3.4 SISTEMA TERMO-ÓPTICO

Nesta etapa descreve-se a montagem para a realização do banho térmico, que é um sistema cuja capacidade calorífica é tão grande que quando está em contacto térmico com outro sistema de interesse a sua temperatura permanece constante.

Na figura 8 está ilustrada a montagem esquemática da disposição dos equipamentos. O interrogador SM130 possui 4 canais e as 4 FBGs estão acopladas a ele possibilitando que os testes ocorram simultaneamente. Como parâmetro utiliza-se o PT100, que trata-se de uma termorresistência.

**Figura 8 - Desenho do esquemático de montagem do sistema de medição de temperatura nos sensores FBGs**



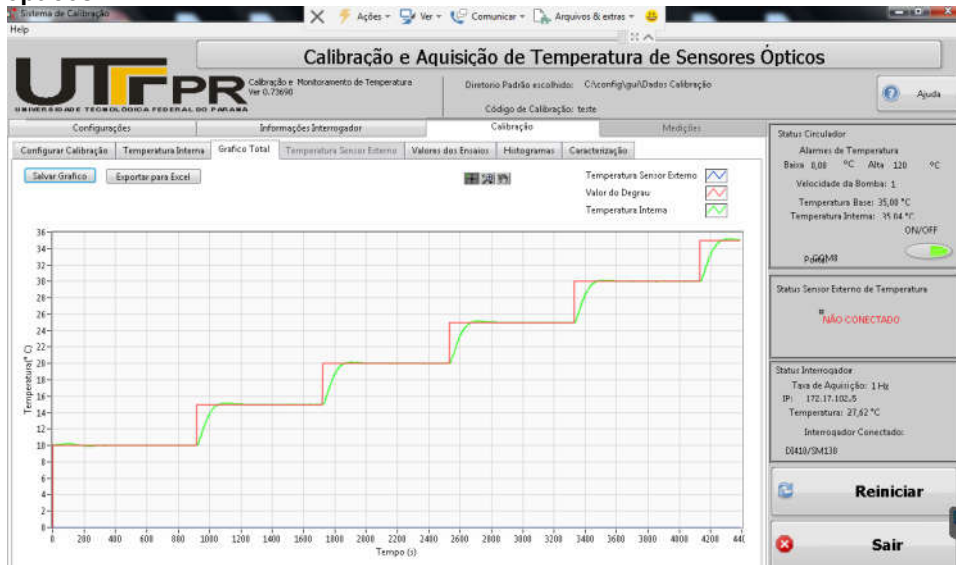
**Fonte: Autoria própria.**

### 3.4.1 Interrogador e Método de Interrogação

O SM130, interrogador que possui uma alta potência, baixo ruído, e utiliza tecnologia de filtro de fibra de Fabry-Perot sintonizável varre uma janela no espectro eletromagnético que varia entre 1510-1590nm, com até 500Hz de frequência.

Na figura 9 pode-se observar a tela principal do software de calibração e aquisição de temperatura de sensores ópticos utilizado para realizar a curva de caracterização de temperatura das FBGs, desenvolvido nos LTSS e LabESO. O programa controla o aquecimento do banho térmico assim como faz a aquisição da leitura dos sensores.

**Figura 9-Tela do software de calibração e aquisição de temperatura de sensores ópticos**

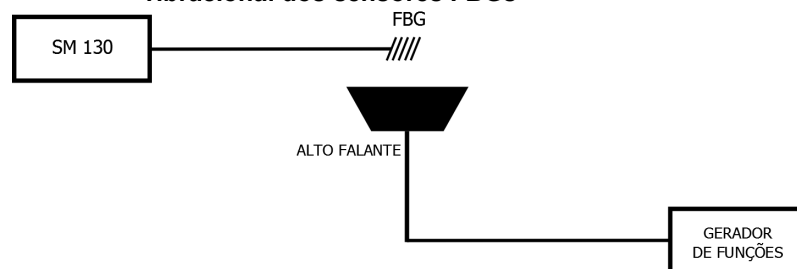


### 3.5 SISTEMA FOTO-ELÁSTICO

Nesta etapa utilizou-se um gerador de funções para proporcionar vibrações ao sistema com faixa abrangida de 100Hz a 450Hz, tal *range* se deu por limitação dos equipamentos. Era desejável que fosse acima das frequências da rede (60Hz) e o interrogador SM 130 tem limite superior de 500Hz.

Os testes nos 4 encapsulamentos foram realizados, novamente, simultaneamente. O esquemático da montagem é ilustrado na figura 10:

**Figura 10- Desenho do esquemático de montagem do sistema de medição vibracional dos sensores FBGs**



Fonte: Autoria própria.

A figura 11 contém uma fotografia do arranjo experimental com autofalante desenvolvido para os ensaios de vibração. Nelas podem ser observados os

encapsulamentos de PBT, nos quais, em seus interiores se dispõe os materiais: gel, óleo, água e ar. Na figura 11 (a) encontra-se a vista lateral e na (b) a vista superior.

**Figura 11- Fotografias com vistas da montagem experimental dos encapsulamentos no autofalante, usado como gerador de ondas mecânicas**

(a)

(b)



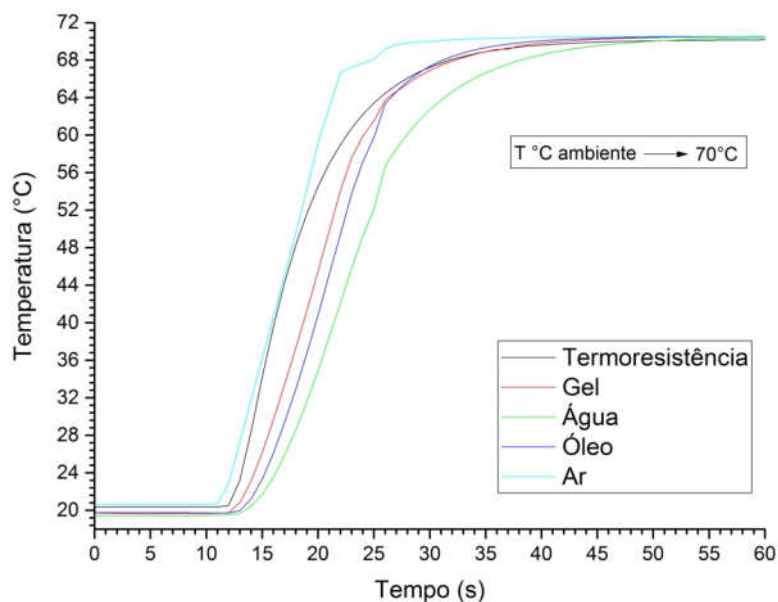
Fonte: Autoria própria.

## 4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO E RESULTADOS

### 4.1 RESPOSTAS À TEMPERATURA

Após montagem e calibração dos instrumentos foram realizados os testes de temperatura, os quais foram repetidos por 8 vezes, aproximadamente 10 horas. Na figura 12 encontra-se a média dos gráficos de subida de 20°C (temperatura ambiente) para 70°C. Software utilizado para realizar as manipulações matemáticas: OriginPro 2016.

Figura 12-Curva de caracterização térmica de subida (20°C- 70°C) das FBGs

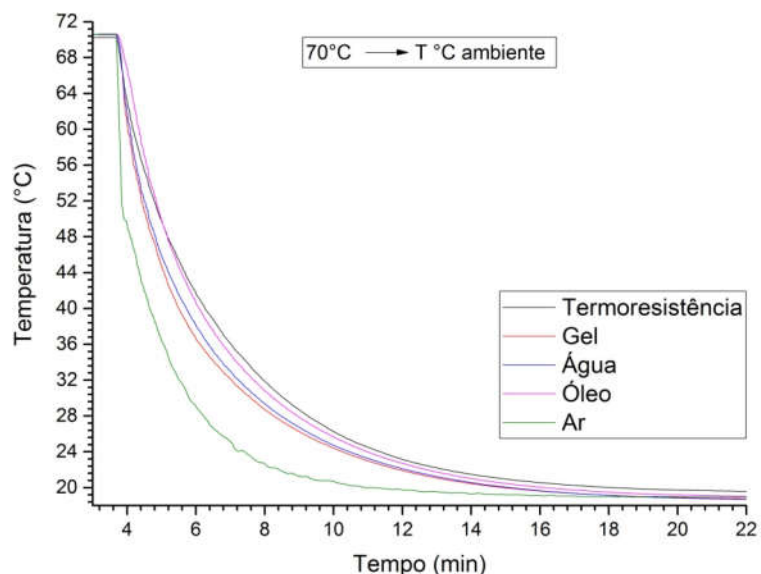


Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o encapsulamento a ar é o com maior velocidade de resposta, tanto na subida quanto na descida, isso pode ser devido a sua pouquíssima massa. O gel apresentou-se intermédio em ambos os casos, subida e descida.

Na figura 13 observam-se as velocidades de descida para os diferentes encapsulamentos. As curvas se mantêm padrão semelhante, variando consideravelmente apenas suas velocidades de declive.

Figura 13-Curva de caracterização térmica de descida (70°C- 20°C) das FBGs.



Fonte: Autoria própria.

## 4.2 RESPOSTAS À VIBRAÇÃO

Após montagem e calibração dos instrumentos foram realizados os testes vibracionais que consistiram em:

- 1-Varrer a faixa de frequência de 100Hz a 450Hz, intervalados em 50Hz e
- 2-Mantendo frequência de 150Hz constante variar amplitude do sinal.

A variação da amplitude do sinal oscilante relaciona-se com a tensão fornecida ao gerador de funções, com faixa de 0,5V a 5V, e resolução de 0,5V.

Para cada amostragem com frequência constante, ou variante, realizou-se 3 ensaios, sendo assim o resultado aqui apresentado trata-se da média simples das FFTs (*Fast Fourier Transform*) destes. Software utilizado para realizar as manipulações matemáticas: OriginPro 2016.

Nas figuras 14 e 15 estão as respostas para o encapsulamento a AR demonstrando 3 ensaios em 100Hz e 450 Hz, respectivamente. Todas as demais aquisições foram realizadas seguindo esse procedimento.

Figura 14- Resposta para encapsulamento AR à 100 Hz. (a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3

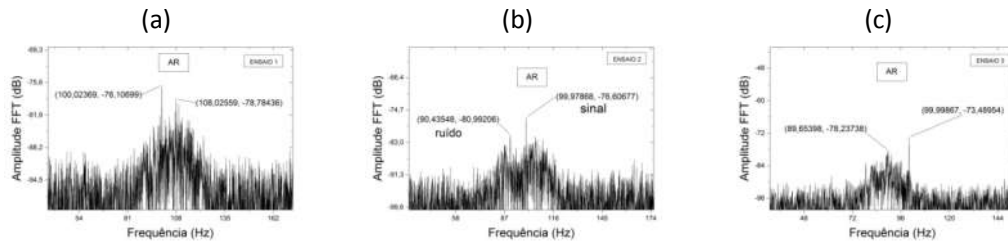
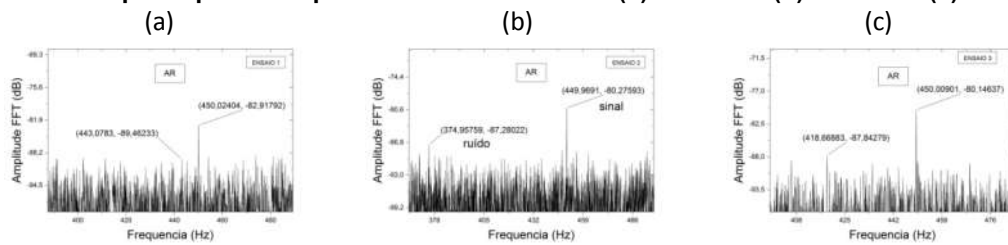


Figura 15- Resposta para encapsulamento AR à 450 Hz. (a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3



Nas figuras 16 e 17 estão as respostas para o encapsulamento a Gel demonstrando 3 ensaios em 100Hz e 450 Hz, respectivamente. Nos gráficos podem ser observados a notável diferença com relação ao ruído, mesmo que não tenha sido empregado nenhum filtro especial. Pode-se, ainda, observar a presença de harmônicas. O Gel foi o único que apresentou capacidade de detectá-las.

Figura 16 - Resposta para encapsulamento GEL à 100 Hz. (a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3.

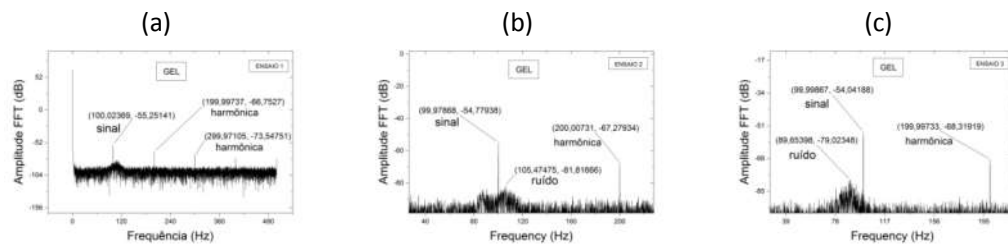
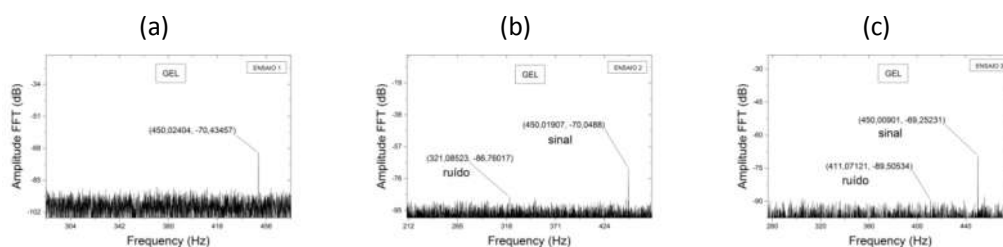




Figura 17- Resposta para encapsulamento GEL à 450 Hz. (a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3.



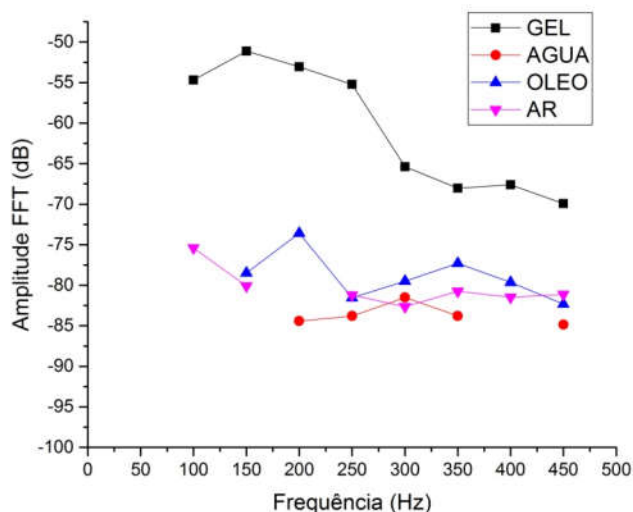
Os valores médios, resultados finais, das amostragens nas frequências de 100- 450 Hz para gel, água, óleo e ar podem ser encontrados na tabela 3:

Tabela 3- Frequência X Amplitude FFT

Frequência (Hz)	Média das Amostragens			
	GEL	AGUA	OLEO	AR
100	-54,69089	--	--	-75,40207
150	-51,113	--	-78,48502	-80,08424
200	-53,06344	-84,41682	-73,5907	--
250	-55,22858	-83,79764	-81,53778	-81,21756
300	-65,36567	-81,49732	-79,47766	-82,64836
350	-68,01238	-83,7747	-77,30452	-80,73557
400	-67,6216	--	-79,63477	-81,4866
450	-69,91189	-84,85326	-82,32631	-81,11341

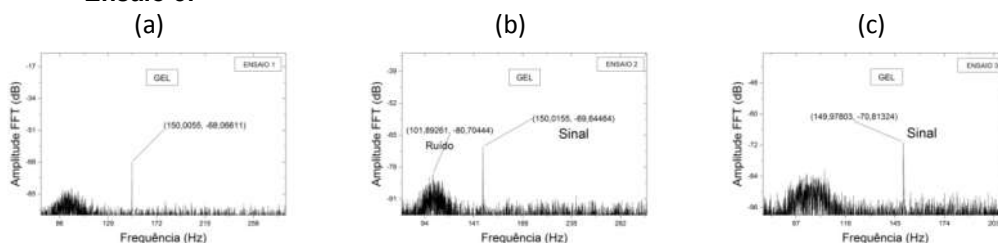
Os resultados finais para os 4 encapsulamentos, transformados graficamente, são mostrados na figura 18:

**Figura 18- Resposta das FBGs para variações de frequência de 100-450Hz**



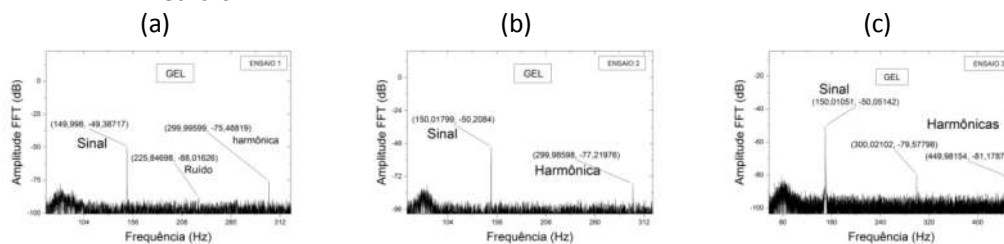
Na figura 19 estão as respostas para o encapsulamento a GEL para os 3 ensaios a 150Hz- cte e entrada 0,5V. Todas as demais aquisições foram realizadas seguindo procedimento semelhante, com resolução de 0,5V a cada ensaio. Pode-se observar claramente a presença do pico da FFT em 150 Hz, com -68 dB, -69dB e -70 dB respectivamente.

**Figura 19- Resposta para encapsulamento a GEL à 150 Hz- 0,5V.(a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3.**



Na figura 20 estão as respostas para o encapsulamento a GEL para os 3 ensaios a 150 Hz- cte e entrada 5V. O pico em 150 Hz encontra-se agora com maior intensidade. Pode-se observar claramente a presença do pico da FFT em 150 Hz, com -49 dB, -50dB e -50 dB, respectivamente.

**Figura 20- Resposta para encapsulamento a GEL à 150Hz- 5V. (a) Ensaio 1. (b) Ensaio 2. (c) Ensaio 3**



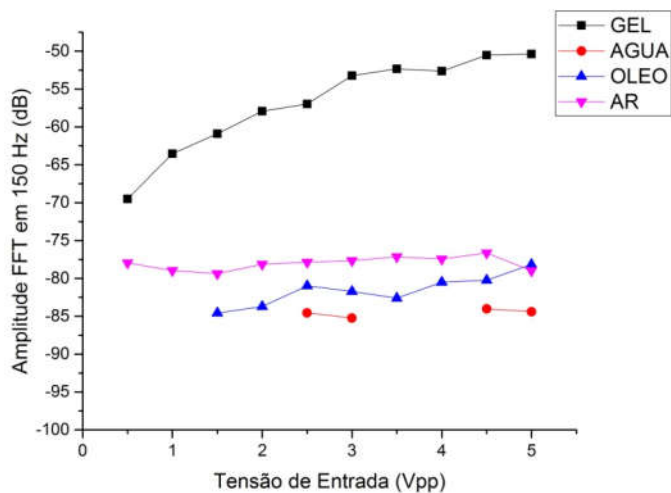
Todos os dados dos ensaios com frequência constante em 150 Hz estão listados na tabela 4, que mostra, também, uma menor sensibilidade do sensor com encapsulamento à água em medir as menores intensidades, abaixo de 2,5V.

**Tabela 4 - Tensão de Entrada X Amplitude FFT em 150 Hz**

	Média das Amostragens			
	Tensão de Entrada (Volts)		Amplitude FFT em 150 Hz (dB)	
	GEL	AGUA	OLEO	AR
0	--	--	--	--
0,5	-69,508	--	--	-77,94495
1	-63,54874	--	--	-78,94227
1,5	-60,90283	--	-84,58324	-79,38681
2	-57,91949	--	-83,72084	-78,11105
2,5	-56,96999	-84,55513	-80,96518	-77,863
3	-53,22281	-85,23322	-81,71967	-77,66219
3,5	-52,32859	--	-82,62378	-77,13895
4	-52,62602	--	-80,4963	-77,45209
4,5	-50,51959	-84,01181	-80,22458	-76,63645
5	-50,37388	-84,3957	-78,1566	-79,00018

A figura 21 traz os resultados finais, das médias dos 3 ensaios, para os 4 encapsulamentos com variação de intensidade de entrada (0,5 - 5V) e frequência constante em 150 Hz. Percebe-se, portanto, a superioridade do sinal no gel dentre os demais encapsulamentos.

Figura 21-Relação Tensão de Entrada x Amplitude da FFT para vibração em 150 Hz



Observou-se, ainda, ocorrência de eventual problema no encapsulamento à água, que ora captava, ora não captava nenhuma vibração. O encapsulamento a AR não respondeu quanto à variação da intensidade, conforme houve com GEL, e ainda assim respondeu para as intensidades mais baixas, o que não ocorreu para o encapsulamento à óleo.

## 5. CONCLUSÃO

Diante dos resultados expostos neste trabalho, chega-se à conclusão de que a melhor captura dos sinais nos encapsulamentos das FBGs foi realizada por aqueles cujo preenchimento era gel de petróleo. Este tixotrópico embora não seja originariamente usado com esta finalidade, se sobressaiu frente aos demais.

Sendo assim os sensores à fibra óptica com encapsulamento à GEL, além de apresentarem características de proteção à fibra, manutenção de baixo campo evanescente ainda permitem que medições de vibração e temperatura sejam satisfatoriamente identificadas.

Entende-se, contudo, que o número amostral de ensaios realizados para este trabalho é demasiado pequeno, embora haja indícios apontando fortemente na direção de que são as características de viscosidade, e aderência do GEL à fibra, que permitem com que tal sensor responda de forma superior aos demais.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados experimentais encontrados para a curva de subida 20-70°C, com relação ao tempo de resposta e em ordem decrescente, foram: AR- GEL- ÓLEO- ÁGUA. E com relação ao tempo de resposta para a curva de descida 70-20°C foram, em ordem decrescente: AR - GEL - ÁGUA - ÓLEO.

Com relação à vibração a densidade não se mostrou ser um fator relevante, por si só, pois gel e óleo apresentam densidades extremamente próximas (0,86 e 0,87 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente) e, no entanto, resultados tão discrepantes. Estima-se que tal resultado, além da correlação com a viscosidade, ocorra também pelo fato do gel poder ser tratado como um meio sólido, ou praticamente sólido do ponto de vista de modelagem, em vez de líquido.

### 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho abre oportunidade para novas investigações e trabalhos futuros, que abordem aplicações a frequências de motor que são da ordem de 8 a 30 Hz

(500 a 1800 rpm), estudo das propriedades tixotrópicas do géis de petróleo, assim como a realização de maior número de ensaios para aprofundamento quanto à repetibilidade/reprodutibilidade de diferentes preenchimentos para encapsulamentos.

## REFERENCIAS

A.Méndez, “**Fiber Bragg grating sensors: a market overview**”, in Proceedings of the SPIE Vol. 6619, 2007. 661905-1 - 661905-4.

BAZZO, J. P. et al. **Digital control system using a thermoelectric cell for temperature electronic devices testing**. LASCAS, 2010.

FURUKAWA NTG-008 -Perdas na Rede PON- (Passive Optical Network). Disponível em:  
[http://portal.furukawa.com.br/arquivos/N/NTG/NTG008PerdasnaRedePON/2163\\_NTG008PerdasnaRedePON.pdf](http://portal.furukawa.com.br/arquivos/N/NTG/NTG008PerdasnaRedePON/2163_NTG008PerdasnaRedePON.pdf) Acesso em 11/11/2016

HILL, K. O. et al. **Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask**. Applied Physics Letters, v. 62, n. 10, 1993.

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.  
KASHYAP, R., “**Fiber Bragg Grating**”, San Diego, Academic Press, 1999.

KERSEY, Y. D. et al. **Progress towards the development of practical fiber Bragg grating instrumentation systems**. SPIE, p. 41–63, jun. 1996

LAM, D. K. W. & GARSIDE, B. K., **Applied Optics**, vol. 20, p. 440-456, 1981, citado por [Bennion et al., 1996].

PATERNIO, A.S. **Sistemas de sensoriamento em fibra ótica: Análise e implementação com aplicações na instrumentação de processos petroquímicos**. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

REPSOL, CATÁLOGO. Disponível em : <https://www.repsol.com/es/es/productos-servicios/especialidades/productos/compuestos-cables/productos/> Acesso em: 11/11/2016

SILVA, J. C. C. **Monitoração de vibrações de estruturas com o emprego de sensores em fibra óptica**. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

SOUSA, K. M. **Validação de modelo térmico e elétrico de motor de indução empregando redes de Bragg em fibra óptica.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

OTHONOS, A., Kalli, K, “**Fiber Bragg Grating: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**”, London, Artech House, 1999.

ZTT. **Fusão da fibra óptica.** Disponível em <http://www.zttcable.com.br/fusao-da-fibra-optica-em-9-passos/> Acesso em: 11/11/2016