

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

CAMILA CARVALHO DE MOURA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE ENCAPSULAMENTOS PARA  
REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS APLICADOS EM MEDIÇÃO DE  
TEMPERATURA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2019

CAMILA CARVALHO DE MOURA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE ENCAPSULAMENTOS PARA  
REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS APLICADOS EM MEDIÇÃO DE  
TEMPERATURA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Fotônica em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Valmir de Oliveira.

CURITIBA

2019

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M929d Moura, Camila Carvalho de  
Desenvolvimento de encapsulamentos para redes de Bragg em fibras óticas aplicados em medição de temperatura / Camila Carvalho de Moura.-- 2019.  
58 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, 2019.

Bibliografia: f. 54-58.

1. Engenharia elétrica - Dissertações. 2. Detectores de fibra óptica. 3. Redes de Bragg. 4. Aparelhos e materiais eletrônicos - Embebedimento de plástico. 5. Óxido de alumínio. 6. Aço inoxidável. 7. Materiais a altas temperaturas. 8. Temperatura - Medição. 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

## TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 817

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Desenvolvimento de Encapsulamentos para Redes de Bragg em Fibras Óticas Aplicados em Medição de Temperatura.**” defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Camila Carvalho de Moura**, no dia 06 de fevereiro de 2019, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração Fotônica em Engenharia, 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). Ilda Abe - (UTFPR)

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

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, 06 de fevereiro de 2019.

## RESUMO

MOURA, Camila Carvalho de. Desenvolvimento e caracterização de encapsulamentos para redes de Bragg em fibras óticas aplicados em medição de temperatura. 2019. 62 f. Dissertação (Fotônica em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Nesse trabalho foram produzidos e encapsulados diversos sensores de altas temperaturas utilizando redes de Bragg em fibra ótica (FBG) para produção de sondas de temperatura. As FBGs foram gravadas na banda do infravermelho utilizando fibra ótica monomodo padrão de telecomunicações (G-652). Algumas fibras óticas utilizadas não sofreram pré-tratamento para produção da FBG padrão, enquanto outras passam pelo processo prévio de hidrogenação para produção posterior de rede de Bragg em fibra ótica regenerada (RFBG). No processo de produção da RFBG foi utilizado tratamento térmico em 850°C e as RFBGs resultantes puderam ser aplicadas em medições de temperaturas menores que aquela da regeneração, que neste trabalho foi limitado a 500 °C. As FBGs e as RFBGs foram encapsuladas com material cerâmico alumina ( $Al_2O_3$ ) e aço inox para produção de sondas de temperatura, que fornecem proteção mecânica ao sensor FBG/RFBG devido a fragilidade adquirida após o tratamento térmico. Um estudo comparativo foi feito da sensibilidade térmica para as diferentes cápsulas e comparadas com fibra ótica sem encapsulamento.

Palavras-chave: FBG; RFBG; encapsulamento de FBG.

## ABSTRACT

MOURA, Camila Carvalho de. Development and characterization of encapsulations for Bragg gratings in optical fibers applied in temperature measurement. 2019. 62 f. Dissertation (Photonics in Engineering) - Graduate Program in Electrical Engineering and Industrial Informatics, Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2019.

In this work, several temperature sensors were produced and encapsulated using fiber optic Bragg grating (FBG). FBGs were written in the infrared band using standard telecommunication single mode optical fiber (G-652). The fiber used does not undergo pre-treatment in the production of standard FBG and undergoes a previous hydrogenation process to produce regenerated fiber Bragg grating (RFBG). In the process of producing RFBG we use heat treatment at 850°C and the resulting gratings can be applied in long time measurements at temperatures lower than that of regeneration. FBGs and RFBGs were encapsulated with ceramic material alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and stainless steel to facilitate application as a sensor. A comparative study of thermal sensitivity for different capsules and compared with non-encapsulated optical fiber was done.

Keywords: FBG; RFBG; encapsulation of FBG.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comparação dos tratamentos térmicos entre diferentes encapsulamentos para a FBG .....	11
Figura 2 - Comparação entre fibras de índice gradual a) e fibras com índice degrau b) .....	15
Figura 3 - Representação esquemática da operação da FBG quando submetida a iluminação por fonte banda larga. Parte da luz é refletida e a restante transmitida ....	16
Figura 4 - Esquema de gravação de FBG utilizando uma fonte ótica UV e máscara de fase, mostrando as alterações no núcleo da fibra ótica .....	23
Figura 5 - Feixe ultravioleta iluminando a máscara de fase e padrão de difração formado na fibra.....	25
Figura 6 - a) Espectro inicial de uma FBG saturada (traçada) e espectro final da FBG após a regeneração (traço contínuo); b) processo de regeneração, aumento da temperatura até 900 °C (quadrados) com a diminuição da amplitude do sinal refletido (círculos).....	29
Figura 7 - FBG recoberta com uma camada de Ni. Em azul o espectro da rede semente, em preto o espectro da RFBG .....	30
Figura 8 - a) sonda pronta para testes com uma RFBG encapsulada com duas camadas, uma cerâmica e a outra em metal. b) sensibilidade térmica para a RFBG com recobrimento (quadrados vermelhos) e sem recobrimento (cruz roxa).....	31
Figura 9 - Máscara de Fase, mostrando sua rede de difração (parte central em laranja), utilizada para gravação de redes de Bragg .....	32
Figura 10 - Processo de gravação de FBGs utilizando máscara de fase e laser excímero.....	34
Figura 11 - Montagem para tratamento térmico das FBGs e RFBGs, controlador (NOVUS), forno elétrico desenvolvido no próprio laboratório de fotônica (UTFPR) e o computador com supervisor.....	35

Figura 12 - Arranjo experimental montado para acompanhar o espectro da FBG durante os testes. A leitura do espectro foi feita em reflexão utilizando uma fonte ASE, um circulador ótico e o OSA.....	36
Figura 13 - a) Espectro inicial e final da RFBG; b) Aumento da temperatura no forno até 900 °C com a regeneração ocorrendo próximo de 82 minutos do início do experimento.....	37
Figura 14 - Encapsulamento FBG utilizando um tubo capilar, como alumina e aço inox .....	38
Figura 15 - Os dois recobrimentos utilizados durante os experimentos de temperatura, acima o tubo de alumina e abaixo o tubo em aço inox .....	38
Figura 16 - a) FBG encapsulada com alumina, reforço na transição cordão ótico-alumina feito com material termorretrátil. b) FBG encapsulada com aço inox, reforço na transição cordão ótico-aço inox feito com material termorretrátil.....	39
Figura 17 - SSMF1. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada um dos encapsulamentos utilizados .....	41
Figura 18 - SSMF2. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento .....	42
Figura 19 - SSMF3. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento .....	44
Figura 20 - SSMF4. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento .....	45
Figura 21 - SSMF5. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento .....	47
Figura 22 - SSMFH1. A) FBG sem encapsulamento; b) encapsulamento em alumina; c) encapsulamento com aço inox; d) sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento. ....	48

Figura 23 - SSMFH2. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento .....50

Figura 24 - SSMFH3. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento .....51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre diferentes encapsulamentos. ....	11
Tabela 2 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMF1 .....	41
Tabela 3 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMF2 .....	43
Tabela 4 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMF3 .....	44
Tabela 5 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMF4 .....	46
Tabela 6 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMF5 .....	47
Tabela 7 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMFH1.....	49
Tabela 8 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMFH2.....	50
Tabela 9 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMFH3.....	52
Tabela 10 - Sensibilidades térmicas médias de cada encapsulamento com FBG SSMF G-652 IR.....	52
Tabela 11 - Sensibilidade térmicas médias de cada encapsulamento COM RFBG SSMF G-652 IR .....	52

## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ASE	Emissão espontânea amplificada ( <i>Amplified Spontaneous Emission</i> )
CCD	Dispositivo de carga acoplada ( <i>Charge Coupled Device</i> )
FBG	Rede de Bragg em fibra ótica ( <i>Fiber Bragg Grating</i> )
Laser	- Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação ( <i>Light amplification by stimulated emission of radiation</i> )
OSA	Analisador de espectro ótico ( <i>Optical Spectrum Analyzer</i> )
RFBG	Rede de Bragg regenerada em fibra ótica ( <i>Regenerated Fiber Bragg Grating</i> )
SSMF	Fibra ótica monomodo padrão ( <i>Standard Single Mode Fiber</i> )

## LISTA DE SÍMBOLOS

pm	picometro
$\mu\epsilon$	microstrain
nm	nanômetro
$\lambda_B$	comprimento de onda de Bragg
$\Lambda$	período espacial da rede de Bragg
$n_{eff}$	índice de refração efetivo no núcleo da fibra ótica
$\Delta l$	variações no período da rede
$\Delta T$	variações de temperatura
Cu	cobre
Ni	níquel
Ge	germânio
B	boro
P	fósforo
Sn	estrontio
F	flúor
mJ	miliJoule
Hz	Hertz
$^{\circ}\text{C}$	graus Celsius
®	marca registrada

# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1 ESTADO DA ARTE .....	10
1.2 MOTIVAÇÕES .....	11
1.3 OBJETIVOS .....	12
1.3.1 Objetivo geral .....	12
1.3.2 Objetivos específicos .....	12
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	12
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	14
2.1 REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA .....	15
2.1.1 Aplicações para redes de Bragg em fibra ótica .....	18
2.2 GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA .....	19
2.2.1 Fotossensibilidade em fibra ótica .....	19
2.2.2 Hidrogenação de fibras óticas .....	20
2.2.3 Utilização de fibras óticas fotossensíveis .....	21
2.2.4 Técnica <i>Flame-brush</i> .....	21
2.2.5 Gravação de FBG utilizando máscara de fase .....	22
2.3 USOS DE FBG A ALTAS TEMPERATURAS .....	25
2.3.1 Regeneração de redes de Bragg em fibra ótica .....	26
2.3.2 FBG com recobrimento metálico .....	29
2.3.3 FBGs encapsuladas .....	30
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	32
3.1 GRAVAÇÕES DAS REDES DE BRAGG .....	32
3.3 AQUISIÇÃO ESPECTRAL NO INFRAVERMELHO .....	35
3.5 ENCAPSULAMENTO .....	37
3.6 DETERMINAÇÃO DE SENSIBILIDADE TÉRMICA .....	39
<b>4 ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	40
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	53
5.1 TRABALHOS FUTUROS .....	53
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	54

## 1 INTRODUÇÃO

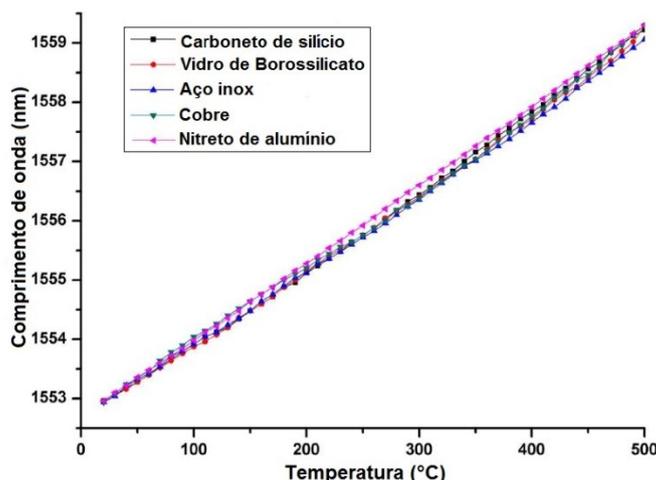
### 1.1 ESTADO DA ARTE

O desenvolvimento de fibras óticas vem ocorrendo desde os anos 50 com testes realizados primeiramente por Narinder Singh Kapany. Após o aperfeiçoamento do método de produção e materiais utilizados para compor as fibras óticas, estas começaram a ser utilizadas em larga escala em todo mundo como meio de telecomunicação, pois as fibras óticas possuem grande capacidade de transporte de dados (na faixa de  $10^{12}$  bits por segundo) por longas distâncias (centenas de quilômetros).

Apesar das fibras óticas serem majoritariamente utilizadas para telecomunicações, elas também são utilizadas para sensoriamento de temperatura, pressão, deformação, índice de refração em líquidos entre outros. O deslocamento do comprimento de onda é um dos parâmetros utilizados para mensurar algumas grandezas como temperatura e deformação. Para cada tipo de sensoriamento utilizando fibra ótica, aplica-se uma técnica específica. No caso da medição em altas temperaturas, uma das técnicas utilizada é a produção de dispositivos de redes de Bragg em fibras óticas (FBG)(KERSEY et al, 1997).

Na medição de altas temperaturas, a fibra ótica pode sofrer danos estruturais devido a temperatura tornando a mesma muito frágil. Devido a este fato, nos últimos cinco anos alguns artigos foram publicados com a temática de encapsulamento de fibras óticas para medição de altas temperaturas.

Um destes artigos (MAMIDI *et al*, 2014) utiliza cinco tipos de encapsulamentos em tubos capilares (carboneto de silício, vidro de borossilicato, aço inox, cobre, nitreto de alumínio) nas FBGs, com uma variação de temperatura de 20 °C – 500 °C e compara seus resultados, como mostra a FIGURA 1. Para este artigo, o melhor resultado foi do nitreto de alumínio, com uma sensibilidade térmica de 14,03 pm/°C, embora não seja observada maiores discrepâncias entre as diferentes cápsulas como mostrado na TABELA 1.



**Figura 1 - Comparação dos tratamentos térmicos entre diferentes encapsulamentos para a FBG**  
Adaptado de: MAMIDI et al,2014

**Tabela 1 - Comparação entre diferentes encapsulamentos.**

Encapsulamento	Capacidade térmica (°C)	Condutividade térmica (W/m.K) a 25 °C
Carboneto de silício	2,730	60
Vidro de borossilicato	500	1,14
Aço inox	1,400	16
Cobre	600	401
Nitreto de Alumínio	1,700	150

Fonte: MAMIDI et al, 2014.

## 1.2 MOTIVAÇÕES

A motivação que leva a realização deste trabalho é devida a relativa fragilidade e dificuldade para aplicação de sensor em fibra ótica sem encapsulamento. Além disso, a fibra ótica tem a sua cobertura de acrilato degradada o que pode facilitar o rompimento após a mesma ser submetida a temperaturas acima de 120 °C.

Neste trabalho, dois tipos de encapsulamento por tubos capilares são utilizados para testes em altas temperaturas: a cerâmica alumina ( $Al_2O_3$ ) e o aço inox.

O encapsulamento com a alumina possui o benefício de ser um material cerâmico, assim não interage com campos eletromagnéticos durante medições, porém é quebradiça e sem os devidos cuidados pode danificar o sensor ótico dentro dela.

O aço inox é mais resistente estruturalmente do que a alumina e a fibra nua, assim o manuseio torna-se mais fácil e a chance de dano no sensor é menor, porém

existe o inconveniente de ser um material metálico podendo interagir com campos eletromagnéticos.

Esses encapsulamentos são comparados para verificar se há perda significativa de sensibilidade térmica com o uso das cápsulas.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a produção de sondas de altas temperaturas utilizando FBGs e RFBGs.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Gravar sensores de redes de Bragg em fibra ótica (FBG);
- Gravar sensores de redes de Bragg em fibra ótica hidrogenada (rede semente);
- Produção de redes de Bragg em fibra ótica regeneradas (RFBG) através do tratamento térmico em altas temperaturas ( $\sim 850$  °C);
- Encapsulamento dos sensores com alumina e aço inox para produção das sondas de temperatura;
- Caracterização e comparação das sondas de temperatura utilizando forno elétrico programável.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 traz uma revisão da literatura explicando sobre as características das fibras óticas, o funcionamento de um sensor baseado em redes de Bragg em fibra ótica, como ocorre a gravação de redes de Bragg em fibra ótica, técnicas de fotossensibilização, o uso da máscara de fase para gravação de Redes de Bragg em fibra ótica, o uso das FBGs para medição em altas temperaturas, o uso de recobrimento metálico e encapsulamento em FBGs.

No capítulo 3 é vista a metodologia utilizada, os tipos de fibras óticas utilizadas, os tipos de encapsulamentos, a montagem experimental das sondas de temperatura, o arranjo experimental para gravação de FBGs e tratamento térmico das FBGs no forno. Por final há também a determinação das sensibilidades térmicas das FBGs.

O capítulo 4 mostra os resultados das aquisições e processamento dos dados em formato de gráfico.

O capítulo 5 traz a conclusão deste trabalho e compara com trabalhos semelhantes e ao final apresenta propostas para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

As fibras óticas são estruturas cilíndricas alongadas feitas de vidro inorgânico sólido, normalmente dióxido de silício (sílica), que possuem uma resistência à temperatura até aproximadamente 1600 °C. Este material dielétrico conduz em seu interior a radiação eletromagnética, é utilizado principalmente nas janelas de comunicações óticas tipicamente nas regiões próximas de 820 nm, 1310 nm e 1550 nm, onde em tais bandas apresentam-se os menores coeficientes de atenuação e/ou dispersão cromática, mas também pode operar na faixa visível do espectro eletromagnético (AGRAWAL, 2002).

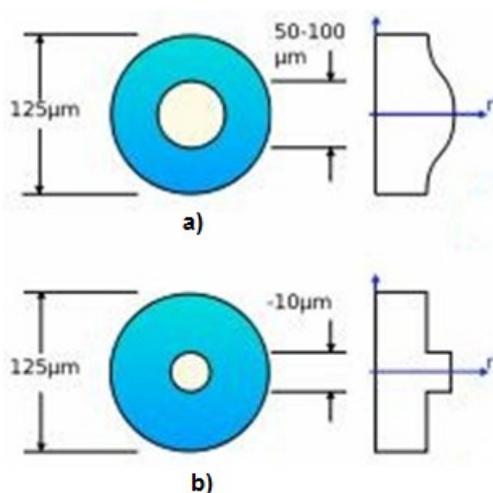
As fibras óticas apresentam duas estruturas concêntricas principais: núcleo e casca. O núcleo possui um índice de refração levemente superior ao da casca fazendo a luz em seu interior refletir na interface núcleo-casca de modo que a refração pela casca seja a menor possível, assim transmitindo a luz por vários quilômetros com razoável baixa perda de potência. A diferença de índice de refração entre núcleo e casca é aproximadamente 1% e o núcleo pode ter um diâmetro entre 7  $\mu\text{m}$  a 9  $\mu\text{m}$  em fibra monomodo padrão de telecomunicações (SMF - *Single mode fiber*) e 50  $\mu\text{m}$  ou 62,5  $\mu\text{m}$  em fibra multimodo (MMF – *Multimode fiber*), e diâmetro externo de 125  $\mu\text{m}$ . Há fibras para aplicações especiais, não utilizadas nesse trabalho, tais como as PCFs e Hibi.

No processo de fabricação de fibras óticas para telecomunicação, normalmente acrescenta-se pequena concentração de germânio (Ge) como dopante, para incrementar o índice de refração do núcleo, ainda na fase de fabricação da preforma.

Dois tipos de modos de propagação podem ser encontrados em fibras óticas, as monomodo (SMF) e as multimodos (MMF). A fibra monomodo possui uma componente principal de propagação da luz, que está relacionada normalmente ao pequeno diâmetro de núcleo (9  $\mu\text{m}$ ), porém quando tal fibra desenvolvida para trabalhar no infravermelho é operada na banda do visível, apresentam alguns poucos modos de propagação, devido ao fato de ocorrer um aumento no valor da frequência normalizada ( $v$ ) devido à redução no comprimento de onda de operação. As fibras monomodos possuem baixa atenuação (0,35 dB/km em 1310 nm e 0,2 dB/km em 1550 nm) e elevada largura de banda (10 a 100 GHz/km) (AGRAWAL, 2002). São aplicadas em redes de altas taxas e longas distâncias.

As fibras multimodo possuem um núcleo maior (50  $\mu\text{m}$  ou 62,5  $\mu\text{m}$ ) e comportam vários modos de propagação, em telecomunicações são utilizadas para redes locais.

As fibras ainda podem ser classificadas em índice degrau e índice gradual, (FIGURA 2). Na primeira a casca e o núcleo são bem definidos pela diferença de índice de refração (FIGURA 2, b). No segundo caso, o índice de refração vai incrementando a partir da interface casca-núcleo até o centro do núcleo (FIGURA 2, a).



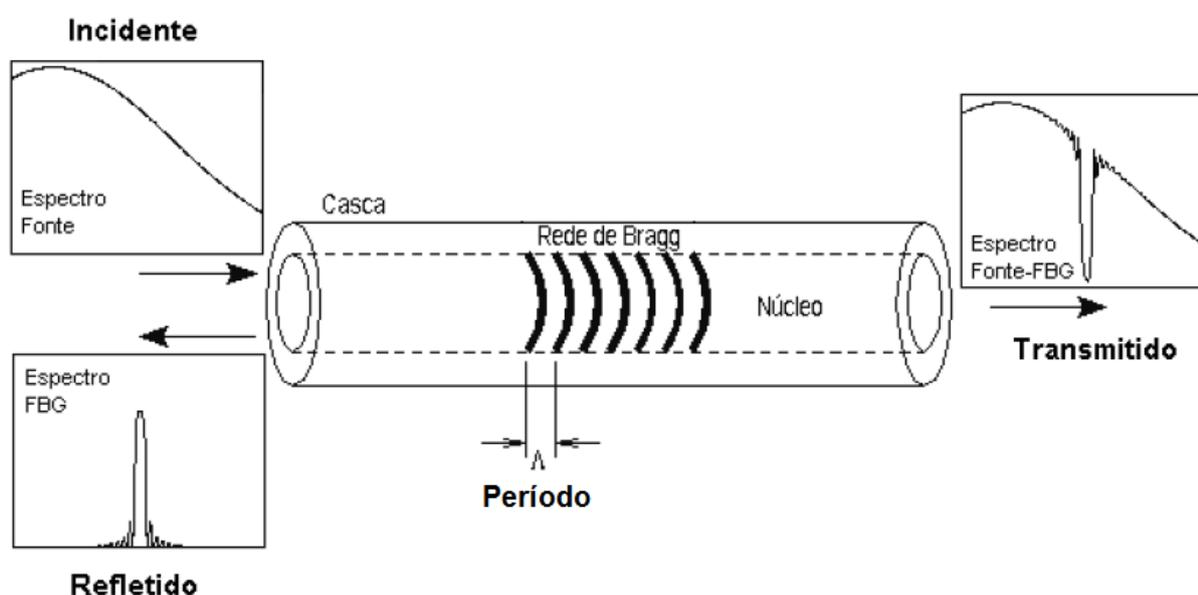
**Figura 2 - Comparação entre fibras de índice gradual a) e fibras com índice degrau b)**  
 Fonte: adaptado de [www.stconsulting.com.br](http://www.stconsulting.com.br) (2018)

## 2.1 REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

As FBGs são filtros de guia de onda ótico e sintonizáveis de alta qualidade com baixa perda por espalhamento e seletividade para extremamente altas frequências (HILL; JOHNSON; KAWASAKI, 1978).

As redes de Bragg possuem características inerentes que as tornam mais versáteis, quando comparadas aos sensores convencionais, como elevada imunidade à interferência eletromagnética, razoável durabilidade em altas temperaturas, grande resistência a corrosão à vários agentes químicos, além de pequenas dimensões e possibilidade da multiplexação de sensores para um sensoriamento quasi-distribuído (KASHYAP, 1999)

A modulação do índice de refração do núcleo da fibra assemelha-se a montagem de diversos planos de reflexão perpendiculares ao eixo longitudinal da fibra. Quando a rede de Bragg é iluminada com uma fonte ótica banda larga, uma parcela da radiação incidente é refletida pelos sucessivos planos, e o sinal remanescente é transmitido. Normalmente em instrumentação utiliza-se o sinal refletido. A FIGURA 3 mostra a representação esquemática da operação da FBG e os espectros da luz incidente, refletida e transmitida (OTHONOS; KALLI, 1999).



**Figura 3 - Representação esquemática da operação da FBG quando submetida a iluminação por fonte banda larga. Parte da luz é refletida e a restante transmitida**  
**Fonte: Adaptado de (OTHONOS; KALLI, 1999)**

O espectro refletido apresenta banda estreita ( $\Delta\lambda$ ), com o comprimento de onda central denominado de comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ) e determinado pela condição de Bragg, conforme mostrado na equação 1 (OTHONOS; KALLI, 1999).

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

Onde  $\Lambda$  é o período da modulação espacial da rede de Bragg,  $\lambda_B$  é o comprimento de onda central do espectro refletido ou transmitido da rede de Bragg e  $n_{eff}$  é o índice de refração efetivo no núcleo da fibra.

A refletividade de uma FBG no comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ), obedece a equação 2:

$$R_{max} = \tanh^2(\Omega l) \quad (2)$$

Sendo

$$\Omega = \frac{\pi \Delta_n M_p}{\lambda}$$

Onde  $R_{max}$  é a refletividade máxima,  $\Omega$  é o coeficiente entre as ondas incidentes e refletidas,  $l$  é o comprimento total da rede,  $\Delta_n$  é a amplitude da modulação,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $M_p$  é a potência do modo contida no núcleo (MELTZ; MOREY; GLENN, 1989).

Outras importantes características nas redes de Bragg são as sensibilidades a deformação longitudinal e temperatura (HILL; JOHNSON; KAWASAKI, 1978). As alterações dos parâmetros externos, como variações no período da rede  $\Delta l$  ou variações de temperatura  $\Delta T$ , podem resultar em mudanças no índice efetivo  $n_{eff}$  e/ou no período da rede  $\Lambda_B$ , resultando numa mudança no comprimento de onda de Bragg  $\lambda_B$ , escrito como mostra a equação 3:

$$\Delta \lambda_B = 2 \left[ \frac{\Lambda \partial n_{eff}}{\partial l} + \frac{n_{eff} \partial \Lambda}{\partial l} \right] \Delta l + 2 \left[ \frac{\Lambda \partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{n_{eff} \partial \Lambda}{\partial T} \right] \Delta T \quad (3)$$

O termo  $\frac{\Lambda \partial n_{eff}}{\partial l} + \frac{n_{eff} \partial \Lambda}{\partial l}$  é devido ao efeito da tensão longitudinal.

O termo  $\frac{\Lambda_B \partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{n_{eff} \partial \Lambda}{\partial T}$  é ao efeito da temperatura na fibra.

O termo  $\frac{\Lambda \partial n_{eff}}{\partial T}$  é responsável pelo efeito termo-ótico.

O termo  $\frac{n_{eff}\partial\lambda}{\partial T}$  é responsável pelo efeito da expansão térmica.

O termo  $\frac{n_{eff}\partial\lambda}{\partial l}$  é responsável pelo efeito elasto-ótico.

As sensibilidades espectrais típicas da rede de Bragg padrão são de 13,7 pm/°C para mudanças de temperatura e 1,2 pm/με de deformação sendo que esses coeficientes são aplicados para um comprimento de onda de Bragg próximo aos 1550 nm. Essas sensibilidades estão correlacionadas, portanto é necessário técnicas de solução de sensibilidades cruzadas. A resposta da sensibilidade térmica para FBG é um polinômio de segundo grau (OTHONOS; KALLI, 1999).

Uma variação da temperatura  $\Delta T$  acarreta num desvio de comprimento de onda  $\Delta\lambda_{BT}$ , expresso pela equação 4:

$$\Delta\lambda_{BT} = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \quad (4)$$

Sendo  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica do material da fibra e  $\xi$  o coeficiente termo ótico da fibra, sendo este último o coeficiente dominante e responsável por cerca de 95 % do deslocamento do comprimento de onda. O coeficiente  $\alpha$  só é significativo para temperaturas superiores a 800 °C (KERSEY et al, 1997).

### 2.1.1 Aplicações para redes de Bragg em fibra ótica

Sensores óticos baseados em redes de Bragg tem se mostrado úteis na monitoração estrutural (GÓRRIZ; ZAFORTEZA; GARCÍA; MAICAS, 2017), na indústria de petróleo e gás, instrumentação em máquinas elétricas (PEREIRA et al, 2016), monitoramento biomédico (FRANCO, 2017), sensoriamento distribuído (RAO et al, 1996) entre outras aplicações. As medidas são obtidas através da temperatura, deformação, pressão, índice de refração em líquidos, vibração e outros (KERSEY et al, 1997). O parâmetro físico mensurado é correlacionado com o deslocamento

espectral da banda ressonante do espectro refletido pela rede de Bragg ( $\Delta\lambda_B$ ) (HILL; JOHNSON; KAWASAKI, 1978; KERSEY et al, 1997).

Em sistemas de telecomunicações, as FBGs podem ser aplicadas na compensação da dispersão (WILLIAMS *et al*, 1994) e nos sistemas multiplexados por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength-division Multiplex*), onde filtros de ondas feitos por FBG provém diferenças precisas de frequências que são usadas para separar os canais individuais (HILL; JOHNSON; KAWASAKI, 1978; Gu, 1998).

## 2.2 GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

A rede de Bragg é um dispositivo passivo baseado na modulação do índice de refração no núcleo da fibra ótica. A modulação do índice de refração tem sido produzida normalmente expondo a fibra ótica à uma radiação ultravioleta (UV) de alta energia, em um padrão de interferência obtido através de uma máscara de fase ou processo interferométrico (MELTZ; MOREY; GLENN, 1989; HILL et al, 1993).

A energia é concentrada, em maior parte, no núcleo da fibra ótica. A presença de impurezas ou o germânio (dopantes) e a utilização de técnicas para aumento de fotossensibilidade, tais como a hidrogenação, utilização de fibras fotossensíveis e *flame-brush*, favorecem a mudança do índice de refração, gravando a rede de Bragg e pouca ou nenhuma alteração ocorre na casca, além de que o sinal é guiado essencialmente pelo núcleo (KASHYAP, 1999).

### 2.2.1 Fotossensibilidade em fibra ótica

Para que ocorram mudanças de índice de refração no núcleo de uma fibra ótica algumas condições devem ser respeitadas. Tais mudanças são devido à fotossensibilidade da fibra, que quando exposta à luz adequada, provoca uma mudança no índice de refração no núcleo. Em fibras dopadas com germânio (germanosilicato) ocorre uma absorção mais forte da luz na banda centrada em 240

nm, por isso são utilizados *lasers* com comprimento de onda de 244 nm e 250 nm. Essas bandas de absorção são conhecidas como centro de cores, durante uma gravação na fibra há a formação de centros de cores normalmente feitos pela irradiação ultravioleta que atua nas ligações de Ge, Si e OH (hidroxila). As bandas de absorção do silício situam-se em 160 nm, 173 nm, 215 nm, 245 nm, 260 nm e 630 nm. Já as bandas de absorção do germanosilicato ocorrem em 180 nm, 213 nm, 240 nm, 281 nm, 325 nm, 517 nm e 630 nm. (KASHYAP, 1999).

As redes de Bragg, uma vez gravadas, podem ser caracterizadas classicamente em três tipos principais: Tipo I, Tipo IIA e Tipo II (OTHONOS, 1999). As redes Tipo I são as mais comuns de serem gravadas, pode-se usar um feixe de luz pulsado ou contínuo, resultando em um incremento do índice de refração ( $\Delta n > 0$ ) e está associada aos centros de cores, possuem uma resistência à temperatura até aproximadamente 300 °C. As redes de Tipo IIA surgem após um apagamento parcial ou total de do espectro de uma rede do Tipo I, seguido por um crescimento espectral acompanhado de um decréscimo do  $\Delta n$ , possui uma resistência à temperatura de até próximo dos 500 °C. Está associada a fenômenos de densificação e compactação. A rede Tipo II apresenta altos incrementos de  $\Delta n$  devido à alta energia utilizada durante a gravação. Resulta em defeitos físicos na matriz de sílica, possui uma resistência à temperatura de até 800 °C (KASHYAP, 1999; OTHONOS; KALLI, 1999). Existem outras classificações de tipos de redes de Bragg e o fenômeno ocorrido na gravação ainda é discutido (CANNING *et al*, 2006).

### 2.2.2 Hidrogenação de fibras óticas

Algumas técnicas são empregadas para aumentar a fotossensibilidade da fibra, a mais comum é a hidrogenação. Esta técnica consiste em expor a fibra durante um período de tempo (normalmente cinco dias) ao hidrogênio a uma pressão entre 20 -750 atmosferas (comum 150 atmosferas) em temperatura ambiente.

A difusão do hidrogênio para o interior da fibra ( $D$ ) segue o que mostra a equação 5:

$$D = 2,83.10^{-4} e^{\frac{-40,19 \text{ kJ/mol}}{RT}} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (5)$$

Onde  $R = 8,311 \text{ J/(K.mol)}$  e  $T$  é a temperatura em Kelvin (K), portanto a difusão é dependente da temperatura e da pressão (KASHYAP, 1999).

Ocorre a difusão do hidrogênio molecular para o interior da fibra que acaba modificando o índice de refração local seguindo os modelos de Kramers-Kronig. Uma vez que a fibra foi hidrogenada (aumentando a fotossensibilidade), quando exposta a luz UV ocorre uma dissociação do  $\text{H}_2$  e a formação de centros Si-OH/Ge-OH criando defeitos de forma facilitada (ZHANG; KAHRIZI, 2007).

### 2.2.3 Utilização de fibras óticas fotossensíveis

Para aumentar a fotossensibilização das fibras óticas e auxiliar na gravação da rede de Bragg, alguns dopantes são acrescentados na fibra ótica ainda durante seu processo de fabricação da preforma. Os dopantes mais comuns utilizados são o boro (B), flúor (F), fósforo (P) e estrôncio (Sn). O boro é acrescentado na casca da fibra ótica diminuindo seu índice de refração, o mesmo efeito causado pelo flúor e pelo fósforo. Em relação a uma fibra ótica de telecomunicações monomodo, a fibra dopada com boro obtém uma modulação máxima do índice de refração 40% maior e um tempo de gravação seis vezes menor (KASHYAP, 1999). Assim as fibras dopadas com boro facilitam a obtenção de redes tipo IIA que são melhores para a obtenção de redes de Bragg regeneradas (RFBG) (CANNING, 2002).

### 2.2.4 Técnica *Flame-brush*

A técnica *flame-brush* é utilizada para incrementar a fotossensibilidade em fibras óticas dopadas com germânio. Consiste em passar uma chama carregada com hidrogênio (H) e um pouco de oxigênio (O) em uma região da fibra ótica. A temperatura alcançada pela chama é em torno de  $1700 \text{ }^\circ\text{C}$  e o processo dura cerca de 20 minutos. Nestas temperaturas o hidrogênio rapidamente difunde para o interior

da fibra e combina com o vidro de silicato para produzir centros de cores que absorvem fortemente na banda de 240 nm tornando o núcleo altamente fotossensível. Com relação à fibra ótica padrão de telecomunicações, a técnica *flame-brush* incrementa a sensibilidade em uma média de dez vezes (OTHONOS, 1999).

### 2.2.5 Gravação de FBG utilizando máscara de fase

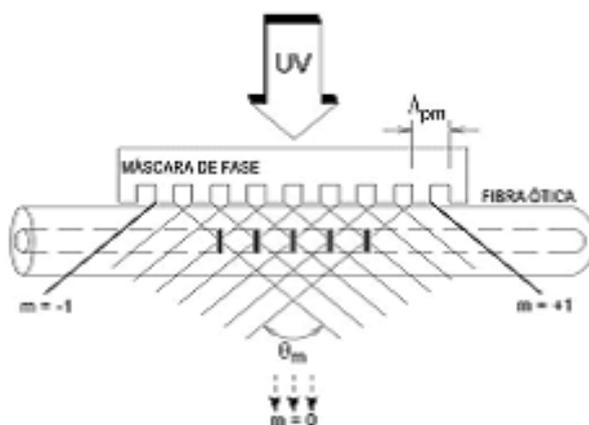
O primeiro método de gravação de rede de Bragg em fibra ótica - FBG utilizava técnica de gravação interna, que apresentavam comprimento de onda de Bragg -  $\lambda_B$  definido pelo comprimento de onda do *laser*. Os filtros produzidos consistiam em FBGs com 1 metro de comprimento, para apresentar uma refletividade considerável, redes muito longas para a maioria das aplicações em sensoriamento. Naquelas gravações utilizavam fibra de sílica fundida com núcleo dopado com germânio (HILL; JOHNSON; KAWASAKI, 1978).

Técnicas de gravação externas se popularizaram nos últimos anos e são classificadas em dois tipos básicos: holográficas/interferométricas e não interferométricas. Na técnica interferométrica, o feixe do *laser* de gravação é dividido em dois feixes através de rede de difração, e depois sobrepostos de maneira que formem padrões de interferência e estes acabam por modular o índice de refração no núcleo da fibra (MELTZ; MOREY; GLENN, 1989). Alguns interferômetros podem ser construídos utilizando uma máscara de fase para a difração do feixe UV e permitindo a gravação de FBGs entre 600 nm até 1300 nm (WANG *et al*, 2001). Este tipo de método possui a vantagem da sintonização do comprimento de onda de Bragg, pois o período da rede gravada na fibra é determinado pela variação angular em espelhos nos dois braços do interferômetro, mas possui a desvantagem de ser muito sensível a vibrações mecânicas devido ao longo caminho ótico percorrido pelos dois feixes antes de sofrerem interferência construtiva no núcleo da fibra.

Na gravação denominada não interferométrica, utiliza-se uma máscara de fase (rede de difração) que gera normalmente a interferência construtiva das ordens difratadas -1 e +1 diretamente no núcleo da fibra, através da iluminação pela luz *laser* (HILL *et al*, 1993; ANDERSON *et al*, 1993). Como vantagem deste método tem a

relativa facilidade de gravação, pois a máscara de fase fica muito próxima da fibra que sofrerá a gravação e de tal forma os efeitos devidos à vibrações mecânicas são menos significantes no processo. Como desvantagem temos o fato do comprimento de onda de Bragg -  $\lambda_B$  ser correlacionado diretamente ao período – *pitch* ou  $\Lambda_{pm}$  da máscara de fase utilizada, não sendo possível sintonização no comprimento de onda de Bragg durante o processo de gravação e dessa forma em sistemas com múltiplos  $\lambda_{Bs}$  requerem múltiplas máscaras (KASHYAP, 1999).

A FIGURA 4 apresenta um esquema de gravação de FBG utilizando iluminação *laser* ultravioleta (UV) sobre máscara de fase (rede de difração) (HILL et al, 1993). Os *lasers* são utilizados para gravação de redes de Bragg, pois são idealmente monocromáticos ( $\lambda$  único) e coerentes (emissão de onda com fase constante). A fibra é montada próxima à máscara de fase e a iluminação *laser* UV é difratada pelos sulcos (*groove*) na fase de saída da luz na máscara de fase. Tais sulcos possuem variação espacial  $\Lambda_{pm}$  normalmente periódica. No núcleo da fibra os máximos construtivos provocam a alteração no índice de refração. Em máscaras de fase ordinárias as primeiras ordens  $\pm 1$  difratadas apresentam aproximadamente 35% da luz transmitida em cada uma. A ordem zero do raio difratado possui 3% da luz transmitida (OTHONOS; KALLI, 1999).



**Figura 4 - Esquema de gravação de FBG utilizando uma fonte ótica UV e máscara de fase, mostrando as alterações no núcleo da fibra ótica**  
 Fonte: adaptado de (HILL et al, 1993)

Em processos comuns de gravação de redes de Bragg, o tempo de exposição pode variar desde poucos segundos até vários minutos, dependendo da amplitude espectral da FBG e das condições da aplicação. Durante o tempo de exposição é necessário garantir a estabilidade no padrão de interferência. A flutuação naquela estabilidade deve ser menor que o período da rede (normalmente unidades de  $\mu\text{m}$ ). Então é necessário eliminar correntes de ar, vibrações, variações de temperatura e instabilidade do *laser* para se obter FBGs razoáveis (OTHONOS; LEE, 1995).

A distância de separação entre a fibra e a máscara de fase é de crucial importância para obtenção de FBG de qualidade. A exposição do *laser* sobre a camada de acrilato (primeiro recobrimento protetivo da fibra ótica) pode provocar a degradação desses com liberação de resíduos que podem aderir à máscara, causando prejuízo (DYER; FARLEY; GIEDL, 1995). Tal dano é evitado se for assegurado que o segmento de fibra a ser gravado esteja previamente desencapado e limpo. Em muitas aplicações se faz necessário recobrir ou encapsular a fibra ótica com FBG, estabelecendo a adequada proteção do dispositivo, assunto principal da presente dissertação.

Na FIGURA 5, são apresentados detalhes relacionados ao distanciamento entre máscara de fase e fibra. A coerência temporal não é crítica para a criação de franjas de alto contraste, já a coerência espacial é crítica para formação de franjas de alto contraste. Na FIGURA 5, considerando o núcleo da fibra a uma distância  $h$  da máscara de fase, quando a distância  $h$  aumentar, a separação  $d$ , entre os dois feixes interferindo emergentes da máscara, aumenta. Se a distância  $h$  for além da coerência espacial do feixe *laser* incidente ultravioleta, o contraste da franja de interferência irá deteriorar, no final não resultando em interferência (gravação).

Uma simples trigonometria fornece a expressão mostrada na equação 6.

$$d = 2h \tan(\theta/2) \quad (6)$$

Sendo  $\theta$  o ângulo entre as primeiras ordens +1 e -1.

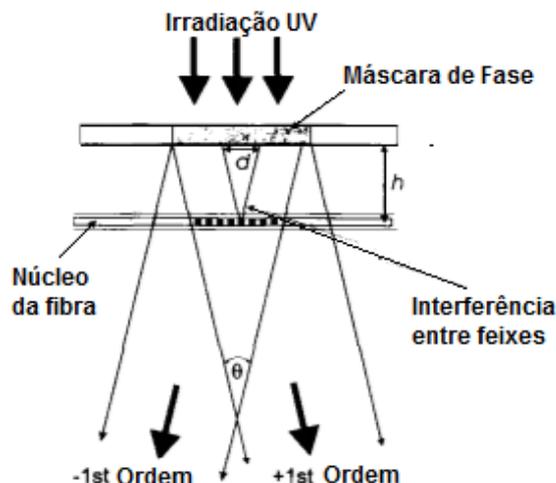


Figura 5 - Feixe ultravioleta iluminando a máscara de fase e padrão de difração formado na fibra  
Fonte: OTHONOS; LEE, 1995

A extensão da coerência espacial para *laser* excímeros comuns é de  $d = 45$   $\mu\text{m}$ , mas pode variar para até poucos mm em *lasers* especiais (OTHONOS; LEE, 1995).

### 2.3 USOS DE FBG A ALTAS TEMPERATURAS

Existe um grande empenho para o desenvolvimento de FBGs que resistam a altas temperaturas, pois existem aplicações para sensoriamento acima de  $400^\circ\text{C}$  (GÓRRIZ; ZAFORTEZA; GARCÍA; MAICAS, 2017), como medição da temperatura de estruturas durante um incêndio, nas quais uma FBG padrão apresentaria degradação de seu espectro em reflexão podendo ser levado ao apagamento completo, além do dano que a temperatura alta causa ao recobrimento polimérico (o acrilato suporta temperaturas de até  $\sim 120^\circ\text{C}$ ) da fibra ótica. Outro tipo de proteção para fibras óticas operarem em altas temperaturas é o uso de recobrimentos metálicos (OLIVEIRA *et al*, 2015).

Sensores convencionais baseados em termopar também necessitam de proteção (sondas de medição INCONEL) ou poço termométrico. O desenvolvimento de encapsulamentos com materiais compostos, metálicos e cerâmicos (como a

alumina -  $Al_3O_2$ ) que apresentam elevada durabilidade a altas temperaturas são estudados na literatura (OLIVEIRA *et al*, 2015).

Muitas técnicas são empregadas para produção de FBGs que resistam a altas temperaturas, tais como o uso de dopantes tanto no núcleo como na casca da fibra ótica (GROOTHOFF; CANNING, 2004; BUTOV; DIANOV; GOLANT, 2006), recozimento térmico (KASHYAP, 1999; CORADIN *et al*, 2013), uso de fibra padrão de telecomunicações (G-652) sem tratamento de hidrogenação e gravação utilizando *laser* excímero KrF (Fluoreto de Criptônio)(OLIVEIRA; MULLER; KALINOWSKI, 2011), uso de outros compostos de vítreos, fibras de safira (GROBINIC *et al*, 2004), uso de *laser* de femtossegundos (fs) para gravação das redes de Bragg (GROBINIC *et al*, 2006) (COSTA *et al*, 2015) e também a regeneração térmica de redes sementes (FOKINE, 2002; CANNING *et al*, 2009; OLIVEIRA; MULLER; KALINOWSKI, 2011)

### 2.3.1 Regeneração de redes de Bragg em fibra ótica

Inicialmente as FBGs regeneradas (RFBG) foram denominadas de redes de composição química (em inglês CCG). Aquelas FBGs foram gravadas utilizando-se de *laser* com irradiação UV e depois feito um tratamento térmico a altas temperaturas (FOKINE, 2002).

A técnica para regeneração consiste em submeter à rede semente (FBG saturada inicial) a temperatura na faixa de 800 - 1100 °C. Naquela temperatura a resposta espectral da rede semente sofre degradação progressiva, podendo extinguir ou apresentar baixa refletividade da ordem de alguns poucos dB e na sequência ocorre um processo, ainda não adequadamente descrito, gerando recrescimento de uma nova rede, denominada de regenerada (RFBG) (CANNING *et al*, 2009). O recrescimento para RFBG apresenta um desvio no  $\lambda_B$  para menor comprimento de onda, deslocamento espectral atribuído à mudança no índice de refração (CANNING *et al*, 2008).

A modulação do índice de refração final na RFBG foi atribuído inicialmente a variação espacial da concentração de flúor no núcleo da fibra ótica, alcançado depois do tratamento térmico, devido á exposição de fibras óticas hidrogenadas contendo

flúor á irradiação UV do *laser*. A estabilidade térmica de tais redes (RFBGs) era considerada limitada pelas propriedades de difusão do dopante utilizado na fibra ótica. Inicialmente foi alcançada uma estabilidade térmica a 1000°C e 1200 °C. O processo de difusão (D) do hidrogênio possui uma dependência quadrática à distância (cm) na fibra ótica, que faz a modulação do período da rede ter um efeito na estabilidade térmica da mesma devido à formação de OH que são defeitos na matriz de sílica resistentes a temperaturas mais elevadas (FOKINE, 2002).

Outra explicação para o processo de regeneração baseia-se no modelo de cristalização da sílica. Este modelo de cristalização leva em conta a fragilidade da RFBG após o tratamento térmico e da casca que não depende diretamente das propriedades do dopante flúor. A sílica vítrea é conhecida por poder cristalizar a altas temperaturas e sob alta pressão. A alta temperatura requerida é da ordem dos 900 °C, enquanto a pressão é aquela oriunda nas diferenças do coeficiente de expansão térmica entre núcleo e casca. Uma FBG inicial Tipo I é formada pela modulação periódica da OH (hidroxila) induzida por uma fonte ultravioleta, a estrutura local aumenta a variação periódica da deformação na interface entre casca e núcleo. A formação de OH no vidro é conhecida por incrementar uma dilatação interna de pressão hidrostática onde se espera a relaxação do vidro em fibras óticas. Ao aquecer a FBG a altas temperaturas leva a uma variação periódica de pressão e, portanto a deformação é suficiente para levar a rede à cristalização (CANNING et al, 2008; BISWAS et al, 2016).

As RFBGs normalmente são produzidas utilizando-se fibras óticas fotossensíveis para obtenção de uma rede semente inicialmente mais saturada (LINDNER *et al*, 2009). As RFBGs já foram produzidas não somente em fibras sem flúor como dopante, mas também em fibras não hidrogenadas (OLIVEIRA; MULLER; KALINOWSKI, 2011; CORADIN et al, 2013) que permaneceram dezenas de horas a temperatura de 800 °C sem apresentarem degradação apreciável na amplitude do sinal refletido, mostrando que os elementos dopantes não são essenciais para a regeneração, mas favorecem muito no processo. A regeneração de redes de Bragg em fibra ótica já foi reportada também em fibras padrão de telecomunicações (CORNING®, SMF-28), mas a maior parte da literatura reporta regeneração em redes de Bragg gravadas em fibras fotossensíveis, nas quais também são obtidas redes sementes saturadas com menor fornecimento de energia do *laser*. O processo de

regeneração já foi obtido durante a deposição de um recobrimento de diamante em fibra utilizando vapores químicos em altas temperaturas.

Redes Tipo IIA também já sofreram processos de regeneração mostrando que a regeneração não se limita a redes Tipo I (BANDYOPADHYAY *et al*, 2008). O intervalo de apagamento, tempo entre o começo da degradação da refletividade até o momento que há o recrescimento em RFBG, diminui com o aumento da temperatura de regeneração para as redes Tipo I (BANDYOPADHYAY *et al*, 2016).

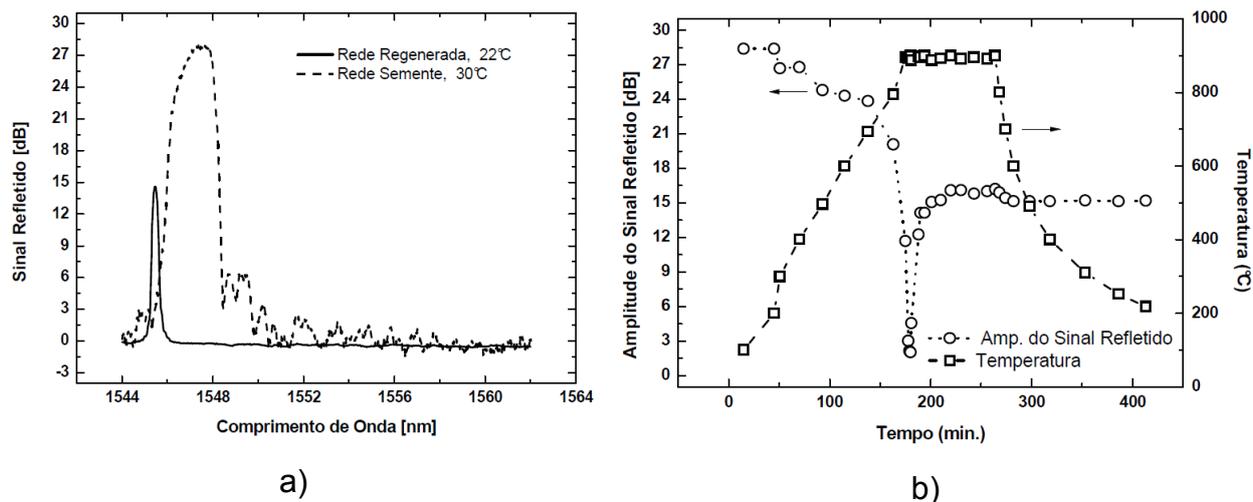
As FBGs que refletem a 800 nm (período aproximado de 0,25  $\mu\text{m}$ ) tem um intervalo de apagamento mais rápido do que FBGs a 1550 nm (período aproximado de 0,5  $\mu\text{m}$ ) durante o tratamento térmico (FOKINE, 2002).

A FBG saturada inicial (rede semente) possui um espectro fortemente saturado que depois do tratamento térmico resulta em uma RFBG, que possui banda espectral mais estreita, tem melhores características espectrais (lóbulos laterais com baixa amplitude) além de estabilidade a altas temperaturas, provendo assim melhores dispositivos e sensores. A literatura mostra estabilidade térmica de RFBGs na ordem de 9.000 horas (LAFONT *et al*, 2013). A regeneração pode ocorrer em temperaturas mais baixas ( $\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), porém o intervalo de apagamento é maior, tornando o processo muito mais lento do que a  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  (OLIVEIRA *et al*, 2015).

As RFBGs podem ainda serem usadas como dispositivos para comunicação ótica como filtros *Notch* refletivo de banda estreita selecionável (MARQUES *et al*, 2012).

A FIGURA 6 (a) mostra os espectros em reflexão de uma rede semente (traçado) em uma fibra SMF G-652 que foi gravada com 1 cm de comprimento utilizando de um *laser* KrF. A reflexão final (traço contínuo) mostra a FBG após o processo de regeneração (RFBG).

A FIGURA 6 (b) mostra o processo de regeneração, onde a temperatura é elevada até  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  com uma rampa de aquecimento de 150 minutos. Em seguida a temperatura é estabilizada a  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 100 minutos, tempo no qual ocorre a regeneração da FBG. O intervalo de apagamento da FBG é de 175 minutos, depois há um recrescimento do sinal refletido até 15 dB (OLIVEIRA, 2012).



**Figura 6 - a) Espectro inicial de uma FBG saturada (traçada) e espectro final da FBG após a regeneração (traço contínuo); b) processo de regeneração, aumento da temperatura até 900 °C (quadrados) com a diminuição da amplitude do sinal refletido (círculos)**  
 Fonte: OLIVEIRA, 2012

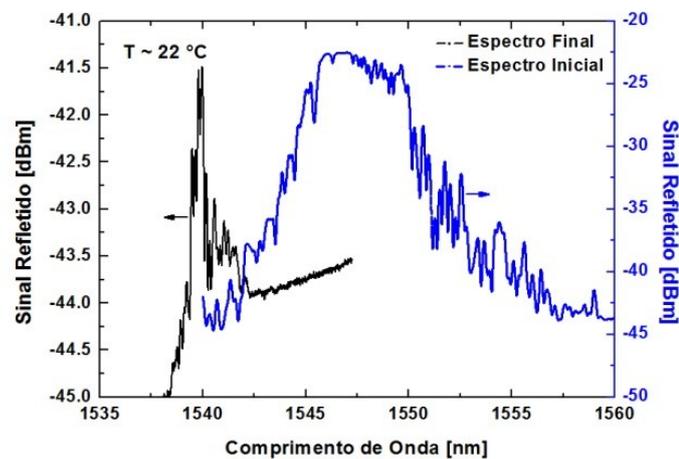
### 2.3.2 FBG com recobrimento metálico

A FBG recoberta com material metálico, na qual uma película metálica é aderida à fibra ótica, é uma solução eficiente para monitoração de estruturas metálicas nos mais diferentes campos de aplicação tais como em componentes estruturais na aeronáutica, estruturas em concreto armado ou metal. Uma fina película de metal, como o alumínio, é depositada sobre a FBG ou RFBG, necessária para proteger durante o manuseio e monitoração, pois principalmente a RFBG possui uma resistência mecânica menor que a FBG, mas também permite aumentar a sensibilidade à deformação de uma estrutura instrumentada com rede de Bragg (Oliveira et al, 2016). O recobrimento metálico também aumenta a temperatura em que as FBGs/RFBGs podem operar em comparação com as FBGs/RFBGs recobertas por acrilato (suportam somente 120°C), limitando-se ao ponto de fusão do metal de recobrimento, resistência da FBG e RFBG à temperatura e do ponto de fusão da fibra ótica.

As RFBGs recobertas também apresentam um rápido intervalo de apagamento, com rápida perda de sinal refletido em altas temperaturas, não sendo necessário à espera de dias ou semanas para verificar se possuem a possibilidade de um comportamento de regeneração.

Alguns recobrimentos metálicos compostos não se mostraram adequados para a aplicação em sensoriamento térmico, devido a apresentarem efeito de histerese, em ciclos de aquecimento/resfriamento e também não apresentam repetitividade (OLIVEIRA *et al*, 2016).

A FIGURA 7 mostra os espectros da rede semente (em preto) e da RFBG (em azul), para o caso da FBG recoberta com Ni. A histerese gerada pelo recobrimento metálico é de aproximadamente 7 nm quando ambas se encontram em uma mesma temperatura.



**Figura 7 - FBG recoberta com uma camada de Ni. Em azul o espectro da rede semente, em preto o espectro da RFBG**  
**Fonte: OLIVEIRA et al, 2016**

### 2.3.3 FBGs encapsuladas

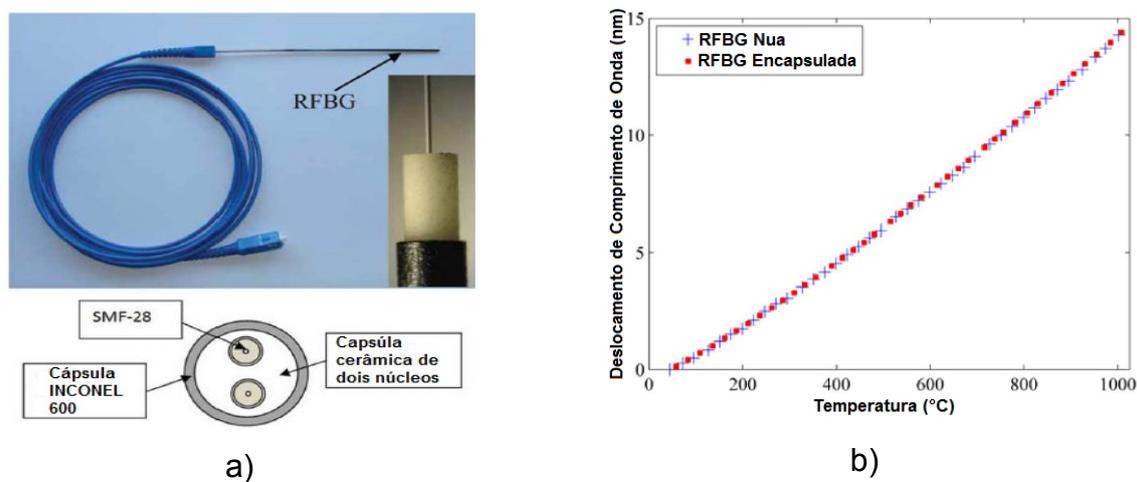
FBGs encapsuladas são produzidas através da aplicação de tubo capilar cerâmico, metálico ou materiais compostos.

No processo de gravação, há necessidade da remoção da cobertura (acrilato) da fibra ótica previamente. Devido a esse procedimento, o segmento descoberto apresenta naturalmente uma maior fragilidade, portanto há necessidade de uma proteção capilar durante o manuseio e a aplicação sensora.

O processo de produção de RFBGs provoca maiores danos à estrutura cristalina, portanto as mesmas são frágeis e extremamente difíceis de manusear em relação à própria FBG. Existem estudos que mostram diferentes possibilidades para encapsulamentos dos sensores em usos como sondas.

A FIGURA 8 (a) mostra a sonda pronta para testes com uma RFBG encapsulada com duas camadas, a primeira cerâmica com dois núcleos e a segunda em metal (INCONEL 600). O encapsulamento consistiu em tubo cerâmico em alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o metal uma liga de Ni (INCONEL 600). O diâmetro interno do tubo de cerâmica é  $130\ \mu\text{m}$ .

Na FIGURA 8 (b) é mostrada as curvas da sensibilidade térmica para a RFBG com recobrimento em alumina e INCONEL 600 (quadrados vermelhos) e fibra nua (cruz roxa) submetidas ao tratamento térmico entre  $20\ ^\circ\text{C}$  e  $1000\ ^\circ\text{C}$ , que não apresentaram histerese durante o tratamento térmico (BARREIRA et al, 2012).



**Figura 8 - a) sonda pronta para testes com uma RFBG encapsulada com duas camadas, uma cerâmica e a outra em metal. b) sensibilidade térmica para a RFBG com recobrimento (quadrados vermelhos) e sem recobrimento (cruz roxa)**

**Fonte: BARREIRA et al, 2012**

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos de gravação de Redes de Bragg em fibra ótica na banda do infravermelho do espectro, acomodação e esquema de funcionamento do forno elétrico utilizado para tratamento térmico, montagem do circuito ótico para aquisição espectral do sinal refletido das FBG e RFBGs, o processo de obtenção de RFBGs, o encapsulamento das FBGs/RFBGs com alumina e aço inox e a determinação da sensibilidade térmica nas FBGs/RFBGs através dos tratamentos térmicos.

#### 3.1 GRAVAÇÕES DAS REDES DE BRAGG

Para gravação de redes de Bragg na banda do infravermelho foram utilizados cinco segmentos de fibras óticas padrão (SMF – *Single Mode Fiber*) G-652. O método de gravação utilizado foi por iluminação direta sob máscara de fase (FIGURA 9) com energia de 2 mJ/pulso, taxa de repetição de 250 Hz, tempo de exposição de 2 minutos, comprimento da rede com 3 mm. O *laser* utilizado no processo de gravação foi o excímero Coherent Xantus Xs ArF (Fluoreto de argônio) com comprimento de onda central de 193 nm e a máscara de fase (Ibsen® Photonics *Pitch* 1058,9 nm) utilizada resultou no comprimento de onda de Bragg em 1532 nm ( $\lambda_B$ ). As FBGs produzidas foram denominadas SSMF1, SSMF2, SSMF3, SSMF4 e SSMF5.

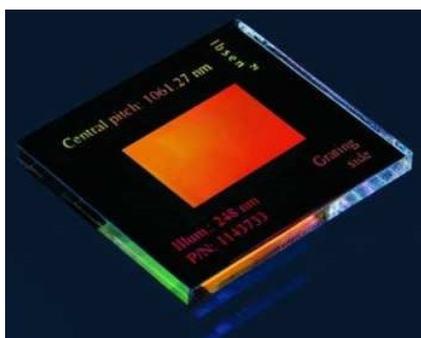


Figura 9 - Máscara de Fase, mostrando sua rede de difração (parte central em laranja), utilizada para gravação de redes de Bragg

Fonte: Ibsen® photonics

Outras três FBGs foram gravadas utilizando fibras óticas hidrogenadas na fibra monomodo padrão (SMF G-652). O processo de hidrogenação para aumento da fotossensibilidade da fibra ótica foi realizado colocando-se as fibras em uma câmara cilíndrica, 5 mm de diâmetro interno e 1 metro de comprimento, pressurizada (80 bar) com gás hidrogênio à temperatura ambiente. As fibras óticas permaneceram pelo menos uma semana dentro da câmara de hidrogenação, antes de serem apresentadas para a gravação. Essas FBGs foram gravadas utilizando-se do *laser* excímero Coherent Xantus Xs KrF (Fluoreto de Criptônio)(comprimento de onda central 248 nm, com energia de 6 mJ, taxa de repetição de 250 Hz e tempo de exposição de 5 minutos por FBG) e máscara de fase (Ibsen Photonics®, *pitch* 1073,5 nm) resultando em redes com comprimento de onda de Bragg em 1553 nm. As FBGs foram nomeadas SSMFH1, SSMFH2, SSMFH3.

A FIGURA 10 apresenta o circuito ótico utilizado para gravação de FBGs. O feixe UV sai do laser excímero KrF (1) passando pelos espelhos (2) e pelo obturador (3) para filtrar o feixe deixando passar apenas a energia condensada ao centro. O feixe é refletido por um espelho móvel (4) para uma lente cilíndrica (5) que concentra os raios em linha para atravessar a máscara de fase (6) gravando na fibra ótica (9). A fibra ótica está conectada a um interrogador ótico (7) que acompanha em tempo real a gravação da FBG e possui um supervisor no Laptop (8) (OLIVEIRA, 2012).

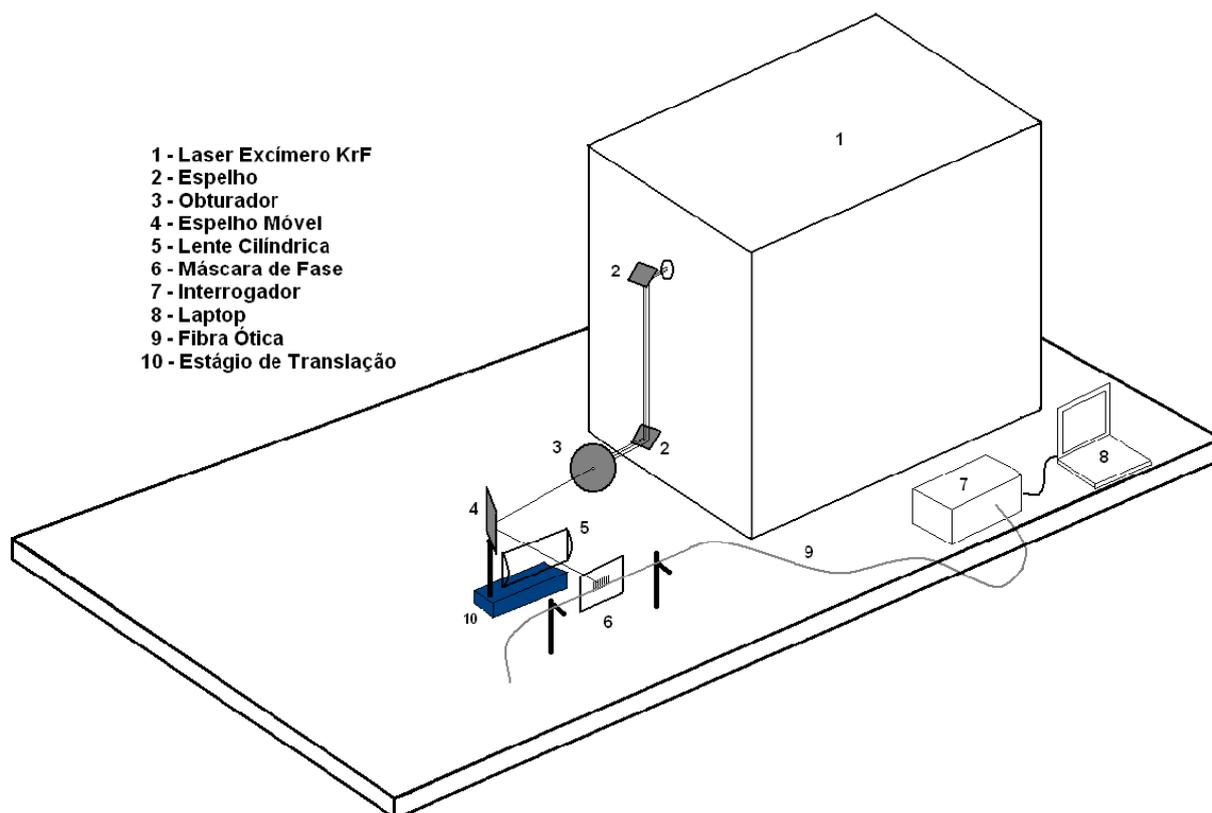


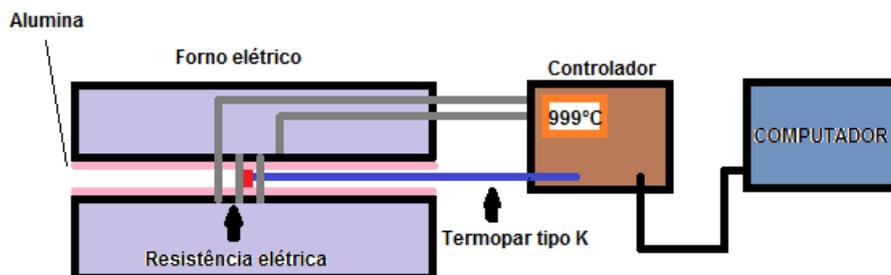
Figura 10 - Processo de gravação de FBGs utilizando máscara de fase e *laser excímero*  
 Fonte: OLIVEIRA, 2012

### 3.2 FORNO ELÉTRICO

Os ensaios para regeneração e para obtenção de sensibilidade térmica foram feitos utilizando-se de um forno elétrico microtubular desenvolvido no laboratório de fotônica – FOTON, na UTFPR. O referido forno é formado por uma pequena câmara cilíndrica em alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  FRIALIT F99.7), 10 mm de diâmetro externo e cavidade com 8 mm, envolvido por de uma resistência elétrica em níquel cromo (30 mm de comprimento, fio na bitola de 1 mm) e recobertas por camadas de lã de rocha e tijolos refratários, como mostra a FIGURA 11.

A faixa de operação varia da temperatura ambiente até 950 °C, com erro em estado estacionário de  $\pm 15$  °C na temperatura máxima de *setpoint*. O acionamento da resistência elétrica, realizado por relé de estado sólido e atuado por um controlador (NOVUS N1200, resolução de 0,1 °C), que utilizava como sensor térmico um termopar tipo K (faixa de operação -200 °C a 1200 °C). Um transformador 12V/20A

fornece a potência elétrica para aquecimento. O ajuste do forno é realizado através de um supervisorio proprietário da NOVUS que permite ao usuário o controle de rampas e patamares de aquecimento.



**Figura 11 - Montagem para tratamento térmico das FBGs e RFBGs, controlador (NOVUS), forno elétrico desenvolvido no próprio laboratório de fotônica (UTFPR) e o computador com supervisorio**  
**Fonte: O autor**

### 3.3 AQUISIÇÃO ESPECTRAL NO INFRAVERMELHO

As FBGs não encapsuladas e as FBGs encapsuladas foram inseridas dentro do forno especificado anteriormente, juntamente com um termopar tipo K, na região central aonde se encontra a resistência de aquecimento.

Os ensaios de tratamento térmico foram acompanhados com as fibras ópticas acopladas a porta 2 a um circulador óptico (banda C), a um analisador de espectro óptico (OSA, Yokogawa 6345, resolução 50 pm) pela porta 3 e a uma fonte óptica de banda larga LED (Thorlabs, SLD 16054) na porta 1, conforme mostrado na FIGURA 12. Os espectros em reflexão das FBGs/RFBGs foram adquiridos em arquivos .CSV e processado através do *software* ORIGIN pro 8, resultando em gráficos do perfil da evolução espectral x Tempo x Temperatura.

### Medição do espectro da FBG/RFBG em reflexão

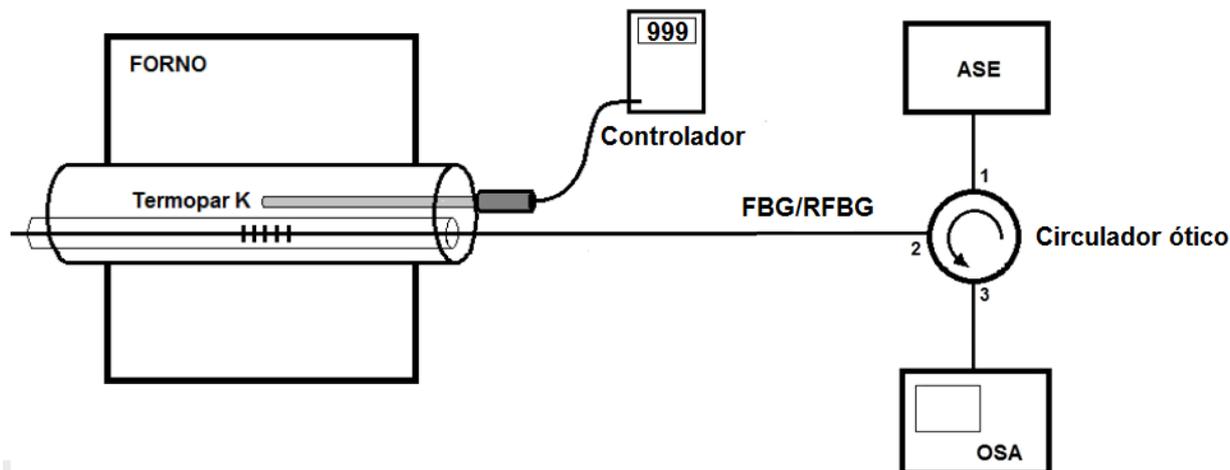


Figura 12 - Arranjo experimental montado para acompanhar o espectro da FBG durante os testes. A leitura do espectro foi feita em reflexão utilizando uma fonte ASE, um circulador óptico e o OSA

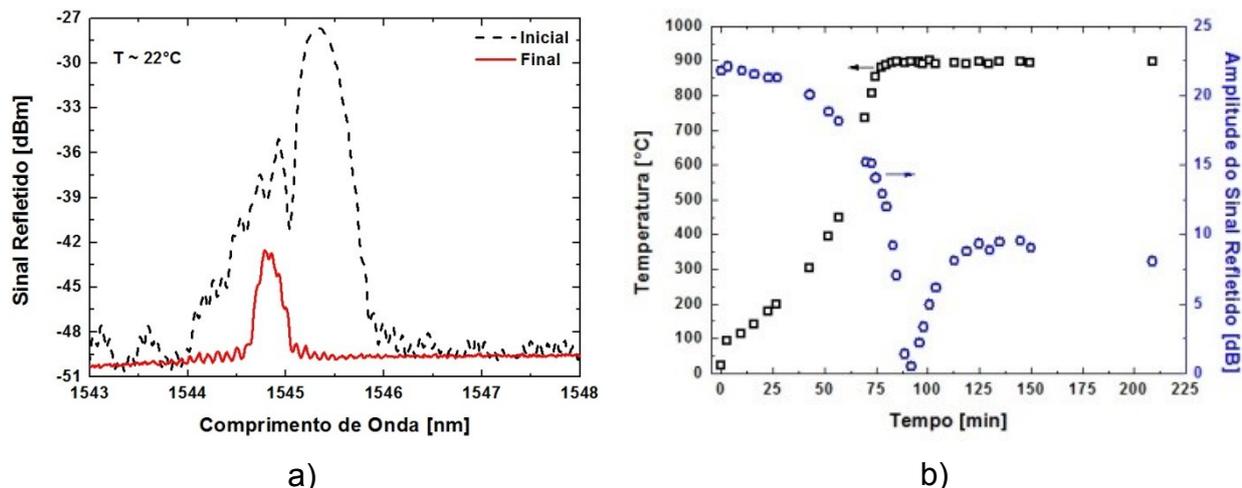
Fonte: adaptado de OLIVEIRA, 2012

### 3.4 PRODUÇÃO DA REGENERAÇÃO

As FBGs hidrogenadas (redes sementes) inseridas dentro do forno foram submetidas ao aquecimento partindo da temperatura inicial (22 °C) até a temperatura de ocorrência da regeneração (850 – 950 °C) em uma rampa de subida de aproximadamente 50 - 75 minutos.

Ao estabilizar o forno na temperatura de ocorrência da regeneração (900 °C), a amplitude do sinal refletido diminui a um valor mínimo (chegando as vezes a zero decibéis), em seguida, a amplitude do sinal refletido aumenta novamente até estabilizar em um valor. A esse processo dá-se o nome de regeneração.

Na FIGURA 13 b), a amplitude do sinal refletido inicia-se com 22 dB seguido por um decaimento do sinal refletido até aproximadamente 0 (dB), em seguida ocorre o processo de regeneração com o retorno da amplitude de sinal refletido até 10 dB.



**Figura 13 - a) Espectro inicial e final da RFBG; b) Aumento da temperatura no forno até 900 °C com a regeneração ocorrendo próximo de 82 minutos do início do experimento**  
**Fonte: autoria própria**

### 3.5 ENCAPSULAMENTO

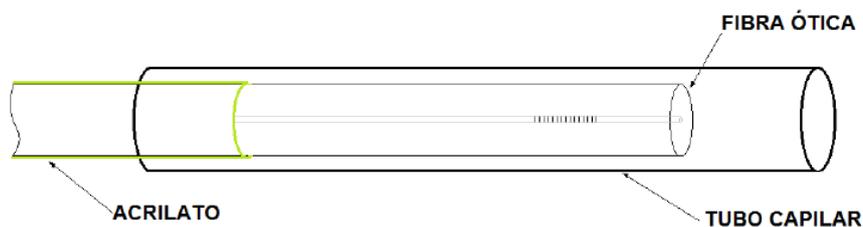
O tratamento térmico das diferentes redes de Bragg foi feito utilizando o forno elétrico já descrito. Os ensaios para mensurar a sensibilidade térmica das FBGs foram feitos utilizando-se diferentes formas de encapsulamentos e também em fibra nua.

Os encapsulamentos utilizados foram:

(1) Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  FRIALIT 121-11100-0) com diâmetro externo 1 mm e o diâmetro interno de 0,5 mm, excelente isolador térmico e elétrico, com condutividade térmica de (30 W/m.K).

(2) Capilar metálico em aço inox (TSTW AISI 304), com 1,55 mm de diâmetro externo e 0,30 mm interno, como apresentado nas FIGURAS 14 e 15. Sua composição é feita de Carbono (C): 0,08%, Cromo (Cr): 18% a 20%, Níquel (Ni): 8% a 10,5%, Manganês (Mn): 2%, Fósforo (P): 0,045%, Enxofre (S): 0,030%, Silício (Si): 0,75%.

### ENCAPSULAMENTO DA FBG



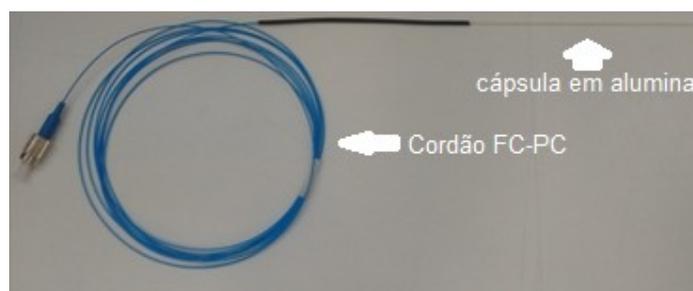
**Figura 14 - Encapsulamento FBG utilizando um tubo capilar, como alumina e aço inox**  
**Fonte: OLIVEIRA, 2012**

As FBGs G-652 foram inseridas nos encapsulamentos sem utilização de adesivo para evitar que a deformação proveniente dos mesmos resultasse em sensibilidade cruzada e assim apenas sensibilização proveniente da temperatura fosse mensurada.

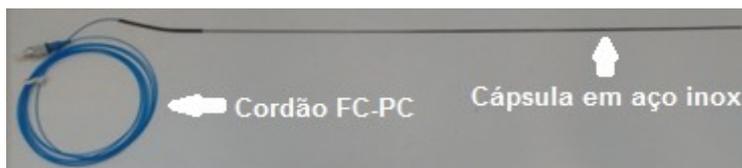


**Figura 15 - Os dois recobrimentos utilizados durante os experimentos de temperatura, acima o tubo de alumina e abaixo o tubo em aço inox**  
**Fonte: autoria própria**

Na FIGURA 16 são mostradas fotografias das redes encapsuladas com o formato final de sonda de temperatura. FIGURA 16 a) cápsula em alumina e em b) capilar aço inox. Percebe-se também o cordão ótico com conector FC-PC.



a)



b)

**Figura 16 - a) FBG encapsulada com alumina, reforço na transição cordão ótico-alumina feito com material termorretrátil. b) FBG encapsulada com aço inox, reforço na transição cordão ótico-aço inox feito com material termorretrátil**

Fonte: autoria própria

### 3.6 DETERMINAÇÃO DE SENSIBILIDADE TÉRMICA

As sensibilidades térmicas foram mensuradas para todas as redes produzidas, tanto para as encapsuladas quanto em fibra nua, através de ciclos de aquecimento, (temperatura entre 22 °C e 500 °C com rampa com duração de 50 minutos).

Em todas as FBGs/RFBGs, em cada condição de recobrimento (aço inox, alumina e fibra nua) três ciclos de aquecimento foram repetidos para mensurar a sensibilidade térmica média. O resfriamento se dava pelo desligamento do forno.

As análises dos dados foram processados em tabelas de dados utilizando o *software* Origin Pro 8, nas quais os dados de temperatura foram obtidos pelo termopar tipo K conectado ao controlador.

Para cada FBG foram feitos três ciclos de aquecimento e para cada encapsulamento mais três ciclos de aquecimento (obtendo sua repetitividade), por meio do qual pôde-se retirar uma média aritmética para cada conjunto de dados de cada tipo de encapsulamento.

A reprodutibilidade é dada pelos sucessivos testes com diferentes FBGs com mesmas características de gravação e mesmas condições de experimento, obtendo-se uma média aritmética geral de sensibilidades térmicas para cada tipo de encapsulamento.

Os dados de temperatura a cada ciclo do tratamento térmico não eram adquiridos todos aos mesmos valores, assim cada ciclo experimental possui sua sensibilidade térmica calculada por aproximação polinomial de segundo grau e a média aritmética é mostrada como uma sobreposição de curvas da repetitividade dos experimentos.

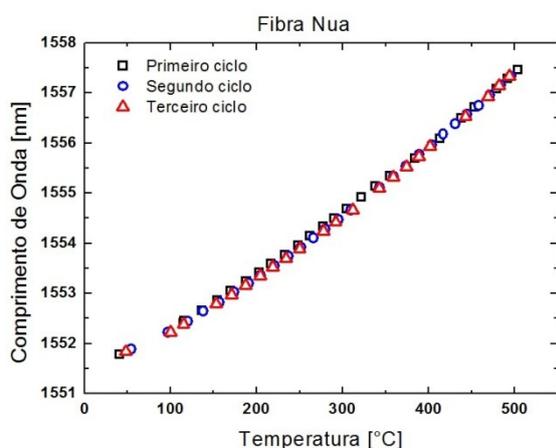
## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os dados apresentados nos gráficos seguintes como quadrados pretos são referentes ao primeiro ciclo de aquecimento para cada tipo de encapsulamento, já os círculos em azul são referentes ao segundo ciclo de aquecimento e os triângulos vermelhos ao terceiro ciclo de aquecimento. Para cada FBG G-652 e RFBG G-652 testada há um gráfico com quadrados verdes (média dos ciclos com fibra nua), círculos roxos (média dos ciclos com alumina) e triângulos amarelos (média dos ciclos com aço inox).

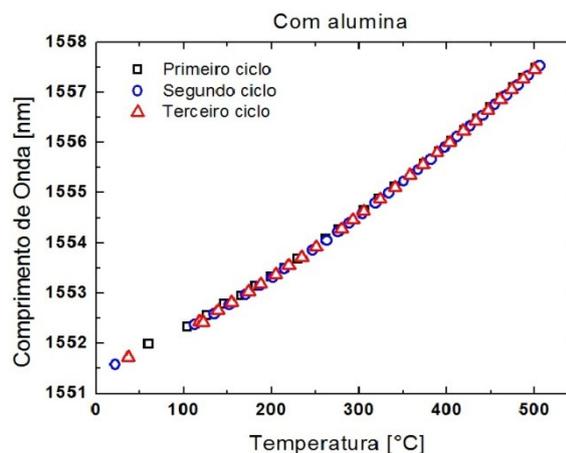
Os experimentos cujos resultados são mostrados das FIGURAS 17 – 21 são de fibras óticas não hydrogenadas.

Os ciclos de aquecimento da FBG SSMF1 são apresentados na FIGURA 17, com gráficos dos experimentos para cada encapsulamento sendo a) fibra nua, b) encapsulamento em alumina e c) encapsulamento com aço inox. Para cada caso foram repetidas três vezes os ciclos de aquecimento. Em todos os encapsulamentos percebe-se uma razoável repetitividade.

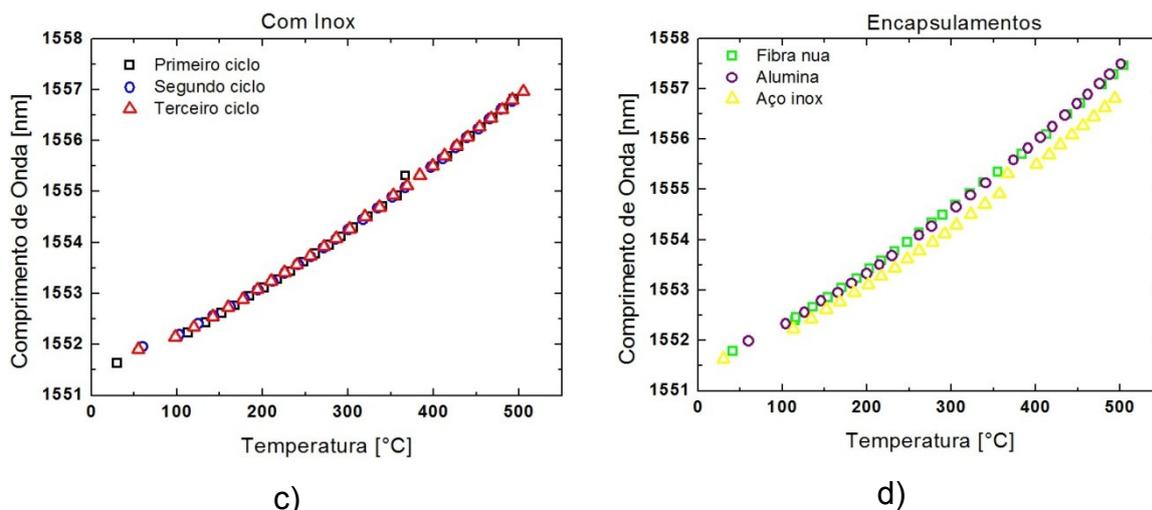
Para a FIGURA 17 (d), o coeficiente angular médio para os experimentos com o encapsulamento em alumina e em fibra nua são os mesmos, na qual difere o aço inox.



a)



b)



**Figura 17 - SSMF1. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada um dos encapsulamentos utilizados**  
**Fonte: autoria própria**

A FBG SSMF1 apresentou sensibilidades térmicas conforme a TABELA 2, com aproximação polinomial de segundo grau, onde se percebeu que o encapsulamento com capilar em aço inox tem sensibilidade térmica média menor (sensibilidade térmica média 15,23 % menor que a fibra nua) quando comparado à sensibilidade térmica média da fibra nua e para o encapsulamento em alumina (sensibilidade térmica média 3,24 % menor que a fibra nua).

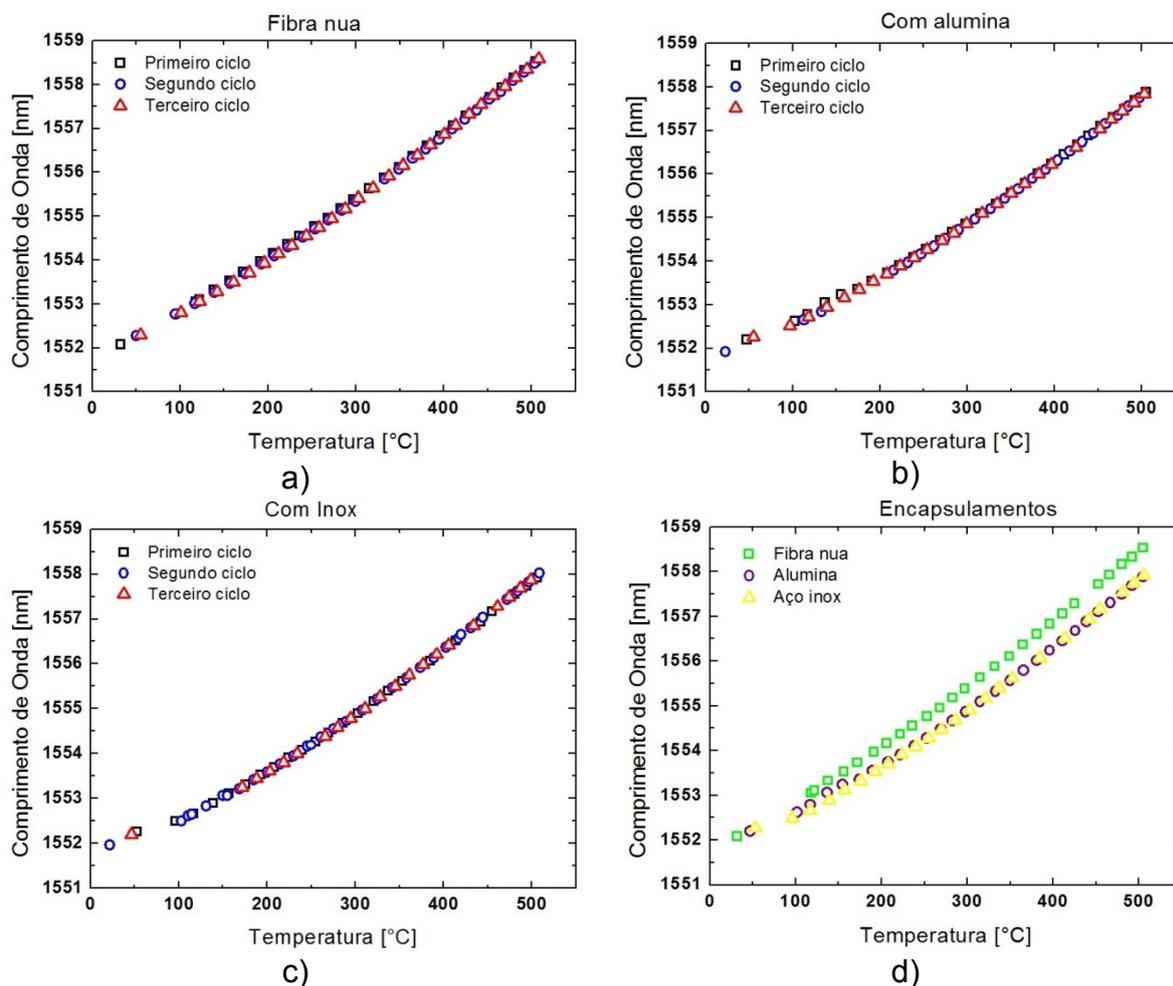
**Tabela 2 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMF1**

Ciclos	Fibra nua (pm/°C)	Com alumina (pm/°C)	Capilar aço inox (pm/°C)
1º	9,02	7,84	7,32
2º	8,15	8,14	6,74
3º	7,84	8,23	7,16
Média + Desvio padrão	Média: 8,34 ± 0,50	8,07 ± 0,17	7,07 ± 0,24

**Fonte: autoria própria.**

Os ciclos de aquecimentos da FBG SSMF2 são apresentados na FIGURA 18, com gráficos dos experimentos para cada encapsulamento sendo a) fibra nua, b) encapsulamento com alumina, c) encapsulamento com aço inox. Os experimentos com cada encapsulamento foram repetidos três vezes e percebeu-se uma boa repetitividade para todos os casos.

Para a FIGURA 18 (d) os encapsulamentos com alumina e com aço inox tem o mesmo coeficiente angular o que difere da fibra nua.



**Figura 18 - SSMF2. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento**

Fonte: autoria própria

A FBG SSMF2 apresentou sensibilidades térmicas, com uma aproximação de um polinômio de segundo grau, conforme a TABELA 3, onde se percebeu que a sensibilidade térmica média do encapsulamento com alumina (sensibilidade térmica média 22,88 % menor que a fibra nua) e do aço inox (sensibilidade térmica média 23,87 % menor que a fibra nua) tem sensibilidades térmicas médias próximas entre si e inferiores quando comparado à sensibilidade térmica média da fibra nua.

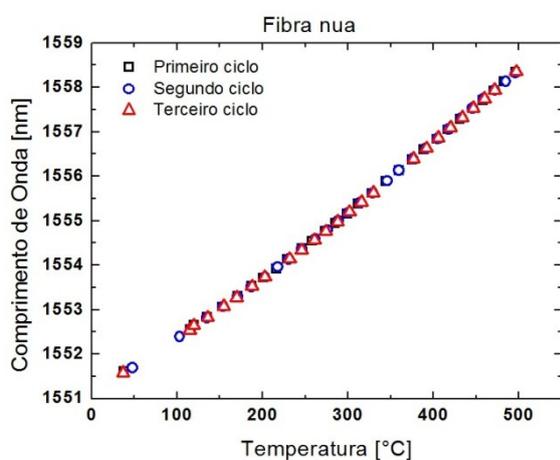
Tabela 3 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMF2

Ciclos	Fibra nua (pm/°C)	Com alumina (pm/°C)	Capilar aço inox (pm/°C)
1°	10,48	7,69	7,89
2°	10,01	7,89	7,90
3°	10,04	7,96	7,46
Média + Desvio padrão	10,18 ± 0,21	7,85 ± 0,11	7,75 ± 0,20

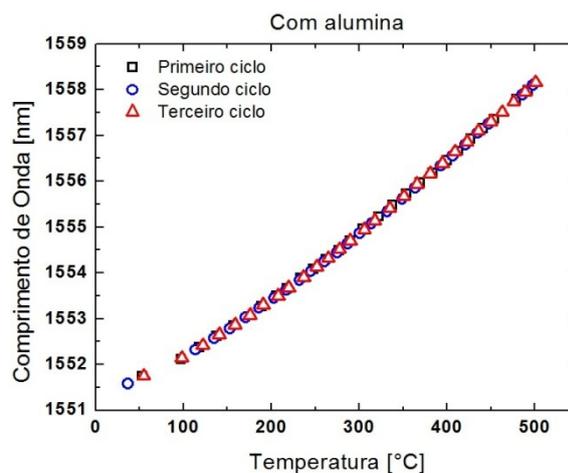
Fonte: autoria própria.

Os ciclos de aquecimentos da FBG SSMF3 são apresentados na FIGURA 19, com gráficos dos experimentos para cada encapsulamento sendo a) fibra nua, b) encapsulamento com alumina, d) encapsulamento com aço inox. Os experimentos com cada encapsulamento foram repetidos três vezes e percebeu-se uma boa repetitividade para todos os casos.

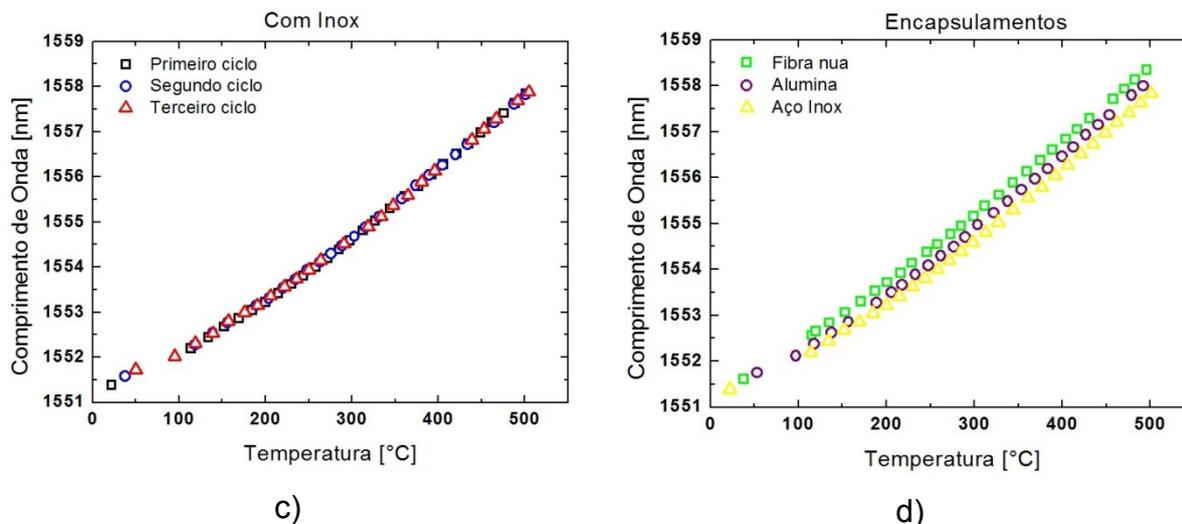
Para a FIGURA 19 (d) cada um dos encapsulamentos tem um coeficiente angular diferente.



a)



b)



**Figura 19 - SSMF3. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento**

Fonte: autoria própria

A FBG SSMF3 apresentou sensibilidades térmicas, com uma aproximação de um polinômio de segundo grau, conforme a TABELA 4, onde se percebeu que o encapsulamento com alumina (sensibilidade térmica média 16,19 % menor que a fibra nua), aço inox (sensibilidade térmica média 25,13 % menor que a fibra nua) e fibra nua tem sensibilidades térmicas médias diferentes entre si.

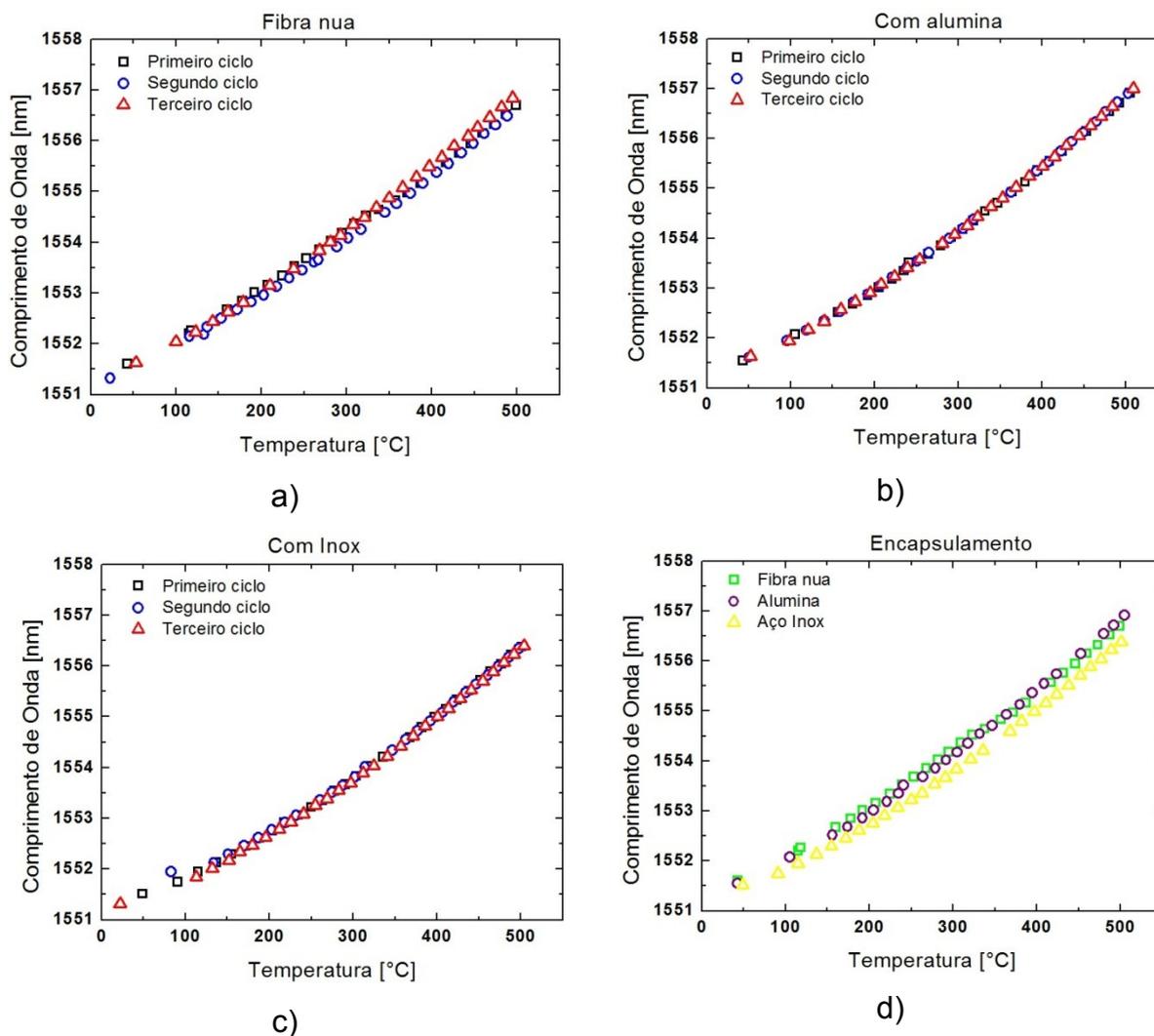
**Tabela 4 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMF3**

Ciclos	Fibra nua (pm/°C)	Com Alumina (pm/°C)	Capilar aço inox (pm/°C)
1°	11,83	10,07	8,82
2°	12,07	9,62	8,95
3°	11,67	10,13	8,86
Média + Desvio padrão	11,86 ± 0,16	9,94 ± 0,23	8,88 ± 0,05

Fonte: autoria própria.

Os ciclos de aquecimentos da FBG SSMF4 são apresentados na FIGURA 20, com gráficos dos experimentos para cada encapsulamento sendo a) fibra nua, b) encapsulamento com alumina, d) encapsulamento com aço inox. Os experimentos com cada encapsulamento foram repetidos três vezes.

Para a FIGURA 20 (a) percebe-se que o segundo ciclo de aquecimento (círculos azuis) tem um coeficiente angular diferente do primeiro e terceiro ciclo. Para a FIGURA 20 (d) cada um dos encapsulamentos tem um coeficiente angular diferente.



**Figura 20 - SSMF4. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento**

Fonte: autoria própria

A FBG SSMF4 apresentou sensibilidades térmicas, com uma aproximação de um polinômio de segundo grau, conforme a TABELA 5, onde se percebeu que o encapsulamento com alumina (sensibilidade térmica média 9,76 % menor que a fibra nua), aço inox (sensibilidade térmica média 27,65 % menor que a fibra nua) e fibra nua tem sensibilidades térmicas médias diferentes.

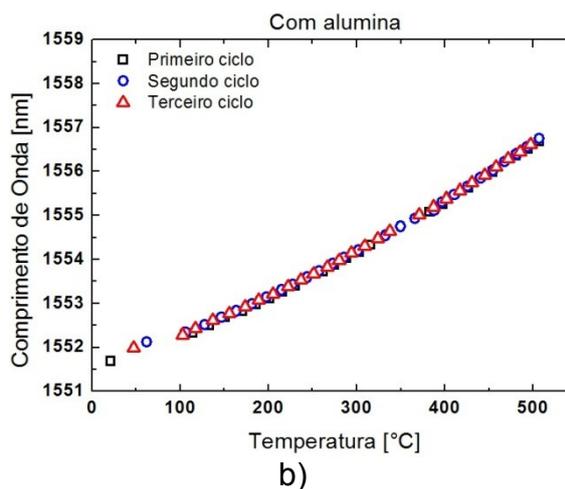
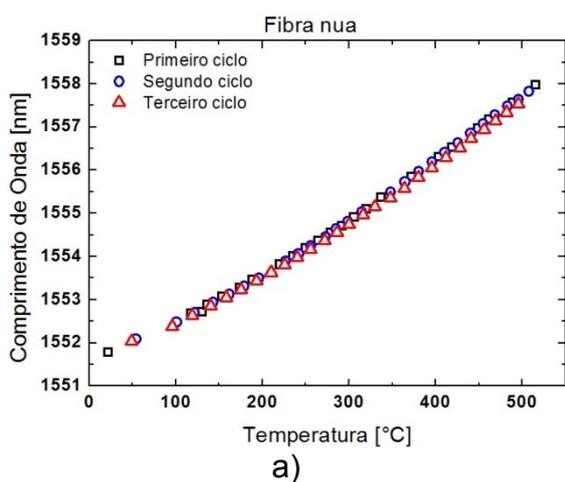
Tabela 5 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMF4

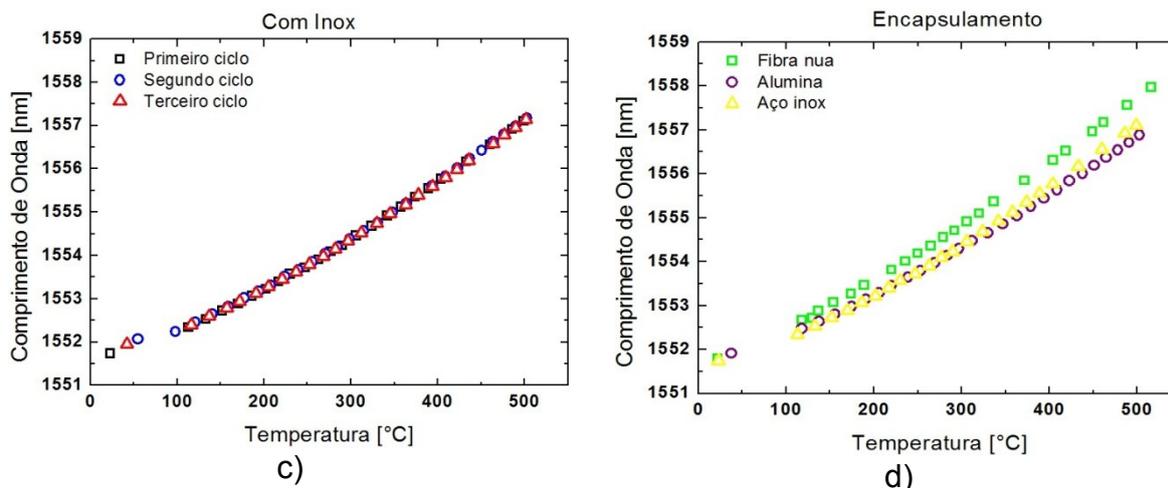
Ciclos	Fibra nua (pm/°C)	Com alumina (pm/°C)	Capilar aço inox (pm/°C)
1º	8,51	7,44	6,30
2º	7,65	7,41	5,33
3º	8,46	7,58	6,18
Média + Desvio padrão	8,21 ± 0,39	7,48 ± 0,07	5,94 ± 0,43

Fonte: autoria própria.

Os ciclos de aquecimentos da FBG SSMF5 são apresentados na FIGURA 21, com gráficos dos experimentos para cada encapsulamento sendo a) fibra nua, b) encapsulamento com alumina, d) encapsulamento com aço inox. Os experimentos com cada encapsulamento foram repetidos três vezes.

Para a FIGURA 21 (a) percebe-se que o terceiro ciclo de aquecimento (triângulos vermelhos) tem um coeficiente angular levemente diferente do segundo e terceiro ciclo. Para a FIGURA 21 (d) cada um dos encapsulamentos tem um coeficiente angular diferente sobrepondo-se inicialmente os ciclos médios dos encapsulamentos com alumina e aço inox.





**Figura 21 - SSMF5. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento**

Fonte: autoria própria

A FBG SSMF5 apresentou sensibilidades térmicas, com uma aproximação de um polinômio de segundo grau, conforme a TABELA 6, onde se percebeu que o encapsulamento com alumina (sensibilidade térmica média 27,09 % menor que a fibra nua) e aço inox (sensibilidade térmica média 22,79 % menor que a fibra nua) possuem sensibilidades térmicas médias próximas entre si.

**Tabela 6 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMF5**

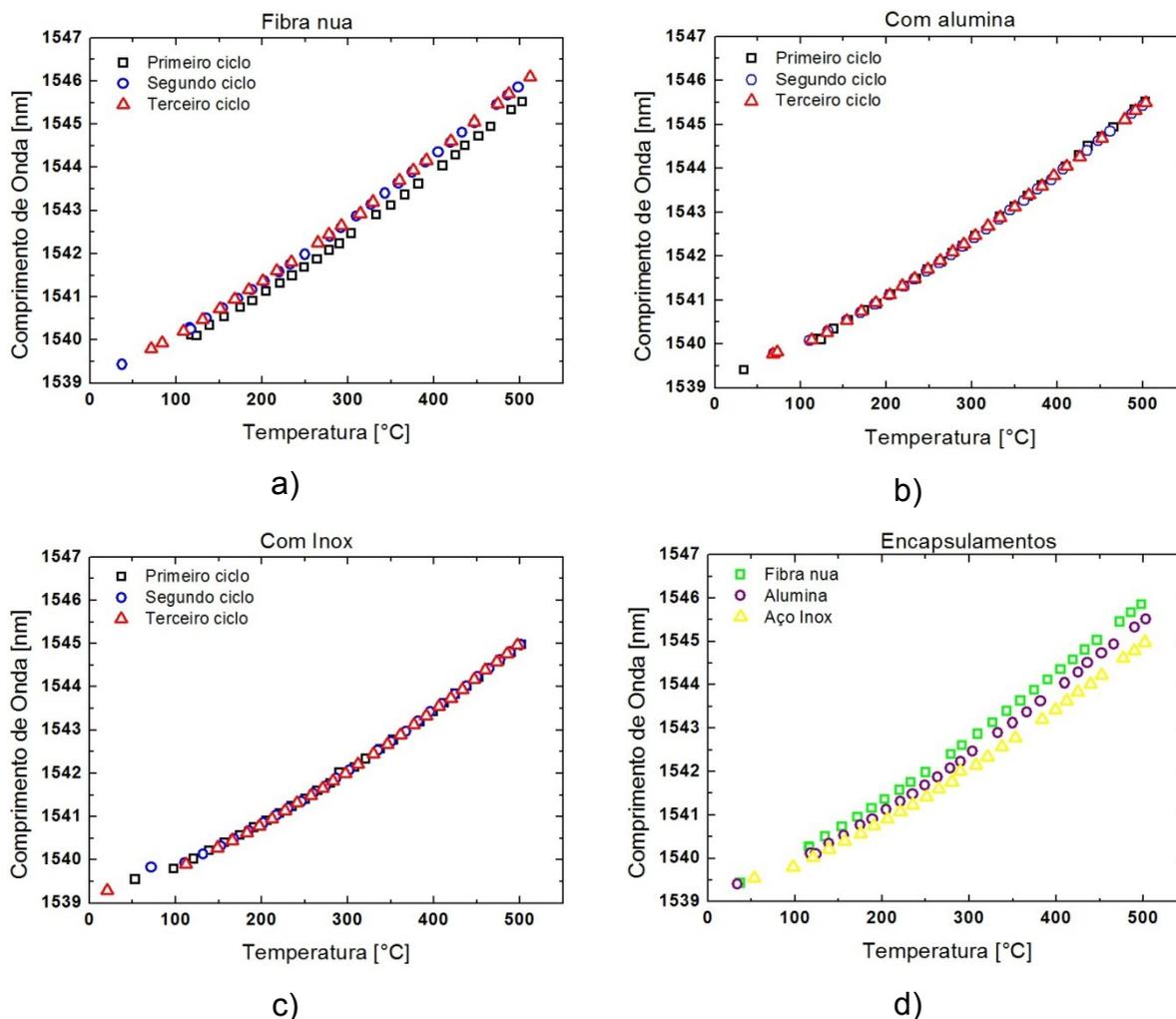
Ciclos	Fibra nua (pm/°C)	Com alumina (pm/°C)	Capilar aço inox (pm/°C)
1°	8,76	6,49	6,86
2°	8,84	5,99	6,53
3°	8,20	6,33	6,53
Média + Desvio padrão	8,60 ± 0,28	6,27 ± 0,21	6,64 ± 0,15

Fonte: autoria própria.

Os experimentos apresentados nas FIGURAS 22 – 24 são de fibras óticas previamente hidrogenadas e posteriormente regeneradas.

Os ciclos de aquecimentos da RFBG SSMFH1 são apresentados na FIGURA 22, com gráficos dos experimentos para cada encapsulamento sendo a) fibra nua, b) encapsulamento com alumina, d) encapsulamento com aço inox. Os experimentos com cada encapsulamento foram repetidos três vezes.

Para a FIGURA 22 (a) percebe-se que o primeiro ciclo de aquecimento (quadrados pretos) tem um coeficiente angular diferente do segundo e terceiro ciclo. Para a FIGURA 22 (d) o ciclo médio para o encapsulamento com aço inox tem um coeficiente angular diferente dos ciclos médios para os encapsulamentos com alumina e fibra nua.



**Figura 22 - SSMFH1. A) FBG sem encapsulamento; b) encapsulamento em alumina; c) encapsulamento com aço inox; d) sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento. Fonte: autoria própria**

A RFBG SSMFH1 apresentou sensibilidades térmicas, com uma aproximação de um polinômio de segundo grau, conforme a TABELA 7, onde se percebeu que o encapsulamento com alumina (sensibilidade térmica média 18,67 % menor que a fibra

nua), encapsulamento com aço inox (sensibilidade térmica média 33,82 % menor que a fibra nua) e a fibra nua tem sensibilidades térmicas médias diferentes.

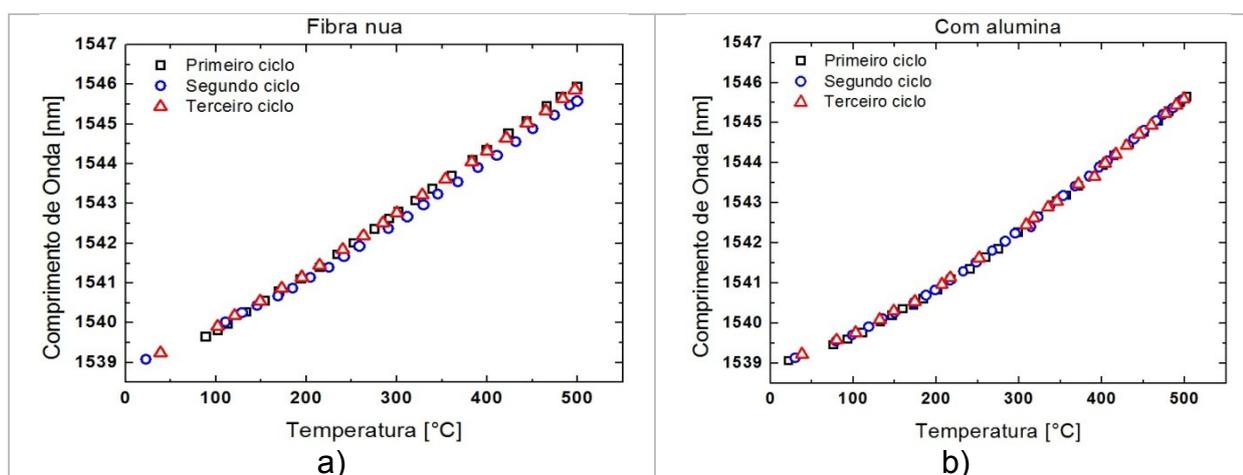
**Tabela 7 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMFH1**

Ciclos	Fibra nua ( $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )	Com alumina ( $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )	Capilar aço inox ( $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )
1°	9,71	8,52	7,15
2°	10,28	8,08	6,44
3°	10,71	8,37	6,73
Média + Desvio padrão	$10,23 \pm 0,41$	$8,32 \pm 0,18$	$6,77 \pm 0,29$

Fonte: autoria própria.

Os ciclos de aquecimentos da RFBG SSMFH2 são apresentados na FIGURA 23, com gráficos dos experimentos para cada encapsulamento sendo a) fibra nua, b) encapsulamento com alumina, d) encapsulamento com aço inox. Os experimentos com cada encapsulamento foram repetidos três vezes.

Para a FIGURA 23 (a) percebe-se que o segundo ciclo de aquecimento (círculos azuis) tem um coeficiente angular diferente do primeiro e terceiro ciclo. Para a FIGURA 23 (c) o primeiro ciclo (quadrados pretos) tem uma diferença no coeficiente angular para as temperaturas acima dos 300 °C. Na FIGURA 23 (d) a média dos ciclos para cada tipo de encapsulamento possui um coeficiente angular diferente.



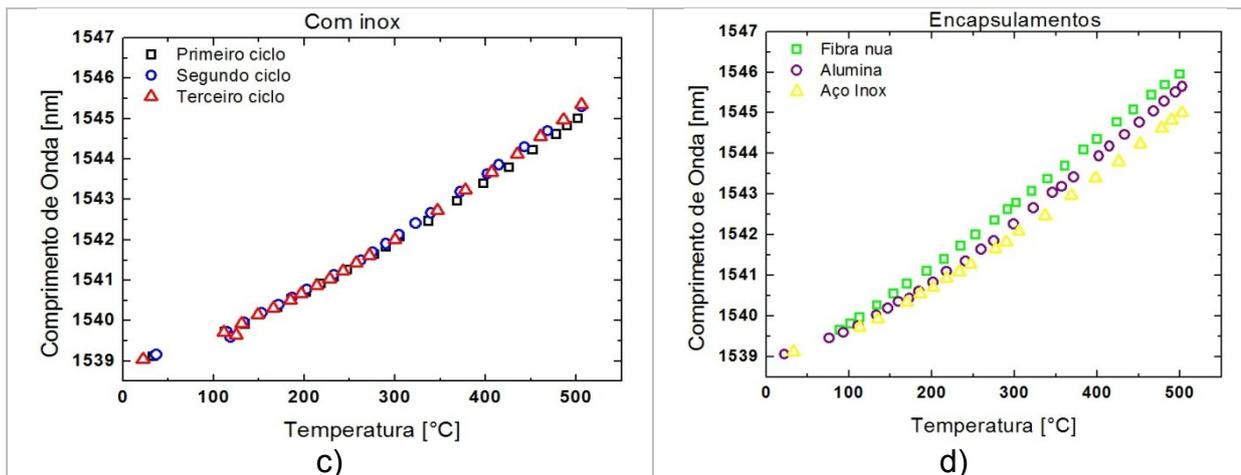


Figura 23 - SSMFH2. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento

Fonte: autoria própria

A RFBG SSMFH2 apresentou sensibilidades térmicas, com uma aproximação de um polinômio de segundo grau, conforme a TABELA 8, onde se percebeu que a sensibilidade térmica média do encapsulamento com alumina (sensibilidade térmica média 28,58 % menor que a fibra nua), aço inox (sensibilidade térmica média 33,73 % menor que a fibra nua) e fibra nua é diferente.

Tabela 8 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMFH2

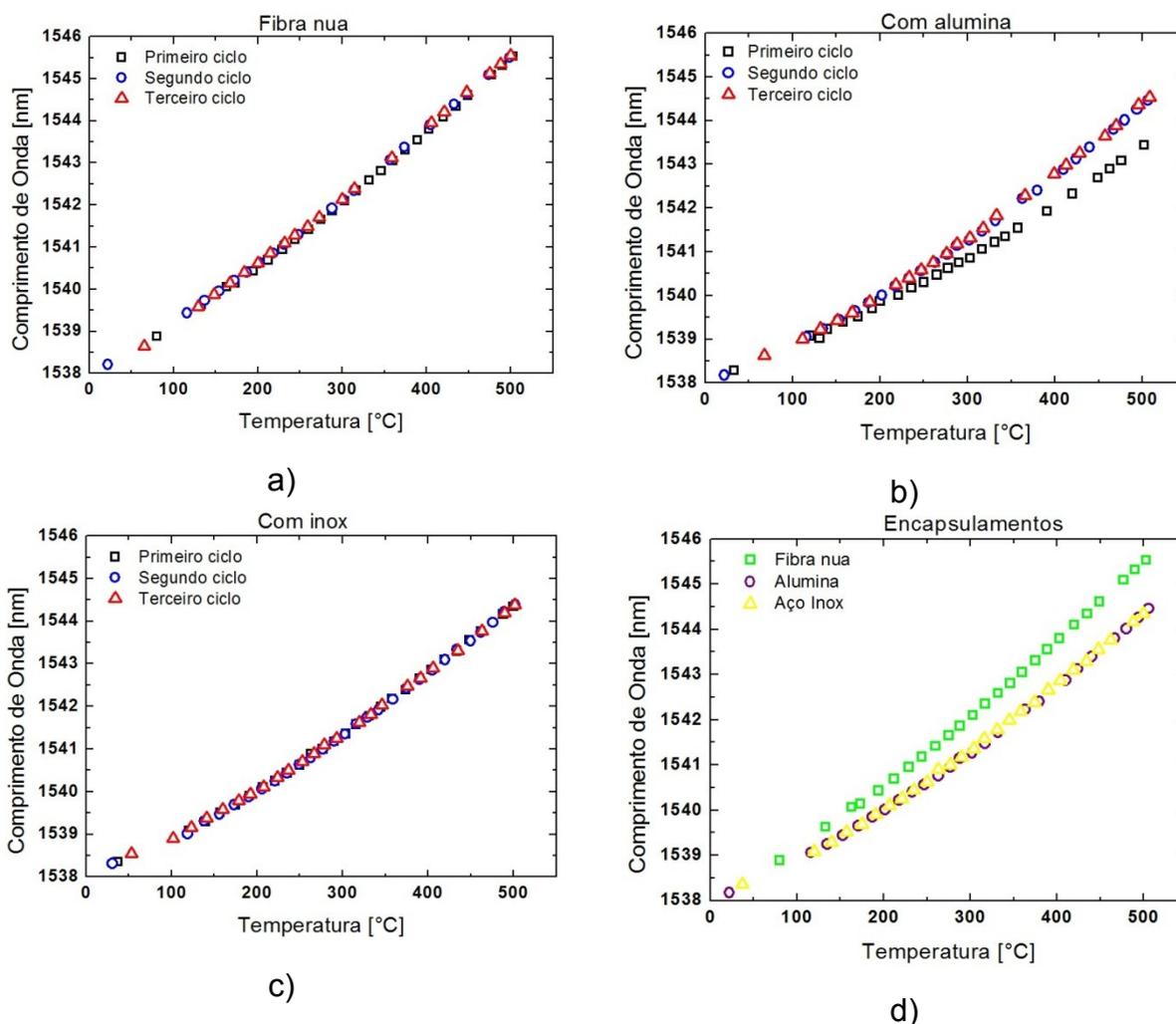
Ciclos	Fibra nua ( $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )	Com alumina ( $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )	Capilar aço inox ( $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )
1°	13,26	8,42	7,86
2°	10,32	8,29	8,27
3°	12,01	8,69	7,44
Média + Desvio padrão	$11,86 \pm 1,20$	$8,47 \pm 0,17$	$7,86 \pm 0,34$

Fonte: autoria própria.

Os ciclos de aquecimentos da RFBG SSMFH3 são apresentados na FIGURA 24, com gráficos dos experimentos para cada encapsulamento sendo a) fibra nua, b) encapsulamento com alumina, d) encapsulamento com aço inox. Os experimentos com cada encapsulamento foram repetidos três vezes.

Para a FIGURA 24 (b) percebe-se que o primeiro ciclo de aquecimento (quadrados pretos) tem um coeficiente angular diferente do primeiro e terceiro ciclo.

Na FIGURA 24 (d) o ciclo médio da fibra nua possui uma inclinação de curva diferente dos demais.



**Figura 24 - SSMFH3. a) FBG sem encapsulamento; b) Encapsulamento em alumina; c) Encapsulamento com aço inox; d) Sobreposição das médias dos ciclos de cada encapsulamento**

Fonte: autoria própria

A RFBG SSMFH3 apresentou sensibilidades térmicas, com uma aproximação de um polinômio de segundo grau, conforme a TABELA 9, onde se percebeu que a sensibilidade térmica média em fibra nua difere dos encapsulamentos com alumina (sensibilidade térmica média 34,55 % menor que a fibra nua) e aço inox (sensibilidade térmica média 28,36 % menor que a fibra nua).

**Tabela 9 - Sensibilidades térmicas dos encapsulamentos para SSMFH3**

Ciclos	Fibra nua (pm/°C)	Com alumina (pm/°C)	Capilar aço inox (pm/°C)
1°	11,83	8,25	8,82
2°	12,00	8,41	8,65
3°	12,97	7,42	8,91
Média + Desvio padrão	12,27 ± 0,50	8,03 ± 0,43	8,79 ± 0,11

Fonte: autoria própria

As médias das sensibilidades térmicas para cada experimento utilizando fibras óticas padrão não hidrogenadas são apresentadas na TABELA 10. O encapsulamento em alumina mostrou ter uma sensibilidade térmica média total 16,10 % menor que a fibra nua, enquanto o encapsulamento em aço inox teve uma sensibilidade térmica média total 23,09 % menor que a fibra nua.

**Tabela 10 - Sensibilidades térmicas médias de cada encapsulamento com FBG SSMF G-652 IR**

Redes de Bragg Médias	Fibra nua (pm/°C)	Com alumina (pm/°C)	Capilar aço inox (pm/°C)
SSMF1	8,34	8,07	7,07
SSMF2	10,18	7,85	7,75
SSMF3	11,86	9,94	8,88
SSMF4	8,21	7,48	5,94
SSMF5	8,60	6,27	6,64
Média total + Desvio padrão	9,44 ± 1,40	7,92 ± 1,18	7,26 ± 1,00

Fonte: autoria própria

As médias para cada experimento utilizando fibras óticas hidrogenadas e regeneradas são mostradas na TABELA 11. A sensibilidade térmica média total do encapsulamento com alumina para as RFBGs são 27,77 % menores do que em fibra nua e o encapsulamento com aço inox tem sensibilidade térmica média total 31,79 % menor do que em fibra nua.

**Tabela 11 - Sensibilidade térmicas médias de cada encapsulamento COM RFBG SSMF G-652 IR**

Redes de Bragg Médias	Fibra nua (pm/°C)	Com Alumina (pm/°C)	Com Aço inox (pm/°C)
SSMFH1	10,23	8,32	6,77
SSMFH2	11,86	8,47	7,86
SSMFH3	12,27	8,03	8,79
Média total +Desvio padrão	11,45 ± 0,88	8,27 ± 0,18	7,81 ± 0,82

Fonte: autoria própria

## 5 CONCLUSÃO

As sensibilidades térmicas médias totais para as fibras nuas em ambos os casos (FBGs SSMF G-652 e RFBGs SSMF G-652) foram maiores que as sensibilidades térmicas totais para os encapsulamentos em alumina e aço inox.

A sensibilidade térmica média total das FBGs SSMF G-652 em fibra nua são 17,55% menor que as RFBGs SSMF G-652, o que indica que o fenômeno de regeneração auxilia no incremento da sensibilidade térmica (expansão térmica ou termo ótico) da RFBG SSMF G-652. Devido à fragilidade estrutural na fibra que ocorre após a regeneração é necessário que a mesma seja encapsulada.

O incremento de sensibilidade térmica média total de FBGs SSMF G-652 com encapsulamento de alumina para RFBGs SSMF G-652 com encapsulamento também em alumina é 4,23%. No caso do aço inox o ganho de sensibilidade média total entre FBG SSMF G-652 e RFBG SSMF G-652 é de 7,04%.

O ganho de sensibilidade térmica em RFBGs SSMF G-652 só é expressivo no caso de fibra nua. O trabalho com este tipo de fibra fica inviável sem um encapsulamento. Os encapsulamentos diminuem as sensibilidades térmicas das FBGs SSMF G-652 e das RFBGs SSMF G-652, mas permitem manuseio mais fácil da fibra. As diferenças de sensibilidades térmicas não são muito expressivas entre as FBGs SSMF G-652 e as RFBGs SSMF G-652, porém estas últimas toleram após o tratamento térmico temperaturas acima dos 1000 °C.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros recomenda-se o teste de outros tipos de encapsulamento (diferentes cerâmicas) e recobrimentos (metálicos e poliméricos), para temperaturas extremamente altas (1000 °C) e temperaturas inferiores 130 °C.

Também se sugere o uso materiais flexíveis para encapsulamento de sensores quasi-distribuídos.

**REFERÊNCIAS**

AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communications Systems**. John Wiley and Sons, 3<sup>o</sup> edição, 2002.

ALBERTO, N.J. **Regeneration of FBGs during the HFCVD diamond-fiber coating process**. Proc. SPIE 9286, #928643 (2014).

ANDERSON, D. Z.; MIZRAHI, V.; ERDOGAN, T.; WHITE, A. E. **Production of in-fiber gratings using a diffractive optical element**. Electronic Letters, vol. 29, pp. 566-568, 1993.

ÅSLUND, M. L.; CANNING, J.; HONGYAN, F.; TAM, H. **Rapid disappearance of regenerated fibre Bragg gratings at temperatures approaching 1500 °C in boron-codoped germanosilicate optical fibre**. 4<sup>th</sup> european workshop on optical fibre sensors-EWOFs 2010, porto, Portugal, 2010.

BAKER, S. R.; ROURKE, H. N.; BAKER, V.; GOODCHILD, D. **Thermal decay of fiber Bragg gratings written in boron and germanium codoped silica fiber**. Journal of lightwave technology, vol. 15, pp. 1470-1477, 1997.

BANDYOPADHYAY, S.; CANNING, J.; STEVENSON, M.; COOK, K. **Ultrahigh-temperature regenerated gratings in boron-codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm**. Optics letters, vol. 33, no. 16, 2008.

BARRERA, D.; FINAZZI, V.; VILLATORO, J.; SALES, S.; PRUNERI, V. **Packaged Optical Sensors Based on Regenerated Fiber Bragg Gratings for High Temperatures Applications**. IEEE sensors journal, vol. 12, issue 1, 2012.

BISWAS, P.; SHARMA, S.; CANNING, J.; BANDYOPADHYAY, S. **Regenerated Gratings Redefined**. Photonics and Fiber Technology Congress, 2016.

BUENO, A.; KINET, D.; MÉGRET, P.; CAUCHETEUR, C. **Fast thermal regeneration of fiber Bragg gratings**. Optics letters, vol. 38, No. 20, 2013.

BUTOV, O. V., DIANOV, E. M., GOLANT, K. M. **Nitrogen-doped silica core fibres for Bragg grating sensors operating at elevated temperatures**. *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 975–979, 2006.

CANNING, J.; BANDYOPADHYAY, S.; STEVENSON, M.; BISWAS, P.; FENTON, J.; ÅSLUND, M. **Regenerated Gratings**. *Journal of European optical Society-Rapidly Publications*, vol. 4, 09052(7pp.), 2009.

CANNING, J.; STEVENSON, M.; BANDYOPADHYAY, S.; COOK, K. **Extreme silica optical fibre gratings**. *Sensors*, vol. 8, pp. 6448-6452, 2008.

CARVER, G.E.; FARKAS, D.L.; PORQUE, J.; FEDER, D.S.; WESTBROOK, P.S. **Visible wavelength fiber Bragg grating arrays for high speed biomedical spectral sensing**. in *Adv. Photon. Revew. Energy*, 2010 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 2010), p 1–3.

CORADIN, F. K.; DE OLIVEIRA, V.; MULLER, M.; KALINOWSKI, H. J.; FABRIS, J. L. **Long-term stability decay of standard and regenerated Bragg gratings tailored for high temperature operation**. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 12, pp. AoP309-AoP319, 2013.

COSTA, L. N.; MOURA, C. C.; DE OLIVEIRA, V.; CHIAMENTI, I.; KALINOWSKI, H. J. **Bragg Gratings Written with Ultrafast Laser Pulses**. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 14, issue 1, 2015.

DIANOV, E. M.; GOLANT, K. M.; KHRAPKO, R. R.; KURKOV, A. S.; LECONTE, B.; DOUAY, M.; BERNAGE, P.; NIAY, P. **Grating formation in a germanium free silicon oxinitride fibre**. *Eletcrocnics letters*, vol. 33, No. 3, pp. 236-238, 1997.

DYER, P. E.; FARLEY, R. J., GIEDL, R. **Analysis of grating formation with excimer laser irradiated phase masks**. *Optics Communications*, vol. 115, pp. 327-334, 1995.

ERDOGAN, T. **Fiber grating spectra**. *Journal of lightwave technology*, vol. 15, No. 8, pp. 1277-1294, 1997.

FRANCO, A. P. G. O.; MOURA, C. C.; KARAM, L. Z.; KALINOWSKI, H. J. **Properties of bulk dental composites using fiber Bragg grating sensors**. In: 2017 SBMO/IEEE MTTs International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2017, Águas de Lindoia. 2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2017. p. 1-64.

FOKINE, M. **Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fibers**. *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 19, pp. 1759–1765, 2002.

GANZIY, D.; ROSE, B.; BANG, O. **Performance of low-cost few-mode fiber Bragg grating sensor systems: polarization sensitivity and linearity of temperature and strain response**. *Applied Optics*, vol. 55, pp. 6156-6161, 2016.

GÓRRIZ, B. T.; ZAFORTEZA, I. P.; GÁRCIA, P. A. C.; MAICAS, S. S. **New fiber optic sensor for monitoring temperatures in concrete structures during fires**. *Sensors and Actuators*, vol. 254, pp. 116-125, 2017.

GROBNIC, D.; SMELSER, C. W.; MIHAILOV, S. J.; WALKER, R. B. **Long term thermal stability tests at 1000°C of silica fibre Bragg gratings made with ultrafast laser radiation.** *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 1009–1013, 2006.

GROOTHOFF, N.; CANNING, J. **Enhanced type IIA gratings for high-temperature operation.** *Optics Letters*, vol. 29, pp. 2360–2362, 2004.

HILL, K.O.; FUJII, Y.; JOHNSON, D. C.; KAWASAKI, B. S. **Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication.** *Applied physics letters*, vol. 32, issue 10, 1978.

HILL, K. O.; MALO, B.; BILODEAU, F.; JOHNSON, D. C.; ALBERT, J. **Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask.** *Applied Physics Letter*, vol. 62, No. 10, pp. 1035-1037, 1993.

HILL, K.O.; MELTZ, G. **Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview.** *Journal of lightwave and technology*, vol. 15, issue 8, p. 1263-1276, 1997.

HOLMBERG, P.; LAURELL, F.; FOKINE, M. **Influence of pre-annealing on the thermal regeneration of fiber Bragg gratings in standard optical fibers.** *Optics express*, vol. 23, No. 21, 2015.

INÁCIO, P.L.; CHIAMENTI, I.; SUALEHE, I.S.V.; DE OLIVEIRA, V.; KALINOWSKI, H.J. **Visible Wavelength Fiber Bragg Gratings: Thermal and Strain Sensitivities.** in *Sixth European Workshop on Optical Fibre Sensors*, vol 9916 of *Proc. SPIE (SPIE, 2016)* paper 991609.

KASHYAP, R. **Fiber Bragg Gratings.** Academic Press, vol 1, 1999.

KAWASAKI, B. S.; HILL, K. O.; JOHNSON, D. C.; FUJII, Y. **Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers.** *Optical letters*, vol. 3, No. 2, pp. 66-68, 1978.

KERSEY, A. D.; DAVIS, M. A.; PATRICK, H. J.; LEBLANC, M.; KOO, K. P.; ASKINS, C. G.; PUTNAM, M. A.; FRIEBELE, E. J. **Fiber grating sensors.** *Journal of lightwave technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1442-1463, 1997.

LAFFONT, G.; CORILLARD, R.; FERDINAND, P. **9000 hours-long high temperature annealing of regenerated Fiber Bragg Gratings.** in *Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors*, vol 8794 of *Proc. SPIE (SPIE, 2013)* paper 87941X.

LAM, D. K. W.; GARSIDE, B. K. **Characterization of single-mode optical fiber filters.** *Applied Optics*, vol. 20, No. 3, pp. 440-445, 1981.

LINDNER, E.; CHOJETZKI, C.; BRÜCKNER, S.; BECKER, M.; ROTHHARDT, M.; BARTELT, H. **Thermal regeneration of fiber Bragg gratings in photosensitive fibers**. *Optical express*, vol. 17, pp. 12523-12531, 2009.

LINDNER, E.; CHOJETZKI, C.; BRÜCKNER, S.; BECKER, M.; ROTHHARDT, M.; VLEKKEN, J.; BARTELT, H. **Arrays of regenerated fiber Bragg gratings in non-hydrogen-loaded photosensitive fibers for high-temperature sensor networks**. *Sensors*, vol. 9, No. 10, pp. 8377-8381, 2009.

MAMIDI, V. R.; KAMINENI, S.; RAVINUTHALA, L. N. P.; THUMU, V.; PACHAVA, V. R. **Characterization of Encapsulating Materials for Fiber Bragg Grating – Based Temperature Sensors**. *Fiber and Integrated Optics*, 33:4, pp. 325-335.

MARQUES, C.A.F.; DE OLIVEIRA, V.; KALINOWSKI, H.J.; NOGUEIRA, R.N. **Production of optical notch filters with fine parameter control using regenerated fiber Bragg gratings**. *Optics Letters*, vol. 37, no. 10, pp. 1697–1699, 2012.

MELTZ, G.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H. **Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method**. *Optics Letters*, vol. 14, pp. 823–825, 1989.

MOREY, W. W.; BALL, G. A.; MELTZ, G. **Photoinduced Bragg gratings in optical fibers**. *Opt. Photon. News*, pp 8-14, 1994.

MOURA, C. C.; INÁCIO, P. L.; CHIAMENTI, I.; DE OLIVEIRA, V.; KALINOWSKI, H. J. **Fiber Bragg gratings in the visible region of the spectrum: writing and regeneration**. *The international conference on fiber optics and photonics*, 2016.

MOURA, C. C.; INÁCIO, P. L.; CHIAMENTI, I.; DE OLIVEIRA, V.; KALINOWSKI, H. J. **Regeneration characteristics of FBG written for the visible spectral range**. In: *OFS-25*, 2017, Jeju. <http://SPIE.org/manuscripts>, 2017.

OLIVEIRA, V. **Redes de Bragg para medições em altas temperaturas**. Tese de doutorado, UTFPR, 2012.

OLIVEIRA, V.; MOURA, C. C.; VINCENTI, M. A.; LIBERA, S.; POLIMADEI, A.; CAPONERO, M.; MONTEREALI, R. M.; KALINOWSKI, H. J. **Partial regeneration of Aluminum coated FBG along 450 days**. in *24th International Conference on Optical Fibre Sensors*, vol 9634 of Proc. SPIE (SPIE, 2015) paper 963440.

OLIVEIRA, V.; MOURA, C. C.; KALINOWSKI, H. J.; VENDITTOZZI, C.; POLIMADEI, A.; CAPONERO, M.; MONTEREALI, R. M. **Caracterização Térmica de FBG's Metalizadas**. In: *Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors*

2016, 2016, Porto Alegre. Proceedings Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors 2016. São Caetano do Sul, 2016. v. único. p. 72-77.

OLIVEIRA, V.; MULLER, M.; KALINOWSKI, H.J. **Bragg gratings in standard non-hydrogenated fibers for high-temperature sensing**. Applied Optics, vol. 50, pp. E55-E58, 2011.

OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. Artech House, 1999.

OTHONOS, A.; LEE, X. **Novel and improved methods of writing Bragg gratings with phase masks**. IEEE photonics technology letters, vol. 7, issue 10, 1995.

PATRICK, H.; GILBERT, S. L.; LIDGARD, A.; GALLHAGER, M. D. **Annealing of Bragg gratings in hydrogen-loaded optical fiber**. Journal Applied Physics, vol. 78, pp. 2940-2945, 1995.

PEREIRA, J. G. ; MOURA, C. C. ; OLIVEIRA, V. ; PELLEGRINI, P. ; CORDEIRO, C. M. B. **Medição de Vibração utilizando Rede de Bragg em Fibra Ótica Afinada**. In: MOMAG2016, 2016, Porto Alegre. MOMAG2016, 2016. v. Único.

RAO, Y. J.; JACKSON, D. A.; ZHANG, L.; BENNION, I. **Strain sensing of modern composite materials with a spatial/wavelength-division multiplexing fiber grating network**. Optical letters, vol 21, pp. 683-685,1996.

RUSSEL, P. St. J; ARCHAMBAULT, J.; REEKIE, J. **Fiber gratings**. Physics world, pp. 41-46, 1993.

WANG, Y.; GRANT, J.; SHARMA, A.; MYERS, G. **Modified talbot interferometer for fabrication of fiber-optic grating filter over a wide range of Bragg wavelength and bandwidth using a single phase mask**. Journal of light wave technology, vol. 19, issue 10, 2001.

WILLIAMS, J. A. R.; BENNION, I.; SUGDEN, K.;DORAN, N. J. **Fiber dispersion compensation using a chirped in-fiber Bragg grating**. Electronics letters, vol 30, pp 985-987, June 9, 1994.

ZHANG B.; KAHRIZI, M. **High-temperature resistance fiber bragg grating temperature sensor fabrication**. IEEE sensors journal, vol. 7, no. 4, 2007.