

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

KAROLINE AKEMI SATO

**REDES DE BRAGG PADRÃO E REGENERADA EM FIBRA ÓTICA: PRODUÇÃO
E ANÁLISE DO ENVELHECIMENTO TÉRMICO PARA APLICAÇÕES EM BAIXAS
E EM ALTAS TEMPERATURAS**

TESE

CURITIBA

2022

KAROLINE AKEMI SATO

**REDES DE BRAGG PADRÃO E REGENERADA EM FIBRA ÓTICA: PRODUÇÃO
E ANÁLISE DO ENVELHECIMENTO TÉRMICO PARA APLICAÇÕES EM BAIXAS
E EM ALTAS TEMPERATURAS**

**Standard and regenerated fiber Bragg gratings: production and analysis of the
thermal aging at low and high temperatures applications**

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

Orientador: Prof. Dr. Valmir de Oliveira

CURITIBA

2022



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

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



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



KAROLINE AKEMI SATO

REDES DE BRAGG PADRÃO E REGENERADA EM FIBRA ÓTICA: PRODUÇÃO E ANÁLISE DO ENVELHECIMENTO TÉRMICO PARA APLICAÇÕES EM BAIXAS E EM ALTAS TEMPERATURAS

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutora Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Fotônica Em Engenharia.

Data de aprovação: 07 de Outubro de 2022

Dr. Valmir De Oliveira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Hypolito Jose Kalinowski, Doutorado - Universidade Federal Fluminense (Uff)

Dra. Ilda Abe, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Leandro Zen Karam, Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Pucpr)

Dr. Uilian Jose Dreyer, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dedico este trabalho à minha família, aos alunos e amigos,
ao corpo docente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná,
de modo especial àqueles que participaram efetivamente
da minha formação pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, proteção e direção.
Sem Ele nada seria possível!

Aos meus pais, por seus exemplos e ensinamentos
e pelos valiosos incentivos aos estudos!

À minha irmã, “my little sister”, que me dá várias dicas!

A todos os professores da UTFPR, em especial:
ao professor orientador Dr. Valmir de Oliveira
por todo auxílio, atenção, dedicação, compreensão e paciência
para a orientação deste trabalho.

Ao meu grande companheiro de equipe,
Caio Gerwandsznajder Nunes Silva, por todo apoio, ajuda e motivação.
E por toda sua tranquilidade nas mais diversas circunstâncias!

À minha amiga, Alessandra Harumi Kikuchi Mercante,
por todo incentivo e conversas!

Aos professores:
ao professor Dr. Hypolito José Kalinowski,
à professora Dr.^a Ilda Abe,
ao professor Dr. Leandro Zen Karam
e ao professor Dr. Uilian José Dreyer
pelas contribuições e participação na banca examinadora.

Aos envolvidos com o “LANOE” e o “Multi-FOTON”, em especial:
à Camila Carvalho de Moura, ao Antonio Carlos Ribeiro Filho
ao Luis Camilo Jussiani Moreira e à Danielle Magalhães Fontenele
que me auxiliaram em algumas situações relacionadas ao doutorado!

A todos os demais amigos e colegas da UTFPR, em especial:
ao Jônatas Daniel de Oliveira Silvério e ao Fernando Mamoru Tanaka Fujisawa.

Enfim, a todos que, de alguma forma,
colaboraram para a execução desta tese.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de
Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

***“Então Deus disse:
– Que haja luz!
E a luz começou a existir.”***
Gênesis 1.3 (BÍBLIA, 2002)

RESUMO

SATO, K. A. Redes de Bragg padrão e regenerada em fibra ótica: produção e análise do envelhecimento térmico para aplicações em baixas e em altas temperaturas. 2022. 112 p. Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2022.

É importante que a intensidade do sinal refletido por sensores óticos possua uma boa estabilidade a longo prazo, porém são escassas as pesquisas nessa área. Assim, o objetivo principal deste trabalho é analisar, exaustivamente, o envelhecimento térmico de sensores FBG (rede de Bragg em fibra ótica) e RFBG (rede de Bragg regenerada em fibra ótica) operados em baixas e em altas temperaturas por longos períodos de tempo. Para a análise em baixas temperaturas foram produzidos dois sensores óticos, um do tipo FBG padrão e outro do tipo RFBG, para medição de temperatura ambiente entre 0 °C e 40 °C. Semanalmente, foram obtidos os espectros em reflexão dos dois sensores utilizando um interrogador ótico por um período de 151 semanas. Com o auxílio de um multímetro, conectado a um termopar de tipo K, foram obtidas as medidas das temperaturas como padrão de referência. Ao avaliar a confiabilidade (precisão e exatidão) das medidas obtidas, não foi observada discrepância superior a 2 °C entre a leitura do termopar e dos sensores FBG e RFBG, eventualmente estando dentro da faixa de erro do multímetro, que possui resolução de 1 °C associado à resolução do interrogador ótico, com exceção de apenas quatro medições pontuais. Além disso, constatou-se que a expectativa de vida útil do sensor regenerado (RFBG) é 20% maior do que a do sensor que não foi regenerado (FBG). Para a análise em altas temperaturas foram produzidos cinco sensores óticos do tipo RFBG para medição de temperaturas entre 600 °C e 900 °C. Os sensores foram expostos a essas temperaturas elevadas de maneira crescente e decrescente com passos de 50 °C ou 100 °C, permanecendo 10 dias em cada patamar, para caracterização das redes em diferentes patamares. Diariamente, foram obtidos os espectros em reflexão dos sensores óticos RFBGs, durante os ciclos de 10 dias em cada patamar de temperatura ou até o apagamento total da RFBG sob ensaio, com o auxílio de um termopar tipo K, acoplado ao sistema de controle do forno, como padrão de referência. Ao avaliar a influência da temperatura na durabilidade dos sensores durante o envelhecimento térmico, os sensores produzidos mantiveram-se em operação entre 1 e 11 dias em temperaturas de 50 °C até 150 °C acima de sua temperatura de regeneração. Dentre

eles, três sensores mantiveram-se estáveis 50 °C acima de suas temperaturas de regeneração por 4 dias, 6 dias e 10 dias nos patamares de 900 °C. Com este trabalho, foi possível aumentar a compreensão para os limites de operação de FBGs e RFBGs encapsuladas, produzidas em fibra padrão de telecomunicações (G-652), operando em baixas temperaturas e em altas temperaturas, contribuindo no embasamento para novas aplicações relacionadas a sensores termo-óticos com tecnologia FBG e RFBG.

Palavras-chave: rede de Bragg em fibra ótica; rede de Bragg regenerada em fibra ótica; envelhecimento térmico; durabilidade do sensor ótico.

ABSTRACT

SATO, K. A. Standard and regenerated fiber Bragg gratings: production and analysis of the thermal aging at low and high temperatures applications. 2022. 112 p. Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2022.

It is important that the signal reflected intensity by optical sensors has a good long-term stability, but there are sparse researches in this area. Thus, the main objective of this work is to exhaustively analyze the thermal aging of FBG (Fiber Bragg Grating) and RFBG (Regenerated Fiber Bragg Grating) sensors operated at low and high temperatures, for long periods of time. For the analysis at low temperatures two optical sensors were produced, one of the standard FBG type and the other of the RFBG type, for environment temperature measurement between 0 °C and 40 °C. Weekly, reflection spectra of the two sensors were obtained using an optical sensing interrogator for 151 weeks. With the aid of a multimeter connected to a type-K thermocouple, temperature measurements were obtained as benchmark. When evaluating the reliability (precision and accuracy) of the measurements obtained, no discrepancy greater than 2 °C was observed between the reading of the thermocouple and the FBG and RFBG sensors, eventually being within the error range of the multimeter, which has a resolution of 1 °C associated with the resolution of the optical sensing interrogator, with the exception of just four spot measurements. In addition, it was found that the lifespan of the regenerated sensor (RFBG) is 20% longer than the sensor that was not regenerated (FBG). For the analysis at high temperatures five optical sensors of the RFBG type were produced to measure temperatures between 600 °C and 900 °C. The sensors were exposed to these high temperatures in increasing and decreasing way with steps of 50 °C or 100 °C, remaining 10 days at each temperature level to characterize the gratings at different levels. The reflection spectra of the RFBG optical sensors were obtained daily, during the 10-days cycles at each temperature level or until the total vanishing of the RFBG under test, with the aid of a type-K thermocouple connected to the furnace control as benchmark. By evaluating the influence of temperature on the sensors durability during the thermal aging, the sensors produced were kept in operation between 1 and 11 days at temperatures from 50 °C to 150 °C above their regeneration temperature. Among them, three sensors remained stable 50 °C above their regeneration temperatures for 4 days, 6 days and

10 days at 900 °C levels. With this work, it was possible to increase the knowledge of the encapsulated FBGs and RFBGs operating limits, produced in standard telecommunications fiber (G-652), operating at low temperatures and at high temperatures, contributing to the foundation for new applications related to thermo-optical sensors with FBG and RFBG technology.

Keywords: fiber Bragg grating; regenerated fiber Bragg grating; thermal aging; optical sensor durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes principais de um cabo de fibra ótica utilizado como sensor.....	29
Figura 2 – Esquemático de uma FBG e seus espectros característicos.	30
Figura 3 – Defeitos em fibras dopadas com germânio.	33
Figura 4 – Transição do defeito GeO para o defeito GeE' pela absorção de um fóton.	33
Figura 5 – Técnica de iluminação direta sob máscara de fase para gravação de FBG.	35
Figura 6 – Encapsulamentos que podem ser utilizados em FBGs e RFBGs. Acima o tubo de alumina e abaixo o tubo de aço inox.	39
Figura 7 – Espectro em reflexão: (a) Espectro inicial de uma FBG saturada (linha tracejada) e espectro final da FBG após a regeneração (linha contínua); (b) processo de regeneração, aumento da temperatura até 900 °C (quadrados) com a diminuição da amplitude do sinal refletido (círculos).	41
Figura 8 – Representação esquemática do sistema de gravação de FBG.	50
Figura 9 – Representação esquemática do encapsulamento de uma FBG para medição em reflexão.	51
Figura 10 – Setup para monitoração do tratamento térmico.	52
Figura 11 – Detalhes da parte interna do forno, com exemplo de monitoração de um sensor encapsulado.	52
Figura 12 – Sensores FBG1-P e RFBG1-P para medição da temperatura ambiente em parede metálica: (a) representação esquemática; (b) montagem para teste em campo.	55
Figura 13 – Etapas básicas utilizadas para o processo de envelhecimento térmico de uma RFBG, exemplificadas no caso de patamares crescentes de temperatura.	56
Figura 14 – Etapas do envelhecimento térmico do sensor RFBG2-F.....	57
Figura 15 – Etapas do envelhecimento térmico do sensor RFBG3-F.....	57
Figura 16 – Etapas do envelhecimento térmico do sensor RFBG4-F.....	58
Figura 17 – Etapas do envelhecimento térmico do sensor RFBG5-F.....	58
Figura 18 – Etapas do envelhecimento térmico do sensor RFBG6-F.....	58

Figura 19 – Espectros em reflexão dos sensores FBG1-P e RFBG1-P: (a) espectro do sensor FBG1-P encapsulado; (b) espectro inicial da FBG (rede semente) comparado ao espectro final após regeneração e encapsulamento do sensor RFBG1-P.	61
Figura 20 – Comparação dos espectros em reflexão do sensor RFBG1-P com e sem encapsulamento após regeneração.	62
Figura 21 – Amplitude do sinal refletido comparada à temperatura do sensor RFBG1-P.	63
Figura 22 – Curva de sensibilidade térmica do sensor: (a) FBG1-P; (b) RFBG1-P. ...	64
Figura 23 – Espectros em reflexão nas semanas 0, 40, 80 e 120 para o sensor: (a) FBG1-P; (b) RFBG1-P.	64
Figura 24 – Amplitudes do sinal refletido pelos sensores FBG1-P e RFBG1-P no decorrer das 151 semanas.	65
Figura 25 – Temperaturas do multímetro comparadas às temperaturas dos sensores no decorrer das semanas.	67
Figura 26 – Espectros em reflexão: espectro inicial da FBG (rede semente) comparado ao espectro final após regeneração com encapsulamento do sensor RFBG7-G.	68
Figura 27 – Amplitude de sinal refletido comparada à temperatura do sensor RFBG7-G.	69
Figura 28 – Flutuação da amplitude do sinal refletido pela fonte ótica do interrogador SM 125, durante 2 horas e 9 minutos de monitoramento.	69
Figura 29 – Espectros em reflexão: espectro inicial da FBG (rede semente) comparado ao espectro final após regeneração com encapsulamento do sensor (a) RFBG2-F, (b) RFBG3-F, (c) RFBG4-F, (d) RFBG5-F e (e) RFBG6-F.	71
Figura 30 – Amplitude do sinal refletido comparada à temperatura do sensor (a) RFBG2-F, (b) RFBG3-F, (c) RFBG4-F, (d) RFBG5-F e (e) RFBG6-F.	72
Figura 31 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG2-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 800 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.	74
Figura 32 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG2-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 900 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.	74
Figura 33 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG2-F antes e após processamento térmico de 1 dia em 1000 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.	75

Figura 34 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG2-F antes e depois do processamento térmico nos patamares de temperatura descritos: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	76
Figura 35 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG3-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 600 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	76
Figura 36 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG3-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 700 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	77
Figura 37 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG3-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 800 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	77
Figura 38 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG3-F antes do processamento térmico nos patamares de temperatura descritos: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	78
Figura 39 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG4-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 800 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	79
Figura 40 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG4-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 850 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	79
Figura 41 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG4-F antes e após processamento térmico de 2 dias em 900 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	80
Figura 42 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG4-F antes e depois do processamento térmico nos patamares de temperatura descritos: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	81
Figura 43 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG5-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 800 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	82
Figura 44 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG5-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 700 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	82
Figura 45 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG5-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 600 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	83

Figura 46 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG5-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 900 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	83
Figura 47 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG5-F antes do processamento térmico nos patamares de temperatura descritos: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	84
Figura 48 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG6-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 800 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	85
Figura 49 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG6-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 700 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	85
Figura 50 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG6-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 600 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	86
Figura 51 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG6-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 900 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	86
Figura 52 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG6-F antes e depois do processamento térmico nos patamares de temperatura descritos: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μ W.....	87
Figura 53 – Potência refletida no decorrer dos dias em que as temperaturas foram monitoradas pelo sensor: (a) RFBG2-F, (b) RFBG3-F, (c) RFBG4-F, (d) RFBG5-F e (e) RFBG6-F.....	88
Figura 54 – Exatidão e precisão: analogia com o tiro ao alvo.	104
Figura 55 – Exemplo de <i>pigtail</i> encontrado comercialmente.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de gravação dos sensores térmicos.....	50
Tabela 2 – Especificação das regenerações de cada sensor térmico em análise.....	53
Tabela 3 – Especificação das programações do forno para cada sensor térmico em análise.....	59
Tabela 4 – Patamares de temperatura do envelhecimento térmico dos sensores, com destaque para as temperaturas iguais ou acima de suas respectivas temperaturas de regeneração.	60
Tabela 5 – Temperaturas do multímetro comparadas às temperaturas dos sensores no decorrer das semanas, amostradas a cada 10 semanas.....	66
Tabela 6 – Taxa de variação da amplitude do sinal refletido para análise da expectativa de vida útil dos sensores FBG1-P e RFBG1-P.....	67
Tabela 7 – Amplitude do sinal refletido durante o processo de regeneração dos sensores RFBG2-F a RFBG6-F.....	73
Tabela 8 – Taxa de variação da amplitude do sinal refletido para a análise da expectativa de vida útil dos sensores RFBG2-F a RFBG6-F.....	91
Tabela 9 – Períodos nos quais os patamares de temperatura dos sensores RFBG2-F a RFBG6-F permaneceram acima de suas respectivas temperaturas de regeneração.	91
Tabela 10 (continua) – Temperaturas do multímetro comparadas às temperaturas dos sensores no decorrer das semanas.	109

LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Instituto Americano do Ferro e do Aço (<i>American Iron and Steel Institute</i>)
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CGCRI	Instituto Central de Pesquisa em Vidro e Cerâmica (<i>Central Glass and Ceramic Research Institute</i>)
Covid-19	Doença do coronavírus 2019 (<i>Coronavirus disease 2019</i>)
FBG	Rede de Bragg em fibra ótica (<i>Fiber Bragg Grating</i>)
FIB	Federação Internacional do Concreto (<i>Fédération Internationale du Béton</i>)
G-652	Modelo de fibra ótica, norma ITU-T
IR	Infravermelho (<i>Infrared</i>)
ISO	Organização Internacional de Normalização (<i>International Organization for Standardization</i>)
ITU-T	Setor de Padronização de Telecomunicações da União Internacional de Telecomunicações (<i>International Telecommunications Union - Telecommunication Standardization Sector</i>)
LANOE	Laboratório de Nanoestruturas da UTFPR, câmpus Curitiba
MCVD	Processo Modificado de Deposição Química de Vapor (<i>Modified Chemical Vapor Deposition</i>)
Multi-FOTON	Laboratório Multiusuário de Fotônica da UTFPR, câmpus Curitiba
NBR	Norma Brasileira
PVC	Policloreto de vinila (<i>Polyvinyl chloride</i>)
RFBG	Rede de Bragg regenerada em fibra ótica (<i>Regenerated Fiber Bragg Grating</i>)
SNR	Relação Sinal/Ruído (<i>Signal to Noise Ratio</i>)
TEC	Pastilha Termoelétrica Peltier (<i>Thermoelectric Cooler</i>)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

UV

Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

Λ	Periodicidade da modulação no índice de refração do núcleo da fibra ótica
Λ_B	Periodicidade da rede
Λ_{pm}	Periodicidade da máscara de fase (do inglês, <i>phase mask</i>)
λ	Comprimento de onda
λ_B	Comprimento de onda de Bragg
$R(l, \lambda_B)$	Refletividade de uma rede de Bragg no comprimento de onda de Bragg (λ_B)
β	Número de onda
$\mu\varepsilon$	Microdeformação (<i>Microstrain</i>)
ϕ	Diâmetro do tubo de alumina
M_p	Fração da potência contida no núcleo da fibra ótica
n_{eff}	Índice de refração efetivo do modo de propagação da luz
D	Difusão
R	Constante universal dos gases perfeitos
e	Constante de Euler
Ω	Coefficiente de acoplamento entre as ondas incidentes e refletidas
α	Coefficiente de expansão térmica do material da fibra ótica
ξ	Coefficiente termo-ótico da fibra ótica
∂	Derivada parcial
\tanh	Tangente hiperbólica
dB	decibel
dBm	Razão de energia em decibel para um miliwatt
atm	atmosfera
l	Comprimento da rede na fibra ótica

m	metro
cm	centímetro
mm	milímetro
μm	micrômetro
nm	nanômetro
pm	picômetro
s	segundo
ns	nanosegundo
fs	femtosegundo
g	grama
min	minuto
h	hora
Hz	Hertz
kHz	quilohertz
J	Joule
mJ	milijoule
T	Temperatura
$^{\circ}\text{C}$	grau Celsius
K	Kelvin
$\Delta\lambda_{BT}$	Desvio de comprimento de onda de Bragg ocasionado por uma variação de temperatura
$\Delta\lambda_B$	Desvio no comprimento de onda de Bragg
ΔT	Variação térmica da rede de Bragg
Δl	Variação na periodicidade da rede de Bragg
Δn	Variação do índice de refração do núcleo da fibra ótica

Al_2O_3	dióxido de alumínio (alumina)
ArF	fluoreto de argônio
B	boro
B_2O_3	trióxido de boro
F	flúor
Ge	germânio
GeO_2	dióxido de germânio
H_2	hidrogênio molecular
KrF	fluoreto de criptônio
O	oxigênio
OH	hidroxila
P	fósforo
Si	silício
e^-	elétron

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 ESTADO DA ARTE	22
1.1.1 Aplicação das redes de Bragg	23
1.1.2 Medições em altas temperaturas com redes de Bragg	24
1.2 JUSTIFICATIVA DA TESE	25
1.3 OBJETIVOS DA TESE.....	26
1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE	27
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1 REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA.....	29
2.2 GRAVAÇÃO DE REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA.....	29
2.2.1 Fotossensibilidade da fibra ótica	32
2.2.2 Hidrogenação em fibras óticas	33
2.2.3 Gravação direta de FBG sob máscara de fase	34
2.2.4 Estabilidade para medições térmicas	36
2.3 ENCAPSULAMENTO	38
2.4 REGENERAÇÃO.....	39
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	42
3.1 REDES DE BRAGG REGENERADAS.....	42
3.2 ENVELHECIMENTO TÉRMICO DE REDES DE BRAGG ABAIXO DA TEMPERATURA DE REGENERAÇÃO.....	43
3.3 ENVELHECIMENTO TÉRMICO DE REDES DE BRAGG ACIMA DA TEMPERATURA DE REGENERAÇÃO.....	45
4 METODOLOGIA	47
4.1 ETAPAS DA PRODUÇÃO DOS SENSORES TÉRMICOS.....	47
4.1.1 Sensores térmicos para medição em baixas temperaturas (entre 0 °C e 40 °C).....	47
4.1.2 Sensores térmicos para medição em altas temperaturas (entre 600 °C e 900 °C).....	48
4.2 HIDROGENAÇÃO	48
4.3 GRAVAÇÃO.....	49
4.4 ENCAPSULAMENTO	50
4.5 TRATAMENTO TÉRMICO PARA REGENERAÇÃO	51

4.6 CALIBRAÇÃO EM TEMPERATURA.....	53
4.7 FIXAÇÃO DOS SENSORES FBG1-P E RFBG1-P EM PAREDE METÁLICA PARA TESTE EM CAMPO.....	54
4.8 ENVELHECIMENTO EM ALTAS TEMPERATURAS.....	55
5 RESULTADOS.....	61
5.1 SENSORES TÉRMICOS PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA AMBIENTE	61
5.1.1 Flutuação da amplitude do sinal refletido pelo interrogador ótico.....	68
5.2 SENSORES TÉRMICOS PARA MEDIÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS (ENTRE DE 600 °C E 900 °C).....	70
5.2.1 Gravação e regeneração dos sensores RFBG2-F a RFBG6-F	70
5.2.2 Envelhecimento térmico dos sensores	73
6 CONCLUSÃO.....	92
6.1 SENSORES TÉRMICOS PARA MEDIÇÃO DE BAIXAS TEMPERATURAS (ENTRE 0 °C E 40 °C)	92
6.2 SENSORES TÉRMICOS PARA MEDIÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS (ENTRE 600 °C E 900 °C)	93
6.3 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	94
REFERÊNCIAS.....	95
GLOSSÁRIO.....	104
APÊNDICE – TEMPERATURAS DOS SENSORES FBG1-P E RFBG1-P CORRELACIONADAS À TEMPERATURA DE REFERÊNCIA AO LONGO DE 151 SEMANAS	108

1 INTRODUÇÃO

Nos sistemas industriais, e em outras aplicações, é de suma importância medir parâmetros físicos para controlar e supervisionar um processo. São comuns medições de deformação, pressão, nível, vazão e temperatura, por exemplo, com sensores eletrônicos convencionais. Porém, em alguns casos, esses sensores não conseguem obter as medidas necessárias devido a algumas limitações que podem ser supridas por redes de Bragg em fibra ótica (FBG, *Fiber Bragg Grating*): interferência elétrica e eletromagnética; dimensão ou volume; distância do ponto a ser monitorado; número de pontos de medição; entre outros fatores (KERSEY *et al.*, 1997; FALATE *et al.*, 2005, OLIVEIRA, 2012).

As FBGs vêm complementar a tecnologia eletrônica existente, atuando em situações nas quais os sensores convencionais não operam de maneira satisfatória. Monitorar tais parâmetros físicos com FBG é uma solução atraente devido ao fato de que possuem pequenas dimensões, apresentando sinal codificado em comprimento de onda (λ), além de serem imunes à interferência eletromagnética, podendo ser utilizadas em diversos sistemas onde essas características sejam necessárias (PEREIRA; FRAZÃO; SANTOS, 2004; CHRYSISS *et al.*, 2005; CUSANO *et al.*, 2005; POLZ *et al.*, 2021).

1.1 ESTADO DA ARTE

As redes de Bragg foram descobertas em 1978 por K. O. Hill (HILL *et al.*, 1978). Desde sua descoberta, uma variedade enorme de trabalhos foram desenvolvidos em torno de suas propriedades intrínsecas de medição de temperatura e deformação (ERDOGAN *et al.*, 1994; KANNAN; GUO; LEMAIRE, 1997; FRAZÃO *et al.*, 1999; BRAMBILLA *et al.*, 2000; OLIVEIRA, 2012; COSTA *et al.*, 2015; CANNING, 2016; MOURA *et al.*, 2017; LU *et al.*, 2018; MOURA, 2019; FIORIN *et al.*, 2019; PENG *et al.*, 2019; FENG *et al.*, 2020; POLZ *et al.*, 2021).

A FBG é uma modulação periódica do índice de refração do núcleo de uma fibra ótica, que é formada através de sua exposição a um padrão de interferência ótica que pode ser criado por máscara de fase (OTHONOS; LEE, 1995) ou outras técnicas interferométricas. A modulação periódica do índice de refração no núcleo cria espelhos semireflexivos, seletivos em comprimento de onda, que refletem parte da luz e

transmitem o restante. Fatores externos, como a temperatura, alteram essa modulação (CRUZ, 2007).

Para apagar uma FBG, de modo que não exista mais em determinada fibra ótica, são necessárias poucas centenas de graus Celsius em tempos que podem variar de minutos a algumas horas, dependendo do tipo da fibra, do *laser* utilizado na gravação entre outros fatores (POLZ *et al.*, 2021).

Erdogan *et al.* (1994) propôs e evidenciou um modelo empírico baseado em uma função exponencial decrescente, a qual explicita o mecanismo de deterioração da rede em função do tempo e da temperatura. Brambilla *et al.* (2000) e Dianov *et al.* (1997) propuseram novos materiais dopantes, assim como pré e pós tratamento da fibra, com o objetivo de aumentar a estabilidade da amplitude do sinal refletido da rede de Bragg submetida a diferentes temperaturas.

1.1.1 Aplicação das redes de Bragg

Por necessitarem apenas de luz no local a ser medido, as FBGs podem ser operadas em áreas classificadas de indústrias petroquímicas (TERADA, 2010) e de outras, por exemplo, para produção de petróleo e gás (QIAO *et al.*, 2017), para detecção de vazamento de hidrocarboneto de petróleo (SPIRIN *et al.*, 1999) e para detecção de etanol em petróleo (KUMAR *et al.*, 2019). No caso de um incêndio, as redes de Bragg regeneradas em fibra ótica (RFBG, *Regenerated Fiber Bragg Grating*) podem medir a temperatura de estruturas da construção civil, situação na qual FBGs padrões apresentariam degradação espectral, podendo ser apagadas completamente ou, até mesmo, ser rompidas devido ao dano que as altas temperaturas causam a fibra ótica (GÓRRIZ *et al.*, 2017).

Na engenharia civil, os sensores FBG podem obter a temperatura ambiente e informações térmicas ao longo de toda estrutura de uma ponte para monitoramento de sua integridade estrutural (SAAD, 2021). É possível também medir a vibração e a temperatura de uma viga cantiléver (viga em balanço) exposta ao fogo (SILVA *et al.*, 2004).

Já em 2001, nos primeiros trabalhos de biomecânica com aplicações *in vivo* de grupos brasileiros, pesquisadores já analisavam seu uso para detectar e monitorar movimentos respiratórios (WEHRLE *et al.*, 2001). É possível utilizar métodos de esterilização e desinfecção em sensores FBGs (KARAM, 2015) que se utilizam da

deformação, por exemplo, para mensurar força de mordida, adquirir dados na aplicação de aparelhos ortodônticos e monitorar problemas no maxilar (FIORIN *et al.*, 2019). Podem ainda verificar a degradação dos componentes dentários para prevenir novas cáries e fraturas nos dentes (FRANCO *et al.*, 2017).

As redes de Bragg podem ser aplicadas para verificar parâmetros físicos e químicos de ambientes marinhos, através da medição de temperatura, salinidade, pressão e pH do oceano, além de detectar a presença de metais pesados na água (MIN *et al.*, 2021).

Há estudos sobre o envelhecimento de sensores FBG, para avaliação de durabilidade e desempenho, por exemplo, no monitoramento de umidade em um ambiente com presença de gases residuais (ALWIS *et al.*, 2017) e no monitoramento de vibração quando os sensores foram encapsulados em metal (GUO; XIONG; LIU, 2019).

As FBGs podem, ainda, ser aplicadas para o monitoramento de vibração em motores elétricos (PEREIRA, 2016), para monitoramento de pressão em processos industriais (HAFIZI *et al.*, 2019), para verificação da qualidade da gasolina (ARISTILDE; CORDEIRO; OSÓRIO, 2019) e para medições da distribuição de altas temperaturas em vaso de reação química e em duto de exaustão de uma turbina a gás (DUTZ *et al.*, 2018).

Além disso, podem ser encontradas na produção de energia elétrica, para o monitoramento de temperatura de painel fotovoltaico (KOTINDA, 2018), e na geração de energia em hidrelétrica, para o monitoramento de vibrações de baixa frequência (LI *et al.*, 2018). Dreyer *et al.* (2018) estudaram o monitoramento simultâneo de temperatura e vibração em geradores hidrelétricos de alta potência.

1.1.2 Medições em altas temperaturas com redes de Bragg

Canning (2016) relata que um grande desafio é determinar a vida útil de operação necessária em uma aplicação específica e a continuidade da exposição a alta temperatura. Aplicações no monitoramento de temperatura em muitos equipamentos estão mostrando a proliferação do uso de RFBG, particularmente dentro do setor de energia, incluindo não apenas a nuclear, mas também a hidrelétrica, a eólica e termoelétrica, bem como, infraestrutura para produção de gás, carvão, petróleo, entre outras. Então, muitas das medições em altas temperaturas podem ser

resolvidas com a utilização de sensores óticos baseados em redes de Bragg regeneradas.

Para que as redes de Bragg resistam a altas temperaturas (acima de 100 °C), diversas técnicas podem ser utilizadas na produção de FBGs, por exemplo:

- Uso de dopantes tanto no núcleo como na casca da fibra ótica (GROOTHOFF; CANNING, 2004; BUTOV; DIANOV; GOLANT, 2006);
- Gravação utilizando *laser* excímero KrF (fluoreto de criptônio) com fibra padrão de telecomunicações (G-652) sem tratamento de hidrogenação (OLIVEIRA; MULLER; KALINOWSKI, 2011);
- Recozimento térmico (KASHYAP, 1999; CORADIN *et al.*, 2013);
- Uso de *laser* com pulsos de femtosegundos (fs) para gravação das redes de Bragg (COSTA *et al.*, 2015), por exemplo, o *laser* de titânio:safira (GROBNIC *et al.*, 2006);
- Regeneração térmica de redes sementes (FOKINE, 2002; CANNING *et al.*, 2009; OLIVEIRA; MULLER; KALINOWSKI, 2011), a qual foi utilizada no presente trabalho.

Para operação em campo, principalmente em altas temperaturas, é fundamental proteger os sensores baseados em FBG. Assim, o desenvolvimento de encapsulamentos com materiais compostos, metálicos e cerâmicos (como a alumina ou o aço inox, por exemplo), que apresentam elevada durabilidade às altas temperaturas, são estudados por alguns autores (MOURA; OLIVEIRA; KALINOWSKI, 2018). A proteção também pode ser feita por recobrimento polimérico de tubos de PVC (policloreto de vinila) flexível, que suporta até 120 °C (GÓRRIZ *et al.*, 2017), ou por recobrimento metálico de alumínio, que suporta até 620 °C em operação (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

1.2 JUSTIFICATIVA DA TESE

Os principais desafios comuns continuam sendo os tempos de vida útil da FBG e o seu encapsulamento, embora um encapsulamento extremamente simples, envolvendo a fibra dentro de um tubo de aço inox, alumina, quartzo ou outro material, seja suficiente para a maioria das muitas aplicações.

Há muitas publicações na área de sensores óticos que utilizam FBGs e RFBGs para fazer medições de temperatura. Porém, há poucos estudos sobre o envelhecimento térmico de sensores óticos operando em altas temperaturas (acima de 100 °C), por longos períodos de tempo, e não foram encontrados estudos que demonstrem o envelhecimento dos sensores em patamares crescentes e/ou decrescentes de temperatura por vários dias em cada patamar. Além disso, são escassos os estudos de envelhecimento de sensores óticos, medindo temperatura ambiente, que fazem tais medições por períodos superiores a um ano.

Desta forma, o presente trabalho contribui com novas observações a respeito do envelhecimento de FBGs e RFBGs, gravadas em fibra ótica de telecomunicações (Draka®, G-652) para monitoração de temperaturas distintas: (1) temperatura ambiente (entre 0 °C e 40 °C) em medição por longos períodos, analisando sua expectativa de vida útil por um período superior a um ano; (2) temperaturas mais altas (entre 600 °C e 900 °C) em medição por períodos de 10 em 10 dias, analisando patamares crescentes e decrescentes de temperatura em que conseguem operar.

Com este trabalho é possível ampliar a compreensão sobre os limites de operação de FBGs e RFBGs em temperatura ambiente e em temperaturas acima da de sua regeneração, proporcionando o desenvolvimento comercial de sensores termo-óticos mais eficientes.

1.3 OBJETIVOS DA TESE

Analisar o envelhecimento térmico de sensores óticos FBG e RFBG, operados em temperatura ambiente (entre 0 °C e 40 °C), para estimar a sua vida útil, e de sensores óticos RFBG, operados em altas temperaturas (entre 600 °C e 900 °C), para verificar a sua durabilidade.

Para a análise em temperatura ambiente, os objetivos específicos são:

- Produzir e caracterizar dois sensores óticos, um do tipo FBG padrão e outro do tipo RFBG para medição de temperaturas entre 0 °C e 40 °C;
- Realizar medições semanais, por um período de tempo longo, através da aquisição dos espectros em reflexão dos dois sensores óticos;
- Verificar a confiabilidade (precisão e exatidão) das medidas obtidas nos referidos sensores em relação a temperatura obtida em multímetro, utilizando um termopar de tipo K como padrão de referência;

- Avaliar a expectativa de vida útil por comparação entre o sensor FBG e o sensor RFBG, que realizaram medições de temperatura ambiente.

Para a análise em altas temperaturas, os objetivos específicos são:

- Produzir sensores óticos do tipo RFBG para medição de temperaturas entre 600 °C e 900 °C;
- Expor as RFBGs a temperaturas elevadas, crescentes ou decrescentes, permanecendo 10 dias em cada patamar, com passos de 50 °C ou 100 °C;
- Realizar medições diárias dos espectros refletidos das RFBGs durante os ciclos de 10 dias em cada patamar, ou até o apagamento total de sua rede;
- Avaliar a durabilidade dos sensores RFBGs acima de sua temperatura de regeneração, analisando a influência das temperaturas utilizadas nos patamares de cada ciclo de temperatura.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese está organizada por capítulos.

No Capítulo 1 (Introdução), a pesquisa é contextualizada com a ideia geral do trabalho, incluindo seus objetivos e o estado da arte relacionado ao tema da pesquisa.

No Capítulo 2 (Fundamentação Teórica) há assuntos prévios importantes para o entendimento do trabalho, tais como a definição das redes de Bragg em fibra ótica, suas formas de produção (hidrogenação, gravação e encapsulamento) e suas especificidades quando regeneradas.

No Capítulo 3 (Revisão Bibliográfica) são apresentadas análises de outros autores a respeito do envelhecimento de redes de Bragg abaixo e acima da temperatura de regeneração.

No Capítulo 4 (Metodologia) explicam-se todos os procedimentos realizados para se alcançar os objetivos do trabalho. Também são descritas todas as FBGs e as RFBGs produzidas e como, posteriormente, foram alocadas, tanto para medição de baixas temperaturas, quanto para medição de altas temperaturas.

No Capítulo 5 (Resultados) são mostrados os espectros obtidos e analisadas as medições em comprimento de onda realizadas para obtenção de suas respectivas

temperaturas, principalmente em termos de confiabilidade, vida útil estimada e durabilidade dos sensores óticos produzidos.

No Capítulo 6 (Conclusão) finaliza-se o trabalho com considerações finais a respeito do que foi feito e de seu potencial de aplicação em trabalhos futuros.

Ao final deste trabalho encontra-se um Glossário, com palavras que podem auxiliar na leitura. Por fim, em Apêndice, apresentam-se os dados obtidos de forma mais detalhada para as medições realizadas em temperatura ambiente.

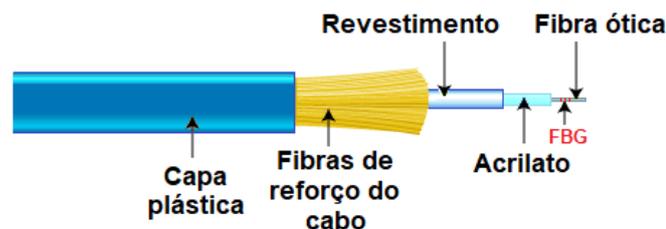
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são tratados assuntos relevantes para o entendimento do trabalho. São descritas as redes de Bragg em fibra ótica e suas formas de produção. Além disso, é explicada a importância da fotossensibilidade e da hidrogenação de fibras óticas para gravação direta de FBG sob máscara de fase. Por fim, são apresentadas maneiras para utilizar as redes de Bragg em altas temperaturas, com o auxílio de encapsulamento e/ou tratamento térmico para regeneração das FBGs.

2.1 REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

Um cordão ótico pode ser constituído de muitas partes, porém as principais são capa plástica, fibras de reforço do cabo (de vidro ou de aramida, por exemplo), revestimento, acrilato e a respectiva fibra ótica (Figura 1). É na fibra ótica que se pode gravar uma FBG, para transformá-la em um sensor de temperatura ou de deformação, entre outros (OTHONOS; KALLI, 1999). No caso deste trabalho, o foco consiste em analisar sensores térmicos com base em FBG e RFBG.

Figura 1 – Componentes principais de um cabo de fibra ótica utilizado como sensor.



Fonte: Adaptado de Black Box (2020).

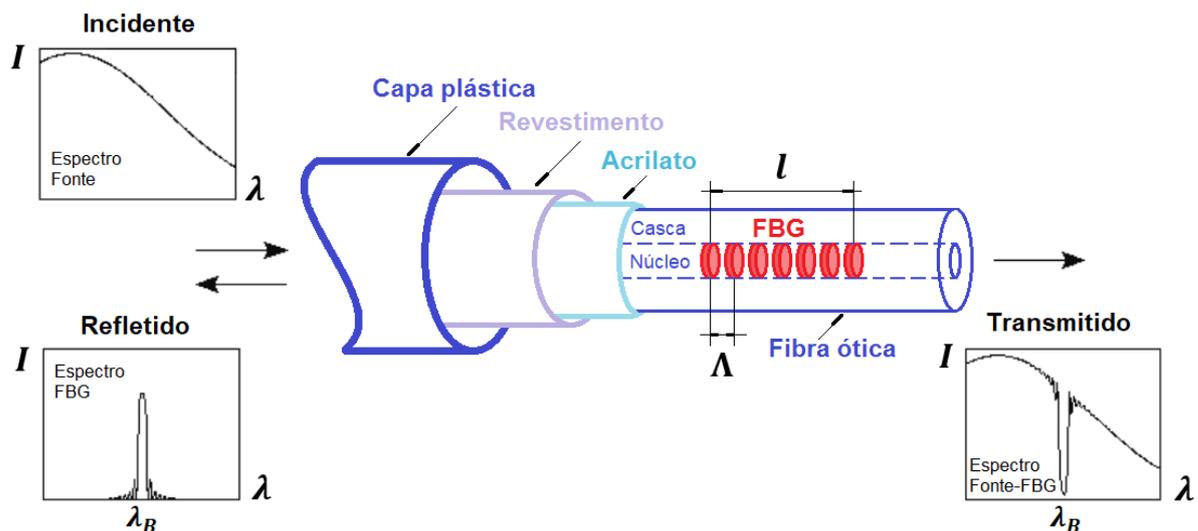
2.2 GRAVAÇÃO DE REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

Existem várias técnicas aplicadas no processo de preparação da fibra ótica, com o propósito de facilitar a gravação da FBG, alterando a amplitude da modulação induzida do índice de refração do núcleo da fibra ótica (Δn). As técnicas vão desde a dopagem com distintos elementos usados na produção de fibras especiais, como também a elevação da fotossensibilidade em fibra padrão de telecomunicação – ITU-T G-652. Para utilizar *lasers* de menor potência e por menor tempo, durante a gravação da FBG, deve-se ter fibras com maior fotossensibilidade, resultando em custos

menores, produção acelerada da FBG e menores danos à área exposta da fibra ótica (OLIVEIRA, 2012).

Para se obter uma FBG é necessário produzir uma modulação periódica no índice de refração de seu núcleo (HILL *et al.*, 1978). Assim, a luz incidente no núcleo pode ser acoplada, na FBG, do modo propagante para o modo contrapropagante, em uma faixa estreita de comprimentos de onda centrada próxima do comprimento de onda de Bragg (λ_B). Ao ser incidida luz com espectro de banda larga em uma fibra contendo determinada FBG, parte do espectro ótico será refletido pelas interfaces, entre as regiões com índices de refração distintos devido a espalhamentos coerentes no conjunto de todas as interfaces. Os espectros resultantes para transmissão e para a reflexão podem ser observados na Figura 2.

Figura 2 – Esquemático de uma FBG e seus espectros característicos.



Fonte: Adaptado de Othonos e Kalli (1999) e de Oliveira (2012).

Conforme Hill (1997), o comprimento de onda de Bragg (λ_B) ocorre próximo ao comprimento de onda central do espectro refletido, podendo ser calculado por:

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

na qual n_{eff} se refere ao índice de refração efetivo do modo de propagação da luz e Λ à periodicidade da modulação no índice de refração do núcleo da fibra ótica, também conhecido como período da rede (HILL *et al.*, 1978; OTHONOS; KALLI, 1999).

Segundo Meltz, Morey e Glenn (1989), a refletividade de uma FBG no comprimento de onda de Bragg pode ser dada por:

$$R(l, \lambda_B) = \tanh^2(\Omega l), \quad (2)$$

onde $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_B}$ é o número de onda e $\Omega = \frac{1}{2} \Delta n \beta M_p$ é o coeficiente de acoplamento entre as ondas incidentes e refletidas. Logo,

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n M_p}{\lambda_B}, \quad (3)$$

na qual l se refere ao comprimento total da rede, Δn à amplitude da modulação do índice de refração e M_p à fração da potência contida no núcleo da fibra ótica.

Conforme mencionado anteriormente, as redes de Bragg são sensíveis à deformação longitudinal e à temperatura (HILL *et al.*, 1978). Assim, alterações dos parâmetros externos, tais como variações na periodicidade da rede (Δl) ou variações de temperatura (ΔT), podem alterar o índice efetivo e/ou a periodicidade da rede (λ_B), mudando o comprimento de onda de Bragg, de modo que:

$$\Delta \lambda_B = 2 \left(\frac{\Lambda \partial n_{eff}}{\partial l} + \frac{n_{eff} \partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\frac{\Lambda \partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{n_{eff} \partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T, \quad (4)$$

na qual o termo $\frac{\Lambda \partial n_{eff}}{\partial l} + \frac{n_{eff} \partial \Lambda}{\partial l}$ se refere ao efeito da tensão longitudinal e o termo $\frac{\Lambda \partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{n_{eff} \partial \Lambda}{\partial T}$ se refere ao efeito da temperatura na fibra. A parcela $\frac{\Lambda \partial n_{eff}}{\partial l}$ se refere ao efeito elasto-ótico, $\frac{n_{eff} \partial \Lambda}{\partial l}$ se refere ao efeito da expansão elástica, $\frac{\Lambda \partial n_{eff}}{\partial T}$ se refere ao efeito termo-ótico e $\frac{n_{eff} \partial \Lambda}{\partial T}$ se refere ao efeito da expansão térmica.

As sensibilidades espectrais típicas de redes de Bragg padrão são de $\sim 13,7$ pm/°C para variações de temperatura e $\sim 1,2$ pm/ $\mu\epsilon$ para variações de deformação, cujos coeficientes são aplicados para um comprimento de onda de Bragg próximo à 1550 nm, sendo $\mu\epsilon$ *microstrain* ou deformação relativa correspondente a 1 μ m/m. Devido à λ_B ser simultaneamente sensível às variações na temperatura e na deformação, são necessárias técnicas de solução de sensibilidades cruzadas (OTHONOS; KALLI, 1999).

Uma variação de temperatura sobre a rede de Bragg ocasiona um desvio de comprimento de onda ($\Delta\lambda_{BT}$) que é calculado por:

$$\Delta\lambda_{BT} = \lambda(\alpha + \xi)\Delta T, \quad (5)$$

na qual ξ é o coeficiente dominante e representa o coeficiente termo-ótico da fibra, responsável por cerca de 95% do deslocamento do comprimento de onda. Já α representa o coeficiente de expansão térmica do material da fibra, passando a ser mais significativo em temperaturas superiores a 800 °C (KERSEY *et al.*, 1997).

2.2.1 Fotossensibilidade da fibra ótica

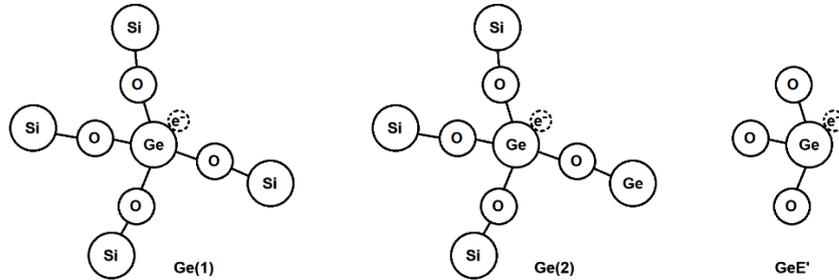
A princípio, acreditava-se que a fotossensibilidade estava associada apenas às fibras óticas dopadas com germânio. Porém, mais tarde, verificou-se que o fenômeno também poderia ocorrer em fibras óticas dopadas com outros elementos, tais como o boro e o nitrogênio. Mesmo assim, as dopadas com germânio, de fácil aquisição por ser padrão para telecomunicações, ainda são as mais utilizadas na fabricação de dispositivos em fibras óticas (KAMIKAWACHI, 2003).

Durante o processo de fabricação da fibra, conhecido como processo modificado de deposição química de vapor (MCVD – *Modified Chemical Vapor Deposition*), formam-se defeitos associados ao germânio. Nesse processo depositam-se gases a alta temperatura, como o tetracloreto de germânio/silício e o oxigênio, dentro de um tubo de sílica que é, então, colapsado. Surgem dióxidos de germânio e silício como produto dessa reação e sub-óxidos de germânio e silício como subprodutos, além de defeitos no núcleo da fibra (KASHYAP, 1999).

Quando a fibra ótica é dopada com germânio, podem ser encontrados defeitos dos tipos Ge(n) que possuem um elétron desemparelhado ligado ao átomo de germânio (Figura 3): no defeito Ge(1) o átomo de germânio ainda possui quatro ligações com moléculas O-Si; no defeito Ge(2), o átomo de germânio ainda possui uma ligação com a molécula O-Ge e três ligações com moléculas O-Si; no defeito GeE', conhecido como Ge(0) ou Ge(3), ocorre a deficiência de um átomo de oxigênio (Figura 3). Já no defeito GeO (Figura 4) o átomo de germânio está ligado a outro átomo de germânio ou silício. Um defeito GeO pode se transformar em um defeito

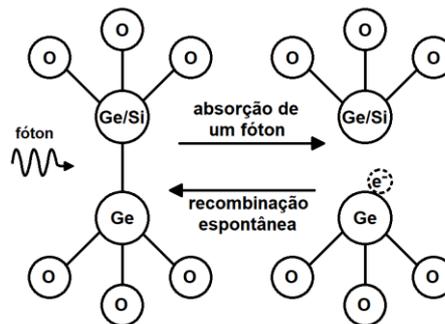
GeE', por absorção de um fóton, e vice-versa, por recombinação espontânea (KAMIKAWACHI, 2003; KASHYAP, 1999).

Figura 3 – Defeitos em fibras dopadas com germânio.



Fonte: Adaptado de Kamikawachi (2003).

Figura 4 – Transição do defeito GeO para o defeito GeE' pela absorção de um fóton.



Fonte: Adaptado de Kashyap (1999) e de Kamikawachi (2003).

2.2.2 Hidrogenação em fibras óticas

O processo de hidrogenação, em que a fibra é varrida por uma chama hidrogenada na área de interesse ou é confinada em uma câmara pressurizada com hidrogênio por diversos dias, aumenta a fotossensibilidade da fibra ótica (HILL *et al.*, 1993b). Em ambos os processos ocorre a difusão de hidrogênio para o interior da fibra, que pode ser gravada utilizando *lasers* em 248 nm, 193 nm e outros comprimentos de operação próximos (ÅSLUND; CANNING; YOFFE, 1999).

A técnica da hidrogenação em câmara pressurizada é a mais comum, na qual a fibra ótica é mantida em uma câmara de hidrogênio sob alta pressão, entre 20 atm e 750 atm, em temperaturas entre 20 °C e 75 °C, promovendo a difusão de hidrogênio para o núcleo da fibra (LEMAIRE *et al.*, 1993). Esse processo ocorre, normalmente,

em um período de alguns dias, podendo ser deixado por mais tempo sob essas condições sem aumento apreciável na fotossensibilização.

Ao ser exposta à luz ultravioleta (UV) ocorre a dissociação do H₂ e a formação de moléculas Si-OH ou Ge-OH, facilitando-se a criação de defeitos (ZHANG; KAHIRIZI, 2007). A hidrogenação contribui para a fotossensibilidade devido ao fato de que o átomo de hidrogênio reage com o íon de germânio, formando o defeito GeH, que muda consideravelmente a banda de absorção no ultravioleta, variando o índice de refração local de acordo com os modelos de Kramers-Kronig (KASHYAP, 1999).

A presença do hidrogênio difundido no interior da fibra mantém a fotossensibilidade por intervalos da ordem de dezenas de horas em pressões e temperaturas ambientes. Dessa maneira, fibras óticas processadas com tal técnica devem permanecer em câmara de hidrogênio, conforme as temperaturas e pressões indicadas ou mantidas sob refrigeração, para minimizar a taxa de difusão de hidrogênio para o exterior da fibra ótica (KAMIKAWACHI, 2003).

A taxa de difusão do hidrogênio para o interior da fibra (D) é dada em cm²/s, de modo que:

$$D = 2,83 \cdot 10^{-4} e^{\frac{-40,19 \text{ kJ/mol}}{RT}}, \quad (6)$$

na qual R se refere a constante universal dos gases perfeitos, que equivale a 8,31 J/(K.mol) e T se refere à temperatura em Kelvin (K). Logo, a difusão do hidrogênio é dependente da temperatura e da pressão a que foi mantida a fibra ótica (KASHYAP, 1999).

2.2.3 Gravação direta de FBG sob máscara de fase

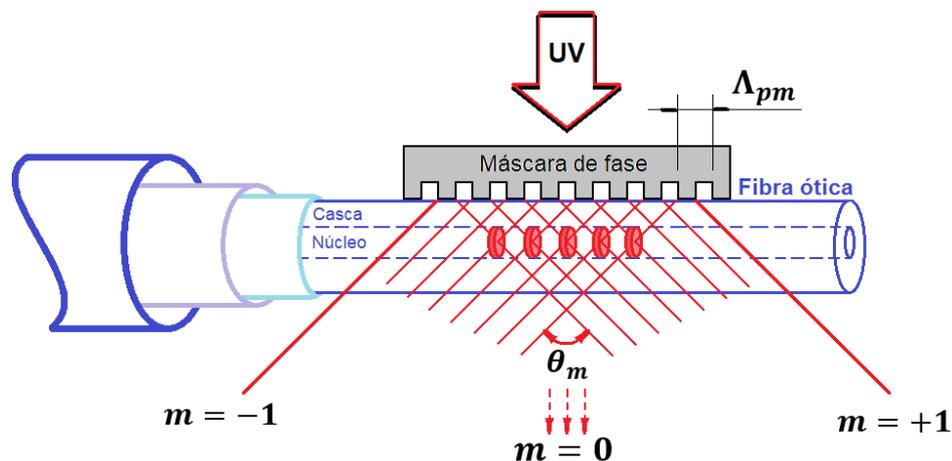
Existem diversas técnicas para gravação de FBG, tais como a técnica interferométrica, a gravação ponto a ponto e a técnica de iluminação direta sob máscara de fase – versão de técnica interferométrica utilizada nas gravações do presente trabalho. Nessa técnica, para modular espacialmente o índice de refração do núcleo da fibra, uma máscara de fase é iluminada diretamente e utilizada como elemento ótico difrator que produz o desejado padrão de interferência (OLIVEIRA, 2012).

A técnica de gravação sob máscara de fase por fonte *laser* ultravioleta é amplamente utilizada para gravação de redes de Bragg em fibra ótica (HILL *et al.*, 1993a), devido a sua razoável capacidade de repetibilidade, elevada estabilidade e pela simplicidade em comparação com as demais (FOKINE, 2002; MIHAILOV *et al.*, 2004; PAL *et al.*, 2003; SOUSA, 2011).

Na Figura 5 mostra-se, em representação esquemática, o efeito da difração de um feixe ultravioleta utilizado em gravação com o uso de máscara de fase. A máscara de fase é constituída por placa de sílica fundida com depressões periódicas em uma de suas superfícies e sua periodicidade é denominada de Λ_{pm} (*pm, phase mask*).

A máscara de fase pode ser projetada de maneira que, ao ser atravessada por feixe de luz UV, resulte em intensidade difratada de ordem zero ($m = 0$) minimizada, verificando-se nessa ordem tipicamente menos de 3% da potência transmitida. Além disso, ocorre a maximização da intensidade difratada das ordens $m = +1$ e $m = -1$ do feixe, verificando-se nessas ordens tipicamente mais de 35% da potência transmitida (HILL *et al.* 1993a).

Figura 5 – Técnica de iluminação direta sob máscara de fase para gravação de FBG.



Fonte: Adaptado de Hill *et al.* (1993a) e Oliveira (2012).

Ao combinar os feixes difratados de ordens $m = +1$ e $m = -1$, surge um padrão de franjas de interferência construtiva, que provoca a diminuição do índice de refração no núcleo da fibra ótica. Dessa maneira, o índice de refração do núcleo da fibra ótica é modulado, resultando numa rede com periodicidade Λ , correspondendo à metade da periodicidade da máscara de fase, tal que:

$$\Lambda = \Lambda_{pm}/2 . \quad (7)$$

Logo, o comprimento de onda de Bragg, apresentado anteriormente na Equação (1) para a condição de incidência normal do feixe ultravioleta sobre a máscara de fase com a fibra ótica paralela a máscara, pode ser reescrito como (OTHONOS; LEE, 1995):

$$\lambda_B = n_{eff} \Lambda_{pm} , \quad (8)$$

necessitando apenas conhecer o índice de refração efetivo da fibra n_{eff} e a periodicidade da máscara de fase Λ_{pm} .

Assim, para os comprimentos de onda que não satisfazem a condição de Bragg, a interferência ótica refletida por cada plano subsequente torna-se progressivamente fora de fase e eventualmente se anulam. Ao se chegar na condição de Bragg, a parcela da interferência ótica refletida por cada plano da rede contribui construtivamente na direção contrapropagante, formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede (OTHONOS; KALLI, 1999).

Para a gravação de redes sementes saturadas, que serão posteriormente regeneradas, é necessária a etapa de hidrogenação da fibra ótica seguida da gravação da FBG (OLIVEIRA, 2012). Conforme já mencionado anteriormente, a hidrogenação aumenta a fotossensibilidade na fibra e uma maior fluência do *laser* ultravioleta produz redes sementes saturadas, as quais são caracterizadas por espectro alargado (PATRICK *et al.*, 1995; EGAN *et al.*, 1996). A regeneração pode ser obtida através de tratamento térmico adequado da FBG, ao final do qual recebe o nome de rede de Bragg regenerada em fibra ótica (RFBG), que é caracterizada por elevada durabilidade em altas temperaturas (CANNING *et al.*, 2009).

2.2.4 Estabilidade para medições térmicas

Desde o começo, a estabilidade da amplitude do sinal refletido das FBGs para medições de temperatura proporcionou novos campos para sua aplicação. Várias

investigações foram feitas para explorar os mecanismos do efeito de regeneração e sua influência em medições térmicas (POLZ *et al.*, 2021).

Uma vez formadas e, particularmente, após o seu recozimento em temperaturas mais altas, as redes regeneradas mostraram-se robustas, mas sensíveis a mudanças nas propriedades gerais da fibra ótica, como, por exemplo, curvaturas acentuadas (CANNING, 2016).

Até o momento, não existe uma teoria abrangente que possa explicar todos os fenômenos observados sobre o efeito de regeneração. No entanto, existe uma ampla base de conhecimento, que pode ser utilizada para fabricação e aplicação de FBGs (POLZ *et al.*, 2021).

De acordo com Fokine (2002), a modulação do índice de refração final da RFBG, a princípio, foi atribuída à variação espacial da concentração de flúor no núcleo da fibra ótica, alcançada depois da regeneração, devido a exposição da fibra ótica hidrogenada, contendo flúor, à irradiação UV do *laser* durante a gravação. Até então 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. Nesse processo, a difusão do hidrogênio possui uma dependência quadrática com a distância (em cm) na fibra ótica, que faz com que a modulação do período da rede tenha um efeito na estabilidade térmica da mesma devido à formação da hidroxila (OH), constituindo-se, assim, defeitos na matriz de sílica, resistentes às altas temperaturas.

O processo de regeneração também pode ser explicado pelo modelo de cristalização da sílica, que leva em conta a razoável fragilidade da RFBG após o tratamento térmico. A sílica vítrea pode cristalizar-se em altas temperaturas, na ordem dos 900 °C, sob alta pressão, proveniente das diferenças do coeficiente de expansão térmica entre núcleo e casca. Uma FBG original do Tipo I é produzida pela modulação periódica da hidroxila (OH) induzida por uma fonte *laser* ultravioleta, o que aumenta a variação periódica da deformação na interface entre casca e núcleo. A formação da hidroxila no vidro promove uma dilatação interna de pressão hidrostática onde se espera a relaxação do vidro das fibras óticas. Ao aquecer a FBG a altas temperaturas ocorre uma variação periódica de pressão e, conseqüentemente, há deformação suficiente para cristalizar a rede (CANNING *et al.*, 2008; BISWAS *et al.*, 2016).

Além disso, as RFBGs podem ser produzidas com fibras óticas sem flúor como dopante e também em fibras não hidrogenadas (OLIVEIRA; MULLER;

KALINOWSKI, 2011; CORADIN *et al.*, 2013) que permanecem dezenas de horas a temperatura de 800 °C sem apresentarem degradação significativa na amplitude do sinal refletido. Assim, constatou-se que os elementos dopantes não são essenciais para a regeneração, mas facilitam a ocorrência do processo. Porém, é interessante mencionar que a maior parte da literatura relata a regeneração em redes de Bragg gravadas em fibras fotossensíveis, nas quais também são obtidas redes sementes saturadas com menor energia do *laser* (OLIVEIRA, 2012).

Há uma oportunidade de mercado considerável para instrumentação não elétrica de altas temperaturas usando sistemas pontuais ou multipontos quase-distribuídos (LINDNER *et al.*, 2011). Portanto, surge um espaço considerável para melhorias do material da fibra ótica. Como exemplo, pode-se citar a proposta de Canning *et al.* (2010), que propõem o uso de vidros de alta temperatura de transição vítrea, como fibras à base de aluminossilicato de alto teor, a serem fabricados no CGCRI (*Central Glass and Ceramic Research Institute*), na Índia. Um vidro de aluminossilicato à base de zircônia também foi fabricado, posteriormente, e apresentou alta resistência térmica (YANG *et al.*, 2014), seguindo um trabalho semelhante usando fibra de aluminossilicato de alta concentração (ELSMANN *et al.*, 2014). Porém, embora possa haver certos materiais concorrentes interessantes, como safira, o futuro continua a parecer promissor para a tecnologia à base de sílica, mesmo que isso signifique fundir safira em sílica (DRAGIC *et al.*, 2012).

2.3 ENCAPSULAMENTO

Previamente ao processo de gravação sob máscara de fase, é preciso remover a cobertura de acrilato da fibra ótica, no ponto de exposição ao *laser*, fragilizando o segmento da fibra. Além disso, o processo de produção de uma RFBG provoca maiores danos à estrutura cristalina, pois a rede semente passa por altas temperaturas durante o tratamento térmico de regeneração, tornando-a frágil e extremamente difícil de manusear em relação a própria FBG que a originou.

O encapsulamento das redes de Bragg é feito através da aplicação de tubo capilar cerâmico, metálico ou de materiais compostos, que envolve a fibra ótica de maneira a dificultar o seu rompimento devido a curvatura da mesma. Moura (2019) apresenta duas alternativas de encapsulamento (Figura 6): (1) encapsulamento de alumina (Al₂O₃ FRIALIT 121-11100-0) com diâmetro externo de 1 mm e diâmetro

interno de 0,5 mm; (2) encapsulamento com capilar metálico em aço inox (AISI 304), com 1,55 mm de diâmetro externo e 0,30 mm de diâmetro interno.

Figura 6 – Encapsulamentos que podem ser utilizados em FBGs e RFBGs. Acima o tubo de alumina e abaixo o tubo de aço inox.



Fonte: Moura (2019).

No trabalho de Moura (2019), foi constatado que há maior sensibilidade térmica, entre FBGs e RFBGs gravadas em fibra ótica G-652 para operação monomodo, ao se utilizar o encapsulamento de aço inox em comparação com o de alumina. Com encapsulamento de aço inox, a sensibilidade térmica média total das RFBGs foi 7,04% maior que a das FBGs. Com encapsulamento de alumina, a sensibilidade térmica média total das RFBGs foi 4,23% maior que a das FBGs. A sensibilidade térmica só foi maior no caso de fibra nua, ou seja, sem encapsulamento, no qual a média total das RFBGs foi 11,55% maior que a das FBGs. Porém sua aplicação em campo, em altas temperaturas, fica inviável sem um encapsulamento. Portanto, o encapsulamento provoca redução na sensibilidade térmica, mas facilita o manuseio, apresentando-se adequado para aplicação em campo.

2.4 REGENERAÇÃO

Redes de Bragg regeneradas (RFBG) são uma categoria de redes que descrevem decaimento de amplitude espectral seguido de recrescimento, na fase de tratamento térmico em elevadas temperaturas, em processos pós gravação. As características da rede semente influenciam a sua regeneração. Observa-se que a refletividade da rede semente apresenta uma relação de proporcionalidade direta em relação à refletividade da rede regenerada. Por esse motivo, fibras com elevada fotossensibilidade demonstram razoáveis resultados no processo de regeneração (POLZ *et al.*, 2021).

A técnica de regeneração consiste em submeter a rede semente (FBG original saturada) a um processo de recozimento (*annealing*) entre 700 °C e 1100 °C. Nessa

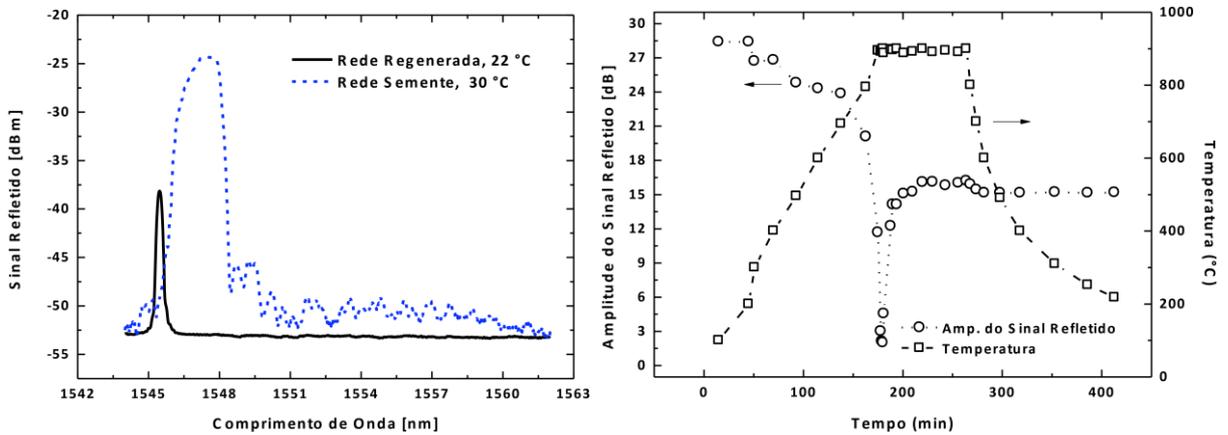
faixa de temperatura a rede semente tem seu espectro refletido completamente ou parcialmente apagado, e, então, começa a recuperar a sua intensidade, gerando o recrescimento de uma nova rede, denominada de rede de Bragg regenerada (FOKINE, 2002; CANNING *et al.*, 2008; CANNING *et al.*, 2009; BARRERA *et al.*, 2012), que apresenta desvio para menor comprimento de onda em relação ao λ_B original. Esse deslocamento espectral é atribuído à redução no índice de refração do núcleo da fibra ótica, nos pontos de rede (CANNING *et al.*, 2008).

Em outras palavras, a FBG saturada inicial (rede semente) possui um espectro fortemente saturado que, ao passar por um tratamento térmico de regeneração, resulta em uma RFBG com características de qualidade espectral melhores, tais como banda espectral mais estreita, baixa amplitude ou ausência de lóbulos laterais, estabilidade a altas temperaturas e, conseqüentemente, maior facilidade de leitura (LAFFONT; CORILLARD; FERDINAND, 2013).

Como mecanismos responsáveis pela regeneração, pode-se citar a compactação e a densificação, que são fenômenos ligados a estrutura da sílica (LINDNER *et al.*, 2009; CANNING *et al.*, 2008). Redes que foram gravadas em fibra fotossensível e/ou hidrogenada, que passam pelo processo de regeneração apresentam elevada estabilidade térmica. Há relatos de redes que suportam temperaturas superiores a 1300 °C (ÅSLUND *et al.*, 2010).

Como exemplo de regeneração, pode-se ver, na Figura 7(a), os espectros em reflexão de uma rede semente (linha tracejada) em uma fibra G-652 em operação monomodo, que foi gravada com 3 mm de comprimento. A reflexão final (linha contínua) mostra a FBG após o processo de regeneração (RFBG). Na Figura 7(b), pode-se ver que o processo de regeneração ocorreu em 900 °C, embora o apagamento da rede semente teve início após 180 minutos, ainda durante a rampa de aquecimento. Durante os 100 minutos seguintes, houve o recrescimento do sinal refletido até, aproximadamente, 15 dB, que se estabilizou nesse valor, formando então uma RFBG (OLIVEIRA, 2012).

Figura 7 – Espectro em reflexão: (a) Espectro inicial de uma FBG saturada (linha tracejada) e espectro final da FBG após a regeneração (linha contínua); (b) processo de regeneração, aumento da temperatura até 900 °C (quadrados) com a diminuição da amplitude do sinal refletido (círculos).



Fonte: OLIVEIRA, 2012.

Pode-se perceber que a rede semente apresentava seu espectro fortemente saturado e que, em temperaturas próximas de 900°C, seu sinal refletido foi diminuindo até um mínimo próximo de 2 dB e, então, iniciou recuperação em sua intensidade, gerando o recrescimento de uma nova rede, com um desvio para um comprimento de onda de Bragg menor.

Outro fato que merece destaque é que a regeneração pode ocorrer em temperaturas mais baixas, aproximadamente em 650 °C, porém o intervalo de apagamento é maior, o que torna o processo muito mais lento do que a 900 °C (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada uma breve revisão bibliográfica da literatura referente às redes de Bragg regeneradas e ao envelhecimento de redes de Bragg abaixo e acima da temperatura de regeneração.

3.1 REDES DE BRAGG REGENERADAS

Nas últimas duas décadas, foram realizadas investigações sobre FBGs regeneradas em diferentes tipos de fibras e com diferentes pré-tratamentos, criando uma ampla base de conhecimentos para fabricação e aplicação de RFBGs, conforme a necessidade de cada situação. Logo após os primeiros estudos, duas teorias alternativas, a teoria da cristalização e a teoria da composição química, foram estabelecidas, com ambas sendo apoiadas por diferentes observações experimentais (POLZ *et al.*, 2021).

Contudo, ambas as teorias tentam explicar os fenômenos de regeneração em toda a sua complexidade, porém, em particular, não explicam a regeneração de FBGs que não passaram pelo processo de hidrogenação (LINDNER *et al.*, 2009; KUMAR *et al.*, 2014) e, portanto, necessitam de maiores estudos. Observações como a regeneração em dois regimes de temperatura diferentes (POLZ *et al.*, 2014; TU *et al.*, 2017; CHAH *et al.*, 2019) ou o decaimento graduado observado em RFBGs (CANNING *et al.*, 2009; HOLMBERG; LAURELL; FOKINE, 2015) indicam que vários processos podem estar ativos em paralelo, o que pode mostrar diferentes dependências de temperatura.

O fato é que uma rede semente é necessária para propiciar a mudança estrutural associada às redes regeneradas. Na prática, há estudos que confirmam que uma rede semente forte resulta em uma rede regenerada forte (CANNING *et al.*, 2009).

Para Canning (2016), a regeneração tem se mostrado um processo interessante, pois possibilita medição de temperaturas muito altas com fibras óticas, que antes não eram possíveis, e avaliação de propriedades fundamentais do vidro, apresentando novos direcionamentos para projetos de fibras óticas e de guias de ondas. Portanto, as redes regeneradas dependem fortemente da natureza composta da fibra ótica, já que são produzidas na região do núcleo e dependem do revestimento

do vidro para não se romperem. Assim, a adição de hidrogênio e hélio, cria um ambiente extremamente rico para a engenharia de materiais vítreos.

Canning (2016) menciona ainda que, para operar em altas temperaturas, é importante todos os componentes da fibra ótica estarem totalmente relaxados. Por exemplo, as redes produzidas utilizando *laser* femtosegundo, que transmitem energia dentro de um período de tempo muito curto, acabam por introduzir tensões microscópicas adicionais, que podem ser melhoradas significativamente pelo pós-recozimento.

3.2 ENVELHECIMENTO TÉRMICO DE REDES DE BRAGG ABAIXO DA TEMPERATURA DE REGENERAÇÃO

O envelhecimento térmico de redes de Bragg pode ser utilizado para obter sua durabilidade e para estimar sua vida útil. Muitos experimentos identificaram parâmetros específicos, que influenciam criticamente o comportamento de FBGs regeneradas. A força espectral da rede semente determina a força espectral de sua respectiva RFBG e o material dopante (principalmente germânio) e sua concentração determinam o intervalo de temperatura na qual as redes podem se regenerar dentro de um período razoável. A refletividade das RFBGs tem se mostrado extremamente estável, especialmente quando a temperatura fica abaixo da temperatura de regeneração (POLZ *et al.*, 2021).

Por exemplo, sem regeneração, as FBGs produzidas por Mihailov *et al.* (2004) foram submetidas a aquecimento nas temperaturas de 500 °C por 2,4 horas, 710 °C por 15,2 horas, 950 °C por 16 horas e 1050 °C por 4 horas. Nas temperaturas de 500 °C e 710 °C não foram constatadas perdas significativas no sinal transmitido. Em 950 °C, a modulação de índice estabilizou-se em 75% do seu valor inicial e, em 1050 °C, a rede apagou-se após 4 horas. As redes eram gravadas para operação monomodo em fibras óticas (Corning®, SMF-28) por uma fonte *laser* com pulsos de femtosegundos (120 fs) no infravermelho (IR) em 800 nm, com energia de 300 µJ/pulso, taxa de repetição de 1 kHz e máscara de fase otimizada para o comprimento de onda do *laser*.

Já quando pré-aquecidas em 710 °C por 2 horas e, em seguida, regeneradas em 920 °C até atingir um nível ideal de refletividade, podem operar por 9000 horas em 760 °C, 810 °C, 850 °C e 890 °C (LAFFONT; CORILLARD; FERDINAND, 2013),

abaixo da temperatura de regeneração. As fibras utilizadas (SMT1310H) para operação monomodo foram hidrogenadas por 2 semanas a 100 bar em 20 °C. As quatro redes foram gravadas com 5 mm de comprimento, utilizando o interferômetro de Lloyd em comprimento de onda de 244 nm, emitido por um *laser* de íons de argônio em frequência dupla (FreD Innova 300). Os deslocamentos do comprimento de onda de Bragg foram semelhantes, mas demonstraram estar relacionados a temperatura. No caso da RFBG em 890 °C, foi observada uma rápida diminuição inicial seguida por um aumento no comprimento de onda, que voltou a aumentar pela segunda vez em 3500 horas. De uma temperatura para a outra, os deslocamentos ocorreram a taxas menores, conforme a temperatura era menor, de maneira que, em 760 °C e em 810 °C, não foi observado um segundo aumento no comprimento de onda. Portanto, a alternância entre diminuição e aumento no comprimento de onda ocorreu muito mais rápido em temperaturas mais altas (LAFFONT; CORILLARD; FERDINAND, 2013).

Um estudo detalhado da dinâmica durante a regeneração térmica de redes de Bragg foi realizado por Holmberg, Laurell e Fokine (2015), que analisaram 21 redes regeneradas a 1100 °C submetidas a *pre-annealings* adicionais em patamares de temperatura entre 200 °C e 1100 °C, com passos de 100 °C, com *annealing* adicional em 950 °C e *annealing* inicial de 85 °C para a etapa de difusão de hidrogênio ser completa. A duração de cada patamar de temperatura foi de 15, 30 ou 60 minutos, com exceção da duração do *annealing* inicial que foi de 72 horas. Os autores concluíram que a dinâmica durante o pré-aquecimento e a regeneração da rede em fibra de telecomunicações padrão hidrogenadas corroboram com o mecanismo molecular da água e a reação de difusão de hidroxilas em vidro de sílica. As redes foram gravadas com o auxílio de um *laser* de estado sólido bombeado por diodo Q-switched Nd:VO₄ (Xiton-Photonics GmbH®, IMPRESS 213) operando em 213 nm, com pulso de ~6 ns e taxa de repetição de 15 kHz.

Além disso, Feng *et al.* (2020) relataram que a regeneração de FBG do Tipo I desempenha um papel importante nas aplicações em campo, auxiliando para que a FBG resista a altas temperaturas por um longo tempo, melhorando muito o desempenho da FBG e atendendo aos requisitos de medição. Os detalhes da regeneração da FBG foram investigados com base na técnica de recozimento em alta temperatura e o desempenho de detecção de temperatura da RFBG foi estudado posteriormente. Uma RFBG foi fabricada pelo processo de *annealing* (recozimento/aquecimento) de alta temperatura, por meio de um processo de controle

de temperatura por etapas, e a temperatura de regeneração foi de 900 °C. Então, a performance da sensibilidade térmica do sensor RFBG foi testada experimentalmente em uma ampla faixa de temperatura, desde a temperatura ambiente até 600 °C, também abaixo da temperatura de regeneração.

Os resultados experimentais de Feng *et al.* (2020) mostraram que a RFBG obtida por recozimento em alta temperatura apresentou adequada estabilidade térmica. Comparado com uma FBG comum, a potência refletida em λ_B da RFBG apresentou baixa flutuação com a mudança de temperatura. A sensibilidade à temperatura durante o processo de aquecimento foi de 12,95 pm/°C e durante o processo de resfriamento foi de 12,86 pm/°C. A diferença na sensibilidade à temperatura foi razoavelmente baixa e a linearidade foi superior a 0,99, mostrando que a RFBG possuiu estabilidade térmica na faixa da temperatura ambiente até aproximadamente 600 °C. A RFBG produzida se mostrou adequada para operar em alta temperatura e seu processo de produção foi razoavelmente simples.

Portanto, além da estabilidade térmica, um aspecto essencial para o uso de RFBGs como sensores de temperatura é a estabilidade do comprimento de onda das RFBGs. Foi constatado que, abaixo da temperatura de regeneração, apesar de apresentar estabilidade reflexiva, as RFBGs mostram um desvio muito pequeno, mas mensurável, em comprimento de onda, semelhante a outras FBGs de altas temperaturas, que podem ser apreciáveis em medições a longo prazo. Algumas investigações indicam que esse desvio pode ser reduzido através de processos de recozimento, semelhantes aos usados para termopares (POLZ *et al.*, 2021).

3.3 ENVELHECIMENTO TÉRMICO DE REDES DE BRAGG ACIMA DA TEMPERATURA DE REGENERAÇÃO

Acima da temperatura de regeneração, uma RFBG ainda pode operar algumas horas, mas uma degradação contínua nas propriedades da rede será observada (POLZ *et al.*, 2021). Não é comum, mas foi relatado por alguns autores, conforme descrição a seguir.

Canning *et al.* (2008) constataram que uma rede regenerada a 900 °C submetida a *annealing* adicional em 1000 °C pode suportar até 1295 °C. A rede foi gravada diretamente, na forma padrão, com comprimento de 5 mm em fibra fotossensível de sílica dopada com germânio (Ge) e codopada com boro (B), com o

auxílio de um *laser* excímero ArF (fluoreto de argônio) em 193 nm, com pulso de 15 ns, fluência de pulso entre 40 e 70 mJ/cm², taxa de repetição de 10 Hz e fluência acumulada de 360 J/cm². A fibra foi, previamente, hidrogenada por 24 horas em 180 atm e possuía núcleo de, aproximadamente, 20 mol% de B₂O₃ (trióxido de boro) e 33 mol% de GeO₂ (dióxido de germânio), com o interior de sua casca com 11 mol% de P (fósforo) e menos que 4 mol% de F (flúor). A fibra esteve sob tensão padrão de ~100 g.

Outros autores mencionaram que 10 redes sementes de GF1 (~12 mol% B₂O₃; ~30 mol% GeO₂) (SHAO *et al.*, 2012) e redes sementes de fibra dopada B/Ge (~12 mol% B₂O₃; ~33 mol% GeO₂) (WANG *et al.*, 2013b) regeneradas a 850 °C foram submetidas a *annealing* adicional em 1100°C e resistiram a 1100 °C durante 20 minutos. As redes foram gravadas diretamente sob máscara de fase com comprimento de 10 mm com o auxílio de um *laser* ArF em 193 nm, com pulso de 15 ns, fluência de pulso de 95 mJ/cm², taxa de repetição de 30 Hz. Já a fluência acumulada foi de 113 J/cm² (WANG, 2013b) e de 7,0 J/cm² (SHAO *et al.*, 2012). A fibra foi, previamente, hidrogenada em 180 bar a 80 °C por 4 dias (WANG, 2013b) e por 2 dias (SHAO *et al.*, 2012).

Wang *et al.* (2013a) relataram que redes sementes de GF1 (~12 mol% B₂O₃; ~30 mol% GeO₂) e de SMF-28 (~3 mol% GeO₂) regeneradas a 850 °C foram submetidas a *annealing* adicional em 1100°C e resistiram por 160 minutos nessa temperatura. Neste caso, diferentes cargas (0 g, 3 g, 6 g, 9 g) foram usadas durante o processo de regeneração e recozimento. As redes foram gravadas diretamente sob máscara de fase com comprimento de 10 mm com o auxílio de um *laser* ArF em 193 nm, com pulso de 15 ns, fluência de pulso de 67 mJ/cm², taxa de repetição de 30 Hz e fluência acumulada de 80 J/cm², no caso das fibras GF1, e de 241 J/cm², no caso das fibras SMF-28. A fibra foi, previamente, hidrogenada em 180 bar a 80 °C por 4 dias.

Portanto, na literatura, quando são relatadas redes de Bragg acima de sua temperatura de regeneração, as RFBGs operam por minutos ou horas apenas, ao contrário do que foi verificado na presente tese.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão apresentados todos os procedimentos realizados para a implementação do trabalho. Descrevem-se todas as FBGs e as RFBGs produzidas e como, posteriormente, foram alocadas, tanto no caso dos sensores térmicos para medição de baixas temperaturas (temperatura ambiente), como no caso dos sensores térmicos para medição de altas temperaturas em intervalos de 10 dias.

4.1 ETAPAS DA PRODUÇÃO DOS SENSORES TÉRMICOS

Os sensores térmicos foram produzidos em segmentos de fibra ótica (Draka®, G-652) para operação monomodo, com ~33 cm de comprimento. Na sequência, pode-se ver a descrição de cada uma dessas etapas.

4.1.1 Sensores térmicos para medição em baixas temperaturas (entre 0 °C e 40 °C)

Os sensores térmicos para medição de temperatura ambiente foram nomeados FBG1-P e RFBG1-P. A letra “P” se refere a “parede” na nomenclatura e indica que o sensor, posteriormente, foi fixado em uma parede metálica.

Para a produção do sensor FBG1-P realizaram-se as seguintes etapas, em ordem:

- 1- Gravação da FBG
- 2- Encapsulamento
- 3- Calibração em temperatura
- 4- Fixação do sensor em parede metálica para teste em campo

Para a produção do sensor RFBG1-P realizaram-se as seguintes etapas, em ordem:

- 1- Hidrogenação
- 2- Gravação da rede semente
- 3- Tratamento térmico para regeneração
- 4- Encapsulamento
- 5- Calibração em temperatura
- 6- Fixação do sensor em parede metálica para teste em campo

Com o intuito de verificar a flutuação da amplitude do sinal refletido pela fonte ótica do interrogador SM 125, produziu-se o sensor genérico RFBG7-G. A letra “G” se refere a “genérico” na nomenclatura. Para a produção do sensor RFBG7-G realizaram-se as seguintes etapas, em ordem:

- 1- Hidrogenação
- 2- Gravação da rede semente
- 3- Encapsulamento
- 4- Tratamento térmico para regeneração

4.1.2 Sensores térmicos para medição em altas temperaturas (entre 600 °C e 900 °C)

Os sensores térmicos para medição em altas temperaturas (entre 600 °C e 900 °C) foram nomeados RFBG2-F, RFBG3-F, RFBG4-F, RFBG5-F e RFBG6-F. A letra “F” se refere a “forno” na nomenclatura e indica que o sensor, posteriormente, foi mantido em altas temperaturas no interior de um forno de indução elétrico tubular.

Para a produção dos sensores RFBG2-F a RFBG6-F realizaram-se as seguintes etapas, em ordem:

- 1- Hidrogenação
- 2- Gravação da rede semente
- 3- Encapsulamento
- 4- Tratamento térmico para regeneração
- 5- Envelhecimento em altas temperaturas

4.2 HIDROGENAÇÃO

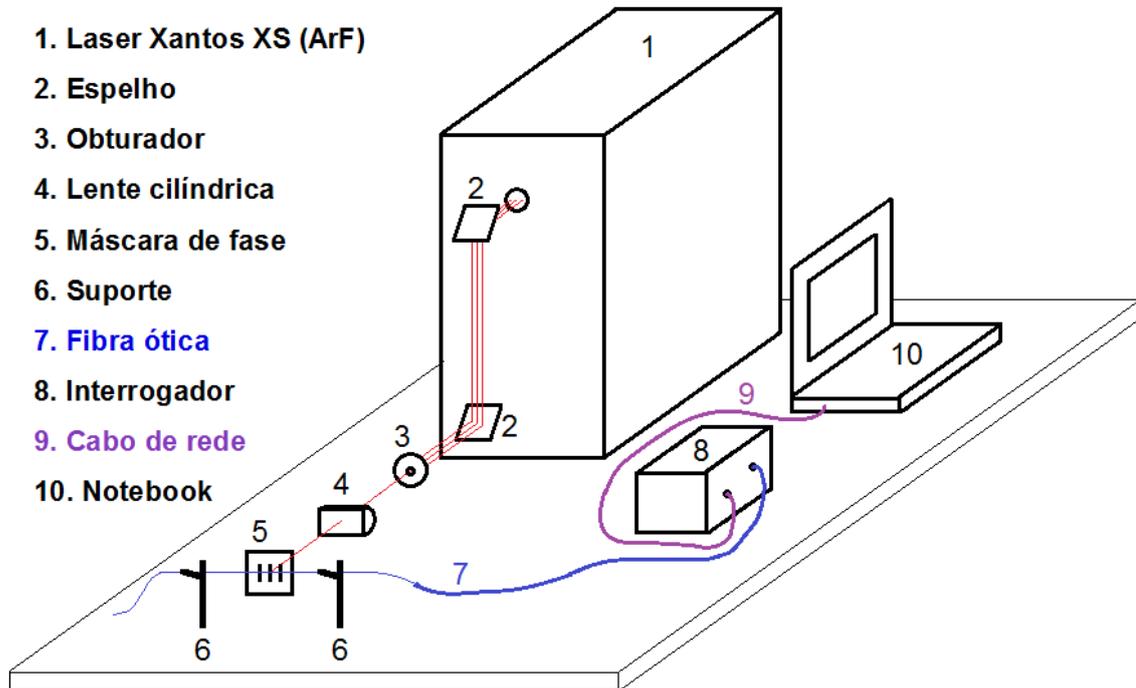
A câmara de hidrogenação é formada por tubo de aço inoxidável com 5 mm de diâmetro interno e 1 m de comprimento, comportando várias dezenas de fibras. Assim, um trecho de fibra ótica (Draka®, G-652) com 1 m de comprimento foi inserido na câmara de hidrogenação, sob pressão de 80 bar em temperatura ambiente. A fibra ótica permaneceu na câmara por um período de 7 dias e, então, foi retirada para se obter um segmento de fibra necessário para a posterior gravação de uma FBG.

4.3 GRAVAÇÃO

O *laser* utilizado nas gravações foi o Coherent®, Xantos XS, com comprimento de onda de emissão em 193 nm. Os sensores foram gravados com 3 mm de comprimento físico da rede, utilizando o método de gravação sob máscara de fase. A máscara de fase utilizada em cada uma das gravações era otimizada para o comprimento de onda do *laser*.

Na Figura 8, pode ser vista a representação esquemática do sistema de gravação utilizado no Laboratório Multiusuário de Fotônica (Multi-FOTON), na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba, local da produção e caracterização dos sensores FBG do presente trabalho. O sistema é constituído de um *laser* (1) que emite um feixe UV, através de um orifício na sua parte frontal superior, que é direcionado pelos espelhos planos idênticos (2) de forma a passar por um obturador (3), com o intuito de ajustar o comprimento da rede de Bragg até o limite de 3 mm definido do formato retangular do feixe *laser* emitido (nominal 3x6 mm). Em seguida, o feixe UV é focalizado por uma lente cilíndrica (4), para incidir sobre a máscara de fase (5). Por fim, posiciona-se a fibra ótica (7) o mais próximo possível e paralelamente à máscara de fase, por meio de dois suportes (6), sem flexionar a fibra. Antes de ser posicionada, é necessário remover a camada de acrilato da fibra e limpá-la, com o auxílio de papel desprovido de felpas e umedecido em álcool isopropílico, no trecho correspondente ao comprimento da máscara de fase (~10 mm a 20 mm). Além disso, a fibra ótica deve estar em um *pigtail* e ser conectada ao interrogador (8), interligado via cabo de rede (9) a um *notebook* (10). Para monitoração das gravações foi utilizado o interrogador ótico (Micron Optics®, SM 125) com resolução de 1,0 pm e frequência para aquisição de dados de 2 Hz.

Figura 8 – Representação esquemática do sistema de gravação de FBG.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2012).

Os parâmetros de gravação podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de gravação dos sensores térmicos.

Identificação	Laser Coherent® Xantos XS			Máscara de fase Ibsen®
	Energia (mJ/pulso)	Taxa de repetição (Hz)	Tempo de exposição (min)	Pitch (nm)
FBG1-P	1,80	250	20	1055,20
RFBG1-P	1,00	250	10	1058,90
RFBG2-F	1,00	250	10	1058,90
RFBG3-F	1,50	250	15	1058,90
RFBG4-F	1,50	250	15	1058,90
RFBG5-F	1,50	250	15	1058,90
RFBG6-F	1,50	250	15	1058,90
RFBG7-G	1,50	250	15	1058,90

Fonte: Autoria própria (2022).

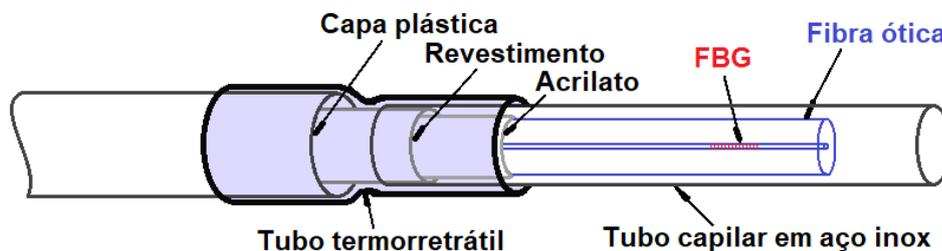
4.4 ENCAPSULAMENTO

Os sensores foram encapsulados utilizando um tubo capilar em aço inoxidável (AISI 304), com diâmetro interno de 0,3 mm e espessura de parede de 0,6 mm. Esta

proteção é necessária para aplicações em campo, pois as fibras óticas são razoavelmente sensíveis a impacto e curvatura.

A composição do encapsulamento pode ser vista na Figura 9. A fibra ótica possui uma proteção primária em acrilato e outras camadas de materiais plásticos, que foram removidas para fabricação desses sensores e substituídas pelo encapsulamento em aço inox. A fixação entre o tubo capilar e a capa plástica externa do cordão ótico foi obtida utilizando tubo termorretrátil, do mesmo tipo utilizado em isolamento de cabo elétrico em baixa tensão.

Figura 9 – Representação esquemática do encapsulamento de uma FBG para medição em reflexão.



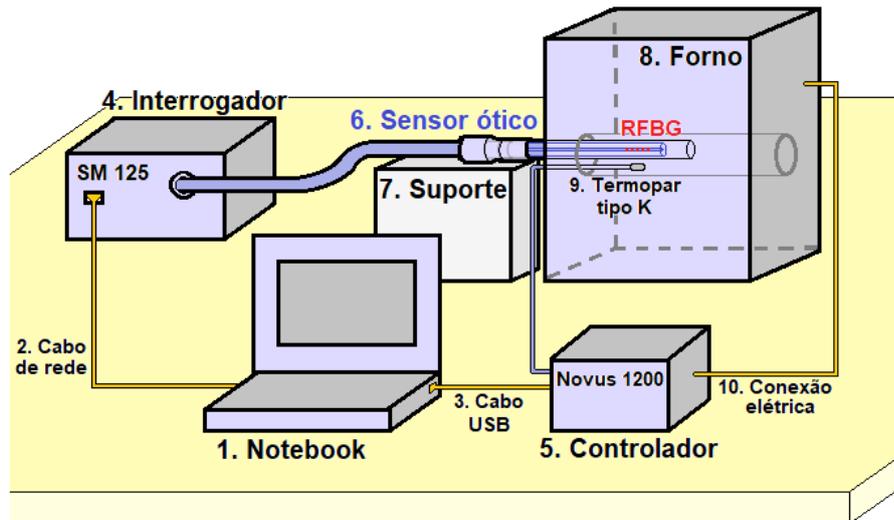
Fonte: Autoria própria (2022).

4.5 TRATAMENTO TÉRMICO PARA REGENERAÇÃO

A rede semente que produziu o sensor foi submetida a um processo de tratamento térmico para obtenção da rede de Bragg regenerada (RFBG). O referido sensor foi inserido em um forno elétrico tubular, o qual possui controle de temperatura até 1000 °C e foi desenvolvido no próprio grupo de pesquisa.

O *setup* de monitoração durante o tratamento térmico constituiu-se de *notebook* (1) interligado via cabo de rede (2) e via cabo USB (3) ao interrogador ótico (4) e ao controlador de temperatura (5), respectivamente. Além disso, o sensor a ser monitorado (6) foi conectado ao interrogador ótico através de *pigtail*, fixado em suporte de apoio (7) e acondicionado dentro do forno de indução elétrico tubular (8), conforme pode ser visto na Figura 10. Para o funcionamento do controlador de temperatura é necessário acoplá-lo a um termopar tipo K (9) no interior do forno e conectá-lo eletricamente ao mesmo (10).

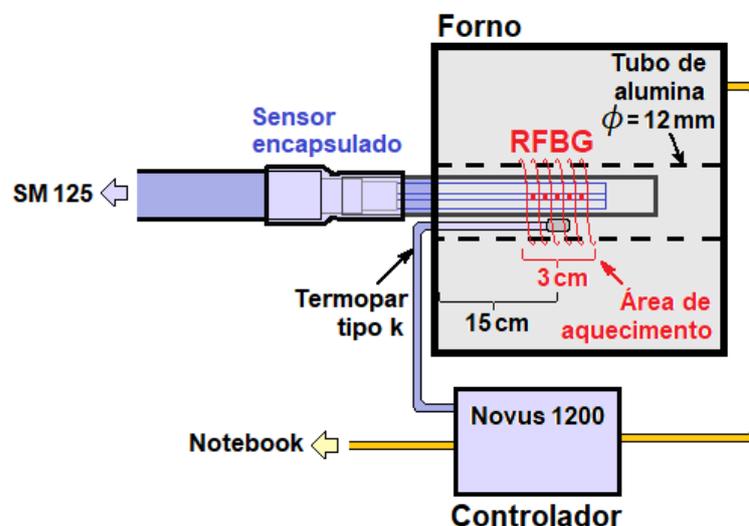
Figura 10 – Setup para monitoração do tratamento térmico.



Fonte: Autoria própria (2022).

O forno elétrico tubular é formado por uma resistência de níquel-cromo, posicionada a 15 cm da entrada, envolvendo um tubo de alumina com 12 mm de diâmetro. A potência é fornecida através de relé eletrônico comandado pelo controlador Novus 1200 (Figura 11). A rede de Bragg é posicionada no centro da área de aquecimento, a qual tem comprimento próximo a 3 cm. Para o monitoramento da temperatura interna do forno, um termopar tipo K, ligado ao controlador, obtém a temperatura na região da rede de Bragg.

Figura 11 – Detalhes da parte interna do forno, com exemplo de monitoração de um sensor encapsulado.



Fonte: Autoria própria (2022).

O forno foi programado conforme os dados apresentados na Tabela 2, que apresenta a especificação de cada uma das regenerações realizadas. O tempo total da regeneração é constituído do tempo da rampa de subida da temperatura somado ao tempo de estabilização da temperatura em seu nível superior.

Tabela 2 – Especificação das regenerações de cada sensor térmico em análise.

Identificação		Rampa de subida		Estabilização		Total
Sensor	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Tempo da rampa (min)	Temperatura estabilizada (°C)	Tempo mantido (min)	Tempo total
FBG1-P	-	-	-	-	-	-
RFBG1-P	22,0	900,0	30	900,0	75	1 h 45 min
RFBG2-F	20,0	900,0	30	900,0	60	1 h 30 min
RFBG3-F	23,0	850,0	20	850,0	57	1 h 17 min
RFBG4-F	21,0	850,0	20	850,0	84	1 h 44 min
RFBG5-F	23,0	850,0	20	850,0	61	1 h 21 min
RFBG6-F	23,0	850,0	20	850,0	207	3 h 47 min
RFBG7-G	23,0	850,0	20	850,0	344	6 h 04 min

Fonte: Autoria própria (2022).

Todos os sensores, após suas respectivas regenerações, foram seguidos de resfriamento até, aproximadamente, 22 °C (temperatura ambiente), de maneira natural, pela troca de calor com o ambiente.

4.6 CALIBRAÇÃO EM TEMPERATURA

Os sensores FBG1-P e RFBG1-P foram calibrados para obtenção da curva de sensibilidade térmica com o auxílio de uma pastilha termoelétrica Peltier (TEC) e controlador específico, com as temperaturas ajustadas para 5 °C e, em seguida, para 10 °C até a 60 °C, com passos de 10 °C, pois os referidos sensores têm a finalidade de serem operados em temperatura ambiente. Os sensores foram calibrados individualmente.

Para cada temperatura selecionada foi aguardado um tempo de 5 minutos de estabilização e foram adquiridos os espectros do sensor a cada minuto, totalizando 11 aquisições para cada temperatura. Para cada nível de temperatura foram realizadas as médias para os comprimentos de onda de Bragg (λ_B), compondo os pontos a serem ajustados para obtenção da curva de sensibilidade térmica.

Os pontos resultantes dos sensores FBG1-P e RFBG1-P foram ajustados linearmente e o valor do coeficiente de primeiro grau foi assumido como sensibilidade térmica.

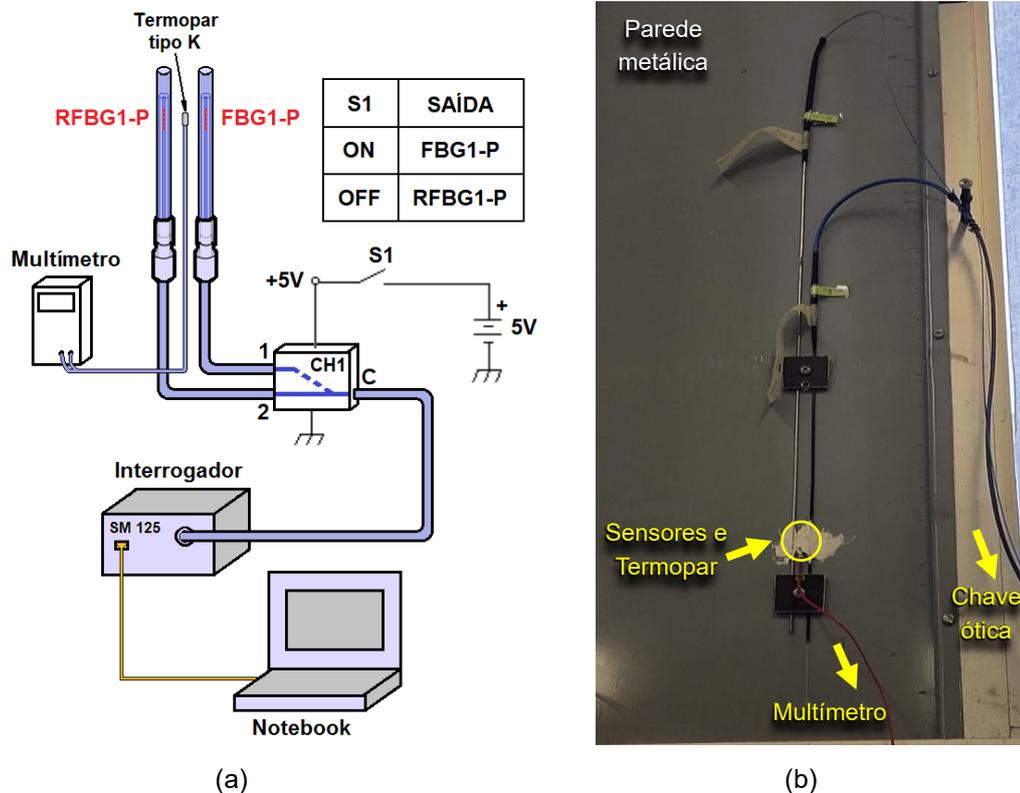
4.7 FIXAÇÃO DOS SENSORES FBG1-P E RFBG1-P EM PAREDE METÁLICA PARA TESTE EM CAMPO

Os sensores FBG1-P e RFBG1-P foram fixados em parede metálica (chapa metálica), próxima a uma janela do laboratório, com o auxílio de parafusos. A chapa metálica tem contato direto com o meio externo ao laboratório onde há variações de temperatura ambiente. O propósito para os sensores foi medir a temperatura na chapa metálica, correlacionar às medições de um termopar e também observar sua possível degradação espectral (envelhecimento). Na Figura 12 é mostrada a representação esquemática das ligações entre os equipamentos, os componentes elétricos e os sensores. Para evitar fadiga ou deficiência de acoplamento nos conectores óticos, optou-se por utilizar seleção via chave ótica, para o sensor a ser medido em cada operação. A chave ótica CH1 (JDS Uniphase®, 1:2 channel) é ativada por tensão contínua 5 V, que altera o caminho ótico entre C e porta 2 (leitura do sensor RFBG1-P), para o caminho ótico entre C e porta 1 (leitura do sensor FBG1-P). Como referência de temperatura utilizou-se um multímetro (ICEL®, MD-6111, com resolução de 1 °C) em conjunto com um termopar tipo K. Os dois sensores e o termopar foram acoplados termicamente à placa metálica com o auxílio de pasta térmica.

Foi obtida a taxa de variação da amplitude do sinal refletido de cada sensor, através de ajuste linear ao longo de 151 semanas, e sua expectativa de vida útil foi calculada, através de extrapolação da reta de ajuste, decaindo até atingir 1 dB. Esse valor de 1 dB foi definido por ser a amplitude mínima para a leitura da temperatura obtida no sensor, preservando uma relação sinal/ruído (SNR, *Signal to Noise Ratio*) razoável de ~1 dB.

Do valor da amplitude do sinal refletido, no final de cada extrapolação da função de ajuste linear, foi subtraído uma unidade de decibel. Em seguida, o resultado foi dividido pela taxa de variação da amplitude do sinal refletido, para obter a expectativa de vida útil de cada sensor ótico.

Figura 12 – Sensores FBG1-P e RFBG1-P para medição da temperatura ambiente em parede metálica: (a) representação esquemática; (b) montagem para teste em campo.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2012).

4.8 ENVELHECIMENTO EM ALTAS TEMPERATURAS

Os sensores regenerados RFBG2-F a RFBG6-F foram submetidos a altas temperaturas, utilizando-se o mesmo *setup* de monitoração apresentado anteriormente no subcapítulo 4.5, constituindo-se do interrogador ótico, do forno elétrico tubular e do controlador de temperatura mostrados na Figura 10. Além disso, a rede de Bragg, agora regenerada, foi da mesma maneira posicionada no centro da área de aquecimento do forno elétrico tubular apresentado na Figura 11, monitorando-se a temperatura interna do forno com um termopar tipo K, ligado ao controlador, para obter a temperatura na região da RFBG de cada um dos sensores.

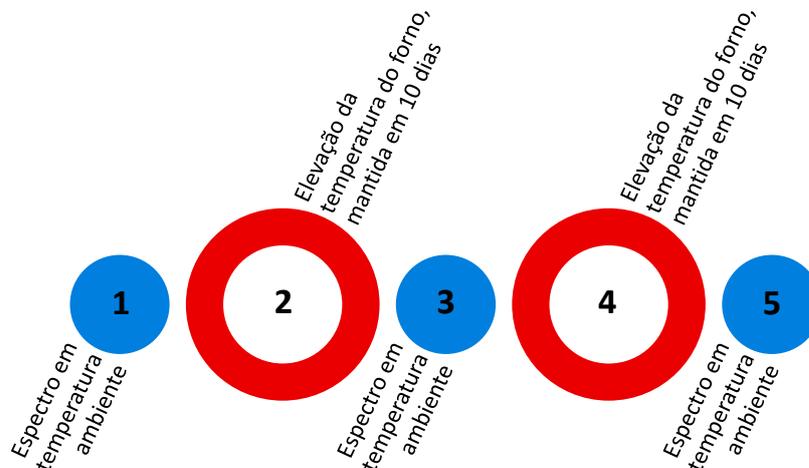
Após sua produção, os sensores óticos (RFBG) foram expostos a temperaturas elevadas, crescendo de cerca de 600-800 °C até cerca de 900-1000 °C, ou decrescendo de cerca de 900-1000 °C até 600-800 °C, permanecendo 10 dias em cada patamar, com passos de 50 °C ou 100 °C. Foram realizadas medições diárias dos espectros refletidos das RFBGs até a perda total de sua intensidade, para análise

da expectativa de vida útil dos sensores RFBG produzidos e para avaliação da influência da temperatura utilizada na produção das RFBGs em sua durabilidade.

Na Figura 13 pode ser vista a esquematização do modelo utilizado para o processo de envelhecimento térmico das RFBGs, exemplificando as etapas básicas que foram executadas neste trabalho (os itens 3 e 4 podem ser repetidos várias vezes):

1. No início, o espectro do sensor RFBG é obtido em temperatura ambiente ($\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$);
2. Depois, a temperatura do forno aumenta ou diminui um patamar de temperatura, que permanece por 10 dias, e o espectro do sensor RFBG é obtido diariamente;
3. Em seguida, a temperatura do forno é resfriada, naturalmente, por um dia até alcançar a temperatura ambiente ($\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$) e, novamente, o espectro do sensor RFBG é obtido;
4. Mais uma vez, a temperatura do forno sobe ou diminui para o patamar de temperatura seguinte, que permanece, também, por 10 dias, e o espectro do sensor RFBG é obtido diariamente;
5. Por fim, a temperatura do forno é resfriada, naturalmente, por um dia até alcançar a temperatura ambiente ($\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$) e o espectro do sensor RFBG é obtido.

Figura 13 – Etapas básicas utilizadas para o processo de envelhecimento térmico de uma RFBG, exemplificadas no caso de patamares crescentes de temperatura.

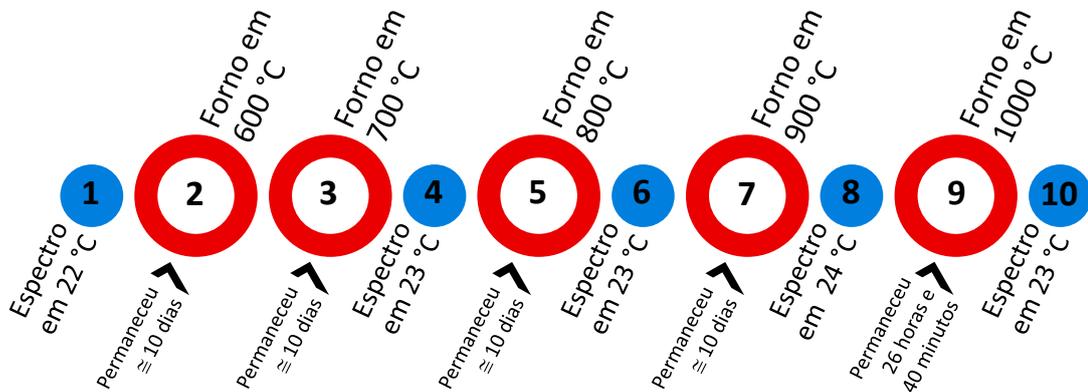


Fonte: Autoria própria (2022).

Cada sensor foi analisado separadamente, ou seja, foi colocado um sensor de cada vez no forno para análise individual de sua durabilidade. As etapas utilizadas na análise do envelhecimento térmico dos sensores RFBG2-F a RFBG6-F podem ser vistas nas Figuras 14 a 18, respectivamente. Por se tratar de um trabalho prático experimental, algumas das etapas necessitaram ser adaptadas.

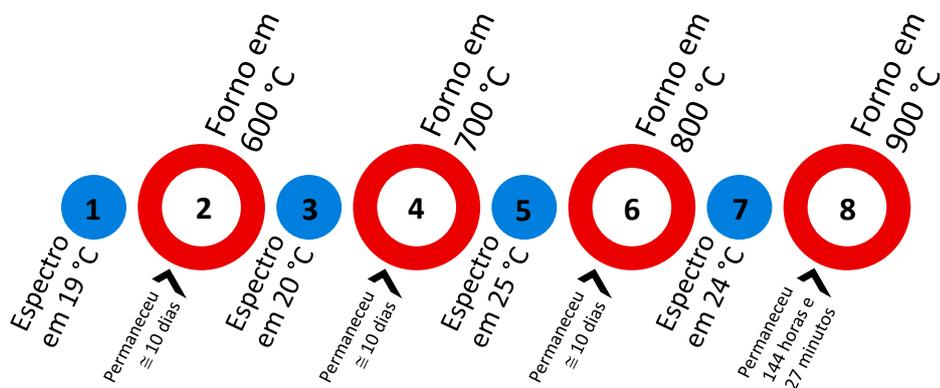
Os sensores ficaram no interior do forno durante todo o processo. Além disso, os espectros foram obtidos ao menos uma vez por dia e também ao resfriar o sensor para a temperatura ambiente, com exceção de quando houve algumas restrições devido a pandemia da covid-19.

Figura 14 – Etapas do envelhecimento térmico do sensor RFBG2-F.



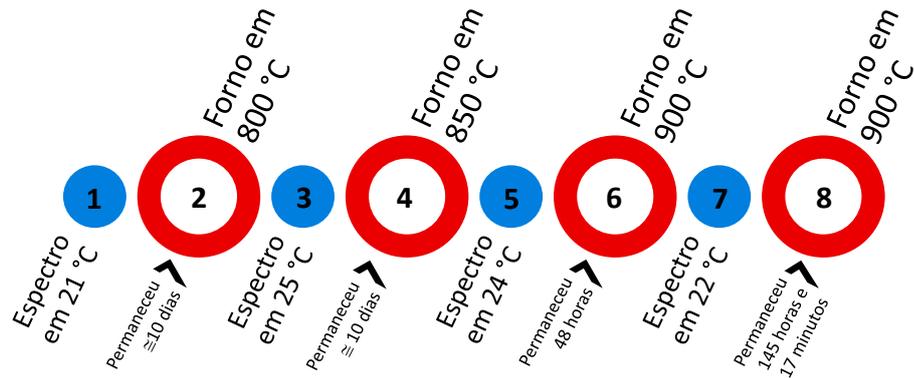
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 15 – Etapas do envelhecimento térmico do sensor RFBG3-F.



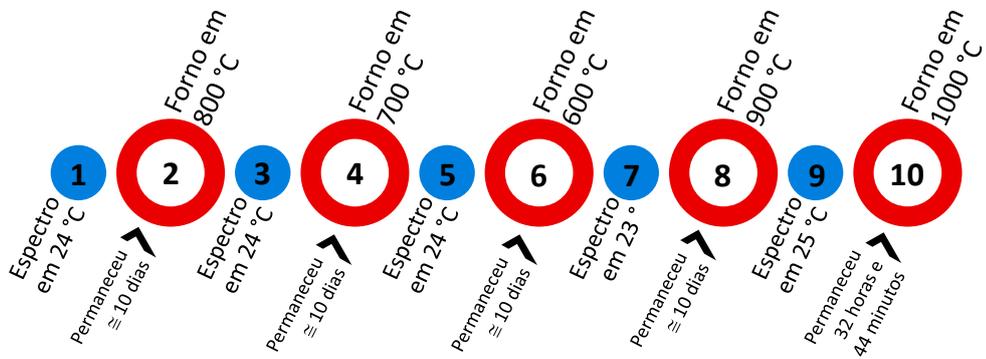
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 16 – Etapas do envelhecimento térmico do sensor RFBG4-F.



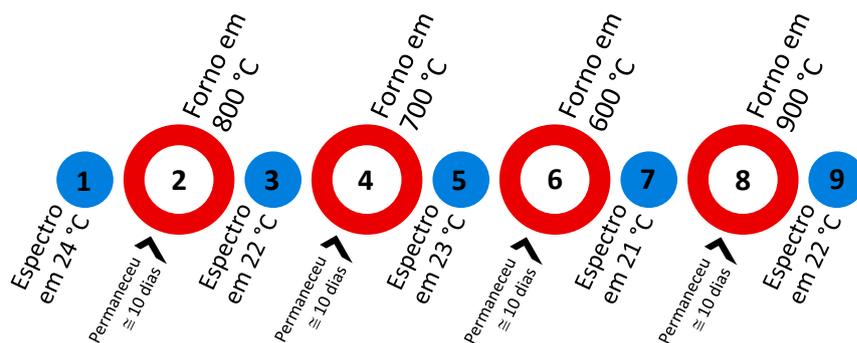
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 17 – Etapas do envelhecimento térmico do sensor RFBG5-F.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 18 – Etapas do envelhecimento térmico do sensor RFBG6-F.



Fonte: Autoria própria (2022).

Assim, foi possível programar as temperaturas do forno para cada sensor em análise, conforme os patamares de temperatura apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificação das programações do forno para cada sensor térmico em análise.

Identificação	Rampa de subida			Estabilização		
	Sensor	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Tempo da rampa (min)	Temperatura estabilizada (°C)	Tempo mantido* (h)
RFBG2-F		22,0	600,0	20	600,0	240
		400,0	700,0	10	700,0	242
		23,0	800,0	25	800,0	241
		23,0	900,0	10	900,0	239
		24,0	1000,0	20	1000,0	26
RFBG3-F		19,0	600,0	10	600,0	240
		20,0	700,0	10	700,0	240
		25,0	800,0	20	800,0	240
		24,0	900,0	15	900,0	144
RFBG4-F		21,0	800,0	15	800,0	240
		25,0	850,0	15	850,0	240
		24,0	900,0	15	900,0	48
		22,0	900,0	15	900,0	145
RFBG5-F		24,0	800,0	15	800,0	240
		24,0	700,0	15	700,0	240
		24,0	600,0	15	600,0	240
		23,0	900,0	15	900,0	240
		25,0	1000,0	15	1000,0	32
RFBG6-F		24,0	800,0	15	800,0	240
		22,0	700,0	15	700,0	240
		23,0	600,0	15	600,0	240
		21,0	900,0	15	900,0	241

* Os minutos foram suprimidos.

Fonte: Autoria própria (2022).

No total, desconsiderando os tempos das rampas de aquecimento e de resfriamento, cada sensor monitorou a temperatura do forno elétrico tubular durante:

- 41,3 dias (sensor RFBG2-F)
- 36,0 dias (sensor RFBG3-F)
- 28,0 dias (sensor RFBG4-F)
- 41,4 dias (sensor RFBG5-F)
- 40,0 dias (sensor RFBG6-F)

Cada sensor em análise permaneceu ao menos um patamar acima de sua temperatura de regeneração, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Patamares de temperatura do envelhecimento térmico dos sensores, com destaque para as temperaturas iguais ou acima de suas respectivas temperaturas de regeneração.

Identificação		Temperatura (°C)				
Sensor	Regeneração	Patamar 1	Patamar 2	Patamar 3	Patamar 4	Patamar 5
RFBG2-F	900,0	600,0	700,0	800,0	900,0 *	1000,0 **
RFBG3-F	850,0	600,0	700,0	800,0	900,0 **	
RFBG4-F	850,0	800,0	850,0 *	900,0 **		
RFBG5-F	850,0	800,0	700,0	600,0	900,0 **	1000,0 **
RFBG6-F	850,0	800,0	700,0	600,0	900,0 **	

* Na temperatura de regeneração; ** Acima da temperatura de regeneração.

Fonte: Autoria própria (2022).

Para avaliar cada sensor, assim como foi feito no caso dos sensores FBG1-P e RFBG1-P, foi obtida a taxa de variação da amplitude do sinal refletido, porém a cada ciclo de 10 dias, também através de ajuste linear. A expectativa de vida útil em cada patamar de temperatura foi calculada através de extrapolação da função de ajuste, decaindo até chegar em 1 dB (SNR ~1 dB), e o resultado foi dividido pela taxa de variação da amplitude do sinal refletido. Esse cálculo foi realizado apenas quando as taxas de variação da amplitude do sinal refletido eram negativas, pois taxas de variação positivas indicam que a rede de Bragg está em regeneração.

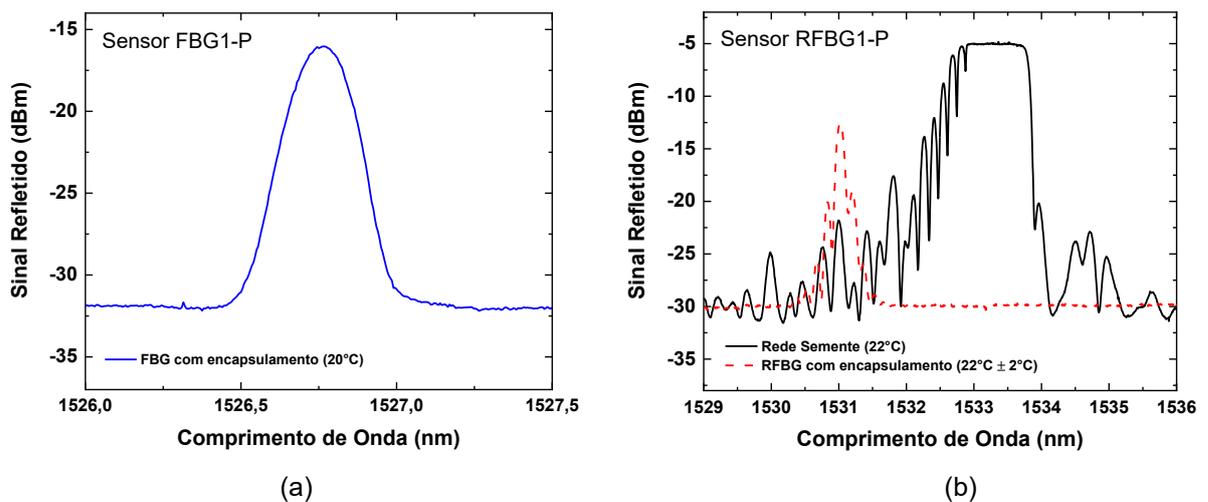
5 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados das medições em comprimento de onda realizadas para obtenção de suas respectivas temperaturas, tanto no caso dos sensores térmicos para medição de temperatura ambiente, como no caso dos sensores térmicos para medição de altas temperaturas.

5.1 SENSORES TÉRMICOS PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA AMBIENTE

Na Figura 19 podem ser vistos os espectros em reflexão dos sensores FBG1-P e RFBG1-P antes de sua calibração em temperatura. Para o sensor FBG1-P, foi obtido um único espectro em reflexão com o sensor encapsulado, por este não ter sido hidrogenado e nem regenerado. Seu espectro foi obtido a uma temperatura de 20 °C (Figura 19 (a)). Para o sensor RFBG1-P, foram obtidos o espectro inicial em reflexão (rede semente) a 22 °C, em linha contínua, e o espectro final em reflexão a 22 °C \pm 2 °C após regeneração e encapsulamento, em linha tracejada (Figura 19 (b)). É possível verificar a perda da saturação da rede de Bragg após a regeneração e seu deslocamento para menor comprimento de onda.

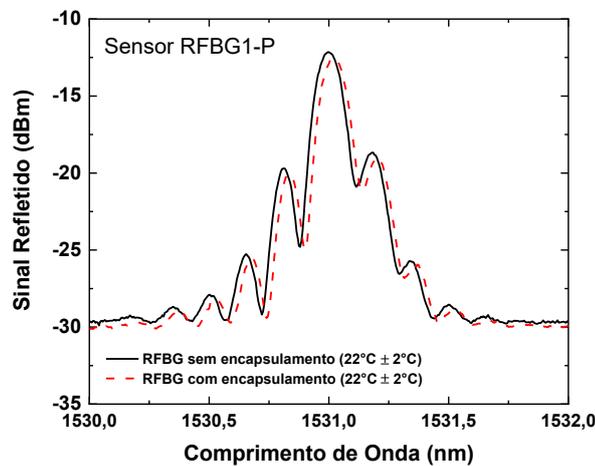
Figura 19 – Espectros em reflexão dos sensores FBG1-P e RFBG1-P: (a) espectro do sensor FBG1-P encapsulado; (b) espectro inicial da FBG (rede semente) comparado ao espectro final após regeneração e encapsulamento do sensor RFBG1-P.



Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 20 são mostrados os espectros finais em reflexão após regeneração do sensor RFBG1-P, ambos na temperatura de $(22 \pm 2) ^\circ\text{C}$, em linha contínua sem encapsulamento e em linha tracejada com encapsulamento. Ao analisar os valores de temperatura correspondentes aos valores de pico dos comprimentos de onda apresentados na Figura 20, percebe-se que o sensor RFBG1-P sem encapsulamento estava medindo $23 ^\circ\text{C}$ e que o mesmo sensor, porém com encapsulamento, estava medindo $24 ^\circ\text{C}$. Aquela diferença de temperatura é razoável para o laboratório que é climatizado.

Figura 20 – Comparação dos espectros em reflexão do sensor RFBG1-P com e sem encapsulamento após regeneração.



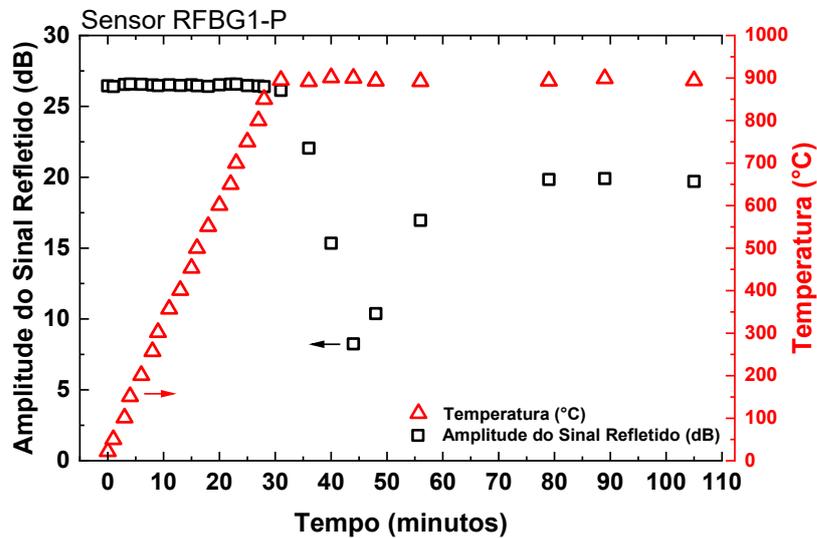
Fonte: Autoria própria (2022).

A tolerância de $\pm 2 ^\circ\text{C}$ foi utilizada na legenda de algumas medições do sensor RFBG1-P, devido ao fato de que essas medições foram realizadas com o sensor RFBG1-P em temperatura ambiente no interior no laboratório, sem a utilização de termopar acoplado ao multímetro ou ao controlador do forno elétrico tubular para verificação da temperatura do sensor. Portanto, nesses casos, o espectro do sensor foi obtido com a informação da temperatura média do laboratório, após mantê-lo estável sobre a superfície de uma mesa. Assim, é possível perceber que o encapsulamento não provocou modificação espectral significativa, indicando que a rede foi mantida sem deformação após o encapsulamento.

Durante o tratamento térmico para obter o sensor RFBG1-P foram adquiridos os espectros e, posteriormente, foi realizada a leitura da amplitude e do comprimento de onda, utilizando *software* comercial para processamento gráfico, resultando na

Figura 21. A temperatura foi elevada de 22 °C a 900 °C em 30 minutos e foi mantida a 900 °C por mais 75 minutos, totalizando aproximadamente 105 minutos. O comprimento de onda acompanhou a variação da temperatura conforme o esperado. A amplitude de sinal refletido permaneceu próxima de 26,4 dB até a temperatura atingir 850 °C, porém a rede perdeu a saturação nessa fase. O processo foi seguido de redução gradativa na amplitude do sinal, atingindo um mínimo próximo de 8,3 dB aos 44 minutos. Por último veio a fase da regeneração (aumento gradativo do sinal) estabilizando a amplitude em, aproximadamente, 20,0 dB.

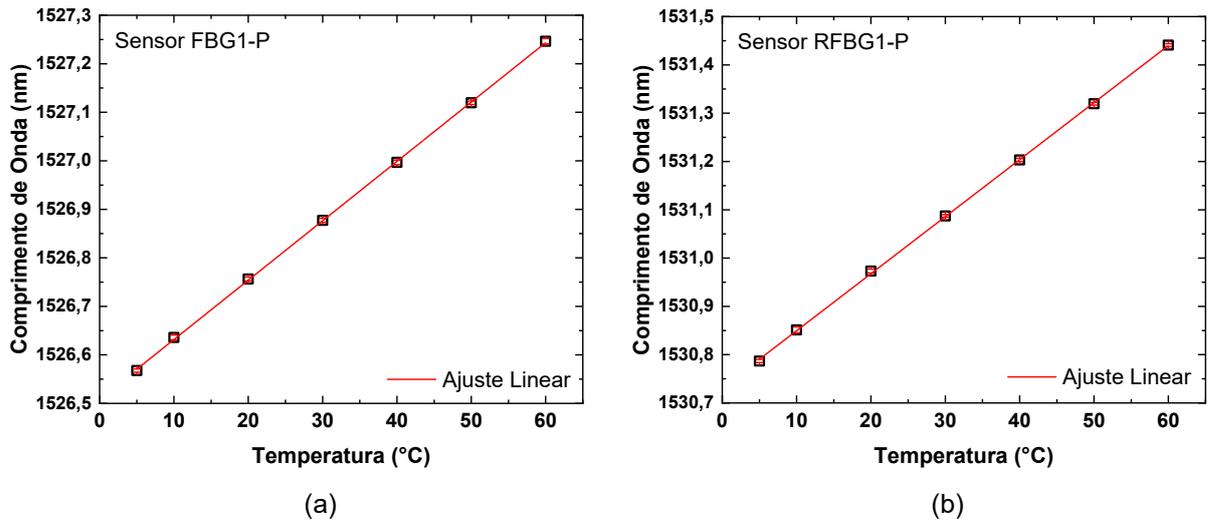
Figura 21 – Amplitude do sinal refletido comparada à temperatura do sensor RFBG1-P.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para a calibração dos sensores FBG1-P e RFBG1-P, foi utilizada uma pastilha termoelétrica Peltier (TEC). Na Figura 22, pode ser vista a curva de sensibilidade térmica de cada sensor. O sensor FBG1-P (Figura 22(a)) e o sensor RFBG1-P (Figura 22(b)) apresentaram sensibilidade térmica de 12,23 pm/°C e de 11,80 pm/°C, respectivamente, obtidas através de ajuste linear. Portanto, pode-se considerar uma sensibilidade térmica padrão entre os sensores como $(12,0 \pm 0,2)$ pm/°C.

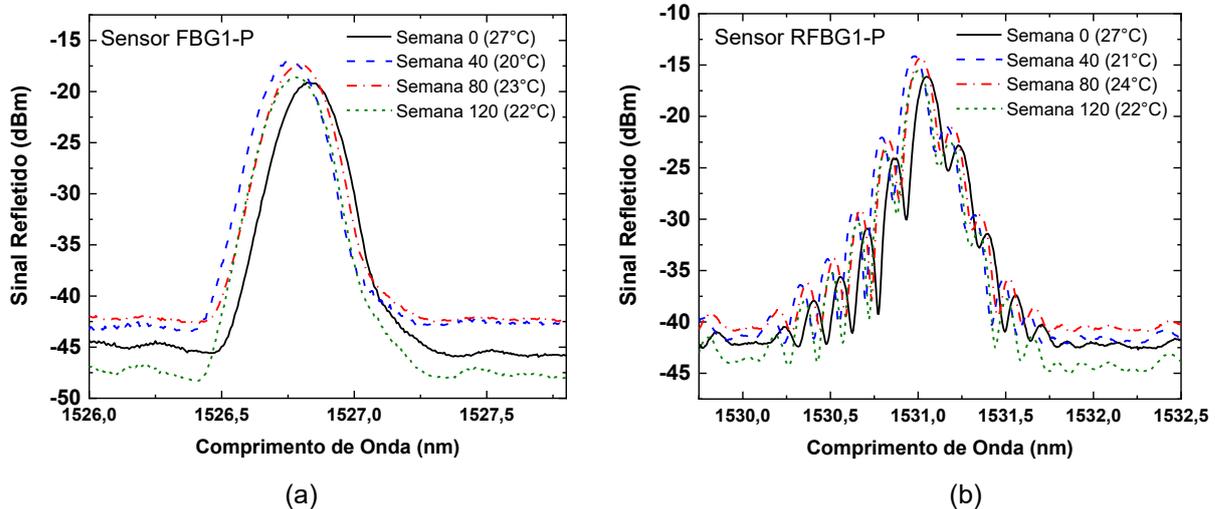
Figura 22 – Curva de sensibilidade térmica do sensor: (a) FBG1-P; (b) RFBG1-P.



Fonte: Autoria própria (2022).

Durante 151 semanas (semana 0 a semana 150), ambos os sensores monitoraram a temperatura ambiente. Na Figura 23, os pequenos desvios no comprimento de onda são devidos às diferentes temperaturas durante as aquisições.

Figura 23 – Espectros em reflexão nas semanas 0, 40, 80 e 120 para o sensor: (a) FBG1-P; (b) RFBG1-P.

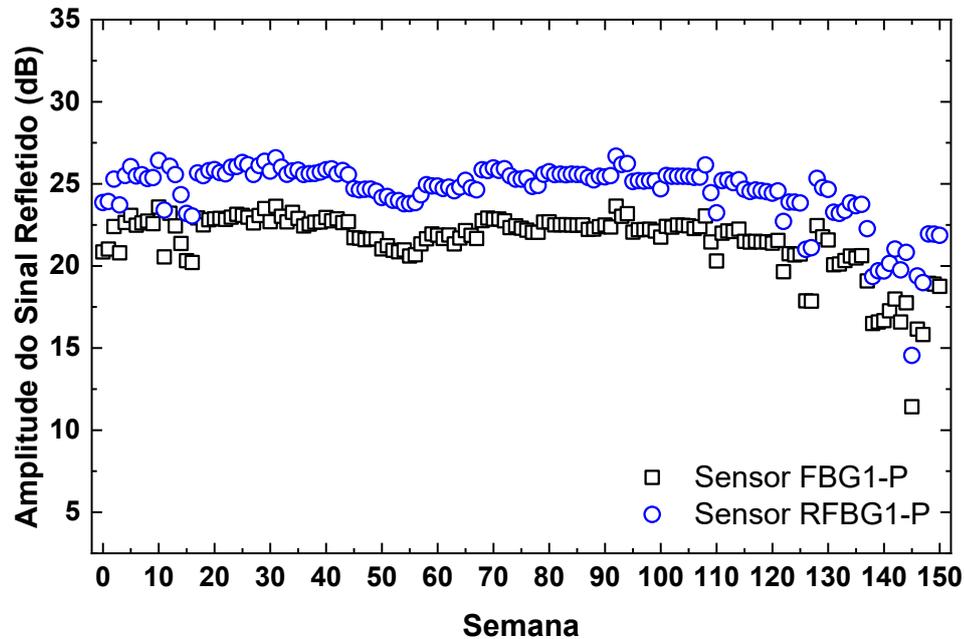


Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 24 pode-se ver a amplitude de sinal refletido ao longo das semanas, considerando a linha de base em -40 dBm. Observa-se um padrão na flutuação da intensidade do sinal refletido pelos dois sensores, corroborando com uma provável flutuação na potência da fonte óptica do interrogador, cuja análise pode ser vista na

seção 5.1.1 desta tese. Entre as semanas 0 e 150, houve uma variação próxima a 3 dB entre os sensores.

Figura 24 – Amplitudes do sinal refletido pelos sensores FBG1-P e RFBG1-P no decorrer das 151 semanas.



Fonte: Autoria própria (2022).

Na Tabela 5, as temperaturas dos sensores FBG1-P e RFBG1-P estão correlacionadas à temperatura de referência, indicada no multímetro, ao longo do experimento, amostradas a cada 10 semanas. A tabela completa está apresentada no Apêndice desta tese. Para obter a temperatura através dos sensores FBG1-P e RFBG1-P, comparou-se o comprimento de onda de Bragg (λ_B) nos espectros adquiridos a cada semana com as respectivas curvas de calibração. Não foi observada discrepância superior a 2 °C, com exceção de apenas quatro medições pontuais nas semanas 26 e 27. Isso pode ter sido ocasionado por oxidação nos contatos dos fios do multímetro. Ao remover e reconectar os fios do termopar no multímetro, sem mover o termopar da parede metálica, essa divergência não foi mais observada.

Tabela 5 – Temperaturas do multímetro comparadas às temperaturas dos sensores no decorrer das semanas, amostradas a cada 10 semanas.

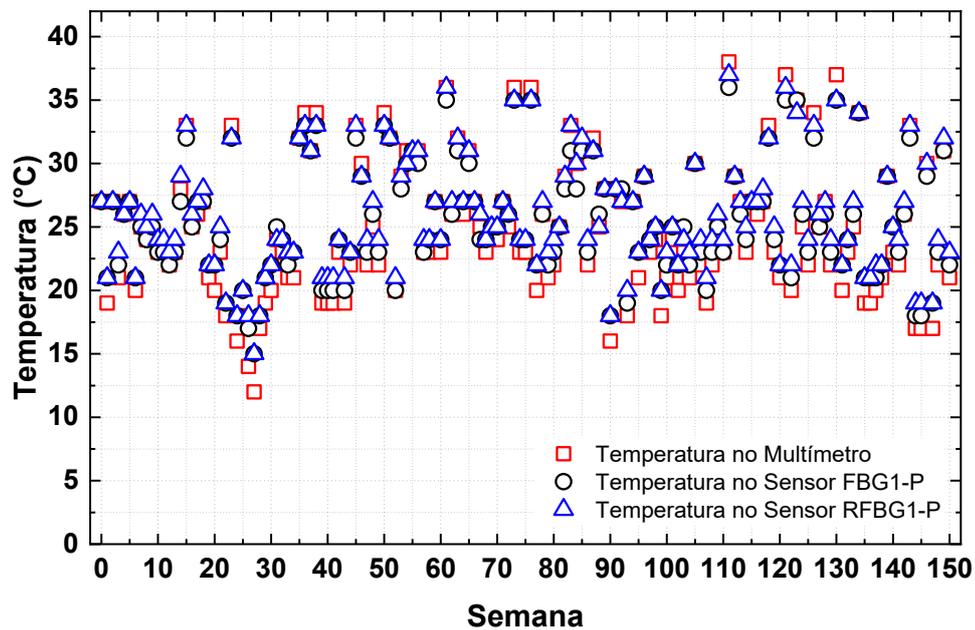
Semana	Temperatura no multímetro (°C)	Temperatura no sensor FBG1-P (°C)	Erro absoluto do sensor FBG1-P (°C)	Temperatura no sensor RFBG1-P (°C)	Erro absoluto do sensor RFBG1-P (°C)
0	27	27	0	27	0
10	23	23	0	24	-1
20	20	22	-2	22	-2
30	20	22	-2	22	-2
40	19	20	-1	21	-2
50	34	33	1	33	1
60	23	24	-1	24	-1
70	24	25	-1	25	-1
80	22	23	-1	24	-2
90	16	18	-2	18	-2
100	21	22	-1	23	-2
110	23	23	0	24	-1
120	21	22	-1	22	-1
130	37	35	2	35	2
140	23	25	-2	25	-2
150	21	22	-1	23	-2

Fonte: Autoria própria (2022).

Para efeito de comparação, os valores descritos na tabela completa do Apêndice estão apresentados graficamente na Figura 25.

Também foram realizados ajustes lineares na Figura 24, para cada um dos sensores, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 6, mostrando a taxa de variação da amplitude do sinal refletido de cada sensor fixado em chapa metálica (parede). A partir da amplitude do sinal refletido no início de cada ajuste linear, fez-se uma estimativa da expectativa de vida útil em função das temperaturas, decaindo até 1 dB, considerando-se 1 ano equivalente a 52,18 semanas. Percebeu-se que a expectativa de vida útil do sensor RFBG1-P é 20% maior do que a expectativa de vida útil do sensor FBG1-P.

Figura 25 – Temperaturas do multímetro comparadas às temperaturas dos sensores no decorrer das semanas.



Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 6 – Taxa de variação da amplitude do sinal refletido para análise da expectativa de vida útil dos sensores FBG1-P e RFBG1-P.

Sensor	Taxa de variação da amplitude do sinal refletido (dB/semana)	Amplitude inicial do sinal refletido no ajuste linear (dB)	Expectativa de vida útil (anos)
FBG1-P	$-23,85 \cdot 10^{-3}$	23,33	18
RFBG1-P	$-22,54 \cdot 10^{-3}$	26,26	21

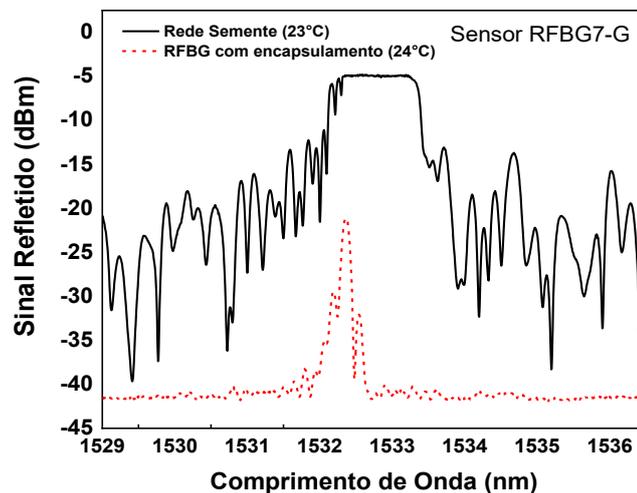
Fonte: Autoria própria (2022).

Ainda em relação à Figura 24, podem-se observar variações aleatórias nas amplitudes dos sinais refletidos de ambos os sensores, porém a diferença entre tais amplitudes é razoavelmente preservada. Tais observações são compatíveis com eventos de flutuação na potência ótica do interrogador e/ou perda de inserção no adaptador ótico utilizado no cordão ótico de entrada do interrogador. Pelo que já foi relatado na literatura, a operação em temperatura ambiente não deveria provocar maiores degradações no sensor RFBG1-P, porém são inexistentes ou escassos trabalhos mostrando resultados de ensaios de longa duração em condições similares.

5.1.1 Flutuação da amplitude do sinal refletido pelo interrogador ótico

Para verificar a flutuação da amplitude do sinal refletido pelo interrogador ótico, produziu-se o sensor genérico RFBG7-G. Na Figura 26 pode ser visto que, para o sensor RFBG7-G, foram obtidos o espectro inicial (rede semente) em linha contínua e o espectro final após a regeneração da RFBG com encapsulamento em linha tracejada. Os espectros foram obtidos na temperatura de 23 °C e 24 °C, respectivamente. É possível verificar a perda da saturação da rede de Bragg após a regeneração e seu deslocamento para comprimento de onda menor.

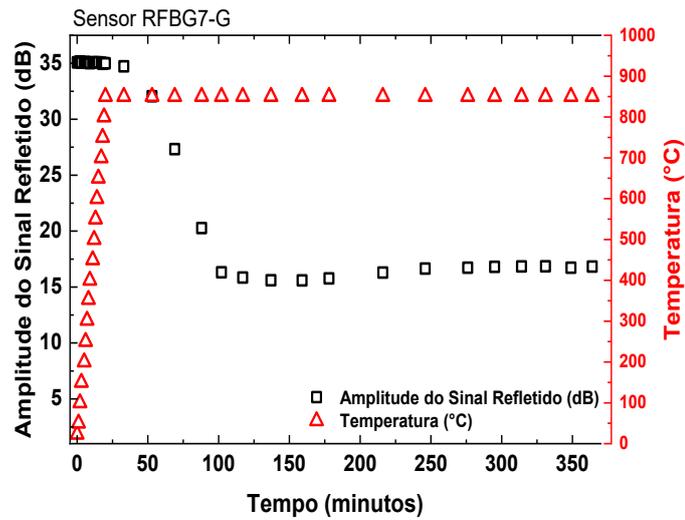
Figura 26 – Espectros em reflexão: espectro inicial da FBG (rede semente) comparado ao espectro final após regeneração com encapsulamento do sensor RFBG7-G.



Fonte: Autoria própria (2022).

Durante o tratamento térmico para obter o sensor RFBG7-G foram adquiridos os espectros e, posteriormente, foi realizada a leitura da amplitude e do comprimento de onda, utilizando *software* comercial para processamento gráfico, resultando na Figura 27. A temperatura foi elevada de 23 °C a 850 °C em 20 minutos e foi mantida a 850 °C por mais 344 minutos, totalizando aproximadamente 364 minutos. O comprimento de onda acompanhou a variação da temperatura conforme o esperado. A amplitude de sinal refletido permaneceu próxima de 35,1 dB até a temperatura atingir 850 °C, porém a rede perdeu a saturação nessa fase. O processo foi seguido de redução gradativa da amplitude do sinal, atingindo um mínimo próximo de 15,6 dB aos 159 minutos. Por último veio a fase da regeneração (aumento gradativo do sinal) estabilizando a amplitude em, aproximadamente, 16,8 dB.

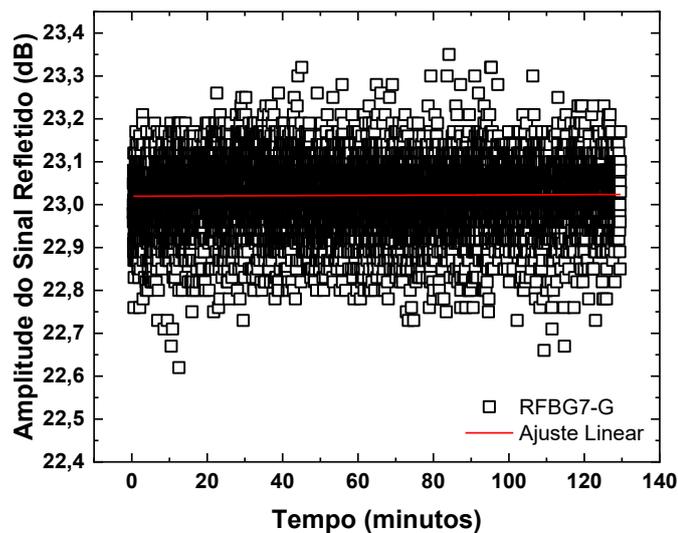
Figura 27 – Amplitude de sinal refletido comparada à temperatura do sensor RFBG7-G.



Fonte: Autoria própria (2022).

Foi realizado um ensaio monitorando o sensor RFBG7-G por 2 horas e 9 minutos em *streaming*, na temperatura de 20 °C, apenas para verificar a flutuação da amplitude do sinal refletido pela fonte ótica do interrogador SM 125. A variação observada foi de 0,36 dB entre o menor e o maior valor lido, ou seja, a amplitude do sinal refletido ficou em torno de $(22,99 \pm 0,36)$ dB, conforme a Figura 28.

Figura 28 – Flutuação da amplitude do sinal refletido pela fonte ótica do interrogador SM 125, durante 2 horas e 9 minutos de monitoramento.



Fonte: Autoria própria (2022).

Ainda na Figura 28, fez-se um ajuste linear e a taxa de variação encontrada foi de $3,13 \cdot 10^{-5}$ dB/minuto. É um valor muito próximo de zero, ainda que um valor positivo. De fato, não houve percepção de que variou a potência ótica da fonte de luz do interrogador ao longo de 2 horas.

Porém, ao longo de mais de 2 anos não se tem informação a respeito. Como é uma fonte de luz interna, não foi encontrado, no manual do fabricante do interrogador ótico, nada correlacionado a envelhecimento da potência ótica, ou seja, a degradação da potência ótica.

Os sensores FBG1-P e RFBG1-P continuam em análise no mesmo local para maiores conclusões a respeito.

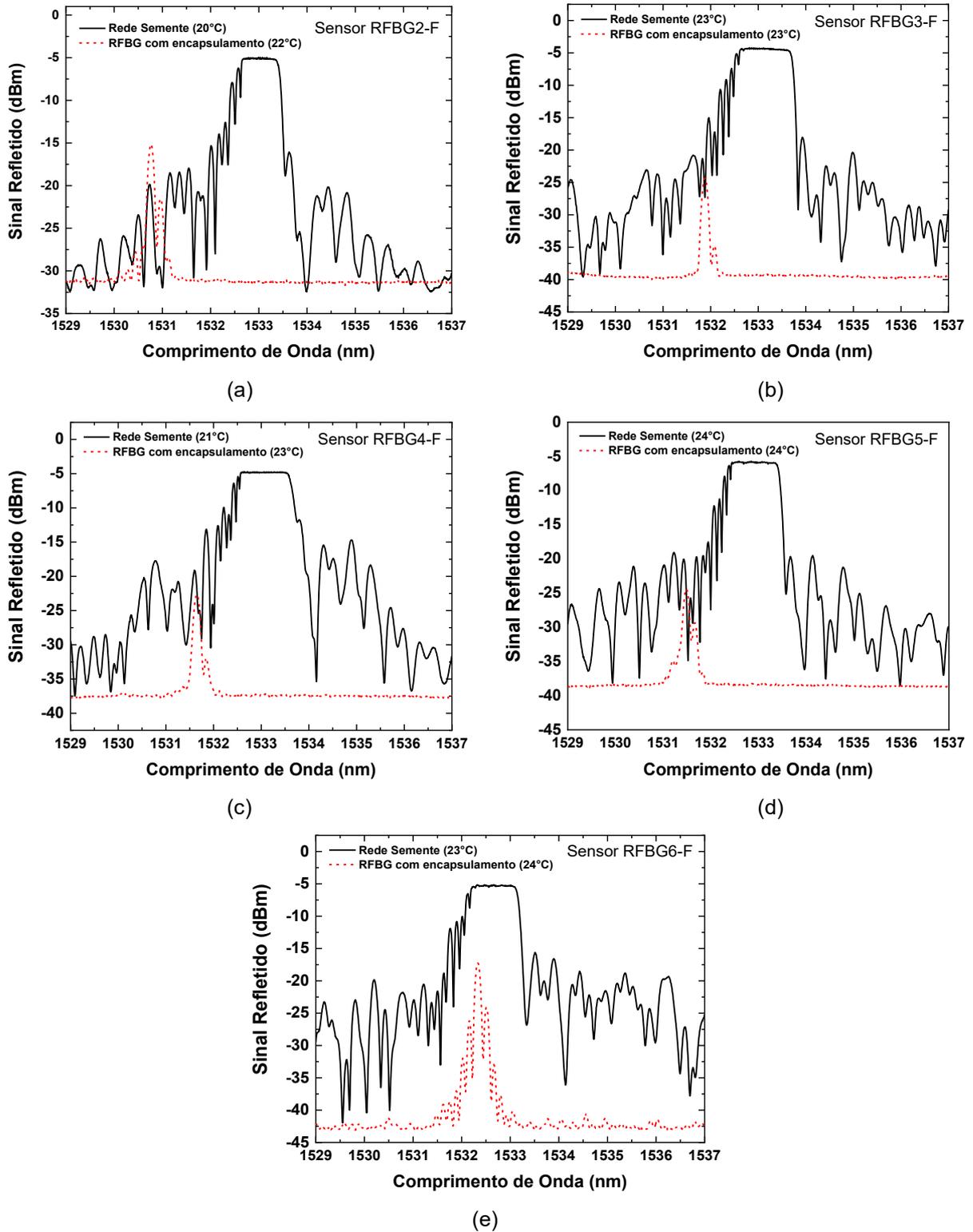
5.2 SENSORES TÉRMICOS PARA MEDIÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS (ENTRE DE 600 °C E 900 °C)

5.2.1 Gravação e regeneração dos sensores RFBG2-F a RFBG6-F

Para cada um dos sensores RFBG2-F a RFBG6-F, foram obtidos o espectro inicial (rede semente) em linha contínua e o espectro final após a regeneração da RFBG com encapsulamento em linha tracejada, conforme a Figura 29. As temperaturas nas quais foram obtidos os espectros podem ser vistas na legenda de cada gráfico. É possível verificar a perda da saturação da rede de Bragg após a regeneração e seu deslocamento para comprimento de onda menor.

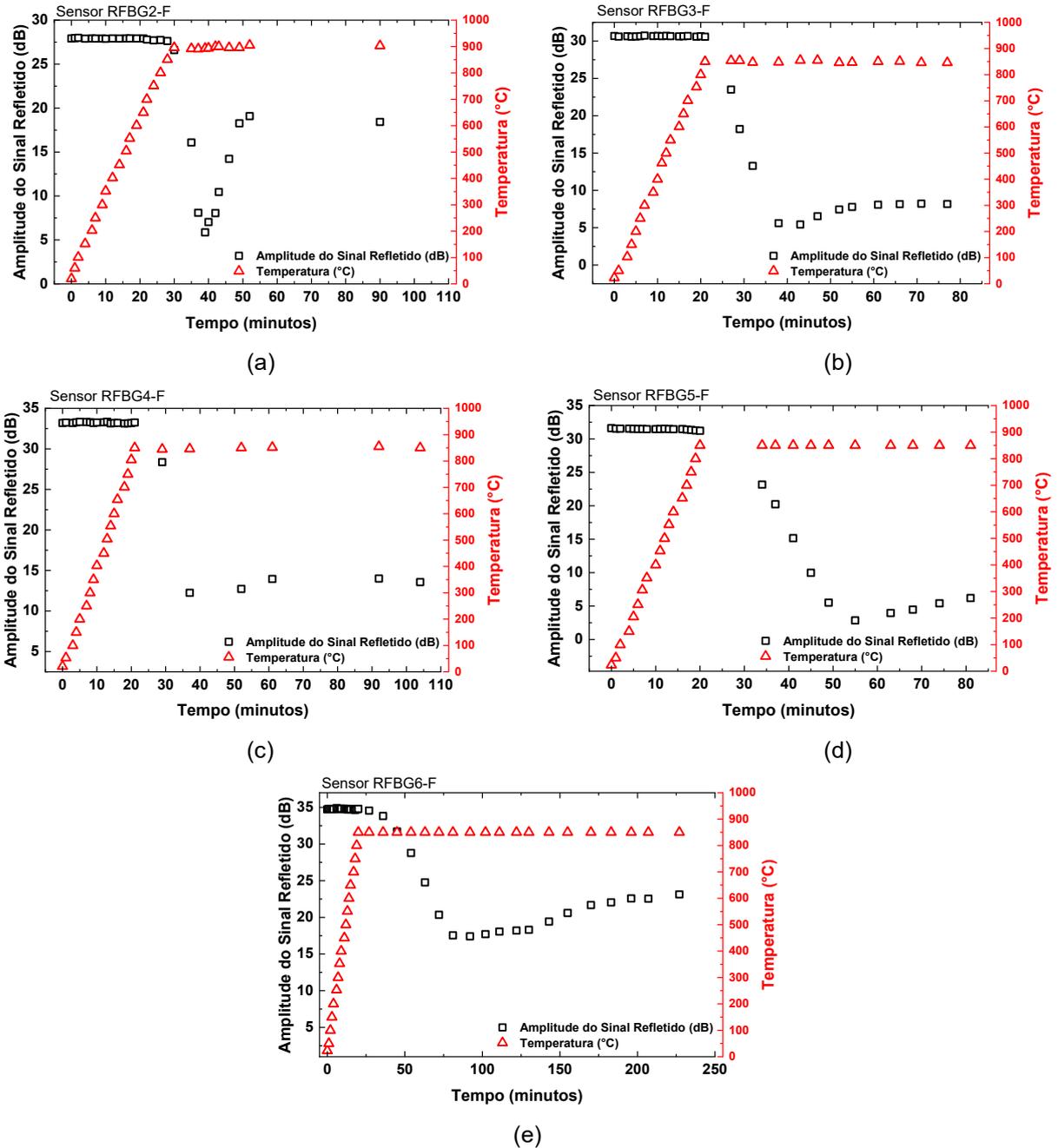
Durante cada processo de regeneração, para obter os sensores RFBG2-F a RFBG6-F, foram adquiridos os espectros e, posteriormente, foi realizada a leitura da amplitude e do comprimento de onda, utilizando *software* comercial para processamento gráfico, resultando na Figura 30. O comprimento de onda acompanhou a variação da temperatura conforme o esperado.

Figura 29 – Espectros em reflexão: espectro inicial da FBG (rede semente) comparado ao espectro final após regeneração com encapsulamento do sensor (a) RFBG2-F, (b) RFBG3-F, (c) RFBG4-F, (d) RFBG5-F e (e) RFBG6-F.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 30 – Amplitude do sinal refletido comparada à temperatura do sensor (a) RFBG2-F, (b) RFBG3-F, (c) RFBG4-F, (d) RFBG5-F e (e) RFBG6-F.



Fonte: Autoria própria (2022).

A amplitude do sinal refletido por cada rede (Figura 30) permaneceu próxima do valor inicial (Tabela 7), até a temperatura atingir ~ 850 °C, porém as redes perderam suas respectivas saturações nessa fase. O processo foi seguido de redução gradativa da amplitude do sinal, até próximo ao valor mínimo, apresentado na Tabela 7 com o respectivo tempo em que ocorreu. Por último, veio a fase da regeneração (aumento gradativo do sinal) estabilizando a amplitude próxima ao valor final (Tabela 7).

Tabela 7 – Amplitude do sinal refletido durante o processo de regeneração dos sensores RFBG2-F a RFBG6-F.

Sensor	Valor inicial (dB)	Valor mínimo (dB)	Tempo em que ocorreu o valor mínimo (min)	Valor de estabilização (dB)
RFBG2-F	27,9	5,9	39	18,4
RFBG3-F	30,6	5,4	43	8,2
RFBG4-F	33,2	12,2*	37*	13,6
RFBG5-F	31,5	2,8	55	6,2
RFBG6-F	34,8	17,4	92	23,1

* Estima-se que o valor mínimo atingido ocorreu próximo de 7,5 dB aos 44 minutos.

Fonte: Autoria própria (2022).

5.2.2 Envelhecimento térmico dos sensores

Nesta seção são apresentados os espectros dos sensores óticos e suas respectivas temperaturas, nas quais foram obtidos, estão descritas na legenda de cada gráfico. A numeração dos patamares de temperatura do envelhecimento térmico de cada sensor é a mesma da Tabela 4, apresentada anteriormente.

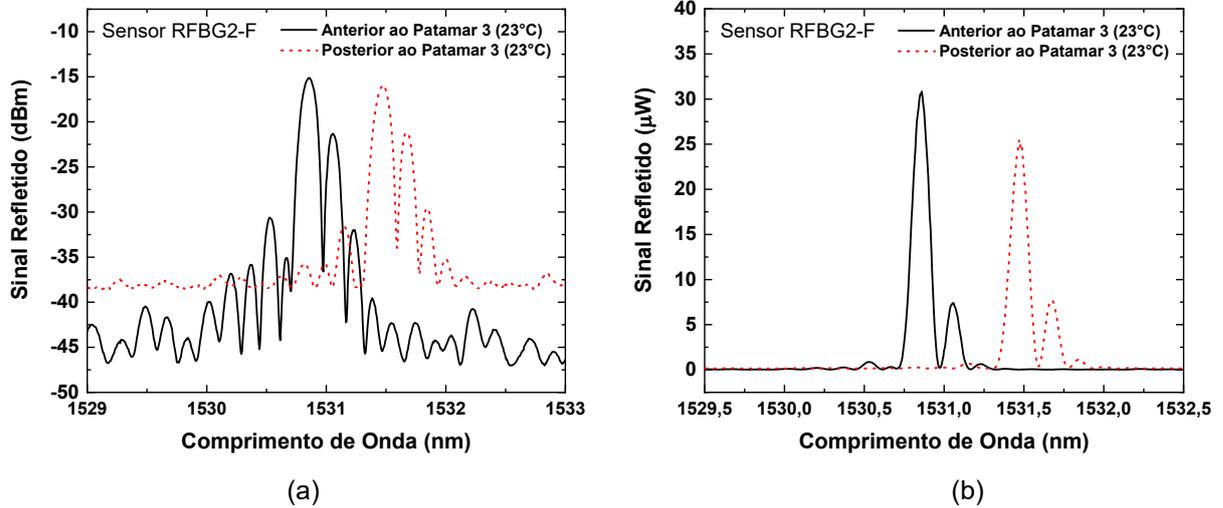
5.2.3.1 Sensor RFBG2-F

Nas Figuras 31 a 33 podem-se observar os espectros em temperatura ambiente do sensor RFBG2-F, antes e depois dos processos térmicos de 800 °C, 900 °C e 1000 °C, respectivamente.

Ao aumentar a temperatura do forno, pode-se observar o deslocamento dos espectros para um comprimento de onda 0,61 nm e 0,74 nm maior ao manter o sensor RFBG2-F por 10 dias em 800 °C (Figura 31) e em 900 °C (Figura 32), respectivamente. Tal fenômeno pode estar relacionado com a evolução da regeneração nestas temperaturas. Também foi medida uma diminuição de 0,84 dBm na intensidade do sinal refletido no patamar de 800 °C. Já no patamar de 900 °C, praticamente não se observa mudança na intensidade do sinal refletido. Foi observado o deslocamento do espectro para um comprimento de onda 0,27 nm menor ao executar o processamento da temperatura do forno de 1000 °C (Figura 33), além de diminuição de 14,25 dBm na intensidade do sinal refletido. Neste caso, a redução do

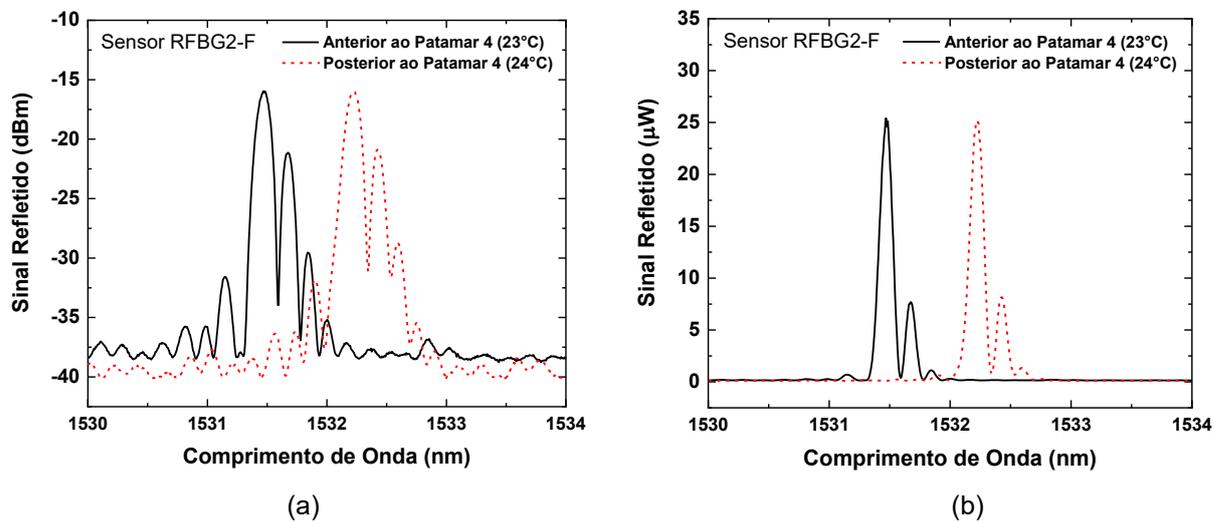
comprimento de onda é compatível com a redução da modulação do índice de refração na rede, indicativo de evolução para apagamento do sensor.

Figura 31 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG2-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 800 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



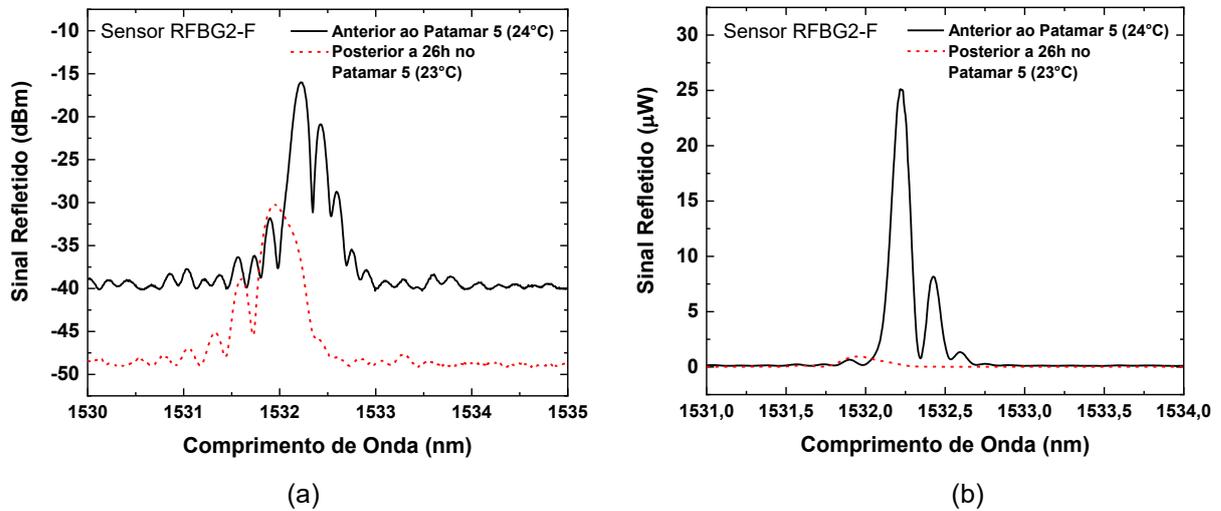
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 32 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG2-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 900 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 33 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG2-F antes e após processamento térmico de 1 dia em 1000 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



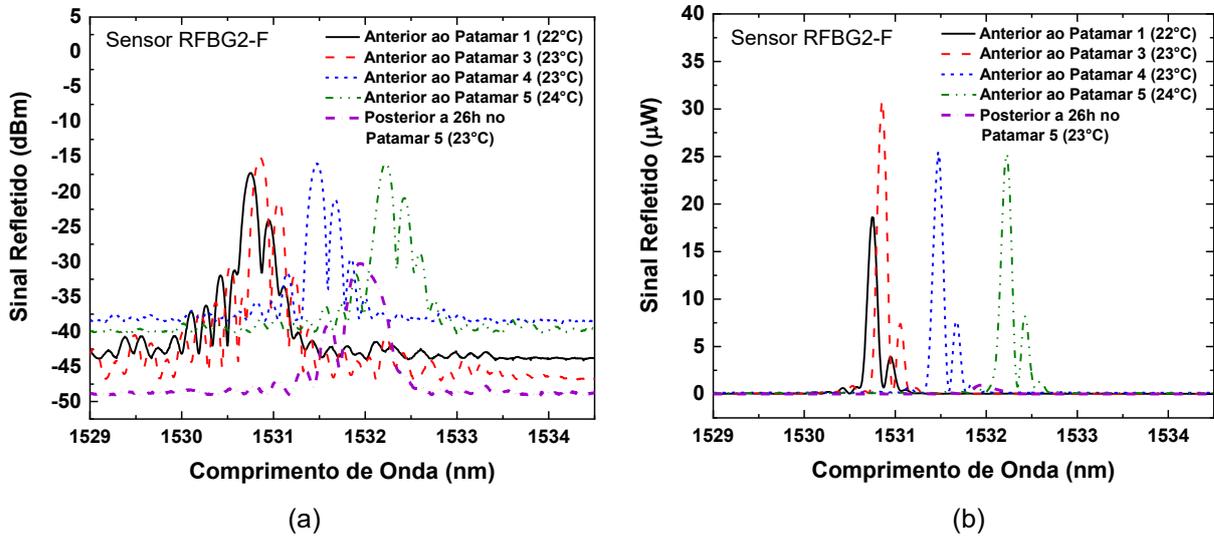
Fonte: Autoria própria (2022).

O espectro depois do processamento térmico de 600 °C, que é o mesmo de antes do processamento térmico de 700 °C, ou seja, entre os patamares 1 e 2, não foi adquirido.

Na Figura 34, pode-se comparar os espectros antes de cada patamar de temperatura, lembrando que não houve a aquisição do espectro antes da temperatura de 700 °C. Observa-se que, desde o início em 600 °C até o final do processamento térmico de 900 °C e, portanto, o início do de 1000 °C, os comprimentos de onda deslocaram-se para valores cada vez maiores (deslocando-se 1,47 nm). Depois de 1000 °C, o sensor monitorou a temperatura por ainda um dia, mais precisamente 26 horas e 40 minutos. É possível perceber que há o deslocamento para um comprimento de onda menor e redução considerável da intensidade de resposta do sensor, conforme já descrito. Posteriormente, a fibra do sensor RFBG2-F se rompeu devido à alta temperatura do forno. O forno foi desligado. Após o sensor esfriar, emendou-se novamente o sensor ao *pigtail*, foi realizada uma aquisição de seu espectro em temperatura ambiente (Figura 34) e recolocou-se o sensor no forno. O forno foi religado novamente em 1000 °C.

Porém, no dia seguinte (20 horas depois), o sensor já se encontrava novamente partido. Na tentativa de emendá-lo mais uma vez ao *pigtail*, não se obteve sucesso de resposta no interrogador ótico, demonstrando que a RFBG realmente se apagou, encerrando os testes com o sensor RFBG2-F. Esse intervalo de 20 horas não foi computado no tempo de análise, pois nenhum dado foi adquirido nesse período.

Figura 34 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG2-F antes e depois do processamento térmico nos patamares de temperatura descritos: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .

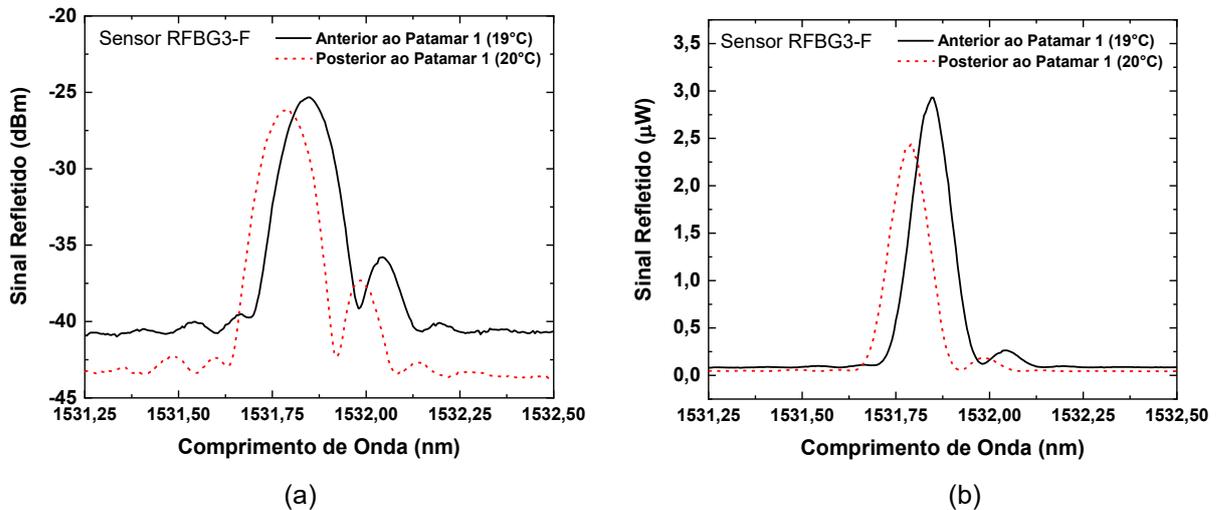


Fonte: Autoria própria (2022).

5.2.3.2 Sensor RFBG3-F

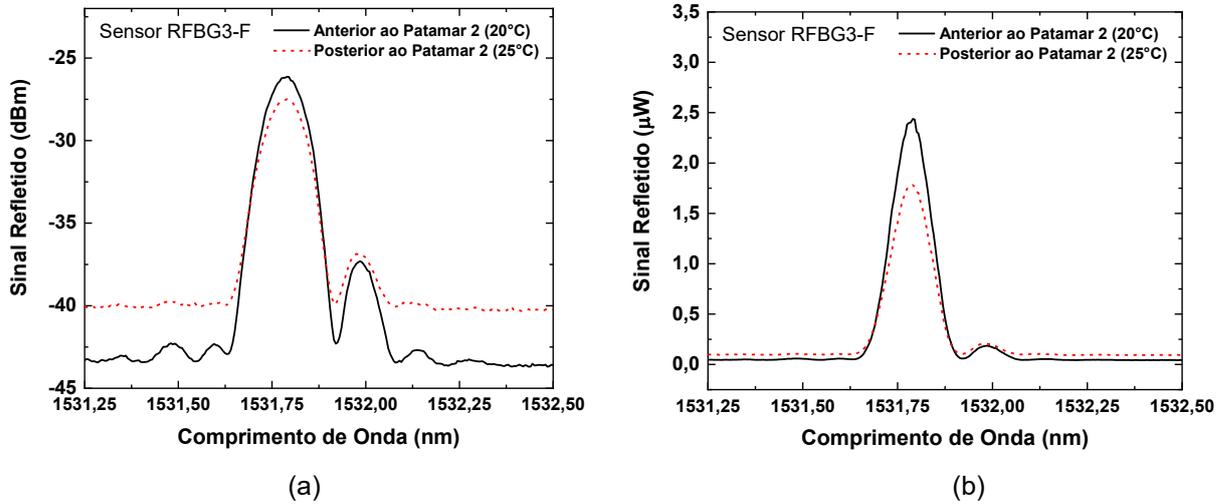
Nas Figuras 35 a 37, podem-se observar os espectros em temperatura ambiente do sensor RFBG3-F, antes e depois dos processos térmicos de 600 °C, 700 °C e 800 °C, respectivamente.

Figura 35 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG3-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 600 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



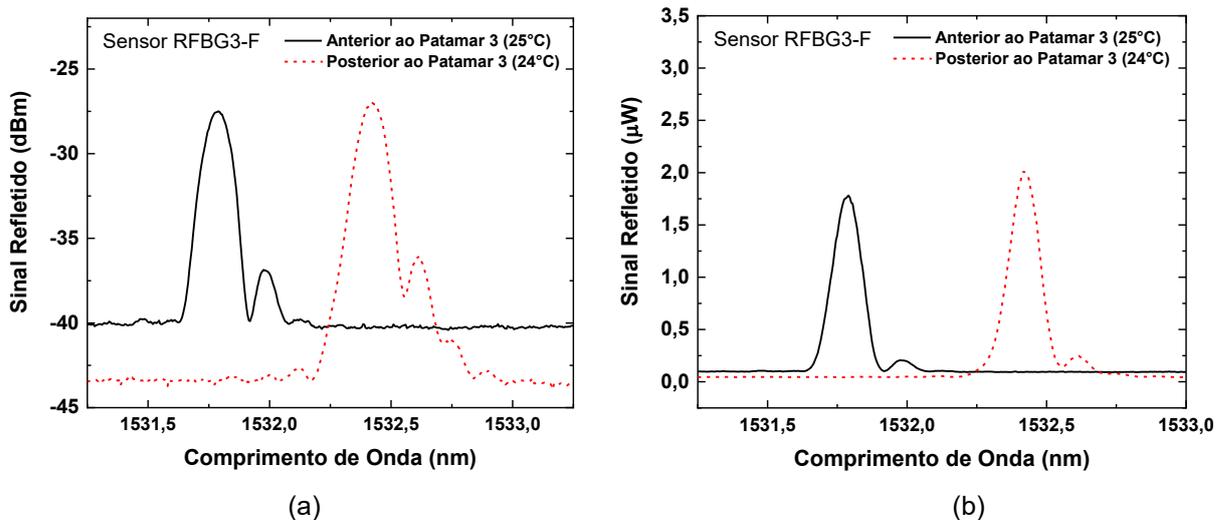
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 36 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG3-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 700 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 37 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG3-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 800 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



Fonte: Autoria própria (2022).

Ao aumentar a temperatura do forno, pode-se observar o deslocamento dos espectros para um comprimento de onda 0,06 nm menor, ao manter o sensor RFBG3-F por 10 dias em 600 °C (Figura 35) e para um comprimento de onda 0,63 nm maior, ao manter o sensor RFBG3-F por 10 dias em 800 °C (Figura 37). Não houve variação considerável no comprimento de onda ao manter o sensor RFBG3-F por 10 dias em 700 °C (Figura 36). Em relação a intensidade do sinal refletido, pode-se observar diminuição de 0,80 dBm e 1,36 dBm na intensidade do sinal refletido ao manter o sensor RFBG3-F por 10 dias em 600 °C (Figura 35) e por 10 dias em 700 °C

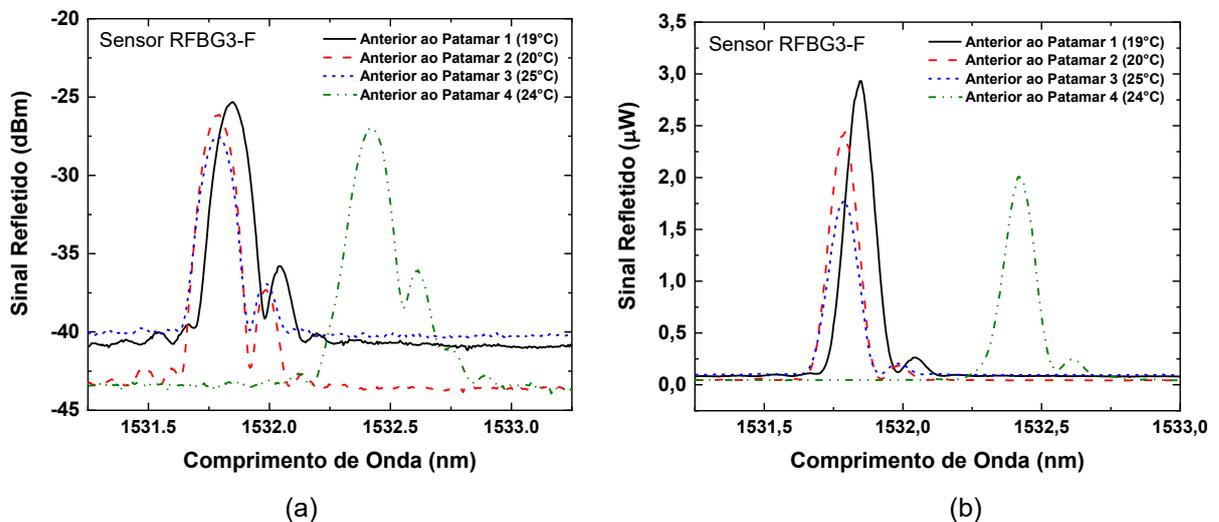
(Figura 36), respectivamente. Também houve um aumento de 0,52 dBm na intensidade do sinal refletido ao manter o sensor RFBG3-F por 10 dias em 800 °C (Figura 37).

O espectro depois do processamento térmico de 900 °C, ou seja, depois do patamar 4, não foi adquirido, devido ao fato de a RFBG ter se apagado.

Na Figura 38, pode-se comparar os espectros antes de cada patamar de temperatura, lembrando que não houve a aquisição do espectro depois da temperatura de 900 °C. Observa-se que, até o final do processamento térmico de 700 °C, os comprimentos de onda deslocaram-se para valores menores (0,06 nm), com intensidade de sinal refletido também menor (2,16 dBm). Já no espectro obtido antes do processamento térmico de 900 °C, observa-se que o comprimento de onda e a intensidade de sinal refletido se deslocaram para valores maiores, quando comparado ao patamar de temperatura anterior, conforme já descrito.

Depois de estar em 900 °C, o sensor monitorou a temperatura por ainda 6 dias, mais precisamente 6 dias e 27 minutos, realizou-se a última aquisição de seu espectro (em 900 °C) e, posteriormente, o sensor RFBG3-F se rompeu devido à alta temperatura do forno. Tentou-se emendar novamente o sensor ao *pigtail*, porém sem sucesso de resposta no interrogador ótico. Portanto, não foi possível adquirir seu espectro em temperatura ambiente após todo o processamento térmico de 900 °C.

Figura 38 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG3-F antes do processamento térmico nos patamares de temperatura descritos: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .

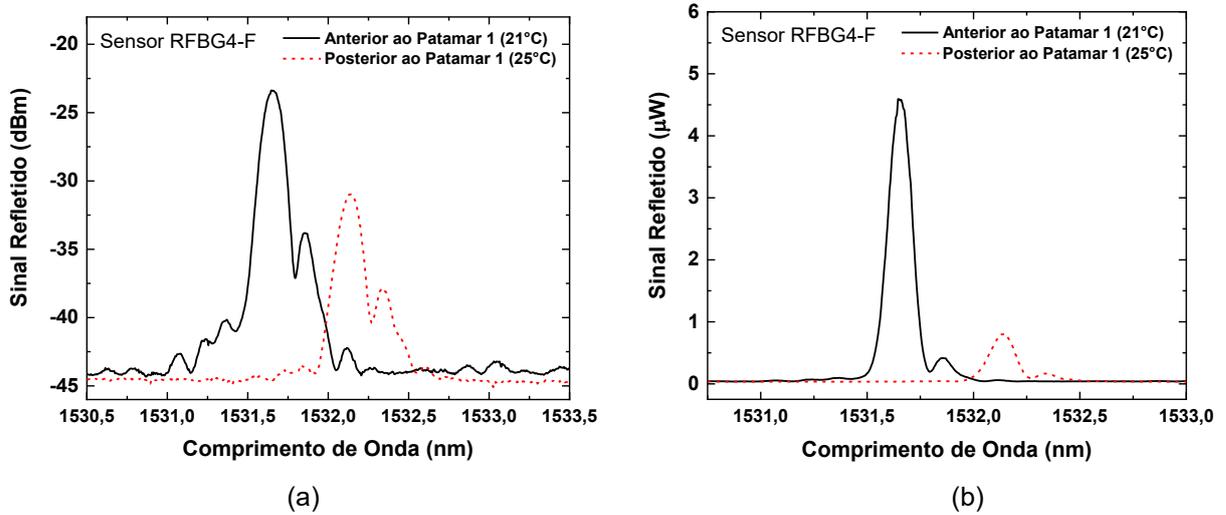


Fonte: Autoria própria (2022).

5.2.3.3 Sensor RFBG4-F

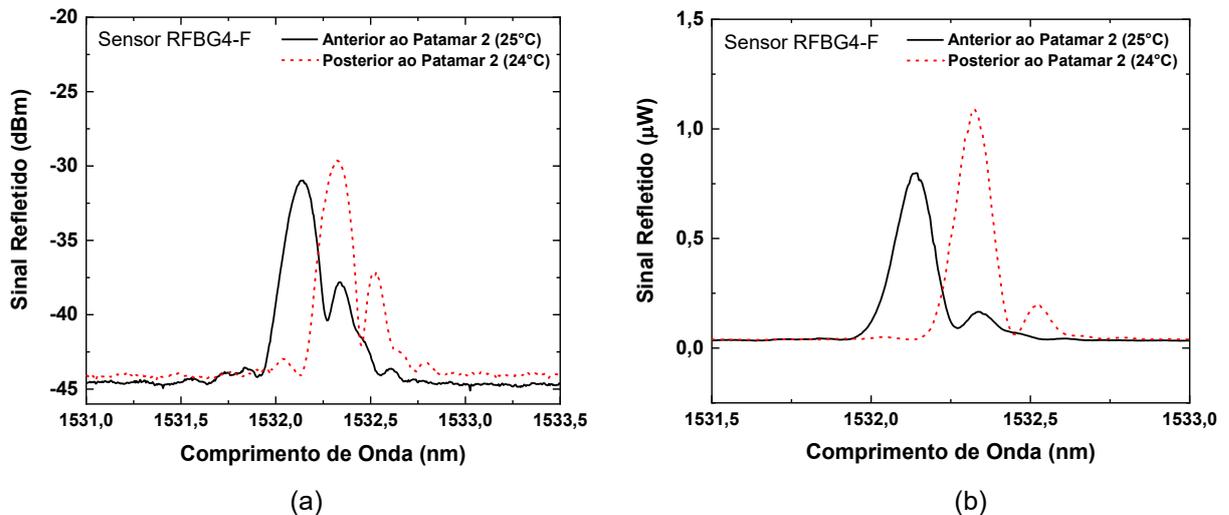
Nas Figuras 39 e 41, podem-se observar os espectros em temperatura ambiente do sensor RFBG4-F, antes e depois dos processos térmicos de 800 °C e 850 °C. Além disso, na Figura 41, pode-se observar o espectro antes do processo térmico de 900 °C e depois de 48 horas em 900 °C.

Figura 39 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG4-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 800 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



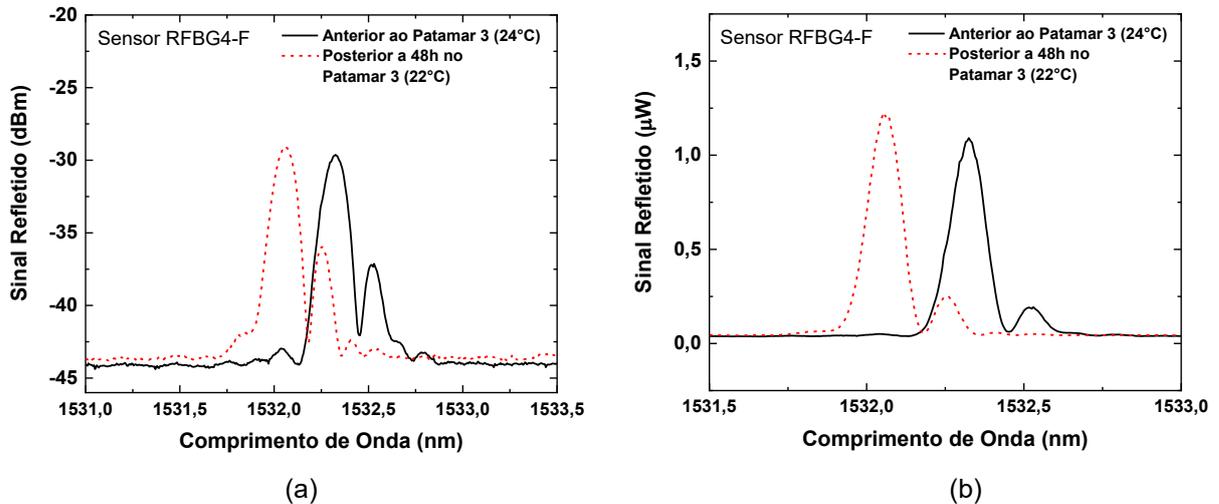
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 40 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG4-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 850 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 41 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG4-F antes e após processamento térmico de 2 dias em 900 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



Fonte: Autoria própria (2022).

Ao aumentar a temperatura do forno, pode-se observar o deslocamento dos espectros para um comprimento de onda 0,49 nm e 0,19 nm maior, ao manter o sensor RFBG4-F por 10 dias em 800 °C (Figura 39) e por 10 dias em 850 °C (Figura 40), respectivamente. Ainda no patamar de 800 °C (Figura 39), houve redução de 7,58 dBm na intensidade do sinal refletido. Porém, no patamar de 850 °C (Figura 40), houve aumento de 1,36 dBm na intensidade do sinal refletido, compatível com a evolução regenerativa.

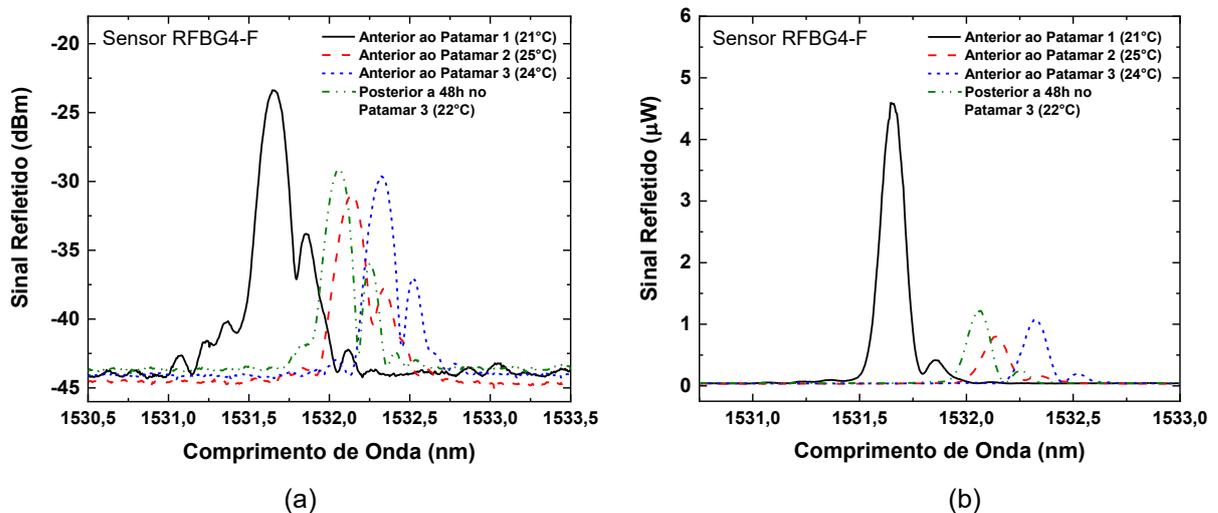
Após 48 horas de processamento térmico em 900 °C (Figura 41), foi observado o deslocamento do espectro para um comprimento de onda 0,27 nm menor, com aumento de 0,51 dBm na intensidade do sinal refletido.

O espectro depois do processamento térmico de 900 °C, ou seja, depois do patamar 3, não foi adquirido, devido ao fato de a RFBG ter se apagado.

Na Figura 42, pode-se comparar os espectros antes de cada patamar de temperatura, lembrando que o último espectro em temperatura ambiente adquirido foi o de 48 horas depois de estar na temperatura de 900 °C. Observa-se que, desde o início em 800 °C até o final do processamento térmico de 850 °C e, portanto, o início do de 900 °C, os comprimentos de onda deslocaram-se para valores cada vez maiores (deslocando-se 0,67 nm), com diminuição de $\sim 6,22$ dBm na intensidade de sinal refletido. Já no espectro obtido após 48 horas (2 dias) em processamento térmico de 900 °C, observa-se que os comprimentos de onda se deslocaram para valores menores e com intensidade de sinal refletido maior, conforme já descrito.

Depois, o sensor monitorou a temperatura por ainda 6 dias, totalizando 8 dias e 1 hora em 900 °C, e, posteriormente, o sensor RFBG4-F se rompeu devido à alta temperatura do forno. Tentou-se emendar novamente o sensor ao *pigtail*, porém sem sucesso de resposta no interrogador ótico. Portanto, não foi possível adquirir seu espectro em temperatura ambiente após todo o processamento térmico de 900 °C.

Figura 42 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG4-F antes e depois do processamento térmico nos patamares de temperatura descritos: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



Fonte: Autoria própria (2022).

5.2.3.4 Sensor RFBG5-F

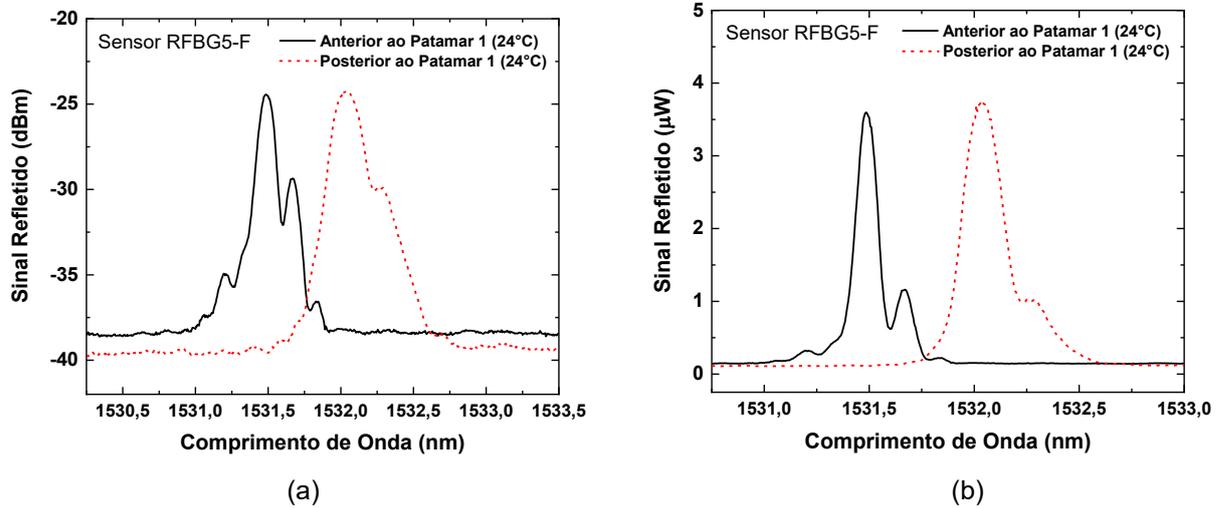
Nas Figuras 43 a 46, podem-se observar os espectros em temperatura ambiente do sensor RFBG5-F, antes e depois dos processos térmicos de 800 °C, 700 °C, 600 °C e 900 °C, respectivamente.

Ao diminuir a temperatura do forno, pode-se observar o deslocamento dos espectros para um comprimento de onda 0,55 nm, 0,06 nm e 0,20 nm maior mantendo o sensor RFBG5-F por 10 dias nos patamares de 800 °C (Figura 43), 700 °C (Figura 44) e 900 °C (Figura 46), respectivamente. No patamar de 600 °C (Figura 45) o comprimento de onda praticamente não variou.

Foi possível observar uma diminuição de 0,51 dBm na intensidade do sinal refletido ao manter o sensor RFBG5-F por 10 dias em 700 °C (Figura 44), e um aumento de 0,20 dBm, 0,20 dBm e 0,78 dBm na intensidade do sinal refletido ao

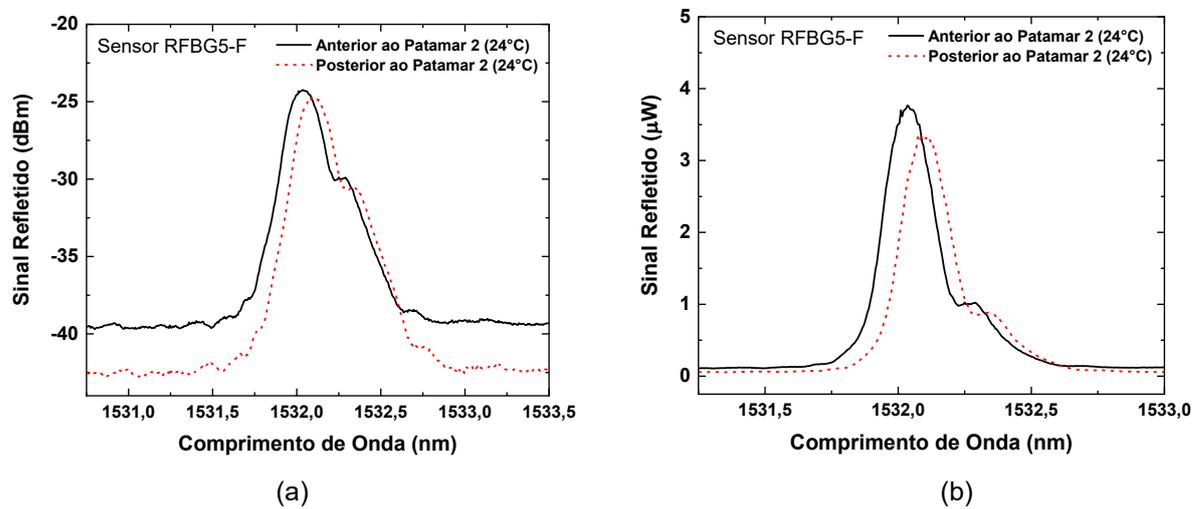
manter o sensor RFBG5-F por 10 dias nos patamares de 800 °C (Figura 43), 600 °C (Figura 45) e 900 °C (Figura 46), respectivamente.

Figura 43 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG5-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 800 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



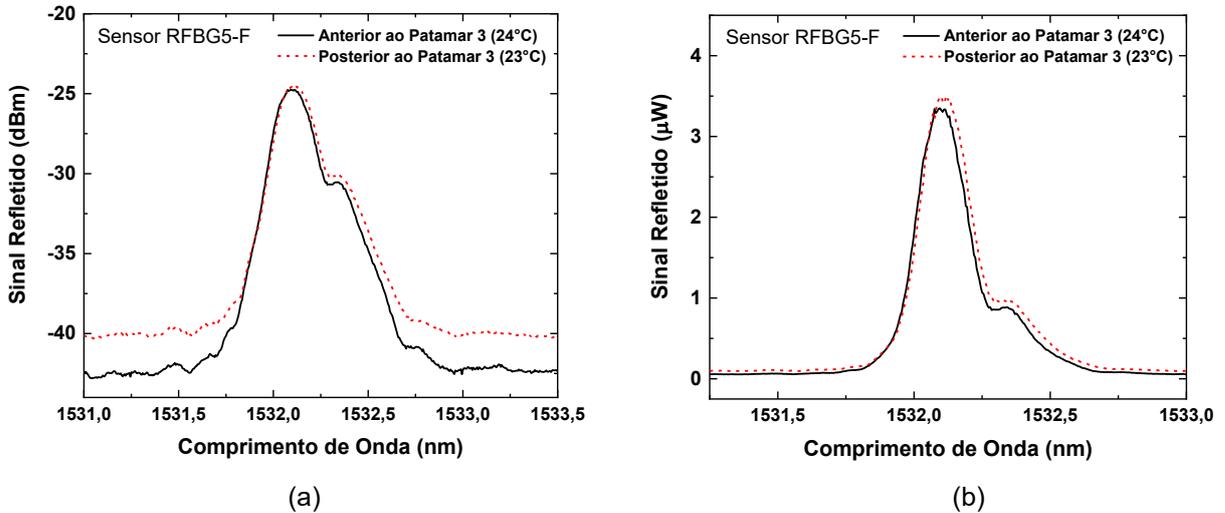
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 44 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG5-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 700 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



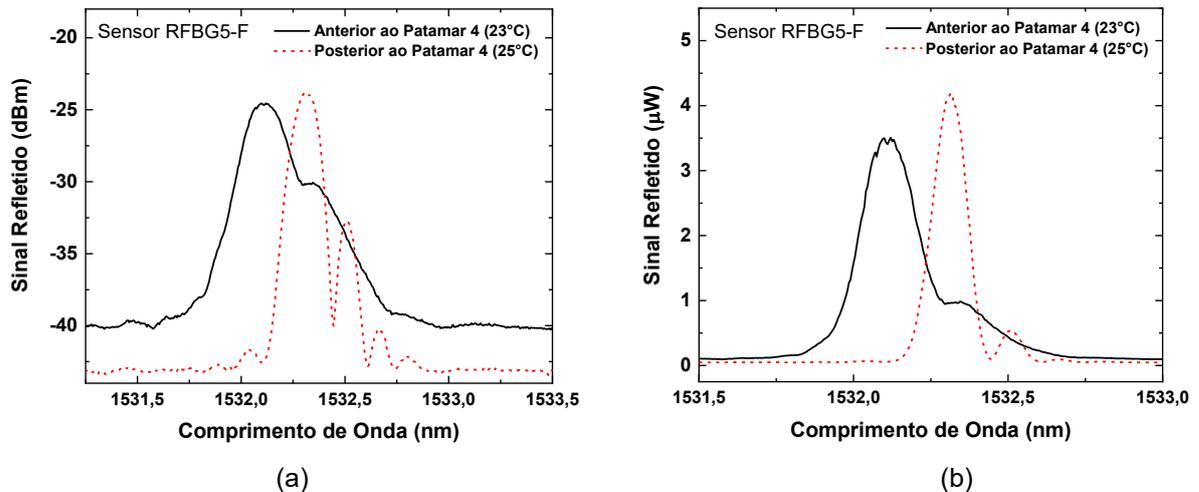
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 45 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG5-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 600 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 46 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG5-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 900 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



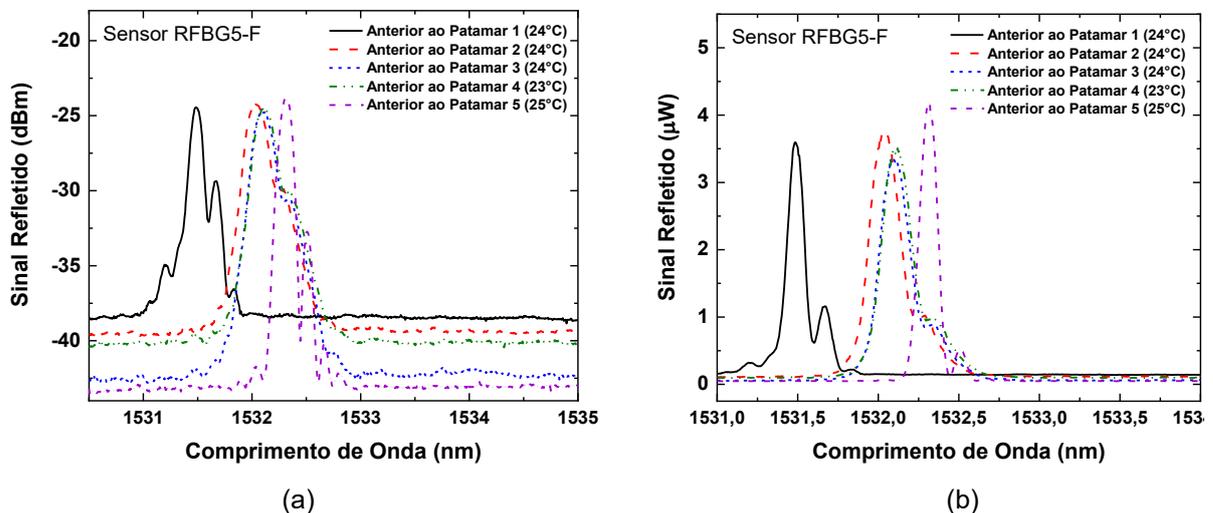
Fonte: Autoria própria (2022).

O espectro depois do processamento térmico de 1000 °C, ou seja, depois do patamar 5, não foi adquirido, devido ao apagamento da rede.

Na Figura 47, pode-se comparar os espectros antes de cada patamar de temperatura, lembrando que não houve a aquisição do espectro depois da temperatura de 1000 °C. Observa-se que, desde o início em 800 °C até o final do processamento térmico de 900 °C e, portanto, o início do de 1000 °C, os comprimentos de onda deslocaram-se para valores cada vez maiores (deslocando-se 0,83 nm). Depois de 1000 °C, o sensor monitorou a temperatura por ainda um dia,

mais precisamente 32 horas e 44 minutos. Nesse ciclo de 1000 °C foi possível perceber uma redução considerável da intensidade de resposta do sensor e, posteriormente, a fibra do sensor RFBG5-F se rompeu devido à alta temperatura do forno. O forno foi desligado. Após o sensor esfriar, emendou-se novamente o sensor ao *pigtail*. Porém, não se obteve sucesso de resposta no interrogador ótico, demonstrando que a RFBG realmente se apagou, encerrando os testes com o sensor RFBG5-F.

Figura 47 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG5-F antes do processamento térmico nos patamares de temperatura descritos: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



Fonte: Autoria própria (2022).

5.2.3.5 Sensor RFBG6-F

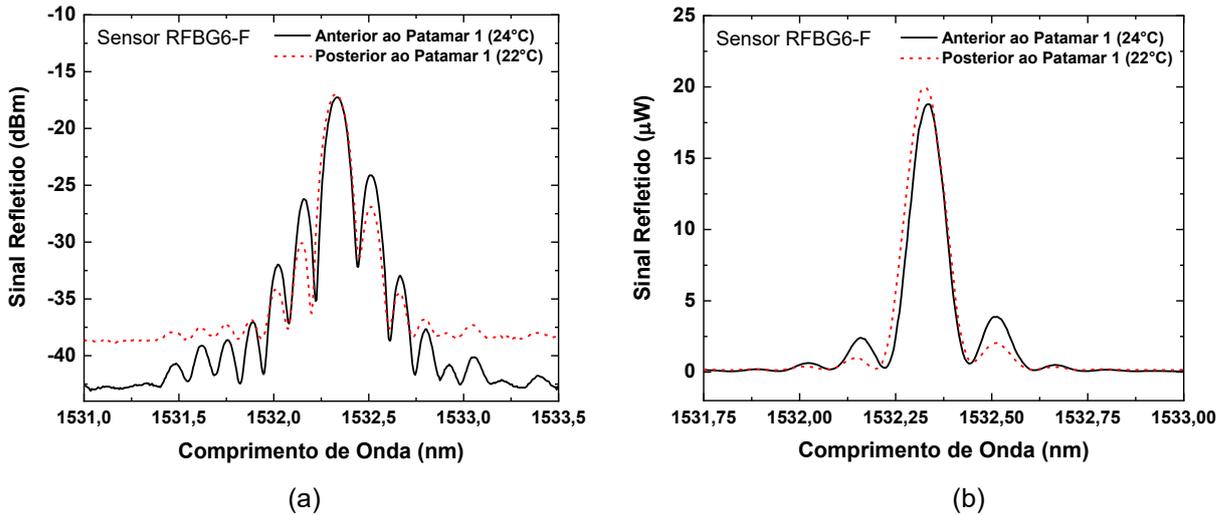
Nas Figuras 48 a 51, podem-se observar os espectros em temperatura ambiente do sensor RFBG6-F, antes e depois dos processos térmicos de 800 °C, 700 °C, 600 °C e 900 °C, respectivamente.

Ao diminuir a temperatura do forno, pode-se observar o deslocamento dos espectros para um comprimento de onda 0,09 nm e 0,80 nm maior mantendo o sensor RFBG6-F por 10 dias nos patamares de 700 °C (Figura 49) e 900 °C (Figura 51), respectivamente. Já nos patamares de 800 °C (Figura 48) e 600 °C (Figura 50), praticamente não se observa variação no comprimento de onda.

Foi possível observar um aumento de 0,26 dBm, 0,08 dBm e 0,09 dBm na intensidade do sinal refletido ao manter o sensor RFBG6-F por 10 dias nos patamares

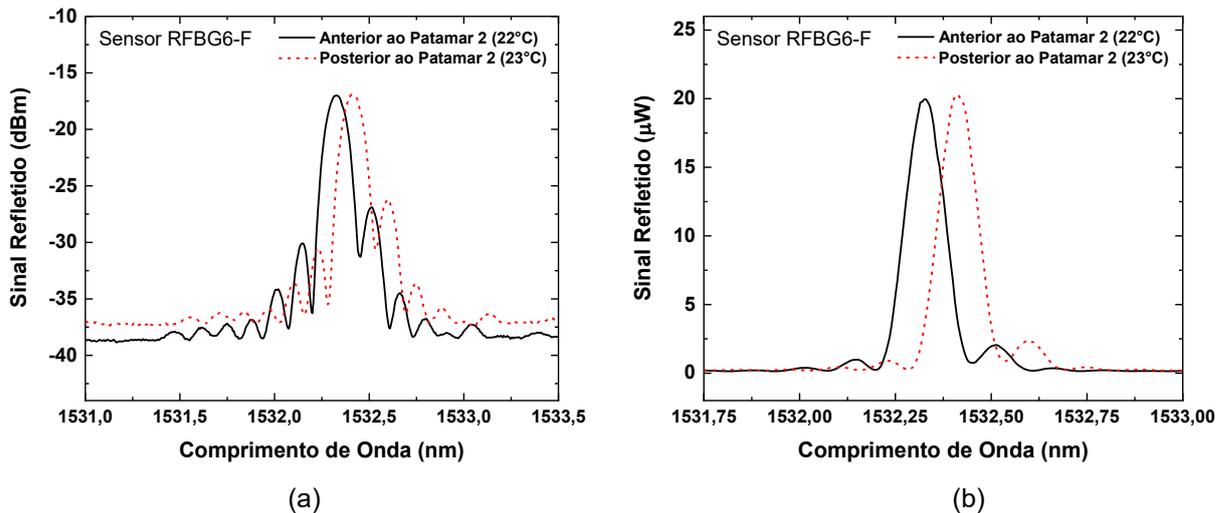
de 800 °C (Figura 48), 700 °C (Figura 49) e 600 °C (Figura 50). Porém, foi possível observar uma diminuição considerável de 6,11 dBm na intensidade do sinal refletido ao manter o sensor RFBG6-F por 10 dias em 900 °C (Figura 51).

Figura 48 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG6-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 800 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



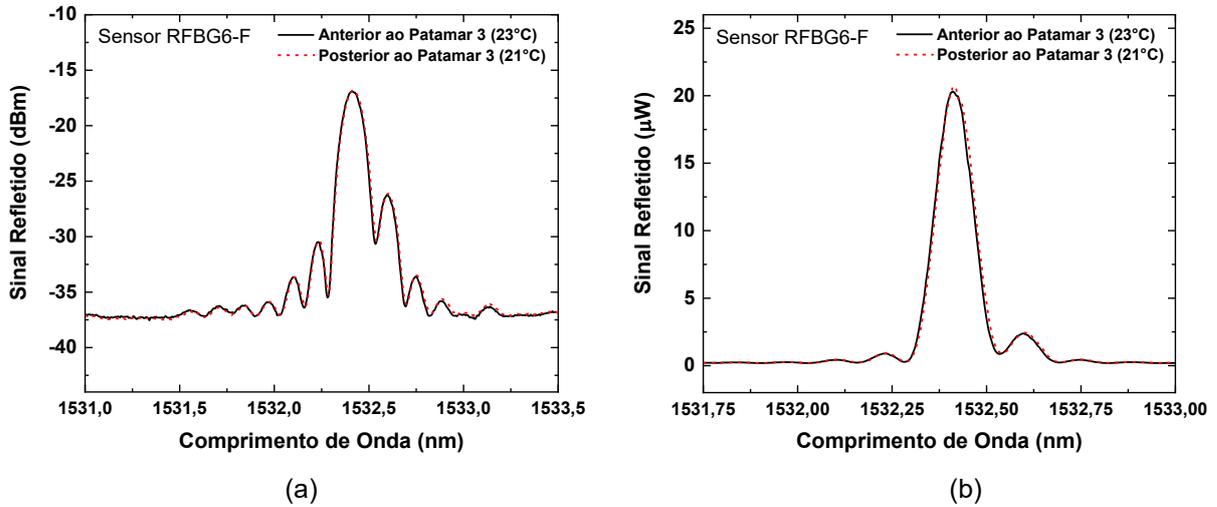
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 49 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG6-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 700 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



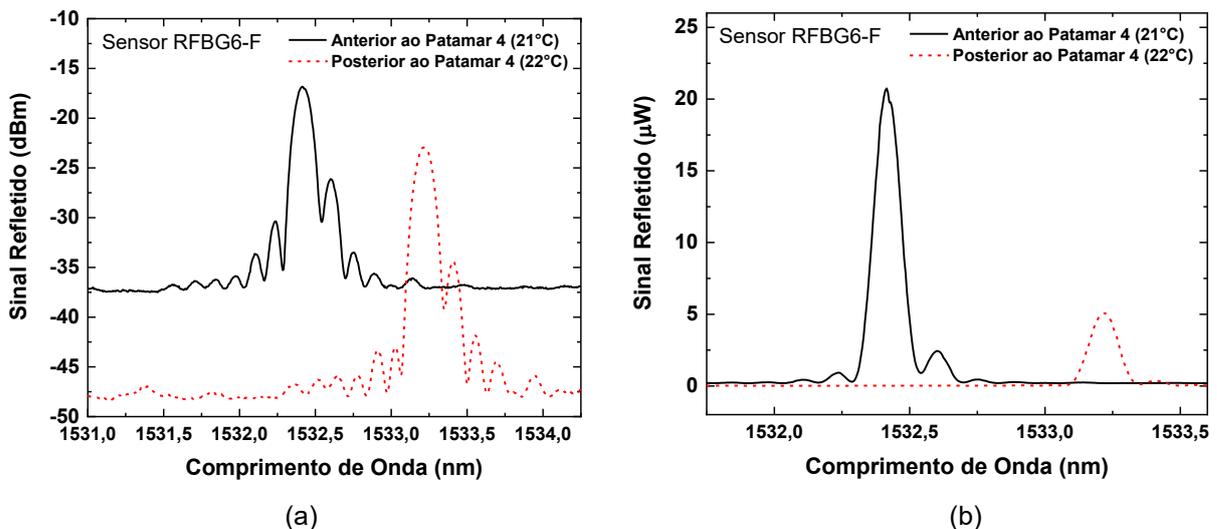
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 50 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG6-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 600 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 51 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG6-F antes e após processamento térmico de 10 dias em 900 °C: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



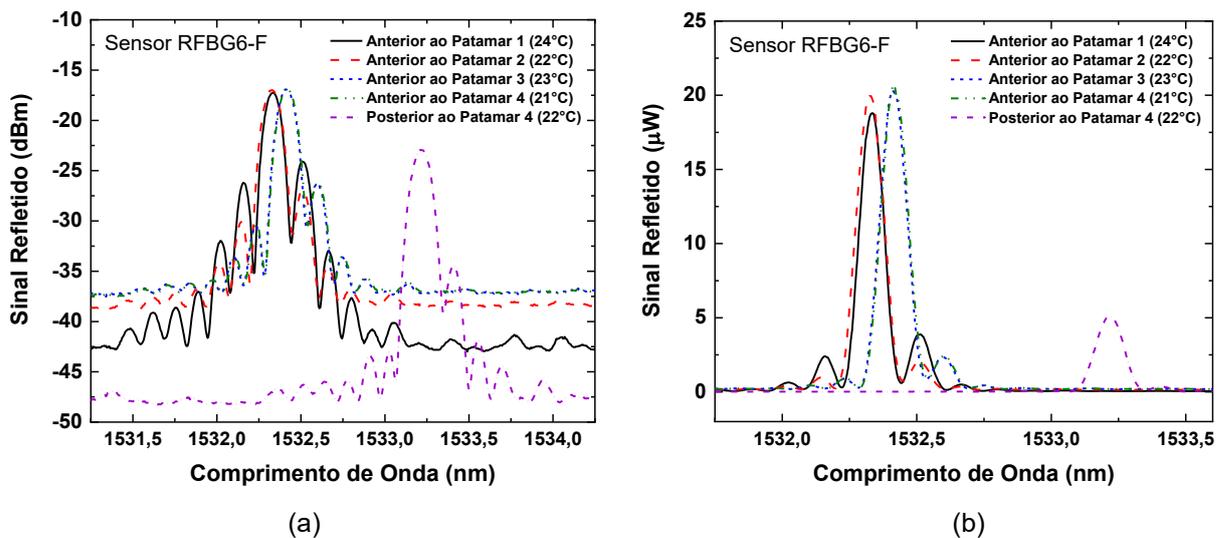
Fonte: Autoria própria (2022).

Ao monitorar o sensor RFBG6-F no patamar de temperatura de 1000 °C percebeu-se que o controlador não manteve a temperatura do forno estável, provavelmente devido ao termopar, que logo necessitou ser substituído. Por esse motivo, optou-se por desconsiderar as medições realizadas em 1000 °C.

Na Figura 52, pode-se comparar os espectros antes de cada patamar de temperatura e também o espectro depois da temperatura de 900 °C. Observa-se que, desde o início em 800 °C até o final do processamento térmico de 900 °C, os

comprimentos de onda deslocaram-se para valores cada vez maiores (deslocando-se 0,88 nm). A intensidade de sinal refletido se manteve praticamente a mesma durante todo o envelhecimento térmico, diminuindo apenas no patamar final de 900 °C, conforme já descrito.

Figura 52 – Espectros em reflexão para o sensor RFBG6-F antes e depois do processamento térmico nos patamares de temperatura descritos: (a) expressa graficamente em dBm; (b) expressa graficamente em μW .



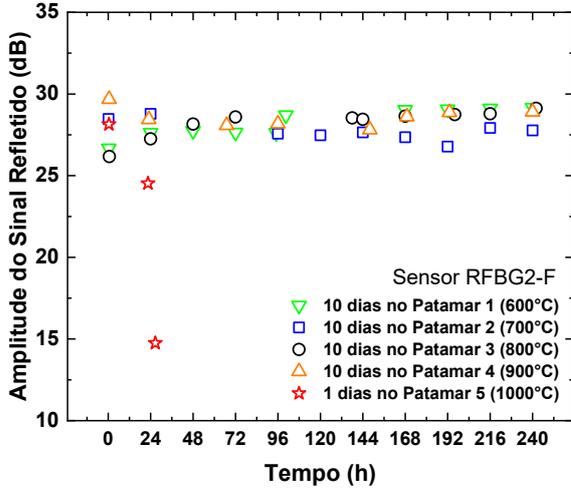
Fonte: Autoria própria (2022).

5.2.3.6 Expectativa de vida útil dos sensores RFBG2-F a RFBG6-F

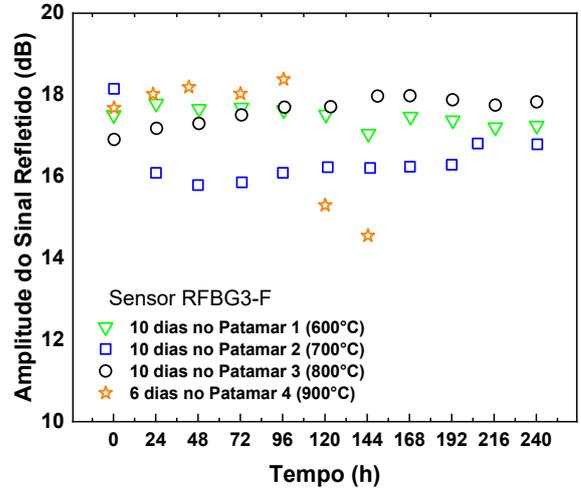
Na Figura 53, pode ser vista a potência refletida, ao longo dos dias em que os sensores RFBG2-F a RFBG6-F monitoraram as temperaturas do forno.

No caso do sensor RFBG2-F (Figura 53(a)), observa-se que nos 10 dias em 600 °C a potência refletida foi aumentando com o passar do tempo, indicando que o sensor ainda estava em processo de regeneração, resultando em incremento de 2,49 dB. Nos 10 dias em 700 °C a potência refletida flutuou, porém sem nítida informação de tendência, decaindo apenas 0,7 dB. Nos 10 dias em 800 °C a potência refletida aumentou 2,95 dB, demonstrando que o sensor estava operando sem se deteriorar e manifestou efeito regenerativo. Nos 10 dias em 900 °C a potência refletida se manteve sem grandes alterações, diminuindo 0,78 dB até o final do processo. Porém, no processamento térmico de um dia em que o sensor ficou em 1000 °C pode-se perceber que a potência refletida diminuiu em elevada taxa, perdendo 13,39 dB.

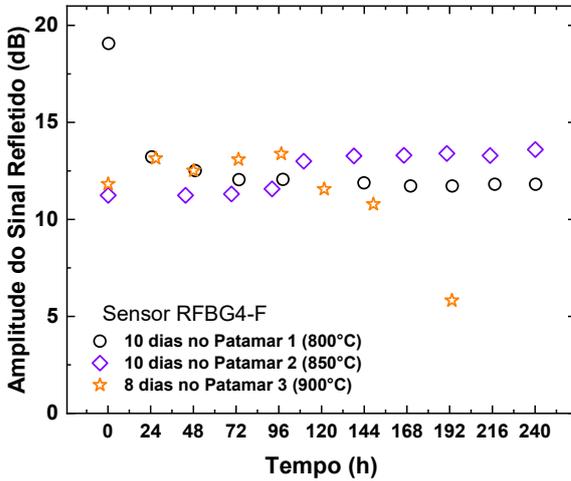
Figura 53 – Potência refletida no decorrer dos dias em que as temperaturas foram monitoradas pelo sensor: (a) RFBG2-F, (b) RFBG3-F, (c) RFBG4-F, (d) RFBG5-F e (e) RFBG6-F.



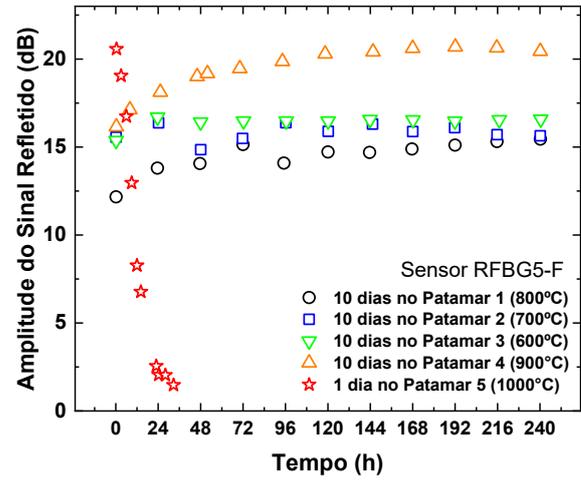
(a)



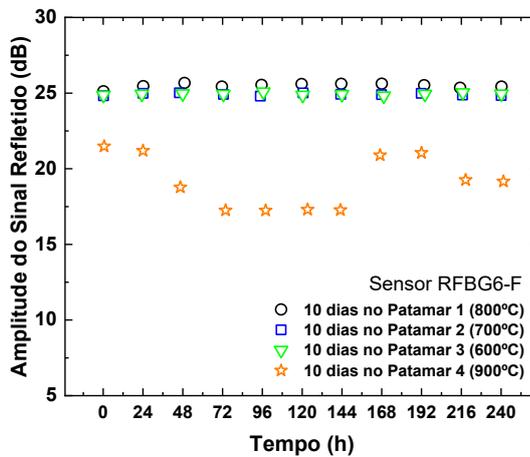
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Autoria própria (2022).

No caso do sensor RFBG3-F (Figura 53(b)), observa-se que nos 10 dias em 600 °C a potência refletida foi diminuindo com o passar do tempo, indicando que o sensor estava em processo de degradação, resultando em um decaimento de 0,26 dB. Nos 10 dias em 700 °C a potência refletida diminuiu 1,36 dB, nesse período é possível observar que nas primeiras 24 horas houve um decaimento de 2,06 dB com posterior tendência crescente da potência refletida, porém, neste processamento térmico de 700 °C a potência refletida final ainda era menor do que a potência refletida inicial. Essa tendência é confirmada no próximo patamar de temperatura, em 800 °C, no qual a potência refletida aumentou 0,92 dB, demonstrando que o sensor estava operando sem se deteriorar e manifestou efeito regenerativo. Já no processamento térmico dos seis dias seguintes em que o sensor ficou em 900 °C pode-se perceber que a potência refletida diminuiu mais rapidamente, decaindo 3,13 dB, ainda que a potência refletida tenha aumentado 0,7 dB em quatro dias, porém caiu em elevada taxa nos dois dias seguintes até o final do processo analisado.

No caso do sensor RFBG4-F (Figura 53(c)), observa-se que nos 10 dias em 800 °C a potência refletida foi diminuindo 7,26 dB com o passar do tempo, perdendo intensidade do sinal refletido por efeito térmico, indicando que o sensor já não estava mais regenerando. É possível observar que, nas primeiras 24 horas desse patamar de temperatura, em 800 °C, a potência refletida decaiu mais rapidamente 5,85 dB em apenas um dia. Nos 10 dias em 850 °C a potência refletida aumentou 2,36 dB. Já nos primeiros 6 dias em 900 °C, a potência refletida se manteve com variações praticamente estáveis, decaindo 1,04 dB, demonstrando que o sensor estava operando sem se deteriorar mesmo devido a alta temperatura. Porém, nos próximos 2 dias em 900 °C, a potência refletida diminuiu 4,96 dB. Assim, no patamar de temperatura em 900 °C a potência refletida decaiu consideravelmente 6 dB.

No caso do sensor RFBG5-F (Figura 53(d)), observa-se que nos 10 dias em 800 °C a potência refletida aumentou 3,28 dB, indicando que a RFBG deveria estar se regenerando. Nos 10 dias em 700 °C a potência refletida se manteve praticamente estável com o passar do tempo, com um ligeiro aumento de 0,08 dB, indicando que o sensor não apresentou degradação significativa nesse processamento. Nos 10 dias em 600 °C a potência refletida aumentou ainda mais 1,21 dB, demonstrando que o sensor estava operando sem se deteriorar mesmo devido a alta temperatura. Nos 10 dias em 900 °C a potência refletida ainda aumentou consideravelmente 4,29 dB, indicando que a RFBG continuava a se regenerar. Porém, no processamento térmico

de um dia em que o sensor ficou em 1000 °C pode-se perceber que a potência refletida diminuiu em elevada taxa, perdendo 19,10 dB.

No caso do sensor RFBG6-F (Figura 53(e)), observa-se que nos 10 dias em 800 °C a potência refletida aumentou 0,31 dB, indicando que a RFBG deveria estar se regenerando. Nos 10 dias em 700 °C e nos 10 dias em 600 °C, a potência refletida se manteve praticamente estável com o passar do tempo, com ligeiro aumento de 0,02 dB e 0,09 dB, respectivamente, demonstrando que o sensor estava operando sem se deteriorar mesmo devido a alta temperatura. Porém, no processamento térmico de 10 dias em que o sensor ficou em 900 °C pode-se perceber que a potência refletida diminuiu 2,32 dB.

Na Tabela 8, pode-se ver a taxa de variação da amplitude do sinal refletido, em cada ciclo de 10 dias, de cada sensor em análise, obtida através de ajuste linear. O ajuste linear não foi aplicado no último patamar de temperatura, em alguns dos sensores, devido ao fato de que poucos pontos foram obtidos. A partir da amplitude do sinal refletido no final de cada ajuste linear, fez-se uma estimativa da expectativa de vida útil em função das temperaturas, decaindo até 1 dB, considerando-se 1 dia equivalente a 24 horas. Por ser utilizada a amplitude final do sinal refletido no ajuste linear, foram somados 10 dias no resultado da expectativa de vida útil.

Todos os sensores analisados mantiveram-se em operação em temperaturas acima de sua temperatura de regeneração (Tabela 9). Os sensores que conseguiram alcançar a temperatura de 1000 °C operaram por ~1 dia já decaindo consideravelmente desde o início de tal ciclo de temperatura, independente de estarem 100 °C ou 150 °C acima de sua temperatura de regeneração (RFBG2-F e RFBG5-F, respectivamente).

Já os sensores que permaneceram em 900 °C estavam todos 50 °C acima de suas respectivas temperaturas de regeneração. Porém, uma diferença foi observada: os sensores que foram submetidos ao envelhecimento térmico em patamares de temperatura decrescentes (*pre-annealings* decrescentes), antes de serem aquecidos acima de suas respectivas temperaturas de regeneração, mantiveram-se em operação durante todo o ciclo de 10 dias nessa temperatura (RFBG5-F e RFBG6-F); mas os sensores que foram submetidos ao envelhecimento térmico em patamares de temperatura crescentes (*pre-annealings* crescentes), antes de serem aquecidos acima de suas respectivas temperaturas de regeneração, mantiveram-se em operação 6 e 8 dias nessa temperatura (RFBG3-F e RFBG4-F, respectivamente),

mantendo-se estáveis por 4 e 6 dias, respectivamente, e apenas decaindo consideravelmente em seus dois últimos dias de monitoramento de temperatura.

Tabela 8 – Taxa de variação da amplitude do sinal refletido para a análise da expectativa de vida útil dos sensores RFBG2-F a RFBG6-F.

Sensor	Temperatura do ciclo de 10 dias (°C)	Taxa de variação da amplitude do sinal refletido (dB/h)	Amplitude final do sinal refletido no ajuste linear (dB)	Expectativa de vida útil (dias)
RFBG2-F	600,0	$+9,66 \cdot 10^{-3}$	29,44	Indefinida
	700,0	$-4,68 \cdot 10^{-3}$	27,25	243
	800,0	$+8,75 \cdot 10^{-3}$	29,27	Indefinida
	900,0	$-8,51 \cdot 10^{-4}$	28,47	1354
	1000,0	(não se aplica)	(não se aplica)	(não se aplica)
RFBG3-F	600,0	$-2,07 \cdot 10^{-3}$	17,22	336
	700,0	$-6,67 \cdot 10^{-4}$	16,33	967
	800,0	$+3,75 \cdot 10^{-3}$	18,06	Indefinida
	900,0	(não se aplica)	(não se aplica)	(não se aplica)
RFBG4-F	800,0	$-1,72 \cdot 10^{-2}$	10,74	33
	850,0	$+1,20 \cdot 10^{-2}$	13,88	Indefinida
	900,0	(não se aplica)	(não se aplica)	(não se aplica)
RFBG5-F	800,0	$+9,72 \cdot 10^{-3}$	15,66	Indefinida
	700,0	$+8,35 \cdot 10^{-4}$	15,93	Indefinida
	600,0	$+2,19 \cdot 10^{-3}$	16,68	Indefinida
	900,0	$+1,55 \cdot 10^{-2}$	21,46	Indefinida
	1000,0	(não se aplica)	(não se aplica)	(não se aplica)
RFBG6-F	800,0	$+4,23 \cdot 10^{-4}$	25,54	Indefinida
	700,0	$-1,37 \cdot 10^{-4}$	24,90	7278
	600,0	$+1,27 \cdot 10^{-4}$	24,95	Indefinida
	900,0	$-2,12 \cdot 10^{-3}$	18,91	362

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 9 – Períodos nos quais os patamares de temperatura dos sensores RFBG2-F a RFBG6-F permaneceram acima de suas respectivas temperaturas de regeneração.

Sensor	Temperatura de regeneração (°C)	Temperatura acima da temperatura de regeneração (°C)	Período acima da temperatura de regeneração (h)
RFBG2-F	900,0	1000,0	26
RFBG3-F	850,0	900,0	144
RFBG4-F	850,0	900,0	193
RFBG5-F	850,0	900,0	240
		1000,0	32
RFBG6-F	850,0	900,0	241

Fonte: Autoria própria (2022).

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo são descritas as considerações finais no caso dos sensores térmicos para medição de baixas temperaturas e no caso dos sensores térmicos para medição de altas temperaturas. Também são mencionadas perspectivas para trabalhos futuros.

6.1 SENSORES TÉRMICOS PARA MEDIÇÃO DE BAIXAS TEMPERATURAS (ENTRE 0 °C E 40 °C)

Foram analisadas a expectativa de vida útil, a precisão e a exatidão de sensores termo-ópticos (FBG1-P e RFBG1-P) para temperaturas ambientes (entre 0 °C e 40 °C). Ao longo de 151 semanas, não foi observada discrepância superior a 2 °C, eventualmente estando dentro da faixa de erro do multímetro, que possui resolução de 1 °C, com exceção de apenas quatro medições pontuais que ocorreram nas semanas 26 e 27, das quais, três medições apresentaram diferenças de 3 °C e uma única medição apresentou diferença de 4 °C. Isso pode ter sido ocasionado por oxidação nos contatos dos fios do multímetro, pois, ao observar tal divergência, os fios do termopar foram removidos do multímetro e reconectados, sem mover o termopar da parede metálica, e esse procedimento já foi suficiente para os sensores não apresentarem diferenças superiores a 2 °C.

Ambos os sensores se mostraram adequados para aplicação em campo e apresentaram razoável precisão e exatidão em relação ao medidor de temperatura de referência. O encapsulamento proposto revelou-se eficiente, tanto pela robustez, quanto pela baixa influência sobre as características de uma FBG sem cápsula.

Constatou-se baixa perda de intensidade do sinal refletido pelo sensor FBG1-P ($-9,68 \cdot 10^{-3}$ dB/semana) e pelo sensor RFBG1-P ($-8,20 \cdot 10^{-3}$ dB/semana), demonstrando que o sensor FBG1-P, que não passou pelo processo de regeneração, está degradando mais rapidamente com o passar do tempo, conforme o esperado.

Em baixas temperaturas de operação (entre 0 °C e 40 °C) constatou-se, por extrapolação térmica decaindo até chegar em 1 dB, no intervalo de mais de dois anos e meio de envelhecimento térmico, que a expectativa de vida útil do sensor RFBG1-P (21 anos) é 20% maior em relação ao sensor FBG1-P (18 anos).

Os dois sensores apresentados neste trabalho continuam sob análise na mesma instalação, possibilitando novas conclusões futuramente.

6.2 SENSORES TÉRMICOS PARA MEDIÇÃO DE ALTAS TEMPERATURAS (ENTRE 600 °C E 900 °C)

Foi analisada a durabilidade de sensores termo-óticos (RFBG) em altas temperaturas (entre 600 °C e 900 °C), por envelhecimento térmico. Foram obtidos os dados de cada sensor colocado para análise em patamares crescentes ou decrescentes de temperatura, com passos de 50 °C ou 100 °C, permanecendo 10 dias em cada patamar, ou menos no caso de a RFBG ter se apagado.

Para isso, os sensores RFBG2-F a RFBG5-F foram regenerados por ~1,5 hora, com exceção do sensor RFBG6-F que foi regenerado por ~3,75 horas. Apenas o sensor RFBG2-F foi regenerado em 900°C, os demais foram regenerados em 850 °C.

Os sensores RFBG2-F a RFBG4-F foram submetidos a *pre-annealings* crescentes (RFBG2-F: de 600 °C até 900 °C; RFBG3-F: de 600 °C até 800 °C; RFBG4-F: de 800 °C até 850 °C) e os sensores RFBG5-F e RFBG6-F foram submetidos a *pre-annealings* decrescentes (ambos de 800 °C até 600 °C) com passos de 100 °C. A exceção foi no caso do sensor RFBG4-F, com passos de 50 °C.

Como resultado, todos os cinco sensores (RFBG2-F a RFBG6-F) operaram acima de sua temperatura de regeneração, cujo processo térmico foi chamado de *annealing*.

Nessas condições, a temperatura mais alta em que os sensores conseguiram operar foi de 1000 °C. O sensor RFBG2-F e o sensor RFBG5-F, permaneceram 1 dia em 1000 °C, apresentando decaimento na intensidade do sinal refletido. Os sensores RFBG3-F a RFBG5-F apresentaram espectros mais estáveis, com estabilidade do sinal refletido por 4, 6 e 10 dias em 900 °C, respectivamente. No caso dos sensores RFBG3-F e RFBG4-F, após passarem por este período de estabilidade, ambos tiveram suas intensidades de sinal refletido em decaimento nos 2 dias seguintes, totalizando 6 e 8 dias, respectivamente, em 900 °C.

No caso do sensor RFBG6-F, que foi regenerado com mais do que o dobro de tempo do que os demais, foi observada uma flutuação de 2,32 dB por 10 dias em

900 °C, indicando que um maior tempo de regeneração, a princípio, não promove maior estabilidade na intensidade do sinal refletido pelo sensor.

Por outro lado, os patamares de temperatura influenciaram a estabilidade do sinal refletido. O sensor RFBG2-F, regenerado em 900 °C permaneceu 100 °C acima de sua temperatura de regeneração por apenas 1 dia. Ao diminuir essa diferença para 50 °C acima de sua temperatura de regeneração, os sensores RFBG3-F e RFBG4-F permaneceram em operação por 4 e 6 dias, respectivamente. Ainda no caso do sensor RFBG4-F, os passos utilizados nos *pre-annealings* foram reduzidos de 100 °C para 50 °C, o que, provavelmente, tornou a rede estável por mais tempo.

Ao serem utilizados *pre-annealings* decrescentes, verificou-se que a intensidade do sinal refletido permaneceu estável por um tempo maior (10 dias), mostrando que os ciclos a temperaturas mais baixas contribuíram para aumentar a resistência da rede a temperatura.

Portanto, foi verificado que os cinco sensores produzidos se mantiveram em operação entre 1 e 11 dias em temperaturas de 50 °C até 150 °C acima de suas respectivas temperaturas de regeneração, dos quais três sensores (RFBG3-F, RFBG4-F e RFBG5-F) apresentaram-se estáveis em relação a intensidade de sinal refletido por 4, 6 e 10 dias, respectivamente.

6.3 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

É interessante continuar a análise do envelhecimento dos sensores óticos (FBG1-P e RFBG1-P) que já estão fixados na parede metálica, utilizados para medição de temperatura ambiente, analisando a precisão e a exatidão que lhes são conferidas no decorrer de mais alguns meses com medições semanais.

Além disso, as redes de Bragg gravadas com o auxílio do *laser* em comprimento de onda de 193 nm, em energia de 1,50 mJ/pulso, frequência de 250 Hz, em um tempo de exposição de 15 minutos regeneraram com maiores eficiências. Por isso, em trabalhos futuros, pode-se utilizar essas especificações para analisar o envelhecimento térmico, em patamares de temperaturas entre 600 °C e 900 °C, de outros sensores termo-óticos regenerados em 850 °C por ~1,5 hora.

REFERÊNCIAS

ALWIS, L. S. M.; BUSTAMANTE, H.; ROTH, B.; BREMER, K.; SUN, T.; GRATTAN, K. T. V. Evaluation of the durability and performance of FBG-based sensors for monitoring moisture in an aggressive gaseous waste sewer environment. **Journal of Lightwave Technology**, v. 35, n. 16, p. 3380-3386, 2017.

APERT. **Vida útil**. 2013. Disponível em: <http://www.apert.com.br/wp-content/uploads/2013/07/artigo1.pdf>. Acesso em: 01 set. 2020.

ARISTILDE, S.; CORDEIRO, C. M. B.; OSÓRIO, J. H. Gasoline quality sensor based on tilted fiber Bragg gratings. **Photonics**, v. 6, n. 51, p. 1-8, 2019.

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. **Proceedings of SPIE**, Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors, v. 7653, n. 76530Q, p. 1-4, 2010.

ÅSLUND, M. L.; CANNING, J.; YOFFE, G. Locking in photosensitivity within optical fiber and planar waveguides by ultraviolet preexposure. **Optics Letters**, v. 24, n. 24, p. 1826-1828, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575**: Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

BARRERA, D.; FINAZZI, V.; VILLATORO, J.; PRUNERI, V.; SALES MAICAS, S. Packaged optical sensors based on regenerated fiber Bragg gratings for high temperature applications. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, p. 101-112, 2012.

BÍBLIA. Português. **Bíblia Jovem**: Nova Tradução na Linguagem de Hoje. São Paulo: Sociedade Bíblica do Brasil, 2002.

BISWAS, P.; SHARMA, S.; CANNING, J.; BANDYOPADHYAY, S. Regenerated Gratings Redefined. *In: Photonics and Fiber Technology 2016*, Optical Society of America, v. BTh3B (Fundamentals: Photosensitivity), n. BTh3B.3, p. 1-2, 2016.

BLACK BOX. **Fibre optic cable construction**. 2020. Disponível em: <https://www.blackbox.co.uk/gb-gb/page/27222/Resources/Technical-Resources/Black-Box-Explains/Fibre-Optic-Cable/Fibre-optic-cable-construction>. Acesso em: 30 maio 2020.

BRAMBILLA, G.; REEKIE, L.; CONTARDI, C.; MILANESE, D.; FERRARIS, M. Bragg gratings in ternary SiO₂: SnO₂: Na₂O optical glass fibers. **Optics Letters**, v. 25, n. 16, p. 1153-1155, 2000.

BUTOV, O. V.; DIANOV, E. M.; GOLANT, K. M. Nitrogen-doped silica core fibres for Bragg grating sensors operating at elevated temperatures. **Measurement Science and Technology**, v. 17, p. 975-979, 2006.

CANNING, J.; STEVENSON, M.; BANDYOPADHYAY, S.; COOK, K. Extreme silica optical fibre gratings. **Sensors**, v. 8, n. 10, p. 6448-6452, 2008.

CANNING, J.; BANDYOPADHYAY, S.; STEVENSON, M.; BISWAS, P.; FENTON, J.; ÅSLUND, M. Regenerated gratings. **Journal of European Optical Society -Rapid Publications**, v. 4, n. 09052, p. 1-7, 2009.

CANNING, J.; BANDYOPADHYAY, S.; BISWAS, P.; ÅSLUND, M.; STEVENSON, M.; COOK, K. Regenerated Fibre Bragg Gratings. *In: **Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics***, n. 18, p. 363-384. Croatia: INTECH, 2010.

CANNING, J. Regeneration, regenerated gratings and composite glass properties: the implications for high temperature micro and nano milling and optical sensing. **Measurement**, v. 79, p. 236-249, 2016.

CHAH, K.; YUKSEL, K.; KINET, D.; YAZD, N. S.; MEGRET, P.; CAUCHETEUR, C. Fiber Bragg grating regeneration at 450 degrees C for improved high temperature sensing. **Optics Letters**, v. 44, n. 16, p. 4036-4039, 2019.

CHRYSSIS, A. N.; LEE, S. M.; LEE, S. B.; SAINI, S. S.; DAGENAIS, M. High sensitivity evanescent field fiber Bragg grating sensor. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 17, n. 6, p. 1253-1255, 2005.

CORADIN, F. K.; OLIVEIRA, V. de; 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**, v. 12, p. 309-319, 2013.

COSTA, L. N. da; MOURA, C. C. de; OLIVEIRA, V. de; CHIAMENTI, I.; KALINOWSKI, H. J. Bragg gratings written with ultrafast laser pulses. **Journal of Microwaves**, v. 14, p. 15-24, 2015.

CRUZ, H. A. B. de la. **Análise da calibração de sensores a rede de Bragg em fibras óticas interrogados através da técnica de filtros fixos**. 2007. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2007.

CUSANO, A.; IADICICCO, A.; CAMPOPIANO, S.; GIORDANO, M.; CUTOLO, A. Thinned and micro-structured fibre Bragg gratings: towards new all-fibre highsensitivity chemical sensors. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 7, n. 12, p. 734-741, 2005.

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. **Electronics Letters**, v. 33, n. 3, p. 236-238, 1997.

DRAGIC, P.; HAWKINS, T.; FOY, P.; MORRIS, S.; BALLATO, J. Sapphire-derived all-glass optical fibres. **Nature Photonics**, v. 6, p. 627-633, 2012.

DREYER, U. J.; MEZZADRI, F.; DUTRA, G.; SILVA, T. da; BAVASTRI, C. A.; SILVA, E. V. da; MARTELLI, C.; SILVA, J. C. C. da. Quasi-distributed optical fiber transducer for simultaneous temperature and vibration sensing in high-power generators. **IEEE Sensors Journal**, v. 18, n. 4, p. 1547-1554, 2018.

DUTZ, F. J.; LINDNER, M.; HEINRICH, A.; SEYDEL, C. G.; BOSSELMANN, T.; KOCH, A. W.; ROTHS, J. Multipoint high temperature sensing with regenerated fiber Bragg gratings. **Proceedings of SPIE**, Fiber Optic Sensors and Applications XV, v. 10654, p. 1-7, 2018.

EGAN, R. J.; INGLIS, H. G.; HILL, P.; KRUG, P. A.; OUELLETTE, F. Effects of hydrogen loading and grating strength on the thermal stability of fiber Bragg gratings. **Optical Fiber Communication Conference**, San José, California, USA, v. OFC-1996, p. 83-84, 1996.

ELSMANN, T.; LORENZ, A.; YAZD, N. S.; HABISREUTHER, T.; DELLITH, J.; SCHWUCHOW, A.; BIERLICH, J.; SCHUSTER, K.; ROTHHARDT, M.; KIDO, L.; BARTELT, H. High temperature sensing with fiber Bragg gratings in sapphire-derived all-glass optical fibers. **Optics Express**, v. 22, p. 26825-26833, 2014.

ERDOGAN, T.; MIZRAHI, V.; LEMAIRE, P. J.; MONROE, D. Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings. **Journal of Applied Physics**, v. 76, n. 1, p. 73-80, 1994.

FALATE, R.; KAMIKAWACHI, R. C.; MÜLLER, M.; KALINOWSKI, H. J.; FABRIS, J. L. Fiber optic sensors for hydrocarbon detection. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 105, n. 2, p. 430-436, 2005.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB 53). **Structural concrete textbook on behaviour, design and performance**: Design of durable concrete structures. 2. e., v. 3, n. 53. Lausanne (Suíça): Manual-textbook, 2009.

FENG, D.; LIU, Y.; LUO, X.; ZHANG, X. Experimental study on high temperature regeneration of fiber Bragg grating. **Proceedings of SPIE**, Sixth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications, v. 11455, n. 114555H, p. 1-6, 2020.

FIORIN, R.; FRANCO, A. P. G. O.; SOUZA, M. A. de; FONTENELE, D. M.; JONES, I. L. G.; KALINOWSKI, H. J.; ABE, I. Case study for monitoring the rhythmic masticatory muscle activity during sleep bruxism episodes by using fiber Bragg gratings. **Journal of Lightwave Technology**, v. 37, n. 18, p. 4823-4829, 2019.

FIRST COAST COMPUTER SERVICES. What is Streaming? 2015. Disponível em: <https://fccspro.com/articles-in-st-augustine-papers/what-is-streaming/>. Acesso em: 23 jan. 2022.

FOCC. **Armour Simplex Duplex Fiber Optic Patch Cord Jumper Cable SC / ST / FC / LC / APC / UPC**. Disponível em: <http://www.focc-fiber.com/fiber-cable-assemblies/os2-9-25singlemode-patchcord/armour-simplex-duplex-fiber-optic-patch-cord.html>. Acesso em: 08 nov. 2020.

FOKINE, M. Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fibers. **Journal of the Optical Society of America B**, v. 19, n. 8, p. 1759-1765, 2002.

FRANCO, A. P. G. de O.; MOURA, C. C. de; KARAM, L. Z.; KALINOWSKI, H. J. Properties of bulk dental composites using fiber Bragg grating sensors. **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**, Águas de Lindóia, p. 1-3, 2017.

FRAZÃO, O.; ARAÚJO, F. M.; DIAS, I.; FERREIRA, L. A.; SANTOS, J. L. Sensores de Bragg em Fibra Ótica. **Jornadas de Engenharia de Telecomunicações e Computadores**, Lisboa, Portugal, v. JETC99, n. XI, p. 23-26, 1999.

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**, v. 254, p. 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. **Measurement Science and Technology**, v. 17, p. 1009-1013, 2006.

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

GUO, Y.; XIONG, L.; LIU, H. Research on the durability of metal-packaged fiber Bragg grating sensors. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 31, n. 7, p. 525-528, 2019.

HAFIZI, Z. M.; VORATHIN, E.; AIZZUDDIN, A. M.; LIM, K. S. High-resolution Fibre Bragg Grating (FBG) pressure transducer for low-pressure detection. **International Journal of Automotive and Mechanical Engineering**, v. 16, n. 2, p. 6783-6795, 2019.

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

HILL, K. O.; FUJII, Y.; JOHNSON, D. C.; KAWASAKI, B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication. **Applied Physics Letters**, v. 32, n. 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 phase mask. **Applied Physics Letters**, v. 62, n. 10, p. 1035-1037, 1993a.

HILL, K. O.; MALO, B.; BILODEAU, F.; JOHNSON, D. C. Photosensitivity in Optical Fibers. **Annual Review of Materials Science**, v. 23, p. 125-157, 1993b.

HOLMBERG, P.; LAURELL, F.; FOKINE, M. Influence of pre-annealing on the thermal regeneration of fiber Bragg gratings in standard optical fibers. **Optics Express**, v. 23, n. 21, p. 27520-27535, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13823**: General principles on the design of structures for durability. Geneva: ISO/TC, 2008.

KAMIKAWACHI, R. C. **Estudo de redes de período longo como elemento sensor de hidrocarbonetos**. 2003. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2003.

KANNAN, S.; GUO, J. Z. Y.; LEMAIRE, P. J. Thermal stability analysis of UV induced fiber Bragg gratings. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1478-1483, 1997.

KARAM, L. Z. **Desenvolvimento de um biosensor para mensuração de deformações mecânicas em tecidos ósseos**. 2015. 95 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

KASHYAP, R. **Fiber Bragg gratings**. San Diego: Academic Press, 1999.

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**, v. 15, n. 8, p. 1442-1463, 1997.

KOTINDA, C. H. P. **Monitoramento térmico de painel fotovoltaico utilizando redes de Bragg em fibra ótica**. 2018. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2018.

KUMAR, J.; MAHAKUD, R.; MOKHARIWALE, A.; PRAKASH, O.; DIXIT, S. K.; NAKHE, S. V. Studies on thermal regeneration and temperature stability of type-I FBGs written in Ge-B codoped and Ge doped fibers by a kHz repetition rate nanosecond 255nm beam. **Optics Communications**, v. 320, p. 109-113, 2014.

KUMAR, P.; KUMAR, S.; KUMAR, J.; PURBIA, G. S.; PRAKASH, O.; DIXIT, S. K. Graphene oxide coated fiber Bragg grating sensor for ethanol detection in petrol. **Measurement Science and Technology**, v. 31, p. 1-8, 2019.

LAFFONT, G.; CORILLARD, R.; FERDINAND, P. 9000 hours-long high temperature annealing of regenerated fiber Bragg gratings. **Proceedings of SPIE**, Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors, v. 8794, n. 87941X, p. 1-4, 2013.

LEMAIRE, P. J.; ATKINS, R. M.; MIZRAHI, V.; REED, W. A. High-pressure H₂ loading as technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibers. **Electronics Letters**, v. 29, n. 13, p. 1191-1193, 1993.

LI, S.; MIN, L.; ZHANG, X.; ZHANG, F.; SUN, Z.; WANG, M. Application of FBG Sensor for Low Frequency Vibration Monitoring in Hydroelectric Generating. **IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC)**, Shenzhen, p. 102-105, 2018.

LIMA JUNIOR, P.; SILVA, M. T. X.; SILVEIRA, F. L. da; VEIT, E. A. **Laboratório de mecânica: subsídios para o ensino de Física experimental**. Porto Alegre: UFRGS, Instituto de Física, 2013.

LINDNER, E.; CHOJETZKI, C.; BRÜCKNER, S.; BECKER, M.; ROTHHARDT, M.; BARTELT, H. Thermal regeneration of fiber Bragg gratings in photosensitive fibers. **Optical Express**, v. 17, n. 15, p. 12523-12531, 2009.

LINDNER, E.; CANNING, J.; CHOJETZKI, C.; BRÜCKNER, S.; BECKER, M.; ROTHHARDT, M.; BARTELT, H. Post-hydrogen-loaded draw tower fiber Bragg gratings and their thermal regeneration. **Applied Optics**, v. 50 n. 17, p. 2519-2522, 2011.

LU, K.; YANG, H.; LIM, K.; AHMAD, H.; ZHANG, P.; TIAN, Q.; DING, X.; QIAO, X. Effect of two annealing processes on the thermal regeneration of fiber Bragg gratings in hydrogenated standard optical fibers. **Applied Optics**, v. 57, n. 24, p. 6971-6975, 2018.

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

MENDES, G. **Qual a diferença entre reparo e manutenção?** 2020. Disponível em: <https://www.fm2s.com.br/qual-a-diferenca-entre-reparo-e-manutencao/>. Acesso em: 26 jan. 2022.

MIHAILOV, S. J.; SMELSER, C. W.; GROBNIC, D.; WALKER, R. B.; LU, P.; DING, H.; HUNRUH, J. Bragg gratings written in All-SiO₂ and Ge-doped core fibers with 800 nm femtosecond radiation and phase mask. **Journal of Lightwave Technology**, v. 22, n. 1, p. 94-100, 2004.

MIN, R.; LIU, Z.; PEREIRA, L.; YANG, C.; SUI, Q.; MARQUES, C. Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring: a review. **Optics & Laser Technology**, v. 140, n. 107082, p. 1-12, 2021.

MOURA, C. C. de; INACIO, P. L.; CHIAMENTI, I.; OLIVEIRA, V. de; KALINOWSKI, H. J. Regeneration characteristics of FBG written for the visible spectral range. **Proceedings of SPIE**, 25th International Conference on Optical Fiber Sensors, v. 10323, n. 103231R, p. 1-4, 2017.

MOURA, C. C. de; OLIVEIRA, V. de; KALINOWSKI, H. J. Characterization of encapsulated temperature sensors based on Bragg gratings. **OSA Technical Digest** (Optica Publishing Group), 26th International Conference on Optical Fiber Sensors, Optical Fiber Sensors 2018, Poster Session III (ThE), n. ThE30, p.1-4, 2018.

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

OLIVEIRA, V. de. **Redes de Bragg para medições em altas temperaturas**. 2012. 137 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2012.

OLIVEIRA, V. de; 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. **Proceedings of SPIE**, 24th International Conference on Optical Fibre Sensors, v. 9634, n. 963440, p. 1-4, 2015.

OLIVEIRA, V. de; MULLER, M.; KALINOWSKI, H. J. Bragg gratings in standard non-hydrogenated fibers for high-temperature sensing. **Applied Optics**, v. 50, p. 55-58, 2011.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE, Escritório Regional para as Américas da Organização Mundial da Saúde. **Folha informativa sobre COVID-19**. 2021. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/covid19>. Acesso em: 10 ago. 2021.

OTHONOS, A., KALLI, K. **Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing**. Norwood: Artech house, 1999.

OTHONOS, A.; LEE, X. Novel and improved methods of writing Bragg gratings with phase masks. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 7, n. 10, p. 1183-1185 1995.

PAL, S.; JANDAL, J.; SUN, T.; GRATTAN, K. T. V.; FOKINE, M.; CARLSSON, F.; FONJALLAS, P. Y.; WADE, S. A.; COLLINS, S. F. Characteristics of potential fibre Bragg grating sensor-based devices at elevated temperatures. **Measurement Science and Technology**, v. 14, n. 7, p. 1131-1136, 2003.

PATRICK, H.; GILBERT, S. L.; LIDGARD, A.; GALLAGHER, M. D. Annealing of Bragg gratings in hydrogen-loaded optical fiber. **Journal Applied Physics**, v. 78, n. 5, p. 2940-2945, 1995.

PENG, J.; ZHOU, X.; JIA, S.; JIN, Y.; XU, S.; CHEN, J. High precision strain monitoring for lithium ion batteries based on fiber Bragg grating sensors. **Journal of Power Sources**, v. 433, p. 1-7, 2019.

PEREIRA, D. A.; FRAZÃO, O.; SANTOS, J. Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature. **Optical Engineering**, v. 43, n. 2, p. 299-304, 2004.

PEREIRA, J. G. **Sensores de vibração baseados em rede de Bragg em fibra ótica afinada: comparação e aplicação no monitoramento de motores elétricos**. 2016. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2016.

POLZ, L.; NGUYEN, Q.; BARTELT, H.; ROTHS, J. Fiber Bragg gratings in hydrogen-loaded photosensitive fiber with two regeneration regimes. **Optics Communications**, v. 313, p. 128-133, 2014.

POLZ, L.; DUTZ, F. J.; MAIER, R. R. J.; BARTELT, H.; ROTHS, J. Regenerated fibre Bragg gratings: a critical assessment of more than 20 years of investigations. **Optics & Laser Technology**, v. 134, n. 106650, p. 236-249, 2021.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, p.1-14, 2013.

QIAO, X.; SHAO, Z.; BAO, W.; RONG, Q. Fiber Bragg grating sensors for the oil industry. **Sensors**, v. 17, n. 429, p. 1-34, 2017.

SAAD, S. FBG sensors for seismic control and detection in extradosed bridges. **International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems**, v. 14, n. 1, p.1-13, 2021.

SHAO, L.; WANG, T.; CANNING, J.; COOK, K.; TAM, H. Bulk regeneration of optical fiber Bragg gratings. **Applied Optics**, v. 51, n. 30, p. 7165-7169, 2012.

SILVA, J. C. C.; MARTELLI, C.; PENNER, E.; KALINOWSKI, H. J. Temperature effects in concrete structures measured with fibre Bragg grating. **Proceedings of SPIE**, Second European Workshop on Optical Fibre Sensors, v. 5502, p. 68-71, 2004.

SOUSA, K. de M. **Validação de modelo térmico e elétrico de motor de indução empregando redes de Bragg em fibra ótica**. 2011. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pato Branco, 2011.

SPIRIN, V. V.; SHLYAGIN, M. G.; MIRIDONOV, S. V.; MENDIETA JIMÉNEZ, F. J., LÓPEZ GUTIÉRREZ, R. M. Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 32, n. 5, p. 497-503, 1999.

TERADA, G. G. **Caracterização e aplicação de sensores à fibra ótica no setor petroquímico**. 2010. 120 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2010.

TRIBUNAL REGIONAL FEDERAL DA TERCEIRA REGIÃO. **Covid-19: masculino ou feminino?** 2021. Disponível em: <https://www.trf3.jus.br/emag/emagconecta/conexaoemag-lingua-portuguesa/covid-19/>. Acesso em: 10 set. 2021.

TU, Y.; YE, L.; ZHOU, S.; TU, S. An improved metal-packaged strain sensor based on a regenerated fiber Bragg grating in hydrogen-loaded boron-germanium co-doped photosensitive fiber for high-temperature applications. **Sensors**, v. 17, n. 431, p. 1-18, 2017.

UFSCAR & UNESP – Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais. **Envelhecimento Térmico**. 2019. Disponível em: <http://www.ccdm.ufscar.br/polimeros-ensaios-tecnologicos/ensaios-climaticos/envelhecimento-termico/>. Acesso em: 01 set. 2020.

WANG, T.; SHAO, L.; CANNING, J.; COOK, K. Regeneration of fiber Bragg gratings under strain. **Applied Optics**, v. 52, n. 10, p. 2080-2085, 2013a.

WANG, T.; SHAO, L.; CANNING, J.; COOK, K. Temperature and strain characterization of regenerated gratings. **Optics Letters**, v. 38, n. 3, p. 247-249, 2013b.

WEHRLE, G.; NOHAMA, P.; KALINOWSKI, H. J.; TORRES, P. I.; VALENTE, L. C. G. A fibre optic Bragg grating strain sensor for monitoring ventilatory movements. **Measurement Science and Technology**, v. 12, n. 7, p. 805-809, 2001.

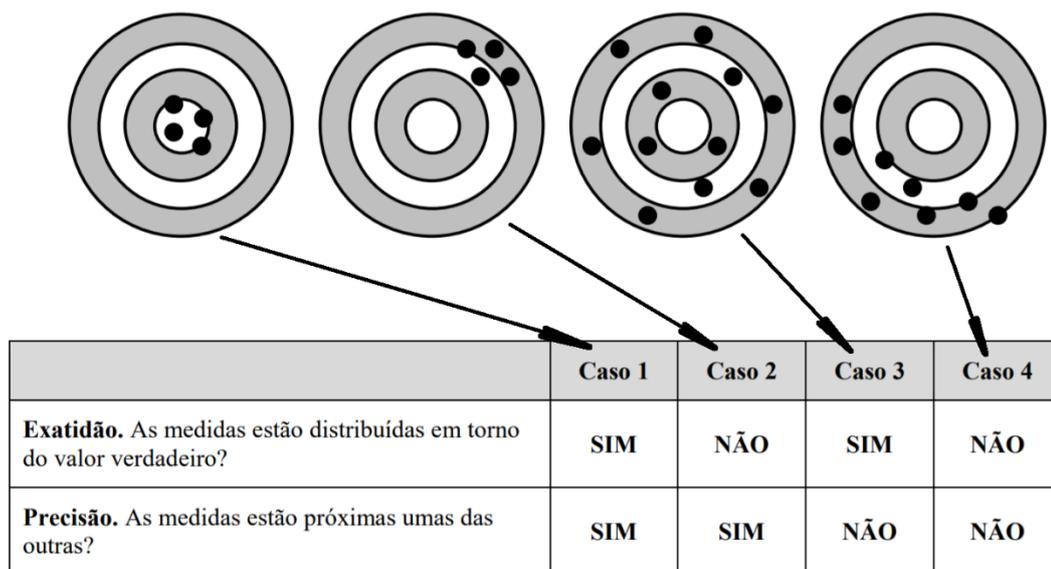
YANG, H. Z.; QIAO, X. G.; DAS, S.; PAUL, M. C. Thermal regenerated grating operation at temperatures up to 1400 °C using new class of multimaterial glass-based photosensitive fiber. **Optics Letters**, v. 39, n. 22, p. 6438-6441, 2014.

ZHANG B.; KAHRIZI, M. High-temperature resistance fiber Bragg grating temperature sensor fabrication. **IEEE Sensors Journal**, v. 7, n. 4, 2007.

GLOSSÁRIO

Comparação entre exatidão e precisão: Para entender melhor a diferença entre exatidão e precisão observe a Figura 54, que ilustra algumas situações de tiro ao alvo.

Figura 54 – Exatidão e precisão: analogia com o tiro ao alvo.



Fonte: Adaptado de Lima Junior *et al.* (2013).

Covid-19: Em dezembro de 2019, foi identificada uma doença infecciosa na China, causada pelo novo coronavírus (SARS-CoV-2), conhecida como “covid-19” ou “doença do coronavírus” (ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE, 2021). Com a propagação dessa doença pelos continentes, a Organização Mundial da Saúde a declarou como pandemia, recomendando o distanciamento social. A partir do momento em que a sigla passou a dar nome à doença, tornou-se um substantivo feminino grafado com letras minúsculas (TRIBUNAL REGIONAL FEDERAL DA TERCEIRA REGIÃO, 2021).

Durabilidade: é uma retrospectiva do período de tempo durante o qual uma estrutura, no caso, o sensor ótico, está desempenhando seus requisitos de projeto, sem a necessidade de manutenção ou reparo além dos previstos (POSSAN; DEMOLINER, 2013). Portanto, “durabilidade” pode ser entendida como “vida útil real”. Porém, nesta tese, utiliza-se apenas “durabilidade”. *Nota: Esta definição relacionada a sensores*

ópticos foi realizada com base na norma internacional ISO 13823/2008 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2008), que trata a respeito da durabilidade de estruturas utilizadas na indústria da construção civil.

Envelhecimento térmico: Simula as consequências possíveis de ocorrer em um determinado material sob efeito de altas temperaturas. Materiais expostos a determinadas temperaturas podem ter suas estruturas físicas e/ou químicas modificadas, liberando umidade, solventes ou plastificantes, além de ter sua coloração alterada. O envelhecimento térmico de fibras ópticas também pode torná-las quebradiças, ou seja, mais frágeis (UFSCAR & UNESP, 2019). O envelhecimento térmico de redes de Bragg pode ser utilizado para analisar a durabilidade e a expectativa de vida útil de sensores termo-ópticos.

Exatidão: Refere-se ao grau de concordância da medida em relação ao valor alvo, ou seja, uma média é mais exata se o valor medido for mais próximo do valor verdadeiro correspondente (LIMA JUNIOR *et al.*, 2013).

Expectativa de vida útil: é referente a “vida útil de projeto” e é avaliada pela utilização de metodologias de previsão de vida útil, com modelos representativos dos processos de deterioração aos quais uma estrutura, no caso, o sensor óptico, está suscetível (POSSAN; DEMOLINER, 2013). *Nota: Esta definição relacionada a sensores ópticos foi realizada com base no boletim informativo fib Bulletin número 53 (FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON, 2009), que trata a respeito do projeto de estruturas de concreto duráveis.*

Manutenção: é o conjunto de ações que irão promover o aumento da vida útil das máquinas (MENDES, 2020).

Pigtail: Cordão óptico flexível que protege mecanicamente a fibra óptica, dificultando seu rompimento por curvatura ou por degradação devido a roedores. Um exemplo de *pigtail* encontrado comercialmente pode ser visto na Figura 55.

Figura 55 – Exemplo de *pigtail* encontrado comercialmente.



Fonte: FOCC (2020).

Precisão: Refere-se apenas ao grau de dispersão dos valores obtidos, ao repetir as medidas sob as mesmas condições, ou seja, uma medida é precisa se apresentar resultados bem semelhantes, ao repetir as medições diversas vezes (LIMA JUNIOR *et al.*, 2013).

Reparo: é uma ação pontual que acontece mediante ao mau funcionamento de equipamentos, corrigindo os defeitos encontrados (MENDES, 2020).

Streaming: Método de transmissão ou recepção de dados através de uma rede, com um fluxo contínuo de informações em determinada frequência (FIRST COAST COMPUTER SERVICES, 2015). Na presente tese, utilizou-se o interrogador ótico SM 125 com frequência de 2 Hz em rede com um *notebook*.

Tipos de redes de Bragg: Classicamente, são três tipos: Tipo I, Tipo IIA e Tipo II (OTHONOS; KALLI, 1999). As redes Tipo I são as mais comuns. Podem ser gravadas por um feixe de luz pulsado ou contínuo, resultando em um incremento do índice de refração, e estão associadas aos centros de cores. Sua resistência à temperatura é de até ~ 300 °C. Uma rede se torna Tipo IIA, quando o espectro de uma rede Tipo I é apagado, ainda que parcialmente, seguido por um crescimento espectral acompanhado de um decrescimento do índice de refração, associado a fenômenos de densificação e compactação. Sua resistência à temperatura passa a ser de até ~ 500 °C. Já as redes Tipo II apresentam altos incrementos do índice de refração, devido à alta energia requerida em sua gravação, resultando em defeitos físicos na matriz de sílica. Sua resistência à temperatura alcança até ~ 800 °C (KASHYAP, 1999;

OTHONOS; KALLI, 1999). Com o passar do tempo essa classificação de tipos de redes de Bragg passou a ser substituída por descrições das próprias características e especificações da fibra ótica utilizada para a produção da rede de Bragg.

Vida útil: Dimensiona por quanto tempo um determinado bem tem condições de operar em sua plenitude e integridade, mantendo sua função da maneira adequada a qual se destina (APERT, 2013). Medida temporal da durabilidade de um sensor ótico e de suas partes, podendo ser dividido em “vida útil real” e “vida útil de projeto”. A “vida útil real” é uma retrospectiva do período de tempo durante o qual o sensor ótico desempenhou seus requisitos de projeto até necessitar de manutenção ou reparo além dos previstos. A “vida útil de projeto” é uma previsão do período de tempo durante o qual o sensor ótico desempenha seus requisitos de projeto, sem a necessidade de manutenção ou reparo além dos previstos (POSSAN; DEMOLINER, 2013). Nesta tese, utiliza-se apenas “vida útil”, se referindo a “vida útil de projeto”. *Nota: Esta definição relacionada a sensores óticos foi realizada com base na norma ABNT NBR 15575/2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), que trata a respeito da vida útil de edifícios e da vida útil de projeto, e na norma internacional ISO 13823/2008, que trata a respeito da vida útil de estruturas utilizadas na indústria da construção civil.*

**APÊNDICE – TEMPERATURAS DOS SENSORES FBG1-P E RFBG1-P
CORRELACIONADAS À TEMPERATURA DE REFERÊNCIA AO LONGO DE
151 SEMANAS**

Tabela 10 (continua) – Temperatura do multímetro comparada às temperaturas dos sensores no decorrer das semanas.

Semana	Temperatura no multímetro (°C)	Temperatura no sensor FBG1-P (°C)	Erro absoluto do sensor FBG1-P (°C)	Temperatura no sensor RFBG1-P (°C)	Erro absoluto do sensor RFBG1-P (°C)
0	27	27	0	27	0
1	19	21	-2	21	-2
2	27	27	0	27	0
3	21	22	-1	23	-2
4	26	26	0	26	0
5	27	27	0	27	0
6	20	21	-1	21	-1
7	25	25	0	26	-1
8	24	24	0	25	-1
9	24	25	-1	26	-2
10	23	23	0	24	-1
11	23	23	0	24	-1
12	22	22	0	23	-1
13	23	23	0	24	-1
14	28	27	1	29	-1
15	33	32	1	33	0
16	25	25	0	26	-1
17	26	27	-1	27	-1
18	27	27	0	28	-1
19	21	22	-1	22	-1
20	20	22	-2	22	-2
21	23	24	-1	25	-2
22	18	19	-1	19	-1
23	33	32	1	32	1
24	16	18	-2	18	-2
25	18	20	-2	20	-2
26	14	17	-3	18	-4
27	12	15	-3	15	-3
28	17	18	-1	18	-1
29	19	21	-2	21	-2
30	20	22	-2	22	-2
31	24	25	-1	24	0
32	23	24	-1	24	-1
33	21	22	-1	23	-2
34	21	23	-2	23	-2
35	32	32	0	32	0
36	34	33	1	33	1
37	31	31	0	31	0
38	34	33	1	33	1
39	19	20	-1	21	-2

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 10 (continuação) – Temperatura do multímetro comparada às temperaturas dos sensores no decorrer das semanas.

Semana	Temperatura no multímetro (°C)	Temperatura no sensor FBG1-P (°C)	Erro absoluto do sensor FBG1-P (°C)	Temperatura no sensor RFBG1-P (°C)	Erro absoluto do sensor RFBG1-P (°C)
40	19	20	-1	21	-2
41	19	20	-1	21	-2
42	23	24	-1	24	-1
43	19	20	-1	21	-2
44	22	23	-1	23	-1
45	33	32	1	33	0
46	30	29	1	29	1
47	22	23	-1	24	-2
48	25	26	-1	27	-2
49	22	23	-1	24	-2
50	34	33	1	33	1
51	32	32	0	32	0
52	20	20	0	21	-1
53	29	28	1	29	0
54	31	30	1	30	1
55	31	31	0	31	0
56	31	30	1	31	0
57	23	23	0	24	-1
58	23	24	-1	24	-1
59	27	27	0	27	0
60	23	24	-1	24	-1
61	36	35	1	36	0
62	26	26	0	27	-1
63	32	31	1	32	0
64	26	27	-1	27	-1
65	31	30	1	31	0
66	27	27	0	27	0
67	25	24	1	26	-1
68	23	24	-1	24	-1
69	24	25	-1	25	-1
70	24	25	-1	25	-1
71	27	27	0	27	0
72	25	26	-1	26	-1
73	36	35	1	35	1
74	23	24	-1	24	-1
75	23	24	-1	24	-1
76	36	35	1	35	1
77	20	22	-2	22	-2
78	26	26	0	27	-1
79	21	22	-1	23	-2

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 10 (continuação) – Temperatura do multímetro comparada às temperaturas dos sensores no decorrer das semanas.

Semana	Temperatura no multímetro (°C)	Temperatura no sensor FBG1-P (°C)	Erro absoluto do sensor FBG1-P (°C)	Temperatura no sensor RFBG1-P (°C)	Erro absoluto do sensor RFBG1-P (°C)
80	22	23	-1	24	-2
81	25	25	0	25	0
82	29	28	1	29	0
83	33	31	2	33	0
84	30	28	2	30	0
85	31	31	0	32	-1
86	22	23	-1	24	-2
87	32	31	1	31	1
88	25	26	-1	25	0
89	28	28	0	28	0
90	16	18	-2	18	-2
91	28	28	0	28	0
92	27	28	-1	27	0
93	18	19	-1	20	-2
94	27	27	0	27	0
95	21	23	-2	23	-2
96	29	29	0	29	0
97	23	24	-1	24	-1
98	24	25	-1	25	-1
99	18	20	-2	20	-2
100	21	22	-1	23	-2
101	24	25	-1	25	-1
102	20	22	-2	22	-2
103	23	25	-2	24	-1
104	21	22	-1	23	-2
105	30	30	0	30	0
106	22	23	-1	24	-2
107	19	20	-1	21	-2
108	22	23	-1	24	-2
109	25	25	0	26	-1
110	23	23	0	24	-1
111	38	36	2	37	1
112	29	29	0	29	0
113	27	26	1	27	0
114	23	24	-1	25	-2
115	27	27	0	27	0
116	26	27	-1	27	-1
117	27	27	0	28	-1
118	33	32	1	32	1
119	23	24	-1	25	-2

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 10 (conclusão) – Temperatura do multímetro comparada às temperaturas dos sensores no decorrer das semanas.

Semana	Temperatura no multímetro (°C)	Temperatura no sensor FBG1-P (°C)	Erro absoluto do sensor FBG1-P (°C)	Temperatura no sensor RFBG1-P (°C)	Erro absoluto do sensor RFBG1-P (°C)
120	21	22	-1	22	-1
121	37	35	2	36	1
122	20	21	-1	22	-2
123	35	35	0	34	1
124	25	26	-1	27	-2
125	22	23	-1	24	-2
126	34	32	2	33	1
127	25	25	0	26	-1
128	27	26	1	27	0
129	22	23	-1	24	-2
130	37	35	2	35	2
131	20	22	-2	22	-2
132	23	24	-1	24	-1
133	25	26	-1	27	-2
134	34	34	0	34	0
135	19	21	-2	21	-2
136	19	21	-2	21	-2
137	20	21	-1	22	-2
138	21	22	-1	22	-1
139	29	29	0	29	0
140	23	25	-2	25	-2
141	22	23	-1	24	-2
142	26	26	0	27	-1
143	33	32	1	33	0
144	17	18	-1	19	-2
145	17	18	-1	19	-2
146	30	29	1	30	0
147	17	19	-2	19	-2
148	22	23	-1	24	-2
149	31	31	0	32	-1
150	21	22	-1	23	-2

Fonte: Autoria própria (2022).