

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

FRANCELLI KLEMBA CORADIN

REDES DE BRAGG PARA APLICAÇÕES EM SENSORIAMENTO E
TELECOMUNICAÇÕES

TESE

CURITIBA
2011

FRANCELLI KLEMBA CORADIN

**REDES DE BRAGG PARA APLICAÇÕES EM SENSORIAMENTO E
TELECOMUNICAÇÕES**

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 Doutor em Ciências. Área de Concentração: Informática Industrial.

Orientador: Prof. Dr. José Luís Fabris

Coorientador: Prof^a. Dr^a. Marcia Muller

CURITIBA
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

C787 Coradin, Francelli Klemba
Redes de Bragg para aplicações em sensoriamento e telecomunicações / Francelli
Klemba Coradin. — 2011.
132 f. : il. ; 30 cm

Orientador: José Luís Fabris.

Coorientador: Marcia Muller.

Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2011.

Bibliografia: f. 125-131.

1. Grades de Bragg. 2. Detectores. 3. Temperatura – tratamento térmico. 4. Refração. 5. Telecomunicações. 6. Engenharia elétrica – Teses. I. Fabris, José Luís, orient. II. Muller, Marcia, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

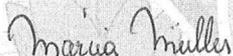
Título da Tese Nº. 65

“Redes de Bragg para Aplicações em Sensoriamento e Telecomunicações”

por

Francelli Klemba Coradin

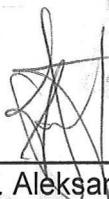
Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba, às 09h do dia 08 de abril de 2011. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:



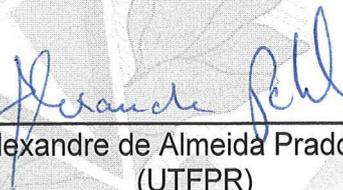
Prof^a. Marcia Muller, Dr.
(Presidente – UTFPR)



Prof. Christiano José Santiago de Matos, Dr.
(MACKENZIE)



Prof. Aleksander Sade Paterno, Dr.
(UDESC)

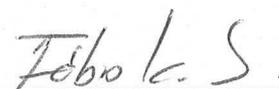


Prof. Alexandre de Almeida Prado Pohl, Dr.
(UTFPR)



Prof. Cícero Martelli, Dr.
(UTFPR)

Visto da coordenação:



Prof. Fábio Kurt Schneider, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

A toda minha família pelo incentivo.

Em especial à minha filha Renata e ao meu
esposo Luiz, que sempre me apoiaram nos
momentos mais difíceis.

E à memória de meu avô, Adão Klemba
que nos deixou durante meu estágio de
doutorado em Portugal.

AGRADECIMENTOS

Várias pessoas contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta tese. A todos, eu gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos.

Agradeço aos meus orientadores, professor Dr. José Luís Fabris e professora Dr. Marcia Muller, pela oportunidade que me proporcionaram em trabalhar em contato direto com um ambiente de pesquisa e pelos conhecimentos. A todos os colegas do Grupo de Dispositivos Fotônicos e Aplicações, agradeço pelas horas de estudos, pelos experimentos realizados juntos, pelas dicas e sugestões e, principalmente, pela amizade.

Aos demais amigos, professores e funcionários da UTFPR, pela amizade e incentivo.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho no Instituto de Telecomunicações, na Universidade de Aveiro em Portugal, durante o ano referente ao meu estágio de doutorado.

Aos meus pais, Luci e José, meus irmãos, Danilo e Lenieverson, e a todos os meus familiares que sempre me incentivaram ao longo deste trabalho. E em especial ao meu esposo, Luiz à minha filha Renata, pelo amor, compreensão, dedicação e pelo tempo de suas vidas dedicadas a mim.

Ao apoio financeiro do CNPq e da CAPES, pela concessão de bolsa e pelo apoio financeiro a este projeto.

RESUMO

CORADIN, Francelli Klemba. Redes de Bragg para Aplicações em Sensoriamento e Telecomunicações. 2011. 132p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

Este trabalho apresenta a produção de redes de Bragg para a aplicação em sensoriamento e em telecomunicações. As redes para aplicação em sensoriamento foram gravadas utilizando incidência direta na máscara de fase bem como um interferômetro com máscara de fase, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná. As redes de Bragg foram gravadas em fibra ótica hidrogenada padrão de telecomunicações e fibra ótica fotossensível com o uso de um laser de Nd: YAG (*New Wave, Tempest-20*) operando em 266 nm e de um laser de excímero KrF (*Xantos XS-Coherent*) em 248 nm. Foram realizados experimentos visando à estabilização térmica dos dispositivos, nos quais as redes de Bragg foram submetidas a ciclos de aquecimento e resfriamento. Testes para determinar a máxima temperatura de operação das redes de Bragg produzidas também foram realizados. Sensores refratométricos foram produzidos por meio da corrosão controlada da casca da fibra na região da rede de Bragg. Duas redes de Bragg corroídas com comprimentos de onda de Bragg de operação próximos a 1300 nm e 1500 nm foram utilizadas na análise de misturas de etanol e água. Quatro configurações para o sensor refratométrico foram estudadas, operando tanto com dois comprimentos de onda quanto somente em um comprimento de onda, e em duas temperaturas distintas das amostras. As curvas de calibração foram determinadas para uma extensão entre 0,0 e 100,0 % v/v de etanol em água. O desempenho do sensor em cada configuração foi analisado pela comparação das sensibilidades, conformidades, repetitividades e incertezas combinadas. As redes para aplicação em telecomunicações foram gravadas em fibra ótica fotossensível com a técnica de incidência direta da luz do laser na máscara de fase, no Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro, em Portugal. Redes de Bragg com gorgeio foram gravadas com um laser de excímero pulsado operando em 248 nm (*BraggStar S-Industrial LN*) e com o uso de posicionadores motorizados com resolução máxima de 1 nm. O estudo da evolução espectral da rede de Bragg com a variação da energia de gravação permitiu o projeto de dispositivos com características pré-definidas.

PALAVRAS-CHAVES: Redes de Bragg. Sensores. Temperatura. Índice de Refração. Telecomunicações.

ABSTRACT

CORADIN, Francelli Klemba. *Fiber Bragg Gratings with Application in Sensing and Telecommunication*. 2011. 132p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

This work presents the production of fiber Bragg gratings with different profiles for application in sensing and in telecommunications. The gratings for sensing application were recorded using direct illumination of a phase mask as well as a phase mask interferometer, at the Federal University of Technology - Parana. The gratings were recorded in hydrogen loaded standard telecommunication fibers and photosensitive fibers using a Nd: YAG laser (Tempest-20, New Wave) at 266 nm and a KrF excimer laser at 248 nm (Xanto XS-Coherent). Experiments were performed in order to reach the thermal stabilization of the devices using a laboratory oven, where the gratings were submitted to thermal cycles which included both annealing and quenching. Tests to determine the maximum operating temperature of the produced fiber Bragg gratings were also performed. Refractometric sensors were produced by wet-etching of the fiber optic cladding using hydrofluoric acid and employed in the analysis of water-ethanol mixture. Two etched fiber Bragg gratings operating close to 1300 nm and 1500 nm were used in the experiment. Four configurations for the refractometric sensor were studied, in dual-wavelength and single-wavelength operation modes, and at two sample temperatures. Calibration curves were determined for the range between 0.0 and 100.0 % v/v of ethanol in water, and the sensor performance for each configuration was analyzed by comparing its sensitivity, conformity, repeatability and combined uncertainty. The gratings for the application in telecommunications were recorded in photosensitive fibers with direct illumination of phase mask at the Institute of Telecommunications of the Aveiro University, in Portugal. Chirped fiber Bragg gratings were produced with the use of an excimer laser operating at 248 nm (S-industrial BraggStar LN) and with the use of translation stages with maximum resolution of 1 nm. The study of Bragg grating spectral evolution with the writing energy allowed the project of devices with predefined characteristics.

KEY-WORDS: *Fiber Bragg Gratings. Sensors. Temperature. Refractive Index. Telecommunications.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Acoplamento entre os modos co e contra-propagante para uma rede de Bragg com período e modulação de índice de refração uniformes.	26
Figura 2 - Diagrama esquemático de uma rede com gorgeio (OTHONOS <i>and</i> KALLI, 1999).	30
Figura 3 - (a) Perfil de modulação do índice de refração com amplitude constante. (b) Perfil de modulação do índice de refração com amplitude variável.	31
Figura 4 - Diagrama esquemático de uma FBG amostrada (SUN <i>et al</i> , 2003).	33
Figura 5 - Esquema dos defeitos das fibras óticas dopadas com germânio (KASHYAP, 1999).	34
Figura 6 - Diagrama esquemático do dispositivo para produção de redes de Bragg pela técnica de gravação interna (HILL <i>and</i> MELTZ, 1997).	37
Figura 7 - Técnica interferométrica de gravação de FBG (KASHYAP, 1999).	38
Figura 8 - Técnica de gravação de redes de Bragg, utilizando máscara de fase.	39
Figura 9 - Gravação de redes de Bragg, utilizando a técnica interferométrica com máscara de fase.	40
Figura 10 - Diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação de FBGs.	41
Figura 11 - Tela do computador da aquisição de dados em <i>Labview</i>	44
Figura 12 - Diagrama esquemático do sistema de gravação de FBGs.	45
Figura 13 - Foto do forno de laboratório utilizado nos experimentos.	47
Figura 14 - Diagrama esquemático do experimento.	48
Figura 15 - Representação esquemática do programa de aquecimento do forno para os tratamentos térmicos com resfriamento rápido e lento.	49
Figura 16 - Representação esquemática do programa de aquecimento do forno.	50
Figura 17 - Representação esquemática do programa de aquecimento e resfriamento do forno.	51
Figura 18 - Evolução térmica do comprimento de onda das FBGs 1 e 2 em três ciclos de aquecimento e resfriamento.	53
Figura 19 - Evolução térmica da refletividade das FBGs 1 e 2 em três ciclos de aquecimento e resfriamento.	54
Figura 20 - Evolução térmica do comprimento de onda das FBGs 3 e 4 em três ciclos de aquecimento e resfriamento.	54
Figura 21 - Evolução térmica da refletividade das FBGs 3 e 4 em três ciclos de aquecimento e resfriamento.	55
Figura 22 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 5 em quatro tratamento térmico.	57
Figura 23 - Evolução do comprimento de onda da FBG 5 corrigido à $(20,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$	58
Figura 24 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 6 em quatro tratamento térmico.	58
Figura 25 - Evolução do comprimento de onda da FBG 6 corrigido à $20 ^\circ\text{C}$	59
Figura 26 - Evolução do comprimento de onda das FBGs 5 e 6 durante os dois ciclos de aquecimento e resfriamento.	60
Figura 27 - Evolução do espectro da FBG 7 no interior do forno durante o tratamento térmico.	61
Figura 28 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 7 mantida em forno de laboratório até apagar.	62
Figura 29 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8.	63
Figura 30 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9.	63

Figura 31 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 no 4° TT.	64
Figura 32 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 no 4° TT.	64
Figura 33 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 no 5° TT.	65
Figura 34 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 no 5° TT.	65
Figura 35 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 no ciclo de aquecimento e resfriamento.	66
Figura 36 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 no ciclo de aquecimento e resfriamento.	66
Figura 37 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 a $(700,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$	67
Figura 38 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 a $(700,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$	67
Figura 39 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 a $(800,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$	68
Figura 40 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 a $(800,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$	68
Figura 41 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 a $(800,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ por 30 horas.	69
Figura 42 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 no segundo ciclo de aquecimento e resfriamento até $(700,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$	69
Figura 43 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 no segundo ciclo de aquecimento e resfriamento até $(700,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$	70
Figura 44 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 a $(900,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$	71
Figura 45 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 a $(900,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$	71
Figura 46 - Diagrama esquemático do sistema de gravação de FBGs.	72
Figura 47 - Foto detalhada do sistema de gravação de FBGs.	73
Figura 48 - Interface de visualização da aproximação máscara de fase/fibra.	74
Figura 49 - Diagrama esquemático da incidência do UV na fibra ótica.	76
Figura 50 - Diagrama esquemático de uma FBG uniforme.	77
Figura 51 - Diagrama esquemático da gravação de redes uniformes com varredura do feixe.	77
Figura 52 - Definições da FBG no <i>software</i> comercial <i>Optiwave IFO</i>	79
Figura 53 - Diagrama esquemático da técnica de gravação por dupla exposição.	81
Figura 54 - Diagrama esquemático da técnica de gravação com deslocamento do feixe com velocidade variável.	82
Figura 55 - Espectros de duas FBGs uniformes.	83
Figura 56 - Espectros de três FBGs uniformes.	84
Figura 57 - Variação do comprimento de onda com relação à diferença de fase entre as subredes.	85
Figura 58 - Espectro de refletividade e atraso de grupo de uma FBG com gorgeio linear, gravação e simulação.	86
Figura 59 - Espectros de redes com gorgeio e atrasos de grupo simulados.	87
Figura 60 - Espectros de refletividade de FBGs com gorgeio simuladas com diferentes tamanhos de S	88

Figura 61 - Variação do comprimento de onda devido à fase introduzida entre cada subrede.....	88
Figura 62 - Espectros de FBGs com gorgeio simuladas com subredes do tamanho de 80, 150 e 250 μm	91
Figura 63 - Refletividade e atraso de grupo da rede com gorgeio resultante de flutuações aleatórias na fase entre as subredes.	91
Figura 64 - Refletividade e atraso de grupo da FBG com gorgeio resultante da gravação com máscara de fase com gorgeio.....	92
Figura 65 - Dados experimentais do crescimento de uma FBG uniforme em função da energia incidente.....	93
Figura 66 - Energia incidente na fibra versus Δn_{eff}	94
Figura 67 - Energia necessária para uma função linear do incremento do índice de refração.	95
Figura 68 - Relação entre velocidade de deslocamento do feixe UV e a variação do índice de refração.....	95
Figura 69 - FBG com gorgeio gravada pelo método de dupla exposição (linha vermelha)....	96
Figura 70 - Relação entre energia incidente na rede e a velocidade de translação do feixe....	97
Figura 71 - FBGs com gorgeio gravadas com única exposição na máscara de fase uniforme.	97
Figura 72 - Redes amostradas gravadas com pelo método da máscara de fase.....	98
Figura 73 - Redes uniformes apodizadas, gravação e simulação.	100
Figura 74 - Redes com gorgeio (não apodizada e apodizadas: perfil gaussiano e trapezoidal), gravação e simulação.....	100
Figura 75 - Aparato experimental utilizado inicialmente na corrosão das FBGs.....	102
Figura 76 - Aparato experimental utilizado na corrosão das FBGs.	102
Figura 77 - Representação esquemática da montagem experimental usada para caracterizar as FBGs corroídas.....	103
Figura 78 - Variações do comprimento de onda durante a corrosão.	105
Figura 79 - Espectros de reflexão antes (linha sólida) e depois (linha pontilhada) da corrosão, para: (a) FBG 10 e (b) FBG 11.....	106
Figura 80 - Variações do comprimento de onda em função do índice de refração das FBGs 10 e 11. O detalhe mostra os índices de refração associados com a mistura água-etanol.....	107
Figura 81 - Índices de refração medidos com um refratômetro Abbe como uma função da concentração de etanol nas misturas etanol-água a 20,0 °C e 3,0 °C.....	107
Figura 82 - Variações do comprimento de onda das FBGs 10 e 11 corroídas em função da concentração de etanol nas misturas de etanol-água a 20,0 °C e 3,0 °C (pontos experimentais e ajuste polinomial).....	108
Figura 83 - Espectros de reflexão antes, depois da primeira e depois da segunda corrosão, para: (a) FBG 10 e (b) FBG 11.....	114
Figura 84 - Variações do comprimento de onda em função do índice de refração das FBGs 10 e 11 mais corroídas (segunda caracterização).....	115
Figura 85 - Índices de refração medidos com um refratômetro Abbe como uma função da concentração de etanol nas misturas água-etanol a 20,0 °C e 3,0 °C (segunda caracterização).....	116
Figura 86 - Variações do comprimento de onda das FBGs 10 e 11 mais corroídas em função da concentração de etanol nas misturas de etanol-água a 20,0 °C e 3,0 °C (pontos experimentais e ajuste polinomial).....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características e parâmetros das FBGs utilizadas nos experimentos.....	46
Tabela 2 - Ciclos de aquecimento realizados nas FBGs 5 e 6.....	56
Tabela 3 - Evolução do comprimento de onda com a temperatura.	60
Tabela 4 - Evolução térmica do comprimento de onda para as FBGs 8 e 9.....	66
Tabela 5 - Evolução térmica do comprimento de onda para as FBGs 8 e 9 no segundo ciclo de aquecimento.	70
Tabela 6 - Dados para movimentação do posicionador principal na gravação de uma FBG uniforme.	75
Tabela 7 - Dados para movimentação do posicionador principal na gravação de uma FBG com gorgeio.	78
Tabela 8 - Características metrológicas das FBGs 10 e 11 a 3,0 °C para cada faixa (A, B ou C).	110
Tabela 9 - Características metrológicas das FBGs 10 e 11 a 20,0 °C para cada faixa (A, B ou C).	110
Tabela 10 - Incertezas combinadas para as quatro configurações.....	111
Tabela 11 - Raízes polinomiais calculadas com (53) para as duas FBGs a 20,0 °C.....	112
Tabela 12 - Raízes polinomiais calculadas com (53) para ambas FBGs a 3,0 °C.....	113
Tabela 13 - Raízes polinomiais calculadas com (53) para cada FBG nas duas temperaturas.....	113
Tabela 14 - Características metrológicas das FBGs 10+ e 11+ a 3,0 °C para cada faixa (A, B ou C).....	117
Tabela 15 - Características metrológicas das FBGs 10 e 11 a 20,0 °C para cada faixa (A, B ou C).	117
Tabela 16 - Incertezas combinadas para as quatro configurações após a segunda corrosão.	118
Tabela 17 - Raízes polinomiais calculadas com (54) para as duas FBGs mais corroídas a 20,0 °C.	118
Tabela 18 - Raízes polinomiais calculadas com (54) para ambas FBGs a 3,0 °C.....	119
Tabela 19 - Raízes polinomiais calculadas com (54) para cada FBG mais corroída nas duas temperaturas.	120

LISTA DE SIGLAS

CFBG	Rede de Bragg com Gorgeio (<i>Chirped Fiber Bragg Gratings</i>)
FBG	Rede de Bragg (<i>Fiber Bragg Gratings</i>)
Ge	Germânio
GeO	Óxido de germânio
GeOH	Hidróxido de germânio
GDR	Ondulações do atraso de grupo (<i>group delay ripple</i>)
GODC	Centros de germânio com deficiência do oxigênio (<i>Germanium Oxygen-Deficient Centers</i>)
H	Hidrogênio
HE	Modo híbrido de polarização
HF	Ácido fluorídrico
IT	Instituto de Telecomunicações
LED	Diodo emissor de Luz (<i>Ligth Emission Diode</i>)
LP	Linearmente Polarizado
LPG	Rede de Período Longo (<i>Long Period Grating</i>)
OH	Hidroxila
ONA	Analisador de Redes Óticas (<i>Optical Network Analyzer</i>)
OSA	Analisador de Espectros Óticos (<i>Optical Spectrum Analyzer</i>)
PCF	Fibras de cristal fotônico (<i>Photonic Crystal Fibres</i>)
POF	Fibras óticas plásticas (<i>plastic optical fibers</i>)
RIS	Sensibilidade ao índice de refração (<i>Refractive Index Sensitivity</i>)
SFBG	Redes de Bragg Amostradas (<i>Sampled Fiber Bragg Gratings</i>)
SMF	Fibra monomodo (<i>Single Mode Fiber</i>)
Si	Silício
SiOH	Hidróxido de silício
TT	Tratamento térmico
UA	Universidade de Aveiro
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UV	Ultravioleta
WDM	Multiplexação por divisão de comprimento de onda (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO	14
1.2	ESTADO DA ARTE	15
1.3	JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS	19
1.4	ESTRUTURA DA TESE	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	FIBRAS ÓTICAS	21
2.2	PROPAGAÇÃO DA LUZ EM FIBRAS ÓTICAS	22
2.3	REDES EM FIBRAS ÓTICAS	25
2.3.1	Redes de Bragg Uniformes	25
2.3.2	Sensibilidade das Redes de Bragg à Deformação e à Temperatura	28
2.3.3	Redes de Bragg Corroídas e Sensibilidade ao Índice de Refração	29
2.3.4	Redes de Bragg com Gorgeio	30
2.3.5	Redes de Bragg Amostradas	32
2.4	A FOTOSSENSIBILIDADE DAS FIBRAS ÓTICAS	34
2.4.1	Hidrogenação	35
2.4.2	Varredura à Chama	36
2.4.3	Co-Dopagem com Boro	37
2.5	TÉCNICAS DE GRAVAÇÃO DAS REDES DE BRAGG	37
2.5.1	Gravação Interna	37
2.5.2	Técnica Interferométrica	38
2.5.2.1	Técnica com Máscara de Fase	39
2.5.2.2	Técnica Interferométrica com Máscara de Fase	40
3	METODOLOGIA E RESULTADOS	41
3.1	GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG NA UTFPR	41
3.2	ESTABILIZAÇÃO TÉRMICA DAS REDES DE BRAGG	46
3.2.1	Procedimento para Tratamento Térmico em Temperaturas Inferiores a 400,0 °C com Patamares de Curta Duração	47
3.2.2	Procedimento para Tratamento Térmico em Temperaturas Inferiores a 400,0 °C com Patamares de Longa Duração	49
3.2.3	Procedimento para Tratamento Térmico em Temperaturas Superiores a 400,0 °C com Patamares de Curta Duração	50
3.2.4	Procedimento para Tratamento Térmico em Temperaturas Superiores a 400,0 °C com Patamares de Longa Duração	51
3.2.5	Resultados dos Tratamentos Térmicos em Temperaturas Inferiores a 400,0 °C com Patamares de Curta Duração	52
3.2.6	Resultados dos Tratamentos Térmicos em Temperaturas Inferiores a 400,0 °C com Patamares de Longa Duração	56
3.2.7	Resultados dos Tratamentos Térmicos em Temperaturas Superiores a 400,0 °C com Patamares de Curta Duração	61
3.2.8	Resultados dos Tratamentos Térmicos em Temperaturas Superiores a 400,0 °C com Patamares de Longa Duração	62
3.3	GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG NO IT-UA	72
3.3.1	Método de Gravação de FBGs Uniformes por Colagem das Franjas de Interferência	74
3.3.2	Método de Gravação de FBGs Uniformes por Deslocamento do Feixe UV	77
3.3.3	Método de Gravação de FBGs com Gorgeio por Colagem das Franjas de Interferência	78
3.3.4	Método de Gravação de FBGs com Gorgeio por Deslocamento do Feixe UV	80

3.3.5	Método de Gravação de FBGs Amostradas	82
3.3.6	FBGs Uniformes Gravadas por Deslocamento do Feixe UV	83
3.3.7	FBGs Uniformes Gravadas por Colagem das Franjas de Interferência.....	84
3.3.8	FBGs com Gorgeio Gravadas por Colagem das Franjas de Interferência.....	85
3.3.9	FBGs com Gorgeio Gravadas por Deslocamento do Feixe UV com Velocidade Constante	92
3.3.10	FBGs com Gorgeio Gravadas por Dupla Exposição: Máscara de Fase Uniforme e Posterior Deslocamento do Feixe UV em Velocidade Variável	93
3.3.11	FBGs com Gorgeio Gravadas com uma Única Exposição: Deslocamento do Feixe UV em Velocidade Variável sobre a Máscara de Fase Uniforme	96
3.3.12	Gravação de Redes Amostradas	98
3.3.13	Redes de Bragg Apodizadas	99
3.4	FBGS CORROÍDAS APLICADAS COMO SENSOR DE CONCENTRAÇÃO	101
3.4.1	Método de Produção dos Dispositivos	101
3.4.2	Método de Calibração Preliminar das FBGs Corroídas	102
3.4.3	Método de Caracterização das FBGs Corroídas quanto a Misturas de Etanol em Água	104
3.4.4	Características das FBGs Corroídas Produzidas	104
3.4.5	Resultados da Calibração Preliminar dos Dispositivos	106
3.4.6	Resultados da Aplicação das FBGs Corroídas na Análise de Misturas Etanol-Água	107
3.4.7	Validação do Método Proposto para a Determinação da Concentração de Etanol ...	111
3.4.8	FBGs Submetidas a uma Segunda Corrosão	114
3.4.9	Resultados da Segunda Calibração com Mistura Glicerina em Água.....	115
3.4.10	Resultados da Aplicação das FBGs Submetidas a uma Segunda Corrosão na Análise de Misturas Etanol-Água	115
3.4.11	Segunda Validação do Método Proposto de Determinação da Concentração de Etanol	118
4	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	121
4.1	ESTABILIDADE TÉRMICA DAS REDES DE BRAGG	121
4.2	GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG NO IT-UA.....	122
4.3	FBGS CORROÍDAS APLICADAS COMO SENSOR DE CONCENTRAÇÃO	123
4.4	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	124
	REFERÊNCIAS	125
	ANEXO - Publicações resultantes desta tese	132

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

As fibras óticas possuem inúmeras aplicações tanto no setor de telecomunicações, quanto na área de sensoriamento, devido as suas características únicas como a imunidade a campos eletromagnéticos, potencial para transmissão de sinais a longas distâncias, flexibilidade, tamanho reduzido, capacidade de multiplexagem, codificação inerente em comprimento de onda (KERSEY *et al*, 1997).

Dos diferentes dispositivos que podem ser produzidos em fibra ótica, existe um de particular interesse e que é o foco principal deste trabalho, a rede de Bragg (*Fiber Bragg grating* - FBG). Estes dispositivos, quando aplicados em sensoriamento, são capazes de medir variações de temperatura, pressão, deformação, etc. O modo de operação está relacionado à influência que um desses parâmetros físicos provoca na alteração da estrutura da fibra ótica afetando direta ou indiretamente a propagação da luz. As reduzidas perdas de transmissão de sinal em fibras em longas distâncias tornam viável a utilização de FBGs para monitorar grandes estruturas. Têm ainda a capacidade de poderem ser integradas em ambientes com ruído eletromagnético ou potencialmente perigosos, tornando-as uma solução competitiva na monitoração de grandes máquinas elétricas ou na exploração petrolífera.

As FBGs podem ainda atuar como sensores refratométricos, desde que o diâmetro da casca da fibra ótica seja reduzido a ponto de o campo evanescente interagir com o índice de refração que envolve o sensor, alterando o índice efetivo do modo de núcleo e, conseqüentemente, o comprimento de onda (SCHROEDER *et al*, 2001).

Na área de telecomunicações as FBGs ganharam particular atenção devido à sua versatilidade na integração com outros componentes óticos, e às suas propriedades únicas de filtragem. Desempenham várias funções nas mais diversas aplicações ligadas a esta área, sendo muito utilizadas em sistemas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) e como elementos óticos para compensação de dispersão. A rede WDM utiliza a tecnologia de multiplexação ótica para compartilhar a mesma fibra com diversos sinais óticos de diferentes comprimentos de onda e uma FBG poderia ser utilizada neste sistema na seleção de canais por multiplexadores/demultiplexadores óticos, já que diminuiria o número de componentes óticos e, conseqüentemente, as perdas de potência causadas pela inserção de componentes e conexões.

São vários os trabalhos que reportam a aplicação das FBGs como compensadores de dispersão (HILL, *et al*, 1994; RIANI *et al*, 1999; CHEN *et al*, 2004; DAI *et al*, 2006). A dispersão cromática manifesta-se por meio de um alargamento temporal dos impulsos ao longo da sua propagação na fibra ótica. Este fenômeno ocorre originado pela incapacidade de emissão de impulsos óticos, e está associado ao fato de a fibra ótica ser um elemento dispersivo. Como a velocidade de grupo dos impulsos é função do comprimento de onda, as componentes espectrais de um dado impulso apresentam um atraso entre si, após a propagação ao longo da fibra, originando um alargamento no domínio temporal. Esse alargamento pode originar a sobreposição de dois impulsos não adjacentes, tornando o sinal indistinguível após algum tempo de propagação (ANDRÉ *et al*, 2006). A compensação desta distorção é conseguida fazendo passar o sinal por um dispositivo com dispersão de igual valor e sinal contrário à acumulada ao longo da transmissão na fibra ótica. Essa função pode ser desempenhada por uma única rede de Bragg com gorgeio.

Contudo, para que as redes de Bragg possam ser empregadas adequadamente como sensores ou na área de telecomunicações, é de fundamental importância que o espectro da FBG seja previamente estabilizado. Esta estabilidade espectral pode ser alcançada por meio de técnicas de aquecimento controlado em altas temperaturas que promovam a estabilização dos defeitos responsáveis pela modulação de índice de refração responsável pela rede de Bragg. A eficiência do processo de estabilização espectral empregado é de suma importância para a obtenção das redes de Bragg estabilizadas.

1.2 ESTADO DA ARTE

Com a significativa descoberta da fotossensibilidade em fibras óticas no *Canadian Communication Research Center* em 1978 por Hill e seus colaboradores, foi possível demonstrar a gravação interna de estruturas permanentes em fibra, chamadas inicialmente de redes de Hill e posteriormente de redes de Bragg (HILL *et al*, 1978). Mas o interesse nestes dispositivos passou a crescer a partir de 1989, quando a equipe de Meltz propôs a gravação externa de redes de Bragg (MELTZ *et al*, 1989), técnica esta que permite a gravação de redes em diferentes comprimentos de onda de operação. Desde então, diversos trabalhos têm sido publicados baseados em redes de Bragg e suas aplicações (KERSEY *et al*, 1997; OTHONOS, 1997; LEE, 2003; TAHIR *et al*, 2007).

As redes de Bragg são elementos intrínsecos, que podem ser gravados em fibras de sílica pela exposição a luz ultravioleta (UV), e que são caracterizados pela mudança periódica do índice de refração do núcleo da fibra ótica ao longo do seu comprimento. Foram propostas diferentes técnicas para aumentar a fotossensibilidade das fibras óticas, e assim permitir a fabricação de redes de Bragg eficientes em diferentes tipos de fibra (BILODEAU *et al*, 1990). A hidrogenação é uma técnica amplamente utilizada para este fim e consiste basicamente em manter a fibra ótica em uma atmosfera de hidrogênio por um determinado período de tempo (LEMAIRE *et al*, 1993).

Na grande maioria das aplicações de FBGs, a rede é codificada em comprimento de onda. No entanto, podem ocorrer mudanças no comprimento de onda central do pico de reflexão das FBGs após a gravação da rede. No caso das redes produzidas em fibras óticas hidrogenadas, as mudanças espectrais são decorrentes principalmente da difusão do hidrogênio molecular remanescente na estrutura da sílica após o processo de gravação. As mudanças no comprimento de onda de Bragg resultantes da difusão do hidrogênio podem exceder ou se comparar com as separações entre canais empregados em sistemas de telecomunicações, afetando o desempenho do sistema. Quando a FBG é utilizada em sensoriamento, tais mudanças espectrais podem comprometer a operação do sensor fornecendo uma medida errônea.

Estudos mostram que tratamentos térmicos adequados podem ser realizados para alcançar a estabilização prévia das FBGs, garantindo desta forma a aplicação eficiente destes dispositivos em diferentes sistemas. O experimento de Masuda e sua equipe mostra o comportamento de uma FBG mantida por 80 horas em um forno a temperatura de 140 °C (MASUDA *et al*, 2004). O comprimento de onda central da rede desloca-se em direção a um valor máximo em aproximadamente 15 minutos e retorna para um valor estável depois de 6 horas de aquecimento. Já o trabalho de Kannan (KANNAN *et al*, 1997), mostra um estudo da estabilidade térmica e uma comparação entre redes fortes (refletividade $\approx 100\%$) e fracas (refletividade $\approx 20\%$). As redes foram colocadas a 200 °C e a rede forte apresentou estabilidade térmica antes da rede fraca. Esta prévia estabilização pode estar relacionado com as altas energias do feixe UV durante a gravação onde o núcleo da fibra é aquecido, contribuindo para a estabilidade da rede forte.

Em 1993, um estudo a respeito da histerese térmica foi realizado por Douay e seus colaboradores (DOUAY *et al*, 1993). Em um mesmo pedaço de fibra foram gravadas três FBGs. Duas redes foram gravadas em uma das extremidades da fibra e colocadas no interior de um forno, e os seus comprimentos de onda foram acompanhados como função da

temperatura. Quando atingiam a temperatura máxima requerida para o experimento, as redes eram retiradas e observava-se um deslocamento para menores comprimentos de onda. A terceira FBG, distanciada 1 m das demais, permaneceu fora do forno como referência. As observações experimentais mostraram que a histerese térmica no comprimento de onda de Bragg é devido a mudanças no índice de refração fotoinduzido via destruição de centros de defeitos.

Vários grupos de pesquisa procuraram a estabilização de redes em fibra em temperaturas superiores a 500 °C. Zhang e Kahrizi desenvolveram um sensor de temperatura baseado em redes de Bragg em fibra hidrogenada dopada com germânio (ZHANG *and* KAHIRIZI, 2007), onde a modulação do índice de refração é resultante da formação de moléculas de água quando a fibra é exposta a alta temperatura. Os resultados deste experimento mostram que a estabilidade deste dispositivo aumenta em altas temperaturas devido à forte energia de ligação da hidroxila e a baixa difusão das moléculas de água, podendo alcançar temperaturas de até 1100 °C. A refletividade desta FBG depende diretamente da concentração de Si-OH.

Bandyopadhyay e colaboradores utilizaram fibra altamente dopada e hidrogenada em um experimento térmico, onde a FBG foi colocada em um micro forno e a temperatura foi elevada da ambiente até 600 °C, e então, elevada de 50 °C até 1100 °C (BANDYOPADHYAY *et al*, 2008). Em 900 °C foi observado a extinção da rede e a geração de uma nova rede em maiores comprimentos de onda na rede gravada em fibra dopada. Este deslocamento pode estar relacionado à tensão aplicada à fibra durante o experimento. O modelo de cristalização é proposto para as redes regeneradas, pois a sílica pode cristalizar a altas temperaturas e pressões. Não foi observada a regeneração na rede gravada em fibra hidrogenada.

Redes regeneradas também foram observadas em fibra fotossensível altamente dopada com germânio e sem a presença de hidrogênio (LINDNER *et al*, 2009). Neste trabalho, após a gravação, a FBG foi recozida a 700 °C por 220 minutos. Nos primeiros minutos, a refletividade da rede decaiu intensamente e aumentou novamente, alcançando o máximo em 50 minutos. Uma explicação do efeito de regeneração é a cristalização do material dopante causado pela radiação UV juntamente com o aquecimento térmico. O segundo crescimento induz mudanças no índice de refração do núcleo da fibra, mais estáveis à temperatura que as redes normais do tipo I não regeneradas.

Para que as FBGs com modulação de índice uniforme ao longo do seu comprimento, possam ser usadas como sensor de índice de refração é necessário a redução do diâmetro da

casca da fibra ótica. Assim, os índices efetivos dos modos de propagação passam a ser influenciados pelo índice de refração do meio externo.

Pereira e colaboradores desenvolveram um sistema para medida simultânea de temperatura e salinidade baseado em FBG corroída (PEREIRA *et al*, 2004). O estudo da influência do diâmetro da casca no aumento da sensibilidade de FBG corroída devido à mudanças do índice de refração do meio circunvizinho foi realizado pela equipe de Chryssis (CHRYSSIS *et al*, 2005). Kamikawachi e sua equipe (KAMIKAWACHI *et al*, 2007) demonstraram a influência do meio circunvizinho com diferentes índices de refração na sensibilidade térmica de uma FBG corroída.

Um sistema sensor a fibra ótica para medir baixas concentrações de etanol (até 50 %), baseado em FBG corroída foi demonstrado por Raikar e colaboradores (RAIKAR *et al*, 2007). Este sensor pode ser utilizado em indústria alimentícia, farmacêutica, plástica, devido à baixa concentração de etanol presente nos produtos produzidos por estas indústrias. Medidas da concentração de etanol misturados em água em diferentes proporções, foram realizadas por Possetti e sua equipe, e o sensor utilizado era baseado em redes de período longo (LPG - *Long Period Grating*) (POSSETTI *et al*, 2009). Neste trabalho é apresentada uma dependência não linear entre o índice de refração e a concentração de etanol, principalmente na região entre 60,0 e 100,0 % v/v. Esta região de ambiguidade aparece devido à entropia da mistura etanol-água que aumenta diferentemente do esperado para uma solução de moléculas misturadas aleatoriamente, este efeito pode ser atribuído a associações hidrofóbicas do soluto na solução aquosa e à formação de *clusters* nas ligações de hidrogênio (NISHI *et al*, 1995). Para resolver este problema da ambiguidade, a adição de água pura em proporções controladas na amostra sob análise foi proposto (POSSETTI *et al*, 2009).

As redes de Bragg com gorgeio encontram grande aplicabilidade nas telecomunicações como dispositivos compensadores de dispersão, tal como foi proposto originalmente por Ouellette em 1987 (OUELLETTE, 1987), devido ao fato de diferentes comprimentos de onda serem refletidos em posições diferentes na fibra ótica originando um atraso de grupo dependente do comprimento de onda.

Em 1994, Willians e sua equipe (WILLIAMS *et al*, 1994) mostraram um modelo numérico que obteve boa concordância com uma rede de Bragg com gorgeio linear usada para compensar o alargamento de um pulso. Já no trabalho do Loh (LOH *et al*, 1996), um par de redes de Bragg com gorgeio foi utilizado para compensar a dispersão em 537 km de fibra padrão de telecomunicação. Paulo André e sua equipe de pesquisa fizeram uma análise dos efeitos da temperatura na dispersão cromática das fibras óticas e da consequente degradação

na qualidade da informação transportada (ANDRÉ *et al*, 2006). Com a evolução das pesquisas já é possível compensar a dispersão utilizando uma rede de Bragg com gorgeio em uma distância de transmissão de 3000 km (TAN *et al*, 2009).

Redes de Bragg amostradas ou superestruturadas possuem a vantagem da operação de vários canais em um dispositivo compacto, pois seu espectro é formado por vários picos, também chamados de canais, assim sendo, este dispositivo pode ser utilizado para compensar a dispersão de vários canais simultaneamente. Ouellette e colaboradores demonstraram pioneiramente a viabilidade de uma rede utilizada para compensar a dispersão de dois diferentes comprimentos de onda (OUELLETTE *et al*, 1995). A partir de então, várias configurações de dispositivos foram utilizadas para tal aplicação, como por exemplo, o trabalho de Pan e sua equipe (PAN *et al*, 2004) que demonstraram um sistema para compensar a dispersão de quatro canais utilizando redes de Bragg amostradas com gorgeio.

Uma análise das redes de Bragg amostradas foi realizada alterando os parâmetro de gorgeio e foi mostrada como a resposta das redes amostradas que tem múltiplos parâmetros de gorgeios podem ser explicados em termos dos casos com um único parâmetro de gorgeio (WANG *et al*, 2002). Em 2003, o grupo de Sun (SUN *et al*, 2003) demonstrou um novo método de análise das redes de Bragg amostradas, neste trabalho eles apresentam uma rede com 10 canais com 0,8 nm de espaçamento entre canais vizinhos.

1.3 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

No contexto apresentado, este trabalho descreve a produção de redes de Bragg em fibra ótica, utilizando tanto o laser Nd: YAG operando em 266 nm, como o laser de KrF pulsado que emite em 248 nm. Um dos objetivos foi a estabilização das redes de Bragg para futuras aplicações em sensoriamento e em telecomunicações; para tanto, tratamentos térmicos com resfriamento lento e com resfriamento rápido foram realizados. As redes gravadas em diferentes fibras foram submetidas a temperaturas mais elevadas para investigar os diferentes comportamentos relacionados tanto ao tipo de fibra quanto à técnica de gravação. Numa etapa seguinte do trabalho foi estudada a aplicação da FBG como sensor de concentração, para o específico objetivo da identificação de concentrações de etanol em água. Para alcançar este objetivo, as redes de Bragg passaram por um processo de corrosão da casca. As FBGs corroídas, quando utilizadas na identificação da concentração de etanol, possuem algumas vantagens em comparação com outras técnicas, como a necessidade de pequenos volumes de

amostra para análise e o fornecimento de uma resposta imediata. Além disso, o uso de FBG corroída não requer a adição controlada de outras substâncias na amostra para que a análise possa ser realizada a fim do problema de ambiguidade no índice de refração seja solucionado. Foram também produzidas redes de Bragg com gorgeio por meio de diversas técnicas de gravação, para possíveis aplicações como compensadores de dispersão. As redes de Bragg amostradas foram produzidas com o intuito de compensar a dispersão de vários canais simultaneamente, utilizando um único dispositivo.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho inicia com uma breve introdução onde é apresentado um levantamento histórico sobre o desenvolvimento e a aplicação de dispositivos em fibra ótica. Inclui uma revisão bibliográfica dos métodos de gravação de redes de Bragg e algumas aplicações em sistemas de comunicações óticas e em sensoriamento, apresentadas na seção do estado da arte. Este primeiro capítulo ainda abrange as justificativas e objetivos deste trabalho.

A fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento e compreensão do trabalho é apresentada no capítulo 2.

Os procedimentos experimentais para o desenvolvimento deste trabalho estão descritos no capítulo 3, juntamente com os resultados obtidos em cada etapa. E finalmente, no capítulo 4 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FIBRAS ÓTICAS

As primeiras fibras foram desenvolvidas na década de 1960 e eram constituídas de material plástico, contendo núcleo de polimetil, enquanto que a casca era formada por um material de menor índice de refração sendo usados para tanto polímeros contendo fluorenos (HECHT, 1993).

Por volta de 1970, surgiram as fibras feitas de sílica, com núcleo constituído de material dielétrico com dimensões características de algumas dezenas de micrometros ou menos, no caso de fibras monomodo (SENIOR, 1992). Estas fibras de sílica têm sido amplamente utilizadas em comunicações desde então, e possuem o núcleo de sílica envolvido por uma casca com índice de refração ligeiramente menor, de forma a garantir que a luz lançada no seu núcleo se propague ao longo do comprimento da fibra sem sofrer perdas significativas. O índice de refração do núcleo pode ser alterado através de dopagem, sendo comumente utilizados germânio (POUMELLEC *et al*, 1996) ou boro (WILLIANS *et al*, 1993) como dopantes. A dopagem altera algumas propriedades do vidro, como a viscosidade e o ponto de fusão, mudando conseqüentemente o índice de refração do núcleo.

A dopagem também pode ser realizada com íons de terras raras (MEARS *et al*, 1985). Quando íons de érbio são introduzidos na fibra de sílica, a excitação laser com um comprimento de onda adequado, gera a emissão do érbio em torno de 1,5 μm (MEARS *et al*, 1987) com largura de banda de até 44 nm. Fibras dopadas com érbio são de especial interesse no campo das telecomunicações óticas para a construção de lasers a fibra, e de amplificadores óticos (OLSHANSKY, 1988).

Fibras com geometrias diferentes e alto desempenho polarimétrico, baseadas principalmente nas fibras mantenedoras de polarização de alta birrefringência (HiBi), propiciaram o desenvolvimento de novos sensores e sistemas de comunicações coerentes (SUDO *et al*, 1997; URBANCZYK *et al*, 2001; LAWRENCE *et al*, 1999).

As fibras plásticas conhecidas como POFs (*plastic optical fibers*) são compostas de polímeros incluindo polimetilmetacrilato, poliestireno, policarbonatos e material perfluorinado para diminuir o mecanismo de absorção e perdas na transmissão do sinal. Normalmente, essas fibras têm o diâmetro do núcleo de 1 mm e da casca de 20 μm e são facilmente clivadas a frio ou a quente (LAW and HARVEY, 2006). As baixas temperaturas

necessárias para fabricação das fibras de polímeros favorecem a incorporação de dopantes orgânicos difíceis de serem incluídos na composição de fibras de sílica, cuja temperatura de manufatura situa-se entre 1800 °C a 2100 °C. O estudo da aplicabilidade das fibras plásticas como sensores foi bastante desenvolvido a partir de 1995, com princípios e técnicas semelhantes aos já adotados nas fibras de sílica (STEIGER, 1998; SCHMITT *et al*, 1996).

As fibras poliméricas microestruturadas surgiram segundo o conceito aplicado na construção de fibras microestruturadas em sílica, chamadas *Photonic Crystal Fibres* (PCF) (BIRKS *et al*, 1997). O guiamento de luz nas fibras óticas poliméricas microestruturadas é fundamentalmente diferente das POFs convencionais, pois a diferença do índice de refração surge em função do padrão microscópico dos espaços de ar. A luz é guiada, principalmente através dos espaços de ar e não na porção sólida da fibra onde ocorre maior absorção.

Em suma, a fibra ótica, independentemente da sua geometria ou constituição, vem a ser um meio físico de transmissão cada vez mais utilizado em redes de telecomunicações e em sensoriamento.

Neste trabalho, foram utilizadas fibras óticas monomodo padrão de telecomunicações e fotossensíveis e, portanto, os itens seguintes se referem às propriedades e formas de propagação da luz nestes tipos de fibra.

2.2 PROPAGAÇÃO DA LUZ EM FIBRAS ÓTICAS

A fibra ótica é um guia de onda que confina a luz propagando-a em determinados modos. Os modos representam as distribuições de campos eletromagnéticos ditadas pelas condições de contorno do guia quando se resolve a equação de onda.

A equação de onda para uma única variável espacial, representada aqui por Ψ , é escrita na forma abaixo (SENIOR, 1992):

$$\nabla^2 \Psi = \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (1)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo, t é o tempo e n é o índice de refração do material.

Como as fibras óticas possuem simetria radial, as soluções são expressas em coordenadas cilíndricas (r, φ, z), para uma onda propagando-se ao longo do eixo z (SENIOR, 1992). A equação em coordenadas cilíndricas e independente do tempo pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial \varphi^2} + \kappa^2 \Psi_z = 0 \quad (2)$$

onde $\kappa^2 = k^2 - \beta^2$, k é o número de onda, β é a constante de propagação, r é a coordenada radial e φ a coordenada angular.

Usando a técnica de separação de variáveis, podem-se obter soluções para as componentes angular e radial da Equação (2). Devido à simetria da fibra é possível escolher uma função circular para a componente angular do campo e substituir na Equação (2) (SENIOR, 1992):

$$\frac{d^2 \Psi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d \Psi}{dr} + \left(\kappa^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) \Psi = 0 \quad (3)$$

A Equação (3) tem a forma da equação de Bessel, onde Ψ representa o campo elétrico ou magnético, l é a ordem do modo radial da função de Bessel, que possui soluções conhecidas para dadas condições de contorno:

1. O campo deve ser finito no núcleo da fibra;
2. O campo na casca da fibra deve decair exponencialmente para grandes distâncias do centro da fibra.

A condição 1 tem como solução, no núcleo da fibra, a função de Bessel $J_\nu(\kappa r)$, portanto:

$$\Psi_z = A J_\nu(\kappa r) e^{j\nu\varphi} \quad (4)$$

O comportamento do campo na casca, quando $\kappa = j\gamma$, é descrito pelas funções de Hankel modificadas de primeiro tipo:

$$\Psi_z = B H_\nu^1(j\gamma r) e^{j\nu\varphi} \quad (5)$$

As constantes A e B são determinadas através das condições de contorno nas interfaces núcleo/casca e casca/ar, que em geral se assume como uma casca infinita. As Equações (4) e (5) descrevem os campos que se propagam no núcleo e na casca.

Nas fibras óticas, a diferença de índice de refração entre núcleo e casca é pequena ($\Delta n \ll 1$), assim as combinações possíveis dos modos podem ser simplificadas. O modo linearmente polarizado (LP) corresponde à superposição de modos de núcleo caracterizados por constantes de propagação próximas.

A penetração dos modos de propagação na casca é determinada pela constante γ . Para grandes valores de γ o modo está fortemente confinado no núcleo. À medida que o valor de γ diminui, o modo começa a penetrar na casca. Quando $\gamma = 0$, o modo deixa de ser guiado, nesta situação o modo é chamado de modo irradiado. A frequência na qual isto acontece é chamada de frequência de corte, ω_c :

$$\omega_c = \frac{\kappa_c}{\sqrt{\mu_0(\epsilon_1 - \epsilon_2)}} \quad (6)$$

onde ϵ_1 e ϵ_2 são as permissividades elétricas do núcleo e da casca, respectivamente.

Quando $\kappa_c = 0$ (κ_c é o parâmetro característico de cada modo), a frequência de corte é nula e apenas um modo pode existir para uma faixa estabelecida de comprimentos de onda. O modo fundamental também é chamado modo híbrido HE_{11} ou LP_{01} e esta é a condição para que uma fibra seja monomodo.

Um parâmetro que tem um papel importante, determinando a condição de corte, é definido como (SENIOR, 1992):

$$V = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) a n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (7)$$

É chamado de frequência normalizada ou simplesmente parâmetro V . Combina informações sobre o raio do núcleo, a , a diferença relativa do índice de refração ($\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$), o comprimento de onda de operação, λ , e o índice de refração do núcleo da fibra, n_1 .

É importante definir a constante de propagação normalizada, b , para uma fibra (AGRAWAL, 2002):

$$b = \frac{\beta_0/k_0 - n_2}{n_1 - n_2} = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2} \quad (8)$$

Na Equação (8), β_0 é a constante de propagação e k_0 é o número de onda no vácuo ($k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda$).

Os modos podem ser classificados também como propagantes e contra-propagantes em relação ao sentido ao qual a luz é injetada na fibra.

2.3 REDES EM FIBRAS ÓTICAS

2.3.1 Redes de Bragg Uniformes

A forma mais básica de uma rede de Bragg consiste da modulação periódica do índice de refração do núcleo de uma fibra ótica monomodo ao longo do eixo de propagação da luz e apresenta como característica principal a reflexão de parte da potência ótica propagando-se pela fibra. Essa reflexão é baseada na difração do feixe luminoso pela estrutura de modulação do índice de refração, acoplando uma parte do espectro em um modo de núcleo contra-propagante.

O acoplamento mais forte ocorre no comprimento de onda de Bragg, λ_B , dado por:

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \quad (9)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo de propagação da luz e Λ é o período espacial da modulação do índice de refração (HILL *and* MELTZ, 1997). Se a condição de Bragg não for satisfeita, a luz refletida em cada plano subsequente torna-se progressivamente fora de fase e se cancela. Quando a condição de Bragg é satisfeita, as contribuições da luz refletida em cada plano da rede contribuem construtivamente na direção contra-propagante formando um pico de reflexão com o comprimento de onda definido pelos parâmetros da rede. Qualquer mudança nas propriedades da fibra, tais como tensão longitudinal ou temperatura, que varie o índice de refração do material da fibra ou o período da rede, mudará o comprimento de onda de Bragg e, portanto o comprimento de onda refletido.

As leis da conservação de energia e de momento fornecem informação sobre o vetor de onda difratado pela modulação periódica de índice. A conservação de energia ($\hbar\omega_f = \hbar\omega_i$) requer que a frequência da radiação incidente (ω_i) e da radiação refletida (ω_f) sejam as mesmas, \hbar é a constante de Planck e possui o valor de $1,055 \times 10^{-16}$ eV s. A conservação de

momento requer que o vetor da onda incidente, \vec{k}_i , mais o vetor da rede, \vec{K} , sejam iguais ao vetor da radiação difratada, \vec{k}_f ,

$$\vec{k}_i + \vec{K} = \vec{k}_f \quad (10)$$

onde o vetor de onda da rede, \vec{K} , tem a direção normal aos planos da rede e possui magnitude $2\pi/\Lambda$ (Λ é o período da FBG representado na Figura 1).

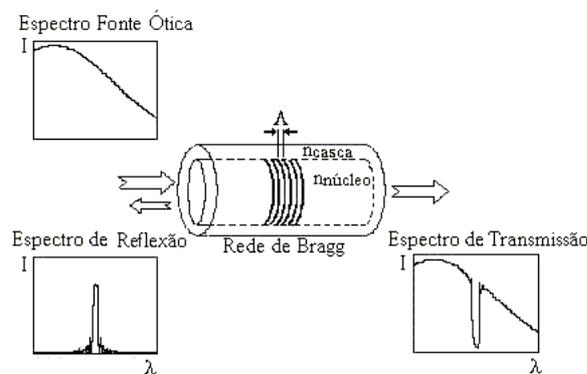


Figura 1 - Acoplamento entre os modos co e contra-propagante para uma rede de Bragg com período e modulação de índice de refração uniformes.

O vetor de onda difratado é igual em magnitude e direção ao vetor de onda incidente, porém com sentido contrário. Logo, a condição de conservação de momento torna-se:

$$2 \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (11)$$

A Equação (11) pode ser simplificada para a condição de primeira ordem de Bragg, dada pela Equação (9).

No caso mais geral, a perturbação no índice de refração $\delta n_{eff}(z)$ tem a forma modulada em amplitude ao longo do comprimento da fibra representada por (ERDOGAN, 1997):

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \left\{ 1 + \mathcal{V}(z) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (12)$$

onde $\overline{\delta n_{eff}}(z)$ representa o comportamento do valor médio da modulação ao longo de um período Λ da FBG, $\phi(z)$ descreve a variação do período ao longo da rede e o termo $\mathcal{V}(z)$ é

a visibilidade das franjas de interferência e pode assumir valores ($0 \leq \mathcal{V}(z) \leq 1$). A visibilidade está relacionada com a apodização, $Ap(z)$ que descreve a amplitude e o valor médio da modulação do índice de refração ao longo da rede, por:

$$Ap(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \cdot \mathcal{V}(z) \quad (13)$$

A Equação (14) representa o perfil de apodização gaussiana de ordem dois. A criação de um perfil de índice com apodização suaviza as bordas da resposta espectral da rede por meio da diminuição gradual da modulação de índice e suaviza os lóbulos laterais do espectro da FBG.

$$Ap_G(z) = \exp\left\{-\left[2(\ln 2)^{1/2} \left(\frac{z-L/2}{3L}\right)\right]^2\right\} \quad (14)$$

Usando a teoria de modos acoplados, a refletividade da rede com amplitude e período de modulação constante, pode ser expressa (LAM and GARSIDE, 1981):

$$R(L, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(SL)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)} \quad (15)$$

onde $R(L, \lambda)$ é a refletividade em função do comprimento da rede L , e do comprimento de onda λ , Ω é o coeficiente de acoplamento correspondente ao acoplamento entre as ondas co-propagantes e contra-propagantes, $\Delta\beta = \beta_0 - (\pi/\lambda)$, onde β_0 é a constante de propagação.

O parâmetro S é dado por:

$$S = \sqrt{\Omega^2 - \Delta\beta^2} \quad (16)$$

O coeficiente de acoplamento, Ω , para uma variação senoidal da perturbação do índice de refração Δn ao longo do eixo da fibra é dado por (LAM and GARSIDE, 1981):

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} M_p \quad (17)$$

Na Equação (17), $M_p \approx 1/V^2$ representa a fração da potência do modo contido no núcleo da fibra.

Considerando $\Delta\beta = 0$ e substituindo a Equação (16) em (15), a refletividade máxima torna-se:

$$R(L, \lambda) = \tanh^2(\Omega L) \quad (18)$$

Se N é o número de planos da rede, pode-se ainda escrever uma equação geral aproximada para a largura de banda máxima à meia altura (OTHONOS *and* KALLI, 1999):

$$\Delta\lambda = \lambda_B \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (19)$$

Na Equação (19), n_0 é o índice de refração médio e o parâmetro α assume valores entre 1, para redes fortes (com reflexão próxima de 100 %), e 0,5, para redes fracas. Quanto maior o número de planos (N), maior o comprimento da rede.

2.3.2 Sensibilidade das Redes de Bragg à Deformação e à Temperatura

As mudanças das características de uma rede são de importância primordial para várias aplicações. Sendo assim, qualquer perturbação que venha a alterar a periodicidade espacial ou o índice de refração efetivo de uma rede, como deformação mecânica ou variações de temperatura, afetará o espectro de reflexão da rede. A variação no comprimento de onda de Bragg da FBG é dada por (KERSEY *et al*, 1997):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} + n_{eff} \frac{\partial \lambda}{\partial L} \right) \Delta L + 2 \left(\lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (20)$$

O primeiro termo do segundo membro da Equação (20) representa o efeito da deformação sobre a rede, que corresponde a uma mudança no espaçamento da rede e à mudança foto-elástica induzida no índice de refração, podendo ser também representado por:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) \varepsilon_z \quad (21)$$

onde $\varepsilon_z = \Delta L / L$ representa a componente de deformação relativa por unidade de comprimento, e p_e representa a constante foto-elástica efetiva definida como:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (22)$$

Na Equação (22), p_{11} e p_{12} são componentes do tensor foto-elástico e ν é o coeficiente de *Poisson*. Para uma fibra ótica de núcleo de sílica $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$ e $n_{eff} = 1,482$. Quando estes parâmetros forem utilizados na Equação (21), a sensibilidade à deformação em aproximadamente 1550 nm é de 1,2 pm/ $\mu\epsilon$, onde 1 $\mu\epsilon$ corresponde a deformação relativa da rede de Bragg de (1 $\mu\text{m}/\text{m}$) (MOREY *et al*, 1995).

O segundo termo da Equação (20) é relativo às mudanças no comprimento de onda de Bragg devidas à variação da temperatura que estão associadas a mudanças no período da rede devido à expansão térmica e a mudanças no índice de refração. O deslocamento no comprimento de onda de Bragg para uma variação de temperatura ΔT pode ser escrito como:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (23)$$

onde $\alpha = (1/\lambda)(\partial\lambda/\partial T)$ é o coeficiente de expansão térmica para a fibra (aproximadamente $0,55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para a sílica). A quantidade $\zeta = (1/n_{eff})(\partial n_{eff}/\partial T)$ representa o coeficiente termo-ótico, que é aproximadamente igual a $8,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para a fibra de sílica dopada com germânio. Da Equação (23), a sensibilidade para uma FBG com comprimento de onda de Bragg em 1550 nm é de aproximadamente 13,7 pm/ $^\circ\text{C}$ (MOREY *et al*, 1995).

2.3.3 Redes de Bragg Corroídas e Sensibilidade ao Índice de Refração

Além da influência da temperatura e da deformação na variação do comprimento de onda de Bragg de uma FBG, o índice de refração efetivo do modo guiado também pode causar mudanças no comprimento de onda de Bragg. Para tanto, é necessário a redução do diâmetro da casca da fibra até um valor no qual o campo evanescente passe a interagir com o meio externo. Quanto menor for o diâmetro da casca da fibra maior será a interação entre o campo evanescente e o meio e, conseqüentemente maior a sensibilidade a este parâmetro.

Quando a fibra ótica é corroída a ponto que o modo fundamental passe a ser afetado, a constante de propagação do modo pode ser escrita como (PEREIRA *et al*, 2004):

$$\beta = \beta_0 + k\eta_p (n_{sur} - n_{cl}) \quad (24)$$

onde $\beta_0 = (2\pi / \lambda)n_{eff}$ é a constante de propagação do modo nas condições normais, n_{sur} é o índice de refração do meio circunvizinho e n_{cl} da casca da fibra, k é o vetor de onda. O fator η_p é a fração da potência ótica total do modo não perturbado que se propaga na região corroída e é irradiada para o meio circunvizinho.

Os deslocamentos no comprimento de onda de ressonância $\Delta\lambda_B$ devido à variação do índice de refração do meio externo em FBGs corroídas são dados por:

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda\eta_p (n_{sur} - n_{cl}) = 2\Lambda\eta_p \Delta n \quad (25)$$

2.3.4 Redes de Bragg com Gorgeio

As redes de Bragg podem ser utilizadas não somente como sensores, mas também em telecomunicações, como compensadores de dispersão. Para o uso específico nesta área as redes de Bragg com gorgeio, também conhecidas na literatura como *chirped fiber Bragg gratings* – *CFBG*, possuem período não uniforme ao longo de seu comprimento, conforme o esquema da Figura 2.

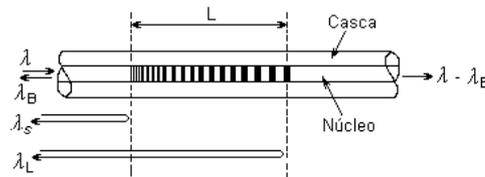


Figura 2 - Diagrama esquemático de uma rede com gorgeio (OTHONOS and KALLI, 1999).

Uma rede com estes parâmetros pode ser conseguida variando axialmente seu período Λ ou a amplitude de modulação do índice de refração, ou ambos. A Figura 3a mostra o perfil de modulação de índice de refração com amplitude constante ao longo do comprimento da fibra para uma FBG com gorgeio e a Figura 3b apresenta o perfil de modulação de índice de refração com amplitude variável ao longo do comprimento da fibra para uma FBG com gorgeio.

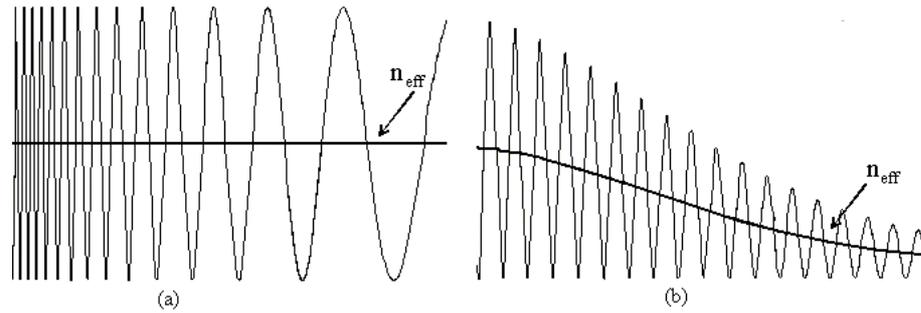


Figura 3 - (a) Perfil de modulação do índice de refração com amplitude constante. (b) Perfil de modulação do índice de refração com amplitude variável.

O período pode variar monotonicamente como na Figura 3a, ou aumentar ou diminuir em torno do centro da rede. Com a Equação (9), pode-se escrever o comprimento de onda de Bragg ao longo do comprimento $\lambda_B(z)$,

$$\lambda_B(z) = 2n_{eff}(z)\Lambda(z) \quad (26)$$

A FBG com gorgeio com a configuração mais simples é aquela onde o período de modulação não é constante ao longo do comprimento da rede, como indicado na Figura 3a. O período da FBG com gorgeio linear é representado por:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Lambda_1 z \quad (27)$$

onde Λ_0 é o período inicial e $\Lambda_1 = \Delta\Lambda/z$ é o período ao longo do comprimento da rede. Portanto, o comprimento de onda de Bragg também varia ao longo do comprimento da FBG com gorgeio. Quando um pulso óptico propaga-se ao longo do comprimento da rede com gorgeio, em diferentes pontos da rede a condição de Bragg é satisfeita por diferentes frequências que compõem a luz incidente. Baseado na Figura 2, as componentes de baixa frequência (λ_L) sofrem um atraso maior ao longo da rede devido ao aumento do período da rede (e do comprimento de onda de Bragg). Pode-se escrever a expressão para a dispersão de atraso de grupo de uma rede de Bragg com gorgeio de comprimento L , usando a relação $\Delta t = D L \Delta\lambda$, onde Δt é o tempo de ida e volta dentro da rede e $\Delta\lambda$ é a diferença entre os comprimentos de onda refletidos nos dois extremos da rede, que corresponde à largura de banda do dispositivo. Como $\Delta t = 2n_{eff}L/c$, a dispersão é dada por (AGRAWAL, 2002):

$$D = \frac{2n_{eff}}{c} \left(\frac{1}{\Delta\lambda} \right) = \frac{\Delta t}{\Delta\lambda L} \quad (28)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo, c é a velocidade da luz no vácuo.

A dispersão ao longo de um sistema constituído de fibra SMF de comprimento L_{fibra} , a ser compensada por uma rede com gorgeio pode ser calculada:

$$D = D_{fibra} L_{fibra} \quad (29)$$

A Equação (28) mostra que a dispersão, para uma fibra padrão de $L_{fibra} = 100 \text{ km}$ de comprimento com uma dispersão de -17 ps/nm km em 1550 nm , pode ser compensada com uma rede com gorgeio linear de aproximadamente $3,5 \text{ cm}$ de comprimento e com $\Delta\lambda = 0,2 \text{ nm}$. Pela Equação (29), $D = -1700 \text{ ps/nm}$.

O gorgeio, G , para uma rede de Bragg com gorgeio linear é calculado pela divisão da largura de banda do dispositivo, pelo seu comprimento:

$$G = \frac{\Delta\lambda}{L} \quad (30)$$

Recentemente, muita atenção tem sido voltada às ondulações na resposta espectral do atraso de grupo, mais conhecidas como GDR (*group delay ripple*) (STEPHEN *et al*, 1998; BONINO *et al*, 1997). Os menores desvios em relação a um atraso de grupo linear, na região espectral da rede, estão na ordem de $\pm 5 \text{ ps}$ (STEPHEN *et al*, 1998). As ondulações podem ocorrer devido às imperfeições na rede, ou em combinação com outros efeitos, tais como *stitching errors* das máscaras de fase, não-uniformidade da fibra, não-uniformidade do feixe UV, dentre outros. Este efeito é de grande importância, pois pode degradar o sinal de um compensador de dispersão baseado em CFBG (CARTLEDGE, 2002).

2.3.5 Redes de Bragg Amostradas

Uma rede de Bragg amostrada (*sampled fiber Bragg gratings - SFBG*), também conhecida como rede superestruturada consiste num conjunto de N pequenas FBGs uniformes ou com gorgeio conforme representado na Figura 4. As diversas FBGs que constituem a rede amostrada estão separadas umas das outras por uma região onde não há modulação do índice de refração. O tamanho da região gravada (a) juntamente com o da região não gravada define o período da amostra (P).

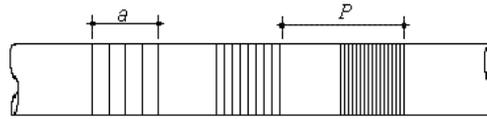


Figura 4 - Diagrama esquemático de uma FBG amostrada (SUN *et al*, 2003).

Os períodos das pequenas FBGs podem variar, como representado na Figura 4, ou não, assim como o período da amostra também pode possuir um coeficiente de gorgoio (WANG *et al*, 2002).

O espectro de uma rede amostrada é composto por vários picos centrados em comprimentos de ondas específicos, que podem ser comparados aos diferentes canais nos sistemas de comunicações óticas. O tamanho do período da amostra será responsável pelo espaçamento entre cada canal ou pico. O valor de P pode ser calculado por (WANG *et al*, 2002):

$$P(i) = P_1[1 + c_s(i-1)] \quad (31)$$

onde c_s é o coeficiente de gorgoio da amostra, P_1 é o período da amostra inicial. A notação $i = 1, \dots, N$ denota o número total de seções gravadas com comprimento a . Quando as seções gravadas (a) são compostas por FBGs com gorgoio, $c_s \neq 1$, a rede de Bragg amostrada resultante também possuirá gorgoio e os vários picos podem ser aplicados como compensadores de dispersão de vários canais simultaneamente, desde que cada pico da rede de Bragg amostrada esteja centrado no comprimento de onda específico de cada canal empregado nos sistemas de telecomunicações. Quando $c_s = 1$, a rede de Bragg amostrada resultante possui picos de reflexão similares aos das redes de Bragg uniformes, sendo que a rede amostrada pode ser utilizada como filtro.

Quando relaciona-se a e P , a razão, $p = a / P$ é utilizada no cálculo do número de canais, m (SUN *et al*, 2003).

$$m = \frac{2}{p} - 1 = \frac{2}{a/P} - 1 \quad (32)$$

A frequência de espaçamento entre canais vizinhos é escrita por:

$$\Delta f_N = \frac{c}{2 n_{eff} P} \Leftrightarrow \Delta \lambda_N = \frac{\lambda_B^2}{2 n_{eff} P} \quad (33)$$

Logo, o espaçamento entre dois canais vizinhos é determinado somente pelo período da amostra P . Para os espaçamentos de 0,8 e 1,6 nm utilizados em sistemas de transmissão, P deve ser 1,035 e 0,517 mm, respectivamente (SUN *et al*, 2003).

2.4 A FOTOSSENSIBILIDADE DAS FIBRAS ÓTICAS

A fotossensibilidade está associada à mudança permanente do índice de refração do núcleo de uma fibra ótica exposta à luz com comprimento de onda e intensidade característicos, que são funções do material constituinte do núcleo. Inicialmente, este fenômeno era associado com fibras óticas que continham uma grande quantidade de germânio em seu núcleo. Em vários anos de pesquisa, a fotossensibilidade foi observada em diferentes tipos de fibra, muitas das quais não continham germânio como dopante (BILODEAU *et al*, 1990). Entretanto, fibras óticas contendo o núcleo dopado com germânio permanecem sendo as mais adequadas para a fabricação de dispositivos (HILL *and* MELTZ, 1997).

Os defeitos presentes na matriz vítrea das fibras que contém germânio como dopante são alterados quando as fibras são irradiadas com luz UV causando uma mudança do índice de refração. Os principais defeitos formados no núcleo da fibra ótica dopada com germânio estão representados na Figura 5.

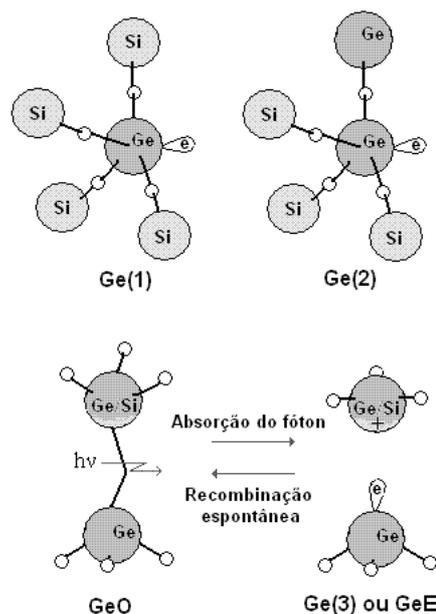


Figura 5 - Esquema dos defeitos das fibras óticas dopadas com germânio (KASHYAP, 1999).

Os defeitos Ge(1) e Ge(2) apresentam uma configuração tetraédrica, mas possuem um elétron adicional preso ao átomo de germânio gerando bandas de absorção em 281 nm e 213 nm, respectivamente. Os números (1) e (2) estão relacionados com a presença de átomos de silício ou germânio mais próximo desta ligação extra. O defeito GeO possui um átomo de germânio ligado com três átomos de oxigênio e a quarta ligação é com um átomo de Ge ou Si. Resultados experimentais sugerem que este tipo de defeito gera uma banda de absorção centrada em aproximadamente 240 nm. Estes centros são também conhecidos como centros de germânio com deficiência de oxigênio ou GODC (*Germanium Oxygen - Deficient Centers*). Com a irradiação nesta banda de absorção ocorrem quebras das ligações Ge – Ge, ou Ge – Si resultando na criação de novos centros de defeitos, os centros GeE' conhecidos também como Ge(3). O índice de refração do material é alterado e surgem novas bandas de absorção, como reportado no artigo de Atkins e colaboradores (ATKINS *et al*, 1993). Os centros GeE' são os principais responsáveis pela formação das redes de Bragg nas fibras óticas dopadas com germânio.

É de grande interesse tecnológico possuir um mecanismo para realçar a fotossensibilidade das fibras, tornando-as mais sensíveis à radiação UV sem a necessidade de utilizar altas potências óticas do feixe de gravação ou prolongar o tempo de exposição. Dentre as principais técnicas destacam-se a hidrogenação, a varredura à chama e a adição de dopantes.

2.4.1 Hidrogenação

Lemaire e colaboradores foram os primeiros a reportar um simples, mas eficiente método de aumentar a fotossensibilidade em fibras óticas. As fibras são colocadas em contato com gás hidrogênio por aproximadamente duas semanas, em temperatura que varia de 20 a 75 °C e pressão entre 20 e 750 atm, resultando na difusão das moléculas de hidrogênio para o núcleo da fibra ótica. Mudanças permanentes no índice de refração do núcleo da fibra são possíveis, da ordem de 10^{-2} , com a vantagem de possibilitar a gravação de redes de Bragg tanto nas fibras dopadas com germânio, quanto nas fibras padrão que possuem pouca concentração de germânio. Além desta vantagem, nas seções da fibra não expostas à radiação ocorre a difusão do hidrogênio molecular para fora da fibra, tornando sem importância as perdas por absorção na janela ótica. Para acelerar o mecanismo da saída do hidrogênio, pode ser feito um tratamento térmico nas fibras (MALO *et al*, 1994).

O mecanismo de hidrogenação não depende da fibra ou do processo da preforma, mas da interação entre os átomos de germânio e o hidrogênio, quando as fibras são expostas à radiação UV. As moléculas de hidrogênio são dissociadas e as ligações GeO são rompidas formando ligações SiOH e GeOH e centros de deficiência de oxigênio (GODC, centros GeH e GeE'). Sendo que os centros GeH e GeE' são os responsáveis principais pela modulação de índice observada em fibras hidrogenadas (LEMAIRE *et al*, 1993). Nas fibras não hidrogenadas a concentração de Ge deve ser alta (fibras fotossensíveis) para que ocorra uma alta concentração de GODCS que irão gerar os centros GeE' quando a fibra for exposta ao UV. Nas fibras hidrogenadas, mesmo nas SMF com pouco Ge, é possível conseguir uma boa modulação de índice, 6×10^{-3} (LEMAIRE *et al*, 1993), pois a formação de GeE' e GeH está associada a presença de H molecular.

2.4.2 Varredura à Chama

A fotossensibilização induzida através de varredura à chama (*Flame Brushing*) é uma técnica simples e efetiva, onde a região da fibra ótica a ser fotossensibilizada é exposta repetitivamente por uma chama de hidrogênio contendo uma pequena quantidade de oxigênio, alcançando temperaturas de até 1700 °C. Este processo demora cerca de 20 minutos. Nesta temperatura, o hidrogênio se difunde rapidamente para o núcleo da fibra ótica e reage com o vidro com adição de germânio produzindo GODC, o que resulta em alta fotossensibilidade no núcleo da fibra, alcançando mudanças no índice de refração $> 10^{-3}$ (BILODEAU *et al*, 1993).

As técnicas de varredura à chama e hidrogenação seguem os mesmos conceitos. Em ambos os casos, o hidrogênio é usado em uma reação química com o vidro que contém germânio em sua composição formando os centros GODC que são responsáveis pela fotossensibilidade.

Há muitas vantagens em utilizar a técnica de varredura à chama para realçar a fotossensibilidade, visto que este aumento é permanente, o oposto da hidrogenação onde as fibras perdem a fotossensibilidade a medida que o hidrogênio se difunde para fora da mesma. Esta técnica permite a fabricação de redes de Bragg fortes em fibras padrão de telecomunicação. A fotossensibilidade é localizada devido à pequena chama utilizada. Porém, as altas temperaturas da chama tornam as fibras frágeis, prejudicando a estabilidade a longo prazo de qualquer dispositivo fabricado com fibras que utilizaram este método.

2.4.3 Co-Dopagem com Boro

A adição de vários dopantes como, por exemplo, o boro na fibra que contém germânio em sua composição também pode resultar no realce da fotossensibilidade. Na fabricação destas fibras é introduzido o dopante no momento da preforma (WILLIAMS *et al*, 1993).

O processo de realce da fotossensibilidade utilizando boro não produz GODC como as outras técnicas, mas ocorre o relaxamento da tensão fotoinduzida que se inicia com a quebra de ligações pela iluminação UV.

2.5 TÉCNICAS DE GRAVAÇÃO DAS REDES DE BRAGG

2.5.1 Gravação Interna

Esta técnica foi primeiramente demonstrada por Hill e colaboradores, mas redes provenientes deste processo apresentam o comprimento de onda refletido igual ao utilizado para sua gravação, o que limita o campo de aplicação. A Figura 6 mostra o diagrama esquemático da montagem experimental.

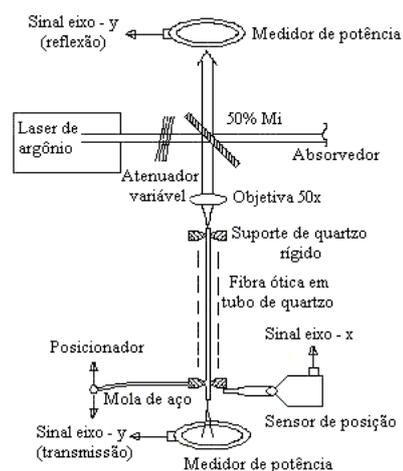


Figura 6 - Diagrama esquemático do dispositivo para produção de redes de Bragg pela técnica de gravação interna (HILL *and* MELTZ, 1997).

Na montagem experimental, a luz de um laser de argônio, monomodo, comprimento de onda de 488 nm, passa através de um divisor de feixe e é lançada em uma fibra ótica. O divisor de feixe é utilizado para monitorar a intensidade da luz refletida.

Devido à reflexão de Fresnel, na extremidade final da fibra há a formação de um feixe contra-propagante que interfere com o feixe incidente, formando uma onda luminosa estacionária no interior do núcleo. Essa onda estacionária possui regiões de máximo e mínimo de intensidade luminosa. As regiões de máxima intensidade causam significativas modificações no valor local do índice de refração, por um processo de absorção de dois fótons, resultando em uma modulação do índice de refração ao longo do eixo da fibra (HILL *et al*, 1978).

2.5.2 Técnica Interferométrica

A técnica interferométrica (MELTZ *et al*, 1989) foi a primeira técnica de gravação externa empregada para produzir redes de Bragg em fibras fotossensíveis. Nesta técnica, um feixe de radiação UV é dividido em dois feixes iguais que são posteriormente recombinados para formar um padrão de interferência. A rede é produzida posicionando a parte descascada de uma fibra ótica na região do padrão (Figura 7). O período, Λ , do padrão formado determina o comprimento de onda de reflexão, λ_B , da rede escrita.

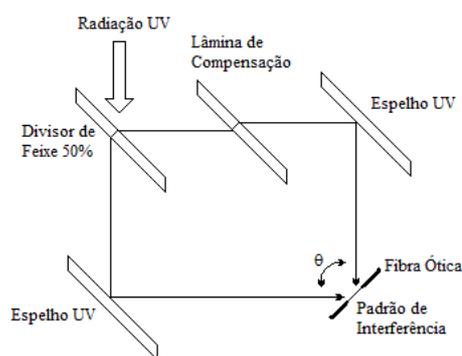


Figura 7 - Técnica interferométrica de gravação de FBG (KASHYAP, 1999).

Nesta montagem, a luz lançada na fibra ótica terá um comprimento de onda refletido pela rede, λ_B , determinado pelo ângulo de cruzamento, θ , entre os feixes e pelo comprimento de onda do feixe de escrita.

Esta técnica, que posteriormente ficou conhecida como técnica holográfica, se mostrou mais eficiente do que o processo de gravação interna devido a diferentes aspectos. O

primeiro foi o de possibilitar gravar redes de Bragg em praticamente qualquer comprimento de onda no visível e infravermelho próximo. O segundo aspecto foi de reduzir a potência ótica necessária para fotossensibilizar a fibra, pois este processo está associado a absorção de apenas um fóton.

Uma desvantagem na utilização desta técnica é a suscetibilidade da montagem às vibrações mecânicas e às correntes de ar, podendo causar uma não periodicidade da rede de Bragg e um consequente alargamento de banda.

2.5.2.1 Técnica com Máscara de Fase

É uma técnica externa de gravação de redes de Bragg no núcleo da fibra ótica. Nesta técnica, como indicado na Figura 8, o feixe de luz UV, sob incidência normal à máscara, é difratado pela máscara de fase sendo separado nas ordens $m = 0$ e $m = \pm 1$. A superposição espacial dos feixes de ordem $m = \pm 1$ resulta num padrão de interferência. Na região deste padrão é posicionada a fibra ótica. Uma lente cilíndrica é posicionada antes da máscara de fase, para criar uma linha focal sobre a região do núcleo da fibra ótica, produzindo uma modulação do índice de refração da fibra com metade do período da máscara.

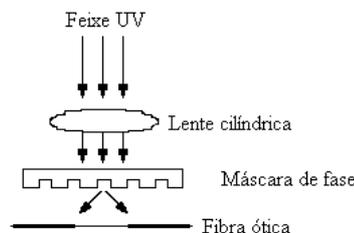


Figura 8 - Técnica de gravação de redes de Bragg, utilizando máscara de fase.

A técnica de gravação com máscara de fase apresenta vantagem por se tratar de um elemento compacto, fácil de alinhar e que apresenta pouca sensibilidade a vibrações mecânicas. Conseqüentemente, as redes produzidas apresentam um alto grau de reprodutibilidade. Esta técnica permite ainda a gravação de redes longas apenas movendo o feixe UV ao longo da máscara de fase (MARTIN *and* OUELLETTE, 1994), ou mesmo a gravação de redes com gorgeio onde o feixe percorre uma máscara de fase com múltiplas seções, cada uma com período espacial diferente. No entanto, a técnica possui a desvantagem de só permitir gravar redes com um dado período limitado pelo período da máscara. Para que redes com diferentes períodos sejam gravadas é preciso substituir a máscara de fase por outra

com período adequado. Uma outra limitação da técnica diz respeito à densidade de potência máxima que pode ser lançada na máscara (normalmente menor do que 1 J/cm^2 , segundo especificações das máscaras).

2.5.2.2 Técnica Interferométrica com Máscara de Fase

Esta técnica consiste na junção das técnicas interferométrica e de máscara de fase. Possui a vantagem de permitir a mudança dos parâmetros da rede produzida. A Figura 9 mostra esquematicamente a montagem experimental utilizada nessa configuração.

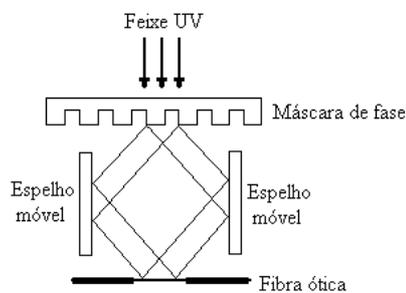


Figura 9 - Gravação de redes de Bragg, utilizando a técnica interferométrica com máscara de fase.

Nesta montagem o feixe UV é difratado pela máscara de fase e as ordens $m = \pm 1$ são recombinadas via reflexão em dois espelhos móveis, formando um padrão de interferência luminosa no núcleo da fibra. O período espacial do padrão formado determina o comprimento de onda de reflexão, λ_B , da rede escrita. Quando os espelhos são girados ocorre uma variação no ângulo de cruzamento das ordens $m = \pm 1$ e, conseqüentemente, uma alteração no comprimento de onda de Bragg da rede gravada. Nesta montagem, uma lente cilíndrica pode ser utilizada para focalizar os feixes UV e, portanto o padrão de interferência sobre a fibra. A possibilidade de encontrar uma posição de referência para o comprimento de onda de Bragg relativo à máscara de fase faz este sistema interferométrico altamente flexível.

3 METODOLOGIA E RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia empregada para a realização de cada etapa do trabalho bem como os resultados obtidos. O capítulo está dividido em quatro etapas, sendo que em cada uma delas é apresentada a metodologia seguida dos resultados obtidos. Primeiramente é apresentada no item 3.1 a etapa de produção de FBGs na UTFPR. Em seguida, no item 3.2 a etapa de estabilização térmica destes dispositivos. No item 3.3, é discutida a simulação e produção de dispositivos, redes com gorgeio e amostradas, no IT na Universidade de Aveiro. Por fim, no item 3.4, é apresentada a etapa de produção de FBGs corroídas e a sua aplicação como transdutores de índice de refração na determinação de concentrações de etanol em água.

3.1 GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG NA UTFPR

O sistema de gravação de redes de Bragg do laboratório de Laser da UTFPR permite a produção de dispositivos utilizando tanto a técnica interferométrica com máscara de fase quanto a técnica de incidência direta do feixe laser sobre a máscara de fase. O sistema foi projetado de tal forma que o operador possa utilizá-lo em uma ou outra configuração, simplesmente redirecionando o feixe laser com a movimentação de um único espelho. A configuração que emprega a técnica interferométrica com máscara de fase está representada em pontilhado na Figura 10 e a técnica com incidência direta na máscara de fase está representada em linha contínua na mesma Figura 10.

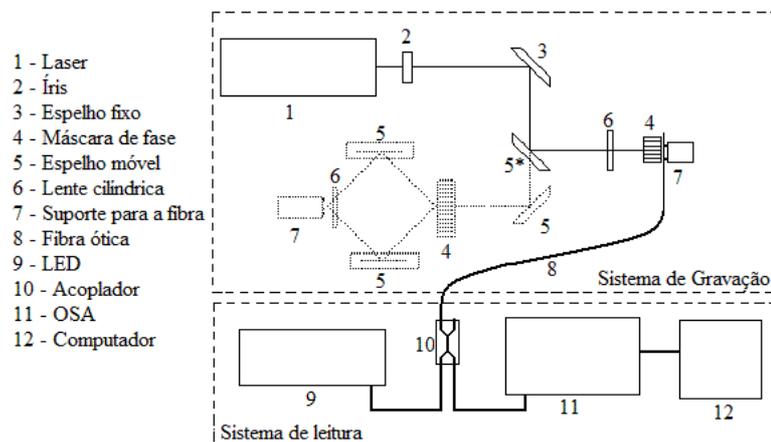


Figura 10 - Diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação de FBGs.

Na técnica interferométrica com máscara de fase (linha pontilhada) a luz ultravioleta do laser (*New Wave, Tempest-20 Nd: YAG 266 nm*) é difratada pela máscara de fase (*Ibsen*, com período de 1050,5 nm) e recombinada após reflexão em dois espelhos móveis com resolução angular de 0,001°, controlados por computador. Uma lente cilíndrica (*Newport-CSX050 25,4x50,8x50,2 FL*) focaliza os feixes UV, formando um padrão de interferência luminosa na posição da fibra. O período espacial do padrão formado pode ser alterado mudando o ângulo dos espelhos, e determina o comprimento de onda de reflexão, λ_B , da rede resultante.

Um sistema composto por um espelho montado sobre um estágio de translação movido por motor de precisão (*Newport UTMCC.5HA, Motorized Translation Stage* com resolução de 0,0177 μm e *backlash* de 1,84 μm), designado pelo número 5* na Figura 10, redireciona a luz do laser fazendo-a incidir sobre a montagem ótica contendo a lente cilíndrica (*Zylinderl. 310/60x50*), a máscara de fase (*Ibsen*, com período de 1050,5 nm) e a fibra ótica, para a possível utilização da técnica com incidência direta sobre a máscara de fase (linha contínua). As ordens difratadas pela máscara formam um padrão de interferência sobre a fibra ótica. Com a translação do espelho (em velocidade constante, ou com um determinado perfil de velocidade) movimentado por um motor controlado por computador, o feixe UV, focalizado pela lente cilíndrica, faz uma varredura na máscara de fase e o padrão de interferência se desloca ao longo do comprimento da fibra (KLEMBA *et al*, 2006). Com esta técnica é possível produzir redes mais longas do que com a técnica interferométrica com a máscara de fase, sendo que o comprimento destas redes seja limitado pelas dimensões da máscara de fase.

Para a gravação das FBGs foram utilizadas fibras hidrogenadas padrão de telecomunicação (*SMF fornecida pela Furukawa* e *SSMF fornecida pela Draktel*) e fibra fotossensível (fornecida pela *Nuferrn*). Como as redes possuem grande sensibilidade à temperatura, esta foi monitorada por um termômetro durante a gravação e mantida aproximadamente constante a $(20,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$, através de um aparelho de ar condicionado que era ligado uma hora antes da gravação.

As fibras SMF passaram pelo processo de hidrogenação, permanecendo em uma atmosfera de hidrogênio por, no mínimo, duas semanas antes da gravação, sob pressão de 116 atm.

O sistema de leitura utiliza como fonte de luz um LED superluminescente (*Superlum, Pilot-2*), que opera na faixa de 1450 nm a 1650 nm. A luz acoplada à fibra e refletida pela FBG é analisada pelo analisador de espectros óticos (OSA - *Optical Spectrum Analyzer*,

Anritsu, MS9710B), operando com uma resolução de 0,07 nm, estabilidade de comprimento de onda de ± 5 pm, e os dados são enviados para um computador conforme esquematizado na Figura 10.

A leitura do espectro de reflexão da rede durante o processo de gravação permite acompanhar o processo de formação da rede fornecendo a sua largura de banda e a refletividade, possibilitando a produção de uma rede que seja adequada a cada aplicação em particular.

Do sistema de gravação também fazem parte um osciloscópio (*Tektronix TDS220, Digital Real-Time Oscilloscope*) e um fotodetector (*Newport 818E Series, Energy Detector*) ligado a ele, estes equipamentos são utilizados para acompanhar os valores da tensão do laser durante a gravação e assim garantir um patamar constante de fluência do feixe laser durante o processo. Antes de iniciar a gravação das redes, sempre foi preciso aguardar aproximadamente 30 minutos para que a fluência do laser atingisse a estabilidade.

De acordo com o manual do fabricante do fotodetector é necessário dividir a tensão registrada em mV por 16,8 V/J e multiplicar por um fator de correção igual a 0,62. O resultado desse cálculo fornece a energia, em *joules*, por pulso de laser. Um dos cálculos efetuados, utilizado para obter a fluência do laser fornecida para uma tensão média de 3 mV, registrada no osciloscópio, está apresentado a seguir:

$$E = \frac{3mV}{16,8V/J} \times 0,62 = 0,11mJ \quad (34)$$

Esse valor de energia deve ser dividido pela área incidente de luz UV sobre a fibra, dada em milímetros quadrados, para obter-se então a fluência da energia em mJ/mm^2 .

No sistema de gravação utilizando a técnica com incidência direta sobre a máscara de fase, a lente utilizada é do tipo plano/convexa, cuja cintura do feixe é dada pela seguinte equação:

$$2\varpi_0 = (4\lambda / \pi)(F_0 / Y_0) \quad (35)$$

Nesta equação λ é o comprimento de onda do laser (266 nm), F_0 é a distância focal (60 mm) e Y_0 é a largura do feixe de entrada, que corresponde à abertura da íris (1 mm). Com a tensão medida durante a gravação das redes de Bragg, a fluência do laser é dada por:

$$Fluência = \frac{Energia}{Área} = \frac{0,11mJ}{2\varpi_0 Y_0} \cong 5,45mJ/mm^2 \quad (\text{por pulso}) \quad (36)$$

A fluência acumulada ao longo do processo de gravação da FBG durante um tempo t de uma hora e frequência f de 20 Hz, é dada por:

$$Fluência_{Acumulada} = Fluência_{por\ pulso} \times f \times t = 3922,77\text{mJ} / \text{cm}^2 \quad (37)$$

Para a efetiva gravação das FBGs, a fibra era posicionada no suporte de gravação, de modo que o acrilato da região a ser irradiada era removido e a região limpa com álcool isopropílico. Fazia-se a aproximação da fibra à máscara de fase com um parafuso micrométrico. Somente então era permitida a incidência do laser na fibra e ajustava-se a altura da fibra de forma que esta coincidissem com o feixe de laser.

A monitoração da gravação de redes de Bragg em fibra pode ser feita em tempo real, podendo ser observada por um analisador de espectro ótico (OSA). A saída do OSA é conectada a um computador, permitindo analisar a evolução do processo e o armazenamento posterior de todos os dados referentes à gravação através do programa *Labview*. Como por exemplo, a Figura 11 mostra o espectro da rede em escala linear (tela à esquerda), o espectro em escala dB (tela central), a evolução do comprimento de onda de Bragg em função do tempo (tela superior à direita), a largura de banda em função do tempo (tela central à direita) e o crescimento da rede em função do tempo (tela inferior à direita).

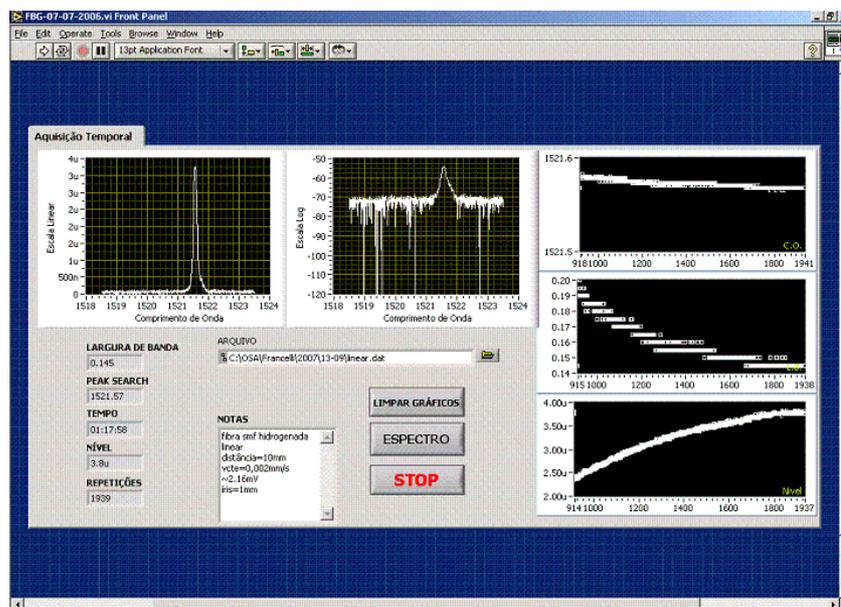


Figura 11 - Tela do computador da aquisição de dados em *Labview*.

O sistema de gravação do Laboratório de Nanotecnologia utiliza a técnica com incidência direta na máscara de fase, conforme o esquema da Figura 12.

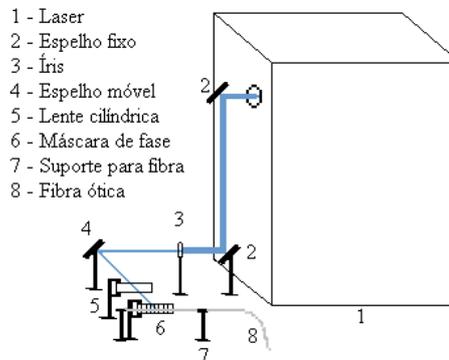


Figura 12 - Diagrama esquemático do sistema de gravação de FBGs.

As redes de Bragg foram gravadas usando duas diferentes máscaras de fase (*Ibsen*, $\Lambda = 902,5 \text{ nm}$ e $\Lambda = 1062,5 \text{ nm}$) iluminadas com luz UV (laser KrF de excímero, 248 nm, *Xanto XS-Coherent*) trabalhando com energia de 5 mJ por pulso (medida na saída do laser), frequência de 50 Hz por 10 minutos, com duração do pulso de 5 ns. Uma lente cilíndrica (*Zylinderl. 310/60x50*) focaliza o feixe UV e a máscara de fase é usada para modular espacialmente o feixe UV gerando um padrão de interferência no núcleo da fibra ótica. As FBGs têm o comprimento estimado de 3 mm, devido à abertura da íris.

Este sistema de gravação também apresenta um espelho móvel montado sobre um estágio de translação movido por motor de precisão (*Newport UTMCC.5HA, Motorized Translation Stage* com resolução de $0,0177 \text{ }\mu\text{m}$ e *backlash* de $1,84 \text{ }\mu\text{m}$), indicado pelo número 4 na Figura 12, que permite a gravação de redes longas.

Sendo a área do feixe na saída do laser de 18 mm^2 , a fluência do laser é dada por:

$$\text{Fluência} = \frac{\text{Energia}}{\text{Área}} = \frac{5 \text{ mJ}}{3 \times 6} \cong 0,28 \text{ mJ} / \text{mm}^2 \quad (\text{por pulso}) \quad (38)$$

Após passar pela íris com abertura de 3 mm, a energia será:

$$\text{Energia} = 0,28 \text{ mJ} / \text{mm}^2 \times \pi(1,5 \text{ mm})^2 = 1,96 \text{ mJ} \quad (\text{por pulso}) \quad (39)$$

A fluência por pulso que incide na fibra é:

$$\text{Fluência} = \frac{\text{Energia}}{\text{Área}} = 103,64 \text{ mJ} / \text{mm}^2 \quad (\text{por pulso}) \quad (40)$$

Na Equação (40), a área corresponde à figura de interferência gerada na fibra.

A fluência acumulada na fibra, para uma frequência de 50 Hz em um tempo de 10 minutos é dada por:

$$Fluência_{Acumulada} = Fluência_{por\ pulso} \times f \times t = 31091,24 \text{ mJ} / \text{cm}^2 \quad (41)$$

A Tabela 1 apresenta os parâmetros do sistema de gravação empregados na produção das redes de Bragg, os tipos de fibra empregados, assim como características das FBGs produzidas.

Tabela 1 - Características e parâmetros das FBGs utilizadas nos experimentos.

FBGs	Tipo de Fibra	Técnica de Gravação	Laser	Frequência (Hz)	Tempo de Gravação (s)	Fluência por Pulso (mJ/mm ²)	Comprimento de Onda (nm)	Comprimento da FBG (mm)
1	fotossensível	MF	KrF	100	500	103,64	1540,41 ± 0,02	3
2	fotossensível	MF	KrF	100	500	103,64	1540,70 ± 0,02	3
3	SMF hidrogenada	MF	KrF	100	80	103,64	1541,32 ± 0,02	3
4	SMF hidrogenada	MF	KrF	100	80	103,64	1541,60 ± 0,02	3
5	SSMF	MF	KrF	50	300	103,64	1540,33 ± 0,02	3
6	SSMF hidrogenada	IMF	Nd: YAG	20	1800	5,45	1556,16 ± 0,05	1,5
7	fotossensível	MF com perfil gaussiano	Nd: YAG	20	3009	3,63	1520,25 ± 0,02	10
8	fotossensível	MF com perfil constante	Nd: YAG	20	5682	3,63	1520,45 ± 0,07	10
9	SMF hidrogenada	MF com perfil constante	Nd: YAG	20	3757	3,63	1520,47 ± 0,07	10
10	SSMF	MF	KrF	50	600	103,64	1539,87 ± 0,06	3
11	SSMF	MF	KrF	50	600	103,64	1308,49 ± 0,06	3

(SMF: fibra fornecida pela furukawa, SSMF: fibra fornecida pela draktel, MF: máscara de fase; IMF: interferométrica com máscara de fase).

3.2 ESTABILIZAÇÃO TÉRMICA DAS REDES DE BRAGG

Algumas redes de Bragg foram tratadas termicamente visando a estabilidade térmica em temperaturas inferiores e superiores a 400,0 °C. Foram realizados tratamentos térmicos com diferentes valores de temperatura máxima, tempo de aquecimento e resfriamento e tempo de permanência em cada patamar de temperatura. A motivação para utilização de diferentes parâmetros nos tratamentos térmicos foi encontrar o conjunto de parâmetros capaz de fornecer uma rede com melhores características de estabilização.

3.2.1 Procedimento para Tratamento Térmico em Temperaturas Inferiores a 400,0 °C com Patamares de Curta Duração

Foram realizados tratamentos térmicos em temperaturas inferiores a 400,0 °C, nos quais as redes durante o aquecimento eram mantidas durante 45 minutos em diferentes patamares de temperatura. Após atingir a temperatura máxima escolhida para o tratamento, as redes eram resfriadas. Dois processos de resfriamento foram adotados: resfriamento rápido obtido com a retirada da fibra do forno, e resfriamento lento obtido desligando o forno e deixando a fibra no seu interior até que este atingisse a temperatura ambiente.

As análises da refletividade foram realizadas de forma qualitativa, sendo que os valores apresentados não são absolutos. Para a realização deste experimento, as redes foram colocadas no interior de um tubo de aço inox e este foi colocado dentro de um forno de laboratório (*Jung, Modelo LT0112, 110V/50V, Monofásico C/J200*), conforme a foto da Figura 13. A temperatura do forno foi monitorada com o auxílio de um termopar (*Minipa MT520*) que foi colocado próximo das FBGs.



Figura 13 - Foto do forno de laboratório utilizado nos experimentos.

O experimento foi realizado simultaneamente com quatro FBGs chamadas de 1, 2, 3 e 4 e para acompanhar a evolução espectral de todas as redes durante o experimento foram utilizadas três chaves óticas (*SW 1: 2 – Direct Drive, JDS Uniphase*) como representado na Figura 14. Um analisador de espectros óticos (*OSA Agilent 8614*), com resolução de 0,06 nm e estabilidade em comprimento de onda de ± 2 pm, foi utilizado para acompanhar os espectros de reflexão das FBGs e os dados eram visualizados na tela do computador.

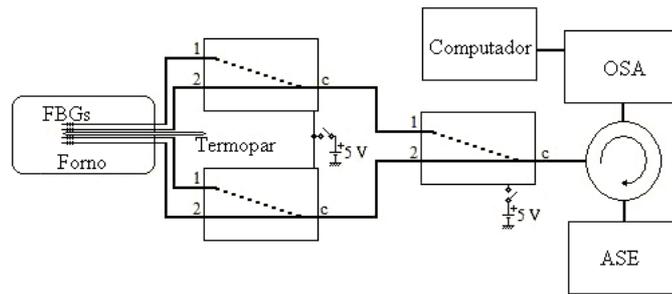


Figura 14 - Diagrama esquemático do experimento.

A evolução do comprimento de onda e da refletividade foi monitorada como função da temperatura, desde $(25,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ até $(425,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ em três ciclos de aquecimento e resfriamento. Três registros eram efetuados a cada estágio de temperatura depois que a mesma era estabilizada por 30 minutos nos respectivos patamares e o resultado final foi calculado pelas médias dos dados. A dispersão associada com as medidas foi estimada para um nível de confiança de 68,3 % pela incerteza combinada (JCGM/WG 1, 2008). A incerteza combinada foi calculada considerando o desvio padrão das médias, os erros associados com a resolução do OSA e com a variação de temperatura. O forno foi programado entre as temperaturas de $(25,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ e $(425,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$, com patamares de 45 minutos a cada $50 ^\circ\text{C}$, o programa de aquecimento do forno está representado na Figura 15. Este procedimento foi adotado conforme o trabalho de Douay e colaboradores (DOUAY *et al*, 1993), mas no experimento de Douay apenas dois ciclos de aquecimento e resfriamento foram realizados e as redes foram gravadas em fibra dopada com germânio com laser operando em 243 nm. Durante este experimento as FBGs eram colocadas no interior de um tubo de quartzo para então serem submetidas ao tratamento térmico. O tempo em que as FBGs permaneciam nos patamares de temperatura era de 45 minutos que, segundo Douay, 30 minutos é o tempo suficiente para fixar as principais modificações no n_{eff} responsáveis pelas mudanças permanentes no comprimento de onda de Bragg, tornando a rede estável.

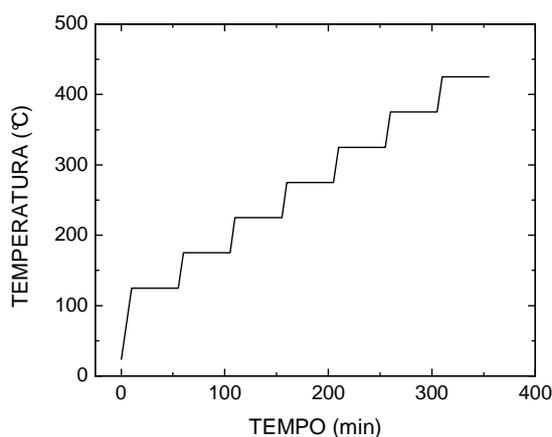


Figura 15 - Representação esquemática do programa de aquecimento do forno para os tratamentos térmicos com resfriamento rápido e lento.

Para este experimento foram utilizadas duas FBGs (1 e 2) gravadas em fibra fotossensível (*Nufern*) e duas FBGs (3 e 4) gravadas em fibra SMF hidrogenada (*Furukawa*), as quatro FBGs foram gravadas pelo método de incidência direta na máscara de fase com o laser KrF.

3.2.2 Procedimento para Tratamento Térmico em Temperaturas Inferiores a 400,0 °C com Patamares de Longa Duração

Outro experimento para verificar a estabilidade térmica das FBGs em temperaturas de até $(400,0 \pm 0,5)$ °C foi realizado com as FBGs 5 e 6, no qual as redes foram submetidas a quatro tratamentos térmicos. Após cada ciclo de aquecimento as redes eram retiradas imediatamente do forno caracterizando um resfriamento rápido. A FBG 5 foi gravada com a técnica da máscara de fase, utilizando o laser KrF de excímero pulsado, fibra SSMF (*Draktel*). A FBG 6 foi gravada com o laser Nd: YAG, com a mesma técnica e tipo de fibra que a FBG 5, mas a fibra passou pelo processo de hidrogenação antes da gravação.

No primeiro tratamento térmico, as redes foram colocadas no interior do forno dentro de um tubo inox, a temperatura foi elevada para $(200,0 \pm 0,5)$ °C, onde as redes permaneceram por duas horas. Nos três tratamentos térmicos seguintes a temperatura foi inicialmente elevada até $(200,0 \pm 0,5)$ °C por 30 minutos e, então, elevada para $(400,0 \pm 0,5)$ °C e as redes permaneceram neste patamar de temperatura por 2 horas.

Além dos quatro tratamentos térmicos, mais dois ciclos de aquecimento e resfriamento foram realizados nas FBGs 5 e 6, onde a temperatura não ultrapassou os

($350,0 \pm 0,5$) °C, sendo que os espectros das redes foram gravados a cada 50 °C. Cada medida foi novamente adquirida três vezes e o resultado final foi calculado pelas médias dos dados. A dispersão associada com as medidas foi estimada da mesma maneira com descrito anteriormente. O segundo ciclo de aquecimento foi realizado cinco meses após o primeiro para observar a estabilidade térmica.

3.2.3 Procedimento para Tratamento Térmico em Temperaturas Superiores a 400,0 °C com Patamares de Curta Duração

A FBG 7 gravada com o laser Nd: YAG, pela técnica de incidência direta sob a máscara de fase em fibra fotossensível (*Nufern*) foi colocada no interior do forno de laboratório, sendo que a temperatura inicial era de ($25,0 \pm 0,5$) °C. A Figura 16 mostra o diagrama esquemático da programação do forno utilizada no experimento, a FBG permaneceu nos patamares de temperatura por 35 minutos.

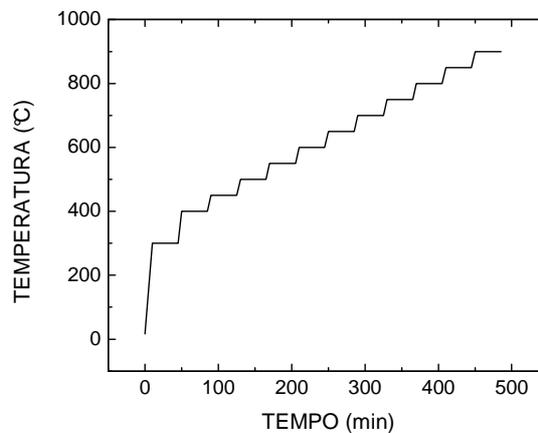


Figura 16 - Representação esquemática do programa de aquecimento do forno.

Três espectros da FBG 7 foram gravados a cada patamar de temperatura e o resultado final foi calculado pelas médias dos dados. A dispersão associada com as medidas foi estimada para um nível de confiança de 68,3 % pela incerteza combinada (JCGM/WG 1, 2008). A incerteza combinada foi calculada considerando o desvio padrão das médias, os erros associados com a resolução do OSA e com a variação de temperatura.

3.2.4 Procedimento para Tratamento Térmico em Temperaturas Superiores a 400,0 °C com Patamares de Longa Duração

As FBGs 8 e 9 foram gravadas com a técnica da máscara de fase com deslocamento do feixe UV, utilizando o laser Nd: YAG e passaram por vários tratamentos térmicos, sendo que os tempos de permanência nos patamares e a temperatura na qual as FBGs eram submetidas foram definidos conforme as observações das variações do comprimento de onda e da refletividade em cada tratamento térmico. Após todos os experimentos as FBGs 8 e 9 eram retiradas imediatamente do forno (resfriamento rápido).

Inicialmente, as FBGs foram aquecidas a $(200,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ por 30 minutos e permaneceram por mais duas horas a $(400,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ e este mesmo tratamento foi realizado mais duas vezes, totalizando três ciclos com temperatura de até $(400,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$. Após este experimento, elas foram submetidas a temperatura de $(500,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ por 6 horas e 30 minutos. O próximo aquecimento foi a $(600,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$, onde as FBGs permaneceram por mais 6 horas e 40 minutos.

Um ciclo de aquecimento e resfriamento foi realizado para verificar a variação do comprimento de onda com a temperatura, assim como a refletividade das FBGs. A temperatura máxima do aquecimento foi de $(600,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$, conforme a Figura 17.

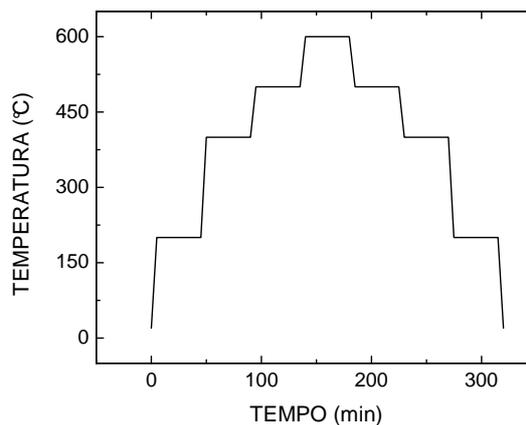


Figura 17 - Representação esquemática do programa de aquecimento e resfriamento do forno.

O tratamento térmico a $(700,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ foi realizado em quatro etapas. Na primeira etapa, o tempo de permanência no patamar a $(700,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ foi de 9 horas e 30 minutos. Na segunda etapa, as redes ficaram 7 horas e 30 minutos no interior do forno, na terceira etapa, 8 horas e, finalmente na última etapa do tratamento térmico a $(700,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$, as FBGs

ficaram 7 horas no interior do forno, totalizando 32 horas a $(700,0 \pm 0,5)$ °C. Sempre após as etapas de aquecimento as FBGs sofriam um resfriamento rápido.

Numa etapa posterior a temperatura foi elevada para $(800,0 \pm 0,5)$ °C. Foram realizados dois aquecimentos nesta temperatura, um deles com tempo de 7 horas e o outro de 5 horas.

O próximo experimento consistiu em deixar apenas a FBG 8 por 30 horas a $(800,0 \pm 0,5)$ °C e após este experimento, um novo ciclo de aquecimento e resfriamento foi realizado para comparar a evolução térmica da FBG com os ciclos realizados anteriormente.

As FBGs 8 e 9 foram aquecidas novamente, mas a temperatura à qual elas foram submetidas foi de $(900,0 \pm 0,5)$ °C. Este procedimento foi realizado em 3 dias consecutivos, sendo que o tempo total que as redes permaneceram a $(900,0 \pm 0,5)$ °C foi de 24 horas. Devido ao comportamento apresentado pela FBG 9, que será mostrado no próximo capítulo, optou-se por realizar mais 24 horas de tratamento térmico na temperatura de $(900,0 \pm 0,5)$ °C. Este experimento também foi dividido em 3 dias, sendo que as redes permaneceram no interior do forno 8 horas a cada dia.

3.2.5 Resultados dos Tratamentos Térmicos em Temperaturas Inferiores a 400,0 °C com Patamares de Curta Duração

As redes permaneceram dentro do forno Jung em temperaturas entre a ambiente e $(425,0 \pm 0,5)$ °C, programada conforme Figura 15. As FBGs 2 e 4 foram retiradas do forno imediatamente após a temperatura ter permanecido 45 minutos no patamar a $(425,0 \pm 0,5)$ °C. As FBGs 1 e 3 permaneceram no interior do forno, quando este foi desligado, para um resfriamento lento, conforme o forno trocava calor com o ambiente. Somente no dia seguinte, as FBGs eram retiradas do forno e era realizada a aquisição espectral, para acompanhar a evolução do comprimento de onda.

A Figura 18 mostra a evolução do comprimento de onda em três ciclos de aquecimento e resfriamento para as FBGs 1 e 2. Após o forno ser desligado, a FBG 1 permaneceu em seu interior, enquanto que a FBG 2 foi retirada imediatamente. Após cada ciclo os espectros das redes foram gravados à temperatura ambiente, e um novo ciclo de aquecimento foi realizado. A resposta térmica da FBG apresenta um comportamento não linear (PAL *et al*, 2004), sendo que esta resposta pode ser aproximada por retas, para temperaturas inferiores e superiores a aproximadamente $(225,0 \pm 0,5)$ °C.

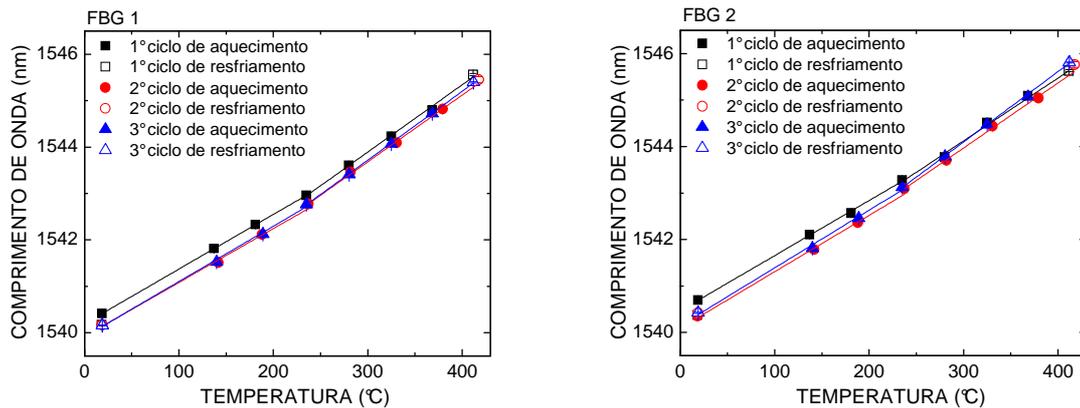


Figura 18 - Evolução térmica do comprimento de onda das FBGs 1 e 2 em três ciclos de aquecimento e resfriamento.

Assim, o ajuste linear realizado para cada ciclo de aquecimento foi dividido em duas partes (I e II). A parte I corresponde à evolução térmica do comprimento de onda entre a temperatura ambiente e aproximadamente $(225,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ e a parte II, entre $(225,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ e $(425,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$.

No primeiro ciclo de aquecimento a evolução térmica para a FBG 1 foi de $11,78 \pm 0,10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ e $14,49 \pm 0,15 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, respectivamente para as partes I e II. Depois do resfriamento lento, a variação no comprimento de onda em relação ao valor inicial foi de $\delta\lambda_1 = -0,24 \pm 0,02 \text{ nm}$. Enquanto que a FBG 2 que passou por um resfriamento rápido a variação foi de $\delta\lambda_2 = -0,35 \pm 0,02 \text{ nm}$ e a evolução térmica do comprimento de onda foi de $11,85 \pm 0,09 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ (parte I) e $13,51 \pm 0,12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ (parte II). Quando o segundo ciclo foi realizado, a evolução térmica do comprimento de onda não apresentou grandes modificações. Para a FBG 1, $11,62 \pm 0,10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ (parte I) e $14,39 \pm 0,21 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ (parte II) e para a FBG 2, a evolução térmica foi de $12,13 \pm 0,10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ (parte I) e $13,98 \pm 0,21 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ (parte II).

Na última medida realizada depois do terceiro ciclo de resfriamento, o comprimento de onda para ambas as FBGs apresentaram estabilidade térmica, pois a variação do comprimento de onda está dentro da faixa de erros; $\delta\lambda_1 = -0,01 \pm 0,01 \text{ nm}$ e $\delta\lambda_2 = 0,00 \pm 0,01 \text{ nm}$. Portanto, não apresentou diferença entre os resfriamentos rápido e lento.

Os espectros das FBGs foram sempre medidos em reflexão, de forma qualitativa, e portanto os valores obtidos não são absolutos.

A Figura 19 mostra a evolução térmica da refletividade entre $(25 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ e $(425,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$, para as FBGs 1 e 2. As linhas são guias visuais que acompanham a evolução térmica no ciclo de aquecimento (linha contínua) e de resfriamento (linha pontilhada).

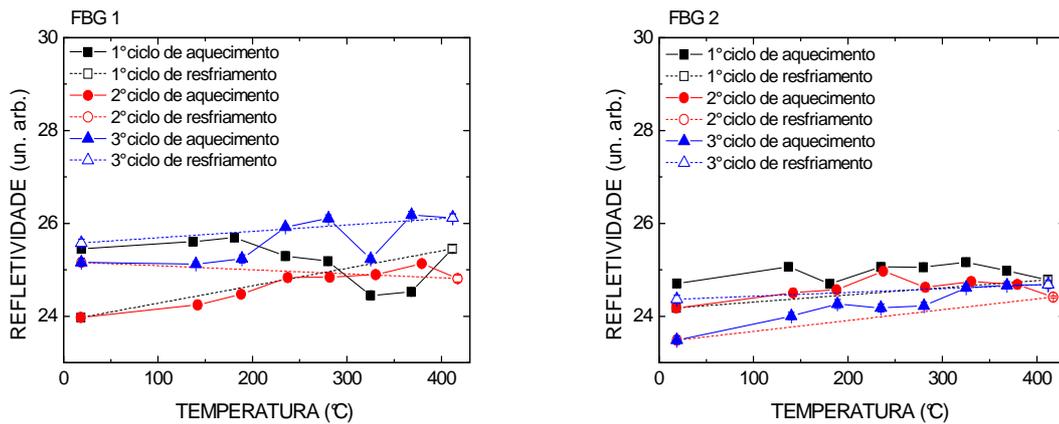


Figura 19 - Evolução térmica da refletividade das FBGs 1 e 2 em três ciclos de aquecimento e resfriamento.

A refletividade permanece aproximadamente constante nos três ciclos de aquecimento e resfriamento. As oscilações são provavelmente resultantes da movimentação da fibra devido a correntes de convecção causadas pelo aumento da temperatura.

A Figura 20 mostra a evolução do comprimento de onda em três ciclos de aquecimento e resfriamento quando as FBGs gravadas em fibra SMF hidrogenadas foram utilizadas (FBG 3 e 4).

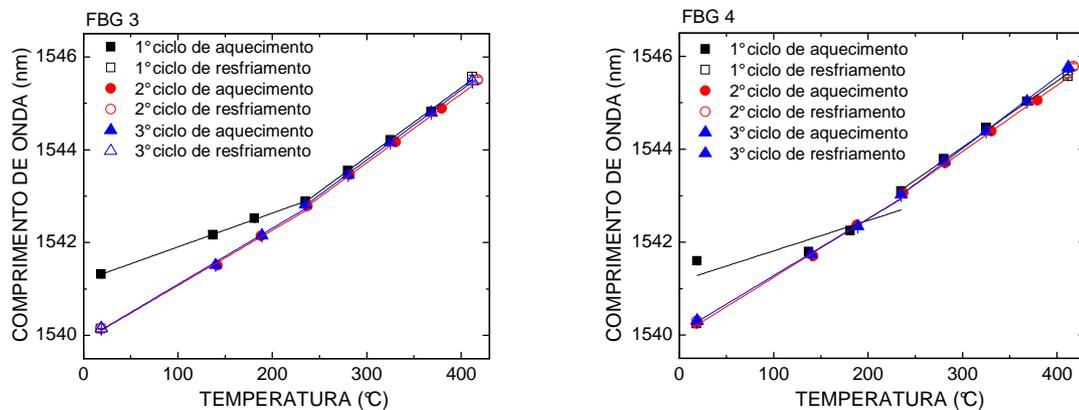


Figura 20 - Evolução térmica do comprimento de onda das FBGs 3 e 4 em três ciclos de aquecimento e resfriamento.

No primeiro ciclo de aquecimento as duas FBGs (3 e 4) apresentam comportamentos diferentes em comprimento de onda quando comparadas com as FBGs 1 e 2. Este comportamento está relacionado com o fato de que as FBGs 3 e 4 foram gravadas um dia antes do tratamento térmico, e ainda havia muito hidrogênio associado ao núcleo da fibra. Depois do primeiro ciclo de resfriamento, a FBG 3 apresentou uma variação de comprimento de onda de $\delta\lambda_3 = -1,18 \pm 0,02$ nm, enquanto que a FBG 4, $\delta\lambda_4 = -1,35 \pm 0,02$ nm.

O segundo ciclo de aquecimento mostra um comportamento linear com o aumento de temperatura ($11,91 \pm 0,10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ e $14,94 \pm 0,20 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ para a FBG 3 nas partes I e II, respectivamente) e ($12,61 \pm 0,10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ e $14,24 \pm 0,21 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ para a FBG 4 nas partes I e II, respectivamente). Depois do segundo ciclo de aquecimento e resfriamento, os comprimentos de onda das FBGs deslocaram $\delta\lambda_3 = 0,01 \pm 0,02 \text{ nm}$ e $\delta\lambda_4 = 0,02 \pm 0,02 \text{ nm}$, quando comparados com o comprimento de onda depois do primeiro ciclo completo.

Após o terceiro ciclo, as FBGs 3 e 4 apresentam estabilidade térmica em comprimento de onda; $\delta\lambda_3 = -0,01 \pm 0,01 \text{ nm}$ e $\delta\lambda_4 = 0,00 \pm 0,01 \text{ nm}$.

A Figura 21 mostra a evolução térmica da refletividade entre $(25,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ e $(425,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$, para as FBGs 3 e 4. Novamente as linhas são como guias visuais que acompanham a evolução térmica no ciclo de aquecimento (linha contínua) e de resfriamento (linha pontilhada).

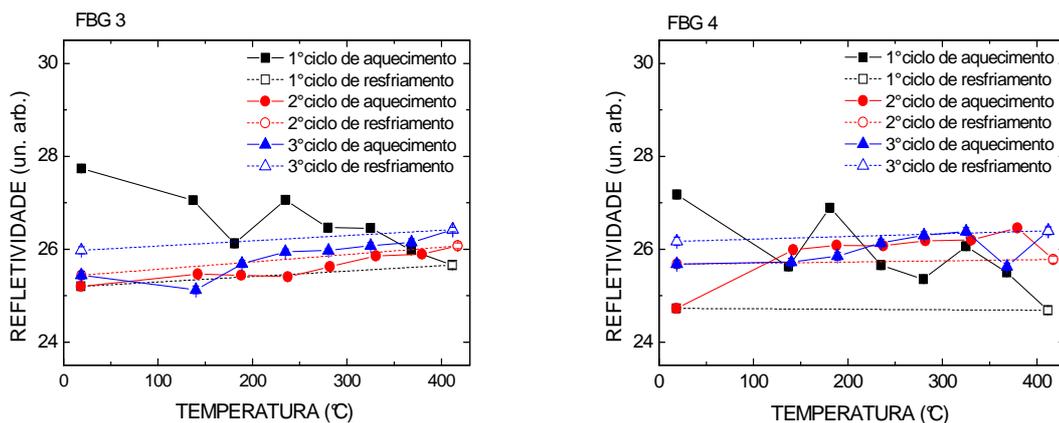


Figura 21 - Evolução térmica da refletividade das FBGs 3 e 4 em três ciclos de aquecimento e resfriamento.

As oscilações são provavelmente resultantes da movimentação da fibra devido as correntes de convecção causadas pelo aumento da temperatura. No primeiro ciclo de aquecimento, a refletividade das FBGs decai, mas permanece aproximadamente constante nos dois últimos ciclos, o que caracteriza a estabilização térmica em refletividade em temperaturas abaixo de $(425,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$. O comportamento observado durante o primeiro ciclo de aquecimento e resfriamento tanto no comprimento de onda de Bragg quanto na refletividade das FBGs gravadas em fibras hidrogenadas pode ser explicado pela difusão do hidrogênio molecular para fora da fibra. Durante a gravação das FBGs em fibra ótica hidrogenada ocorre o crescimento da rede e o deslocamento do comprimento de onda para maiores valores devido ao aumento da modulação gerada no índice de refração. No núcleo exposto ao UV a molécula de hidrogênio se dissocia para formar defeitos GeE' , GeH e GeOH , e conseqüentemente,

aumenta o índice de refração da região exposta e também aumenta o índice efetivo. As diferenças na concentração de hidrogênio entre as regiões exposta e não exposta do núcleo e entre casca e região exposta do núcleo causam a migração de hidrogênio para a região exposta do núcleo, aumentando ainda mais o índice da região exposta e portanto a modulação. Após a gravação o comprimento de onda pode retornar devido à migração do hidrogênio molecular residual para fora da fibra diminuindo o índice de refração efetivo (deslocamento para menores comprimentos de onda) e diminuindo a modulação no índice de refração (diminuição da refletividade). O tratamento térmico acelera o processo de difusão do hidrogênio molecular para fora da fibra, diminuindo o índice de refração efetivo da fibra e também a modulação de índice (MASUDA *et al*, 2004).

O tratamento térmico com patamares de temperatura de curta duração mostrou-se eficaz na estabilização térmica das FBGs, sendo necessários três ciclos de aquecimento e resfriamento para que as FBGs, tanto as gravadas em fibra fotossensível como as gravadas em fibra hidrogenada, apresentassem estabilização térmica. Não foram observadas diferenças significativas na estabilização das FBGs, quando realizados os resfriamentos lento e rápido.

3.2.6 Resultados dos Tratamentos Térmicos em Temperaturas Inferiores a 400,0 °C com Patamares de Longa Duração

Para acompanhar a estabilidade térmica de FBGs submetidas a temperaturas de até $(400,0 \pm 0,5)$ °C, duas FBGs (5 e 6) foram submetidas a quatro tratamentos térmicos (TT) e após cada TT, as redes eram retiradas imediatamente do forno (Tabela 2).

Tabela 2 - Ciclos de aquecimento realizados nas FBGs 5 e 6.

Ciclos de Aquecimento	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Tempo (h)	Temperatura (°C)
1° TT	2	$200,0 \pm 0,5$	-	-
2° TT	0,5	$200,0 \pm 0,5$	2	$400,0 \pm 0,5$
3° TT	0,5	$200,0 \pm 0,5$	2	$400,0 \pm 0,5$
4° TT	0,5	$200,0 \pm 0,5$	2	$400,0 \pm 0,5$

A Figura 22 mostra a evolução térmica da FBG 5 quando submetida aos quatro tratamentos térmicos. No 1° TT a temperatura do forno foi programada para atingir $(200,0 \pm 0,5)$ °C, mas com o passar do tempo ela decaiu para $(180,0 \pm 0,5)$ °C. Nos demais ciclos, a temperatura inicialmente ultrapassou os $(200,0 \pm 0,5)$ °C e após 10 minutos tendeu à estabilizar. Assim como para a temperatura de $(400,0 \pm 0,5)$ °C, que inicialmente atinge

aproximadamente $(420,0 \pm 0,5)$ °C e após um tempo tende ao equilíbrio térmico. Estas oscilações acontecem devido à inércia térmica do forno, uma vez que as resistências de aquecimento do forno promovem variações do fluxo de calor interno do mesmo. Este mesmo efeito foi observado nos demais experimentos.

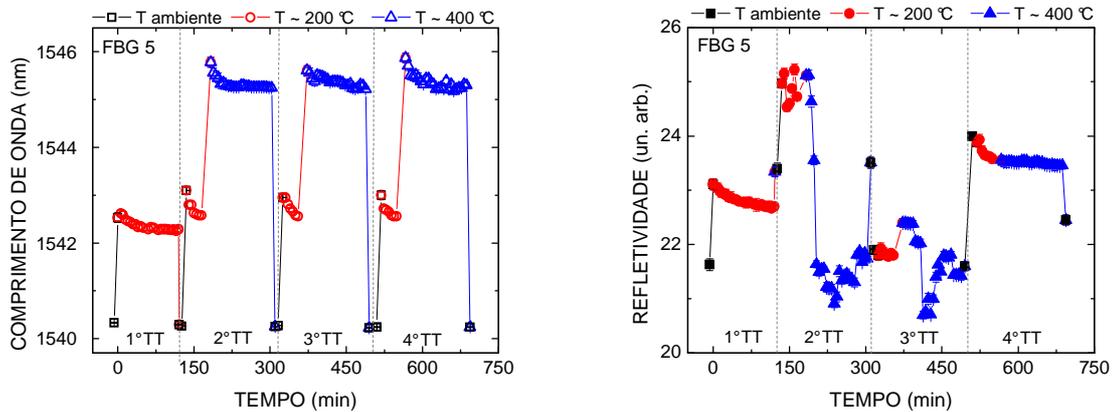


Figura 22 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 5 em quatro tratamento térmico.

A refletividade da FBG 5 durante o 1° TT tende a estabilizar, mas com a manipulação da rede após cada ciclo de aquecimento, há variação na refletividade, pois o simples fato de retirar a FBG do forno pode resultar em curvaturas na fibra que alteram o espectro de reflexão da FBG. Este fator não permite fazer uma comparação entre as refletividades após cada ciclo, uma vez que os valores de refletividade não são absolutos. No 2° TT e no 3° TT a FBG 5 não apresentou um comportamento de tendência, mas novamente no 4° TT, a refletividade tende à estabilização térmica. O comprimento de onda médio a $(400,0 \pm 0,5)$ °C foi de $1545,26 \pm 0,06$ nm, que representa uma evolução térmica de $13,25 \pm 0,14$ pm/°C. Como os experimentos foram realizados em dias diferentes, os dados de comprimento de onda correspondem a temperaturas ambiente levemente diferentes, portanto foi usado o valor de sensibilidade térmica média de cada FBG, para corrigir estes valores para uma mesma temperatura ambiente de $(20,0 \pm 0,5)$ °C. Estes valores correspondem aos dados apresentados na Figura 23. Nesta figura também é apresentado o ajuste exponencial dos dados experimentais, e as linhas pontilhadas representam a separação entre cada um dos tratamentos térmicos realizados.

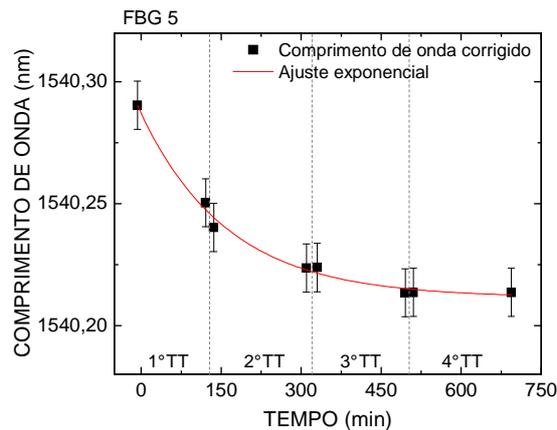


Figura 23 - Evolução do comprimento de onda da FBG 5 corrigido à $(20,0 \pm 0,5)$ °C.

Com o ajuste exponencial realizado nos pontos que representam a posição do comprimento de onda da FBG 5 à $(20,0 \pm 0,5)$ °C, pode-se observar que existe uma tendência à estabilidade do comprimento de onda, mas nos 4 ciclos de aquecimento a estabilidade não foi observada. Com uma extrapolação da curva exponencial e possível estimar um tempo de 32 horas e 30 minutos necessário para que a FBG 5 atinja a estabilidade. Esta estimativa foi realizada considerando como critério de estabilidade a resolução do analisador de espectros óticos utilizado no experimento (± 5 pm).

A evolução do comprimento de onda e da refletividade com a temperatura da FBG 6 colocada no forno juntamente com a FBG 5, está representada na Figura 24.

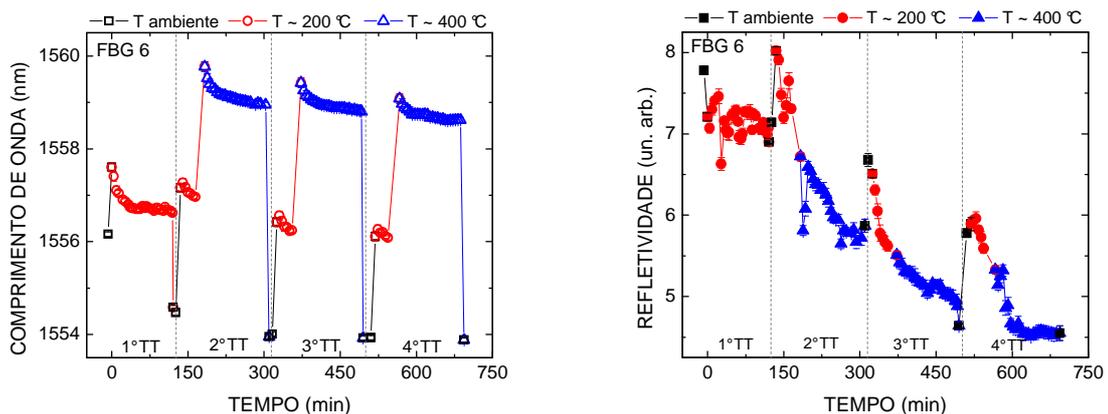


Figura 24 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 6 em quatro tratamento térmico.

A rede gravada em fibra hidrogenada (FBG 6) apresenta um grande deslocamento em comprimento de onda na temperatura ambiente e em refletividade após o primeiro TT devido à difusão do hidrogênio molecular residual para fora da fibra diminuindo o índice de

refração efetivo (deslocamento para menores comprimentos de onda) e diminuindo a modulação de índice (diminuição da refletividade).

Os comprimentos de onda a temperatura ambiente foram corrigidos para uma mesma temperatura ($20,0 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$) e estes dados estão representados na Figura 25, juntamente com um ajuste exponencial, as linhas pontilhadas representam a separação entre cada um dos tratamentos térmicos realizados.

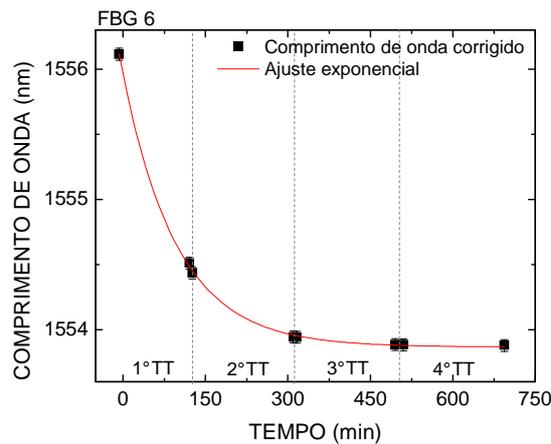


Figura 25 - Evolução do comprimento de onda da FBG 6 corrigido à $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Existe uma tendência à estabilização térmica do comprimento de onda, mas assim como a FBG 5, a FBG 6 não está completamente estabilizada em comprimento de onda. A estabilidade para a FBG 6 aconteceria após 25 horas e 20 minutos, quando realizada uma extrapolação da curva exponencial da Figura 25, também foi considerado como critério de estabilidade a resolução do analisador de espectros óticos utilizado no experimento ($\pm 5 \text{ pm}$).

Dois ciclos de aquecimento e resfriamento foram realizados para as FBGs 5 e 6, como representado na Figura 26. A temperatura máxima foi de $(350,0 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$. O segundo ciclo foi realizado cinco meses após o primeiro. A resposta térmica da FBG apresenta um comportamento não linear (PAL *et al*, 2004), sendo que esta resposta pode ser aproximada por retas, para temperaturas inferiores e superiores a aproximadamente $200,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

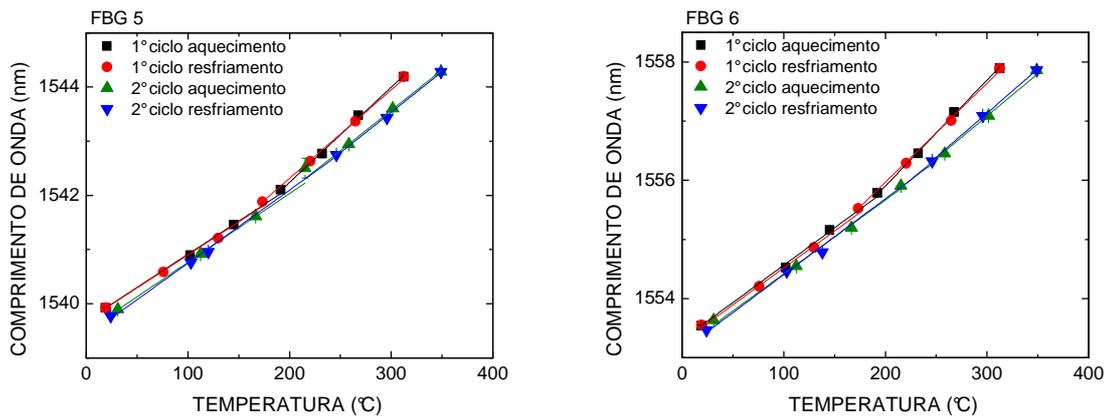


Figura 26 - Evolução do comprimento de onda das FBGs 5 e 6 durante os dois ciclos de aquecimento e resfriamento.

Os ajustes lineares representados na Figura 26 foram realizados em duas partes, da temperatura ambiente até aproximadamente 200,0 °C (Parte I) e de 200,0 °C até ~ 350,0 °C (Parte II). Os dados da evolução térmica do comprimento de onda estão representados na Tabela 3, para os dois ciclos de aquecimento.

Tabela 3 - Evolução do comprimento de onda com a temperatura.

Ciclos	FBG 5 (pm/°C)		FBG 6 (pm/°C)	
	Parte I	Parte II	Parte I	Parte II
1º ciclo de aquecimento	12,2 ± 0,1	17,6 ± 0,5	12,6 ± 0,2	17,9 ± 0,6
1º ciclo de resfriamento	12,2 ± 0,1	16,3 ± 0,3	12,5 ± 0,1	16,7 ± 0,4
2º ciclo de aquecimento	12,7 ± 0,1	14,9 ± 0,2	12,5 ± 0,1	14,3 ± 0,1
2º ciclo de resfriamento	13,5 ± 0,1	14,9 ± 0,2	12,8 ± 0,1	14,9 ± 0,2

A comparação entre os dois ciclos de aquecimento e resfriamento indica que as redes não estavam estáveis, visto que os comprimentos de onda de Bragg a temperatura ambiente e as sensibilidades sofreram alterações após 5 meses, apesar da realização dos tratamentos térmicos até 400,0 °C, os defeitos responsáveis pela formação da rede ainda sofreram alterações quando a rede foi mantida a temperatura ambiente. Aparentemente os defeitos produzidos que estão associados com a presença de hidrogênio apresentaram maior instabilidade, uma vez que foi observada uma maior variação de sensibilidade nesta fibra (hidrogenada) após 5 meses.

A refletividade das duas FBGs manteve-se aproximadamente constante nos ciclos de aquecimento e resfriamento.

O tratamento térmico com patamares de longa duração também se mostrou eficaz na estabilização térmica das FBGs (gravadas em fibra SSMF e SSMF hidrogenada), sendo necessário três ciclos de aquecimento em patamares de temperatura de $(400,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$.

Após aquecer a rede até uma dada temperatura, em patamares de curta ou longa duração, a histerese (variação do comprimento de onda em relação ao ciclo anterior) é drasticamente reduzida e a rede de Bragg pode ser usada em diversas aplicações até a temperatura máxima do tratamento, com uma evolução térmica que depende somente do tipo de fibra.

3.2.7 Resultados dos Tratamentos Térmicos em Temperaturas Superiores a $400,0^\circ\text{C}$ com Patamares de Curta Duração

A FBG 7 foi colocada no interior do forno de laboratório e a temperatura foi progressivamente elevada, permanecendo constante por 35 minutos em cada patamar. A Figura 27 mostra o deslocamento do comprimento de onda da FBG 7 à medida que ocorre o aumento da temperatura. Observa-se a queda da refletividade com o aquecimento do forno. Quando a temperatura chegou a $(900,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ a rede foi completamente apagada.

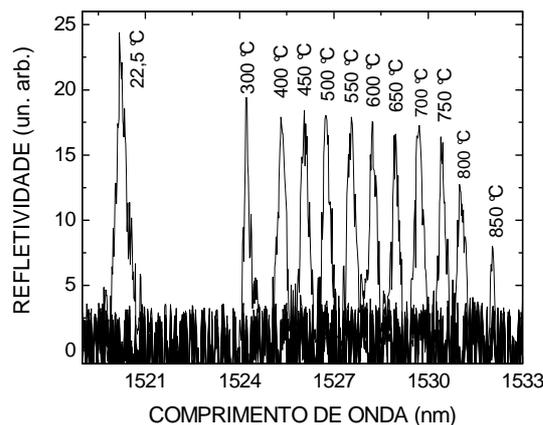


Figura 27 - Evolução do espectro da FBG 7 no interior do forno durante o tratamento térmico.

A Figura 28 mostra os espectros de refletividade e comprimento de onda em função do aumento da temperatura para a FBG 7 mantida em um forno de laboratório até a perda total da refletividade.

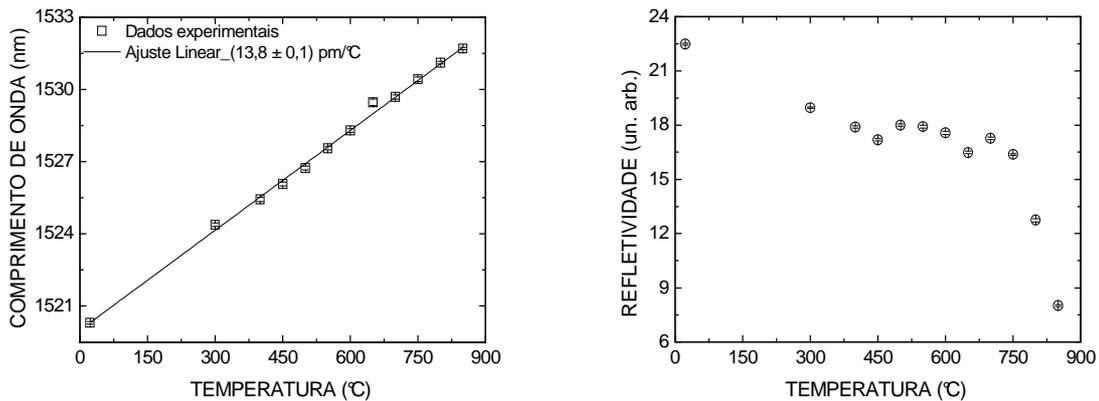


Figura 28 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 7 mantida em forno de laboratório até apagar.

O deslocamento do comprimento de onda com a temperatura apresenta um comportamento que pode ser aproximado por uma função linear para esta faixa total de temperatura, resultando em uma evolução térmica de $(13,8 \pm 0,1) \text{ pm}/^\circ\text{C}$, similar ao encontrado na literatura que é de $13,7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ (MOREY *et al*, 1995). Conforme a temperatura se eleva, ocorre uma queda da refletividade até a completa extinção da FBG 7 em temperaturas ligeiramente superiores a $(850,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$, pois com o aquecimento térmico os defeitos produzidos ópticamente durante a gravação são alterados, destruindo a modulação de índice Δn até a extinção completa da rede.

Os patamares de curta duração em temperaturas elevadas resultaram na extinção completa da modulação de índice de refração responsável pela formação da FBG.

3.2.8 Resultados dos Tratamentos Térmicos em Temperaturas Superiores a $400,0 ^\circ\text{C}$ com Patamares de Longa Duração

As FBGs 8 e 9 foram tratadas termicamente até a temperatura de $(900,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$. Os tratamentos térmicos foram realizados em várias etapas e sempre após o término de cada TT as FBGs eram retiradas do forno para que seu resfriamento fosse rápido.

Inicialmente foram realizados 3 tratamentos térmicos nas FBGs. Os comportamentos do comprimento de onda e da refletividade em função da temperatura ao longo dos três TT iniciais estão representados na Figura 29 e na Figura 30.

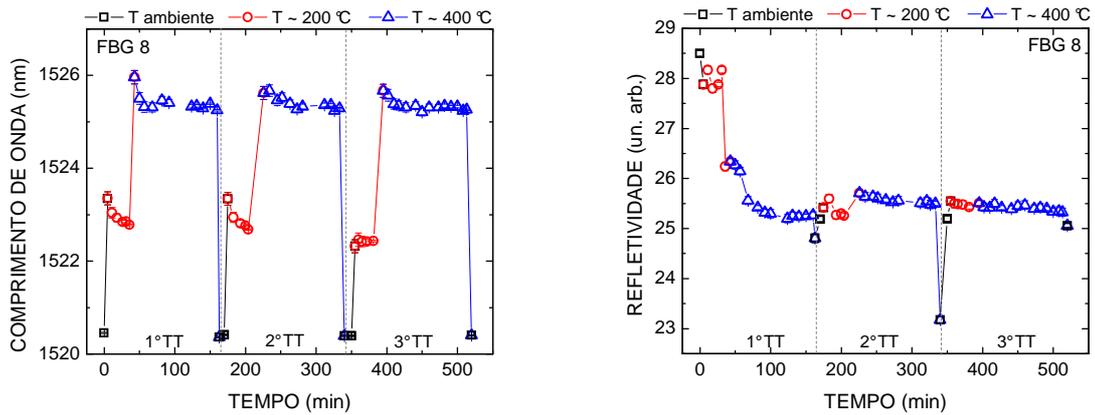


Figura 29 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8.

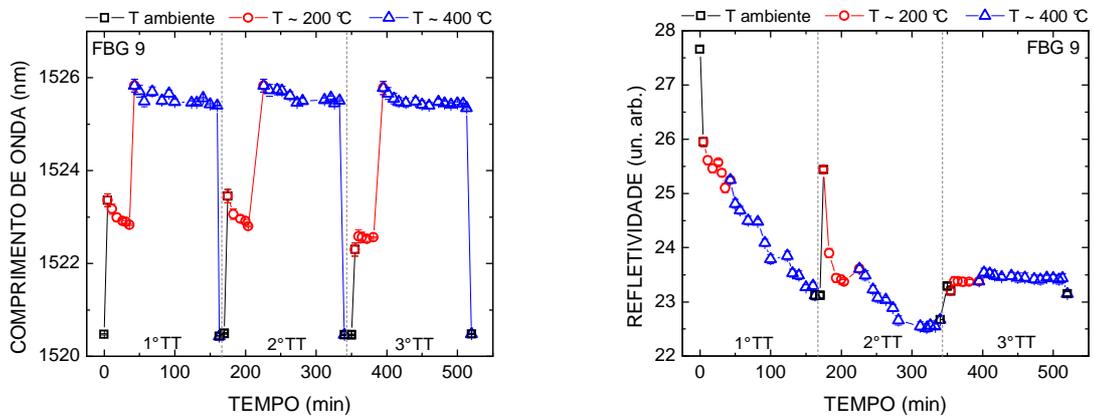


Figura 30 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9.

A FBG 8 tende à estabilidade térmica em comprimento de onda e em refletividade no 2° TT, já a FBG 9 continua a perder refletividade no 2° TT e tende à estabilidade somente no 3° TT, este evento está associado a presença de hidrogênio na estrutura vítrea da FBG 9 que foi gravada em fibra SMF hidrogenada. O aquecimento levou à difusão do hidrogênio molecular e consequentemente a perda de refletividade e o deslocamento em comprimento de onda.

No 4° TT realizado nas FBGs 8 e 9 foi elevada a temperatura para $(500,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$, estes dados estão representados na Figura 31 e na Figura 32.

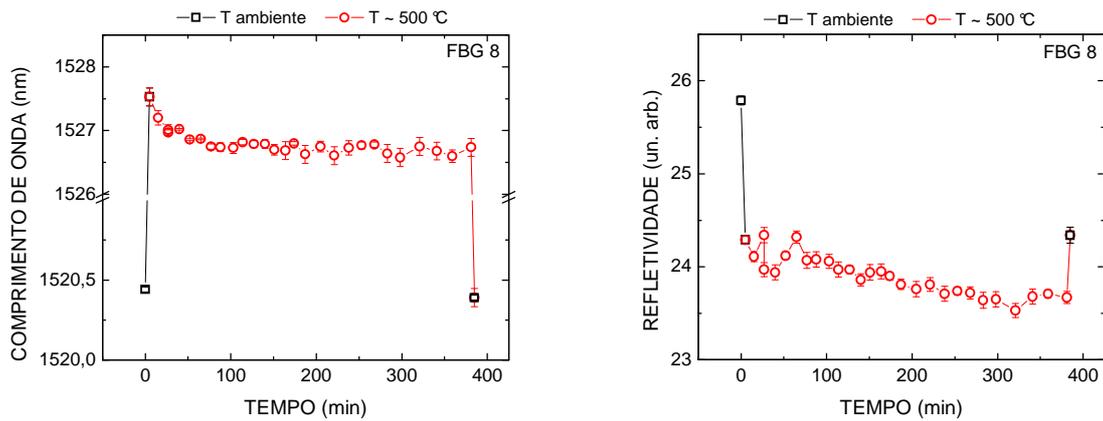


Figura 31 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 no 4º TT.

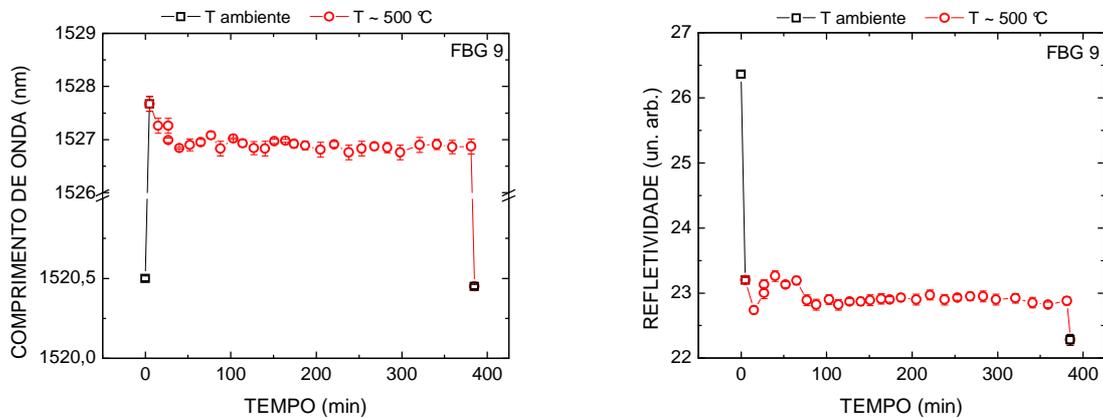


Figura 32 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 no 4º TT.

As variações em comprimento de onda (principalmente no início do patamar de temperatura) estão relacionadas com as variações de temperatura do forno, no início do patamar a temperatura é superior àquela em que o forno foi programado. Ambas as FBGs mantêm a estabilidade em comprimento de onda. A FBG 8 apresenta uma pequena variação na refletividade e a FBG 9 mantém a refletividade constante durante o experimento. São observadas grandes variações na refletividade das FBGs à temperatura ambiente antes e depois do tratamento térmico, que estão relacionadas à manipulação do dispositivo quando foram retiradas do interior do forno, podendo ocasionar curvaturas na fibra, gerando diferenças no espectro de reflexão das FBGs.

O 5º TT foi a $(600,0 \pm 0,5) \text{ } ^\circ\text{C}$, onde as redes permaneceram no interior do forno por 6 h e 40 minutos (Figura 33 e Figura 34).

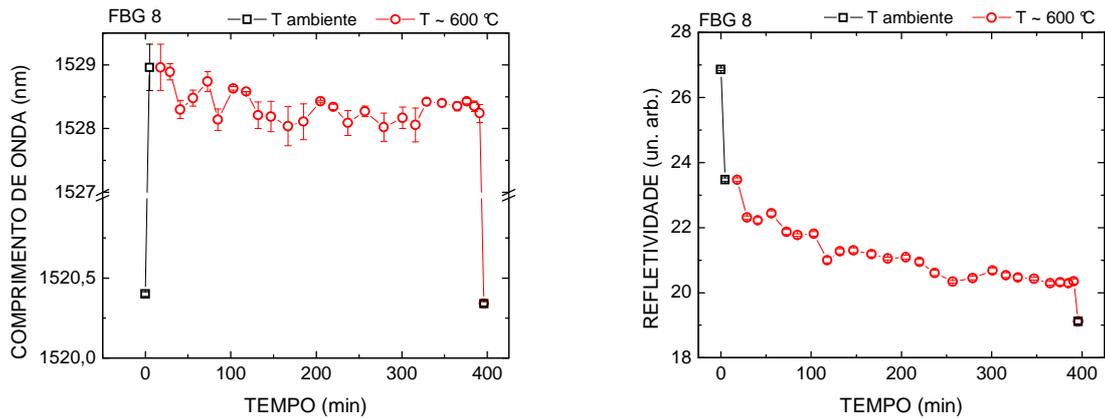


Figura 33 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 no 5° TT.

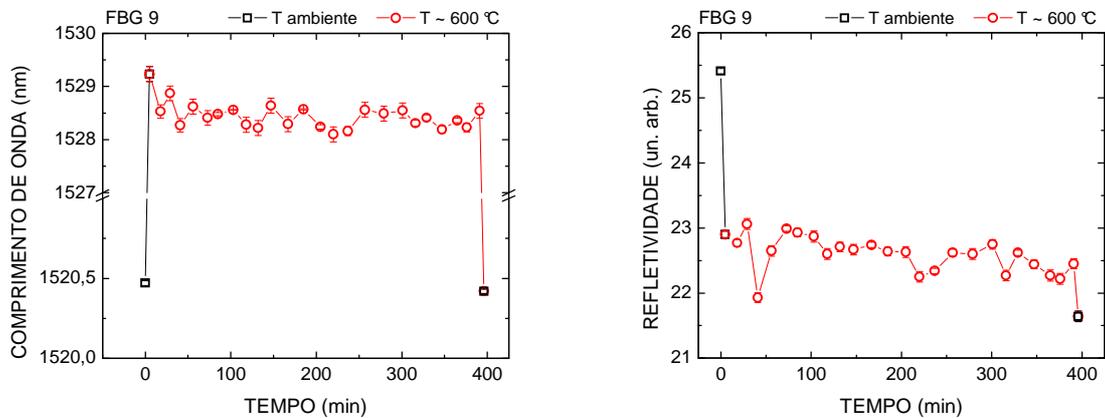


Figura 34 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 no 5° TT.

Não foram observadas grandes variações no comprimento de onda das FBGs, novamente observa-se uma tendência para menores valores na refletividade para a FBG 8, enquanto que a refletividade da FBG 9 não mostra grandes variações. As variações na refletividade das FBGs à temperatura ambiente antes e depois do tratamento térmico estão relacionadas com a manipulação do dispositivo quando retiradas do interior do forno, como foi mencionado anteriormente.

O próximo experimento consistiu em aquecer e resfriar o forno até a temperatura máxima de $(600,0 \pm 0,5)$ °C. A Figura 35 mostra a evolução do comprimento de onda (com ajuste linear) e da refletividade (linha para auxílio visual) para a FBG 8 e a Figura 36 para a FBG 9.

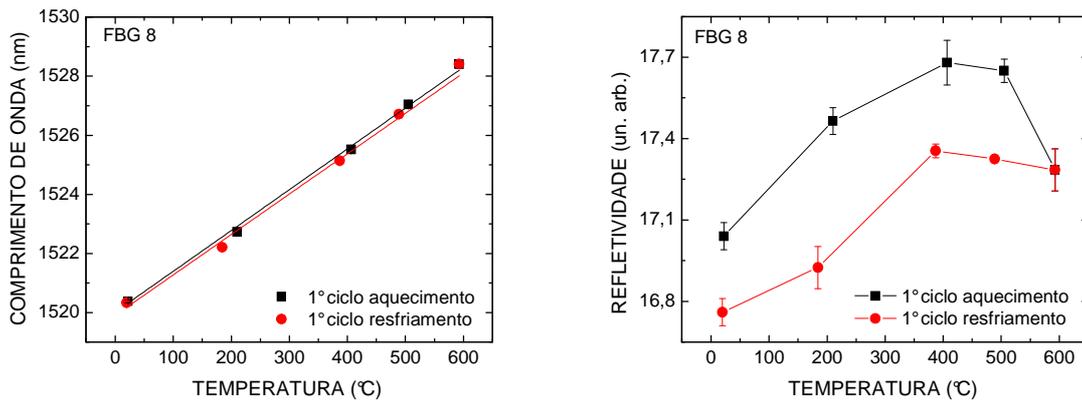


Figura 35 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 no ciclo de aquecimento e resfriamento.

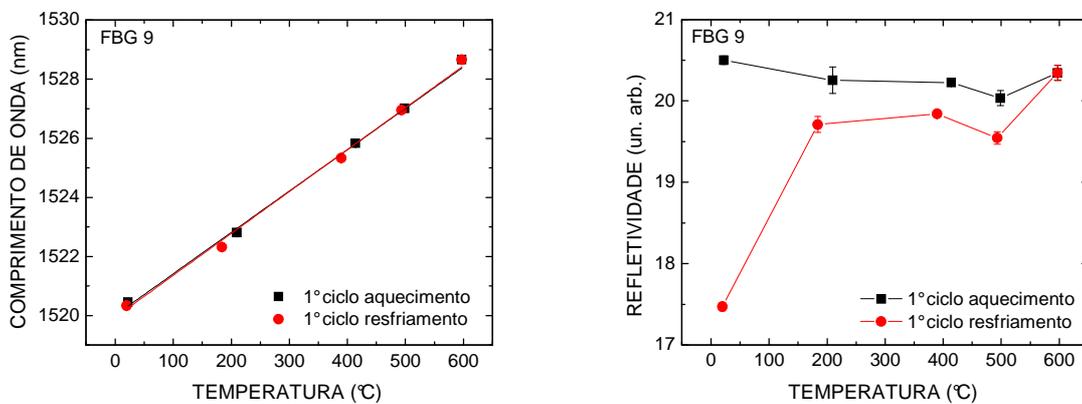


Figura 36 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 no ciclo de aquecimento e resfriamento.

A evolução do comprimento de onda com a temperatura nos ciclos de aquecimento e resfriamento estão representados na Tabela 4. Considerando as incertezas nas medidas, as sensibilidades térmicas são praticamente as mesmas, mas a refletividade continua a diminuir após o ciclo de resfriamento.

Tabela 4 - Evolução térmica do comprimento de onda para as FBGs 8 e 9.

	FBG 8 (pm/°C)	FBG 9 (pm/°C)
1º ciclo de aquecimento	$13,8 \pm 0,2$	$14,0 \pm 0,2$
1º ciclo de resfriamento	$13,7 \pm 0,2$	$14,2 \pm 0,1$

Após o ciclo de aquecimento e resfriamento as FBGs 8 e 9 foram aquecidas novamente. Os tratamentos térmicos à $(700,0 \pm 0,5)$ °C foram realizados em 4 etapas (6º TT, 7º TT, 8º TT e 9º TT), conforme a Figura 37 e a Figura 38.

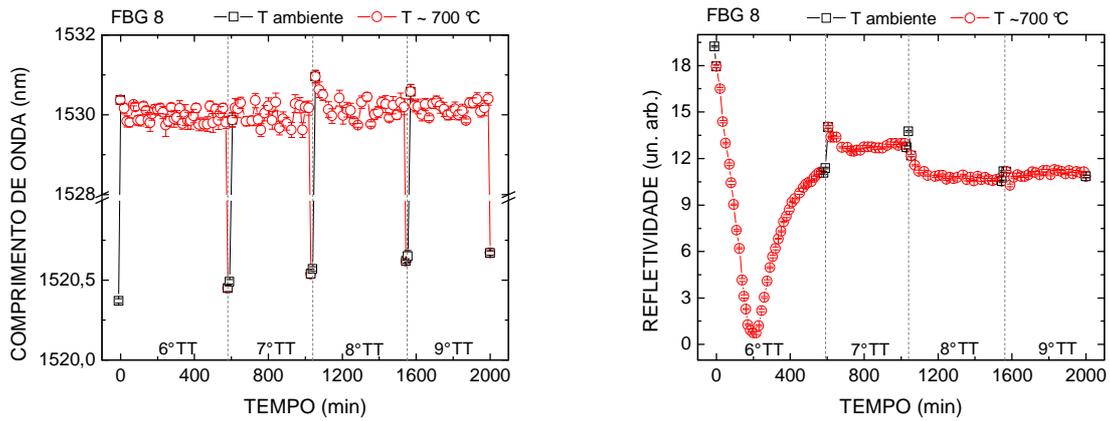


Figura 37 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 a $(700,0 \pm 0,5)$ °C.

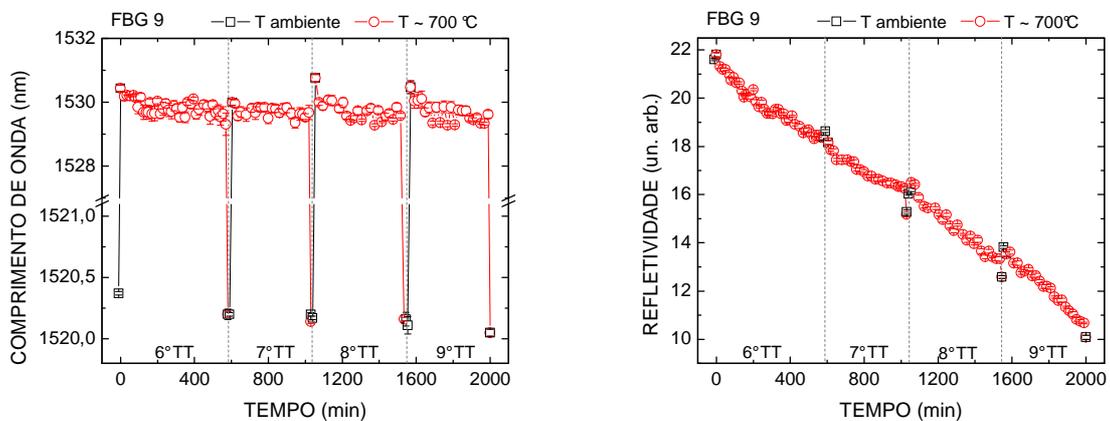


Figura 38 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 a $(700,0 \pm 0,5)$ °C.

Na primeira etapa do experimento, o tempo no patamar foi maior para poder observar a regeneração da FBG 8 que praticamente apagou após 3 horas em $(700,0 \pm 0,5)$ °C e no final do 6° TT a sua refletividade era constante. A FBG 9 teve uma redução de sua refletividade ao longo de todo o TT na temperatura de $(700,0 \pm 0,5)$ °C.

O processo de alteração do Δn deve ser diferente acima de uma determinada temperatura, T^* , que depende do tipo de fibra e das condições de gravação. A FBG 8 regenerou a $(700,0 \pm 0,5)$ °C, portanto neste momento $\Delta n = 0$, pois a refletividade da rede é praticamente nula. Nesta temperatura T^* , o índice de refração exposto à radiação UV durante a gravação (n_{exp}) diminui e o índice de refração não exposto à radiação UV durante a gravação (n_{n-exp}) aumenta em uma proporção considerável, de forma que a refletividade decaiu repentinamente. Os defeitos gerados ópticamente deixam de existir e os defeitos estruturais causados pela exposição da rede a elevada temperatura passam a atuar e a rede reaparece.

A FBG 8 depois de regenerada permanece aproximadamente constante em refletividade e em comprimento de onda. O comprimento de onda se mantém constante, pois

o n_{eff} passa a não ser mais afetado pela temperatura na qual a regeneração ocorreu. Ou seja, os defeitos estruturais gerados pela T^* são estáveis nesta temperatura. Contudo, para a FBG 9, a refletividade continua a decair após os diversos tratamentos térmicos devido a continuada alteração no Δn pela temperatura.

Optou-se por elevar a temperatura para $(800,0 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$ para observar se a FBG 9 poderia ser regenerada numa temperatura superior a temperatura de regeneração da FBG 8 e também para observar o comportamento da FBG 8 regenerada numa temperatura superior a da regeneração. Os resultados estão representados na Figura 39 e na Figura 40.

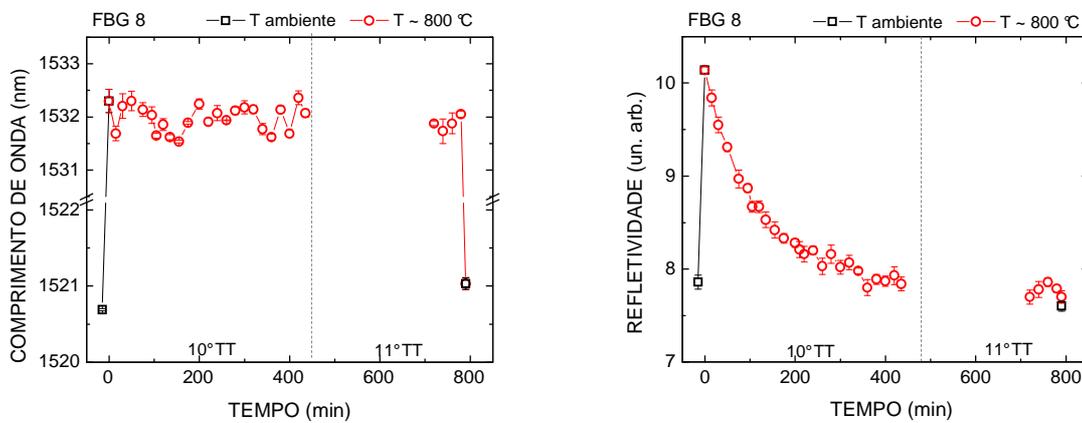


Figura 39 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 a $(800,0 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$.

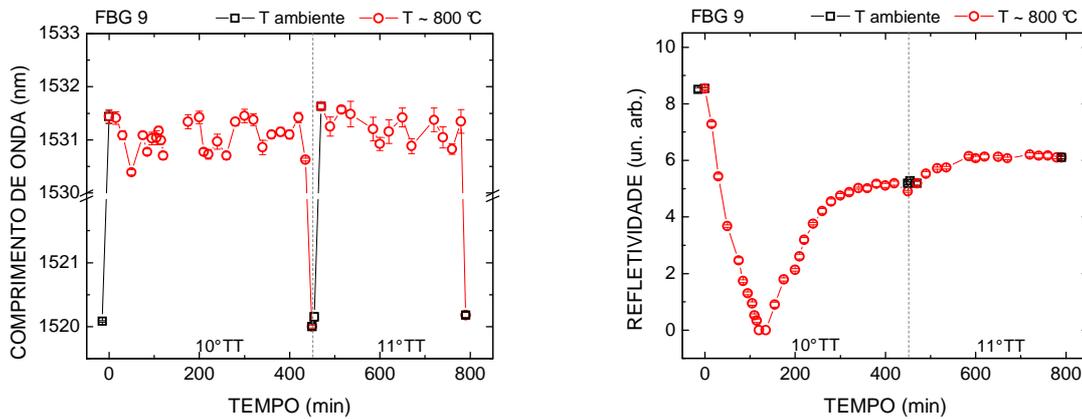


Figura 40 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 a $(800,0 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$.

Na temperatura de $(800,0 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$ foram realizados dois tratamentos térmicos (10° TT e 11° TT) com as duas FBGs. No 10° TT a FBG 9 também apresentou o processo de regeneração e a FBG 8 decaiu em refletividade e após a retirada do forno não foi observado o espectro devido a um imprevisto que somente foi constatado no 11° TT . A refletividade da FBG 9 regenerada permaneceu aproximadamente constante durante o 11° TT .

Numa etapa posterior, a FBG 8 foi novamente colocada no forno a $(800,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ e foi monitorada por 30 horas consecutivas, os resultados estão apresentados na Figura 41 e este foi o 12º tratamento térmico.

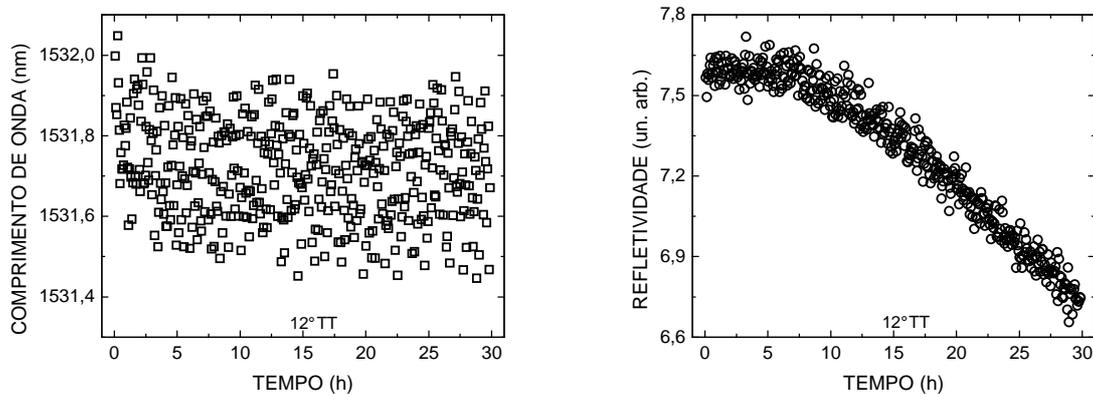


Figura 41 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 a $(800,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ por 30 horas.

O comprimento de onda mostra uma oscilação que corresponde às mudanças de temperaturas do forno. Em 30 horas a FBG 8 apresentou uma queda de refletividade.

As redes foram submetidas (Figura 42 e Figura 43) a um novo ciclo de aquecimento e resfriamento até $(700,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$.

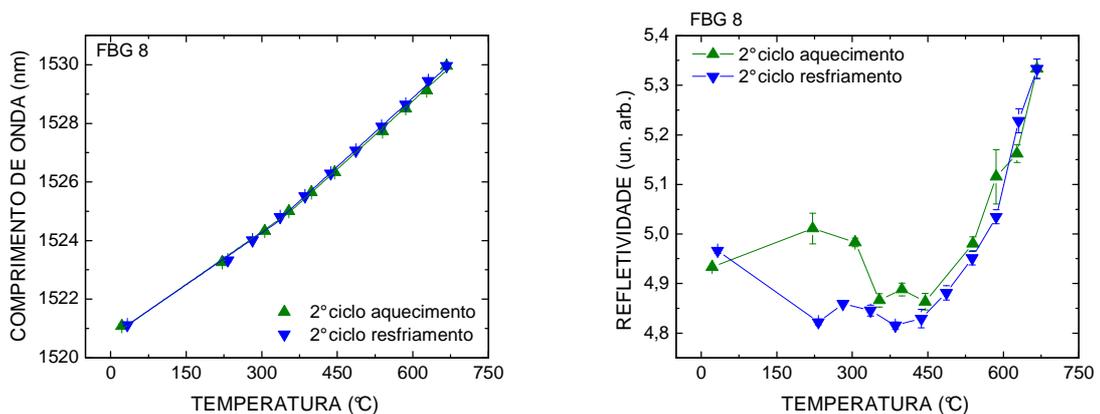


Figura 42 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 no segundo ciclo de aquecimento e resfriamento até $(700,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$.

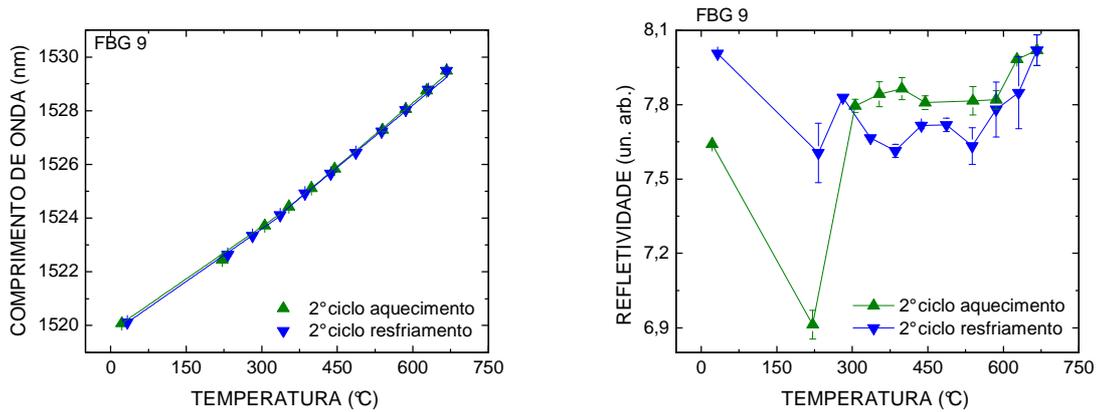


Figura 43 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 no segundo ciclo de aquecimento e resfriamento até $(700,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$.

As FBGs mostraram comportamento de estabilidade térmica com pequena variação na refletividade. Os ajustes lineares no segundo ciclo de aquecimento e resfriamento foram realizados em duas partes: da temperatura ambiente até aproximadamente 350°C (Parte I) e de 350°C até o final (Parte II). Os dados da evolução do comprimento de onda com a temperatura estão indicados na Tabela 5.

Tabela 5 - Evolução térmica do comprimento de onda para as FBGs 8 e 9 no segundo ciclo de aquecimento.

	FBG 8 (pm/°C)		FBG 9 (pm/°C)	
	Parte I	Parte II	Parte I	Parte II
2º ciclo de aquecimento	$12,0 \pm 0,2$	$15,5 \pm 0,1$	$13,0 \pm 0,1$	$15,8 \pm 0,2$
2º ciclo de resfriamento	$11,8 \pm 0,1$	$15,7 \pm 0,1$	$13,1 \pm 0,1$	$15,4 \pm 0,1$

As sensibilidades térmicas referentes à Parte I são ligeiramente inferiores às sensibilidades apresentadas pelas redes no primeiro ciclo de aquecimento e resfriamento (Tabela 4) e as sensibilidades relativas à Parte II são superiores. Estes dados podem estar relacionados a diferentes defeitos que foram criados e/ou modificados durante a regeneração, resultando em diferentes sensibilidades.

Após o segundo ciclo de aquecimento as FBGs foram submetidas à temperatura de $(900,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ por 48 horas, dividido em seis partes (13º TT ao 18º TT). Os primeiros foram realizados em três dias consecutivos de 8 horas por dia e os últimos três TT também foram realizados em três dias consecutivos (de 8 horas cada), mas quatro semanas depois, estes dados estão representados na Figura 44 e na Figura 45.

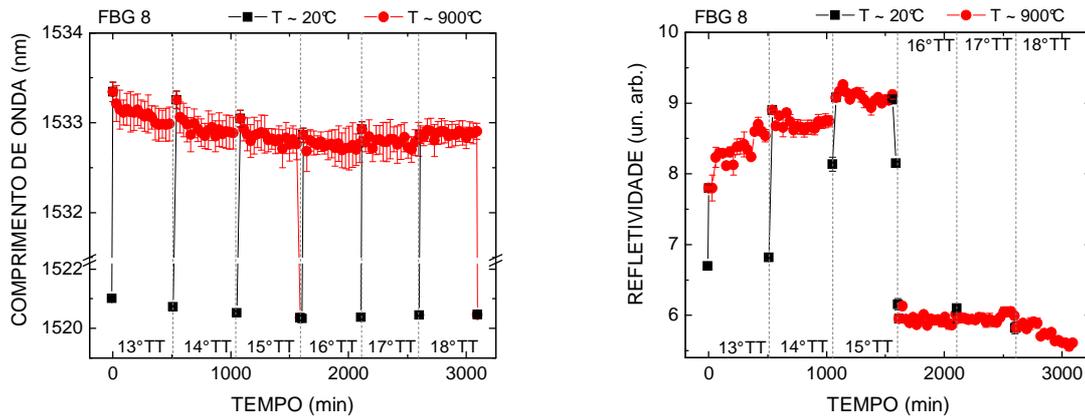


Figura 44 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 8 a $(900,0 \pm 0,5)$ °C.

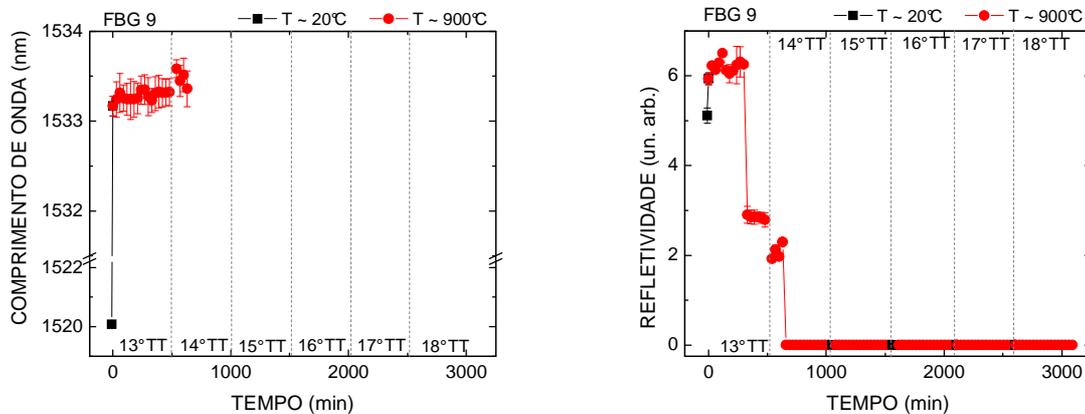


Figura 45 - Evolução térmica do comprimento de onda e da refletividade da FBG 9 a $(900,0 \pm 0,5)$ °C.

Na primeira semana, a FBG 8 apresentou uma pequena variação no comprimento de onda para menores valores, tendendo a estabilidade na semana seguinte. Seu espectro de refletividade tornou-se mais intenso na primeira semana, mas perdeu refletividade durante o período de quatro semanas, em que permaneceu a temperatura ambiente. Durante o 16° TT e 17° TT a refletividade permaneceu aproximadamente estável, apresentando um leve decaimento no 18° TT.

A FBG 9 iniciou o 13° TT estável em comprimento de onda e em refletividade, mas após 5 horas a $(900,0 \pm 0,5)$ °C perdeu refletividade. No 14° TT, o espectro da FBG 9 permaneceu visível por apenas 1 hora e no demais TT não foi observado mais nenhum sinal.

Os tratamentos térmicos com patamares de longa duração em temperaturas elevadas ocasionam a destruição e subsequente regeneração das FBGs, sendo que a temperatura de regeneração depende das características de cada FBG, como o tipo de fibra e as condições de gravação. Para temperaturas iguais ou inferiores a temperatura de regeneração, as FBGs

apresentam estabilidade térmica. No entanto, em temperaturas superiores as FBGs regeneradas decaem.

3.3 GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG NO IT-UA

Em um segundo momento, este trabalho foi desenvolvido no Instituto de Telecomunicações na Universidade de Aveiro em Portugal (IT-UA), com o objetivo de produzir diferentes tipos de FBGs com gorgeio para aplicação em telecomunicações.

O Laboratório de Produção e Teste de Componentes Óticos foi utilizado para o desenvolvimento do trabalho. Os principais equipamentos utilizados foram os dispositivos de posicionamento de precisão nanométrica e o laser UV (KrF) que opera em 248 nm (*BraggStar S-Industrial LN*) e pode ser acionado em modo contínuo ou pulsado. Com este sistema é possível gravar redes pela técnica da máscara de fase, com deslocamento do feixe UV e por colagem das franjas de interferência, resultando em redes de Bragg de elevada qualidade, redes com gorgeio e estruturas complexas.

No sistema de gravação, como mostra a Figura 46, a luz laser é refletida por cinco espelhos fixos que fazem com que o feixe UV seja elevado até um espelho móvel mostrado em mais detalhes na Figura 47.

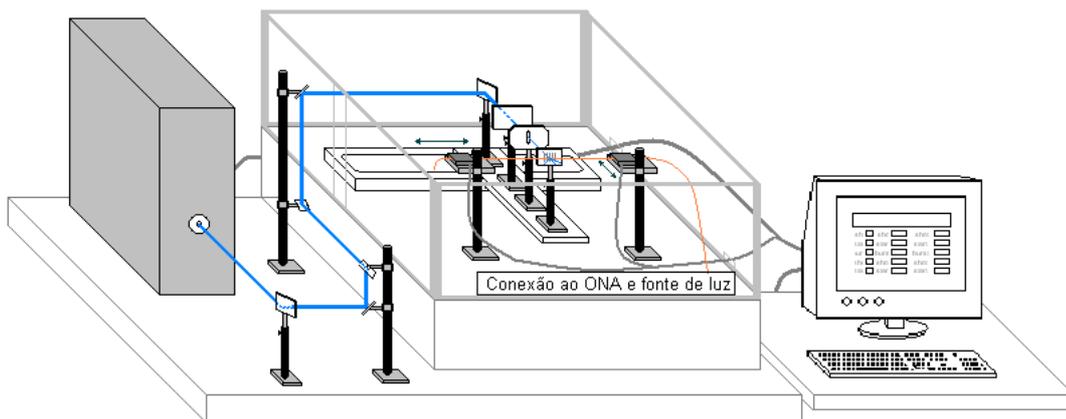


Figura 46 - Diagrama esquemático do sistema de gravação de FBGs.

Após ser refletido pelo espelho móvel, o feixe UV passa pela fenda (*Melles Griot* com largura ajustável de 0 a 4 mm com resolução de 1,5 μm .), que seleciona a porção do feixe de maior intensidade e com largura referente à gravação desejada e é focalizado por uma lente cilíndrica, com distância focal de 20 cm, para incidir na fibra ótica após ser difratado

pela máscara de fase. Todo o sistema está posicionado sobre uma mesa suspensa através de ar comprimido (*Newport RS4000*) para minimizar as perturbações mecânicas.



Figura 47 - Foto detalhada do sistema de gravação de FBGs.

Para a gravação de FBGs, a fibra ótica foi conectada ao ONA (*Optical Network Analyzer*) de forma a observar o espectro da FBG, em reflexão e/ou transmissão, em tempo real com resolução de 0,01 nm, sendo que a luz refletida pela FBG foi fornecida pelo *Agilent 8164B Lightwave Measurement System* (1260 a 1640 nm). Todo o sistema de gravação é automatizado. Diversos parâmetros podem ser manipulados a partir de uma interface em *Labview*, onde é possível selecionar o modo de disparo do laser (contínuo ou pulsado), número de pulsos, frequência do laser, o alinhamento da fibra com a máscara de fase, o comprimento da rede, além de outros parâmetros. Em todas as gravações o laser foi emitido em pulsos.

Antes da gravação, o acrilato da fibra foi retirado e a limpeza da mesma foi efetuada com álcool isopropílico e então, a fibra foi posicionada em garras magnéticas de forma a garantir que permanecesse esticada durante todo o processo de gravação. A fibra pode deslocar-se em movimentos perpendiculares à máscara de fase, aproximando-se quando necessário, de forma que a fibra esteja posicionada na zona de sobreposição dos feixes, mas sem ocorrer o contato da fibra com a máscara de fase, evitando possíveis danos. Para controlar os movimentos da fibra, é usado um controlador motorizado (*XPS Controller, Newport*) conectado a um computador, os posicionadores (*Miniature Linear Stage, MFA-CC*) possuem resolução de 0,0174 μm . Há uma interface que permite a visualização em tempo real da posição da fibra, permitindo um alinhamento automático através de uma figura fornecida por uma câmera posicionada próximo da fibra/máscara de fase (Figura 48).



Figura 48 - Interface de visualização da aproximação máscara de fase/fibra.

Os movimentos do posicionador principal (resolução máxima de 1 nm), o qual movimenta toda a plataforma que contém o posicionador micrométrico (estágio de translação *ILS-PP* com resolução de 0,5 μm), um dos espelhos de redirecionamento do feixe UV, a fenda, a lente cilíndrica e a máscara de fase em relação a fibra (que se encontra estática), são realizados por um *software* a partir de uma placa *Unidex 500*. Para alimentar o motor do posicionador principal é utilizado um amplificador (*DR500*) que fornece potência após ordens dadas a partir da placa *Unidex 500* acoplada a um computador, permitindo o deslocamento gradual de todo o conjunto, de modo que o feixe UV incida na seção da fibra destinada à gravação da rede de Bragg.

3.3.1 Método de Gravação de FBGs Uniformes por Colagem das Franjas de Interferência

As redes de Bragg originadas a partir do método de colagem das franjas de interferência são compostas por várias subredes gravadas consecutivamente ao longo do comprimento da fibra. Neste processo o posicionador principal foi movimentado, logo todo o conjunto (posicionador micrométrico/espelho/fenda/lente/máscara de fase) deslocou-se em relação à fibra. Para a movimentação do posicionador principal foi necessário fornecer uma lista de dados com os parâmetros de deslocamento, que eram relacionados com o período da máscara de fase, com o comprimento da rede e com a abertura da fenda.

Na gravação de redes de Bragg utilizando uma máscara de fase com período de 1065 nm, o período da FBG resultante foi de $\Lambda = 532,5$ nm, que corresponde à metade do período da máscara de fase. Para a gravação de uma FBG com aproximadamente 1,5 mm de comprimento, o passo do deslocamento do posicionador foi calculado levando em consideração a abertura da fenda (F). Na maior parte das gravações o passo do posicionador era aproximadamente 0,15 mm, logo, o número de períodos (N) em um passo do posicionador (D) é:

$$N = \frac{D}{\Lambda} = \frac{0,15mm}{532,5nm} = 281,69 \sim 282 \quad (42)$$

Para um número de períodos $N = 282$, o valor calculado do passo do posicionador principal proporcional ao período da FBG é:

$$D = N \Lambda = 282 \times 532,5nm = 150165 \text{ nm} \quad (43)$$

Os deslocamentos são limitados pelo intervalo entre dois disparos consecutivos do feixe UV. Este cálculo foi de grande importância para que fosse realizada a perfeita colagem das franjas de interferência entre cada subrede gravada. Portanto, para a gravação uma rede com 1,50165 mm composta por 10 subredes com $S = 150165$ nm, a seguinte tabela de dados foi fornecida para a movimentação do posicionador principal:

Tabela 6 - Dados para movimentação do posicionador principal na gravação de uma FBG uniforme.

Número de passos	Deslocamento do posicionador (nm)
1	0
2	150165
3	150165
4	150165
5	150165
6	150165
7	150165
8	150165
9	150165
10	150165
11	150165

Os dados da Tabela 6 significam que o laser dispara uma vez na posição 0, desloca 150165 nm, dispara novamente, e assim sucessivamente.

A Figura 49 representa esquematicamente o feixe UV após passar pela abertura da fenda (F), sendo difratado pela máscara de fase e incidindo na fibra ótica, onde forma um padrão de interferência de comprimento S , onde a subrede é gravada. Z é a distância da fibra à máscara de fase, h é a distância da máscara de fase ao final da região de interferência dos feixes difratados.

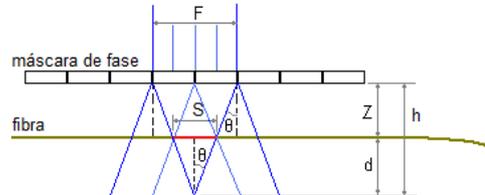


Figura 49 - Diagrama esquemático da incidência do UV na fibra ótica.

Para que a região iluminada na fibra (S) possua o comprimento desejado foi necessário calcular a abertura da fenda. O cálculo é apresentado a seguir:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta &= \frac{\frac{S}{2}}{d} = \frac{S}{2d} \\ S &= 2 \operatorname{tg} \theta (d) = 2 \operatorname{tg} \theta (h - Z) = 2 \operatorname{tg} \theta \left(\frac{F}{2 \operatorname{tg} \theta} - Z \right) = F - 2 \operatorname{tg} \theta (Z) \\ F &= S + 2 \operatorname{tg} \theta (Z) \end{aligned} \quad (44)$$

Pode-se calcular o valor de θ por uma aproximação da máscara de fase com uma rede de difração. Assumindo que o laser possui incidência normal ($\theta_i = 0$), considerando $m = 1$,

$$\theta = \operatorname{arcsen} \left(\frac{\lambda_{UV}}{\Lambda_{MF}} \right) \quad (45)$$

O período da máscara de fase utilizado nas gravações era de 1065 nm e o $\lambda_{UV} = 248 \text{ nm}$. A distância entre a máscara e a fibra ótica era ajustada em 60 μm conforme a imagem fornecida pela câmera (Figura 48). Para obter uma região iluminada de $S = 150165 \text{ nm}$, que corresponde a gravação de uma subrede de comprimento S , foi necessário abrir a fenda com uma abertura de $F \sim 179 \mu\text{m}$, calculado pela equação (44).

A parte superior da Figura 50 representa esquematicamente uma subrede de comprimento $1S = 150165 \text{ nm}$, calculada conforme a equação (43), correspondendo a apenas um disparo do laser. Após o segundo disparo, onde o posicionador principal deslocou um passo equivalente a S , a pequena FBG possui um comprimento de $2S = 300330 \text{ nm}$, representado no esquema central. Após o término da gravação, em que o posicionador

realizou todos os movimentos apresentados na Tabela 6, a FBG com comprimento de $10 S = 1,5 \text{ mm}$ pode ser observada no último esquema da Figura 50.

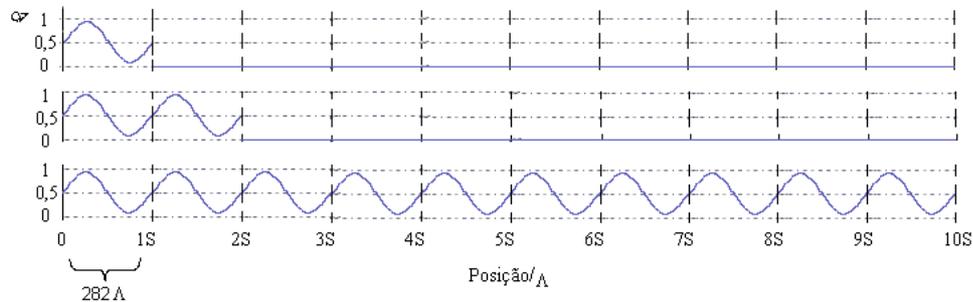


Figura 50 - Diagrama esquemático de uma FBG uniforme.

O eixo das coordenadas da Figura 50 representa a visibilidade normalizada das franjas de interferência. Na gravação de uma FBG uniforme por este método, duas exposições consecutivas devem realizar-se em fase, a fim de evitar deslocamentos de fase não desejados resultando na degradação espectral.

3.3.2 Método de Gravação de FBGs Uniformes por Deslocamento do Feixe UV

Neste processo de gravação o feixe UV se desloca ao longo do comprimento da fibra (Figura 51), portanto as FBGs provenientes deste processo são limitadas pelo tamanho da máscara de fase. As máscaras de fase disponíveis no Instituto de Telecomunicações possuíam 1,0 cm e apenas uma máscara tinha seu comprimento de 2,5 cm.

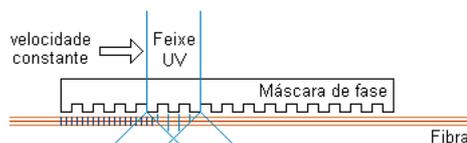


Figura 51 - Diagrama esquemático da gravação de redes uniformes com varredura do feixe.

Neste método, o espelho móvel, a fenda e a lente cilíndrica são deslocados por um estágio de translação com resolução de $0,5 \mu\text{m}$ (*ILS-PP Newport*), que pode movimentar-se com velocidade pré-determinada, interligado através de controladores (*XPS Newport*) que utiliza interface *Ethernet* a um computador.

O estágio de translação micrométrico está posicionado sobre o posicionador principal, que neste processo de gravação fica desligado para evitar possíveis vibrações.

3.3.3 Método de Gravação de FBGs com Gorgeio por Colagem das Franjas de Interferência

As redes de Bragg com gorgeio originadas a partir do método de colagem das franjas de interferência são compostas por várias subredes gravadas consecutivamente ao longo do comprimento da fibra e com variação de fase entre subredes consecutivas.

Para a gravação e leitura das redes com gorgeio e com variação na fase, utilizou-se o mesmo sistema de leitura e gravação empregado na produção das redes uniformes por colagem das franjas de interferência. A variação de fase, ϕ , entre duas subredes foi obtida com a aplicação de um gorgeio ao deslocamento efetuado entre os disparos consecutivos, sendo que a abertura da fenda permanecia sempre constante. A Tabela 7 mostra uma lista de 11 passos para o deslocamento do posicionador principal para a gravação de uma rede com gorgeio com aproximadamente 1,5 cm.

Tabela 7 - Dados para movimentação do posicionador principal na gravação de uma FBG com gorgeio.

Número de passos	Deslocamento do posicionador (nm)
1	0
2	150165
3	$150165 + \phi$
4	$150165 + 2\phi$
5	$150165 + 3\phi$
6	$150165 + 4\phi$
7	$150165 + 5\phi$
8	$150165 + 6\phi$
9	$150165 + 7\phi$
10	$150165 + 8\phi$
11	$150165 + 9\phi$

Cada passo de irradiação é separado por uma distância cada vez maior resultando em uma rede com gorgeio linear. Este processo consiste na gravação de várias subredes uniformes, sendo que entre elas há a introdução de deslocamentos de fase que aumentam ao longo do comprimento da rede.

Para observar os deslocamentos no comprimento de onda do pico de reflexão das redes de Bragg com a variação da fase entre as subredes, foram gravados sete conjuntos de redes de Bragg com a introdução de diferença de fase constantes entre suas subredes. Esta diferença de fase foi de $(-\Lambda/3)$, $(-\Lambda/4)$, $(-\Lambda/8)$, (0) , $(+\Lambda/8)$, $(+\Lambda/4)$ e $(+\Lambda/3)$. Os deslocamentos no comprimento de onda em função da diferença de fase introduzida entre cada subrede

resultaram em uma reta. Este parâmetro (deslocamento no comprimento de onda em função da diferença de fase) forma a base do estudo da gravação e simulação de redes de Bragg com gorgeio linear.

Também foram simuladas redes com diferentes tamanhos de subredes (S) utilizando a equação teórica da reta que foi encontrada na gravação de redes de Bragg com a introdução de diferença de fase constante entre cada subrede. Com a observação de que as alterações em S modificavam a largura de banda das redes com gorgeio, novas simulações foram executadas a fim de encontrar uma relação entre os deslocamentos no comprimento de onda das redes de Bragg para os diversos tamanhos de subredes.

As simulações foram realizadas utilizando um *software* comercial *Optiwave IFO*. A Figura 52 apresenta as definições da FBG simulada na tela do *software*. As lacunas em amarelo são preenchidas com os mesmos parâmetros utilizados na gravação. Como a gravação da FBG utiliza a incidência direta sobre a máscara de fase, o período da rede é metade do período da máscara de fase. A lacuna comprimento é preenchida com o valor da abertura da fenda (S), pois várias subredes serão gravadas consecutivamente. A lacuna *shift* representa a diferença de fase introduzida entre cada subrede.

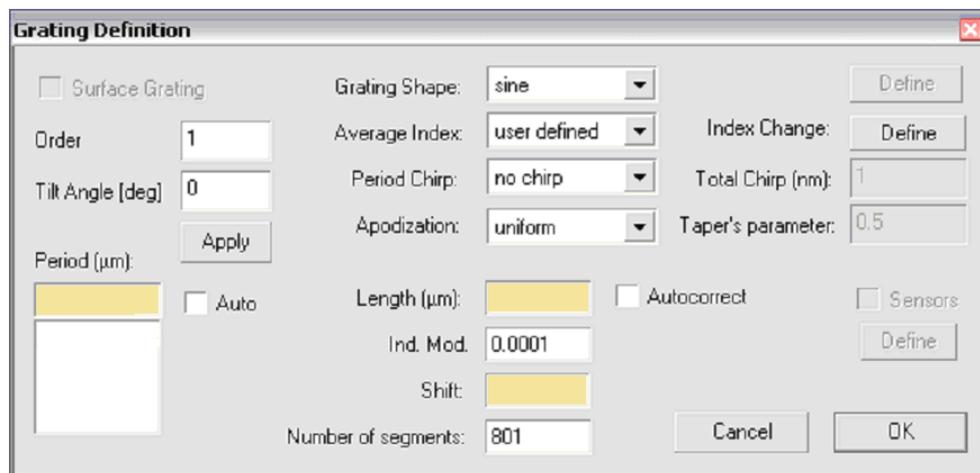


Figura 52 - Definições da FBG no *software* comercial *Optiwave IFO*.

Visto que para determinadas situações necessita-se de redes com características específicas, como as redes com gorgeio para atuarem como compensadores de dispersão passou-se então ao projeto das mesmas. Os parâmetros iniciais para o projeto de redes de Bragg com gorgeio são: comprimento de onda de Bragg, largura de banda a -3 dB, comprimento da fibra a ser compensado.

Com os dados do comprimento da fibra a ser compensado, a dispersão das redes com gorgeio pode ser calculada conforme a Equação (29). Com os valores da dispersão e da

largura de banda, pode-se calcular o atraso de grupo (Equação (28)). E aplicando a mesma Equação (28) o comprimento da rede pode ser calculado. Com o valor do comprimento da rede e da largura de banda, encontra-se o gorgoio linear da rede (Equação (30)).

Após a realização dos cálculos das características do dispositivo, pode-se obter uma relação entre a largura de banda da rede de Bragg com gorgoio e os deslocamentos no comprimento de onda das redes gravadas com diferença de fase entre as subredes, assim foi possível relacionar a fase a ser introduzida entre cada subrede.

Outro método de se obter uma rede de Bragg com gorgoio com variação do período, utilizando um método mais simples, é realizar a exposição da fibra com a translação do feixe UV diretamente sobre uma máscara de fase com gorgoio. Este método também foi utilizado para a gravação de redes.

3.3.4 Método de Gravação de FBGs com Gorgoio por Deslocamento do Feixe UV

Com a incidência da radiação UV no núcleo da fibra ótica ocorre mudanças no índice de refração efetivo (n_{eff}) e, conseqüentemente, o comprimento de onda de Bragg (λ_B) sofre alterações, conforme a Equação (9). Quando a fibra é exposta a diferentes densidades de energias ao longo do seu comprimento, é produzida uma FBG com gorgoio. Quando a FBG apresenta uma variação de índice de refração que aumenta ou diminui de forma constante ao longo do comprimento da rede, esta rede é uma FBG com gorgoio linear.

Uma maneira de conseguir este efeito é realizar uma segunda exposição com o feixe UV depois da fabricação de uma FBG uniforme de forma a alterar o índice de refração ao longo do comprimento da rede. Deslocar o feixe UV com uma determinada velocidade controlada diretamente sobre a máscara de fase também pode resultar em alteração crescente ou decrescente no índice de refração.

O primeiro passo deste processo foi gravar uma FBG uniforme com deslocamento do feixe UV em velocidade constante, utilizando uma máscara de fase uniforme, em seguida a máscara de fase foi removida e realizou-se uma segunda exposição (Figura 53) com velocidade variável, induzindo um perfil de gorgoio linear na FBG, devido à variação do índice de refração ao longo do comprimento da rede.

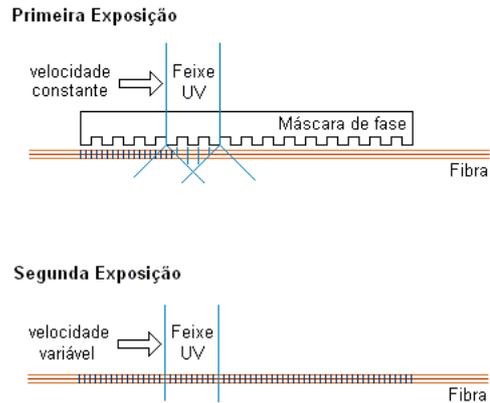


Figura 53 - Diagrama esquemático da técnica de gravação por dupla exposição.

Na segunda exposição, para cada ponto da FBG tem-se uma velocidade, quanto menor a velocidade, maior é a exposição ao feixe UV e por consequência, maior é a alteração no índice de refração.

Para determinar a alteração no índice de refração causada pela incidência do feixe UV, acompanhou-se o crescimento de uma FBG uniforme, bem como o deslocamento do comprimento de onda com a incidência de pulsos de energia. A frequência de repetição f do laser utilizada na gravação foi de 500 Hz, 3,5 mJ foi a energia do pulso medida com o fotodetector, a fenda foi aberta de maneira que a subrede gravada tivesse um comprimento de 0,5 mm. Deste modo, a energia pode ser calculada por:

$$E = f \times t \times E_{pulso} \quad (46)$$

sendo t o tempo de cada exposição dado por:

$$t = \frac{n^{\circ} \text{ de pulsos}}{f} \quad (47)$$

Com a variação no comprimento de onda observada devido à incidência de pulsos de energia e com o auxílio da Equação (9) calcula-se o n_{eff} resultante após a incidência de cada pulso de energia. A partir destes dados, uma relação entre energia e variação no n_{eff} foi obtida, tornando possível determinar a velocidade com que o feixe UV devia deslocar-se ao longo do comprimento da fibra que resultasse em uma determinada largura de banda do dispositivo.

Com os dados da abertura da fenda e da velocidade utilizada foi possível obter o tempo exato em que cada ponto da FBG foi exposto ao feixe UV. O feixe UV chegava a um ponto discreto com uma determinada velocidade e naquele mesmo momento a velocidade modificava e mantinha-se constante até chegar a outro ponto discreto. Assim, a velocidade

para ir de um ponto na posição x até o ponto adjacente, na posição $x+S$, onde S é o comprimento da subrede, pode ser expressa por:

$$v_{UV} = \left(\frac{S}{t_{x+S} - t_x} \right) \quad (48)$$

Outro método de obter um aumento constante no índice de refração efetivo ao longo do comprimento da rede é variar a velocidade diretamente sobre a máscara de fase uniforme (Figura 54). Neste caso, a amplitude da modulação no índice de refração varia ao longo do comprimento da fibra.

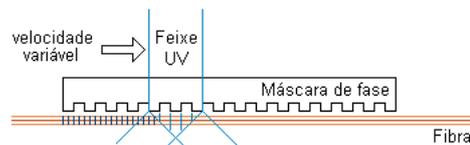


Figura 54 - Diagrama esquemático da técnica de gravação com deslocamento do feixe com velocidade variável.

A velocidade de translação do feixe foi calculada da mesma forma que pelo método de dupla exposição, conforme a Equação (48).

3.3.5 Método de Gravação de FBGs Amostradas

As redes superestruturadas foram estudadas como uma possível alternativa na gravação de redes com gorgeio. O espectro destas redes é formado por vários picos (número de canais, m) e quando estes picos são similares a redes de Bragg com gorgeio podem compensar vários canais simultaneamente, além desta vantagem, as FBGs amostradas possuem comprimento reduzido.

As FBGs amostradas foram gravadas utilizando a técnica da máscara de fase com deslocamento do feixe UV. A gravação consistia em abrir a fenda de forma que o comprimento da subrede tivesse o comprimento desejado. Neste caso específico das redes gravadas com a técnica da máscara de fase com deslocamento do feixe UV, $S = a$. A gravação era feita neste ponto, o posicionador micrométrico motorizado controlado por computador deslocava o conjunto (espelho/fenda/lente/máscara) por uma distância P (durante este deslocamento o laser era desligado), e uma nova subrede era gravada, e assim sucessivamente até o comprimento total da rede.

Para observar o comportamento dos vários canais ou picos das FBGs amostradas, gravaram-se redes com a região não exposta constante e com diferentes coeficientes de gorgeio, que correspondem a regiões não expostas com espaçamentos aumentando com o comprimento da rede. Gravações com alterações no comprimento da seção (a) também foram realizadas.

3.3.6 FBGs Uniformes Gravadas por Deslocamento do Feixe UV

A Figura 55 mostra o espectro de duas redes de Bragg uniformes escritas pela técnica da máscara de fase com deslocamento do feixe UV ao longo da máscara de fase uniforme.

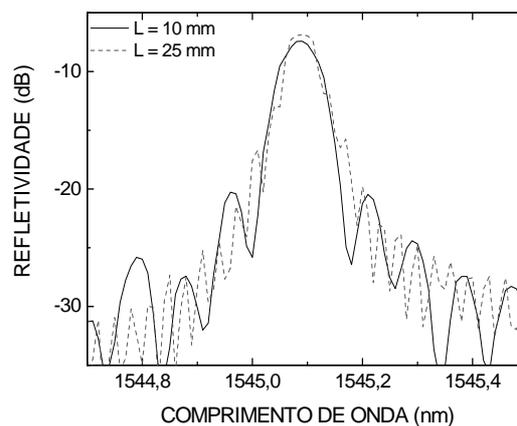


Figura 55 - Espectros de duas FBGs uniformes.

As FBGs foram gravadas com uma máscara de fase com período de 1072,55 nm e comprimento de 25 mm. A FBG com comprimento de 10 mm foi gravada com velocidade de 0,1 mm/s, resultando em uma rede com comprimento de onda de 1545,085 nm e largura de banda de 0,09 nm. A largura de banda foi calculada a -3 dB. A FBG de 25 mm de comprimento resultou em um comprimento de onda de 1545,09 nm e largura de banda de 0,05 nm, com velocidade de gravação de 0,81 mm/s.

A largura de banda dos dispositivos diminui com o comprimento total dos mesmos (Equação (19)) e com o aumento do índice de refração médio n_0 , conseqüentemente, a FBG de 25 mm gravada com velocidade e comprimento maior, resultou em uma largura de banda menor comparada à FBG de 10 mm, porém apresenta lóbulos laterais mais acentuados.

3.3.7 FBGs Uniformes Gravadas por Colagem das Franjas de Interferência

A Figura 56 mostra o espectro de três FBGs uniformes (A, B e C), comprimento de ~ 15 mm, gravadas com $S = 150165$ nm, este parâmetro foi definido pela Equação (43) representado na Figura 49. A energia total utilizada durante as gravações, calculada pela Equação (46), foi de 5625 mJ. As FBGs A, B e C foram gravadas sem diferença de fase entre as subredes, conforme a Tabela 6 e com uma máscara de fase uniforme com período de 1065 nm.

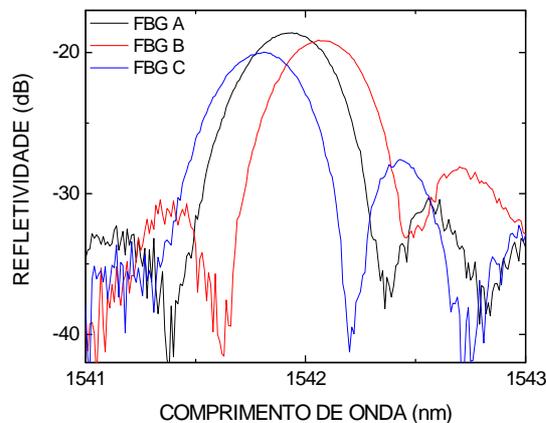


Figura 56 - Espectros de três FBGs uniformes.

Foram gravados sete conjuntos de redes de Bragg, cada conjunto composto por três FBGs. A variação no comprimento de onda entre as FBGs é devido a erros experimentais. Todos os conjuntos de FBGs foram gravados com os mesmos parâmetros do laser e tamanho das subredes, alterando somente a diferença de fase entre cada subrede. Foi realizada uma média entre os valores do comprimento de onda para cada conjunto de redes, para a consideração de um comprimento de onda médio. A variação do comprimento de onda médio com relação à diferença de fase entre cada subrede está representado na Figura 57.

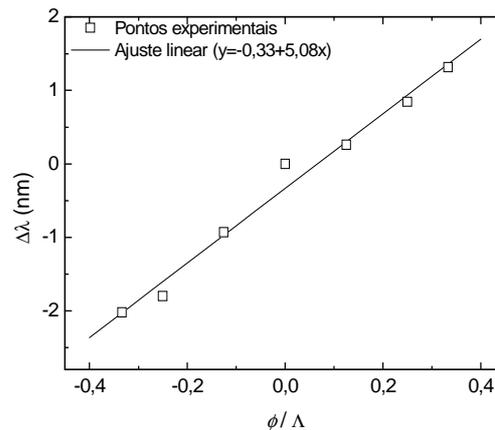


Figura 57 - Variação do comprimento de onda com relação à diferença de fase entre as subredes.

O ponto localizado na origem da Figura 57 corresponde ao conjunto de FBGs uniformes gravadas sem diferença de fase entre as subredes, $\phi = 0$, que coincidem com as FBGs A, B e C expostas na Figura 56. Quando $\phi = (\Lambda/8), (\Lambda/4), (\Lambda/3)$, onde Λ é o período da FBG, o comprimento de onda da FBG sofre variações para maiores valores, enquanto que para $\phi = (-\Lambda/8), (-\Lambda/4), (-\Lambda/3)$, as variações são para menores valores, resultando em um efetivo deslocamento no comprimento de onda com uma pequena variação na fase, múltipla do período da máscara de fase. Quando a diferença de fase aumenta linearmente ao longo do comprimento da rede, a rede resultante será uma rede com gorgeio, e pode-se portanto, fazer uma equivalência entre o comprimento de onda das redes gravadas com diferença de fase constante entre as subredes e a largura de banda das redes de Bragg com gorgeio.

3.3.8 FBGs com Gorgeio Gravadas por Colagem das Franjas de Interferência

A partir das informações obtidas na Figura 57, elaborou-se um conjunto de dados para gravação de FBGs com gorgeio que resultou no espectro da Figura 58. Além da refletividade é apresentado o atraso de grupo para a FBG com gorgeio gravada e simulada.

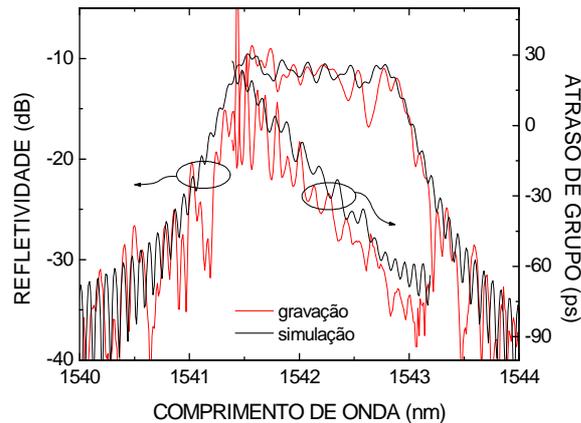


Figura 58 - Espectro de refletividade e atraso de grupo de uma FBG com gorgeio linear, gravação e simulação.

A oscilação espectral pode ser devido aos erros experimentais e à não perfeita colagem das franjas de interferência, pois a fenda possui resolução de apenas $1,5 \mu\text{m}$, resultando em ondulações na resposta espectral do atraso de grupo (GDR) de 20 ps . A FBG com gorgeio resultante da gravação possui largura de banda de $1,49 \text{ nm}$ e dispersão de $-56,07 \pm 1,84 \text{ ps/nm}$, e a rede simulada possui largura de banda de $1,63 \text{ nm}$ e dispersão de $-55,27 \pm 0,6 \text{ ps/nm}$, para ambos os casos o gorgeio é linear. O atraso de grupo da rede gravada é fornecido diretamente pelo ONA (*Optical Network Analyzer*). Foram necessárias 66 subredes, $S = 150165 \text{ nm}$, para a gravação da rede, resultando em um comprimento de aproximadamente 10 mm . Considerando os parâmetros de simulação, deveriam ser introduzidas entre cada uma das seções diferenças de fase consecutivas de $\phi_i = -0,1455 \Lambda$ a $\phi_f = 0,1435 \Lambda$. No entanto, estes valores não correspondem à situação real de gravação, uma vez que a largura da fenda de $1,5 \mu\text{m}$ introduz incertezas de posicionamento das seções de gravação que alteram este valor.

Conforme o ajuste linear da Figura 57, a largura de banda da rede gravada deveria ser $1,45 \text{ nm}$, conseqüentemente um bom resultado foi conseguido. Com relação à dispersão calculada conforme a Equação (28), a rede simulada, deveria ter $D = -60,3 \text{ ps/nm}$ e a rede gravada, $D = -66,5 \text{ ps/nm}$, esta diferença entre os resultados pode estar associado ao ruído presente nos espectros resultantes da instabilidade ou de um possível desalinhamento do sistema.

A fim de verificar o comportamento da rede com gorgeio utilizando diferentes comprimento de subredes (S), foram simuladas (Figura 59) redes com S aproximadamente iguais a $100 \mu\text{m}$ e $350 \mu\text{m}$, proporcionais ao período da FBG. O valor de S foi calculado conforme a Equação (43), o comprimento da rede (L) permaneceu constante e a fase inicial e

final também é a mesma ($\phi_i = -0,1455 \Lambda$ e $\phi_f = 0,1435 \Lambda$) utilizada na gravação e simulação da rede da Figura 58.

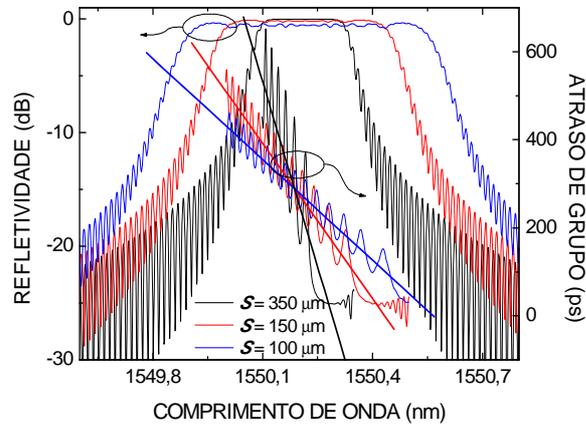


Figura 59 - Espectros de redes com gorgeio e atrasos de grupo simulados.

Quanto menor o tamanho de S , menor inclinação possui a reta ajustada à dispersão e maior é a largura de banda. Para uma rede simulada com $S = 350 \mu\text{m}$ a largura de banda é de $\Delta\lambda = 0,3 \text{ nm}$, já para uma rede simulada com $S = 150 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 0,5 \text{ nm}$ e finalmente, a rede simulada com $S = 100 \mu\text{m}$ possui uma largura de banda de $\Delta\lambda = 0,7 \text{ nm}$. Estas diferenças estão associadas a uma modulação diferenciada do índice de refração da rede, pois quanto menor o comprimento de S , maior será o número de seções gravadas ao longo do comprimento da rede (L).

Para uma melhor visualização da largura de banda máxima que uma rede com gorgeio linear pode ter, quando gravada com o método de colagem das franjas de interferência, foram realizadas simulações com a introdução de fase entre cada subrede variando de $(-\Lambda/2)$ até $(+\Lambda/2)$ e com dois diferentes comprimentos de subredes ($S = 100$ e $150 \mu\text{m}$), de forma a verificar a diferença na largura de banda. Os valores de S foram escolhidos devido a utilização frequente no laboratório, durante a gravação de redes uniformes. Os comprimentos (L) das redes foram mantidos constantes.

A Figura 60 mostra o espectro das duas redes simuladas, de forma que a largura de banda da rede simulada com $S = 100 \mu\text{m}$ é de $\sim 7,9 \text{ nm}$, enquanto que a rede simulada com $S = 150 \mu\text{m}$ é de $\sim 5,3 \text{ nm}$.

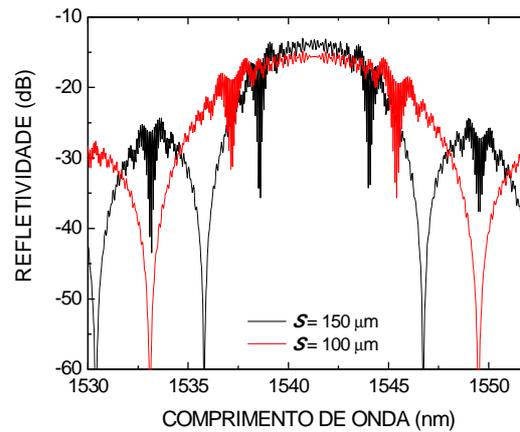


Figura 60 - Espectros de refletividade de FBGs com gorgeio simuladas com diferentes tamanhos de S .

Essas redes possuem um espectro diferente quando comparadas com as redes da Figura 59, apresentam o topo espectral de forma arredondada, além do aparecimento de posições no espectro da FBG com ausência de refletividade. Estas características estão associadas a fase entre seções escolhida, $\phi_i = -0,5 \Lambda$ e $\phi_f = 0,5 \Lambda$, que não é capaz de gerar uma FBG com espectro adequado.

A partir de então, novas simulações foram realizadas para encontrar uma relação entre qualquer tamanho de subrede (S) de forma a facilitar a gravação de redes com uma largura de banda específica, independente do S utilizado.

A Figura 61 apresenta a variação do comprimento de onda das redes com relação à diferença de fase introduzida entre cada subrede. Os valores de diferenças de fase utilizados foram $\phi = (-\Lambda/3), (-\Lambda/4), (\Lambda/8), 0, (\Lambda/8), (\Lambda/4), (\Lambda/3)$. As redes foram simuladas com diferentes tamanhos de subredes, mas com mesmo comprimento total, $L = 15$ mm.

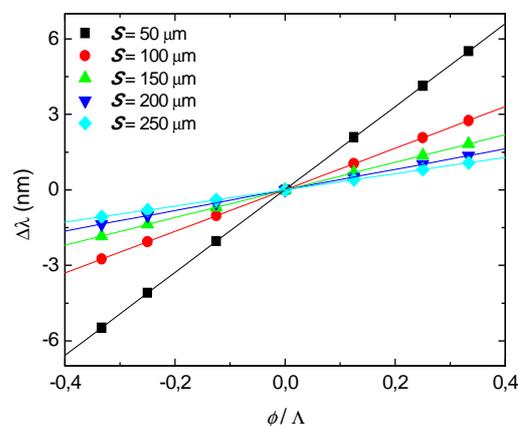


Figura 61 - Variação do comprimento de onda devido à fase introduzida entre cada subrede.

Os vários pontos na Figura 61 representam a diferença de fase acrescentada entre cada subrede na simulação das redes com diferença de fase constante entre cada subrede.

O valor da variação no comprimento de onda ($\Delta\lambda$) para a rede simulada com $S = 50 \mu\text{m}$, é duas vezes maior que a variação apresentada com $S = 100 \mu\text{m}$, três vezes maior que $S = 150 \mu\text{m}$, quatro vezes maior que $S = 200 \mu\text{m}$ e cinco vezes maior que $S = 250 \mu\text{m}$, sendo 50, 100, 150, 200, 250 os valores de S múltiplos do período da máscara de fase. Esta relação pode ser escrita:

$$\Delta\lambda_{50} = 2 \times \Delta\lambda_{100} = 3 \times \Delta\lambda_{150} = 4 \times \Delta\lambda_{200} = 5 \times \Delta\lambda_{250} \quad (49)$$

A Equação (49) mostra a relação entre as variações no comprimento de onda das redes simuladas com diferença de fase constantes entre as subredes e relaciona todas as retas da Figura 61 em relação à reta da rede simulada com $S = 50 \mu\text{m}$. A fase inicial e final $\phi_{i,f}$ a ser introduzida entre cada subrede considerando as equações das retas da Figura 61, pode ser representada por:

$$\phi_{i,f} = \left(\frac{\left(\pm \frac{\Delta\lambda}{2} - 0,00571 \right)}{16,51817} \left(\frac{S}{50,40985} \right) \right) \Lambda \quad (50)$$

A fase inicial ϕ_i corresponde aos valores negativos da Equação (50) e a fase final ϕ_f , aos valores positivos. A variação no comprimento de onda das redes simuladas com diferença de fase constantes entre as subredes ($\Delta\lambda$) será equivalente à largura de banda das redes de Bragg com gorgeio linear, independentemente de S . É importante ressaltar que na Equação (50), o valor de S deve ser em micrometros.

Para que uma rede de Bragg com gorgeio linear atue como um compensador de dispersão, ela deve ter algumas características distintas, como estar centrada em determinado comprimento de onda, referente ao canal de aplicação do dispositivo e ter largura de banda compatível com o canal ótico. Com relação à dispersão a ser compensada, o dispositivo terá comprimento compatível com o comprimento de fibra a ser compensado.

O primeiro passo no projeto da CFBG é ter os dados referentes à dispersão a ser compensada, ao comprimento de onda e à largura de banda que o dispositivo deve ter. Inicialmente, os parâmetros fornecidos foram: comprimento de onda de Bragg de 1550,5 nm,

largura de banda a -3 dB de 60 GHz = 0,48 nm, e compensar a dispersão de 20 km de fibra. Com a Equação (29), a dispersão a ser compensada é de -340 ps/nm.

Com a aplicação da Equação (28), calcula-se o comprimento da rede, $L = 16,9$ mm e com a Equação (30) o gorgeio da rede = 0,28 nm/cm.

No método de colagem das franjas de interferência, o comprimento da rede é composto por N subredes de comprimento S , com uma diferença de fase ϕ entre cada subrede. A fase inicial e final, para uma determinada largura de banda, é calculada pela Equação (50).

$$\begin{aligned} \text{para} \left(-\frac{\Delta\lambda}{2} \right) &= -0,24 \text{ nm} \rightarrow \phi_i = -0,044\Lambda \\ \text{para} \left(+\frac{\Delta\lambda}{2} \right) &= +0,24 \text{ nm} \rightarrow \phi_f = +0,042\Lambda \end{aligned} \quad (51)$$

A diferença de fase introduzida entre cada subrede será dada pela divisão entre a fase total e o número de subredes N ($\phi = (\phi_f - \phi_i) / N = 4,15 \times 10^{-7} \text{ mm}$). Onde N é encontrado através da divisão entre o comprimento da rede L e o tamanho da subrede, S . Para gravar uma rede com comprimento de 16,9 mm, deve-se inscrever um total de $N = 113$ subredes. A abertura da fenda permanece sempre a mesma, portanto são inscritas 113 subredes com uma diferença de fase cumulativa entre elas de $4,15 \times 10^{-7} \text{ mm}$.

O tamanho da subrede deve ser proporcional ao período da FBG utilizada na gravação. Para uma máscara de fase com período de 1072,55 nm, o período da FBG será $\Lambda = 536,275$ nm, S será de 0,150157 mm. Pode-se, portanto calcular o conjunto de dados para o deslocamento do posicionador principal.

$$\begin{aligned} D_i &= 0,150157 \text{ mm} + \phi_i \Lambda = 0,1501332 \text{ mm} \\ D_f &= 0,150157 \text{ mm} + \phi_f \Lambda = 0,1501797 \text{ mm} \end{aligned} \quad (52)$$

Foram feitas simulações utilizando os resultados da Equação (52) e com valores de S aproximadamente iguais a 80 μm , 150 μm e 250 μm , proporcionais ao período da FBG. Os espectros de refletividade estão representados na Figura 62.

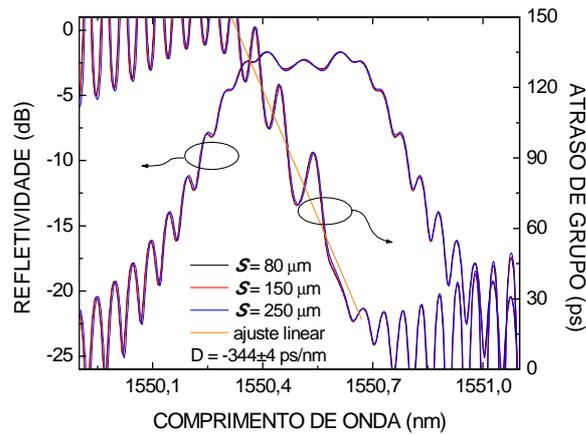


Figura 62 - Espectros de FBGs com gorgeio simuladas com subredes do tamanho de 80, 150 e 250 μm .

Os espectros das redes da Figura 62 se sobrepõem indicando boa concordância com os resultados da Equação (50). Considerando o erro proveniente do ajuste linear, a dispersão é equivalente à projetada ($D = -344 \pm 4$ ps/nm).

Para alcançar resultados satisfatórios com o método de colagem das franjas de interferência, a precisão no posicionamento da máscara de fase/feixe UV é crítica. O erro relativo deve ser mínimo, caso contrário ele poderá acarretar em mudanças de fase indesejada degradando o espectro da rede. Para demonstrar este efeito, a rede da Figura 63 foi simulada e gravada com os mesmos parâmetros da rede da Figura 58, mas com flutuações aleatórias na fase entre cada subrede e que variou de -60 nm a 60 nm ao longo do comprimento total da rede.

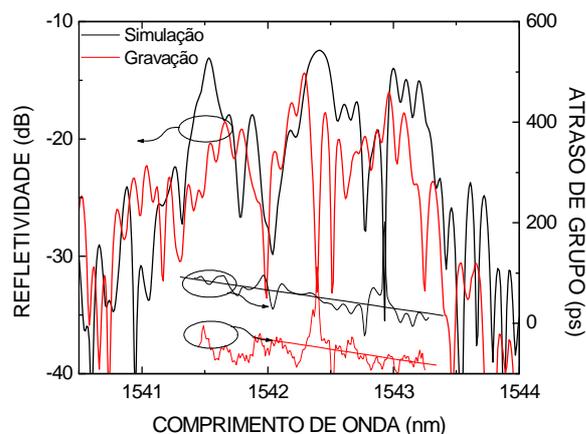


Figura 63 - Refletividade e atraso de grupo da rede com gorgeio resultante de flutuações aleatórias na fase entre as subredes.

Este resultado mostra que a precisão na colagem das franjas de interferência é um critério decisivo na boa qualidade das redes com gorgeio. Com a introdução de flutuações

aleatórias na fase entre as subredes, além da rede com gorgeio apresentar deformação espectral, ocorre queda na dispersão em relação à rede da Figura 58 ($D_{\text{simulada}} = -36,62 \text{ ps/nm}$ e $D_{\text{gravada}} = -38,06 \text{ ps/nm}$).

Com o método de colagem das franjas de interferência é possível projetar e gravar redes de Bragg com qualquer tipo de gorgeio, sem a necessidade de utilizar várias máscaras de fase com gorgeios específicos, podendo desta forma utilizar as FBGs com gorgeio para compensar a dispersão de um dado comprimento de fibra.

3.3.9 FBGs com Gorgeio Gravadas por Deslocamento do Feixe UV com Velocidade Constante

A forma mais simples de obter uma rede de Bragg com gorgeio é realizar a gravação com deslocamento do feixe UV diretamente sobre uma máscara de fase com gorgeio. A rede resultante da gravação com este método está representado na Figura 64.

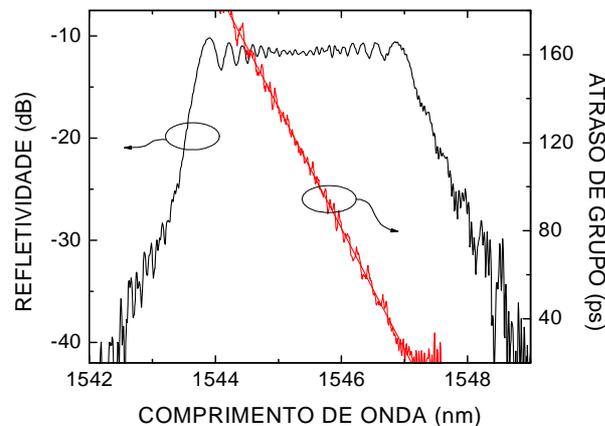


Figura 64 - Refletividade e atraso de grupo da FBG com gorgeio resultante da gravação com máscara de fase com gorgeio.

A máscara de fase utilizada nesta gravação possui período de 1068 nm, gorgeio de 1,7 nm/cm e comprimento de 25 mm, sendo que o feixe UV foi deslocado com velocidade de 0,9 mm/s ao longo de 20 mm, resultando em uma largura de banda de 3,45 nm e dispersão de $-54,9 \pm 0,13 \text{ ps/nm}$. A dispersão calculada pela Equação (28) é de $D = -55,92 \text{ ps/nm}$, sendo apenas 1,86% maior que o ajuste linear.

A rede da Figura 64 apresenta pouca oscilação espectral quando comparada com a Figura 58 apesar de ambas redes não serem apodizadas. As ondulações na resposta espectral

do atraso de grupo (GDR) são de no máximo 10 ps. Isto se deve ao fato de que o gorgeio associado com a máscara de fase utilizada nesta técnica é mais preciso do que o gorgeio associado com a técnica de colagem das franjas de interferência.

3.3.10 FBGs com Gorgeio Gravadas por Dupla Exposição: Máscara de Fase Uniforme e Posterior Deslocamento do Feixe UV em Velocidade Variável

Para a gravação de redes de Bragg com gorgeio com variação no índice de refração de uma forma controlada ao longo da rede, foi necessário primeiramente acompanhar a gravação de uma rede de Bragg uniforme sem deslocamento do feixe UV, sendo neste caso, o comprimento da rede proporcional à abertura da fenda. Durante este processo, a cada pulso de energia incidente na rede, monitorava-se o deslocamento no comprimento de onda. O resultado obtido da variação do comprimento de onda em função da energia incidente está representado na Figura 65.

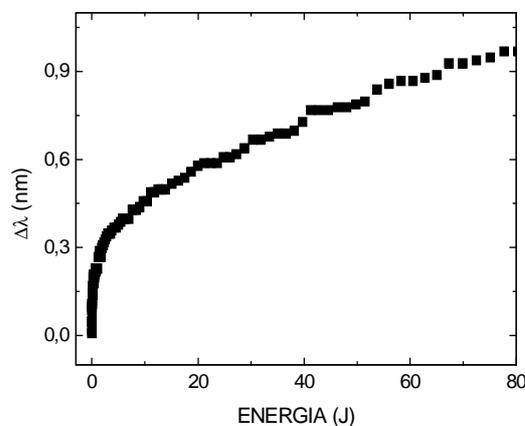


Figura 65 - Dados experimentais do crescimento de uma FBG uniforme em função da energia incidente.

Com a Equação (9) foram encontrados os valores de Δn_{eff} referentes a cada $\Delta\lambda$, obtendo desta forma, uma relação entre a energia incidente na fibra, E, e a modulação do índice de refração (Δn_{eff}), conforme indicado na Figura 66.

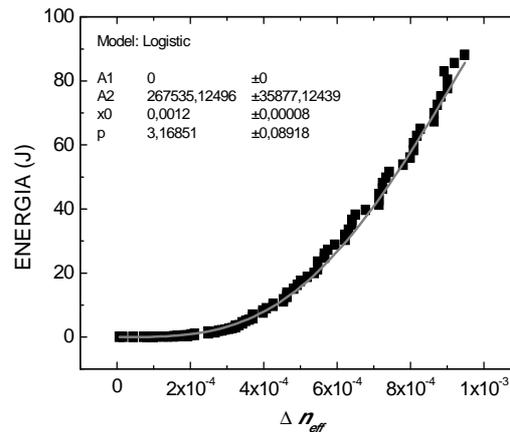


Figura 66 - Energia incidente na fibra versus Δn_{eff} .

Com o ajuste obtido na Figura 66 é possível prever qual será a energia necessária para causar uma determinada variação no índice de refração. Quando a variação no índice de refração aumenta linearmente ao longo do comprimento da rede, a rede resultante terá um gorgeio linear.

Inicialmente uma FBG uniforme com 10 mm de comprimento foi gravada com o deslocamento de feixe com $v = 0,81$ mm/s, frequência do laser de 500 Hz, a abertura da fenda de 0,5 mm e energia do pulso de 3,5 mJ. A energia utilizada na gravação foi de 1080,25 mJ, calculada conforme a Equação (47), resultando em uma variação constante do índice de refração ao longo da rede. A máscara de fase foi retirada e a segunda exposição foi realizada ao longo da rede uniforme.

Para a segunda exposição (frequência do laser de 500 Hz, a abertura da fenda de 0,5 mm e energia do pulso de 3,5 mJ), utilizou-se o ajuste obtido na Figura 66 para calcular a energia necessária para resultar em uma variação de índice linear ao longo do comprimento da rede. Esta relação está representada na Figura 67. A incidência de energia é controlada pela velocidade de deslocamento do feixe UV. A energia mínima utilizada na segunda exposição foi 1080,25 mJ, a mesma em que foi realizada a gravação da FBG uniforme.

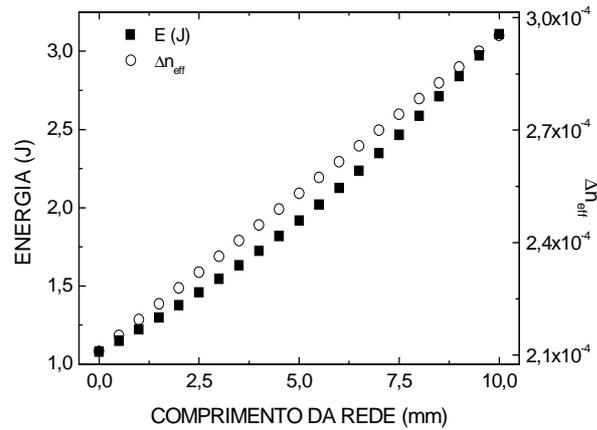


Figura 67 - Energia necessária para uma função linear do incremento do índice de refração.

A velocidade foi calculada pela Equação (48) e pode ser relacionada com a energia pela Equação (46). A velocidade de deslocamento do feixe UV ao longo do comprimento da FBG estão representados na Figura 68, assim como a variação no índice de refração resultante da segunda exposição.

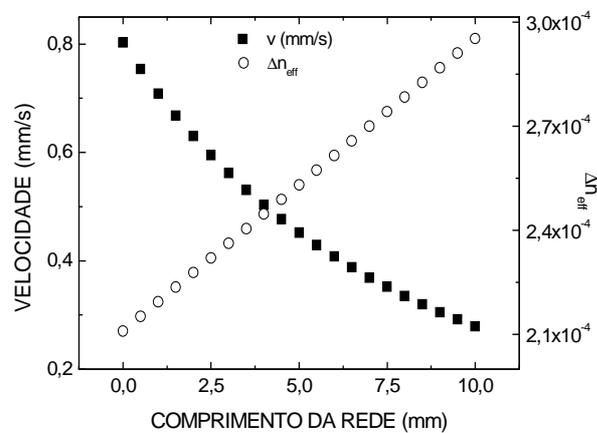


Figura 68 - Relação entre velocidade de deslocamento do feixe UV e a variação do índice de refração.

Os espectros das duas redes de Bragg (uniforme e com gorgeio) provenientes deste método estão representados na Figura 69. Pode ser observada a refletividade, assim como o atraso de grupo para a rede com gorgeio, juntamente com o ajuste linear.

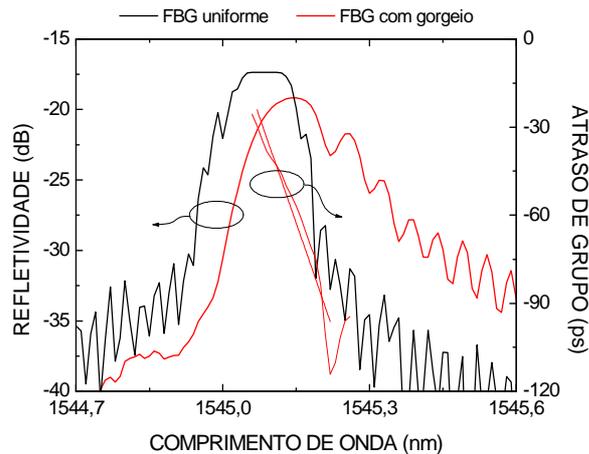


Figura 69 - FBG com gorgeio gravada pelo método de dupla exposição (linha vermelha).

Após a segunda exposição ao feixe UV com velocidade variável, o espectro sofre um alargamento e um deslocamento para maiores comprimentos de onda (QUINTELA *et al*, 2005). O comprimento da FBG uniforme e da FBG com gorgeio é constante, porém o perfil de modulação de índice ao longo do comprimento da rede é alterado, modificando assim o índice de refração efetivo ao longo do comprimento. Porém, as redes produzidas com esta técnica não são de boa qualidade, por apresentarem uma distorção espectral.

3.3.11 FBGs com Gorgeio Gravadas com uma Única Exposição: Deslocamento do Feixe UV em Velocidade Variável sobre a Máscara de Fase Uniforme

Neste método também foram utilizados os dados da Figura 66 que mostra a relação da energia em relação à variação do índice de refração. A diferença em relação à técnica anterior está no fato de que somente uma única exposição é realizada diretamente na máscara de fase. A velocidade de deslocamento do feixe UV resulta em uma variação linear do índice de refração efetivo com a energia incidente ao longo da rede representada na Figura 70.

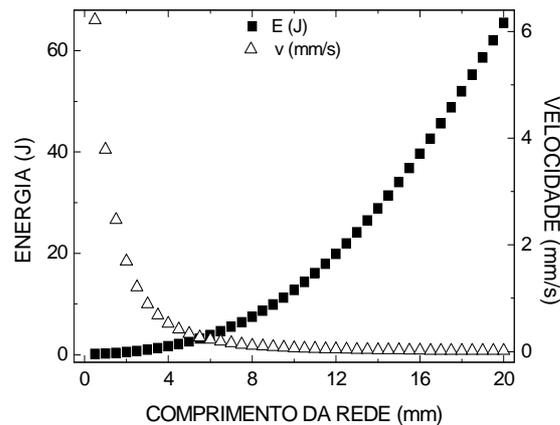


Figura 70 - Relação entre energia incidente na rede e a velocidade de translação do feixe.

As redes de Bragg com gorgeio gravadas com esta técnica estão representadas na Figura 71, assim como a dispersão e o ajuste linear.

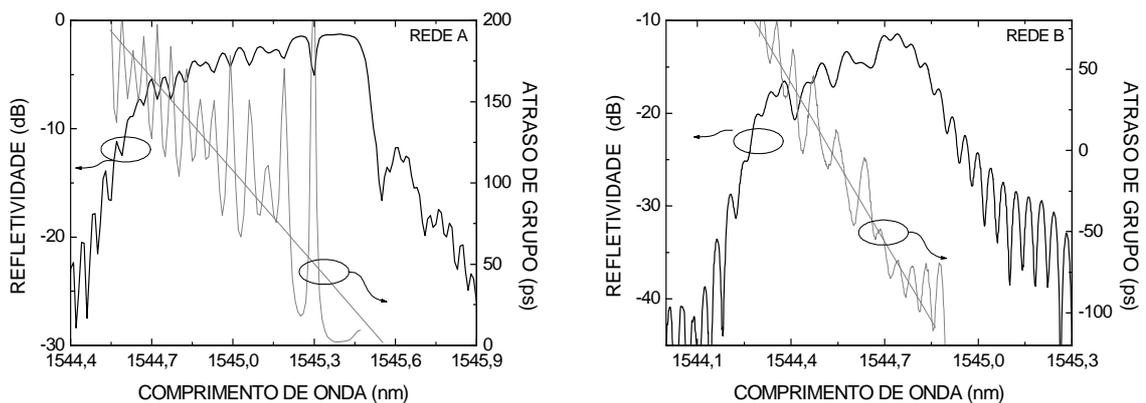


Figura 71 - FBGs com gorgeio gravadas com única exposição na máscara de fase uniforme.

A rede A foi gravada com energia inicial de 77,54 mJ e final de 65468,83 mJ, resultando em uma rede com largura de banda de 0,81 nm. A energia inicial utilizada na gravação da rede B foi 300 mJ e finalizada com 45220,65 mJ, apresentando uma largura de banda de 0,5 nm (frequência do laser de 500 Hz, a abertura da fenda de 0,5 mm e energia do pulso de 3,5 mJ). Entretanto, nos valores da dispersão ocorreram ligeiras discrepâncias comparado com o valor calculado pela Equação (28), sabendo que ambas as redes foram gravadas com 20 mm, a dispersão calculada para a rede A é de $-238,19$ ps/nm e para a rede B é de $-385,86$ ps/nm. A dispersão segundo o ajuste linear para a rede A é de $D = -191 \pm 17$ ps/nm, enquanto para a rede B, $D = -325 \pm 5$ ps/nm. Esta discrepância pode estar relacionada com a alta energia necessária para a gravação destes dispositivos, gerando uma apodização não uniforme do dispositivo, no qual o perfil de modulação de índice é

alterado ao longo do comprimento da rede. Como pode ser observado, principalmente na rede A, as ondulações na resposta espectral do atraso de grupo (GDR) são muito grandes, em torno de 200 ps, quando comparadas com as FBGs com gorgeio gravadas com o deslocamento do feixe utilizando a máscara de fase com gorgeio (10 ps), representada na Figura 64, ou as redes gravadas pelo método de colagem das franjas de interferência, representada na Figura 58, com $GDR = 20$ ps. A discrepância entre os valores de dispersão pode também estar relacionada ao fato de que não foram considerados todas as incertezas relacionadas ao experimento. O erro considerado está subestimado, pois considera-se apenas o erro relacionado ao ajuste linear do atraso de grupo.

3.3.12 Gravação de Redes Amostradas

As redes amostradas inicialmente foram gravadas utilizando uma máscara de fase uniforme com período de 1080 nm, o laser operando com frequência de 500 Hz, a energia por pulso de 3,47 mJ, resultando em energia de 1214,5 mJ, calculada conforme a Equação (46).

A Figura 72 mostra o espectro de refletividade de duas redes amostradas, onde são observados 8 picos, também chamados de canais.

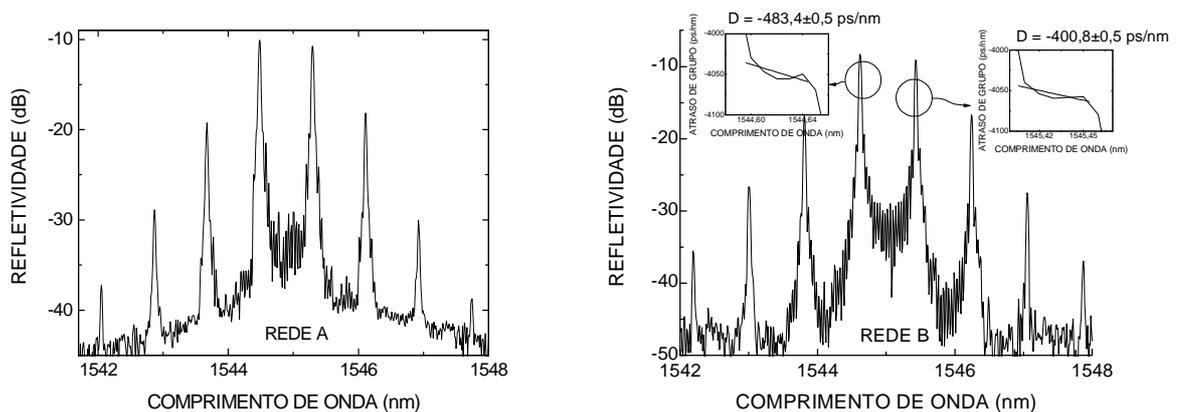


Figura 72 - Redes amostradas gravadas com pelo método da máscara de fase.

A rede A foi gravada com o período inicial, $P_1 = 1,00008$ mm, $c_s = 1$ μ m e $a = 0,15$ mm, resultando em espaçamentos entre canais de aproximadamente 0,8 nm, calculados pela Equação (33), resultando em canais compostos de FBGs uniformes. A rede B difere da rede A pelo fato de que foi gravada com um coeficiente de gorgeio de $c_s = 0,2$ μ m, P_1 e a são os mesmos, resultando em canais compostos de FBGs com gorgeio. Os detalhes

representados na Rede B (Figura 72) mostram o atraso de grupo em função do comprimento de onda para os picos centrais da rede, o pico da esquerda possui uma dispersão de $-483,4 \pm 0,5$ ps/nm e o da direita $-400,8 \pm 0,5$ ps/nm, conforme os ajustes lineares. Os picos centrais possuem 0,04 nm de largura de banda, tanto para a rede A, quanto para a B.

As oscilações espectrais podem estar relacionadas ao fato de que a abertura da fenda possui resolução de apenas 1,5 μm e o posicionador micrométrico, resolução de 0,5 μm , resultando em diferenças no tamanho do período da amostra, assim como no gorgeio e na seção gravada.

Esta técnica é uma alternativa na gravação de redes de Bragg com gorgeio, possuem a vantagem de apresentar vários canais em um único dispositivo, mas no caso do resultado da Figura 72, os canais apresentaram larguras de banda muito estreitas, possibilitando a aplicação como compensadores de dispersão e podendo também, ser aplicados como filtros.

3.3.13 Redes de Bragg Apodizadas

Na gravação de redes apodizadas pelo método da máscara de fase com deslocamento do feixe UV a função com perfil gaussiano é calculada conforme a Equação (14). Na apodização trapezoidal, a função é obtida por duas equações lineares, sendo os pontos inicial e final da rede correspondentes à modulação mínima do índice de refração e o ponto central à modulação máxima. A modulação no índice de refração é calculada pela Equação (12), e a energia necessária para causar tal modulação é obtida através do ajuste encontrado na Figura 66. Por fim a velocidade de deslocamento do feixe UV é calculada pela Equação (48).

A apodização de FBGs uniformes gravadas pelo método da máscara de fase com deslocamento do feixe UV e simuladas, podem ser observadas na Figura 73. Os espectros apresentam a refletividade da FBGs não apodizada e com perfil de apodização gaussiana e trapezoidal. Para a gravação da FBG não apodizada, o feixe UV foi transladado com uma velocidade constante de 0,7 mm/s ao longo de 20 mm de fibra, resultando em uma rede com largura de banda de 0,1 nm.

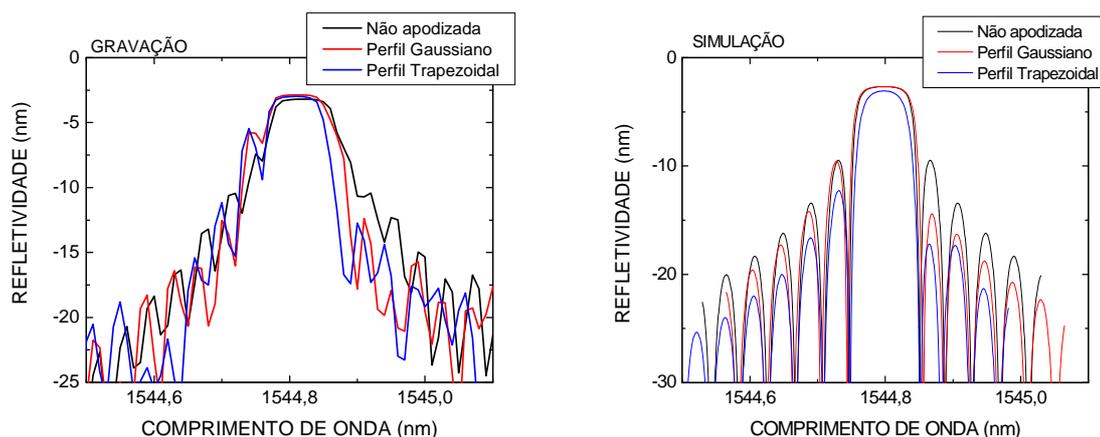


Figura 73 - Redes uniformes apodizadas, gravação e simulação.

Ambas as redes apodizadas mostram uma assimetria espectral: os lóbulos relacionados aos maiores comprimentos de onda diminuem, conforme o esperado com a apodização, embora a estrutura referente aos menores comprimentos de onda é diferenciada. Este método de gravação permite controlar a variação da modulação do índice de refração, Equação (12), mas a condição de Bragg dada pela Equação (9) também varia ao longo da rede, causando uma cavidade de Fabry-Perot distribuída responsável pela não uniformidade espectral (MIZRAHI *and* SIPE, 1993).

Este mesmo método de apodização também pode ser utilizado com uma máscara de fase com gorgeio. Os espectros das redes gravadas e simuladas podem ser observados na Figura 74. As redes foram simuladas conforme descrito anteriormente. As redes possuem 20 mm de comprimento e o feixe UV deslocou-se com velocidade constante de 0,7 mm/s durante a gravação da rede não apodizada, e com velocidades programadas gerando o perfil de apodização gaussiano e o trapezoidal para as demais redes.

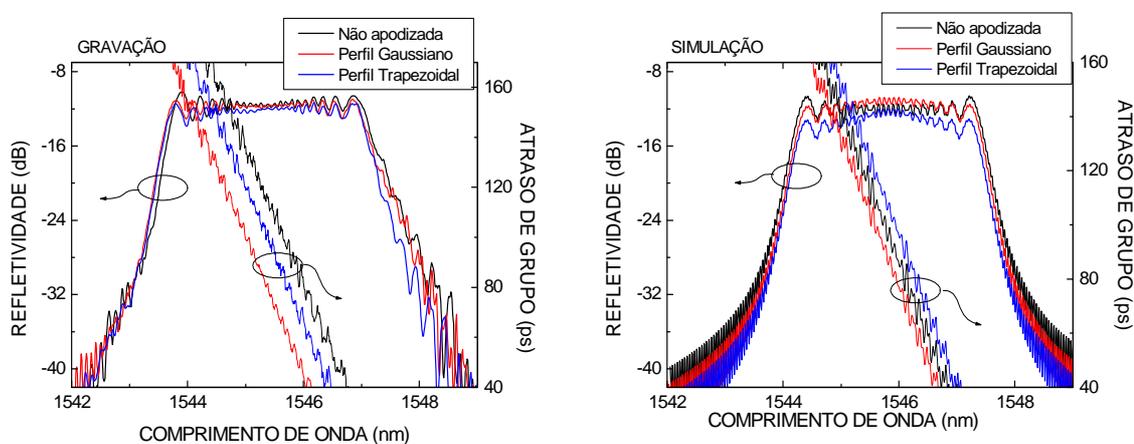


Figura 74 - Redes com gorgeio (não apodizada e apodizadas: perfil gaussiano e trapezoidal), gravação e simulação.

As FBGs com gorgeio apodizadas apresentam uma sutil variação espectral, onde os lóbulos são ligeiramente suavizados, também apresentaram a diminuição da oscilação relacionada ao atraso de grupo. A GDR para a rede não apodizada é de 11 ps, enquanto que a rede apodizada com perfil trapezoidal é de 6 ps, e com perfil gaussiano, $GDR = 4$ ps. Esta característica de minimizar os lóbulos e a oscilação espectral é muito importante quando o dispositivo é utilizado em um sistema de comunicação, pois a presença de oscilações espectrais pode ocasionar a degradação do sinal ótico.

3.4 FBGS CORROÍDAS APLICADAS COMO SENSOR DE CONCENTRAÇÃO

As FBGs corroídas foram aplicadas na produção de um sensor de concentração no caso específico da análise de soluções de etanol e água. O funcionamento do sensor baseia-se na sensibilidade das FBGs corroídas ao índice de refração do meio que circunda a fibra. Uma FBG não é sensível ao índice de refração do meio que a circunda, mas pode tornar-se sensível pela redução do diâmetro da casca da fibra ótica. A redução do diâmetro da casca faz com que os índices efetivos dos modos de propagação passem a ser influenciados pelo índice de refração do meio externo.

3.4.1 Método de Produção dos Dispositivos

A corrosão da casca da fibra é normalmente feita por imersão em ácido fluorídrico (HF), sendo que a velocidade de corrosão depende da concentração da substância corrosiva.

Nos experimentos, as FBGs foram corroídas uma a uma para que seu espectro de reflexão fosse monitorado durante o processo. A rede era imersa em uma solução aquosa de ácido fluorídrico. Inicialmente utilizou-se HF 20 %, mas a FBG permaneceu por 8 horas na solução e não foi observada variação no comprimento de onda de Bragg. Com HF 30 %, o processo de ataque químico demorou cerca de 6 horas. Esta delonga no processo foi o passo principal para a utilização do HF 40 % (máxima concentração disponível em laboratório).

O aparato experimental inicialmente utilizado durante a corrosão está representado na Figura 75, onde a fibra contendo a FBG gravada era presa com fita adesiva em um suporte (apenas na parte superior). A FBG era imersa no HF, o espectro era monitorado em tempo real pelo OSA (*Anritsu, MS9710B*; com resolução de 0,1 nm e estabilidade em comprimento

de onda de ± 5 pm). Quando o espectro de refletividade decaía em aproximadamente metade da intensidade inicial, a rede era retirada do ácido e neutralizada por imersão do segmento corroído em solução de NaOH (2 mol/L).

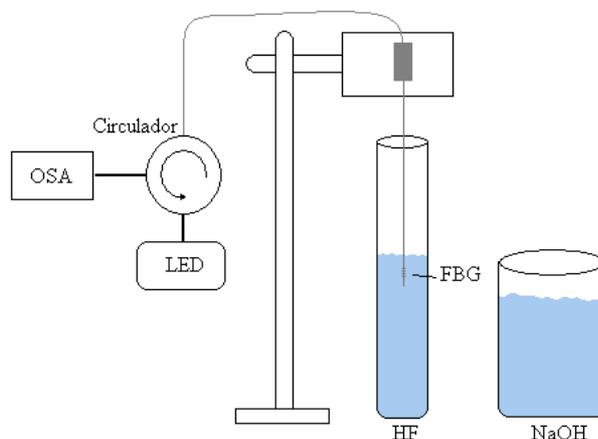


Figura 75 - Aparato experimental utilizado inicialmente na corrosão das FBGs.

Utilizando este processo, várias redes quebraram durante a imersão em NaOH, pois no processo de corrosão ao qual a fibra é submetida, a sua resistência e integridade são afetadas, tornando-a muito mais frágil e sensível, necessitando de mais cuidados durante a manipulação. Para minimizar este problema, a fibra foi então colada em uma palheta de PVC (Figura 76), facilitando o manuseio do dispositivo para posteriores caracterizações.

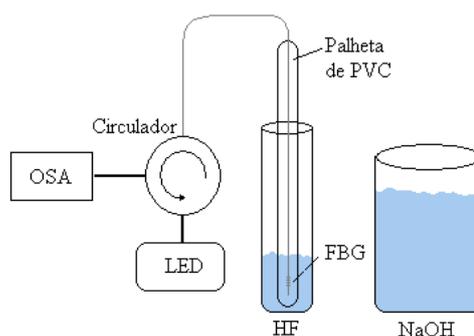


Figura 76 - Aparato experimental utilizado na corrosão das FBGs.

3.4.2 Método de Calibração Preliminar das FBGs Corroídas

A montagem experimental utilizada na caracterização das FBGs corroídas (FBG 10 e FBG 11) fez uso de um OSA (*Anritsu, MS9710B*; com resolução de 0,1 nm e estabilidade em comprimento de onda de ± 5 pm) e dois LEDs como fonte de luz (LED1 – *Superlum, Pilot 2*,

comprimento de onda central de 1544,2 nm e largura de banda de 58,8 nm, e o LED2 – *Superlum, BroadLighter S-1300-G-I-20 SM*, comprimento de onda central a 1290 nm com largura de banda de 48 nm) como mostrado na Figura 77.

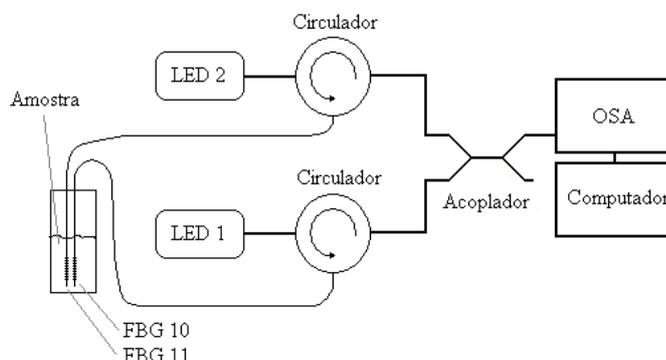


Figura 77 - Representação esquemática da montagem experimental usada para caracterizar as FBGs corroídas.

A luz emitida pelos LEDs é acoplada para as FBGs (10 e 11), que estão imersas na amostra obtida pela mistura de água e glicerina em diferentes proporções. A potência ótica refletida pelas duas FBGs corroídas é medida com o OSA.

Para a calibração preliminar das FBGs 10 e 11, foram preparadas amostras de misturas de glicerina em água sendo que o índice de refração de cada amostra foi medido três vezes a $(25,0 \pm 0,5)$ °C com um refratômetro Abbe (*Atago, DR-A1*) com resolução de 0,0001 unidades de índice de refração (RIU), operando a 589,3 nm. As FBGs corroídas foram imersas em cada amostra e o espectro de reflexão também foi medido a $(25,0 \pm 0,5)$ °C. Cada medida foi adquirida cinco vezes e o resultado final foi calculado pelas médias dos dados. A dispersão associada com as medidas foi estimada para um nível de confiança de 68,3 % pela incerteza combinada (JCGM/WG 1, 2008). A incerteza combinada foi calculada considerando o desvio padrão das médias, os erros associados com a resolução do OSA e do refratômetro, e os erros associados com a incerteza no volume da amostra.

O fato do índice de refração ter sido medido no visível com o refratômetro Abbe ao passo que a resposta da FBG ocorre para variações de índice no infravermelho, não representa problema, uma vez que a medida de índice de refração é usada somente para auxiliar a caracterização do dispositivo. Inicialmente as FBGs foram caracterizadas quanto à sensibilidade ao índice de refração, porém as características do sensor baseado nas FBGs foram obtidas em função da concentração das amostras e não do seu índice de refração.

3.4.3 Método de Caracterização das FBGs Corroídas quanto a Misturas de Etanol em Água

As medidas foram realizadas utilizando as FBGs corroídas (10 e 11) em amostras com concentrações de etanol entre 0,0 % v/v (água pura) e 100,0 % v/v (etanol puro). Os experimentos foram realizados em duas diferentes temperaturas: $(20,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ e $(3,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$. Os índices de refração das amostras foram medidos com um refratômetro Abbe operando a 589,3 nm para ambas temperaturas.

Cada conjunto de dados experimentais foi obtido da análise do conjunto de quatro medidas independentes. Os erros associados com os dados experimentais e a incerteza combinada foram calculados como descrito anteriormente.

As características metrológicas de cada FBG nas duas temperaturas foram determinadas para três regiões características, menor que 40 % v/v (*A*), entre 40 % v/v e 90 % v/v (*B*) e maior que 90 % v/v (*C*).

Após todo este procedimento, as FBGs 10 e 11 foram corroídas por mais 14 segundos a fim de aumentar a sensibilidade e melhorar as características metrológicas dos dispositivos gerados. Novas caracterizações ao índice foram realizadas seguindo o mesmo procedimento, utilizando misturas de água com glicerina e etanol em água.

3.4.4 Características das FBGs Corroídas Produzidas

Foram produzidas duas FBGs corroídas a partir das FBGs 10 e 11, sendo que a corrosão foi realizada imergindo individualmente cada uma das redes em solução aquosa de ácido fluorídrico (HF 40 %). As FBGs tiveram sua evolução espectral acompanhada em tempo real durante o processo de corrosão. Para as duas FBGs, as variações relativas do comprimento de onda medidas durante a corrosão estão representadas na Figura 78.

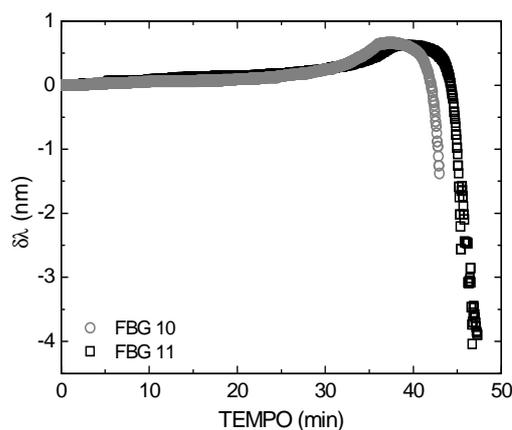


Figura 78 - Variações do comprimento de onda durante a corrosão.

Os dados experimentais da Figura 78 mostram que após os 30 minutos iniciais de imersão em HF, o comprimento de onda sofre um pequeno desvio para maiores valores. Este efeito pode ser atribuído a um aumento na tensão ao longo da região enfraquecida pela corrosão, devido a uma não homogeneidade da fibra ótica (IADICICCO *et al*, 2005) ou devido ao processo de corrosão que apresenta características exotérmicas (PATERNO *et al*, 2005). Após aproximadamente 43 minutos imersa na solução ácida, o comprimento de onda mostra sofrer um grande deslocamento para o azul como consequência da diminuição do índice de refração efetivo dos modos de propagação, causado pela redução do raio da casca (PEREIRA *et al*, 2004). Este fato é uma indicação de que o diâmetro da fibra aproxima-se do diâmetro do núcleo e de que se a corrosão não for interrompida, a FBG e a própria fibra podem ser destruídas. Para parar o ataque químico, a fibra foi removida do ácido e a reação neutralizada pela imersão do segmento corroído em uma solução de NaOH (2 mol/L).

Depois de 43 minutos de corrosão, a sensibilidade ao índice de refração (RIS - *Refractive Index Sensitivity*) foi avaliada imergindo a FBG 10 em duas amostras a temperatura ambiente: água e etanol. Uma variação no comprimento de onda de 0,08 nm entre as respostas na água e etanol foi medida.

A FBG 11 foi quimicamente corroída em duas etapas. Inicialmente a FBG 11 permaneceu na solução de HF até que a variação relativa no comprimento de onda alcançasse o mesmo valor previamente obtido durante a corrosão da FBG 10 ($\delta\lambda = -1,38$ nm). Porém, quando ela foi colocada em contato com as mesmas duas amostras (água e etanol a temperatura ambiente) usadas para a caracterização RIS da FBG 10, a variação relativa do comprimento de onda resultou em somente 0,03 nm. Para obter uma variação maior no comprimento de onda (e consequentemente uma RIS maior), a FBG 11 foi recolocada na

solução ácida por mais 2 minutos, totalizando 47 minutos de corrosão. Após este tempo, a FBG 11 mostrou uma variação relativa em comprimento de onda de 0,25 nm quando em contato com as amostras de água e etanol.

Depois da corrosão, as posições em comprimento de onda para as duas FBGs no ar foram: $\lambda_{\text{FBG10}} = 1538,46 \text{ nm}$ e $\lambda_{\text{FBG11}} = 1304,59 \text{ nm}$ (Figura 79).

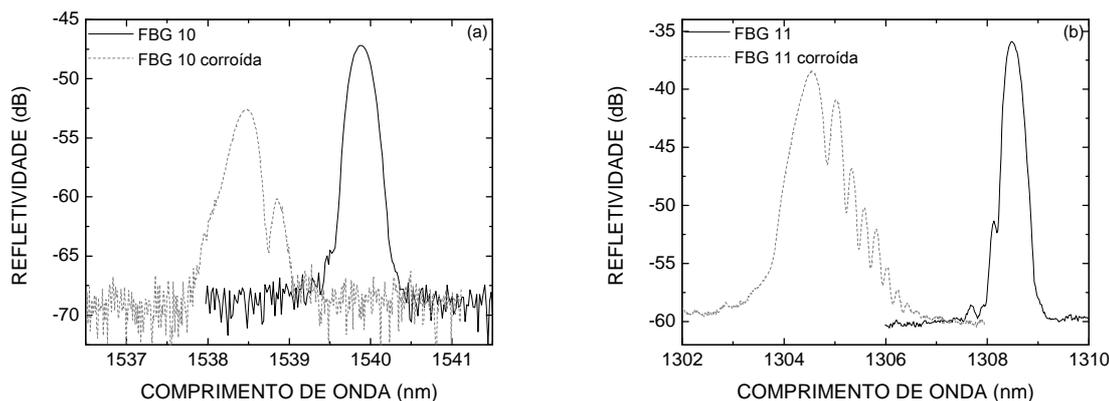


Figura 79 - Espectros de reflexão antes (linha sólida) e depois (linha pontilhada) da corrosão, para: (a) FBG 10 e (b) FBG 11.

A redução do diâmetro da fibra implica uma redução da refletividade da FBG devido ao acoplamento do sinal ótico para fora da fibra, e faz com que os índices efetivos dos modos de propagação passem a ser influenciados pelo índice de refração do meio externo, alterando o perfil espectral (CHEN *et al*, 2007).

3.4.5 Resultados da Calibração Preliminar dos Dispositivos

A Figura 80 mostra a medida relativa da variação do comprimento de onda para as FBGs 10 e 11 submetidas a amostras obtidas pela mistura de glicerina em água. O detalhe na Figura 80 representa a região de interesse para a operação do sensor a ser desenvolvido, que corresponde a região de índices de refração compreendida entre o índice da água e o do etanol. Para esta faixa de índices, as sensibilidades apresentadas são de $(2,9 \pm 0,2) \text{ nm/RIU}$ e de $(6,5 \pm 0,2) \text{ nm/RIU}$ para a FBG 10 e a FBG 11, respectivamente.

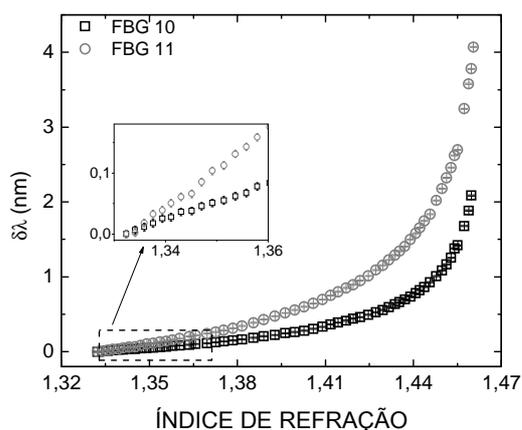


Figura 80 - Variações do comprimento de onda em função do índice de refração das FBGs 10 e 11. O detalhe mostra os índices de refração associados com a mistura água-etanol.

3.4.6 Resultados da Aplicação das FBGs Corroídas na Análise de Misturas Etanol-Água

Primeiramente foi feito um levantamento da dependência entre índice de refração das amostras e a concentração de etanol em água apresentada por estas amostras. Os índices de refração das amostras foram medidos com o refratômetro Abbe para as temperaturas de $(20,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ e $(3,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ e os resultados estão representados na Figura 81, onde as linhas entre os pontos são usadas apenas como guia visual.

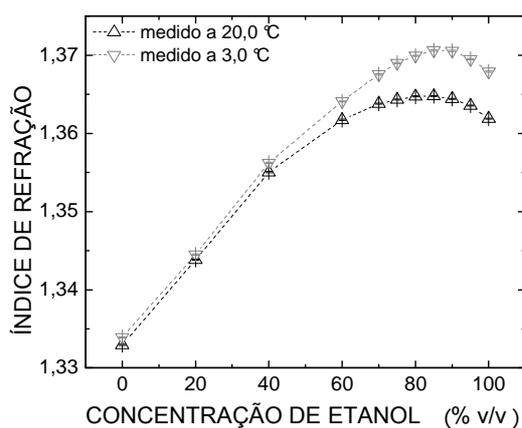


Figura 81 - Índices de refração medidos com um refratômetro Abbe como uma função da concentração de etanol nas misturas etanol-água a $20,0^\circ\text{C}$ e $3,0^\circ\text{C}$.

O índice de refração mostra uma dependência não linear com a concentração de etanol nas amostras, como descrito na literatura (POSSETTI *et al*, 2009). O índice de refração das amostras aumenta quando as concentrações de etanol elevam-se de $0,0\% \text{ v/v}$ para

aproximadamente 80,0 % v/v. Porém, para misturas com concentrações de etanol acima deste valor crítico, o índice de refração diminuiu, e conseqüentemente, há uma correlação ambígua entre o índice de refração e as proporções de etanol na mistura. Esta região de ambigüidade aparece devido à entropia da mistura etanol-água, este efeito pode ser atribuído a associações hidrofóbicas do etanol na solução aquosa e à formação de *clusters* nas ligações de hidrogênio (NISHI *et al*, 1995). Este valor crítico ocorre para um valor de índice de refração bem definido em cada temperatura, estando, portanto relacionado à proporção de etanol e água na amostra e a temperatura da mesma. Quando a temperatura diminui, o índice de refração de uma dada substância aumenta devido ao coeficiente termo-ótico da amostra ser negativo (o coeficiente termo-ótico da água é $-8 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, enquanto que para o etanol é $-4 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (KAMIKAWACHI *et al*, 2008)). Como consequência, as curvas da Figura 81 alcançam valores máximos para concentrações diferentes das amostras.

A ambigüidade observada para a mistura etanol-água pode representar um grande problema para a identificação da concentração da amostra, portanto é proposto um sensor refratométrico como é o caso das redes de Bragg corroídas. Para tentar resolver o problema da ambigüidade na determinação da concentração de etanol em água, foram empregadas na análise das misturas as duas FBGs corroídas obtidas anteriormente, centradas em diferentes comprimentos de onda ($\sim 1300 \text{ nm}$ e $\sim 1500 \text{ nm}$) e com diferentes sensibilidades, sendo que para cada rede as medidas foram realizadas em duas temperaturas distintas ($20,0 \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$ e ($3,0 \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$.

A Figura 82 mostra as variações do comprimento de onda (com relação ao da rede imersa em água pura) medidas com as duas FBGs corroídas a ($20,0 \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$ e ($3,0 \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$ quando imersas nas diferentes amostras.

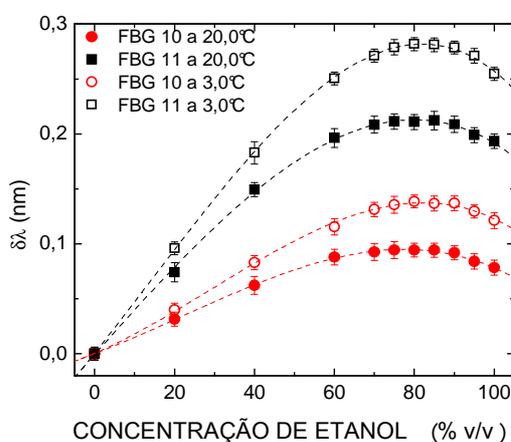


Figura 82 - Variações do comprimento de onda das FBGs 10 e 11 corroídas em função da concentração de etanol nas misturas de etanol-água a 20,0 $^\circ\text{C}$ e 3,0 $^\circ\text{C}$ (pontos experimentais e ajuste polinomial).

Cada ponto experimental foi obtido da análise de um conjunto de quatro medidas independentes e as linhas pontilhadas que conectam os pontos experimentais são os ajustes polinomiais. Foi utilizado um ajuste polinomial de 3ª ordem, por ter sido a função que melhor se ajustou aos pontos experimentais com coeficientes de determinação maiores que 0,99901. Estas funções de calibração são expressas por:

$$\begin{aligned}
 \delta\lambda_{10}^{3,0^{\circ}\text{C}} &= 4,50 \times 10^{-4} + 1,56 \times 10^{-3} E_{\%} + 2,28 \times 10^{-5} E_{\%}^2 - 2,62 \times 10^{-7} E_{\%}^3 \\
 \delta\lambda_{11}^{3,0^{\circ}\text{C}} &= 5,22 \times 10^{-4} + 4,56 \times 10^{-3} E_{\%} + 1,43 \times 10^{-5} E_{\%}^2 - 3,43 \times 10^{-7} E_{\%}^3 \\
 \delta\lambda_{10}^{20,0^{\circ}\text{C}} &= 8,13 \times 10^{-5} + 1,39 \times 10^{-3} E_{\%} + 1,16 \times 10^{-5} E_{\%}^2 - 1,77 \times 10^{-7} E_{\%}^3 \\
 \delta\lambda_{11}^{20,0^{\circ}\text{C}} &= -6,68 \times 10^{-4} + 4,10 \times 10^{-3} E_{\%} - 2,32 \times 10^{-6} E_{\%}^2 - 1,94 \times 10^{-7} E_{\%}^3
 \end{aligned} \tag{53}$$

Na Equação (53), $\delta\lambda$ é a variação do comprimento de onda medido quando as FBGs estão em contato com as amostras, o subscrito (10 ou 11) indica qual FBG foi utilizada na medida, o sobrescrito (3,0 °C ou 20,0 °C) representa a temperatura das amostras e $E_{\%}$ é a concentração de etanol na mistura etanol-água. A solução do conjunto de equações (53) fornece a correta concentração de etanol em água, por meio do método de validação proposto que será descrito no item 3.4.7.

Dois fatores contribuem para o aumento da sensibilidade das redes em temperaturas mais baixas (dada pela inclinação da curva com uma resposta aproximadamente linear até uma concentração de etanol de 70,0 % v/v): o coeficiente termo-ótico negativo da amostra e o coeficiente termo-ótico positivo da fibra ($8,6 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$) (OTHONOS *and* KALLI, 1999)). Quando a temperatura da amostra diminui, os efeitos combinados dos dois fatores aumentam o valor de Δn em (25), com um conseqüente aumento nas variações do comprimento de onda.

Para a rede em temperatura menor, os deslocamentos em comprimento de onda para cada amostra vão ser maiores, pois acontece um aumento no Δn (diferença entre índice da casca e do meio externo) por conta do efeito termo-ótico negativo da amostra que aumenta o índice da mesma e o termo-ótico positivo da fibra que diminui o valor do índice da casca.

Para determinar as características metrológicas de cada FBG para ambas as temperaturas, o eixo das abscissas da Figura 82 foi dividido em valores menores que 40 % v/v (*faixa A*), entre 40 % v/v e 90 % v/v (*faixa B*) e maiores que 90,0 % v/v (*faixa C*) da concentração de etanol. Um ajuste linear foi realizado para os pontos experimentais em cada faixa, a inclinação de cada função ajustada corresponde à sensibilidade média da FBG para a faixa considerada.

Para cada FBG em ambas as temperaturas (3,0 °C e 20,0 °C), a conformidade, repetitividade e resolução foram calculadas. O maior desvio absoluto apresentado pelos pontos experimentais relativos ao ajuste polinomial é a conformidade. A unidade de medida mínima detectável é a resolução e o desvio padrão das médias máximo dos pontos experimentais é a repetitividade.

Todas as características metrológicas foram calculadas em unidades de concentração de etanol na mistura etanol-água (% v/v). Cada característica metrológica foi inicialmente obtida em picômetros (pm), e subsequentemente foi convertida para concentração de etanol (% v/v) pela multiplicação de seus valores pelo inverso da sensibilidade média para cada parte. Os resultados estão apresentados na Tabela 8 (a 3,0 °C) e Tabela 9 (a 20,0 °C).

Tabela 8 - Características metrológicas das FBGs 10 e 11 a 3,0 °C para cada faixa (A, B ou C).

Características	A_FBG 10	A_FBG 11	B_FBG 10	B_FBG 11	C_FBG 10	C_FBG 11
	3,0°C	3,0°C	3,0°C	3,0°C	3,0°C	3,0°C
Sensibilidade Média**	2,1	4,6	1,2	1,6	-1,6	-2,4
Conformidade*	0,8	0,1	1,8	0,3	2,1	0,4
Repetitividade*	0,9	1,1	3,0	0,7	1,9	1,4
Resolução (OSA)*	1,4	0,6	2,5	1,8	1,8	1,2
Resolução (Temperatura)*	1,1	0,4	1,9	1,3	1,4	0,9
Incerteza Combinada*	2,1	1,3	4,7	2,3	3,6	2,1

* Todas as unidades estão expressas em (% v/v) com exceção ** (pm/% v/v)

Tabela 9 - Características metrológicas das FBGs 10 e 11 a 20,0 °C para cada faixa (A, B ou C).

Características	A_FBG 10	A_FBG 11	B_FBG 10	B_FBG 11	C_FBG 10	C_FBG 11
	20,0°C	20,0°C	20,0°C	20,0°C	20,0°C	20,0°C
Sensibilidade Média**	1,6	3,7	0,6	1,3	-1,35	-1,5
Conformidade*	1,1	0,5	4,5	0,6	3,0	0,6
Repetitividade*	1,7	1,2	7,9	2,5	2,8	2,4
Resolução (OSA)*	1,9	0,8	5,3	2,2	2,1	1,9
Resolução (Temperatura)*	1,4	0,6	4,1	1,6	1,7	1,4
Incerteza Combinada*	3,1	1,6	11,3	3,8	4,9	3,4

* Todas as unidades estão expressas em (% v/v) com exceção ** (pm/% v/v)

Apesar do desempenho apresentado para cada FBG para determinar a concentração de etanol nas faixas, somente uma FBG corroída é incapaz de classificar a correlação entre o índice de refração e a concentração de etanol da mistura na região de ambiguidade. Para resolver o problema da ambiguidade as curvas de resposta das FBGs 10 e 11 foram combinadas em pares, resultando em quatro diferentes configurações: para a mesma

temperatura a dois comprimentos de onda (FBG 10 e FBG 11 a 3,0 °C, FBG 10 e FBG 11 a 20,0 °C), ou o mesmo comprimento de onda em diferentes temperaturas (FBG 10 a 3,0 °C e 20,0 °C, FBG 11 a 3,0 °C e 20,0 °C). As incertezas combinadas associadas com estes sistemas estão apresentadas na Tabela 10, para as faixas A, B e C.

Tabela 10 - Incertezas combinadas para as quatro configurações.

Sensor	Sistema Temperatura (°C)	Incerteza Combinada do Sistema (% v/v)		
		Faixa A	Faixa B	Faixa C
FBG 10 e FBG 11	3,0	3,2	5,3	4,2
FBG 10 e FBG 11	20,0	3,5	11,9	5,9
FBG 10	3,0 e 20,0	3,8	12,3	6,1
FBG 11	3,0 e 20,0	2,1	4,5	4,0

A incerteza combinada da configuração do sensor composto pelas duas FBGs operando a 3,0 °C é 3,2 % v/v para a *faixa A* e 5,3 % v/v para a *faixa B* e 4,2 % v/v para a *faixa C*. Estas incertezas são menores quando comparadas à configuração do sensor que opera a 20,0 °C, cujas incertezas são 3,5 % v/v para a *faixa A* e 11,9 % v/v para a *faixa B* e 5,9 % v/v na *faixa C*. Porém, as incertezas combinadas obtidas para a configuração do sensor baseado na resposta da FBG 11 nas duas temperaturas, 3,0 °C e 20,0 °C, foi de 2,1 % v/v para a *faixa A* e 4,5 % v/v para a *faixa B* e para a *faixa C* 4,0 % v/v. As incertezas neste caso são menores não somente comparada com a configuração do sensor baseado na resposta da FBG 10 em duas temperaturas (3,8 % v/v para a *faixa A*, 12,3 % v/v para a *faixa B* e 6,1 % v/v para a *faixa C*), mas também quando comparada com as configurações que utilizam dois sensores na mesma temperatura.

O melhor desempenho da configuração do sensor baseado na FBG 11 comparado ao da FBG 10 está relacionado à sua maior sensibilidade ao índice de refração.

3.4.7 Validação do Método Proposto para a Determinação da Concentração de Etanol

O método proposto para determinar a concentração de etanol nas amostras consiste basicamente em medir o comprimento de onda obtido com uma amostra desconhecida e em encontrar as raízes adequadas do sistema de equações obtidos a partir das curvas de calibração dadas pelo conjunto de Equações (53). Cada curva de calibração apresenta três diferentes raízes, e a correta concentração é determinada pelo valor da raiz real (ou seu módulo no caso de uma raiz complexa) entre 0,0 % v/v e 100,0 % v/v que melhor se aproxima (com a menor

diferença) às duas curvas de calibração associadas com a configuração do sensor, resultando em uma concentração média $E\%$. Cada configuração do sensor foi individualmente testada para verificar a validade do método proposto, e comparado ao desempenho de cada sensor.

Para as duas FBGs corroídas a 20,0 °C foram calculadas as raízes das curvas de calibração atribuindo para ambas as FBGs os valores que correspondem aos pontos experimentais mostrados na Figura 82 ($\delta\lambda^{20,0\text{ °C}}$ em (53)). A Tabela 11 mostra as raízes polinomiais encontradas para cada curva de calibração.

Tabela 11 - Raízes polinomiais calculadas com (53) para as duas FBGs a 20,0 °C

$E\%$ real*	FBG 10 a 20,0 °C			FBG 11 a 20,0 °C			$E\%$ *	$u_{E\%}$ *
	Raízes*			Raízes*				
	1	2	3	1	2	3		
0,0	-61,7	-0,1	127,5	-151,4	0,2	139,3	0,1	3,5
20,0	-73,7	20,2	119,3	-159,4	18,8	128,7	19,5	3,5
40,0	-82,2	39,5	108,5	-166,5	40,7	113,8	40,1	11,9
60,0	-88,0	60,9	92,9	-170,5	60,9	97,7	60,9	11,9
70,0	-89,0	67,7	87,1	-171,5	70,2	89,3	88,2	11,9
75,0	-89,3	71,5	83,6	-171,6	71,2	88,4	86,0	11,9
80,0	-89,3	71,5	83,5	-171,7	73,4	86,3	72,5	11,9
85,0	-89,3	71,5	83,6	-171,8	75,9	84,0	83,8	11,9
90,0	-88,8	66,2	88,3	-171,5	70,5	89,0	88,7	11,9
95,0	-87,1	56,6	96,3	-170,7	62,5	96,3	96,3	5,9
100,0	-85,9	51,5	100,2	-170,2	59,0	99,3	99,7	5,9

* Todas as unidades estão expressas em % (v/v).

Na Tabela 11, as células em cinza representam valores a serem desconsiderados, pois não cumprem as exigências do método. São assumidos os valores superiores e inferiores que estabelecem os níveis de confiança com base na incerteza combinada do sensor ($u_{E\%}$), previamente calculada na Tabela 10.

Para esta configuração de sensor, um valor calculado (célula vermelha) está distante do valor real (70,0 % v/v). Os maiores erros para esta configuração ocorrem quando os pontos experimentais estão distantes da curva de calibração. Levando em conta esta observação, foi determinada a divergência máxima (para mais ou para menos) que os pontos experimentais podem se afastar da curva de calibração. Estes valores são cerca de 0,6 pm e os pontos experimentais estão em média 10 pm distantes da curva de calibração, resultando em raízes erradas. Para encontrar estes valores, primeiramente foram realizados os cálculos das raízes que fazem parte da curva de calibração (53). Após este passo, 0,05 pm foi acrescentado a cada ponto (para mais e para menos) e foi calculada a concentração correspondente. Este procedimento foi realizado até quando se acrescentou 0,65 pm e a concentração calculada não correspondia ao valor real.

Um método similar de validação foi utilizado para a configuração do sensor baseado nas FBGs a 3,0 °C. Estes resultados estão mostrados na Tabela 12. Novamente, as células em cinza devem ser desconsideradas e o nível de confiança foi estabelecido nos dados apresentados na Tabela 10. As células em verde equivalem aos módulos das raízes complexas.

Tabela 12 - Raízes polinomiais calculadas com (53) para ambas FBGs a 3,0 °C.

$E_{\% \text{ real}}^*$	FBG 10 a 3,0 °C			FBG 11 a 3,0 °C			$E_{\%}^*$	$u_{E\%}^*$
	Raízes*			Raízes*				
	1	2	3	1	2	3		
0,0	-44,9	-0,3	132,4	-96,3	-0,1	138,2	-0,2	3,2
20,0	-58,6	20,5	125,2	-107,0	20,3	128,5	20,4	3,2
40,0	-68,2	40,1	115,2	-114,7	39,7	116,7	39,9	5,3
60,0	-73,9	57,3	103,9	-119,9	59,6	102,1	103,0	5,3
70,0	-76,4	69,5	94,2	-121,4	69,3	93,8	69,4	5,3
75,0	-77,1	75,3	89,0	-121,9	75,3	88,4	75,3	5,3
80,0	-77,5	82,5	82,5	-121,1	81,1	82,8	82,7	5,3
85,0	-77,3	78,0	86,5	-122,1	79,0	84,8	78,5	5,3
90,0	-77,3	78,6	86,0	-121,9	75,1	88,6	87,3	5,3
95,0	-76,2	67,7	95,7	-121,4	69,2	93,9	68,5	4,2
100,0	-74,9	61,1	101,0	-120,2	61,2	100,8	61,1	4,2

* Todas as unidades estão expressas em % (v/v).

Para esta configuração de sensor, três valores calculados estão distantes (células em vermelho) dos valores reais (60,0 % v/v, 95,0 % v/v e 100,0 % v/v).

As desvantagens descritas nos métodos descritos são minimizadas usando uma configuração de sensor baseado em apenas uma FBG em duas temperaturas diferentes.

A Tabela 13 exhibe as concentrações calculadas $E_{\%}$ e as respectivas incertezas combinadas $u_{E\%}$, para as duas configurações de sensor que empregam somente uma FBG em duas temperaturas: 3,0 °C e 20,0 °C.

Tabela 13 - Raízes polinomiais calculadas com (53) para cada FBG nas duas temperaturas.

$E_{\% \text{ real}}^*$	FBG 10		FBG 11	
	a 3,0°C e 20,0°C		a 3,0°C e 20,0°C	
	$E_{\%}^*$	$u_{E\%}^*$	$E_{\%}^*$	$u_{E\%}^*$
0,0	-0,2	3,8	0,0	2,1
20,0	20,3	3,8	19,5	2,1
40,0	39,8	12,3	40,3	4,5
60,0	59,1	12,3	60,6	4,5
70,0	68,6	12,3	70,6	4,5
75,0	73,4	12,3	72,2	4,5
80,0	83,0	12,3	83,6	4,5
85,0	85,0	12,3	82,8	4,5
90,0	87,1	12,3	88,2	4,5
95,0	96,0	6,1	95,0	4,0
100,0	100,6	6,1	100,1	4,0

* Todas as unidades estão expressas em % (v/v).

Para as duas FBGs, todas as concentrações de etanol obtidas correspondem às concentrações de etanol real, dentro do nível de confiança estabelecido pela incerteza combinada. Contudo, a FBG 11 apresenta um melhor desempenho (expresso pela incerteza combinada) em comparação com a FBG 10. Este comportamento é resultado da alta sensibilidade da FBG 11 ao índice de refração externo, como previamente mostrado na Tabela 8 e na Tabela 9.

3.4.8 FBGs Submetidas a uma Segunda Corrosão

Uma vez que os resultados anteriores mostraram que a sensibilidade da FBG corroída é um fator determinante do desempenho do sensor, as FBGs corroídas 10 e 11 foram submetidas a um segundo processo de corrosão com o intuito de aumentar ainda mais a sua sensibilidade. As redes foram imersas novamente em solução aquosa de ácido fluorídrico (HF 40 %) durante 14 segundos, e tiveram os seus espectros acompanhados em tempo real. Para parar o ataque, a fibra foi removida do ácido e neutralizada pela imersão do segmento corroído em uma solução de NaOH (2 mol/L). As FBGs foram individualmente corroídas.

Depois da segunda corrosão, a posição do comprimento de onda para as duas FBGs no ar foram: $\lambda_{\text{FBG10}} = 1537,34 \text{ nm}$ a $\lambda_{\text{FBG11}} = 1301,97 \text{ nm}$, conforme a Figura 83.

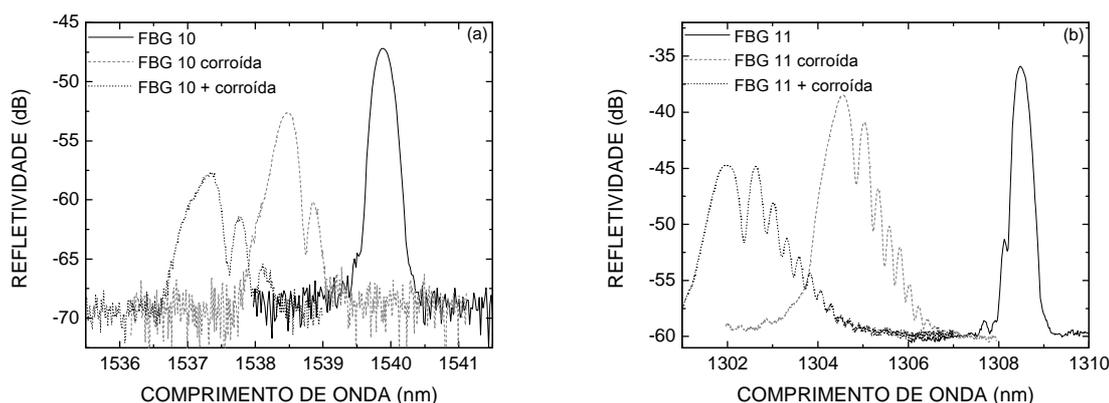


Figura 83 - Espectros de reflexão antes, depois da primeira e depois da segunda corrosão, para: (a) FBG 10 e (b) FBG 11.

A redução do diâmetro das fibras após os 14 segundos na segunda corrosão contribuiu ainda mais para a redução da refletividade das redes, pois uma maior quantidade de sinal está sendo acoplada para fora da fibra na região corroída, devido ao campo evanescente estar interagindo de forma mais efetiva com o meio externo. A forma espectral após a

segunda corrosão é mais afetada, pois os índices efetivos dos modos de propagação passam a ser ainda mais influenciados pelos índices de refração do meio externo (CHEN *et al*, 2007).

3.4.9 Resultados da Segunda Calibração com Mistura Glicerina em Água

A Figura 84 mostra a medida relativa da variação do comprimento de onda para as FBGs 10 e 11 na segunda calibração utilizando misturas de água e glicerina. Para a faixa de índices de refração entre água e etanol (de 1,33 a 1,36), as sensibilidades das FBGs aumentaram para $(7,2 \pm 0,1)$ nm/RIU para a FBG 10 e $(11,4 \pm 0,1)$ nm/RIU para a FBG 11.

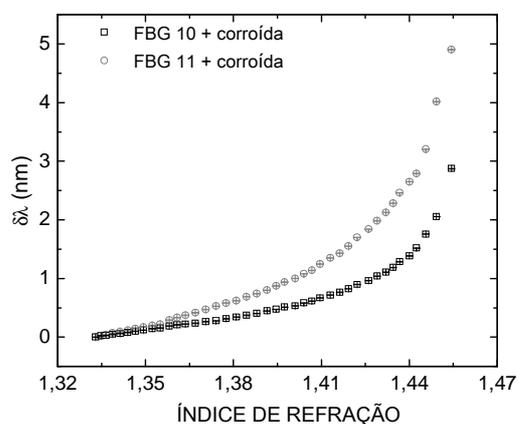


Figura 84 - Variações do comprimento de onda em função do índice de refração das FBGs 10 e 11 mais corroídas (segunda caracterização).

3.4.10 Resultados da Aplicação das FBGs Submetidas a uma Segunda Corrosão na Análise de Misturas Etanol-Água

Com as FBGs 10 e 11 submetidas a uma segunda corrosão, foram realizadas novamente as medidas de caracterização com as amostras contendo concentrações de etanol entre 0,0 % v/v (água pura) e 100 % v/v (etanol puro). Novas amostras foram preparadas e os índices de refração medidos com o refratômetro Abbe para as temperaturas de $(20,0 \pm 0,5)$ °C e $(3,0 \pm 0,5)$ °C estão representados na Figura 85, onde as linhas entre os pontos são usadas apenas como guia visual.

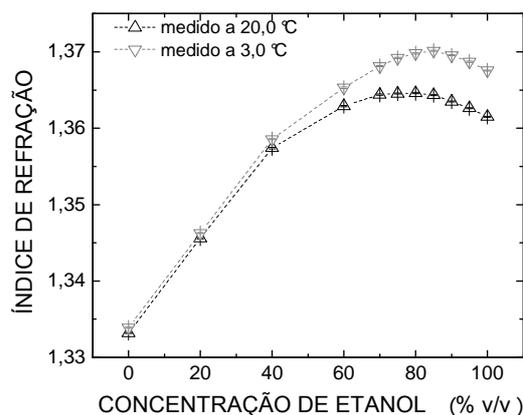


Figura 85 - Índices de refração medidos com um refratômetro Abbe como uma função da concentração de etanol nas misturas água-etanol a 20,0 °C e 3,0 °C (segunda caracterização).

A Figura 86 mostra as variações do comprimento de onda (medida do comprimento de onda relativo quando a rede está imersa em água pura) medidas com as duas FBGs mais corroídas a $(20,0 \pm 0,5)$ °C e $(3,0 \pm 0,5)$ °C para cada concentração de etanol.

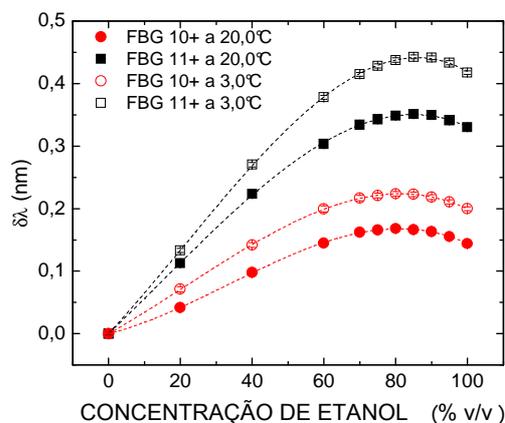


Figura 86 - Variações do comprimento de onda das FBGs 10 e 11 mais corroídas em função da concentração de etanol nas misturas de etanol-água a 20,0 °C e 3,0 °C (pontos experimentais e ajuste polinomial).

Cada ponto experimental foi obtido da análise de um conjunto de cinco medidas independentes e as linhas pontilhadas que conectam os pontos experimentais são os ajustes polinomiais. Funções polinomiais de terceira ordem com coeficientes de determinação maiores que 0,99983 foi ajustada a cada conjunto de pontos experimentais. Estas funções de calibração são expressas por:

$$\begin{aligned}
\delta\lambda_{10+}^{3,0^{\circ}\text{C}} &= 8,30 \times 10^{-5} + 3,22 \times 10^{-3} E_{\%} + 2,23 \times 10^{-5} E_{\%}^2 - 3,45 \times 10^{-7} E_{\%}^3 \\
\delta\lambda_{11+}^{3,0^{\circ}\text{C}} &= 6,98 \times 10^{-5} + 6,19 \times 10^{-3} E_{\%} + 3,51 \times 10^{-5} E_{\%}^2 - 5,50 \times 10^{-7} E_{\%}^3 \\
\delta\lambda_{10+}^{20,0^{\circ}\text{C}} &= -1,06 \times 10^{-4} + 1,45 \times 10^{-3} E_{\%} + 4,10 \times 10^{-5} E_{\%}^2 - 4,11 \times 10^{-7} E_{\%}^3 \\
\delta\lambda_{11+}^{20,0^{\circ}\text{C}} &= -5,81 \times 10^{-5} + 5,49 \times 10^{-3} E_{\%} + 1,65 \times 10^{-5} E_{\%}^2 - 3,83 \times 10^{-7} E_{\%}^3
\end{aligned} \tag{54}$$

As características metrológicas de cada FBG mais corroída para as duas temperaturas foram calculadas como descrito anteriormente. Os resultados estão apresentados na Tabela 14 (a 3,0 °C) e Tabela 15 (a 20,0 °C).

Tabela 14 - Características metrológicas das FBGs 10+ e 11+ a 3,0 °C para cada faixa (A, B ou C).

Características	A_FBG 10+	A_FBG 11+	B_FBG 10+	B_FBG 11+	C_FBG 10+	C_FBG 11+
	3,0°C	3,0°C	3,0°C	3,0°C	3,0°C	3,0°C
Sensibilidade Média**	3,6	6,8	1,6	3,3	-1,9	-2,4
Conformidade*	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3
Repetitividade*	0,8	0,3	1,9	0,7	0,9	0,7
Resolução (OSA)*	0,8	0,4	2,1	0,9	1,5	1,2
Resolução (Temperatura)*	0,6	0,3	1,4	0,6	1,2	0,9
Incerteza Combinada*	1,3	0,6	2,9	1,3	2,1	1,7

* Todas as unidades estão expressas em (% v/v) com exceção ** (pm/% v/v)

Tabela 15 - Características metrológicas das FBGs 10 e 11 a 20,0 °C para cada faixa (A, B ou C).

Características	A_FBG 10+	A_FBG 11+	B_FBG 10+	B_FBG 11+	C_FBG 10+	C_FBG 11+
	20,0°C	20,0°C	20,0°C	20,0°C	20,0°C	20,0°C
Sensibilidade Média**	2,5	5,6	1,3	2,6	-1,9	-2,0
Conformidade*	0,1	0,1	0,3	0,4	0,1	0,3
Repetitividade*	1,0	0,2	1,3	0,5	0,9	0,5
Resolução (OSA)*	1,2	0,5	2,2	1,1	1,5	1,5
Resolução (Temperatura)*	0,9	0,4	1,7	0,8	1,2	1,1
Incerteza Combinada*	1,8	0,7	3,1	1,5	2,1	1,9

* Todas as unidades estão expressas em (% v/v) com exceção ** (pm/% v/v)

Com a segunda corrosão das FBGs 10 e 11, a sensibilidade média aumentou, as características metrológicas apresentaram melhores resultados, e consequentemente uma menor incerteza combinada do sistema. As incertezas combinadas associadas com as quatro diferentes configurações mencionadas anteriormente estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Incertezas combinadas para as quatro configurações após a segunda corrosão.

Sensor	Sistema Temperatura (°C)	Incerteza Combinada do Sistema (% v/v)		
		Faixa A	Faixa B	Faixa C
FBG 10+ e FBG 11+	3,0	1,4	3,2	2,7
FBG 10+ e FBG 11+	20,0	1,9	3,4	2,8
FBG 10+	3,0 e 20,0	2,2	4,3	3,0
FBG 11+	3,0 e 20,0	0,9	2,0	2,5

As incertezas combinadas das configurações dos sensores são menores quando comparadas às incertezas combinadas apresentadas na Tabela 10, onde as FBGs não haviam passado pela segunda corrosão. A melhor configuração que apresenta a menor incerteza combinada continua sendo o sensor baseado na FBG 11+ em duas temperaturas, pois está relacionada à sua maior sensibilidade ao índice de refração.

3.4.11 Segunda Validação do Método Proposto de Determinação da Concentração de Etanol

A correta concentração de uma amostra desconhecida composta pela mistura água-etanol é determinada pelo mesmo método descrito anteriormente, utilizando as curvas de calibração agora dadas pelo conjunto de equações (54). Para as duas FBGs mais corroídas (FBG 10+ e FBG 11+) a 20,0 °C foram calculadas as raízes das curvas de calibração atribuindo para ambas as FBGs os valores que correspondem aos pontos experimentais mostrados na Figura 86 ($\delta\lambda^{20,0\text{ °C}}$ em (54)). As raízes polinomiais encontradas para cada curva de calibração estão mostradas na Tabela 17.

Tabela 17 - Raízes polinomiais calculadas com (54) para as duas FBGs mais corroídas a 20,0 °C.

$E_{\% \text{ real}}^*$	FBG 10+ a 20,0 °C			FBG 11+ a 20,0 °C			$E_{\%}^*$	$u_{E\%}^*$
	Raízes*			Raízes*				
	1	2	3	1	2	3		
0,0	-27,7	0,1	127,5	-100,1	0,0	143,1	0,0	1,9
20,0	-42,0	19,8	121,9	-110,5	19,9	133,8	19,9	1,9
40,0	-52,7	40,2	112,4	-118,8	40,4	121,5	40,3	3,4
60,0	-59,4	59,4	99,8	-124,0	59,3	107,8	59,3	3,4
70,0	-61,6	70,6	90,8	-125,8	70,2	98,7	70,4	3,4
75,0	-62,0	74,9	87,0	-126,3	74,9	94,5	74,9	3,4
80,0	-62,3	79,9	82,2	-126,7	79,8	90,0	79,8	3,4
85,0	-62,1	75,3	86,6	-126,8	85,0	85,0	85,6	3,4
90,0	-61,7	71,7	89,9	-126,8	81,9	89,9	89,9	3,4
95,0	-60,7	65,4	95,2	-126,7	74,0	95,3	95,1	2,8
100,0	-59,3	59,1	100,0	-125,6	68,5	100,2	100,0	2,8

* Todas as unidades estão expressas em % (v/v).

Cada curva de calibração apresenta três diferentes raízes, e a correta concentração é determinada pelo valor da raiz real (ou seu módulo no caso de uma raiz complexa) entre 0,0 % v/v e 100,0 % v/v que melhor se aproxima (com a menor diferença) às duas curvas de calibração associadas com a configuração do sensor, resultando em uma concentração média $E\%$. Na Tabela 17, as células em verde correspondem aos módulos das raízes complexas e as células em cinza representam valores a serem desconsiderados, pois não cumprem as exigências do método. São assumidos os valores superiores e inferiores que estabelecem os níveis de confiança com base na incerteza combinada do sensor ($u_{E\%}$), previamente calculada na Tabela 16.

A configuração de sensor baseado em dois comprimentos de onda na temperatura de 20,0 °C apresentou todos os resultados calculados ($E\%$) próximos dos valores reais ($E\%_{\text{real}}$). A segunda corrosão foi de grande importância para melhorar as sensibilidades dos sensores, resultando em um melhor desempenho do dispositivo.

O método de validação com a configuração do sensor baseado nas FBGs mais corroídas a 3,0 °C foi realizado novamente. Estes resultados estão mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Raízes polinomiais calculadas com (54) para ambas FBGs a 3,0 °C.

$E\%_{\text{real}}^*$	FBG 10+ a 3,0 °C			FBG 11+ a 3,0 °C			$E\%^*$	$u_{E\%}^*$
	Raízes*			Raízes*				
	1	2	3	1	2	3		
0,0	-69,5	0,0	134,1	-78,9	0,0	142,5	0,0	1,4
20,0	-81,3	20,2	125,7	-90,4	20,0	134,0	20,1	1,4
40,0	-89,9	39,8	114,6	-99,3	40,3	122,7	40,1	3,2
60,0	-95,8	60,2	100,0	-105,3	59,9	108,9	60,1	3,2
70,0	-97,4	70,6	91,3	-107,1	69,6	101,1	70,1	3,2
75,0	-97,8	74,8	87,5	-107,8	74,7	96,7	74,7	3,2
80,0	-98,0	81,3	81,3	-108,2	80,1	91,7	80,7	3,2
85,0	-97,9	76,2	86,1	-108,4	86,1	86,1	86,1	3,2
90,0	-97,6	72,1	90,0	-108,3	82,6	89,3	89,7	3,2
95,0	-96,9	66,4	95,0	-108,0	77,2	94,4	94,7	2,8
100,0	-95,8	60,5	99,8	-107,2	70,5	100,3	100,1	2,8

* Todas as unidades estão expressas em % (v/v).

Novamente, as células em cinza devem ser desconsideradas e o nível de confiança foi estabelecido dos dados na Tabela 16. As células em verde correspondem aos módulos das raízes complexas. Para esta configuração de sensor, todos os valores calculados também estão próximos dos valores reais, porém a incerteza combinada é menor devido ao fato de que a sensibilidade do sensor é acentuada com a temperatura menor.

A configuração de sensor baseado em apenas um comprimento de onda em duas temperaturas diferentes também foram validados com as FBGs mais corroídas. A Tabela 19 exhibe as concentrações calculadas $E\%$ e as respectivas incertezas combinadas $u_{E\%}$, para as duas configurações de sensor que empregam somente uma FBG a duas temperaturas.

Tabela 19 - Raízes polinomiais calculadas com (54) para cada FBG mais corroída nas duas temperaturas.

$E\%_{\text{real}}^*$	FBG 10+		FBG 11+	
	a 3,0°C e 20,0°C		a 3,0°C e 20,0°C	
	$E\%^*$	$u_{E\%}^*$	$E\%^*$	$u_{E\%}^*$
0	0,0	2,2	0,0	0,9
20	20,0	2,2	19,9	0,9
40	40,0	4,3	40,3	2,0
60	59,8	4,3	59,6	2,0
70	70,6	4,3	69,9	2,0
75	74,8	4,3	74,8	2,0
80	86,1	4,3	79,9	2,0
85	80,6	4,3	85,5	2,0
90	89,9	4,3	89,6	2,0
95	95,1	3,0	94,8	2,5
100	99,9	3,0	100,3	2,5

* Todas as unidades estão expressas em % (v/v).

Todas as concentrações de etanol obtidas correspondem às concentrações de etanol real para a FBG 11+, porém o valor referente à concentração de 85 % v/v não corresponde ao valor real quando a FBG 10+ foi utilizada nas duas temperaturas, dentro do nível de confiança estabelecido pela incerteza combinada. Contudo, a FBG 11+ continua apresentando melhor desempenho em comparação com a FBG 10+. Este comportamento é resultado da alta sensibilidade da FBG 11+ ao índice de refração externo, como mostrado anteriormente.

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

4.1 ESTABILIDADE TÉRMICA DAS REDES DE BRAGG

O tratamento térmico em temperaturas de até 400,0 °C, com patamares de temperatura de curta duração mostrou-se eficaz na estabilização térmica das FBGs, sendo necessários três ciclos de aquecimento e resfriamento para que as FBGs, tanto as gravadas em fibra fotossensível como as gravadas em fibra hidrogenada, apresentassem estabilização térmica. Não foram observadas diferenças significativas na estabilização das FBGs, quando realizados os resfriamentos lento e rápido.

O tratamento térmico em temperaturas de até 400,0 °C, com patamares de longa duração também se mostrou eficaz na estabilização térmica das FBGs (gravadas em fibra SSMF e SSMF hidrogenada), após os três ciclos de aquecimento em patamares de temperatura de $(400,0 \pm 0,5)$ °C, sendo necessárias mais 33 horas em temperatura ambiente.

Após aquecer a rede até uma dada temperatura, em patamares de curta ou longa duração, a histerese (variação do comprimento de onda em relação ao ciclo anterior) é drasticamente reduzida e a rede de Bragg pode ser usada em diversas aplicações até a temperatura máxima do tratamento, com uma evolução térmica que depende somente do tipo de fibra.

Os patamares de curta duração em temperaturas elevadas resultaram na extinção completa da modulação de índice de refração responsável pela formação da FBG.

Os tratamentos térmicos com patamares de longa duração em temperaturas elevadas ocasionam a destruição e subsequente regeneração das FBGs, sendo que a temperatura de regeneração depende das características de cada FBG (FBG 8 regenerou a 700,0 °C e a FBG 9 a 800 °C), como o tipo de fibra (FBG 8: fibra fotossensível, FBG 9: fibra SMF hidrogenada) e as condições de gravação. Para temperaturas iguais ou inferiores a temperatura de regeneração, as FBGs apresentam estabilidade térmica. No entanto, em temperaturas superiores as FBGs regeneradas decaem.

4.2 GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG NO IT-UA

Utilizando o método de gravação de redes de Bragg por colagem das franjas de interferência, foi encontrada uma relação entre a diferença de fase mantida constante entre cada subrede e o comprimento de onda de redes gravadas. O método permite fazer uma correspondência entre as larguras de banda de redes de Bragg com gorgeio gravadas e o tamanho de subrede.

Com o método de colagem das franjas de interferência é possível projetar e gravar redes de Bragg com qualquer tipo de gorgeio, sem a necessidade de utilizar várias máscaras de fase com gorgeios específicos. Este fato representa uma vantagem do método pois não há necessidade de se ter uma grande quantidade de máscaras diferentes para produzir dispositivos adequados a cada aplicação. No entanto, para a aplicação do método de colagem das franjas de interferência são necessários posicionadores de precisão nanométrica, caso contrário, podem ocorrer mudanças de fase indesejadas entre as subredes degradando o espectro da rede gravada.

As FBGs gravadas pela exposição direta da máscara de fase uniforme tanto por meio de uma única exposição da máscara com velocidade variável quanto por meio de uma exposição com velocidade constante seguida de exposição direta da fibra com velocidade variável, apresentaram baixa simetria espectral. As FBGs com gorgeio gravadas com uma única exposição da máscara de fase, resultaram em larguras de banda maiores comparadas às redes gravadas com a dupla exposição. As vantagens destes métodos são a possibilidade de gravação com posicionadores com resolução micrométrica e a utilização de uma única máscara de fase uniforme.

As redes amostradas com os parâmetros a (tamanho da seção gravada) e P (período da amostra: tamanho total correspondente a seção gravada e a não gravada) constantes, e com coeficiente de gorgeio nos parâmetros a ou P , ou em ambos, resultam num espectro correspondente ao de várias redes de Bragg com largura de banda reduzida, sendo que o dispositivo pode ser usado como compensador de dispersão de vários canais ou como filtros centrados em comprimentos de onda específicos.

4.3 FBGS CORROÍDAS APLICADAS COMO SENSOR DE CONCENTRAÇÃO

As FBGs corroídas foram aplicadas na produção de um sensor de concentração no caso específico da análise de soluções de etanol e água com o objetivo de resolver a ambiguidade existente na correlação entre o índice de refração das amostras e as proporções nas misturas etanol em água. No específico caso da análise de misturas de etanol-água, foram empregadas duas FBGs corroídas operando em diferentes comprimentos de onda (~ 1300 nm e ~ 1500 nm), com sensibilidades de $(2,9 \pm 0,2)$ nm/RIU e $(6,5 \pm 0,2)$ nm/RIU após a primeira corrosão, e de $(7,2 \pm 0,1)$ nm/RIU e $(11,4 \pm 0,1)$ nm/RIU após a segunda corrosão.

Para resolver o problema da ambiguidade, quatro configurações dos dispositivos foram propostas e testadas. A configuração codificada em dois comprimentos de onda à temperatura de $(3,0 \pm 0,5)$ °C resultou em melhores características metrológicas comparada a mesma configuração operando à $(20,0 \pm 0,5)$ °C, mas ambos os casos resultaram em concentrações erradas para cerca de 18 % das amostras estudadas. Esta limitação foi suprimida quando foi utilizada uma configuração com um único comprimento de onda operando em duas temperaturas diferentes. Nesta configuração, a FBG em ~ 1300 nm resultou em melhores características metrológicas devido à sua melhor sensibilidade comparada à FBG em ~ 1500 nm.

As características metrológicas e conseqüentemente as incertezas combinadas do sistema foram reduzidas após a segunda corrosão, mas a utilização da FBG ~ 1500 nm em duas temperaturas diferentes resultou em valores de concentração errôneos. Os melhores resultados continuaram sendo para a configuração com um único comprimento de onda em duas temperaturas diferentes (FBG ~ 1300 nm). O sistema forneceu incertezas combinadas de 0,8 % v/v abaixo de 40,0 % v/v de concentração de etanol, de 1,7 % v/v entre 40,0 % v/v e 90,0 % v/v e de 2,1 % v/v acima de 90,0 % v/v de concentração de etanol.

Com o aumento da sensibilidade dos sensores foi possível utilizar a configuração codificada em dois comprimentos de onda à temperatura ambiente $(20,0 \pm 0,5)$ °C para resolver o problema da ambiguidade na análise da mistura etanol em água, sendo que as incertezas combinadas na determinação da concentração de etanol para esta configuração foram de 1,7 % v/v abaixo de 40,0 % v/v de concentração de etanol, 2,9 % v/v entre 40,0 % v/v e 90,0 % v/v e 2,4 % v/v acima de 90,0 % v/v de concentração de etanol.

4.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo presente a evolução da ciência, da tecnologia e da inovação como linha de referência, são raros os trabalhos científicos que se possam considerar terminados. Dentro deste princípio, procurou-se com esta tese, além da investigação de dados experimentais e da consolidação do conhecimento, trazer novas ideias para a pesquisa na área das redes de Bragg.

Quanto aos desenvolvimentos futuros existem alguns pontos de melhoramento em relação ao desenvolvimento da técnica de gravação das redes de Bragg, uma vez que a gravação com o laser Nd: YAG é morosa e de difícil alinhamento. Sugere-se a confecção de dispositivos de fixação de componentes óticos que possibilitem o fácil alinhamento.

Ficou evidenciado que as redes de Bragg produzidas necessitam de tratamentos térmicos antes da possível aplicação como dispositivos em telecomunicações e em sensoriamento. Esforços também devem ser concentrados na tentativa de otimizar o processo de produção de redes regeneradas, buscando compreender os parâmetros envolvidos no processo de regeneração.

Quanto as FBGs corroídas, poderiam ser gravadas redes de maior comprimento, pois possuem as vantagens de possuírem uma maior área de contato com a amostra e uma largura espectral menor. Diâmetros de corrosão diferentes também poderão ser estudados.

E para todos os casos analisados nesta tese, seria interessante um estudo detalhado do encapsulamento do sensor, uma vez que, tanto submetidos a elevadas temperaturas como corroídos, o dispositivo fica frágil, dificultando a manipulação.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, G.P. *Fiber-Optic Communications Systems*, Wiley-Interscience. 2002.

ANDRÉ, P., NETO, B., TEIXEIRA, A.L., LIMA, M., NOGUEIRA, R., DA ROCHA, J.F., PINTO, J.L. *Compensadores adaptativos de dispersão cromática para sistemas de comunicação por fibra óptica*. **IEEE Latin America Transactions**. v. 4, n. 5, p. 306-311, 2006.

ATKINS, R.M., MIZRAHI V., ERDOGAN T. *248 nm induced vacuum UV spectral changes in optical fibre preform cores: support for a colour centre model of photosensitivity*. **Electronics Letters**. v. 29, n. 4, p. 385-388, 1993.

BANDYOPADHYAY, S., CANNING, J., STEVENSON, M., COOK, K. *Ultra-high-temperature regenerated gratings in boron-codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm*. **Optics Letters**. v. 33, p. 1917-1919, 2008.

BILODEAU, F., JOHNSON, D.C., MALO, B., VINEBERG, K.A., HILL, K.O. *Ultraviolet light photosensitivity in Er³⁺-Ge doped optical fiber*. **Optics Letters**, v. 15, p. 1138-1147, 1990.

BILODEAU, F., MALO, B., ALBERT, J., JOHNSON, D.C., HILL, K.O., HIBINO, Y., ABE, M., KAWACHI, M. *Photosensitization of optical fiber and silica-on-silicon/silica waveguides*. **Optics Letters**. v. 18, p. 953-955, 1993.

BIRKS, A. KNIGHT, J.C., RUSSELL, P.S. ENDLESSLY J. *Single-mode photonic crystal fiber*. **Optic Letters**. v. 22, p. 961-963, 1997.

BONINO, S. NORGIA, M. RICCARDI, E. *Spectral behaviour analysis of chirped fibre Bragg gratings for optical dispersion compensation*. **Integrated Optics and Optical Fibre Communication**. v. 3, p. 194-197, 1997.

CARTLEDGE, J.C. *Effect of modulator chirp and sinusoidal group delay ripple on the performance of systems using dispersion compensating gratings*. **IEEE Journal of Lightwave Technology**. v. 20, n. 11, p. 1918-1923, 2002.

CHEN, A., YUN, B., WANG, Y., CUI, Y. *Theoretical and experimental study on etched fiber Bragg grating cladding mode resonances for ambient refractive index sensing*. **Journal**

Optical Society of America B. v. 24, n. 3, p. 439-445, 2007.

CHEN, X., XU, X., ZHOU, M., JIANG, D., LI, X., FENG, J., XIE, S. *Tunable dispersion compensation in a 10-Gb/s optical transmission system by employing a novel tunable dispersion compensator.* **IEEE Photonics Technology Letters.** v. 16, n. 1, p. 188-190, 2004.

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

DAI, Y., CHEN, X., SUN, J., YAO, Y., XIE, S. *Dispersion compensation based on sampled fiber Bragg gratings fabricated with reconstruction equivalent-chirp method.* **IEEE Photonics Technology Letters.** v. 18, n. 8, p. 941-943, 2006.

DOUAY, M., FERTEIN, E., XIE, W.X., BERNAGE, P., NIAY, P., BAYON, J.F., GEORGES, T. *Thermal hysteresis of Bragg wavelengths of intra-core fiber gratings.* **IEEE Photonics Technology Letters.** v. 5, n. 11, p. 1331-1335, 1993.

ERDOGAN, T. *Fiber grating spectra.* **Journal of Lightwave Technology.** v. 15, n. 8, p. 1277-1294, 1997.

HECHT, J. *Understanding fiber Optics. Second Edition, Optics and Photonics,* Academic Press. 1993.

HILL, K.O. and MELTZ G. *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 waveguide: Application to reflection filter fabrication.* **Applied Physics Letters.** v. 32, p. 647-649, 1978.

HILL, K.O., THÉRIAULT, S., MALO, B., BILODEAU, F., KITAGAWA, T., JOHNSON, D.C., ALBERT, J., TAKIGUCHI, K., KATAOKA, T., HAGIMOTO, K. *Chirped in-fibre Bragg grating dispersion compensators: Linearisation of dispersion characteristic and demonstration of dispersion compensation in 100km, 10Gbit/s optical fibre link.* **Electronics Letters.** v. 30, n. 21, p. 1755-1756, 1994.

IADICICCO, A., CAMPOPIANO, S., GIORDANO, M., CUTOLO, A., CUSANO, A., *Structures fiber Bragg gratings for sensing applications.* **1st International Conference on Sensing Technology,** p. 248-254, 2005.

JCGM/WG 1, *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*. **JCGM 100:2008**. 2008.

KAMIKAWACHI, R.C., ABE, I., PATERNO, A.S., KALINOWSKI, H.J., MULLER, M., PINTO, J.L., FABRIS, J.L. *Determination of thermo-optic coefficient in liquids with fiber Bragg grating refractometer*. **Optics Communications**, v. 281, p. 621-625, 2008.

KAMIKAWACHI, R.C., KALINOWSKI, H.J., MULLER, M., FABRIS, J.L. *Thermal behavior of an etched FBG immersed in different surroundings*. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**. v. 6, n. 2, p. 392-397, 2007.

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. 1478-1484, 1997.

KASHYAP, P. *Fiber Bragg Grating*. **Academic Press**. San Diego, 1999.

KERSEY, A.D., DAVIS, M.A., PATRICK, H.J., LEBLANC, M., KOO, K.P., ASKIN, C.G., PUTNAM, M.A., FRIEBELE, E.J. *Fiber grating sensors*. **Journal of Lightwave Technology**. v. 15, n. 8, p. 1478-1463, 1997.

KLEMBA, F., KULLER, F., MARCONCIN, C., SILVA, J.C.C., MÜLLER, M., POHL, A.P., FABRIS, J.L., KALINOWSKI, H.J. *Implementação de sistema de gravação de redes de Bragg com perfis arbitrários de apodização por varredura do feixe de escrita*. **12º SBMO Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e o 7º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo**. Belo Horizonte. Anais MOMAG 2006, 2006.

LAM, D.K.W. and GARSIDE, B.K. *Characterization of single-mode optical fiber filters*. **Applied Optics**. v. 20, n. 3, p. 440-445, 1981.

LAW, J., HARVEY, D.S. *Cleaving of microstructured polymer optical fibres*. **Optics Communications**. v. 258, n. 2, p. 193-202, 2006.

LAWRENCE, C.M., NELSON, D.V., UDD, E. BENNETT, T. *A Fiber Optic Sensor for Transverse Strain Measurement*. **Experimental Mechanics**, v. 39, n. 3, p. 202-209, 1999.

LEE, B. *Review of the present status of optical fiber sensors*. **Optical Fiber Technology**. v. 9, p. 57-79, 2003.

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

LINDNER, E., CHOJETZTKI, C., BRUECKNER, S., BECKER, M., ROTHHRDT, M., VLEKKEN, J., BARTELT, H. *Arrays of regenerated fiber Bragg gratings in non-hydrogen-loaded photosensitive fibers for high-temperature sensor networks.* **Sensors**. v. 9, p. 8377-8381, 2009.

LOH, W.H., LAMING, R.I., ROBINSON, N., CAVACIUTI, A., VANINETTI, F., ANDERSON, C.J., ZERVAS, M.N., COLE, M.J. *Dispersion compensation over distances in excess of 500 km for 10-Gb/s systems using chirped fiber gratings.* **IEEE Photonics Technology Letters**. v. 8, n. 7, p. 944-946, 1996.

MALO, B., ALBERT, J., HILL, K.O., BILODEAL, F., JOHNSON, D.C. *Effective index drift from molecular hydrogen diffusion in hydrogen-loaded optical fibres and its effect on Bragg grating fabrication.* **Electronics Letters**. v. 30, p. 442-444, 1994.

MARTIN, J. and OUELLETTE, F. *Novel writing technique of long and highly reflective in-fibre gratings.* **Electronics Letters**. v. 30, n. 10, p. 811-812, 1994.

MASUDA, Y., NAKAMURA, M., KOMATSU, C., FUJITA, K., YAMAUCHI, M., KIMURA, M., MISUTANI, Y., KIMURA, S. SUZAKI, Y., YOKOUCHI, T., NAKAGAWA, K., EJIMA, SEIKI. *Wavelength evolution of fiber Bragg gratings fabricated from hydrogen-loaded optical fiber during annealing.* **Journal of Lightwave Technology**. v. 22, n. 3, p. 934-942, 2004.

MEARS, R.J., REEKIE, L., JAUNCEY, I.M., PAYNE, D.N. *Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μ m.* **Electronics Letters**. v. 23, p. 1026, 1987.

MEARS, R.J., REEKIE, L., POOLE, S.B., PAYNE, D.N. *Neodymium-doped silica single-mode fiber laser.* **Electronics Letters**. v. 21, p. 738, 1985.

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

MIZRAHI, V., SIPE, J.E. *Optical properties of photosensitive fiber phase gratings.* **Journal of Lightwave Technology**. v. 11, p. 1513-1517, 1993.

MOREY, W.W., MELTZ, G., WEISS, J.M. *Recent advances in fiber grating sensors for utility industrial application.* **Proc. SPIE-Calibrated Intelligent Optical Sensors and Systems.** v. 2594, p. 90-98, 1995.

NISHI, N., TAKAHASHI, S., MATSUMOTO, M., TANAKA, A., MURAYA, K. *Hydrogen bonding cluster formation and hydrophobic solute association in aqueous solution of ethanol.* **Journal of Physical Chemistry.** v. 99, p. 462-468, 1995.

OLSHANSKY, R. *Noise figure for erbium-doped optical fibre amplifiers.* **Electronics Letters.** v. 24, n. 22, p. 1363, 1988.

OTHONOS, A. *Fiber Bragg Gratings.* **Review of Scientific Instruments.** v. 68, p. 4309-4341, 1997.

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

OUELLETTE, F. *Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides.* **Optics Letters.** v. 12, n. 10, p. 847, 1987.

OUELLETTE, F., KRUG, P.A., STEPHENS, T., DHOSI, G, EGGLETON, B. *Broadband and WDM dispersion compensation using chirped samples fibre Bragg gratings.* **Electronics Letters.** v. 31, n. 11, p. 899-901, 1995.

PAL, S., SUN, T., GRATTAN, K.T.V., WADE, S.A., COLLINS, S.F., BAXTER, G., DUSSARDIER, B., MONNOM, G. *Non-linear temperature dependence of Bragg gratings written in different fibres, optimised for sensor applications over a wide range of temperatures.* **Sensors and Actuators A.** v. 112, p. 211-219, 2004.

PAN, Z., SONG, Y.W., YU, C., WANG, Y., WILLNER, A.E. *Using sampled nonlinearly chirped fiber Bragg gratings to achieve 40-Gbit/s tunable multi-channel dispersion compensation.* **Optics Communications.** v. 241, p. 371-375, 2004.

PATERNO, A.S., FIGUEREDO, T.S., MILCZEWSKI, M.S., KULLER, F., KALINOWSKI, H.J. *Sistema com sensor a FBG refratométrico: aplicações na detecção de gasolina adulterada e desenvolvimento de sensor de hidrogênio.* **3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás,** 2005.

PEREIRA, A.P., FRAZÃO, O., SANTOS, J.L. *Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature*. **Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers**. v. 43, n. 2, p. 299-304, 2004.

POSSETTI, G.R.C., CAMILOTTI, E., MULLER, M., FABRIS, J.L. *Application of a long-period fibre grating-based transducer in the fuel industry*. **Measurement Science and Technology**. v. 20, 034012, 2009.

POSSETTI, G.R.C., CAMILOTTI, E., MULLER, M., FABRIS, J.L. *Long period grating transducer for measurement of ethanol concentration in water solution*. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**. v. 8, p. 17S-25S, 2009.

POUMELLEC, B., NIAY, P., DOUAY, M., BAYON, J.F. *The UV induced refractive index grating in Ge:SiO₂ preform: additional CW experiments and the macroscopic origin of the index change in index*. **Journal of Physics D: Applied Physics**. v. 29, p. 1842-1856, 1996.

QUINTELA, A., JAUREGUI, C., LOMER, M., COBO, A., LÓPEZ-HIGUERA, J.M., *Arbitrary chirped fiber Bragg grating fabrication technique*. **4th IEEE/LEOS Workshop on Fibres and Optical Passive Components**. p. 1-6, 2005.

RAIKAR, U.S., KULKARNI, V.K., LALASANGI, A.S., MADHAV, K., ASOKAN, S. *Etched fiber Bragg grating as ethanol solution concentration sensor*. **Optoelectronics and Advanced Materials**. v. 1, p. 149-151, 2007.

RIANT, I., GURIB, S., GOURHANT, J., SANSONETTI P., BUNGARZEANU, C., KASHYAP, R. *Chirped fiber Bragg gratings for WDM chromatic dispersion compensation in multispan 10-Gb/s transmission*. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 5, n. 5, p. 1312-1324, 1999.

SCHMITT, N.F., LEWIS, E., SCULLY, P. *UV photo-induced structures on plastic optical fibres*. **Proceedings POF 97 Conference**, p. 109-110, 1996.

SCHROEDER, K., ECKE, W., MUELLER, R., WILLSCH, R., ANDREEV, A. *A fibre Bragg grating refractometer*. **Measurement Science and Technology**. v. 12, p. 757-764, 2001.

SENIOR, J.M. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. **New York: Prentice Hall**. 2nd ed. 1992.

STEIGER, U. *Sensor properties and applications of POF*. **Proceedings of the Seventh Conference on Sensors and their Applications**, Dublin, Ireland, p. 325–330, 1998.

STEPHEN, T., ARKWRIGHT, J., HINTON, K., STEPANOV, D.Y., KRUG, P.A., SMITH, B., DHOSI, G., YOFFE, G., OUELLETE, F. **Optical Fiber Communication Conference**. v. 2, 1998.

SUDO, M., NAKAI, M., HIMENO, K., SUZAKI, S., WADA, A., YAMAUCHI R., *Simultaneous Measurement of Temperature and Strain using PANDA Fiber Grating*. **12th International Conference on Optical Fiber Sensors, Technical Digest Series**. v. 16, p. 170-173, 1997.

SUN, C., LI, C., YU, X. *Study on sampled fiber gratings*. **Optics Communications**. v. 218, p. 297-302, 2003.

TAHIR, B. A., ALI, J., RAHMAN, A. *Review of Fabrication Techniques of Fiber Gratings*. **Journal of Engineering and Applied Sciences** 2. v.1, p. 105-115, 2007.

TAN, Z., WANG, Y., REN, W., LIU, Y., LI, B., NING, T., JIAN, S. *Transmission system over 3000km with dispersion compensated by chirped fiber Bragg gratings*. **Optik**. v. 120, p. 9-13, 2009.

URBANCZYK, W., CHMIELEWSKA, E., BOCK, W. J. *Measurements of temperature and strain sensitivities of a two-mode Bragg grating imprinted in a bowtie fibre*. **Measurement Science and Technology**. v. 12, p. 800-804, 2001.

WANG, C., CHEN, L.R., SMITH, W.E. *Analysis of chirped-sampled and sampled-chirped fiber Bragg gratings*. **Applied Optics**. v. 41, n. 9, p. 1654-1660, 2002.

WILLIAMS, D.L., AINSLIE, B.J., ARMITAGE, J.R., KASHYAP, R., CAMPBELL, R. *Enhanced UV photosensitivity in boron codoped germanosilicate fibres*. **Electronics Letters**. v. 29, n. 1, p. 45, 1993.

WILLIAMS, J.A.R., BENNION, I., SUGDEN, K., DORAN, N.J. *Fibre dispersion compensation using a chirped in-fibre Bragg grating*. **Electronics Letters**. v. 30, n. 12, p. 985-987, 1994.

ZHANG, B., KAHRIZI, M. *High-temperature resistance fiber Bragg grating temperature sensor fabrication*. **IEEE Sensors Journal**. v. 7, n. 4, p. 586-592, 2007.

ANEXO - Publicações resultantes desta tese

ARTIGO COMPLETO PUBLICADO EM PERIÓDICO

CORADIN, F.K., POSSETTI, G.R.C., KAMIKAWACHI, R.C., MULLER, M., FABRIS, J.L. *Etched fiber Bragg gratings sensors for water-ethanol mixtures: a comparative study.* **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications.** v. 9, n. 2, p. 131-143, 2010.

TRABALHOS EM ANAIS DE EVENTOS

CORADIN, F.K., POSSETTI, G.R.C., KAMIKAWACHI, R.C., MULLER, M., FABRIS, J.L. *Etched fiber Bragg grating sensing system thermically assisted for analysis of water- ethanol mixtures.* **21th International Conference on Optical Fiber Sensors.** Ottawa, Canada, maio 2011.

CORADIN, F.K., MARQUES, C., NOGUEIRA, R.N., PINTO, J.L., MULLER, M., FABRIS, J.L. *Analysis of Different Writing Techniques for Chirped Fibre Bragg Gratings.* **7th Conference on Telecommunication.** Santa Maria da Feira, Portugal, ConfTele 2009 Proceedings, 2009.

KULLER, F., CORADIN, F.K., SILVA, J.C.C., KALINOWSKI, H.J., FABRIS, J.L., MULLER, M. *Development of an Experimental Set-up for Fiber Bragg Gratings Production.* **XXXI Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada.** Águas de Lindóia, XXXI Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2008.

POSSETTI, G.R.C., CORADIN, F.K., CÔCCO, L.C., YAMAMOTO, C.I., ARRUDA, L.V.R., FALATE, R., MULLER, M., FABRIS, J.L. *Smart sensors for the petroleum sector based on long period gratings supervised by artificial neural networks In: 19th International Conference on Optical Fibre Sensors.* **19th International Conference on Optical Fibre Sensors.** Perth, Proc. of SPIE, v. 7004, 2008.

POSSETTI, G.R.C., CORADIN, F.K., CÔCCO, L.C., YAMAMOTO, C.I., ARRUDA, L.V.R., MULLER, M., FABRIS, J.L. *Application of artificial neural networks for conformity analysis of fuel performed with an optical fiber sensor.* **6th Ibero-American Conference on Optics (Riao), 9th Latin-American Meeting on Optics, Lasers and Applications (Optilas).** Campinas, Riao 07 Optilas, 2007.