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

IVENSO DA SILVA VASCO SUALEHE

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE BRAGG NO VISÍVEL GRAVADAS POR PULSOS DE FEMTOSSEGUNDOS EM 248 NM

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2016

IVENSO DA SILVA VASCO SUALEHE

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE BRAGG NO VISÍVEL GRAVADAS POR PULSOS DE FEMTOSSEGUNDOS EM 248 NM

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

Orientador: Prof. Dr. Hypolito José Kalinowski Co-orientador: Prof. Dr. Ismael Chiamenti

CURITIBA 2016 Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S939p 2016	Sualehe, Ivenso da Silva Vasco Produção e caracterização de redes de Bragg no visível gra- vadas por pulsos de femtossegundos em 248 nm / Ivenso da Silva Vasco Sualehe 2016. 91 f. : il. ; 30 cm
	Texto em português, com resumo em inglês Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2016 Bibliografia: f. 65-68
	1. Redes de Bragg. 2. Fibras ópticas. 3. Detectores de fibra óptica. 4. Engenharia elétrica - Dissertações. I. Kalinowski, Hypolito José. II. Chiamenti, Ismael. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba



Ministério da Educação Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Curitiba

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial



TERMO DE APROVAÇÃO

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE BRAGG NO VISÍVEL GRAVADAS POR PULSOS DE FEMTOSSEGUNDOS EM 248 NM

por

IVENSO DA SILVA VASCO SUALEHE

Esta Dissertação foi apresentada em 19 de Agoto de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Fotônica em Engenharia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - CPGEI. O(a) candidato(a) foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Hypolito José Kalinowski Prof. Orientador (Universidade Tecnológica Federal do Paraná)

Prof Dr. Marlio José do Couto Bonfim (Universidade Federal do Paraná)

Profa. Dr. Francelli Klemba Coradin (Faculdade Estácio de Curitiba)

DEDICATÓRIA

À minha amada Mãe Luisa por todo ensinamento, persistência e paciência para que eu pudesse assimilar todas suas boas lições de vida!

.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Deus pela proteção, saúde quotidiana e por todas boas oportunidades que me tem proporcionado na vida.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia de Moçambique, pela oportunidade que me foi dada por esta bolsa de estudos que me permitiu frequentar o curso e a Universidade Pedagógica de Moçambique, minha instituição de origem, pela liberação para continuação de estudos a nível de Pós-Graduação.

Ao meu orientador Hypolito José Kalinowski, pela orientação e apoio constante durante o meu curso de Mestrado.

Ao Professor Ismael Chiamenti, pela co-orientação, apoio e paciência que demonstrou durante todo trabalho de pesquisa.

À Patrícia Loren Inácio por todo apoio e paciência nos trabalhos laboratoriais e demais aspetos pertinentes.

Aos professores do grupo de Fotônica que me depositaram uma atenção especial, ao Valmir de Oliveira, Jean da Silva Carlos Cardozo, Ilda Abe, Keli, Ricardo Kamikawachi, José Fabris e Márcia Muller.

A todos os colegas do grupo de Dispositivos Fotônicos e Aplicações (DIFOTON) e LabEso, pelo apoio e companheirismo durante todo curso, especialmente ao José Galvão, Rodrigo Fiorin.

Aos meus compatriotas moçambicanos estudantes em Curitiba, extensivo aos bons amigos que esta cidade me presenteou, pelo calor humano e apoio constante em momentos difíceis, especialmente ao Caísse Amisse, Acácio Zimbico.

Finalmente, à minha família pela paciência e coragem transmitida mesmo à distância, com um carinho especial aos meus amados filhos Ivan e Ivens Jr.

RESUMO

SUALEHE, Ivenso da S. V. **Produção e Caracterização de Redes de Bragg no Visível Gravadas por Pulsos de Femtossegundos em 248 nm**. Dissertação – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Este trabalho apresenta a gravação e caracterização de redes de Bragg em fibras óticas (FBGs), com comprimentos de onda otimizados para a banda do visível, a partir de pulsos de laser femtossegundo em UV ajustados por um oscilador paramétrico ótico (*OPO – optical parametric oscillator*). Para tal propósito foi usado o método de inscrição direta sob máscara de fase, tendo como base diferentes fibras óticas previamente hidrogenadas com vista a incrementar a sua fotossensibilidade. Durante o processo de gravação dos sensores a fibra ótica, as FBGs foram monitoradas espectralmente em reflexão e posteriormente caracterizados em temperatura e deformação longitudinal, para a análise dos seus coeficientes de sensibilidades; seus principais parâmetros pós-gravação foram analisados comparativamente em relação às redes de Bragg funcionais na faixa espectral do infravermelho.

Palavras-chave: Produção de redes de Bragg no visível. Laser femtossegundos UV. Caracterização à deformação e temperatura

ABSTRACT

SUALEHE, Ivenso da S. V. **Production and Characterization of Visible Wavelength Fiber Bragg Gratings With Femtossecond Laser Pulses at 248 nm** Dissertação – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2016.

In this work, a visible wavelength fiber Bragg gratings (FBGs) were produced using ultrafast laser pulses adjusted with an *OPO (optical parametric oscillator)* to 248 nm UV femtosecond laser source. For that purpose it was employed the normal phase-mask method and different fibers loaded with hydrogen previously, in order to increase its photosensitivity. During de process the spectral characteristics were analyzed in terms of reflection as well as temperature and longitudinal deformations were made to analyze the post inscription main parameters of sensitivity comparing with IR spectral range produced FBGs.

Keywords: Visible wavelength FBGs. UV femtosecond laser. Temperature and Deformation Characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Esquema de confinamento da radiação luminosa no interior de uma fibra de índice degrau, evidenciando-se o fenômeno da reflexão interna total dos raios no núcleo a partir da condição Θ < Θ c, pois que caso Φ < Θ c então os raios desviam-Figura 2– Esquema ilustrativo da produção da rede de Bragg numa fibra ótica. ... 25 Figura 3 – Representação esquemática dos principais de defeitos de cor existentes numa fibra ótica dopada com Ge evidenciando-se: a) GeO, b) GeE', c) Ge(1) e d) Figura 4 – Esquema do padrão de interferência criado pelas ordens m=-1, m=+1 e m=0 suprimida, ilustração da técnica iluminação direta sob mascara de fase...... 34 Figura 5 -- Representação do processo de ionização não linear por ação de fonte laser femtossegundos, evidenciando-se: (a) ionização por tunelamento, (b) ionização multifotônica, (c) ionização por avalanche havendo uma absorção de portadores livres e ionização por impacto; BV - banda de valência e BC - banda de condução. 40 Figura 6 -- Esquema de gravação de Redes de Bragg pela técnica de incidência direta (normal) sob máscara de fase, uma fonte laser incide sobre uma fibra ótica onde a ordem zero é anulada e o padrão de interferência é causado a partir das Figura 7 -- Esquema de montagem do laboratório de Fotônica da UTFPR usado gravação de Redes de Bragg, evidenciando-se o sistema de combinação do laser Figura 8 -- Esquema simplificado das caracterizações em temperatura contendo o elemento termoelétrico da célula peltier, no qual é posicionado a parte sensora da Figura 10 -- Dispositivo de fixação da FBG para o tracionamento mecânico 49 Figura 11 -- Espetros de reflexão das FBGs gravadas nas fibras (a) SSMF, ESMF e fibra fotossensível GF1, sendo fibras da faixa de transmissão do IR; (b) S450, S600 Figura 12 -- Gráficos de deslocamento da banda espectral de reflexão das redes de Bragg, em função da temperatura (a) inscritas nas fibras SSMF, ESMF e fotossensível GF1; (b) inscritas nas fibras SM450, SM600 e SM633. Onde as marcas mostram os valores experimentais e vislumbram-se as linhas da reta ajustada por Figura 13 -- Gráficos sobre o deslocamento espectral da banda de reflexão em função da deformação aplicada à rede de Bragg. Marcas mostram pontos experimentais, as linhas o melhor ajuste por uma reta para as fibras SSMF, ESMF e Figura 14 -- Gráfico do deslocamento espectral da banda de reflexão da rede de Bragg aplicada à fibra muiltimodo, onde as marcas mostram pontos experimentais das linhas com um ajuste polinomial, (a) em função da temperatura e (b) em função

LISTA DE TABELAS

Tabela I: Especificações das Fibras Óticas Gravadas
Tabela II: Parâmetros Pós-Gravação das FBGs em fibras óticas
Tabela III: Coeficientes de Sensibilidade à Temperatura das FBGs Monomodais. 56
Tabela IV: Coeficientes de Sensibilidade à Deformação das FBGs Monomodais . 58
Tabela V: Coeficientes de Sensibilidade à Temperatura da FBG Multimodo 58
Tabela VI: Coeficientes de Sensibilidade à Deformação da FBG Multimodo 59
Tabela VII: Valores de Incertezas da Caracterização à Temperatura nas Fbgs 61
Tabela VIII: Valores de Incertezas à deformação longitudinal das FBGs61
Tabela IX: Valores do comprimento de onda médio, desvio-padrão das FBGs na fibras óticas da banda do Infravermelho resultantes da caracterização em Temperatura
Tabela X: Valores do comprimento de onda médio desvio padrão das FBGs nas fibras óticas da banda do Visível resultantes da caracterização em Temperatura. 74
Tabela XI: Valores do comprimento de onda médio desvio padrão das FBGs gravadas na fibras óticas pertencentes a banda do Infravermelho

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Ar ⁺	Átomo de Argônio
ESMF	Enhanced Single Mode Fiber (Fibra Ótica Monomodo Enriquecida)
FBG	<i>Fiber Bragg Gratings</i> (Redes de Bragg)
FDM	Frequency Division Multiplex (Multiplexação por Divisão de Frequência)
FWHM	<i>Full Width Half Maximum</i> (Largura de banda a Meia Altura)
Ge	Germânio
GeO ₂	Dióxido de Germânio
G-562	Fibras Óticas Padrão de Comunicações
H ₂	Molécula de Hidrogênio
GF1	Photossensitive Single Mode (Fibra Monomodo Fotossensível)
IR	Infrared (Infravermelho)
LPG	Long Period Gratings (Redes de Período Longo)
MMF	Multimode Fiber (Fibra Multimodo)
NA	Numeric Aperture (Abertura Numérica)
0	Átomo de Oxigênio
OPO	Optical Parametric Oscilator (Oscilador Paramêtrico Ótico)
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i> (Analizador de Espetros Óticos)
Sc/pc	Subscriber connector/physical contact pigtail (conetor pgtail de contato físico de fibras única fibra monomodo)
Si	Átomo de Silício
SiO ₂	Dióxido de Sílica
SM450	<i>Single Mode Fiber</i> 450 nm (Fibra Monomodo 488 – 633 nm)
SM600	<i>Single Mode Fiber</i> 600 nm (Fibra Monomodo 633 – 680 nm)
SM633	<i>Single Mode Fiber</i> 633 nm (Fibra Monomodo 633 – 780 nm)
SSMF	Standard Single Mode Fiber (Fibra Monomodo Padrão)
TE	Transversal Elétrico
ТМ	Transversal Magnético
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UV	Ultraviolet (Ultravioleta)
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> (Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda)

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Permeabilidade do Meio
με	MicroStrain
а	Raio do Núcleo da Fibra
В	Campo Magnético
D	Densidade do Fluxo Magnético
E	Campo Elétrico
f	Frequência Linear
К	Número de Onda/ Vetor de Onda da Rede
K _f	Vetor de Onda da Radiação Retroespalhada
Ki	Vetor de onda da Radiação Incidente
I	Comprimento da Rede
L	Deslocamento
m,N	Número de Planos da Rede
M _P	Potência do Modo
N ₀	Índice de Refração do Ar
n _{1/} n _{co}	Índice de Refração Efetivo do Núcleo
n _{2/} n _{Cl}	Índice de Refração Efetivo da Casca
n _{eff}	Índice de Refração Efetivo do Modo Guiado
nm	Nanometros
°C	Graus Celsius
mm	Milímetros
$P_{11} P_{12}$	Tensor Fotoelástico
Pe	Coeficiente Fotoelástico
pm	Picometros
R(I,λ)	Amplitude do Sinal Refletido Pela Rede (Refletividade)
T,t	Tempo
V	Frequência Normalizada
Z	Direção de Propagação Z
α _n	Coeficiente Termo-ótico
α_{\wedge}	Coeficiente de Expansão Térmico
β	Constante de Propagação
Δ	Diferença entre os Índices de Refração

Δd	Diferença entre os Planos da Rede
Δn	Amplitude da Perturbação Induzida no Índice de Refração
ΔΤ	Variação da Temperatura
3	Permissividade do Meio
Θa	Ângulo de Aceitação
Θc	Ângulo Crítico
Θi	Ângulo de Incidência
Θm	Ângulo das Ordens Difratadas
Θ_t	Ângulo de Transmissão
Λ	Periodicidade Espacial da Rede
λ	Comprimento de Onda
λ_{B}	Comprimento de Onda de Bragg
Λ_{Pm}	Periodicidade da Máscara de Fase
λ_{UV}	Comprimento de Onda da radiação Incidente
V	Coeficiente de Poisson
ω	Frequência Angular
Ω	Coeficiente de Acoplamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14	
1.1 MOTIVAÇÃO	14	
1.2 ESTADO DA ARTE	16	
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA	18	
1.3.1 Objetivo Geral	18	
1.3.2 Objetivos Específicos	18	
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	19	
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20	
2.1 .TEORIA DAS REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS	20	
2.1.1 Histórico das Fibras Óticas	20	
2.1.2 Redes de Bragg em Fibra Ótica	24	
2.1.3 Propriedades de Formação das Redes de Bragg	26	
2.1.4 Fotossensibilidade em Redes de Bragg	27	
2.1.5 Processo de Hidrogenação das Redes de Bragg	29	
2.1.6 FBGs Como Sensores de Temperatura e Deformação	30	
2.2 MÉTODOS DE GRAVAÇÃO DAS REDES DE BRAGG	32	
2.2.1 Técnica de Incidência Direta Sob Máscara de Fase	34	
2.3 MANIPULAÇÃO DE MICROESTRUTURAS POR PULSOS ULTRACURT	ros	
36		
2.3.1 Efeitos de Laser Femtossegundos em Materiais Dielétricos	38	
2.3.2 Manipulação de Guias e Produção de FBGs por Laser Femtossegundos.	40	
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43	
3.1 PROCESSO DE GRAVAÇÃO DAS REDES DE BRAGG	43	
3.2 NATUREZA DAS FIBRAS ÓTICAS USADAS NA GRAVAÇÃO	45	
3.2.1 Hidrogenação das Fibras	46	
3.3 PROCESSO DE CARACTERIZAÇÃO DAS REDES DE BRAGG	47	
3.3.1 Caracterização à Temperatura das FBGs	47	
3.3.2 Caracterização à Deformação Longitudinal das FBGs	48	
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	52	
4.1 ANÁLISE DOS PARÂMETROS PÓS-GRAVAÇÃO DAS FBGs	52	
4.2 SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG	55	
4.2.1 Sensibilidades à Temperatura das Redes de Bragg	55	
4.2.2 Sensibilidade à Deformação das Redes de Bragg	56	
4.2.3 Sensibilidade à Temperatura e Deformação da FBG Gravada na Fibra Óti	ica	
em Condição Multimodo	58	
4.3 ANALISE DOS VALORES DAS INCERTEZAS DAS REDES DE BRAGG	60	
4.3.1 Incertezas da Caracterização à Temperatura	61	
4.3.2 Incertezas da Caracterização à Deformação Longitudinal	61	
5 CONCLUSOES E TRABALHOS FUTUROS		

5.1 CONCLUSÕES	63
5.2 TRABALHOS FUTUROS	64
REFERÊNCIAS	65
APÊNDICE A - PARÂMETROS METROLÓGICOS E ESTATÍSTICOS DAS F	≀EDES
DE BRAGG	69
APÊNDICE B - DETERMINAÇÃO DE INCERTEZAS NA CARACTERIZAÇ	ÇÃO À
TEMPERATURA DAS REDES DE BRAGG	73
APÊNDICE C - DETERMINAÇÃO DE INCERTEZAS NA CARACTERIZAÇ	ÇÃO À
DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL DAS REDES DE BRAGG	83

1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta, em linhas gerais, a contextualização deste trabalho, iniciando com aspetos motivacionais onde se evidenciam razões que impulsionam a relevância da pesquisa nesta temática em 1.1, seguido do estado da arte que espelha as pesquisas relacionadas desde a gênese e as perspetivas mais recentes sobre o assunto em destaque em 1.2, os objetivos que norteiaram a pesquisa são apresentados em 1.3 e, finalmente, a estrutura organizacional do trabalho em toda sua extensão em termos de evolução no tratamento e análise dos dados é descrita em 1.4.

1.1 MOTIVAÇÃO

Após a sua descoberta, as fibras óticas revolucionaram as telecomunicações com a alta qualidade nas conexões em grandes distâncias, acompanhadas de baixas perdas e um nível inferior de não linearidade (OTHONOS & KALLI, 1999; KASHYAP 1999). Dentre os vários dispositivos derivados da disseminação de fibras óticas para o mercado de telecomunicações, os sensores óticos correspondem a uma categoria de dispositivos que se tornaram bastantes atrativos em relação aos sensores convencionais, em função das suas peculiaridades pois que a partir do seu princípio de transdução, a informação encontra-se codificada em comprimento de onda do sinal de entrada relacionado ao parâmetro físico a ser mensurado que se encontra no domínio ótico e após os devidos processamentos se obtém uma saída no domínio elétrico.

O sinal é modulado no domínio ótico que podem ser a partir de características da radiação luminosa como, transmissão, reflexão, absorção ou dispersão e considerando que apresentam uma característica linear, alta sensibilidade, alta faixa dinâmica e resolução que em muitos casos é superior aos sensores convencionais. (LOPEZ-HIGUERA, 1998).

Os sensores óticos baseados em redes de Bragg em (FBG) ganharam uma peculiar notoriedade devido a sua aplicação em diversos campos, como em telecomunicações, sistemas de roteamento, filtragem de sinais, amplificação,

multiplexação (HILL & METZ, 1997) e em sistemas de sensoriamento industrial principalmente em parâmetros como a temperatura, deformação mecânica, elementos químicos, fato este associado ao fenômeno da fotossensibilidade que lhes é característica (KERSEY *et al.*, 1997).

As vantagens das redes de Bragg vão para além do uso em telecomunicações e sensoriamento, é evidente em aspetos relacionados à imunidade eletromagnética, isolação elétrica, uso em ambientes hostis, fácil manutenção, aplicado para longas distâncias, capacidade de multiplexação, compactos entre outros aspetos.

O desenvolvimento de novas técnicas de produção ou escrita de FBGs com a incidência transversal à fibra ótica permitiu a obtenção de redes com diferentes comprimentos de onda, diversificando o método anterior de gravação interna, no qual a rede produzida operava apenas para comprimentos de onda próximos na banda de escrita (OTHONOS & KALLI, 1999). Outra alternativa é a técnica de gravação por máscara de fase que se mostrou ainda mais atrativa devido ao fácil alinhamento, estabilidade do padrão de interferência e alta reprodutibilidade (HILL & MELTZ *et al.,* 1997).

Devido às menores perdas de propagação na faixa do infravermelho, houve um forte desenvolvimento dos sistemas de comunicações por fibra ótica nesta região espectral, influenciando tanto o mercado de fibras quanto de outros componentes ali utilizados. Em consequência, a investigação de redes de Bragg naquela faixa espectral foi também mais explorada, incluindo seu uso comercial em sistemas de monitoração e mensuração. Porém, a diversificação de aplicações e a saturação em sistemas de comunicação óticos são elementos potenciais para que a faixa espectral do visível atraia o interesse da comunidade científica.

Além do fato supracitado relacionado à produção de sensores operando na faixa do visível, a pesquisa recente aborda igualmente as nuances da produção de FBGs por fontes de radiação de laser UV e pulsos de femtossegundos-IR, sendo relatados e divulgados resultados de redes com boa eficiência segundo Becker *et al* (2014), incluindo a menção das técnicas usadas e possíveis aplicações concretas em áreas que vão desde a biofotônica, espectroscopia e aplicações laser como uma alternativa eficaz na perspectiva de diversificar e alargar a compreensão da evolução das pesquisas nesta área dos sensores baseados em FBGs (CARVER *et al.,* 2010; ARASU *et al.,* 2014; SHI *et al.,* 2014). E ainda em aplicações concretas

onde são produzidas fibras óticas poliméricas como as produzidas por Marques *et al* (2013)

O presente trabalho se propõe a apresentar o estudo sobre a produção e caracterização de redes de Bragg com comprimentos de onda na região espectral do visível, usando como fonte de luz de escrita pulsos ultracurtos de laser femtossegundos como uma vertente focada no aproveitamento de fontes laser altamente pulsadas para produção de FBGs, mas neste caso concreto a energia incidente é otimizada para a emissão em UV a 248 nm e com o auxílio da técnica de incidência direta sob máscara de fase.

Ainda no presente estudo, após a produção das redes de Bragg foram analisados diversos parâmetros resultantes do processo de caracterização em temperatura e deformação longitudinal, posteriormente tendo sido analisadas as sensibilidades resultantes deste processo para uma aplicação mais concreta como sensores aos parâmetros de temperatura de deformação longitudinal, incluindo a apresentação da componente metrológica em função dos desvios e incertezas.

1.2 ESTADO DA ARTE

A escrita das primeiras FBGs teve origem com a descoberta do fenômeno da fotossensibilidade, descoberta por Hill e seus colaboradores (HILL *et al.*, 1978) quando investigavam efeitos não lineares em fibras óticas. Nos experimentos desses autores, um feixe de um laser de argônio em 488 nm foi lançado no interior de uma fibra ótica dopada com germânio. Dessa forma, pela técnica de inscrição interna na fibra, obteve-se um incremento do sinal refletido devido a uma modulação periódica do índice de refração no núcleo ao longo de toda a fibra (HILL & METZ, 1997; MELTZ *et al.*, 1989); com a evidente desvantagem pela difícil reprodutibilidade e, também, pelo fato do comprimento de onda de Bragg refletido coincidir com comprimento de onda da fonte incidente usado na escrita.

Seguiu-se a escrita externa a fibra por métodos interferométricos, pelo uso de uma fonte de luz UV de laser Excímero na faixa de 486-500 nm. Onde fontes coerentes na ordem de 244 nm, subdividiam-se em duas com igual intensidade e se

recombinavam, formando um padrão de interferência na fibra e criando uma estrutura da rede de Bragg (MELTZ *et al.*, 1989). Solucionando desse modo o impasse anterior, onde era possível desse modo a produção de redes de Bragg de qualquer perfil e período a partir de métodos interferométricos, possibilitando a manipulação das mesmas para a gravação em diferentes comprimentos de onda diferentes ao da fonte incidente.

Como uma alternativa versátil introduzida, a técnica de gravação por máscara de fase descoberta por Hill e colaboradores mostrou-se mais atrativa pelo fácil alinhamento, estabilidade do padrão de interferência e alta reprodutibilidade (HILL *et al.,* 1997), mas o período da rede de Bragg gravada dependia do período da mascara.

Posteriormente, constatou-se que a eficiência do processo de inscrição de FBGs era realçada submetendo previamente a fibra ótica a uma atmosfera de hidrogênio em alta pressão (LEMAIRE *et al.*, 1993). A difusão de hidrogênio molecular na matriz de sílica causa um aumento da fotossensibilidade, facilitando processos de alteração do índice de refração induzidos pela absorção da luz ultravioleta (ZELLER *et al.*, 2004).

Em 2003 em iniciativas pioneiras, pulsos de laser femtossegundos na banda do infravermelho a 800 nm foram usados sob a técnica de máscara de fase, na produção de redes de Bragg (MIHAILOV *et al.*, 2003) provando tratar-se de uma alternativa eficiente e versátil em relação à técnica convencional de laser UV. Recentemente foi demonstrado que as redes gravadas por pulsos ultracurtos apresentavam como uma potencial alternativa, em aplicações como sensores para ambientes de altas temperaturas e pressão extrema, bem como em situações de ionização ionizante onde as redes produzidas por laser UV encontram limitações. Numa outra vertente, constatações foram igualmente aprovadas sobre a aplicação desta categoria de redes em áreas de produção de energia, sendo um subsídio em instrumentação avançada (MIHAILOV *et al.*, 2016).

Como já mencionado, a diversificação de aplicações e a saturação nos sistemas de comunicação óticos faz com que a faixa espectral do visível atraia o interesse da comunidade científica. Dentre as aplicações possíveis nessa faixa podem-se ressaltar a espectroscopia (CARVER *et al.,* 2010), biofotônica com a possibilidade de detecção do DNA, bem como de outras amostras biológicas

(ARASU *et al.,* 2014), redes locais de telecomunicações e sistemas sensores baseados em componentes optoeletrônicos de baixo custo.

Segundo Becker *et al.* (2014) foi demonstrado à produção de FBGs de primeira ordem a partir de pulsos de laser femtossegundos no UV profundo, com comprimentos de onda em reflexão que abrangiam uma larga faixa do espetro eletromagnético desde o visível em 660 nm até o infravermelho em 2000 nm. Experimentos estes baseados no uso da técnica interferométrica de divisão de frente de onda por meio de uma máscara de fase e tendo obtido a gravação de FBGs em fibras não hidrogenadas e sem dopagem do germânio.

Em 2015 Costa *et al.* demonstraram a produção de FBGs em fibras óticas padrão de comunicações e fotossensíveis previamente hidrogenadas pelo uso de pulsos de laser ultracurtos, combinando as técnicas ponto-a-ponto e a interferométrica com máscara de fase, tendo sido usados pulsos de laser femtossegundos com comprimento de onda da radiação incidente em 800 nm.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.3.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é o de produzir redes de Bragg, na faixa espectral da luz visível, em fibra ótica, a partir de pulsos de laser de femtossegundo com emissão centrada na banda do ultravioleta e analisar os parâmetros de sensibilidades a temperatura e deformação em várias fibras óticas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Gravar redes de Bragg com comprimento de onda na banda do visível;
- Comparar os parâmetros pós-gravação de redes de Bragg da faixa do visível e do infravermelho;
- Caracterizar e obter variações na sensibilidade em temperatura e deformação das diferentes fibras;

- Explicar a aplicabilidade das redes no visível, em função dos coeficientes de sensibilidade a temperatura e a deformação obtidos;
- Calcular as incertezas relativas pelas características metrológicas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente Dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, onde no primeiro apresentou-se a introdução motivacional para a elaboração do projeto de pesquisa, o estado da arte relativa ao assunto abordado das redes de Bragg e terminou com a descrição dos objetivos, iniciando pelo geral na sua vertente macro e seguidos dos específicos como garantia da materialização concreta.

O capítulo 2 é reservado à fundamentação teórica, como sendo a teoria de base que sustenta a teoria básica das Redes de Bragg como objeto de investigação proposto; abordando-se de maneira ascendente desde os conceitos históricos da descoberta das fibras óticas, condições de propagação da luz e seguido da perspectiva aliada também, à origem das redes de Bragg em fibra ótica, desde as condições de guiamento, técnicas de fabricação e sua aplicação em sensoriamento.

No capítulo 3 deste trabalho, são apresentadas as condições materiais e metodológicas que condicionaram a materialização de todo trabalho experimental feito em ambiente laboratorial, iniciando com o processo de gravação das redes de Bragg nas fibras óticas, seguido do processo de caracterização das mesmas e finalmente a explicação dos procedimentos estatísticos usados para a determinação das incertezas. O capítulo 4 apresenta os resultados do processo experimental, incluindo as ilações retiradas em função das características apresentadas. E no capítulo 5 deste trabalho são expostas as conclusões gerais retiradas do processo de gravação das redes de Bragg pela técnica em causa, bem como as peculiaridades a elas associadas que vão até ao campo da aplicação quotidiana.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 .TEORIA DAS REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS

2.1.1 Histórico das Fibras Óticas

É evidente a revolução que se verificou nas comunicações a partir da descoberta e uso das fibras óticas, desde situações remotas que vão de uma simples conversa telefônica onde o homem sempre aproveitou fontes luminosas para comunicar a longas distâncias, em algumas situações pelo uso de fumaça até mesmo em espelhos e outros objetos expostos a luz solar. Ainda que existissem limitações as informações eram transmitidas, baseados na sensibilidade do principal receptor ótico existente na época, o olho humano.

De forma evolutiva os inventos foram se destacando em marcos notáveis como o *Semaphore* de Claude Chape em 1791, o *Photophone* de Alexander Graham Bell em 1880, passando pelo experimento de D. Collandon em 1842 que demonstrou a transmissão da luz a partir de um meio diferente do ar, tendo propagado um feixe luminoso por um jato de água fino e curvo.

Atingiu-se na sequência um marco importante, com a propagação de ondas eletromagnéticas em cilindros dielétricos pela contribuição de Hondros e Debye, seguindo-se Lamb que em 1930 realizou as primeiras experiências de transmissão em fibras de vidro, a proposição de fibras de vidro revestidas por material de menor índice de refração (A. C. S. Van Heel, 1954) até a invenção do *Fiberscope* de Hopkins e Kapany que demonstraram a aplicação prática em áreas médicas (*in* GIOZZA *et al.,* 1991).

Uma fibra ótica consiste em uma guia de onda dielétrico que confina luz no seu interior, sendo concebida a partir de materiais à base de vidro (sílica) ou plástico de forma cilíndrica concêntrica, a parte mais interna constitui o núcleo (*core*) com um índice de refração n_1 maior que a circundante a ela designada por casca (*clading*) com um índice de refração menor $n_2 (n_1>n_2)$. A condição de propagação da radiação no interior do núcleo obedece à condição de reflexão interna total, deduzida pela lei

de Snell dada por $n_1 sen \theta_i = n_2 sen \theta_i$, (SALEH & TEICH, 1991; AGRAWAL, 2002; OKAMOTO, 2006).

A condição de propagação nas fibras óticas, ilustrada na Figura 1, acontece se ângulo de incidência é maior que o ângulo crítico $\theta_i > \theta_c$, sendo que caso se verifique $\theta_t > \theta_i$ o raio luminoso se afasta da normal , no caso do ângulo crítico ser igual ao de incidência $\theta_i = \theta_c$, então o ângulo de transmissão será $\theta_t = 90^\circ$ e o raio sairá paralelo a interface considerando que $\theta_t = \theta_r$.



Figura 1– Esquema de confinamento da radiação luminosa no interior de uma fibra de índice degrau, evidenciando-se o fenômeno da reflexão interna total dos raios no núcleo a partir da condição Θi < Θc, pois que caso Φ < Θc então os raios desviam-se para for a do núcleo. Fonte: Adaptado de AGRAWAL (2002)

Entretanto, existe um ângulo de incidência limite acima do qual não se verifica a reflexão interna total, não havendo desse modo a transmissão e esse é designado por ângulo de aceitação θ_a determinado pela equação (1)

$$\theta_a = sen^{-1} \left[\frac{\left(n_1^2 - n_2^2 \right)^{1/2}}{n_0} \right].$$
(1)

Outro parâmetro importante nas fibras óticas é a abertura numérica que corresponde ao máximo ângulo de incidência, esta é comumente expressa em termos das diferenças dos índices de refração Δ entre o núcleo e a casca a partir das equações (2) e (3)

$$NA = n_0 sen \theta_i^{\max} = n_0 sen \theta_a = n_1 sen(\pi / 2 - \phi_c) = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$
(2)

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{e} \quad AN = n_1 * \sqrt{2\Delta} \;. \tag{3}$$

Onde o NA (*numeric aperture*) é a abertura numérica, n_0 é o índice de refração do ar, n_1 o índice de refração do núcleo, n_2 o índice de refração da casca e θ_c o ângulo crítico.

Em função das diversas aplicações que variam desde a comunicação em curtas e longas distâncias bem como para o sensoriamento industrial, são concebidas fibras óticas que são empregues em distintas tarefas concretas, fator este que determina a existência de vários tipos de fibras fabricadas tendo em atenção a detalhes como o nível de dopagem intrínseca, as perdas (atenuação), tamanho do núcleo e taxas de transmissão de sinal. Detalhes esses determinantes para a variação efetiva do índice de refração do núcleo, ao qual se verifica quando a fibra ótica é exposta a uma radiação luminosa e consequentemente verifica-se uma alteração da intensidade da radiação refletida, devido ao do fenômeno da fotossensibilidade como o móbil das redes de Bragg.

Atendendo a vários fatores como a dispersão e a quantidade de modos propagados encontramos duas categorias, a primeira são as fibras monomodo que possuem apenas um único modo se propagando no seu interior e são apropriadas para comunicações a longas distâncias; por outro lado existem as fibras multimodo que possuem mais de um modo de propagação com tempos diferentes de propagação e por sua vez esta categoria se subdivide em dois tipos, sendo o primeiro as de índice degrau cujo seu índice de refração do núcleo é constante cujas aplicações são para pequenas distâncias e o outro é a de índice gradual que o índice de refração do núcleo vai variando do centro para a casca (WIRTH, 2004; HECHT, 1993).

A condição de propagação dos modos da radiação luminosa no interior das fibras óticas é explicada pela teoria das ondas eletromagnéticas descritas a partir das equações de Maxwell (AGRAWALL, 2002; OKAMOTO, 2006) para meios dielétricos homogêneos, isotrópicos e sem fontes de campo:

$$\nabla xE = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla xH = \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot D = 0$$

$$\nabla \cdot B = 0$$
(4)

onde E representa o campo elétrico, B o campo ou densidade do fluxo magnético, e D a densidade do fluxo elétrico. A partir das equações de Maxwell acima se obtém as relações de propagação das ondas do campo eletromagnético, designadas por equações de onda em (5) e (6), onde ε e μ representam, respectivamente, a permissividade e a permeabilidade do meio cujos. No caso do vácuo, seus valores correspondem a ε_0 =8,85·10⁻¹² F/m e μ_0 =4 π ·10⁻⁷ H/m

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$
(5)

$$\nabla^2 \vec{H} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \tag{6}$$

As propriedades de guiamento estão relacionadas com a geometria do guia de onda e, no caso da fibra ótica, tratando-se de um guia cilíndrico de simetria radial, as equações de onda são escritas em coordenadas cilíndricas de modo a obter suas soluções expressas em função das mesmas coordenadas, r, Φ , e z, pelas equações (7)

$$\begin{cases} E_{r} = -\frac{j}{q^{2}} \left(\beta \frac{\partial E_{z}}{\partial r} + \frac{\mu \omega}{r} \frac{\partial H_{z}}{\partial \phi} \right) \\ E_{\phi} = -\frac{j}{q^{2}} \left(\frac{\beta}{r} \frac{\partial E_{z}}{\partial \phi} - \mu \omega \frac{\partial H_{z}}{\partial r} \right) \\ H_{r} = -\frac{j}{q^{2}} \left(\beta \frac{\partial H_{z}}{\partial r} - \frac{\omega}{r} \frac{\partial E_{z}}{\partial \phi} \right) \\ H_{\phi} = -\frac{j}{q^{2}} \left(\frac{\beta}{r} \frac{\partial H_{z}}{\partial \phi} + \omega \omega \frac{\partial E_{z}}{\partial r} \right) \end{cases}$$
(7)

Os modos de propagação no interior da fibra são designados por transversos elétricos (TE) quando $E_z = 0$ e por outro lado transversos magnéticos (TM) quando $H_z = 0$. As equações em coordenadas cilíndricas são apresentadas nas equações (8) onde as componentes axiais satisfazem a equação de onda (AGRAWAL, 2002).

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + q^2 E_z = 0\\ \frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + q^2 H_z = 0 \end{cases}$$
(8)

A solução geral da equação de onda pode ser escrita segundo a equação (9) onde k é o número de onda, β é a constante de propagação em z, tendo $\omega = 2\pi f$ e cada solução representa um modo de propagação da fibra.

$$\psi = \psi_r e^{iK\phi} e^{-i\beta z} e^{i\omega t} \tag{9}$$

2.1.2 Redes de Bragg em Fibra Ótica

Uma rede de Bragg (*FBG-Fiber Bragg Grating*) consiste numa modulação periódica longitudinal verificada no índice de refração do núcleo de uma fibra ótica. Ao acoplar na fibra uma fonte de luz de banda larga esta interage com a rede de Bragg, de tal forma que uma reflexão ocorre em cada plano de mudança do índice de refração que compõem a rede. A banda refletida satisfaz a chamada condição de Bragg, expressa na equação (10) verificada para redes de Bragg simples na condição de primeira ordem (HILL *et al.*, 1997)

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \tag{10}$$

onde $\lambda_{\rm B}$ é o comprimento de onda central de Bragg de ressonância da luz incidente, que é posteriormente retrorefletida pela rede, n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo guiado no núcleo e Λ a periodicidade espacial da rede ou período da modulação do índice de refração do núcleo da fibra (HILL *et al.,* 1978; OTHONOS & KALI, 1999).

Na Figura 2 é ilustrado o princípio de operação de uma rede de Bragg em uma fibra ótica, onde a luz proveniente de uma fonte de banda larga é guiada no núcleo percorrendo o eixo da fibra e, de seguida sofre um espalhamento pelos vários planos na interação com cada interface da grade de difração, resultando deste modo numa intensidade de radiação que é refletida no sentido contra propagante, funcionando como um filtro seletor de uma faixa específica da radiação visto que outra parte da radiação atravessa a grade em forma de intensidade transmitida no sentido propagante (OTHONOS & KALI, 1999).

A condição de Bragg satisfaz simultaneamente a conservação de energia e do momento, sendo que para a energia é necessário que as frequências da radiação incidente e refletida sejam iguais em $\hbar \omega_f = \hbar \omega_i$ e para a conservação do momento

requer que o vetor de onda da radiação espalhada k_f , seja o resultado do somatório entre o vetor de onda da radiação incidente k_i com o vetor de onda da rede k o que se traduz por $k_i + k = k_f$.



Figura 2– Esquema ilustrativo da produção da rede de Bragg numa fibra ótica. Fonte: Adaptado de Othonos (1999)

A faixa da radiação refletida é verificada caso se verifique a condição de Bragg na equação (11), onde a luz refletida por um plano interfere construtivamente com a luz refletida pelo plano subsequente e se tal preposição não for verificada, então as ondas que forem espalhadas por dois planos consecutivos estarão fora de fase, resultando numa fraca reflexão que vão se acentuando até ao ponto de originar uma intensidade nula.

$$2n_{eff}\Lambda = m\lambda_{Bragg} \tag{11}$$

onde Λ é o período da modulação do índice de refração, n_{eff} o índice de refração efetivo da rede, m a ordem de operação da rede e λ_{Bragg} o comprimento de onda central da banda refletida pela rede de Bragg.

Uma rede de Bragg formada numa fibra ótica acopla modos diferenciados quando são satisfeitas as condições de sincronismo de fase e superposição suficiente dos modos na região da rede, a condição para que tal acoplamento ocorra segundo a equação (12) é designado por casamento de fase (HILL e MELTZ, 1997).

$$\beta' - \beta'' = \frac{2\pi}{\Lambda} \tag{12}$$

onde β' e β'' são constantes de propagação dos modos guiados e aquele no qual ocorre o acoplamento. Neste caso quanto maior for à diferença entre as constantes de propagação, menor será o período que fornece o acoplamento entre os dois modos dados.

Dois modos guiados acoplam quando a diferença entre os seus índices de refração em um dado comprimento de onda é igual a λ/Λ_z , sendo que a condição de casamento de fase se estende à equação (13):

$$n_{eff} = \frac{\lambda}{\Lambda_z} = n_{eff}$$
(13)

onde n_{eff} é o índice de refração modal da onda incidente, n_{eff} é o índice de refração modal da onda refletida (-) /transmitida (+) e Λ_{-} é o período da modulação.

2.1.3 Propriedades de Formação das Redes de Bragg

Para uma rede de Bragg uniforme formada numa fibra ótica com um índice de refração do núcleo, n_0 , o perfil do índice de refração pode ser expresso pela equação (14), onde Δn é a amplitude da perturbação induzida no índice de refração com valores em torno de 10⁻⁵ a 10⁻³, z é à distância ao longo do eixo longitudinal da fibra (OTHONOS & KALI, 1999)

$$n(z) = n_0 + \Delta n \times \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) .$$
(14)

Pela teoria dos modos acoplados que descreve as propriedades do perfil de reflexão das redes de Bragg, explica-se que a refletividade de uma rede com uma modulação constante do seu índice de amplitude e seu período é expressa pela equação (15), onde $R(l,\lambda)$ é a refletividade que depende do comprimento da rede l e do comprimento de onda λ ; Ω o coeficiente de acoplamento entre a onda incidente e refletida, $\Delta k = k - \pi/\lambda$ é a variação do vetor de onda, $k = 2\pi n_0/\lambda$ é a constante de propagação e o $s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2$. (LAM & GARSIDE, 1981)

$$R(l,\lambda) = \frac{\Omega^2 senh^2(sl)}{\Delta k^2 sen^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)}$$
(15)

Para uma variação senoidal do índice de refração ao longo do eixo da fibra, o coeficiente de acoplamento Ω é dado pela equação (16), onde M_p é a fração da potência do modo contida no núcleo da fibra

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} M_p \tag{16}$$

A refletividade correspondente ao comprimento de onda de Bragg para uma rede de Bragg inscrita uniformemente no núcleo de uma fibra, considerando que M_p é aproximadamente igual a $1-V^{-2}$ sendo que V é a frequência normalizada dada por $V = (2\pi/\lambda)a(n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}$ onde a é o raio do núcleo, n_{co} e n_{cl} são os índices de refração do núcleo e da casca, respectivamente; nesse caso a refletividade que aumenta proporcionalmente a indução verificada no índice de refração é dada pela equação (17).

$$R(l,\lambda) = \tanh^2(\Omega l) \tag{17}$$

O espectro de reflexão de uma FBG é calculado como uma função em ordem ao comprimento de onda, expresso matematicamente pelo tratamento de uma transformada de Fourier para sinais harmônicos dando uma extensão finita, resultando numa resposta no domínio da variação do comprimento de onda comumente designado por largura de banda a meia altura (*FWHM-Full Width Half Maximum*) expresso pela equação (18), onde N é o número de planos da rede e o parâmetro $s \sim 1$ para redes fortes ou $s \sim 0.5$ para redes fracas.

$$\Delta \lambda = \lambda_B s \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2}$$
(18)

2.1.4 Fotossensibilidade em Redes de Bragg

A fotossensibilidade consiste na variação permanente que se verifica no índice de refração, ou seja, uma opacidade induzida do núcleo da fibra ótica como resultado da exposição direta duma radiação luminosa incidente com um espetro de banda de um comprimento de onda específico, fenômeno este atribuído a defeitos de centros de cor verificado em certos materiais de estrutura vítrea quando expostos à radiação ultravioleta e ao calor (HILL *et al 1978;* KASHYAP 1999).

Teorias explicativas sobre o aparecimento deste fenômeno apontam para o fato de estar associado a defeitos de cor pontuais na estrutura da matriz vítrea dotados de ciclos de absorção e emissão, os quais se verificam pela absorção da radiação de um fóton (UV) ou dois fótons (visível) em mecanismos fotoquímicos, fotomecânico e termoquímicos.

O surgimento dos defeitos de cor nas fibras óticas de telecomunicações relaciona-se à incorporação de átomos de Ge na sua fabricação, existindo distintamente quatro tipos de defeitos moleculares numa fibra ótica dopada com Ge representados na figura (3) sendo eles, defeito tipo GeO que induz o aparecimento duma banda de absorção em 240 nm que se considera ser responsável pela fotossensibilidade em fibras com essa dopagem específica; o defeito GeE' que aumenta pela exposição prolongada da radiação UV em 195 nm; defeitos Ge(1) e Ge(2) em 281 nm e 213 nm, respectivamente; finalmente o outro defeito é o GeO₂ que induz o aparecimento da banda de absorção em 195 nm (OTHONOS & KALI, 1999).



Figura 1 – Representação esquemática dos principais de defeitos de cor existentes numa fibra ótica dopada com Ge evidenciando-se: a) GeO, b) GeE', c) Ge(1) e d) Ge(2). Fonte: Adaptado de Kashyap (1999)

Pela sugestão de vários autores é explicado que o fenômeno da fotossensibilidade recorrente em fibras de sílica (SiO₂), dopadas com GeO₂ é um resultado da geração de dois fótons e a modulação do índice de refração depende diretamente do quadrado da potência da radiação incidente (LAM & GARSIDE, 1981) e o desinteresse no quais diversas correntes na época acreditarem que o fenômeno apenas se verificava em fibras especiais utilizadas no laboratório do Centro de Pesquisas canadense, foram refutadas por Stone (1987) quando anos depois demonstrou que o mesmo fenômeno foi observado em diversos tipos de fibras com altas concentrações de germânio.

2.1.5 Processo de Hidrogenação das Redes de Bragg

Segundo Othonos e Kali (1999) desde a descoberta do fenômeno da fotossensibilidade em fibras óticas de sílica dopadas com Ge, entre os esforços para compreender as nuances deste fenômeno constatou-se que fibras do padrão de comunicação (G-562) dopadas com 3% de Ge apresentavam uma modulação no índice de refração na ordem de 3x10⁻⁵, notou-se ainda que aumentando o nível de dopagem e submetendo a fibra a condições de altas temperaturas era possível obter um incremento na modulação do índice de refração em torno de 5x10^{-4.} Para tal efeito algumas técnicas com o objetivo de aumentar a sensibilidade das fibras, foram desenvolvidas dando a possibilidade da produção de redes de Bragg com alta refletividade.

Neste âmbito Lemaire *et al* (1993) desenvolveram a técnica de hidrogenação que visava aumentar a fotossensibilidade, consistia em submeter à fibra a uma atmosfera de alta pressão e baixa temperatura por um período em atmosfera de hidrogênio. É de salientar que a exposição da fibra pode ser feita a quente sob varredura duma chama hidrogenada, ou ainda sob deposição em uma câmara pressurizada com hidrogênio. Neste caso as redes escritas neste tipo de fibras mesmo com pouca dopagem de Ge, elas apresentam uma boa modulação do índice de refração devido à presença do hidrogênio molecular (H₂) que se desestrutura formando os defeitos GeE', GeH e GeOH.

Durante a escrita de redes de Bragg neste tipo de fibras que são previamente submetidas a temperaturas na ordem de 20 °C a 75 °C, com pressões

entre 20 atm até um pouco mais de 750 atm (comumente usada 150 atm) é possível notar um aumento da refletividade e, deslocamento para maiores comprimentos de onda, ainda é possível obter a vantagem de inscrição de redes de Bragg numa curta duração de tempo possibilitando o uso de uma energia do laser menor (OTHONOS & KALI, 1999).

2.1.6 FBGs Como Sensores de Temperatura e Deformação

As redes de Bragg representam uma categoria dos sensores à fibra ótica baseados na modulação do índice de refração, ostentando diversas vantagens cuja principal reside no fato de a informação ou parâmetro a ser medido encontrar-se codificado em comprimento de onda, tornando-o independente das flutuações de intensidade da luz. Estes sensores pelo princípio de transdução são intrínsecos, pois usam um guia de onda que o mensurando altera o espectro da luz incidente acoplando luz para outros modos de propagação.

A reflexão da radiação numa largura de banda estreita possibilita que sejam usados de forma multiplexada, várias redes podendo ser usadas simultaneamente numa mesma fibra para medição de diversos parâmetros, a partir da técnica de multiplexação por comprimento de onda (WDM – *wavelength division multiplex*) e também multiplexação por divisão de tempo (TDM – *time division multiplex*), ou ainda pela técnica de multiplexação por divisão por divisão de frequência (FDM – *frequency division multiplex*).

Nos sensores intrínsecos o mensurando atua diretamente na própria fibra ótica, modificando as propriedades da luz guiada e funcionando como o elemento sensor, de acordo com o domínio e a magnitude do parâmetro a ser mensurado, estes sensores podem ser classificados em mecânicos, térmicos, eletromagnéticos, de radiação, de compósitos químicos, de fluxo ou turbulência de fluidos e biomédicos (LÓPEZ-HIGUERA, 1998).

Outros atrativos que tornam os sensores óticos baseados em redes de Bragg, cada vez mais empregues em diversas áreas tecnológicas, estão aliados às suas características, pois possuem uma elevada sensibilidade, baixas perdas em transmissões de dados, imunidade eletromagnética e uso em ambientes hostis de grande risco como fornalhas de altas temperaturas e soluções químicas devido ao fato de não serem corrosivos. Entretanto algumas desvantagens no emprego destes dispositivos prendem-se ao elevado custo dos instrumentos de mensuração, em muitos casos superiores aos sensores convencionais.

Segundo Hill *et al*, alterações na periodicidade espacial Λ e no índice de refração n_{eff} efetivo de uma rede, induzem um deslocamento espectral do comprimento de onda de Bragg. Essas alterações podem ser causadas pela deformação longitudinal e temperatura, fatores estes descritos por um tensor fotoelástico e termo-ótico, respectivamente a seguir representados na equação (19) pelos (primeiro e segundo fatores) entre parêntesis (HILL *et al 1978*, OTHONOS & KALI, 1999):

$$\lambda_B = 2 \left(\lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T$$
(19)

onde *l* é o comprimento total da rede, Δl é a variação causada pela deformação longitudinal e ΔT é variação da temperatura. O efeito produzido pelo fator fotoelástico da equação pode ser escrito de forma simplificada pela equação (20)

$$\Delta \lambda_{B} = \lambda_{B} (1 - p_{e}) \varepsilon_{z}$$
⁽²⁰⁾

onde \mathcal{E}_z é a componente da deformação relativa na unidade do tempo, p_e é o coeficiente foto-elástico da deformação efetiva definida pela equação (21)

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu (p_{11} + p_{12})]$$
(21)

onde p_{11} e p_{12} são as componentes do tensor foto-elástico e V é o coeficiente de Poisson, para fibras de gemanosilicato correspondem aos valores de $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, v = 0,16, $n_{eff} = 1,482$

Pelo segundo termo da equação (21) representando o tensor termo-elástico relativo ao deslocamento pela expansão térmica, a qual provoca uma mudança no espaçamento do índice de refração da rede pode ser expresso pela equação (22):

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (\alpha_\Lambda - \alpha_n) \Delta T \tag{22}$$

onde $\alpha_{\Lambda} = (1/\Lambda)(\partial \Lambda / \partial T)$ é o coeficiente de expansão térmica da fibra com um valor em torno de 0,55 x10⁻⁶ °C⁻¹ (significativo somente acima de 800 °C) para a sílica e $\alpha_n = (1/n_{eff})(\partial n_{eff}/\partial T)$ representa o coeficiente termo-ótico da fibra com valores em torno de 8,6 x10⁻⁶ °C⁻¹.

Tipicamente, para as fibras de núcleo de sílica dopada com germânio, verificamse em comprimentos de onda de Bragg centrados em torno de 1550 nm, as sensibilidades à deformação e à temperatura apresentam valores na ordem de 1,2 pm/με e 13,7 pm/°C, respectivamente (HILL *et al 1997,* OTHONOS & KALI, 1999).

2.2 MÉTODOS DE GRAVAÇÃO DAS REDES DE BRAGG

Existem diversas técnicas avaliadas para a inscrição de redes de Bragg em fibras óticas desde as internas às externas, atualmente dá-se mais ênfase a divisão entre as interferométricas e as não interferométricas.

A técnica de gravação interna mostrou-se pouco atrativa e foi sendo pouco usual com o desenvolvimento das pesquisas. Esta técnica, apesar de apresentar um aparato experimental simples e com poucos dispositivos, apresentava certas limitações, visto que o comprimento de onda das redes gravadas coincidia com o da fonte laser incidente situada na faixa do visível e apresentava uma baixa reprodutibilidade, dificultando desse modo a produção de estruturas de Bragg para diversas aplicações (HILL *et al.,* 1978; OTHONOS e KALI, 1999).

Na sequência das pesquisas relativas à nova categoria de dispositivos ora descobertos, designadas inicialmente por redes de Hill e posteriormente redes de Bragg, Meltz *et al*, (1989) apresentaram a primeira experiência de gravação externa de redes de Bragg pela técnica de inscrição externa ou holográfica, esta consistia na iluminação em fibras fotossensíveis por uma fonte de laser UV em 244 nm. A radiação incidente era dividida por um interferômetro em dois feixes luminosos coerentes, de igual intensidade afetada pelo ângulo de separação entre eles e, posteriormente se recombinavam formando um padrão de interferência, o que induzia consequentemente uma modulação permanente do índice de refração no interior da fibra.

Esta técnica mostrou-se mais eficiente e flexível, pois dava a possibilidade de inscrição de estruturas de Bragg com diversos comprimentos de onda a partir da

variação do ângulo dos feixes que incidiam sobre a fibra, aliado à vantagem de sistema maior reprodutibilidade. oferecer um com uma Neste sistema interferométrico abre-se a possibilidade de ter um interferômetro de divisão de amplitude, cuja vantagem reside no fato de se produzir FBGs com qualquer comprimento desejado, sendo mais utilizado para estas aplicações e por outro lado também se encontram os de divisão de frente de onda como o biprisma de Fresnel e o espelho Lloyd, este arranjo experimental oferece ainda a vantagem de usar um único elemento ótico que reduz a sensibilidade a vibrações mecânicas e pouca distorção (MELTZ et al., 1989).

Outra possibilidade da técnica interferométrica prende-se com a inclusão de uma máscara de fase, que é um elemento difrator, dando a possibilidade de variar o comprimento de onda de inscrição das FBGs a partir da alteração do ângulo dos espelhos por onde os feixes são refletidos. Este protótipo mostrou-se ser mais flexível e prático para gravar FBGs, pois que comumente usa um interferômetro de Talbot, dando a possibilidade de inscrição de redes em qualquer comprimento de onda bastando ajustar o ângulo de interseção dos feixes que se recombinam.

A técnica de máscara de fase pode ser usada de modo independente da base interferométrica e constitui a ferramenta mais comum para a produção das redes de Bragg que são objeto de estudo no presente trabalho, por esta razão será explicada com mais detalhes mais adiante. Numa ordem de comparação aos outros protótipos experimentais, este se mostrou mais prático para a inscrição de FBGs pois exibe uma menor complexidade no aparato experimental e em comparação com a inscrição holográfica, ela oferece um fácil alinhamento da fibra a ser fotoimpressa, baixa coerência da fonte laser UV, para além de uma boa e alta reprodutibilidade, permitindo a inscrição de FBGs com uma resposta espectral controlada (HILL & MELTZ, 1997).

Ainda outra perspectiva usada na gravação de FBGs é a técnica ponto-aponto igualmente desenvolvida no Centro de Pesquisas Canadense segundo Malo *et al (1993)*, onde cada modificação no índice de refração da fibra é inscrita ponto-aponto e por essa razão, em redes com várias perturbações esta alternativa é impraticável devido a sua morosidade e pouca eficiência. Por outro lado, tem sido usada na produção de micro FBGs e principalmente as redes de período longo (*LPGs- long period gratings*). O ponto forte desta técnica reside na facilidade em alterar os parâmetros da rede, construindo modificações na estrutura uma de cada vez e ainda dá a possibilidade de variação da energia do pulso de laser entre vários pontos do índice de refração induzido (MALO *et al*, 1993; OTHONOS & KALI, 1999).

2.2.1 Técnica de Incidência Direta Sob Máscara de Fase

As vantagens supracitadas sobre o uso desta técnica constituíram atrativos, como opção a usar para a fabricação das FBGs desta pesquisa, sendo constituído por uma máscara de fase que é um dispositivo ótico fabricado à base de sílica, com algumas depressões longitudinais periodicamente espaçadas na sua superfície, basicamente produzida por processos de inscrição holográfica ou por litrografia de varredura de feixe de elétrons que apresenta maior vantagem pelo fato de se poderem inscrever estruturas complexas.

O seu princípio básico de funcionamento é que ela funciona como um elemento ótico com um período Λ_{pm} , capaz de difratar um feixe em transmissão que incide normalmente segundo a figura (4), a partir da difração de um feixe nela incidente em várias ordens, sendo elas m=0 normalmente suprimida e com potência menos de 3%, $m=\pm 1$ com potências maximizadas com mais de 35% e, posteriormente se recombinam criando um padrão de interferência correspondente à rede na fibra ótica (HILL & MELTZ, 1997; OTHONOS & KALI, 1999).



Figura 2 – Esquema do padrão de interferência criado pelas ordens m=-1, m=+1 e m=0 suprimida, ilustração da técnica iluminação direta sob mascara de fase. Fonte: Adaptado de KASHYAP (1999)
O período espacial da modulação verificada no índice de refração no núcleo da fibra, pela sobreposição dos feixes difratados em relação ao comprimento de onda de ressonância de Bragg pode ser expresso pela equação (23).

$$\lambda_B = \frac{n_{eff} \lambda_{uv}}{sen\varphi}$$
(23)

onde λ_{B} é o comprimento de onda de Bragg, n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra e φ é o ângulo de difração da ordem 1.

As ordens do feixe incidente e difratado são descritas pela equação (24) conhecida como equação geral da difração, onde $\theta_m/2$ é o ângulo das ordens difratadas, λ_{uv} é o comprimento de onda da radiação incidente, m é a m-ésima ordem do modo difratado e θ_i é o ângulo formado pela incidência da radiação da fonte UV sobre a máscara de fase. E por exemplo quando o período da rede se encontra entre λ_{uv} e $\lambda_{uv}/2$, então a radiação incidente é somente difratada na ordem $m=\pm 1$ e a potência remanescente encontrando-se na ordem m=0 conforme esquematizado na figura (4).

$$\Lambda_{pm} = \frac{m\lambda_{uv}}{\left(sen\frac{\theta_m}{2} - sen\theta_i\right)}$$
(24)

No caso da incidência direta (normal) da radiação UV sob a máscara de fase representado na figura 4 onde o ângulo $\theta_i = 0$, então o padrão de interferência é formado pela sobreposição das ordens ±1 na fibra e o período da rede segundo a equação (25) encontra-se relacionado com o ângulo de difração $\theta_m/2$ (KASHYAP, 1999).

$$\Lambda = \frac{\lambda_{uv}}{2sen\frac{\theta_m}{2}} = \frac{\Lambda_{pm}}{2}$$
(25)

2.3 MANIPULAÇÃO DE MICROESTRUTURAS POR PULSOS ULTRACURTOS

Pesquisas relacionadas à manipulação de materiais óticos a partir de pulsos de laser ultracurto têm-se evidenciado cada vez mais em ótica não linear, a partir da interação e alteração de propriedades dos materiais com tempos de duração numa escala de femtossegundos. Esses fenômenos são detalhadamente estudados em ótica não linear que, segundo Boyd (2007), trata do estudo das modificações nas propriedades de um sistema material. Efeitos esses originados pela interação com fontes de luz de alta potência, geralmente lasers. Esses fenômenos encontram-se associados à geração do segundo harmônico, seus estudos iniciaram sucessivamente logo após a descoberta do primeiro laser funcional por Maiman em 1960.

O interesse em fenômenos nessa escala centra-se em duas razões básicas, a primeira é o fato do perfil natural das interações não lineares serem profundamente modificadas através do uso de pulsos baseados em uma fonte de laser ultracurto, a segunda razão é devido aos pulsos de laser ultracurto possuírem picos de intensidade extremamente altos. A energia dos pulsos de laser está diretamente ligada à capacidade de armazenamento da energia no meio de ganho, fator determinante para que os pulsos curtos possuam maior potência em relação aos pulsos longos (BOYD, 2007).

Se comparado com o processo natural mais comum de oscilação periódica dos átomos e moléculas, segundo Mazur (2014), na escala de femtossegundos (1fs = 10^{-15} s) para picossegundos (1 ps = 10^{-12} s) e em pesquisas mais recentes na escala attossegundos (1 as = 10^{-18} s), a manipulação de matérias por pulsos ultracurtos é uma modificação que se dá a partir da absorção rápida de energia através de um mecanismo de excitação não linear e a subsequente dissipação de energia dentro da área atingida.

O material irradiado permanece inalterado pela ação direta do laser nele incidente, os pulsos do laser femtossegundos provocam uma forte condição de equilíbrio não linear no material, com a temperatura dos elétrons superiores à temperatura da superfície, isto é, elétrons altamente aquecidos e uma superfície do material fria.

A equação correspondente a expressão que relaciona a condição de propagação de um pulso ultracurto num meio ótico não linear, considerada também

como a generalização da equação de propagação, ou seja, a equação de Schrodinger a partir da equação de onda no domínio do tempo é representada em (26).

$$-\nabla^{2}\widetilde{E} + \frac{1}{c^{2}}\frac{\partial^{2}\widetilde{D}^{(1)}}{\partial t^{2}} = -\frac{1}{\epsilon_{0}c^{2}}\frac{\partial^{2}\widetilde{P}}{\partial t^{2}}$$
(26)

E a expressão pode-se apresentar as suas quantidades em forma das respetivas transformadas de Fourier pelas equações em (27).

$$\begin{cases} \widetilde{E}(r,t) = \int E(r,\omega)e^{-i\omega t} d\omega / 2\pi \\ \widetilde{D}^{(1)}(r,t) = \int D^{(1)}(r,\omega)e^{-i\omega t} d\omega / 2\pi \\ \widetilde{P}(r,t) = \int P(r,\omega)e^{-i\omega t} d\omega / 2\pi \end{cases}$$
(27)

onde todas integrais são desenvolvidas nos intervalos de $-\infty$ até $+\infty$, considerando que $D^{(1)}(r,\omega)$ e $E(r,\omega)$ usados como dispersão linear e que pode ser expressa pela equação (28), sendo que \tilde{P} representa a parte não linear da resposta do material.

$$D^{(1)}(r,\omega) = \in_0 \in^{(1)} (\omega) E(r,\omega)$$
(28)

A ação da intensidade luminosa dos pulsos ultracurtos determina a resposta apresentada pelo material específico e, efeitos óticos não lineares são vistos como potenciais geradores de pulsos ultrarápidos. Por outro lado, pulsos óticos ultrarápidos também permitem ao aparecimento de novos fenômenos óticos não lineares como a auto-focalização, auto-modulação de fase e geração de contínuo.

Os pulsos ultrarápidos não se encontram disponíveis para toda região do espectro eletromagnético de interesse, por esse fato diversas aplicações tem sido consideradas para a região laranja do espetro onde existe a maioria das fontes. Poucas aplicações suscitaram o desenvolvimento de fontes de laser em outros comprimentos de onda, notavelmente o semicondutor arsenato de gálio em 800 nm e comunicações óticas em 1500 nm (AGRAWAL & BOYD, 1992).

2.3.1 Efeitos de Laser Femtossegundos em Materiais Dielétricos

A interação de materiais transparentes por laser femtossegundo proporciona a criação de microestruturas com perfil único e com propriedades curiosas, em aplicações concretas na confeção de microestruturas óticas para diversos fins. Lasers emitindo pulso na escala ultracurta com altas intensidades e um caráter de absorção não linear, nos materiais disponíveis são atrativos, pois apresentam uma ausência da difusão térmica com resultados bem precisos e uma elevada reprodutibilidade (OSTENDORF, 2001).

O processo consiste, basicamente, numa situação onde a energia ótica é irradiada sobre o material, ionizando um grande número de elétrons que por sua vez, transferem energia para a superfície específica e como resultado, o material sofre uma estrutural alteração de fase provocando assim uma permanente alteração no índice de refração ou até mesmo anulando-o.

Microestruturas fabricadas por laser femtossegundos em materiais transparentes oferecem vantagens incontornáveis em relação a outras técnicas de fabricação de dispositivos fotônicos; os pulsos curtos provocam um dano reduzido na área focada e, a partir de um controle micrométrico, possibilitam a fabricação de microcanais e estruturas 3-D (e.g., Fiorin et al., 2013). A natureza não linear da absorção com a varredura da fonte laser possibilita também a fabricação de estruturas complexas em três dimensões. O processo de absorção é independente do material, permitindo que dispositivos óticos sejam fabricados, a partir de substratos compostos por materiais diferentes e também, permite à fabricação de dispositivos opto-eletrônicos onde as interligações dos componentes podem ser feitas inicialmente ou, após a inserção numa placa (MAZUR, 2014).

Em materiais dielétricos, a banda de valência constitui o nível mais alto ocupado por uns elétrons que se encontram no zero absoluto, a banda mais baixa de estados permitidos. Uma banda proibida de energia E_g separa a banda de valência da banda de condução, mas quando os elétrons ganham energia suficiente proveniente da irradiação pelo campo eletromagnético, eles migram da banda de valência para a de condução. Para que tal feito aconteça, a energia do campo da radiação do fóton deve ser superior a da banda proibida (gap), e um único fóton

visível não possui energia suficiente para esse salto de banda em materiais óticos comuns.

Naquele contexto, é ativado o processo de absorção linear, este que condiciona a passagem dos elétrons da banda de valência para a banda de condução, acompanhada por uma fotoionização e ionização por avalanche segundo Schaffer *et al* (2001). A fotoionização corresponde à excitação direta dos elétrons pelo campo da radiação do laser, quebrada por diferentes regimes diferentes, mas que dependem da frequência e intensidade do laser, sendo elas a ionização multifotônica e a ionização por tunelamento (AMS *et al*, 2008).

Na Figura 5 são representados os processos da fotoionização não linear do dielétrico por ação do laser femtossegundos, no caso (a) corresponde à ionização por tunelamento mostrando que por ação de um campo da radiação do laser suficientemente intensa, a estrutura das bandas pode ser quebrada favorecendo transições da banda de valência para a de condução e, este é o regime de ionização não linear predominante para lasers com campos fortes e baixas frequências.

No caso (b) corresponde à ionização multifotônica, a transição de um elétron que transita da banda de valência pela absorção simultânea de múltiplos fótons, para acontecer à transição é necessária que a energia absorvida por n fótons interagindo com o elétron, seja superior a da banda proibida E_g, sendo necessário no mínimo seis fótons para serem absorvidos por um elétron na banda de valência e, se efetue a transição entre diferentes bandas; este tipo de ionização é característica para altas frequências de laser.

Finalmente, no último caso referido em (c) representa a ionização por avalanche, onde um elétron da banda de condução pode absorver sequencialmente vários fótons, até que a sua energia exceda a energia da banda proibida E_g, este elétron pode de seguida ionizar outros da banda de valência, a partir de uma colisão designada por ionização por impacto resultando em dois elétrons na banda de condução menos energética disponível (STUART *et al.*, 1996). Deste modo, o processo repete-se à medida que o campo do laser estiver atuando, o que provoca um aumento exponencial da densidade do elétron de condução, Keiser *et al*, (2000) demonstrou que este processo de ionização por avalanche desenvolve-se para durações de pulso superior a 200 fs.



Figura 5 -- Representação do processo de ionização não linear por ação de fonte laser femtossegundos, evidenciando-se: (a) ionização por tunelamento, (b) ionização multifotônica, (c) ionização por avalanche havendo uma absorção de portadores livres e ionização por impacto; BV – banda de valência e BC – banda de condução. Fonte: Adaptado de AMS et al., (2008)

2.3.2 Manipulação de Guias e Produção de FBGs por Laser Femtossegundos

Desde seu desenvolvimento em 2003 segundo Mihailov *et al.*, (2003), pela técnica de inscrição de redes de Bragg e guias de onda por ação de pulsos ultracurtos de laser femtossegundos com comprimento da radiação incidente na região do infravermelho, a partir do uso da técnica de máscara de fase, comprovouse a simplicidade na inscrição tanto quanto a técnica básica de inscrição de FBGs por incidência direta de laser UV, sendo deste modo possível a fabricação de estruturas em materiais vítreos e cristalinos, por ação de radiação IR ultracurta mesmo até não sendo fotossensível a incidência de laser na banda do UV.

As redes de Bragg produzidas por pulsos de laser femtossegundos no infravermelho, apresentavam modificações óticas na fibra relacionadas à fotosensibilidade multifotónica associado a fenômenos não lineares, tendo um caráter de fotosensibilidade significativamente diferente do fenômeno induzido pela formação dos defeitos aliados aos centros de cor produzidos por fonte de laser UV. Aliado a possibilidade de terem demonstrado um perfil termicamente estável acima da temperatura de transição da sílica (MIHAILOV, 2016).

A vantagem maior na utilização da técnica por laser femtossegundos comparativamente a laser com pulsos de duração maior, reside no fato de

proporcionar a inscrição em diversos materiais óticos e não apenas as FBGs tradicionais para aplicações em telecomunicações, mas também incluindo aplicações não disponíveis anteriormente como estruturas de guias exóticos tanto como fibras cristalinas de safira e niobato de lítio, estendendo-se tanto para a sílica pura como para o caso do material dopado com borosilicato, fluorida, fosfatos e ainda fibras de cristais fotônicos (MIHAILOV *et al.*, 2008).

Tomando em consideração a intensidade da radiação incidente otimizada para energias altamente controladas, nesta técnica abriu-se a possibilidade da produção de redes de Bragg com alta qualidade espectral, para aplicações em telecomunicações e em sensoriamento pela técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM).

Segundo Davis *et al.*, (1996) a criação de defeitos permanentes na sílica por radiação IR em torno de 810 nm, resulta do processo não linear associado à ionização multifotônica provavelmente causada pelos altos pulsos energéticos produzidos pela radiação do laser femtossegundos e, o incremento do índice de refração fotoinduzido na sílica pura aparece como uma observação nova.

Em anos recentes foram produzidas FBGs para aplicações em ambientes hostís a partir do uso de pulsos ultracurtos de laser femtossegundos, com modulações de índice em torno de 1,9×10⁻³ usando fibras não fotossensíveis e não hidrogenadas. As redes produzidas demonstraram características de estabilidade térmica acima de 950 °C, comprovando o fato de serem práticos na aplicação como sensores por possuírem uma boa e longa estabilidade térmica acima de 1500 °C, característica apresentada por FBGs gravadas por esta técnica e usadas em ambientes de elevadas temperaturas (YIN *et al.,* 2008).

Segundo Costa *et al.*, (2014), (2015) em uma pesquisa recente pelo uso de pulsos ultracurto, foram produzidas FBGs em fibras óticas convencionais do padrão de comunicações (G-652) e fotossensíveis previamente hidrogenadas a partir das técnicas ponto-a-ponto e a interferométrica com máscara de fase, com pulsos de laser femtossegundos e um comprimento de onda da radiação incidente em 800 nm. Tendo-se notando a influência do comprimento de onda da iluminação pois que as redes gravadas tendo em atenção à banda UV apresentaram melhores amplitudes em curto espaço de tempo comparativamente as do infravermelho próximo. Fato este que reforça a melhor condição de sensibilidade apresentada pela sílica dopada com germânio, aliada aos defeitos de cor associados à geração da modulação do

índice de refração do núcleo da fibra e que posteriormente originam os comprimentos de onda de ressonância de Bragg.

Considerando a alternativa usada no presente trabalho onde pelo uso de um amplificador paramétrico OPO, os pulsos de laser femtossegundos centrados em 800 nm foram otimizados para uma saída da radiação em UV e, posteriormente a obtenção de redes de Bragg com comprimentos de onda na banda do visível, mostrando haver uma dependência direta entre a intensidade da radiação incidente e o perfil espectral das FBGs gravadas com laser femtossegundos. Um alto perfil de não linearidade influenciado pela potência da radiação apresenta uma tendência a aplainar os picos espectrais de reflexão, diferentemente, a baixas intensidades o perfil de reflexão do espectro segue um perfil gaussiano (SMELSER *et al.,* 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção apresentam-se as técnicas de gravação usadas para a produção das redes de Bragg, detalhes sobre a natureza intrínseca das fibras aliada a explicação dos condicionalismos relativos ao pré-tratamento efetuado antes do processo de gravação, tendo-as conferido um aumento da sensibilidade.

Também são mencionados os procedimentos do processo de caracterização à temperatura e deformação longitudinal, realizados nas FBGs com objetivo de obter a sensibilidade aos parâmetros físicos mencionados, estes que pela sua ação direta induziram uma modulação no índice de refração do núcleo da fibra ótica e consequentemente um deslocamento no comprimento de onda de Bragg.

3.1 PROCESSO DE GRAVAÇÃO DAS REDES DE BRAGG

O processo de gravação das redes de Bragg foi realizado no laboratório de Fotônica da UTFPR-Curitiba, pelo uso de uma fonte laser Ti: Safira (Coherent LIBRA) que emite no infravermelho a 800 nm, com pulsos de aproximadamente 100 fs; logo à sua saída o feixe laser passa por uma íris que ajusta o seu diâmetro e a partir de alguns espelhos é direcionado a um amplificador ou oscilador paramétrico ótico (*OPO – optical parametric oscilator*) que condiciona a emissão laser para a faixa do ultravioleta em 248 nm. A energia dos pulsos é mensurada por um medidor de potência que avalia a energia irradiada em função do tempo.

A técnica usada para a gravação das redes de Bragg, foi a de incidência direta (normal) sob uma máscara de fase (lbsen) que possuía uma periodicidade (*pitch*) de 460 nm, com auxílio da lente cilíndrica possuindo uma distância focal 50 mm, que focalizava uma porção maior do feixe convergente da radiação para o núcleo da fibra ótica.

Após a saída do OPO, o feixe foi desviado com o auxílio de mais espelhos que o direcionam até a uma lente cilíndrica posicionada antes da máscara de fase, com a função de focalizar um feixe convergente que atravessa a máscara de fase com as suas depressões, funcionando como uma grade de difração a qual divide o mesmo em várias ordens (m = \pm 1) anulando a ordem zero (m = 0), garantindo desse modo a criação de um padrão de interferência no núcleo da fibra e originando consequentemente a modulação do índice de refração. A energia de gravação usada foi avaliada em de 6,3 µJ, com 1 kHz de taxa de repetição do pulso e um tempo de gravação de aproximadamente um minuto de acordo com a Figura 6.



Figura 6 -- Esquema de gravação de Redes de Bragg pela técnica de incidência direta (normal) sob máscara de fase, uma fonte laser incide sobre uma fibra ótica onde a ordem zero é anulada e o padrão de interferência é causado a partir das ordens m=-1/m=+1. Fonte: Autoria própria

A rede de Bragg foi iluminada por uma fonte de luz laser supercontínua (Khoreas, SuperK Power), o sinal refletido da rede foi obtido por um acoplador ótico 2x2 (Thorlabs TW670R5F2) e o processo de interrogação do sinal do espetro de reflexão foi mensurado por um analisador de espetros óticos (*Optical Spectrum Analyzer- OSA* Yokogawa AQ6373), com a faixa de operação de 390 nm a 780 nm correspondente ao espetro da luz visível segundo Hect (2002) e uma resolução de 0,1 pm. Foi o mesmo sistema de interrogação no processo de caracterização das redes, posteriormente os espectros foram processados pelo uso do programa (*Origin 8.0*), tendo sido obtidos os parâmetros pós gravação, como comprimento de onda, amplitude e largura de banda bem como a construção dos gráficos incluindo o

processo de caracterização das FBGs. Na Figura 7 apresenta-se a fotografia do esquema de base usado na produção das redes de Bragg.



Figura 7 -- Esquema de montagem do laboratório de Fotônica da UTFPR usado gravação de Redes de Bragg, evidenciando-se o sistema de combinação do laser femtossegundos Coherent, seguido do amplificador paramétrico.

3.2 NATUREZA DAS FIBRAS ÓTICAS USADAS NA GRAVAÇÃO

Para a produção das FBGs foram usadas diversas fibras óticas com diferentes diâmetros e dopagens, num total de sete tipos diferentes divididas em duas categorias em relação a sua condição modal, concretamente as otimizadas para a banda espectral do infravermelho (IR) e as da banda visível do espetro eletromagnético. Usaram-se as fibras monomodo do padrão de comunicação (G-652), SSMF (*Standard Single Mode Fiber*) do infravermelho com comprimentos de onda na faixa de operação 1310 nm e 1550 nm, até a operação na banda da banda L entre 1565 a 1625 nm; fibras monomodo com processo de dopagem diferenciado ESMF (*Enhanced Single Mode Fiber 1260 – 1625 nm*) fabricadas pela Draktel; fibra fotossensível GF1 (*Photossensitive Single Mode 1500 – 1600 nm*).

A outra categoria usada constitui as fibras produzidas especialmente para a banda do visível, sendo a SM450 (488-633nm), a SM600 (633-680nm) vendidas pela Thorlabs e fibra SM633 (633-780) fabricada pela 3M.

Ainda de forma acrescida e com o intuito de estender a análise para um número considerável de fibras, foi usada a fibra de índice gradual com a condição modal multimodo (*Multimode Fiber MMF 750 – 1450 nm*) na banda do Infravermelho, vendida pela Thorlabs.

3.2.1 Hidrogenação das Fibras

Com vista a aumentar a sensibilidade das fibras, antes do processo de gravação das redes de Bragg, as fibras foram submetidas a uma atmosfera de hidrogênio por um período de 15 dias, as condições da câmara de hidrogenação encontravam-se à pressão de 100 atm e temperatura ambiente; de seguida foi realizado o processo de clivagem das mesmas fibras, que iniciou pela remoção do acrilato por um alicate desencapador e limpeza com álcool isopropílico para remoção de quaisquer impurezas. Logo após a limpeza, na sequência é feito a clivagem da fibra a partir da máquina de corte com elevada precisão, de modo a proporcionar um ângulo de 90° de forma perpendicular e a seguir termina com emenda realizada pela máquina de fusão que acaba por efetuar o teste de tração automaticamente, estando garantida desse modo a união entre fibra e um conector de baixas perdas para fibra monomodo (sc/pc – subscriber connector/physical contact pigtail) o que permite o acoplamento com o interrogador, facilitando de uma forma eficaz a monitoração espectral durante o processo de gravação das redes de Bragg.

As especificações quanto à natureza das fibras usadas, encontram-se resumidas na Tabela I.

Código da Fibra		Fabricante	Condição Modal	
01	SSMF@1550nm			
02	ESMF@1550nm	Draktel	Monomodo (infravermelho)	
03	GF1@1550nm		(
04	MMF@1550nm		Multimodo	
		Thorlabs	(infravermelho)	
05	SM450@450nm		Monomodo	

Tabela I: Especificações das Fibras Óticas Gravadas

06	SM600@600nm		(visível)
07	SM633@633nm	3M	Monomodo (visível)

Fonte: Autoria própria

Devido ao processo de exposição longo, as redes gravadas passam por um processo de recozimento (*annealing*) devido ao processo de aquecimento no interior da própria fibra em função da exposição à radiação UV. Para o caso específico das redes gravadas neste trabalho, antes de serem mensuradas, as FBGs foram submetidas ao processo de recozimento em um forno com temperaturas de 70 °C por um tempo de 6 horas, com o objetivo de remover o hidrogênio na matriz da sílica, visto que deste modo proporciona uma estabilidade térmica das redes.

3.3 PROCESSO DE CARACTERIZAÇÃO DAS REDES DE BRAGG

3.3.1 Caracterização à Temperatura das FBGs

No processo de caracterização em temperatura, ilustrado na Figura 8, a parte sensora das fibras óticas contendo as redes FBGs, foi posicionada sobre uma célula termoelétrica *peltier*, sendo a FBG iluminada por um laser supercontínuo (Khoreas, SuperK Compact NKT Photonics), passando pelo acoplador ótico (Thorlabs TW670R5F2) e finalmente o sinal refletido foi monitorado pelo analisador de espetros óticos (OSA Yokogawa AQ6373) visível que operava na faixa entre 350 a 1200 nm com uma resolução de 0,1 pm.

A variação da temperatura foi realizada em nove ensaios, na condição de repetibilidade, correspondendo a 3 ciclos de subida para o aumento de 0 °C até 60 °C. Em seguida, no sentido inverso, correspondendo ao patamar de descida para a diminuição da temperatura, em condições de reprodutibilidade. Essas variações constituíram oito degraus com intervalos de 5,0 °C no *peltier* e registrados por um sensor Termopar (ET–2082C); sendo que o peltier foi alimentado por uma fonte de tensão AC/DC (*ICEL MANAUS PS-5000*) na tensão nominal de 12 Volts; em cada degrau de variação da temperatura estabilizada, eram registrados os valores dos comprimentos de onda de Bragg específicos, apresentados pela aquisição no próprio OSA.

Após a coleta dos dados, foi usado o programa (*software*) Origin® 8.0, para o tratamento dos mesmos com a finalidade de se obter os gráficos correspondentes as sensibilidades à temperatura, com os seus respectivos valores dos coeficientes. Na sequência do tratamento dos dados, foi feita a determinação pelo mesmo programa e se obteve os valores dos desvios-padrão e cálculo das respectivas incertezas



Figura 8 -- Esquema simplificado das caracterizações em temperatura contendo o elemento termoelétrico da célula peltier, no qual é posicionada a parte sensora da FBG. Fonte: Autoria própria

3.3.2 Caracterização à Deformação Longitudinal das FBGs

Para a caracterização a deformação das redes de Bragg, foi executada a partir de uma configuração tendo como base o esquema anterior da Figura 8, mas com algumas mudanças, com notável introdução do dispositivo de tracionamento mecânico, monitorado por um micrômetro apalpador fazendo deslocamentos na ordem de 0,01 mm. De acordo com a Figura 9, que mostra o esquema experimental utilizado para a caracterização à deformação longitudinal, após a remoção duma porção significativa do acrilato, as fibras foram coladas ao dispositivo com a parte sensora bem ao meio do eixo. De seguida com um motor de controle de passo, o deslocamento foi sendo variado e controlado pelo micrômetro em intervalos de 0,01 mm.



Figura 9 -- Esquema simplificado da montagem para caracterização em deformação das FBGs, destacando-se o dispositivo de tracionamento mecânico onde é colada a fibra. Fonte: Autoria própria

A Figura 10 ilustra de forma detalhada, os elementos constituintes no dispositivo usado para a caracterização a deformação longitudinal das redes de Bragg, onde a fibra depois de desencapada pela retirada do acrilato foi colada sobre o eixo das bases, usando uma cola cianoacrilato e deixada por 24 horas de modo a garantir uma melhor aderência ao dispositivo de tracionamento. Os deslocamentos efetuados de forma lenta a partir do motor de passo foram visualizados no micrômetro em valores de 0,01 mm, considerando que entre as bases contendo o eixo de fixação da fibra, um era fixo não se movendo e o outro era móvel e garantia a tração e relaxação da fibra ótica contendo a rede de Bragg.



Figura 10 -- Dispositiva de fixação da FBG para o tracionamento mecânico Fonte: Autoria própria

Os tracionamentos aplicados na fibra contendo a rede FBG foram convertidos de absolutos para relativos, sendo expressos conforme a equação (29)

$$D = \frac{\Delta L}{L} \tag{29}$$

onde D é a deformação relativa em *micro-strain*, ($\mu\epsilon$), ΔL corresponde às variações longitudinais registadas durante a tração e relaxação, e *L* é o comprimento inicial da fibra ótica medido com um paquímetro logo após a colagem sobre o eixo do dispositivo.

A cada variação no deslocamento feito manualmente sobre o motor de passo, induzia uma deformação na fibra que consequentemente originava uma variação no comprimento de onda de Bragg, que era registrado a partir da aquisição feita pelo OSA, procedimento este feito em nove ensaios nas condições de repetibilidade, em três ciclos de subida e descida (tração/relaxação) e posteriormente os dados foram processados a partir de pelo *Software Origin® 8.0;* sendo deste modo determinados os valores correspondentes das sensibilidades das redes de Bragg à deformação longitudinal, os respectivos gráficos que demonstram a relação entre o comprimento de onda em função da deformação e finalmente a determinação das médias, os desvios-padrão, os desvios médios possibilitando a determinação das incertezas.

Um estudo analítico e comparativo foi efetuado para as redes de Bragg gravadas, relacionado com as características das diferentes fibras óticas, considerando os parâmetros pós-gravação determinantes como a largura de banda a meia altura (FWHM), o comprimento de onda de ressonância central de Bragg e a amplitude espectral; aliado aos dados relativos ao processo de caracterização a temperatura e deformação longitudinal com todos os principais parâmetros quantitativos.

A comparação da dinâmica de crescimento das FBGs em termos de regimes de exposição à radiação UV, encontra-se associada a parâmetros de estabilidade térmica e sensibilidade, obtidas para redes gravadas em fibras óticas de diferentes dopagens e categorias modais, verfifica-se em um padrão de crescimento denominado como normal similar ao comportamento verificado com FBGs do tipo I e tipo IA. No caso anterior verificando-se para modulações de índice de refração associados a modulações por temperaturas entre 300 °C, por outro lado para casos onde a temperatura alcança a 500 °C é designado como regime anormal, similar as FBGs do tipo IIA com um baixo limite de temperatura (LIMA *et al.,* 2005; OTHONOS *et al.,* 2005; SIMPSON *et al.,* 2004).

O comportamento relacionado ao deslocamento no comprimento de onda de Bragg em fibras hidrogenadas, estando sob influência da exposição de uma fonte de laser UV, demonstra significativamente um comportamento anormal de crescimento do perfil espectral, estando visível igualmente em situações de tratamentos térmicos associados à regeneração de redes semente do tipo IA, numa situação em que exibem coeficientes de sensibilidade a temperatura bastante reduzida e deslocamentos do comprimento de Bragg em torno de 18 nm (LIU *et al.*, 2002).

Foi ainda efetuado um estudo a partir dos aspetos qualitativos e quantitativos das redes produzidas experimentalmente, para uma melhor avaliação do desempenho, tomando em consideração a sua aplicação em sensoriamento, fato que toma em atenção alguns pressupostos técnicos como, para uma medição precisa usando sensores FBGs influenciados por erros aleatórios e sistemáticos, a identificação das fontes que os produzem devem ser consideradas e quantificadas o que suscita a determinação das incertezas (POSSETTI *et al.,* 2012).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados nesta seção os gráficos que constituem a resposta ao processo de inscrição das redes de Bragg por laser femtossegundos, nas respectivas fibras óticas a partir dos espetros de reflexão obtidos e processados segundo a subdivisão considerando as fibras monomodo do padrão de comunicação da banda do infravermelho, seguido dos espectros da banda do visível do espectro eletromagnético e terminando com a abordagem correspondente à fibra multimodo, também pertencente à faixa do infravermelho.

Na sequência são discutidos os resultados do processo de caracterização à temperatura e deformação longitudinal, a partir de uma análise dos principais parâmetros obtidos após o tratamento dos dados obtidos experimentalmente, tendo sido considerados aspetos relevantes em função dos valores das sensibilidades obtidos. Finalmente, a última abordagem centra-se na análise dos resultados provenientes do tratamento estatístico dos dados pós-caracterização em temperatura e deformação longitudinal das FBGs, tendo sido exibidos diversos parâmetros que vão desde a determinação do desvio padrão e as respetivas incertezas de diversa ordem.

4.1 ANÁLISE DOS PARÂMETROS PÓS-GRAVAÇÃO DAS FBGS

Alguns dos espectros das redes gravadas são mostrados nos gráficos presentes na Figura 11, apresentados de modo resumido pelas categorias anteriormente mencionadas. A qualidade espectral é considerada boa, com as bandas de reflexão razoavelmente estreitas e picos bem definidos. O conjunto das redes gravadas apresentou uma amplitude média em torno de 11 dB – valores apresentados na tabela II – com largura de banda (*FWHM – Full Width Half Maximum*) relativamente estreita avaliada em 0,3 nm.

No campo das comunicações óticas, a largura de banda de um sistema linear é vista como a frequência na qual a potência decai para 3 dB, ainda que as

fibras não podem ser tratadas na sua generalidade como sistemas lineares e em função da sua potência podem ser consideradas condições de propagação da radiação de forma independente (AGRAWAL, 2002).

Diversos autores consideram a largura de banda a meia altura com valores de 0,4 nm, para redes apodizadas como que apresentando uma qualidade espectral boa, por via da visualização no seu perfil espectral a partir da eliminação ou ausência de lóbulos laterais, como consequência da modulação do índice de refração uniforme (OTHONOS, 1999).

Segundo Williams *et al.*, (1996) é possivel produzir redes de Bragg com alta qualidade espectral e apodizadas com curvas de dispersão tão altas na ordem de - 1800 ps/nm⁻² acima de 0,7 nm de largura de banda, sendo suficientes para compensar dispersões em torno de 25000 Km de extensão em fibras padrão de comunicação.

Os gráficos apresentados na Figura 11(a) correspondem às fibras pertencentes à faixa de operação situadas na banda espectral do infravermelho (IR), ESMF, SSMF, GF1 e a MMF; os gráficos na Figura 11(b) constituem àquelas fibras concebidas especialmente para a faixa da banda espectral do visível; respectivamente.





Figura 11 -- Espetros de reflexão das FBGs gravadas nas fibras (a) SSMF, ESMF e fibra fotossensível GF1, sendo fibras da faixa de transmissão do IR; (b) S450, S600 e SM633, concebidas especificamente faixa de transmissão do Visível. Fonte: Autoria própria

Os valores relacionados ao comprimento de onda de Bragg para o conjunto de FBGs, estão em torno de 672,466 nm confirmando a sua localização na faixa do visível do espectro eletromagnético, a amplitude do sinal refletido e a largura de banda espectral das redes de Bragg, gravadas para todas as fibras em função da sua faixa de operação são descritos na Tabela II. O comprimento de onda de Bragg foi determinado pela posição do pico da banda de reflexão, uma vez que os sinais apresentam baixa saturação e largura de banda estreita.

	Tabela II. Farainetros Fos-Gravação das FBGS em libras oticas							
Fibra		Comprimento de Onda de Bragg (nm)	Amplitude Espectral de Reflexão (dB)	Largura de Banda FWHM (nm)				
01	SSMF-IR	672,22	11	0,31				
02	ESMF-IR	671,78	11	0,20				
03	GF1-IR	672,47	11	0,36				
04	SM450-Vis	671,18	12	0,25				
05	SM600-Vis	671,48	12	0,27				
06	SM633- Vis	671,41	10	0,19				
07	GIF50C – IR	676,72	11	0,30				

Tabela II: Parâmetros Pós-Gravação das FBGs em fibras óticas

Fonte: Autoria própria

4.2 SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG

4.2.1 Sensibilidades à Temperatura das Redes de Bragg

Os gráficos do comprimento de onda versus temperatura são apresentados na Figura 12, divididos em (a) para fibras da banda do infravermelho e (b) da banda do visível. Para uma aplicação como sensores, as FBGs apresentam uma resposta à variações à temperatura submetidas à rede, um comportamento linear, induzindo deste modo uma modulação no índice de refração e consequente incremento das bandas espectrais para maiores valores do comprimento de onda.



Figura 12 -- Gráfica de deslocamento da banda espectral de reflexão das redes de Bragg, em função da temperatura (a) inscritas nas fibras SSMF, ESMF e fotossensível GF1; (b) inscritas nas fibras SM450, SM600 e SM633. Onde as marcas mostram os valores experimentais e vislumbram-se as linhas da reta ajustada por mínimos quadrados.

Fonte: Autoria própria

Esse comportamento é observado tanto para as fibras da faixa do infravermelho quanto àquelas pertencentes à faixa do visível e os valores médios obtidos, mostrados na Tabela III, mostram sensibilidades na faixa de $(5,19\pm0,1)$ pm/°C a $(7,78\pm0,1)$ pm/°C de acordo com a fibra utilizada. Nessa caracterização em temperatura a FBG ESMF apresenta um coeficiente pela inclinação bem maior, devido a uma dopagem intrínseca enriquecida que a própria fibra apresenta tendo resultado num maior valor de sensibilidade obtido durante a caracterização.

Tipo de Fibra		Sensibilidade à Temperatura (pm/°C)
01	SSMF	5,35
02	ESMF	7,78
03	GF1	5,36
04	SM450	5,19
05	SM600	5,35
06	SM633	5,92
07	GIF50C – IR	5,05

Tabela III: Coeficientes de Sensibilidade à Temperatura das FBGs Monomodais

Fonte: Autoria própria

4.2.2 Sensibilidade à Deformação das Redes de Bragg

Os resultados da caracterização das FBGs como sensores à grandeza externa da deformação mecânica são apresentados nos gráficos da Figura 13 (a) e (b), notando-se um incremento em função da variação das bandas espectrais para maiores comprimentos de onda de Bragg registrados como resultado da deformação aplicada às redes de Bragg. Foi verificada uma resposta linear a partir do melhor ajuste linear aos dados obtidos experimentalmente, usando o método dos mínimos quadrados.



Figura 13 -- Gráfica sobre o deslocamento espectral da banda de reflexão em função da deformação aplicada à rede de Bragg. Marcas mostram pontos experimentais, as linhas o melhor ajuste por uma reta para as fibras SSMF, ESMF e fotossensível GF1 e (b) para fibras SM450, SM600 e SM633.

Fonte: Autoria própria

A visualização dos gráficos apresentados segue a divisão correspondente às fibras na faixa da região do infravermelho, Figura 13 (a), assim como para aquelas na região do visível na Figura 13(b); o comportamento que todas as redes apresentam é uma resposta linear em função da deformação aplicada. A Tabela IV apresenta os valores numéricos das sensibilidades à deformação para as diferentes fibras óticas empregadas na gravação das FBGs.

Tipo de Fibra		Sensibilidade à Deformação (pm/με)		
01	SSMF	0,50		
02	ESMF	0,51		
03	GF1	0,50		
04	SM450	0,55		
05	SM600	0,53		
06	SM633	0,51		
07	GIF50C – IR	0,59		

Tabela IV: Coeficientes de Sensibilidade à Deformação das FBGs Monomodais

Fonte: Autoria própria

4.2.3 Sensibilidade à Temperatura e Deformação da FBG Gravada na Fibra Ótica em Condição Multimodo

No caso específico da rede de Bragg gravada na fibra ótica multimodo GIF50C, a caracterização em função da temperatura se apresenta na Figura 14 (a), não sendo possível aplicar um ajuste linear aos pontos experimentais; o que suscitou a aplicação de um ajuste polinomial de 2ª ordem cujos coeficientes são apresentados na Tabela V. O desvio na linearidade desta fibra nesta faixa de temperatura menor pode estar aliado ao fato dela apresentar um perfil de índice gradual e o seu espectro sendo a superposição de várias bandas de reflexão com diferentes comprimentos de onda. Comportamento similar ao que se verifica com as FBGs monomodo operando na banda C, quando submetidas a altas temperaturas (T> 250 °C), aspeto este verificado de forma evidente na modulação do índice de refração em função da temperatura para as redes com comprimentos de onda na faixa do visível (INÁCIO *et al.*, 2016).

Equação do ajuste polinomial (pm/°C) = $B_2X^2 + B_1X + C$							
Tipo de FibraB1 [pm/°C²]B2 [pm/°C]C [pm]							
GIF50C 0,005 4,61·10 ⁻⁷ 676,42							
Fonte: Autoria própria							

Tabela V: Coeficientes Polinomiais da Sensibilidade à Temperatura da FBG Multimodo

Na Figura 14 (b) apresenta-se a sensibilidade da mesma FBG à deformação longitudinal, onde se pode notar que, em função do comportamento dos pontos experimentais, uma não linearidade também está presente. Realizando o mesmo ajuste polinomial são obtidos valores da sensibilidade em torno de (0,50 ±0,01) pm/µɛ de acordo com a tabela VI.



Figura 14 -- Gráfica do deslocamento espectral da banda de reflexão da rede de Bragg aplicada à fibra muiltimodo, onde as marcas mostram pontos experimentais das linhas com um ajuste polinomial, (a) em função da temperatura e (b) em função da deformação. Fonte: Autoria própria

Tabela VI: Coeficientes de Sensibilidade a Deformação da FBG Multimodo							
Equação do ajuste polinomial (pm/ ϵ) = B ₂ X ² + B ₁ X + C							
Tipo de Fibra B_1 [pm/ ϵ^2] B_2 [pm/ ϵ]C [pm]							
GIF50C 7,81 1,54 676,45							

1.4

Fonte: Autoria própria

4.3 ANÁLISE DOS VALORES DAS INCERTEZAS DAS REDES DE BRAGG

Com o auxílio do programa *Origin* foram processados os dados das redes de Bragg, após o processo de caracterização em temperatura e deformação longitudinal para a determinação das incertezas, iniciando pela obtenção do desviopadrão de cada uma e incertezas do tipo A; de seguida foram determinadas as outras incertezas do tipo B, do interrogador incluindo a sensibilidade e resolução de cada sensor a partir das expressões matemáticas expostas segundo Possetti *et al* (2012).

Foram determinados os valores dos comprimentos de onda e desviospadrão para a caracterização à temperatura e de forma análoga foram obtidos os valores para a caracterização à deformação longitudinal, tomando-os como base foi possível a determinação das principais incertezas das FBGs que permitiram aferir as características mensuradas dos sensores. Notou-se nesse processo a existência de uma correlação muito alta, fato que demonstra a influência bastante significativa entre a temperatura e deformação longitudinal (variáveis independentes) e o comprimento de onda (variável dependente). Esse efeito liga-se à diafonia observada entre as duas grandezas independentes quando mensuradas através da mudança em comprimento de onda de uma rede de Bragg (POSSETTI, 2013).

Nas Tabelas VII e VIII encontram-se os principais parâmetros resultantes do processo de determinação de incertezas, incluindo a análise a partir do melhor ajuste da regressão linear para as FBGs em fibras monomodo e pelo ajuste polinomial da FBG gravada na fibra multimodo, nesta última devido à disposição dos vários modos e como a radiação se propaga relativamente à diferença dos campos da radiação no seu interior, mas nas duas características modais vislumbrou-se pelas equações ajustadas e o coeficiente de *Pearson* (R²), o que demonstrou um grau bastante elevado de correlação entre as variáveis.

Relativamente à determinação dos parâmetros metrológicos em função do processo de calibração, tendo em consideração o numero de amostras visadas em todos os ensaios realizados no processo de caracterização, verificou-se uma repetibilidade e precisão no processo de medição dos parâmetros em estudo, após o processo de calibração as incertezas foram obtidas por um nível de confiança em torno de 95,45% (BORTOLOTTI *et al.*, 2012).

4.3.1 Incertezas da Caracterização à	Temperatura
--------------------------------------	-------------

Tipo de Fibra	SSMF	ESMF	GF1	SM450	SM600	SM633	GIF50C
Comprimento de Onda Médio λ _B (nm)	672,22	671,78	672,47	671,18	671,48	671,41	676,72
Desvio padrão	0,018	0,025	0,019	0,017	0,016	0,033	0,007
Incerteza Padrão (nm) (Tipo A)	0,010	0,006	0,009	0,008	0,004	0,017	0,003
Incerteza do Interrogador (nm) (Tipo B)	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
Incerteza do Calibrador (°C) (Tipo B)	0,288	0,288	0,288	0,288	0,288	0,288	0,288
Incerteza de Regressão (°C) (Tipo B)	0,005	0,023	0,006	0,006	0,005	0,0141	0,105
Incerteza Combinada (°C) (Tipo B)	0,282	0,296	0,289	0,289	0,289	0,334	0,308
Incerteza Expandida (°C)	0,02	0,012	0,019	0,017	0,008	0,034	0,006
Resolução do Sensor	0,02	0,019	0,02	0,018	0,018	0,019	0,019
Repetitividade	0,001	0,006	0,01	0,009	0,004	0,018	0,030
Coeficiente de Pearson (R ²⁾	0,996	0,996	0,996	0,996	0,998	0,983	0,958
Equação de Regressão	Y=0,00 527x+6 71,86	Y=0,0077 x+671,62	Y=0,0053x+ 672,21	Y=0,0051x+ 670,84	Y=0,0052x+ 671,14	Y=0,0055 x+670,63	Y=4,61e ⁻ ⁷ x ² +0,005x+ 676,42

Tabela VII: Valores de Incertezas da Caracterização à Temperatura nas FBGs

Fonte: Autoria própria

4.3.2 Incertezas da Caracterização à Deformação Longitudinal

Tab	Tabela VIII: Valores de Incertezas à deformação longitudinal das FBGs							
Tipo de Fibra	SSMF	ESMF	GF1	SM450	SM600	SM633	GIF50C	
Comprimento de Onda Médio λ_B (nm)	672,22	671,78	672,47	671,18	671,48	671,41	676,72	
Desvio padrão	0,026	0,016	0,023	0,021	0,010	0,042	0,029	
Incerteza Padrão (nm) (Tipo A)	0,073	0,010	0,008	0,007	0,007	0,014	0,0028	
Incerteza								

Interrogador (nm) (Tipo B)	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
Incerteza Calibrador (με) (Tipo B)	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Incerteza de Regressão (°C) (Tipo B)	0,044	0,015	0,006	0,009	0,012	0,014	0,065
Incerteza Combinada (°C) (Tipo B)	0,089	0,033	0,029	0,009	0,031	0,035	0,071
Incerteza Expandida (°C)	0,015	0,02	0,015	0,014	0,013	0,028	0,006
Resolução do Sensor	0,21	0,19	0,2	0,18	0,18	0,19	0,169
Repetitividade	0,078	0,011	0,008	0,009	0,007	0,015	0,003
Coeficeiente de Pearson (R ²⁾	0,996	0,995	0,999	0,998	0,997	0,995	0,989
Equação de Regressão	Y=4,9e ⁻ ⁴ x+671,96	Y=4,98e ⁻ ⁴ x+671,81	Y=5,32e ⁻ ⁴x+672,61	Y=5,33e ⁻ ⁴x+670,61	Y=5,18e ⁻ ⁴x+671,29	Y=5,11e ⁻ ⁴ x+670,78	Y=1,54x ⁻ ² +7,81x+676,45

Fonte: Autoria própria

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Redes de Bragg com o comprimento de onda otimizado para a região do visível foram produzidas com pulsos de laser de femtossegundos no UV, tendo como base fibras óticas do padrão de comunicação da condição monomodo na região do infravermelho e na região do visível, incluindo também redes gravadas numa fibra ótica da condição multimodo; constatou-se que todas as redes gravadas apresentaram uma boa qualidade espectral e largura de banda estreita.

Os coeficientes apresentados da sensibilidade à temperatura e deformação das redes de Bragg, possuem valores mensurados inferiores àqueles obtidos para redes operando na banda-C, confirmando observações anteriormente levantadas para o caso da sensibilidade à temperatura (OTHONOS & KALLI, 1999).

Os valores determinados para a sensibilidade à deformação são inferiores àqueles publicados em 820 nm e 1300 nm (HILL *et al.*, 1997), confirmando a tendência de queda para comprimentos de onda menores. Embora os valores encontrados sejam menores que aqueles na região espectral do infravermelho a 1550 nm, a menor sensibilidade térmica implica em menor complexidade no tratamento de dados em aplicações onde seja necessário compensar a diafonia entre deformação e temperatura em sensores FBGs; a resposta à variação destes parâmetros externos apresenta um comportamento linear para as redes gravadas em fibras na condição monomodo, dentro das faixas de temperatura e deformação estudadas.

O comportamento verificado para redes gravadas na fibra multimodo apresenta não linearidade na evolução em função dos referidos parâmetros externos, análogo ao que se verifica no caso em que um sensor FBG no infravermelho é submetido a temperaturas muito altas, situação em que se registra um aumento da sensibilidade e resposta não linear (HILL *et al.,* 1997).

As redes produzidas não são adequadas para aplicações em telecomunicações a longas distâncias devido à faixa de operação na região do visível onde a atenuação da fibra ótica é elevada. No entanto, essas redes podem ser aplicadas especificamente, por exemplo, em técnicas de espectroscopia

combinadas ao uso de microscopia em imageamento na detecção e diagnóstico de células cancerígenas em tecidos *in vivo*, área de pesquisa em análises clinicas (CARVER *et al., 2010*).

Sensores baseados em FBGs no visível podem ainda ter seu uso estendido em aplicações onde radiação laser é utilizada em tomografia de ótica coerente, bem como naquelas aplicações de interação com células vivas, baseadas em sensores operando na faixa do visível em função da radiação laser incidente, como, por exemplo, fototerapia dinâmica de processos cancerosos, cirurgias, branqueamento de dentes a laser, e ainda em situações envolvendo fenômenos relacionados com filtros que funcionam com base em espectroscopia Raman (BECKER *et al.*, 2014).

5.2 TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho foram gravadas redes de Bragg com comprimentos de onda na faixa do visível, usando pulsos laser de femtossegundos. Considerando que as redes apresentam potencial aplicação devido ao seu desempenho como sensores de altas temperaturas, a próxima sequência da pesquisa seria interessante um estudo relacionado ao tratamento térmico dessas redes mediante regeneração (extinção e recriação da banda característica durante um patamar em alta temperatura).

Com objetivo de entender as características intrínsecas das redes de Bragg gravadas em condições similares ao presente trabalho, face ao processo de regeneração, uma sugestão adicional seria a de estender os procedimentos experimentais com vista a confrontar os resultados relativos à FBGs gravadas com outras técnicas e com comprimentos de onda em outras faixas espectrais.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, A. & SOUSA, A. R. De; Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial. Editora Manole Ltda; Barueri – SP; pp 127-13, 12008

AGRAWAL, G. P. Fiber Optic Communication Systems. 3rd Edition. John Wiley & Sons. p. 23-30. 2002.

AGRAWAL, G. P. & BOYD, Robert W. **Contemporary Nonlinear Optics**. Academic Press Inc, New York. p. 119-148. 1992.

AMS, M., MARSHALL, G. D., DEKKER, P., DUBOV, M., MAZENTSEV, V. K., BENNION, I., WITHFORD, M. J. Investigation of Ultrafast Laser Photonic Material Interactions: Challenges for Directly Written Glass Photonics. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 14, p. 1370-1381. 2008.

ARASU, P. T., NOOR, A. S. M., SHABANEH, A. A., GIREI, S. H., MAHDI, M. A., LIM, H. N., ABDUL RASHID, H. A., YAACOB, M. H., Absorbance Properties of Gold Coated Fiber Bragg Grating Sensor for Arqueous Ethanol, J. Europ. Soc. Rap. 9, p.1-5, 2014.

BECKER, M., ELSMAN, T., SCHWUCHOW, A., ROTHHARDT, M., DOCHOW, S. and BARTLET, H. First Order Fiber Bragg Grating Inscription With Femtosecond Laser and Reflection Wavelengths from Visible to Infrared. 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors. 2014.

BORTOLOTTI, F.; SOUSA, K. de M.; KALINOWSKI, H. J.; SILVA, J. C. C., **Packaging, characterization and calibration of fiber Bragg grating temperature sensors.** In: MOMAG 2012 - 15° SBMO - Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e o 10° CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2012, João Pessoa - Paraíba. Anais MOMAG 2012, v. único. p. 1-5.

BOYD, R. W. Nonlinear Opitcs. 3rd Edition. New York, p. 1, 561-568, 2007.

CARVER, G. E., FARKAS, D. L., PORQUE, J., FEDER K. S. & WESTBROOK, P. S., **Visible Wavelength Fiber Bragg Gratings Arrays for High Speed Biomedical Spectral Sensing**, Proc. Adv. Photon. Renew Energy OSA Techn. Dig., p.1-3, 2010.

COSTA, L. N., OLIVEIRA, V., CHIAMENTI, I., KALINOWSKI, H. J., ALBERTO, N., and BILRO, L., **Redes de Bragg Escritas com Pulsos Ultracurtos,** Anais do MOMAG 2014, Curitiba, Brazil, 2014.

COSTA, L. N. da., MOURA, C. C. de., OLIVEIRA, V., CHIAMENTI, I., and KALINOWSKI, H. J. **Bragg Gratings Written with Ultrafast Laser Pulses**. Journal of Microwaves, Optoeletronics and Electromagnetics Applications, vol. 14, SI-I, July 2015.

DAVIS, K. M., MIURA, K., SUGIMOTO, N., and HIRAO, K. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser," Optics Letters, vol. 21, no. 21, pp. 1729–1731, 1996.

FIORIN, R., COSTA, L. N. da., ABE, I., CHIAMENTI, I., MOURA, C. C. de., KALINOWSKI, H. J. Manufacturing of Microchannels in Soda-lime lass by Femtosecond Laser and Chemical Etching. Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International. p. 1-2. 2013

GIOZZA, W. F., CONFORTI, Evandro, WALDMAN, Hélio. **Fibras Óticas: Tecnologia e Projeto de Sistemas**. Editora McGraw-Hill. São Paulo. P. 1-5. 1991.

HECHT, E. **Optics.** Adelphi University. 4th Edition. New York. p. 73-77 2002

HECHT, J. **Entendendo Fibras Óticas.** Berkeley Livros de Última Geração. Rio de Janeiro p. 61-95, 1993.

HILL, K. O., FUJI, Y., JOHNSON, D. C. & KAWASAKI, B. S., **Photosensitivity in Optical Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication**, Appl. Phys. Lett, Vol. 32, p.647-649, 1978.

HILL, K. O. & MELTZ, G., Fiber Bragg Gratings Technology: Fundamentals and **Overview**, Journal of Lightwave Technology Vol. 15, No. 8, Aug 1997.

INÁCIO, P. L., CHIAMENTI, I., SUALEHE, I. da S. V., OLIVEIRA, V., KALINOWSKI, H., **Visible Wavelength Fiber Bragg Gratings: Thermal and Strain Sensitivities**, European Workshop on Fibre Sensors, May 31-June 3, 2016.

KAISER, A. RETHFELD, B., VICANEK, M. and SIMON, G. **Microscopic processes in dielectrics under irradiation by subpicosecond laser pulses**, Physical Review B, vol. 61, no. 17, pp. 11 437–11 450, 2000.

KASHYAP, Raman, "Fiber Bragg Gratings", San Diego, Academic Press, 1999.

KERSEY, A. D., DAVIS, M. A., PATRICK, H. J., LeBLANC, M., KOO, K. P., Askins, C. G., PUTNAM, M. A. & FRIEBELE E. J. **Fiber Grating Sensor**, Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, p. 1442-1462, 1997.

LAM, D. K. W. and GARSIDE B. K. Characterization of Single-mode Optical Fiber Filters. Applied Optics, Vol. 20, issue 3, p. 440-445, 1981.

LEMAIRE, P. J., ATKINS, R. M., MIZRAHI, V., REED, W. A., Electronics Letters, vol. 29,p. 1191-1198, 1993, citado por [Othonos, 1999].

LIMA, M. J. N., NOGUEIRA, R. N., SILVA, J. C. C., TEIXEIRA, A. L. J., ANDRE, P. S. B., ROCHA, J. R. F. da., KALINOWSKI, H. J. and PINTO, J. L., **Comparison of the Dependence of Diferrent Types of Bragg Gratings,** Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 45, No. 4, May 20, 2005.

Y. Liu, J.A.R. Williams, L. Zhang, and I. Bennion, Abnormal spectral evolution of fiber Bragg gratings in hydrogenated fibers, Optics Lett 27 (2002), 586–588.

LÓPEZ-HIGUERA, J. M. **Optical Sensors**. Universidad de Cantabria. p. 3-62, 1998. MALO, B., HILL, K. O, BILODEAU, F., JOHNSON, D. C., ALBERT, J., **Point-bypoint fabrication of micro-Bragg Gratings in Photosensitive Fibre Using Single Excimer Pulse Refractive Index Modification Techniques**. Electronics Letters, vol. 29, n. 18, p. 1668-1669, 1993.

MARQUES, C. A., BILRO, L. B., ALBERTO, N. J., WEBB, D. J., and NOGUEIRA, R. N. Inscription of Narrow Bandwidth Bragg Gratings in Polymer Optical Fibers, J. Opt., vol. 15, no. 7, p. 075404, 2013.

MAZUR, Eric. **Femtosecond Laser Processing Materials.** Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) – Laser Science to Photonics Applications. p. 1-2. 2014.

MELTZ, G., MORLEY, W. W., GLENN, W. H., Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method, Optics Letter, Vol. 14, p.823-825, 1989.

MIHAILOV S. J., SMELSER C. W., WALKER, LU, P., GROBNIC, R. B., DING, D., H., HENDERSON, G., and UNRUH J., "Fiber bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation," Opt. Lett. 28(12), 995–997. 2003.

MIHAILOV, S. J., GROBNIC, D., SMELSER, C. W., LU, P., WALKER, R. B. and DING, H. Induced Bragg Gratings in Optical Fibers and Waveguides Using na Ultrafast Infrared Laser and Phase Mask. Laser Chemistry, Anual. 2008

MIHAILOV, S. J., Ultrafast laser inscribed fiber Bragg gratings for sensing applications, Proc. SPIE 9852, p. 98520P, 2016. doi:10.1117/12.2229313

OKAMOTO, K. Fundamentals of Optical Waveguides. 2nd Edition. Elsevier Acdemic Press. California-USA. P. 1-8. 2006.

OLIVEIRA, Fernanda Mantuan Dala Rosa de, **Rede de Bragg Aplicada na Monitoração de Deformação Mecânica do Verniz Acrílico Durante a Secagem.** Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2013.

OSTENDORF, A. **Femtosecond Laser Matching**. Laser and Eletctro-Optics. vol. 1, The 4th Pacific Rim Conference On. 2001.

OTHONOS, A., KALLI, K., PUREUR, D. & MUGNIER, A.; "Fiber Bragg Grating: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing", London, Artech House, 1999.

POSSETTI, G. R. C., KAMIKAWACHI, R., MULLER, M., and FABRIS, J. L., "Metrological evaluation of optical fiber grating-based sensors: An approach towards the standardization," Lightwave Technology, Journal of, vol. 30, no. 8, pp. 1042 –1052, april15, 2012. POSSETTI, G. R. C. Sensores a Fibra Ótica para Avaliação de Combustíveis. Tese (Doutorado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2013.

SALEH, Bahaa E., TEICH, Marvin C. **Fundamentals of Photonics**. John Wiley In. New York. 1991.

SCHAFFER, C. B., BRODEUR, A., and MAZUR, E. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses. Measurement Science and Technology. vol. 12, no. 11, pp. 1784–1794, 2001.

SHI, J., TANG, M., FU, S., SHUM, P., **Modeling and Analysis of Fiber Bragg Gratings Based Visible Pr³⁺-Doped Fiber Lasers**, J. Lightw Technol., vol 32, no. 1, pp. 27-34, Jan. 1, 2014.

SIMPSON, A.G.; KALLI, K.; ZHOU, K.; ZHANG, L.; BENNION, I. Formation of type IA fibre Bragg gratings in germanosilicate optical fibre. In: Electronics letters, Vol. 40, No. 3, 05.02.2004, p. 163-164.

SMELSER, C. W., MIHAILOV, S. J., GROBNIC, D., Dependence of Grating Profile on Incident Intensity During the Formation of Type I-IR Ultrafast Fiber Bragg Gratings. Conference on Laser and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference. p. 1-2. 2006.

STUART, B. C., FEIT, M. D., HERMAN, S., RUBENCHIK, A. M., SHORE, B. W. and PERRY, M. D. **Nanosecond-to-femtosecond Laser-induced Breakdown in Dielectrics**, Physical Review B, vol. 53, no. 4, pp. 1749–1761, 1996.

WILLIAMS, J. A. R., EVERALL, L. A. and BENNION, I., Fiber Bragg Grating Fabrication for Dispersion Slope Compensation. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 8, No. 9, September, 1996.

WIRTH, Almir (Almir Wirth Lima Junior). **Formação e Aperfeiçoamento Profissional em Fibras Óticas**. Editora Axel Books do Brasil. Rio de Janeiro. p. 23-31. 2004.

YIN, Shizhuo; RUFFIN, Paul B.; YU, Francis T. S. **Fiber Optic Sensors**. 2nd Ed. CRC Press Taylor and Francis Group. p. 164-1978. 2008

ZELLER, M., LIMBERGER, H. G. & LASSER, T., An All-fiber Pr/Yb-doped Upconversion Laser in Different Laser Operation Modes, Proc. Of SPIE Vol. 5457, p.621-626, 2004.

APÊNDICE A - PARÂMETROS METROLÓGICOS E ESTATÍSTICOS DAS REDES DE BRAGG

Nesta vertente, são determinadas as principais características metrológicas das redes de Bragg que constituíram objeto desta pesquisa, permitindo a percepção da sua eficiência como sensores a partir da apresentação do tratamento estatístico dos dados adquiridos experimentalmente, o correspondente aos erros aleatórios e sistemáticos que ocorrem num processo de medição de um sensor, com vista a assegurar a confiabilidade do resultado a ser obtido pela identificação das fontes de incerteza (POSSETTI 2013).

Foram determinados parâmetros como o desvio-padrão da média dos comprimentos de onda, as incertezas do tipo A proveniente da dispersão das amostras, as incertezas do tipo B relacionadas com o interrogador como analisador de espetros óticos e os calibradores termopar e micrômetro como instrumentos de medição para a aquisição dos valores das grandezas relacionadas à variação do comprimento de onda de Bragg das FGBs; tendo sido incluídas a determinação da incerteza padrão combinada e a incerteza expandida (BORTOLOTTI, *et al.* 2012).

No que diz respeito ao tratamento estatístico dos dados obtidos durante as caracterizações, pelo do uso do programa *Origin 8.0* foi possível determinar dentre os desvios-padrão, os desvios padrão das médias o que permitiu de seguida obtenção de valores para o cálculo das possíveis incertezas do tipo A e do tipo B baseado nas expressões descritas a seguir na sequência (POSSETI *et al.,* 2012, ALTERTAZZI & SOUSA, 2008).

Média:
$$\overline{X} = \sum_{i=1}^{N} \frac{X_i}{N}$$
 (30)

Desvio padrão da amostra experimental:
$$\sigma \cong \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}X_{i}^{2} - \frac{N}{N-1}\overline{X}^{2}}$$
 (31)

Desvio padrão do valor médio:
$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$
 (32)

Onde \overline{x} é a média, $\sum X$ são os dados adquiridos, X_i é a i-ésima amostra obtida e N é a quantidade de amostras que foram obtidas, σ é o máximo desvio padrão experimental das amostras, o σ_m é o desvio padrão médio das amostras, a média e o desvio-padrão (σ_m) da média em condições de repetibilidade.

A incerteza do tipo A é determinada pela seguinte expressão

$$u(\bar{x}) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}$$
(33)

onde u(x) é a incerteza do tipo A, $\sigma(x_k)$ é o maior desvio padrão dos dados adquiridos experimentalmente e já fornecidos pelo tratamento automático pelo *origin*.

A incerteza do tipo B associada com o interrogador é utilizada considerando que se tem a especificação do fabricante dos equipamentos, em função dos seus limites de erro e como não se sabe os valores possíveis de X no intervalo de precisão, considera-se que este se encontra no ponto médio e descrito pela equação (34), onde a incerteza residual (u_r) é determinada.

$$u_r = \frac{\partial x}{\sqrt{12}} \quad \text{ou} \quad u_r = \frac{L_r}{2\sqrt{3}} \tag{34}$$

Tendo em conta que ∂x é a variação do dado fornecido pelo fabricante, sendo que L_r ou em alguns casos designado por R é o limite de erro do equipamento, considerando que se usa um interrogador, o termopar e o micrômetro.

O deslocamento relativo em microstrain foi calculado tomando em consideração os instrumentos, micrômetro com resolução de 0,01 mm e o termopar com 1 °C e a partir dele se obteve a porção livre da fibra.

A incerteza associada ao interrogador é calculada pelas expressões

$$u_{\lambda(nm)} = u_{\lambda} \cdot S_{inicial} = (pm \times pm/\Delta\varepsilon) = \Delta\varepsilon$$
(35)

$$u_{T(^{\circ}C)} = u_T \cdot S_{inicial} = (^{\circ}C \times ^{\circ}C/pm) = pm$$
(36)
Sendo a expressão (35) para incerteza da deformação em microstrain e a expressão (36) para a temperatura, onde S_i é a sensibilidade do sensor, $\Delta \epsilon$ a variação do deslocamento em microstrain (OLIVEIRA, 2013; POSSETI, 2013).

A incerteza combinada é determinada pela combinação do desvio padrão do valor médio com as incertezas nas medidas de deformações relativas e incertezas associadas ao interrogador, pela expressão (37):

$$u_{c}(y) = u_{1}(x) + u_{2}(x) + \dots + u_{N}(x)$$
 ou $u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{calib}^{2} + u_{interrog}^{2} + u_{Regr}^{2}}$ (37)

Onde U_m é a incerteza do valor desvio médio, U_{calib} é a incerteza medida pelo calibrador (termopar e micrômetro), $U_{interrog}$ é a incerteza do interrogador usado para a aquisição dos dados (OSA) e U_{Regr} é a incerteza da reta de regressão obtida a partir do método dos mínimos quadrados e ajuste polinomial no caso da MMF.

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = ku(\bar{x})$

Onde k é o fator de abrangência que normalmente é usado o fator de cobertura de 95,45%, para n = 6 a partir da determinação do número de graus liberdade o k tem o valor de k = 2, 649.

O número de graus liberdade é determinado a partir da expressão a (38)

$$v = N - 1 \tag{38}$$

Onde para o caso específico de N = 6 teremos: v = 6 - 1 = 5 gr.lib

A resolução para cada sensor duma distribuição de probabilidade retangular é definida segundo a expressão (39):

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilid\,ade} = \frac{R}{S}$$
(39)

Para o cálculo da Repetitividade da média é calculada considerando o coeficiente de t student correspondente ao número de graus liberdade sendo $v=n-1 \Rightarrow v=6-1=5$ graus liberdade considerando graus liberdade a 95,45% de probabilidade; para 8 graus o coeficiente de t-student corresponde a 2,649.

 $\operatorname{Re}_{I} = \frac{\operatorname{Re}_{I}}{\sqrt{n}} \Rightarrow \operatorname{Re}_{I} = \frac{t.u}{\sqrt{n}}$, onde Re_{I} é a repetitividade da média de N indicações

de medições repetidas; u é a incerteza padrão e N é o número de medições repetitivas usadas parra calcular a média.

A incerteza de regressão linear das FBGs após a caracterização e análise por via dos pontos experimentais é descrito pela equação (40), onde Sy/x é o desvio padrão das variáveis independentes temperatura e deformação representadas por (X), por outro lado da variável dependente comprimento de onda representado por (Y) que leva a determinação da incerteza de regressão U_{Regr.}

$$U_{\text{Regr}} = \pm S_{Y/X} \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(X - \overline{X})^2}{(N - 1)S_X^2}} = \pm S_{Y/X} \sqrt{1 + \frac{1}{N}}$$
(40)

Considerando que o S_X é o desvio padrão da grandeza independente e a equação (41) é que mais se adéqua para a determinação o desvio padrão das variáveis:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{N-1}{N-2} \left(S_Y^2 - b S_X^2 \right)}$$
(41)

Onde Sx e Sy correspondem aos desvios-padrão das variáveis independente e dependente, respectivamente; b é a inclinação da reta e o N é o número de pares de valores (x, y) medidos.

APÊNDICE B - DETERMINAÇÃO DE INCERTEZAS NA CARACTERIZAÇÃO À TEMPERATURA DAS REDES DE BRAGG

Temperatura (ºC)	Média dos Comp. de Onda (nm)	Desvio padrão (λ)	Desvio padrão da média	Média dos Comp. de Onda (nm)	Desvio padrão (λ)	Desvio padrão da média
	Fibra SSMF			Fibra ESMF		
0	671,86802	0,01456	0,00595	671,63617	0,01838	0,0075
5	671,89817	0,01298	0,0053	671,6612	0,0168	0,00686
10	671,92143	0,00793	0,00324	671,70432	0,00731	0,00298
15	671,94937	0,00953	0,00389	671,73965	0,01866	0,00762
20	671,97225	0,01547	0,00632	671,776	0,01619	0,00661
25	671,99715	0,01789	0,0073	671,80478	0,0185	0,00755
30	672,02253	0,01533	0,00626	671,8373	0,01998	0,00816
35	672,04863	0,0149	0,00608	671,88558	0,01681	0,00686
40	672,07643	0,01447	0,00591	671,93317	0,02498	0,0102
45	672,1033	0,01668	0,00681	671,98195	0,02469	0,01008
50	672,12788	0,01516	0,00619	672,01833	0,02161	0,00882
55	672,15963	0,00925	0,00377	672,05678	0,00812	0,00331
60	672,192	0,00926	0,00378	672,0891	0,00361	0,00147
		Fibra GF1			Fibra GIF50C	
0	672,21445	0,0026	0,00106	676,44062	0,00455	0,00186
5	672,2319	0,00171	0,00069	676,44812	0,00501	0,00205
10	672,2514	0,00551	0,00225	676,45763	0,00416	0,0017
15	672,27405	0,00663	0,00271	676,46852	0,00285	0,00116
20	672,29842	0,01167	0,00476	676,48605	0,00206	0,00084
25	672,3225	0,01264	0,00516	676,53272	0,00692	0,00283
30	672,34745	0,01499	0,00612	676,57577	0,00309	0,00126
35	672,37893	0,01777	0,00725	676,62088	0,00125	0,00051
40	672,42198	0,01867	0,00762	676,64123	0,00517	0,00211
45	672,44592	0,01725	0,00704	676,65522	0,00659	0,00269
50	672,47137	0,01596	0,00651	676,66683	0,00499	0,00204
55	672,49355	0,01311	0,00535	676,6813	0,00383	0,00156
60	672,52203	0,01386	0,00566	676,70727	0,0037	0,00151

Tabela IX: Valores do comprimento de onda médio, desvio-padrão das FBGs nas fibras óticas da banda do Infravermelho resultantes da caracterização em Temperatura.

Fonte: Autoria própria

Temperatura (ºC)	Média dos Comp. de Onda (nm)	Desvio padrão (λ)	Desvio padrão da média	Média dos Comp. de Onda (nm)	Desvio padrão (λ)	Desvio padrão da média
	Fibra SM450				Fibra SM600	
0	670,84767	0,00447	0,00183	671,13998	0,01615	0,00659
5	670,87392	0,00783	0,0032	671,16303	0,01539	0,00628
10	670,89277	0,01033	0,00422	671,1833	0,01301	0,00531
15	670,91847	0,01204	0,00492	671,20753	0,00913	0,00373
20	670,94255	0,00532	0,00217	671,2355	0,01012	0,00413
25	670,96883	0,00906	0,0037	671,2646	0,00929	0,00379
30	670,98987	0,01167	0,00476	671,29912	0,00891	0,00364
35	671,01153	0,00963	0,00393	671,3289	0,0032	0,00131
40	671,03955	0,01047	0,00427	671,34962	0,00532	0,00217
45	671,08135	0,01725	0,00704	671,37232	0,01591	0,0065
50	671,10362	0,01759	0,00718	671,394	0,00946	0,00386
55	671,1288	0,01335	0,00545	671,42438	0,00475	0,00194
60	671,14267	0,00956	0,0039	671,45243	0,00532	0,00217
	Fibra SM633					
0	670,6589	0,03374	0,01378			
5	670,66558	0,00869	0,00355			
10	670,6842	0,0138	0,00563			
15	670,70675	0,01486	0,00607			
20	670,7267	0,00769	0,00314			
25	670,74197	0,00661	0,0027			
30	670,76522	0,00784	0,0032			
35	670,80612	0,01572	0,00642			
40	670,84968	0,01437	0,00587			
45	670,88977	0,01544	0,0063			
50	670,92515	0,01155	0,00471			
55	670,94077	0,01605	0,00655			
60	670,9534	0,0181	0,00739			

Tabela X: Valores do comprimento de onda médio desvio padrão das FBGs nas fibras óticas da banda do Visível resultantes da caracterização em Temperatura.

Fonte: Autoria própria

FBG da Fibra SSMF:

Incerteza do tipo A:
$$u(x) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}$$
, $u(x)_{SSMF} = \frac{0.0255}{\sqrt{6}} = \frac{0.0255}{2.449} = 0.010$

$$u_r = \frac{0.1pm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{3,464} = 0,028$$

Incerteza do calibrador: $u_r = \frac{1^{\circ} C}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{3,464} = 0,288$

,Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Regr}} = \pm S_{Y/X} \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(X - \overline{X})^2}{(N - 1)S_X^2}} = \pm S_{Y/X} \sqrt{1 + \frac{1}{N}}$$

$$U_{\text{Regr}} = 0,00521 \sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,00521 \times 1,0377 = 0,0054$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}\,gr)} + u_{Calibrador} + u_{interrogador}^{2}}$$
$$u_{C} = \sqrt{(0,01)^{2} + (0,005)^{2} + (0,28)^{2} + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,079309} = 0,282$$

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = k u_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2 \cdot 0,01 = 0,02$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{0.1}{0.5} = 0.02$$

A repetitividade foi obtida da seguinte forma: $\operatorname{Re}_{I} = \frac{\operatorname{Re}_{I}}{\sqrt{n}} \Rightarrow \operatorname{Re}_{I} = \frac{t.u}{\sqrt{n}}$,

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,01}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,026}{2,449} = 0,01$$

FBG da Fibra ESMF:

Incerteza do tipo A: $u(\bar{x}) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}, \ u(\bar{x})_{SSMF} = \frac{0.016}{\sqrt{6}} = 0.006$

Incerteza do tipo B do interrogador: $u_r = \frac{\partial x}{\sqrt{12}}$ ou $u_r = \frac{L_r}{2\sqrt{3}}$

$$u_r = \frac{0.1\,pm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{3,464} = 0,028$$

Incerteza do tipo B do calibrador: $u_r = \frac{1^{\circ}C}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{3,464} = 0,288$

Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Regr}} = 0,0222\sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,023$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}\,gr)} + u_{Calibrador} + u_{int\,errogador}^{2}}$$
$$u_{C} = \sqrt{(0,06)^{2} + (0,023)^{2} + (0,288) + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,087857} = 0,296$$

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = k u_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2.0,006 = 0,012$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{0,1}{0,51} = 0,019$$

A repetitividade foi obtida da seguinte forma: $\operatorname{Re}_{I} = \frac{\operatorname{Re}_{I}}{\sqrt{n}} \Rightarrow \operatorname{Re}_{I} = \frac{t.u}{\sqrt{n}}$,

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,006}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,01589}{2,449} = 0,006$$

FBG da Fibra GF1:

Incerteza do tipo A: $u(\bar{x}) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}$,

$$u(\bar{x})_{SSMF} = \frac{0,02303}{\sqrt{6}} = \frac{0,02303}{2,449} = 0,0094$$

Incerteza do tipo B do interrogador: $u_r = \frac{\partial x}{\sqrt{12}}$ ou $u_r = \frac{L_r}{2\sqrt{3}}$

$$u_r = \frac{0.1\,pm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{3,464} = 0,028$$

Incerteza do tipo B do calibrador: $u_r = \frac{1^{\circ}C}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{3,464} = 0,288$

Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Re}gr} = 0,0062\sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,006$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}\,gr)} + u_{Calibrador} + u_{interrogador}^{2}}$$
$$u_{C} = \sqrt{(0,0094)^{2} + (0,006)^{2} + (0,288) + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,083852} = 0,289$$

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = k u_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2 \cdot 0,0094 = 0,019$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{0.1}{0.5} = 0.02$$

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,0094}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,025}{2,449} = 0,01$$

FBG da Fibra SM450:

Incerteza do tipo A:
$$u(x) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}, \quad u(x)_{SSMF} = \frac{0,0213}{\sqrt{6}} = \frac{0,0213}{2,449} = 0,0086$$

Incerteza do tipo B do interrogador: $u_r = \frac{\partial x}{\sqrt{12}}$ ou $u_r = \frac{L_r}{2\sqrt{3}}$

$$u_r = \frac{0.1pm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{3,464} = 0,028$$

Incerteza do tipo B do calibrador: $u_r = \frac{1^{\circ}C}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{3,464} = 0,288$

Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Re}gr} = 0,0059\sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,006$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{c} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}\,gr)} + u_{Calibrador} + u_{\text{int}errogador}^{2}}$$
$$u_{c} = \sqrt{(0,0086)^{2} + (0,006)^{2} + (0,288) + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,08383796} = 0,289$$
A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{\exp} = ku_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2 \cdot 0,0086 = 0,017$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{0.1}{0.55} = 0.0182$$

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,0086}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,023}{2,449} = 0,0093$$

FBG da Fibra SM600:

Incerteza do tipo A:
$$u(x) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}$$
, $u(x)_{SSMF} = \frac{0,01005}{\sqrt{6}} = \frac{0,01005}{2,449} = 0,004$

Incerteza do tipo B do interrogador: $u_r = \frac{\partial x}{\sqrt{12}}$ ou $u_r = \frac{L_r}{2\sqrt{3}}$

$$u_r = \frac{0.1\,pm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{3,464} = 0,028$$

Incerteza do tipo B do calibrador: $u_r = \frac{1^{\circ}C}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{3,464} = 0,288$

Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Re}gr} = 0,0051\sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,005$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}gr)} + u_{Calibrador} + u_{interrogador}^{2}}$$
$$u_{C} = \sqrt{(0,004)^{2} + (0,005)^{2} + (0,288) + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,083769} = 0,289$$

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = k u_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2 \cdot 0,004 = 0,008$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{0.1}{0.53} = 0.018$$

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,004}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,011}{2,449} = 0,0043$$

FBG da Fibra SM633:

Incerteza do tipo A: $u(\bar{x}) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}$,

$$u(\bar{x})_{SSMF} = \frac{0.04188}{\sqrt{6}} = \frac{0.04188}{2.449} = 0.0171$$

Incerteza do tipo B do interrogador: $u_r = \frac{\partial x}{\sqrt{12}}$ ou $u_r = \frac{L_r}{2\sqrt{3}}$

$$u_r = \frac{0.1\,pm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{3,464} = 0,028$$

Incerteza do tipo B do calibrador: $u_r = \frac{1^{\circ}C}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{3,464} = 0,288$

Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Re}gr} = 0,01358\sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,0141$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}\,gr)} + u_{Calibrador} + u_{interrogador}^{2}}$$
$$u_{C} = \sqrt{(0,0171)^{2} + (0,0141)^{2} + (0,288) + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,11143522} = 0,334$$

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = k u_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2 \cdot 0,0171 = 0,0342$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{0.1}{0.51} = 0.019$$

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,0171}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,0452}{2,449} = 0,018$$

FBG da Fibra GIF50C:

Incerteza do tipo A: $u(\bar{x}) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}$,

$$u(\bar{x})_{SSMF} = \frac{0,00692}{\sqrt{6}} = \frac{0,00692}{2,449} = 0,0028$$

Incerteza do tipo B do interrogador: $u_r = \frac{\partial x}{\sqrt{12}}$ ou $u_r = \frac{L_r}{2\sqrt{3}}$

$$u_r = \frac{0.1pm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{3,464} = 0,028$$

Incerteza do tipo B do calibrador: $u_r = \frac{1^{\circ}C}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{3,464} = 0,288$

Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Re}gr} = 0,101144 \sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,1049$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}\,gr)} + u_{Calibrador} + u_{interrogador}^{2}}$$
$$u_{C} = \sqrt{(0,0028)^{2} + (0,1049)^{2} + (0,288) + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,09473985} = 0,308$$

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = k u_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2 \cdot 0,0028 = 0,0056$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{0.1}{5.05} = 0.019$$

A repetitividade foi obtida da seguinte forma: $Re_I = \frac{Re_I}{\sqrt{n}} \Rightarrow Re_I = \frac{t.u}{\sqrt{n}}$,

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,0028}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,0074}{2,449} = 0,0030$$

APÊNDICE C - DETERMINAÇÃO DE INCERTEZAS NA CARACTERIZAÇÃO À DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL DAS REDES DE BRAGG

nbras oticas pertencentes a banda do innavermento.								
Deformação (με)	Média dos Comp. De Onda (nm)	Desvio padrão (λ)	Desvio padrão da média	Média dos Comp. De Onda (nm)	Desvio padrão (λ)	Desvio padrão da média		
		Fibra SSMF	-		Fibra ESMF			
0	671,96687	0,01887	0,0077	671,78927	0,00315	0,00128		
118,3432	672,02797	0,01722	0,00703	671,88395	0,00868	0,00354		
236,68639	672,07423	0,00516	0,00211	671,94462	0,00366	0,00149		
355,02959	672,1167	0,01282	0,00523	671,98288	0,00545	0,00223		
473,37278	672,1867	0,0255	0,01041	672,03068	0,01086	0,00443		
591,71598	672,2648	0,00727	0,00297	672,0965	0,01606	0,00656		
710,05917	672,3103	0,00957	0,00391	672,17895	0,01085	0,00443		
828,40237	672,3543	0,01269	0,00518	672,2363	0,00624	0,00255		
946,74556	672,4173	0,02275	0,00929	672,279	0,00604	0,00247		
1065,08876	672,4978	0,00863	0,00352	672,32722	0,01251	0,00511		
1183,43195	672,5499	0,00684	0,00279	672,4008	0,00838	0,00342		
		Fibra GF1			Fibra GIF50C			
0	672,63073	0,02303	0,0094	676,4892	0,00173	0,00071		
118,3432	672,68013	0,01708	0,00697	676,53288	0,01985	0,0081		
236,68639	672,73813	0,01296	0,00529	676,5891	0,02909	0,01188		
355,02959	672,79812	0,01186	0,00484	676,68607	0,01462	0,00597		
473,37278	672,86442	0,00911	0,00372	676,79187	0,02005	0,00819		
591,71598	672,91865	0,01173	0,00479	676,8685	0,02078	0,00848		
710,05917	672,98157	0,00836	0,00341	676,94818	0,01378	0,00563		
828,40237	673,048	0,00821	0,00335	677,01403	0,00612	0,0025		
946,74556	673,11158	0,0115	0,0047	677,05747	0,00933	0,00381		
1065,08876	673,17563	0,00442	0,0018	677,11012	0,01051	0,00429		
1183,43195	673,2443	0,00494	0,00202	677,14345	0,01886	0,0077		

Tabela XI: Valores do comprimento de onda médio desvio padrão das FBGs gravadas nas fibras óticas pertencentes à banda do Infravermelho.

Fonte: Autoria própria

Temperatura (⁰C)	Média dos Comp. De Onda (nm)	Desvio padrão (λ)	Desvio padrão da média	Média dos Comp. De Onda (nm)	Desvio padrão (λ)	Desvio padrão da média
	ŀ	Fibra SM45	0		Fibra SM600	
0	670,60787	0,02133	0,00871	671,29032	0,00557	0,00228
118,3432	670,66743	0,01386	0,00566	671,35783	0,004	0,00163
236,68639	670,74508	0,01411	0,00576	671,40272	0,00526	0,00215
355,02959	670,80507	0,01412	0,00577	671,45523	0,00553	0,00226
473,37278	670,85157	0,004	0,00163	671,53155	0,00735	0,003
591,71598	670,90937	0,01478	0,00603	671,5987	0,00213	0,00087
710,05917	670,98	0,01561	0,00637	671,64323	0,00589	0,0024
828,40237	671,05085	0,00711	0,0029	671,7126	0,01005	0,0041
946,74556	671,10955	0,01385	0,00566	671,79438	0,00816	0,00333
1065,08876	671,16765	0,01615	0,00659	671,8482	0,00429	0,00175
1183,43195	671,25363	0,01235	0,00504	671,8863	0,00271	0,00111
	F	Fibra SM63	3			
0	670,76608	0,03713	0,01516			
118,3432	670,8605	0,03755	0,01533			
236,68639	670,91258	0,00835	0,00341			
355,02959	670,94822	0,0306	0,01249			
473,37278	671,03867	0,0367	0,01498			
591,71598	671,10182	0,04188	0,0171			
710,05917	671,1503	0,01104	0,00451			
828,40237	671,1949	0,03269	0,01335			
946,74556	671,2513	0,03157	0,01289			
1065,08876	671,33168	0,03898	0,01591			
1183,43195	671,3934	0,00627	0,00256			

Tabela XII: Valores do comprimento de onda médio desvio padrão das FBGs gravadas nas fibras óticas pertencentes à banda do Visível.

Fonte: Autoria própria

FBG da Fibra SSMF:

Incerteza do tipo A:
$$u(x) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}$$
, $u(x)_{SSMF} = \frac{0,1789}{\sqrt{6}} = 0,073$

$$u_r = \frac{0.1\,pm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{3,464} = 0,028$$

Incerteza do tipo B do calibrador: $u_r = \frac{0.01mm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.01}{3.464} = 0.0029$

Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Re}gr} = 0,0115\sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,044$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}\,gr)} + u_{Calibrador} + u_{interrogador}^{2}}$$
$$u_{C} = \sqrt{(0,073)^{2} + (0,044)^{2} + (0,0029) + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,00805741} = 0,089$$

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = k u_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2 \cdot 0,073 = 0,0146$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{0.1\,pm}{0.5} = 0.2$$

A repetitividade foi obtida da seguinte forma: $\operatorname{Re}_{I} = \frac{\operatorname{Re}_{I}}{\sqrt{n}} \Longrightarrow \operatorname{Re}_{I} = \frac{t.u}{\sqrt{n}}$,

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,073}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,1933}{2,449} = 0,078$$

FBG da Fibra ESMF:

Incerteza do tipo A: $u(\bar{x}) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}, \ u(\bar{x})_{SSMF} = \frac{0.0249}{\sqrt{6}} = 0.010$

$$u_r = \frac{0.1pm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{3,464} = 0,028$$

Incerteza do tipo B do calibrador: $u_r = \frac{0.01mm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.01}{3.464} = 0.0029$

Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Regr}} = 0,01429 \sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,0149$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}gr)} + u_{Calibrador} + u_{interrogador}^{2}}$$
$$u_{C} = \sqrt{(0,010)^{2} + (0,015)^{2} + (0,0029) + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,00111741} = 0,033$$

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = k u_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2 \cdot 0,010 = 0,02$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{0.1}{0.51} = 0.196$$

A repetitividade foi obtida da seguinte forma: $\operatorname{Re}_{I} = \frac{\operatorname{Re}_{I}}{\sqrt{n}} \Rightarrow \operatorname{Re}_{I} = \frac{t.u}{\sqrt{n}}$,

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,010}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,02649}{2,449} = 0,011$$

FBG da Fibra GF1:

Incerteza do tipo A: $u(x) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}$,

$$u(\bar{x})_{SSMF} = \frac{0.01867}{\sqrt{6}} = \frac{0.01867}{2.449} = 0.0075$$

$$u_r = \frac{0.1\,pm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{3,464} = 0,028$$

Incerteza do tipo B do calibrador: $u_r = \frac{0.01mm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.01}{3.464} = 0.0029$

Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Re}gr} = 0,00577\sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,0060$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}gr)} + u_{Calibrador} + u_{interrogador}^{2}}$$
$$u_{C} = \sqrt{(0,0075)^{2} + (0,006)^{2} + (0,0029) + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,00088466} = 0,029$$

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = ku_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2 \cdot 0,0075 = 0,015$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{0.1}{0.5} = 0.2$$

A repetitividade foi obtida da seguinte forma: $\operatorname{Re}_{I} = \frac{\operatorname{Re}_{I}}{\sqrt{n}} \Rightarrow \operatorname{Re}_{I} = \frac{t.u}{\sqrt{n}}$,

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,0075}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,01986}{2,449} = 0,0081$$

FBG da Fibra SM450:

Incerteza do tipo A:
$$u(x) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}$$
,

$$u(\bar{x})_{SSMF} = \frac{0,01759}{\sqrt{6}} = \frac{0,01759}{2,449} = 0,0072$$

Incerteza do tipo B do interrogador: $u_r = \frac{\partial x}{\sqrt{12}}$ ou $u_r = \frac{L_r}{2\sqrt{3}}$

$$u_r = \frac{0.1\,pm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{3,464} = 0,028$$

Incerteza do tipo B do calibrador: $u_r = \frac{0.01mm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.01}{3.464} = 0.0029$

Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Regr}} = 0,0094 \sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,0098$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}gr)} + u_{Calibrador} + u_{interrogador}^{2}}$$
$$u_{C} = \sqrt{(0,0072)^{2} + (0,0098)^{2} + (0,0029) + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,00088466} = 0,0094$$

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = k u_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2 \cdot 0,0072 = 0,0144$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{0.1}{0.50} = 0.182$$

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,0072}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,0191}{2,449} = 0,0078$$

FBG da Fibra SM600:

Incerteza do tipo A: $u(\bar{x}) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}$,

$$u(\bar{x})_{SSMF} = \frac{0,01615}{\sqrt{6}} = \frac{0,01615}{2,449} = 0,0066$$

Incerteza do tipo B do interrogador: $u_r = \frac{\partial x}{\sqrt{12}}$ ou $u_r = \frac{L_r}{2\sqrt{3}}$

$$u_r = \frac{0.1\,pm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{3,464} = 0,028$$

Incerteza do tipo B do calibrador: $u_r = \frac{0.01mm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.01}{3.464} = 0.0029$

Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Regr}} = 0,01118\sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,0116$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}gr)} + u_{Calibrador} + u_{interrogador}^{2}}$$
$$u_{C} = \sqrt{(0,0066)^{2} + (0,0116)^{2} + (0,0029) + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,00097053} = 0,03115$$

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = ku_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2 \cdot 0,0066 = 0,0132$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{0,1}{0,53} = 0,189$$

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,0066}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,0174}{2,449} = 0,0071$$

FBG da Fibra SM633:

Incerteza do tipo A:
$$u(x) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}$$

$$u(\bar{x})_{SSMF} = \frac{0,03374}{\sqrt{6}} = \frac{0,03374}{2,449} = 0,0138$$

Incerteza do tipo B do interrogador:
$$u_r = \frac{\partial x}{\sqrt{12}}$$
 ou $u_r = \frac{L_r}{2\sqrt{3}}$

$$u_r = \frac{0.1\,pm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.1}{3,464} = 0,028$$

Incerteza do tipo B do calibrador: $u_r = \frac{0.01mm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.01}{3.464} = 0.0029$

Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Re}gr} = 0,01383 \sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,0144$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}gr)} + u_{Calibrador} + u_{interrogador}^{2}}$$
$$u_{C} = \sqrt{(0,0138)^{2} + (0,0144)^{2} + (0,0029) + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,00119021} = 0,0345$$

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = ku_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2 \cdot 0,0138 = 0,0276$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{0,1}{0,51} = 0,196$$

A repetitividade foi obtida da seguinte forma: $\operatorname{R}e_I = \frac{\operatorname{R}e_I}{\sqrt{n}} \Rightarrow \operatorname{R}e_I = \frac{t.u}{\sqrt{n}}$,

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,0138}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,037}{2,449} = 0,015$$

FBG da Fibra GIF50C:

Incerteza do tipo A: $u(\bar{x}) = \frac{\sigma(x_k)}{\sqrt{N}}$,

$$u(\bar{x})_{SSMF} = \frac{0,00692}{\sqrt{6}} = \frac{0,00692}{2,449} = 0,0028$$

Incerteza do tipo B do calibrador: $u_r = \frac{0.01mm}{2\sqrt{3}} = \frac{0.01}{3.464} = 0.0029$

Incerteza de regressão linear é dada por:

$$U_{\text{Re}gr} = 0,06238 \sqrt{1 + \frac{1}{13}} = 0,0652$$

A Incerteza Combinada foi determinada a partir de expressão:

$$u_{C} = \sqrt{u_{m}^{2} + u_{(\text{Re}\,gr)} + u_{Calibrador} + u_{interrogador}^{2}}$$
$$u_{C} = \sqrt{(0,0028)^{2} + (0,0652)^{2} + (0,0029) + (0,028)^{2}} = \sqrt{0,00505129} = 0,071$$

A incerteza expandida é determinada pela equação $u_{exp} = ku_{(\overline{X})}(y)$

$$u_{\rm exp} = 2 \cdot 0,0028 = 0,0056$$

A resolução do sensor FBG foi determinada por: $R_{sensor} = \frac{R_{interrogador}}{Sensibilidade} = \frac{R}{S}$

$$R_{sensor} = \frac{R_{int\,errogador}}{Sensibilid\,ade} = \frac{0.1}{0.59} = 0.169$$

$$\operatorname{Re}_{I} = \frac{2,649 \cdot 0,0028}{\sqrt{6}} \Longrightarrow \operatorname{Re} = \frac{0,0074}{2,449} = 0,0030$$