**GLEISON ELIAS DA SILVA** 

### IMPLEMENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE TRANSDUTORES DE DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA A FIBRAS ÓPTICAS BASEADOS EM REDES DE BRAGG

São Paulo 2011 **GLEISON ELIAS DA SILVA** 

### IMPLEMENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE TRANSDUTORES DE DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA A FIBRAS ÓPTICAS BASEADOS EM REDES DE BRAGG

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

São Paulo 2011

#### **GLEISON ELIAS DA SILVA**

### IMPLEMENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE TRANSDUTORES DE DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA A FIBRAS ÓPTICAS BASEADOS EM REDES DE BRAGG

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Josemir Coelho Santos.

São Paulo 2011

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.
São Paulo, 11 de novembro de 2011.
Assinatura do autor
Assinatura do orientador

### FICHA CATALOGRÁFICA



## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, ao meu filho Matheus e aos meus sobrinhos Ana Paula e Gustavo.

"A ambição da ciência não é abrir a porta do saber infinito, mas pôr um limite ao erro infinito"

Bertolt Brecht

#### AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Josemir Coelho Santos pelo seu apoio, orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho. O seu conhecimento e qualidade científica que me transmitiu, proporcionaram uma visão fundamental para o entendimento e para a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos da Universidade de São Paulo (USP) que me ajudaram em vários momentos no decorrer deste trabalho e que foram por diversas vezes o ancoradouro nesta jornada: Luiz Pinheiro Cordovil da Silva pela sua criatividade e estórias, Domingos Bernardes pelos constantes estímulos, Sandra Sayuri pela sua paciência, Ana Carolina Marques pelo seu entendimento, Marcelo Palin pelos seus incentivos e ao Marcelo Vantini por sua amizade e apoio.

Ao professor Miguel Bussolini pelo estímulo e pelas conversas edificantes durante o período de realização deste trabalho.

Aos integrantes do laboratório de elétrica do departamento de energia e automação elétricas (PEA) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), Marco Aurélio Coelho de Oliveira, Edson da Conceição Santana e em especial ao Adelino Alves Damaceno, pelo auxílio valioso em um momento crítico da construção dos aparatos mecânicos e elétricos utilizados neste trabalho.

À Eniria Maria Garavelo, a Nega, pela amizade, carinho e pelos chás e cafés maravilhosos.

Aos amigos Ricardo Takashi Tanaka, Luiz Antonio Barbosa Coelho, Lauro Muramoto e Jaime Ono que pelo apoio e entendimento foram fundamentais para a realização desta pesquisa. Ao amigo Willians Vieira de Almeida pela força e auxílio e aos amigos da empresa Lynx que de uma forma ou de outra me ajudaram e me incentivaram.

Ao Cel. Av. Vilson Rosa de Almeida, Ph.D., chefe do laboratório da Subdivisão de Sensores (EFO-S) da divisão de fotônica do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA) pelo apoio científico e colaboração e ao Cap. Rogério Moreira Cazo, M.Sc., também do IEAv pelas discussões construtivas e apoio durante a realização dos trabalhos experimentais. Aos professores Túlio Nogueira Bittencourt do Laboratório de Mecânica Computacional (LMC) e Carlos Eduardo Viana do Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI), ambos da EPUSP, pelo apoio e disponibilização de infra-estrutura e de equipamentos para a realização de alguns ensaios.

Ao Rodrigo Guevara Tomazi da empresa Lupatech Monitoring Systems pelo apoio e empréstimo de equipamento e sensores da Fiber Sensing utilizado em alguns ensaios.

Aos meus amigos Djalma César Rocha e Diego dos Santos pela amizade e apoio em momentos difíceis desta jornada.

Aos meus pais Noel Elias da Silva e Ana Orse da Silva pela paciência, incentivo, pelos ensinamentos e exemplos de força, raça, determinação e humildade.

Ao meu filho Matheus e minha sobrinha Ana Paula pela paciência e entendimento dos momentos difíceis e muitas vezes de sacrifício que passamos neste período.

À Sonia Regina, minha irmã, e ao Celso Antônio, meu cunhado, os meus sinceros agradecimentos, pelos incentivos e apoio.

À minha esposa Kátia Pavani da Silva Gomes pela notável paciência, incondicional e ilimitado apoio, incentivo e enorme carinho que sempre me ofereceu, mesmo nos momentos mais difíceis.

A todos que colaboraram direta e indiretamente, na execução deste trabalho, registro os meus agradecimentos.

Ao CNPq por ter me concedido um apoio financeiro.

A DEUS por guiar meus caminhos e me dar força e sustentação.

"Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar... As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito."

Chico Xavier

# "Se vi mais longe foi por estar de pé sobre ombros de gigantes."

Carta de Sir Issac Newton à Robert Hooke (15 de fevereiro de 1676).

# "O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano."

Sir Issac Newton em 1687, explicando a sua Terceira Lei de Newton - Ação e Reação.

#### RESUMO

Essa dissertação de mestrado é dedicada ao estudo, desenvolvimento e caracterização da resposta dinâmica de transdutores de deformação mecânica e de temperatura baseados em grades de Bragg inscritas em fibras ópticas (FBG). Como não se encontram referências diretas na literatura da área sobre a caracterização da resposta dinâmica de sensores de temperatura e deformação a FBG, percebeu-se a importância de realizar um trabalho com ênfase nesse aspecto.

O desenvolvimento de transdutores FBG de deformação e de temperatura com resposta dinâmica rápida é de grande importância, já que as grades de Bragg são afetadas, de maneira intrínseca, simultaneamente pelas duas grandezas e que existe um amplo leque de aplicações em que uma delas, ou ambas, variam rapidamente. Nesses casos, diferenças em termos de tempos de resposta entre os sensores utilizados para medição de deformação e os usados para compensação de temperatura podem acarretar em erros significativos nas medidas, o que pode até inviabilizar o uso dos sensores a grades de Bragg em tais aplicações.

Este trabalho apresenta um compêndio da teoria da tecnologia das FBG para aplicação em sensores ópticos de deformação e de temperatura. Buscando contribuir para o domínio das técnicas de fabricação de sensores a FBG no Brasil, também são apresentados os resultados experimentais da utilização de grades de Bragg inscritas em fibras ópticas fabricadas no laboratório da Subdivisão de Sensores (EFO-S), da Divisão de Fotônica do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA), como elementos sensores em ensaios de deformação e de temperatura.

Os resultados de caracterizações, tanto de FBG produzidas no IEAv quanto de sensores de deformação e de temperatura comerciais das empresas Micron Optics e Fiber Sensing, foram obtidos por meio de três interrogadores diferentes e são comparados e apresentados neste trabalho. Em uma análise realizada dos resultados apresentados de sensores a FBG, utilizados para medição de temperatura e de deformação mecânica em alguns arranjos experimentais, foram observados comportamentos dinâmicos não lineares que apresentam-se como um

obstáculos a serem vencidos para a viabilização da aplicação desta técnica à medição desses parâmetros quando os mesmos são rapidamente variáveis.

**Palavras-chave:** Grades de Bragg em Fibras Ópticas (*Fiber Bragg Gratings - FBG*), sensor de deformação, sensor de temperatura, medida simultânea de deformação e temperatura e estruturas inteligentes (*smart structures*).

#### ABSTRACT

This dissertation is devoted to the study, development and characterization of the dynamic response of mechanical strain and temperature transducers based on Bragg gratings inscribed in optical fibers (FBG). Since there are no direct references in the literature on the characterization of the dynamic response of FBG based temperature and strain sensors, it was realized the importance of conducting a study with emphasis on this aspect.

The development of FBG strain and temperature transducers with fast dynamic response is of great importance, since the Bragg gratings are intrinsically and simultaneously affected by the two quantities and there is a wide range of applications in which one or both quantities vary rapidly. In such cases, differences in response times between the sensors used for measurement of strain and used for temperature compensation can result in significant errors, which may even preclude the use of FBG sensors in such applications.

This work presents a compendium of the theory related to FBG technology for application in optical strain and temperature sensors. Seeking to master the techniques of manufacture of the FBG sensors in Brazil, experimental results from the use of FBG manufactured in the laboratory of Sensors Subdivision (EFO-S), of Photonics Division of Institute of Advanced Studies (IEAv) of General Command for Aerospace Technology (CTA) as sensor elements in strain and temperature trials are also presented.

The results of both characterizations, of FBG produced in IEAv and strain and temperature commercial sensors, produced by Micron Optics and Fiber Sensing manufacturers, were obtained from three different interrogators and are compared and presented in this paper. In an analysis of the results of FBG sensors used for measuring temperature and mechanical deformation in some experimental arrangements, nonlinear dynamic behaviors were observed. Such behaviors present themselves as an obstacle to be overcome to achieve the feasibility of applying this technique to measurement of these parameters when they are rapidly changing.

**Keywords:** Fiber Bragg Gratings (FBG), strain sensor, temperature sensor, simultaneous measurement of strain and temperature and smart structures.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1.1. – Reflexão de parte do espectro óptico por uma grade de Bragg
inscrita em fibra óptica40
Figura 2.3.1. – Eixos de coordenadas em um guia de onda cilíndrico57
Figura 2.3.2. – Desenho ilustrativo de uma grade de Bragg uniforme inscrita em
fibra óptica63
Figura 2.3.3. – Desenho ilustrativo de exemplos de perfis de índice de refração
de grades de Bragg inscritas em fibra óptica. a) perfil uniforme, b)
perfil apodizado gaussiano c) perfil apodizado gorjeio ou <i>chirped</i> e d)
perfil apodizado gaussiano com média zero ou nível dc zero64
Figura 2.4.1. – Desenho representativo de uma FBG como um quadripolo77
Figura 2.4.2. – Desenho ilustrativo do espectro de reflexão de grades de Bragg
em fibra óptica com diferentes variações do índice de refração
induzido82
Figura 2.4.3. – Desenho ilustrativo do espectro de reflexão de grades de Bragg
em fibra óptica com diferentes comprimentos de grade
Figura 2.5.1. – Desenho ilustrativo da resposta de uma FBG atuando como
sensor de deformação88
sensor de deformação
<ul> <li>sensor de deformação</li></ul>

com 4 canais da MOI117
Figura 3.2.3. – Foto ilustrativa do interrogador óptico industrial modelo FS2200
com 4 canais118
Figura 3.2.4. – Foto ilustrativa do sistema de aquisição de dados modelo USB-
6251 da National Instruments120
Figura 3.2.5. – Foto ilustrativa do sistema de aquisição de dados modelo
ADS2002IP-B-3 da Lynx122
Figura 3.3.1. – Foto ilustrativa do reforço do revestimento da asa da aeronave
AT-26 Xavante da Embraer denominado W6127
Figura 3.3.2. – Foto ilustrativa da câmara térmica modelo TBO-1 da Tenney. 128
Figura 3.3.3. – Foto ilustrativa da câmara climática modelo CC-200H da
SuperOhm130
Figura 3.3.4. – Foto da chapa metálica com as FBG-5, FBG-6 e FBG-17 coladas
na superfície133
Figura 3.3.5. – Foto da chapa metálica com os EER colados na superfície
posterior da chapa133
Figura 3.3.6. – Desenho ilustrativo da ligação de ¼ de ponte de Wheatstone em
ligação a três fios134
Figura 3.3.7. – Desenho ilustrativo dos extensômetros longitudinal e
transversal colados na chapa135
Figura 3.3.8. – Desenho ilustrativo da ligação de ½ ponte de Wheatstone em
ligação a três fios136
Figura 3.3.9. – Desenho ilustrativo do dispositivo mecânico projetado e
construído no LSO137
Figura 3.3.10. – Desenho ilustrativo da chapa engastada e as referências das
medidas mecânicas138
Figura 3.3.11. – Foto do dispositivo mecânico posicionador com parafuso
micrométrico e da chapa metálica engastada
Figura 3.3.12. – Foto do dispositivo mecânico posicionador com disco
excêntrico140
Figura 3.3.13. – Foto do dispositivo mecânico com o movimentador vertical.141
Figura 3.3.14. – Foto do mecanismo de movimentação vertical em detalhe142
Figura 3.3.15. – Foto ilustrativa da câmara térmica modelo Q-317M33 da
Quimis

Figura 3.3.16. – Foto do arranjo experimental utilizado nos ensaios térmicos
realizados no LSI145
Figura 3.3.17. – Foto da montagem para ensaio térmico das FBG coladas na
chapa de Alclad146
Figura 3.3.18. – Desenho ilustrativo dos esquemas de montagem da chapa de
Alclad dentro da câmara térmica nas posições referenciadas à porta:
a) 0°, b) 45°, c) 90° e d) 180°148
Figura 3.3.19. – Foto da montagem para ensaio térmico da FBG tripla colocada
no tubo de papelão horizontalmente posicionado na câmara149
Figura 3.3.20. – Foto da montagem para ensaio térmico dos sensores FBG
comerciais colocados dentro da caixa de papelão
Figura 4.1.1. – Desenho ilustrativo do sensor de deformação com a grade de
compensação de temperatura com baixa sensibilidade a deformação
mecânica165
Figura 4.2.2. – Tela do programa MU com a curva espectral da grade FBG-11
com sinal saturado171
Figura 4.3.1. – Telas da função OSA do programa MU referente aos espectros
de resposta das grades após colagem na chapa metálica: a) FBG-5, b)
FBG-6 e c) FBG-17181

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1.1. – Gráficos da diferença entre os comprimentos de onda das
grades (FBG-1 – FBG-2), da saída do amplificador de transimpedância
(FBG-22 e FBG-31) e da temperatura (Temp. PTC)154
Gráfico 4.1.2. – Curvas dos comprimentos de onda das grades FBG-1 e FBG-2
normalizados e da diferença entre eles (FBG-1 – FBG-2) em
picometros do ensaio térmico na peça W6
Gráfico 4.1.3. – Curvas do comprimento de onda da grade FBG-1 e da
degradação do sinal da grade FBG-2157
Gráfico 4.1.4. – Curvas da diferença entre os comprimentos de onda das
grades (FBG-1 – FBG-2), da saída do amplificador de transimpedância
(FBG-37 e FBG-31) e da temperatura (Temp. PTC)158
Gráfico 4.1.5. – Curvas dos comprimentos de onda das grades FBG-1 e FBG-2
normalizados e da diferença entre eles (FBG-1 – FBG-2) em
picometros do ensaio térmico na peça W6
Gráfico 4.1.6. – Curvas dos comprimentos de onda das grades FBG-1 e FBG-2
normalizados e da diferença entre eles (FBG-1 – FBG-2) em
picometros do ensaio térmico realizado no tubo de papel161
Gráfico 4.1.7. – Gráfico normalizado dos comprimentos de onda das grades de
Bragg FBG-1 e FBG-2 fabricadas no IEAv do ensaio de deformação
mecânica na peça W6163
Gráfico 4.2.1. – Curvas de temperatura dos dois sensores FS6320 e da
diferença entre os valores (FS6300-1S – FS6300-2S) do ensaio térmico
realizado na peça metálica sem pasta térmica
Gráfico 4.2.2. – Curvas de temperatura dos dois sensores FS6320 e da
diferença entre os valores (FS6300-1S – FS6300-2S) do ensaio térmico
realizado na peça metálica com pasta térmica
Gráfico 4.2.3. – Curvas de temperatura dos dois sensores FS6320 e da
diferença entre os valores (FS6300-1S – FS6300-2S) do ensaio térmico
realizado na peça metálica com pasta térmica e canais de entrada
trocados173
Gráfico 4.2.4. – Curvas de temperatura do ensaio térmico realizado com dois

sensores FS6320 com as faces inferiores encostadas uma à outra e as

curvas do TMP-K e da diferença entre os valores das grades (FS6300-Gráfico 4.2.5. – Curvas de temperatura do ensaio térmico realizado com dois sensores FS6320 com as faces inferiores encostadas e a curva da diferença entre os valores (FS6300-1S – FS6300-2S)......176 Gráfico 4.2.6. – Curvas térmicas normalizadas pelo valor máximo dos comprimentos de onda dos sensores FS6300-1S e OS4100-T e a curva Gráfico 4.2.7. – Curvas térmicas normalizadas pelo min-max dos comprimentos de onda dos sensores FS6300-1S e OS4100-T e a curva da diferença Gráfico 4.3.1. – Curvas de comprimento de onda das grades FBG-5, FBG-6 e FBG-17 coladas na chapa de liga Alclad em estado de repouso. .....179 Gráfico 4.3.2. – Curvas de comprimento de onda das grades FBG-5 e FBG-6 coladas na face superior da chapa de liga Alclad em resposta a movimentação flexural......183 Gráfico 4.3.3. – Curvas de comprimento de onda das grades FBG-5 e FBG-6 coladas na face superior da chapa de liga Alclad em resposta a movimentação flexural......184 Gráfico 4.3.4. – Curvas de temperatura do TMP-K e de deformação do EER (tração das FBG) no ensaio de degraus de carga. ......185 Gráfico 4.3.5. – Curvas de comprimento de onda das grades FBG-5 e FBG-6 coladas na face inferior da chapa de liga Alclad em resposta a movimentação flexural......186 Gráfico 4.3.6. – Curvas de temperatura do TMP-K e de deformação do EER (compressão das FBG) no ensaio de degraus de carga......187 Gráfico 4.3.7. – Curvas de comprimento de onda das grades FBG-5 e FBG-6 coladas na face superior da chapa de liga Alclad em resposta a movimentação flexural dinâmica de 20 mHz.....188 Gráfico 4.3.8. – Curvas em detalhe de um ciclo do ensaio mecânico com as Gráfico 4.3.9. – Curvas de comprimento de onda das grades FBG-17 e FBG-6 coladas na face superior da chapa de liga Alclad em resposta a movimentação flexural dinâmica de 16,67 mHz.....190 Gráfico 4.3.10. – Curvas de temperatura do TMP-K e de deformação do EER (compressão das FBG) no ensaio dinâmico......191 Gráfico 4.3.11. – Curvas de deformação mecânica das grades FBG-5 e FBG-17 coladas na face superior da chapa de liga Alclad em resposta a flexão com tempo de transição de 1,5 s. .....192 Gráfico 4.3.12. – Curvas de deformação mecânica das grades FBG-5 e FBG-17 coladas na face inferior da chapa de liga Alclad em resposta a flexão com tempo de transição de 1,5 s. .....194 Gráfico 4.4.1. – Curvas da temperatura das grades FBG-5 e FBG-17 coladas na face superior da chapa de liga Alclad na posição 0° dentro da câmara térmica......197 Gráfico 4.4.2. – Curvas da temperatura dos termopares TMP-K1 e TMP-K2 encostados na superfície da chapa de liga Alclad na posição 0° dentro da câmara térmica......197 Gráfico 4.4.3. – Curvas da temperatura das grades FBG-5 e FBG-17 coladas na face superior da chapa de liga Alclad na posição 45° dentro da câmara Gráfico 4.4.4. – Curvas da temperatura dos termopares TMP-K1 e TMP-K2 encostados na superfície da chapa de liga Alclad na posição 45° dentro da câmara térmica......198 Gráfico 4.4.5. – Curvas da temperatura das grades FBG-5 e FBG-17 coladas na face superior da chapa de liga Alclad na posição 90° dentro da câmara Gráfico 4.4.6. – Curvas da temperatura dos termopares TMP-K1 e TMP-K2 encostados na superfície da chapa de liga Alclad na posição 90° dentro da câmara térmica......199 Gráfico 4.4.7. – Curvas da temperatura das grades FBG-5 e FBG-17 coladas na face superior da chapa de liga Alclad na posição 180° dentro da Gráfico 4.4.8. – Curvas da temperatura dos termopares TMP-K1 e TMP-K2 encostados na superfície da chapa de liga Alclad na posição 45° dentro da câmara térmica......200 Gráfico 4.4.9. – Curvas da temperatura do termopar TMP-K1 e da deformação

devido à dilatação térmica na chapa de liga Alclad medida por meio de

um único EER ligado em ¼ de ponte a 3 fios. ......202

- Gráfico 4.4.11. Curvas do comportamento térmico da grade tripla FBG-T3 dentro do tubo de papelão posicionado verticalmente na câmara e da variação das diferenças de temperatura entre as grades.......207
- Gráfico 4.4.12. Curvas da temperatura dos termopares TMP-K1 e TMP-K2 colocados dentro do tubo de papelão juntamente com a FBG-T3.....208
- Gráfico 4.4.13. Curvas do comportamento térmico da grade tripla FBG-T3 dentro do tubo de papelão posicionado horizontalmente na câmara térmica......209
- Gráfico 4.4.14. Curvas da variação da diferença entre os comprimentos de onda e as temperaturas das grades da FBG-T3: a) (1562,52 –1531,25),

b) (1581,19 – 1562,52) e c) (1581,19 – 1531,25)......210

- Gráfico 4.4.16. Curvas do comportamento térmico do sensor compensado FS6200-1EC em comparação à FBG-6 colada na chapa de Alclad. ...213
- Gráfico 4.4.18. Curvas de comprimento de onda dos sensores de poliamida FS6200-1P e FS6200-2P ligados em série em um canal do interrogador óptico FS2200......215
- Gráfico 4.4.19. Curvas de comprimento de onda dos sensores soldáveis FS6300-3S e FS6300-4S ligados em série em um canal do interrogador óptico FS2200......216

### LISTA DE TABELAS

Tabela 2.4.1. – Características da fibra óptica utilizada na simulação e das FBG
com diferentes valores de variação do índice de refração induzido no
núcleo82
Tabela 2.4.2. – Características da fibra óptica utilizada na simulação e das FBG
com diferentes comprimentos de grade83
Tabela 3.1.1. – Características da fonte de luz laser utilizada no laboratório
EFO-S do IEAv94
Tabela 3.1.2. – Características do analisador OSA modelo Q8347 utilizado no
laboratório da EFO-S do IEAv101
Tabela 3.1.3. – Características das grades de Bragg em fibra óptica
hidrogenada fabricadas pelo laboratório da EFO-S do IEAv104
Tabela 3.1.4. – Características dos sensores FBG de deformação modelo
OS3100 e de temperatura modelo OS4100108
Tabela 3.1.5. – Dados de calibração dos sensores de temperatura FBG de
deformação modelo OS3100 e de temperatura modelo OS4100108
Tabela 3.1.6. – Características dos sensores FBG de deformação modelo
FS6200109
Tabela 3.1.7. – Dados de calibração dos sensores FBG de deformação com
encapsulamento de poliamida modelo FS6210
Tabela 3.1.8. – Dados de calibração dos sensores FBG de deformação com
encapsulamento de compósito modelo FS6230110
Tabela 3.1.9. – Dados de calibração dos sensores FBG de deformação com
encapsulamento para embutir e compensado modelo FS6250111
Tabela 3.1.10. – Características dos sensores FBG de temperatura modelo
FS6300112
Tabela 3.1.11. – Dados de calibração do conjunto 1 de sensores FBG de
temperatura do tipo soldável modelo FS6320
Tabela 3.1.12. – Dados da calibração do conjunto 2 de sensores FBG de
temperatura do tipo soldável modelo FS6320
Tabela 3.2.1. – Configuração dos canais do sistema de aquisição de dados NI
USB-6251 da National Instruments116
Tabela 3.2.2. – Características do interrogador de espectros ópticos modelo

sm130117
Tabela 3.2.4. – Características do sistema de aquisição de dados modelo USB-
6251120
Tabela 3.2.5. – Características do sistema de aquisição de dados modelo
ADS2002IP-B-3122
Tabela 3.2.6. – Características dos módulos condicionadores de sinais
modelos Al2161VB e Al2164VA da Lynx123
Tabela 4.1.1. – Configuração do interrogador sm130 – MOI utilizado no ensaio
térmico na peça W6 (arquivo: Aquisicao1-17-03-2009)153
Tabela 4.1.2. – Configuração do interrogador sm130 – MOI utilizado no ensaio
térmico das FBG no tubo papel (arquivo: Aquisicao2-FBG-Tubo-papel
de 24-03-2009)
Tabela 4.1.3. – Dados experimentais do ensaio mecânico na peça W6 utilizando
o sistema interrogador do IEAv165
Tabela 4.2.1. – Configuração do interrogador sm130 – MOI utilizado no ensaio
térmico dos sensores FS6300 na barra metálica (arquivo: Ensaio-1 de
05-05-2009)
Tabela 4.2.2. – Configuração do interrogador sm130 – MOI utilizado no ensaio
térmico dos sensores FS6300 na barra metálica (arquivo: Ensaio-3 de
Tabela 4 3 1 - Dados estatísticos das FBG-5 FBG-6 e FBG-17 coladas na
rabela 4.5.1. – Dauos estatísticos das 1 DG-5, 1 DG-6 e 1 DG-17 coladas ha
Tabola 4.2.2. Valores de comprimente de onde o de deformação dos grados
Tabela 4.3.2. – Valores de comprimento de onda e de deformação das grades
FBG-5 e FBG-17 nos estados de repouso e de fiexão da chapa (tração
das FBG)
l abela 4.3.3. – Valores de comprimento de onda e de deformação das grades
FBG-5 e FBG-17 nos estados de repouso e de flexão da chapa
(compressão das FBG)195
Tabela 4.4.1. – Valores da variação máxima de comprimento de onda e de
temperatura das grades da FBG-T3211
Tabela 4.4.2. – Valor da sensibilidade das três grades da FBG-T3
Tabela 4.5.1. – Características das grades de Bragg produzidas no IEAv e de
sensores FBG comerciais

### LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1.1. – Comparação de técnicas de gravação de FBG	42
Quadro 2.1.2. – Características e vantagens dos sensores a fibra óptica para	a
aplicação em metrologia	43

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AI	Elemento químico alumínio
$AI_2O_3$	Óxido de alumínio
Alclad	Liga de alumínio, cobre e manganês que possui relativa resistência a fadiga
BBO	Cristal de Beta Borato de Bário (BaB <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )
CAD	Conversor Analógico/Digital
Cap.	Capitão: grau hierárquico das forças armadas
Cel. Av.	Coronel aviador: grau hierárquico das forças armadas
CFRP	Polímero reforçado com fibras de carbono (acrônimo de sua designação em inglês: <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> )
CLAD	Cobertura ou revestimento (contração de sua designação em inglês: ( <i>Cladding</i> )
CRC	Centro de pesquisa canadense: Canadian Communications Research Centre
СТА	Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial
Cu	Elemento químico cobre
CW	Modo contínuo (acrônimo de sua designação em inglês: Continuos Wave)
DC	Corrente contínua
DIP	Encapsulamento em duas fileiras de pinos (acrônimo da sua designação em inglês: <i>Dual In-Line Package</i> )
Dr.	Título acadêmico de doutor em ciências
EDFA	Amplificador óptico a fibra dopada com érbio (acrônimo de sua designação em inglês <i>Erbium-Doped Fibre Amplifier</i> )
EER	Extensômetro elétrico de resistência
EFO-S	Subdvisão de sensores a fibra óptica da divisão de fôtonica do IEAv
ELED	Diodo LED de emissão lateral (acrônimo de sua designação em inglês <i>Edge Light-Emitting Diode</i> )

- EMBRAER Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A
- EMI Interferências eletromagnéticas (acrônimo de sua designação em inglês: ElectroMagnetic Interference)
- EPS Poliestireno, material derivado do petróleo mais conhecido, na sua forma expandida, pelos nomes comerciais isopor e estiropor (acrônimo de sua designação em inglês: *Expanded Polystyrene*)
- EPUSP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- FAB Força Aérea Brasileira
- FBG Grades de Bragg em fibras ópticas (acrônimo de sua designação em inglês: *Fiber Bragg Gratings*)
- FFP-TF Filtro óptico sintonizável de Fabry-Perot em fibra (acrônimo de sua designação em inglês: *Fiber Fabry-Perot Tunable Filter*)
- FWHM Largura total à meia altura (acrônimo de sua designação em inglês: *Full-Width at Half Maximum*)
- FWFZ Largura entre os primeiros zeros laterais (acrônimo de sua designação em inglês: *Full-Width at First Zeros*):
- FS Empresa Fiber Sensing
- GeO Óxido de germânio
- IEAv Instituto de Estudos Avançados do CTA
- ICP<sup>®</sup> Circuito integrado piezoelétrico (acrônimo de sua designação em inglês: Integrated Circuit – Piezoelectric)
- IIR Filtro de resposta ao impulso infinita (acrônimo de sua designação em inglês: Infinite Impulse Response)
- ITA Instituto Tecnológico de Aeronáutica
- LMC Laboratório de Mecânica Computacional do PEF
- LSI Laboratório de Sistemas Integráveis do PSI
- LSI-SMT Laboratório da linha de montagem SMT do LSI
- LSO Laboratório de Sensores Ópticos do PEA
- Mg Elemento químico manganês
- Mn Elemento químico magnésio
- MOI Empresa Micron Optics, Inc

- Ms.C. Título acadêmico de mestre em ciências
- MU Programa utilizado para a programação, controle e operação do interrogador óptico da FS (*Measurement Unit Software*)
- NI Empresa National Instruments
- OSA Analisador de espectro óptico (acrônimo do inglês Optical Spectrum Analyser)
- PEA Departamento de Energia e Automação Elétricas da EPUSP
- PEF Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações da EPUSP
- Ph.D. Título de doutor
- PID Controle em malha fechada com ganhos proporcional, integral e diferencial (acrônimo de sua designação em inglês: *Proportional, Integral, Derivative*)
- PSI Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da EPUSP
- Pt100 Sensor tipo termorresistência de platina que a  $0 \,^{\circ}$ C apresenta uma resistência de  $110 \,\Omega$
- PTC Termistor de coeficiente positivo (acrônimo de sua designação em inglês: *Positive Temperature Coefficient*)
- PTFE Politetrafluoretileno, também conhecido como teflon<sup>®</sup>
- PWM Modulação por largura de pulso (acrônimo de sua designação em inglês: *Pulse-Width Modulation*)
- SFG Geração de frequências de soma (acrônimo de sua designação em inglês: Sum-Frequency Generation)
- SHG Geração da segunda harmônica (acrônimo de sua designação em inglês: Second Harmonic Generation)
- SMT Tecnologia de montagem em superfície (acrônimo de sua designação em inglês: *Surface Mount Technology*)
- TEC Dispositivo termo-elétrico tipo Peltier (acrônimo de sua designação em inglês: *ThermoElectric Coolers*)
- TMM Método das matrizes de transferência (acrônimo de sua designação em inglês: *Transfer Matrix Method*)
- UDP/IP Protocolo de comunicação de interface de rede padrão *ethernet*
- USP Universidade de São Paulo
- UV Radiação de luz ultravioleta
- WDM Multiplexação por divisão de comprimentos de onda (acrônimo de sua designação em inglês: *Wavelength-Division Multiplexing*)

## LISTA DE SÍMBOLOS

a	Raio do núcleo da fibra óptica
b	Índice efetivo normalizado
С	velocidade de propagação da luz no vácuo
СС	Complexo conjugado
d	Diâmetro de uma fibra
$\vec{e}_{jt}(x,y)$	Modo transversal do campo
ij	Índice de variação $i$ e $j$
m	Número inteiro
mn	Índice de variação $m$ e $n$
n	Número inteiro
$n(\omega)$	Coeficiente do índice de refração linear em função da frequência angular
$n_1$	Índice de refração do núcleo da fibra óptica
<i>n</i> <sub>2</sub>	Índice de refração da casca fibra óptica
n <sub>2NL</sub>	Coeficiente do índice de refração não linear
n <sub>ef</sub>	Índice de refração efetivo do núcleo da fibra
$p_{11}$	Componente do tensor elasto-óptico
$p_{12}$	Componente do tensor elasto-óptico
$p_{e}$	Constante efetiva elasto-óptica
$\vec{r}$	Distância axial em relação à origem do sistema de eixos
<i>x</i>	Versor polarização
Ζ.	Em coordenadas cilíndricas é a distância ao longo do eixo $z$
$k_0$	Vetor de onda no vácuo
A	Constante de normalização
Ap(z)	Função de apodização de uma FBG ao longo do eixo $z$
$A_j(z)$	Amplitude do modo de índice $j$ para a direção propagante

$\overrightarrow{B}$	Vetor de densidade de fluxo magnético
$B_j(z)$	Amplitude do modo de índice $j$ para a direção contrapropagante
$C_1$	Constante numérica 1
$C_2$	Constante numérica 2
D	Derivada do atraso de grupo em função do comprimento de onda
$\overrightarrow{D}$	Vetor deslocamento campo elétrico ou densidade de fluxo elétrico
E	Coeficiente de proporcionalidade denominado módulo de Young
$\overrightarrow{E}$	Vetor campo elétrico
E	Transformada de Fourier do vetor campo elétrico
F	Força externa aplicada
$F(\rho)$	Função da distribuição modal do campo elétrico
$\overrightarrow{H}$	Vetor campo magnético
$HE_{mn}$	Modo de propagação híbrido
Im	Parte imaginária de um número complexo
$\vec{J}$	Vetor densidade de corrente
Jm	Função de Bessel de ordem $m$
$K_{kj}^{t}$	Coeficiente de acoplamento transversal dos os modos $j e^k$
$K_{kj}^{z}$	Coeficiente de acoplamento longitudinal dos os modos $j$ e $^k$
Km	Função modificada de Hankel de ordem $m$
L	Comprimento de uma grade de Bragg
LP	Modo linearmente polarizado
$\overrightarrow{M}$	Polarização magnética induzida
Ν	Número de períodos da grade
Nm	Função de Neumann de ordem $m$
$\overrightarrow{P}$	Polarização elétrica induzida
$\vec{P}_L$	Componente de polarização linear
$\vec{P}_{NL}$	Componente de polarização não linear

- *P*<sub>r</sub> Potência óptica refletida em uma FBG
- *P*<sub>t</sub> Potência óptica transmitida em uma FBG
- R Refletividade óptica
- Re Parte real de um número complexo
- $S_{\Delta l}$  Sensibilidade de uma FBG à deformação
- *S<sub>T</sub>* Sensibilidade de uma FBG à temperatura
- T Transmissividade óptica
- *TE* Modo de propagação transversal elétrico
- *TEM* Modo de propagação transversal elétrico e magnético
- TM Modo de propagação transversal magnético
- V Frequência normalizada
- $\nabla$  Operador diferencial "del" do cálculo vetorial
- $\nabla^2$  Operador Laplaciano do cálculo vetorial, definido como o divergente do gradiente no espaço euclidiano n-dimensional
- $\alpha_x$  Coeficiente de expansão térmica do material x
- $\alpha_{\Lambda}$  Coeficiente de expansão térmica da fibra
- $\alpha_n$  Coeficiente termo-óptico da fibra
- $\alpha(\omega)$  Coeficiente de absorção linear em função da frequência angular
- $\alpha_{_{2NL}}$  Coeficiente de absorção não linear de dois fótons
- $\beta$  Constante de propagação
- *χ* Susceptibilidade elétrica
- $\chi$  Transformada de Fourier do vetor susceptibilidade elétrica
- $\delta_d$  Desvio entre o vetor de propagação da onda incidente e o vetor de onda da rede
- $\delta n_{ef}$  Variação efetiva do índice de refração da FBG
- $\bar{\delta n_{ef}}(z)$  Variação média do índice de refração ao longo da FBG em função de z
- ε Permissividade elétrica do meio
- ε Deformação mecânica
- $\mathcal{E}_0$  Permissividade elétrica do vácuo

- *ε<sub>r</sub>* Permissividade elétrica relativa
- $\varepsilon_z$  Deformação mecânica longitudinal
- Em coordenadas cilíndricas é o ângulo entre a parte positiva do eixo do X e a distância de O a P', no sentido contrário aos ponteiros do relógio
- Y Constante de decaimento do campo evanescente
- $\varphi(z)$  Aperiodicidade espacial da modulação em função de z
- $\varphi_{\scriptscriptstyle B}$  Desvio de fase em cada seção uniforme da FBG
- *κ* Coeficiente de acoplamento "ac"
- $\kappa_{kj}(z)$  Coeficiente de acoplamento "ac" em função do eixo z
- $\lambda$  Comprimento de onda da luz
- $\lambda_{B}$  Comprimento de onda de Bragg
- $\lambda_c$  Comprimento de onda de corte para fibras monomodo
- $\lambda_{UV}$  Comprimento de onda UV do laser
- μ Permeabilidade magnética do meio
- $\mu_0$  Permeabilidade magnética do vácuo
- $\mu_r$  Permeabilidade magnética relativa.
- v Razão de Poisson
- $\pi$  Número irracional que representa a divisão entre uma circunferência e o diâmetro correspondente, com o valor aproximado de 3,14159265
- $\theta_i$  Ângulo da luz incidente de ordem i
- $\theta_m$  Ângulo do raio difratado de ordem m
- $\theta_{\rho}$  Fase do sinal refletido
- ρ Em coordenadas cilíndricas é a projeção ortogonal do ponto P no plano XY
- *ρ* Coeficiente de reflexão em amplitude do campo elétrico
- $\rho_f$  Densidade volúmica de cargas livres no material
- $\sigma$  Condutividade elétrica do material
- $\sigma$  Coeficiente de acoplamento médio para uma grade de Bragg
- $\sigma_{kj}(z)$  Coeficiente de acoplamento "dc" em função do eixo z
- $\sigma_z$  Tensão mecânica agindo na direção do eixo z

^	
$\sigma$	Coeficiente deral de acoplamento medio ou acoplamento "dc"
-	

- $au_{
  ho}$  Atraso de grupo
- v(z) Visibilidade das franjas de intensidade do índice ao longo do eixo z
- *ω* Frequencia angular
- $\omega_0$  Frequencia angular inicial ou fixa
- $\Delta l$  Variação do comprimento L da grade
- $\Delta_L$  Variação do comprimento L do objeto
- $\Delta n$  Variação do índice de refração
- $\Delta \varepsilon$  Variação ou amplitude da perturbação da permissividade elétrica
- $\Delta \lambda_{_{FWFZ}}$  Variação da largura entre os primeiros zeros laterais de uma FBG
- $\Delta \lambda_{FWHM}$  Variação da largura total à meia altura uma FBG
- $\Delta T$  Variação da temperatura
- $\Gamma$  Fator de confinamento de potência no núcleo
- $\Lambda$  Período da grade FBG
- $\Lambda_{MF}$  Período da máscara de difração ou de fase

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	33
1.1	Motivação e objetivos	35
1.2	Organização da dissertação	36
2	DESENVOLVIMENTO	38
2.1	Revisão histórica das fibras ópticas e das FBG	38
2.1.1	Características dos sensores a fibra óptica	43
2.2	Fotossensibilidade em fibras ópticas	44
2.2.1	Modelo dos centros de cor	45
2.2.2	Modelo dos dipolos	45
2.2.3	Modelo da compactação ou densificação	45
2.2.4	Modelo de alívio de tensão	46
2.2.5	Técnicas de melhoria da fotossensibilidade em fibras ópticas	46
2.2.5.1	Hidrogenação	47
2.2.5.2	Co-dopagem	47
2.2.5.3	Varredura a chama	48
2.3	Teoria das grades de Bragg em fibras ópticas (FBG)	48
2.3.1	Propagação de ondas eletromagnéticas em fibras ópticas	48
2.3.2	Propriedades lineares e não lineares das fibras	52
2.3.3	Guias de onda cilíndricos	57
2.3.4	Fibra monomodo	61
2.3.5	Rede de Bragg em fibra óptica	62
2.3.5.1	Teoria dos modos acoplados	67
2.3.5.2	Condição de Bragg	70
2.3.5.3	Largura de banda da grade de Bragg	72
2.3.5.4	Atraso de grupo e dispersão da grade de Bragg	73
2.4	Simulação de grades de Bragg	74
2.4.1	Método matricial	76
2.4.2	Simulação de FBG pelo método matricial	81
2.5	FBG como sensores de deformação e de temperatura	84
2.6	Sensibilidade cruzada em FBG	89
3	MATERIAIS E MÉTODOS	91

3.1	Grades de Bragg inscritas em fibras ópticas e sensores FBG91
3.1.1	Grades de Bragg fabricadas no IEAv92
3.1.2	Sensores baseados em FBG fabricados pela Micron Optics107
3.1.3	Sensores baseados em FBG fabricados pela Fiber Sensing108
3.2	Sistemas interrogadores114
3.2.1	Interrogador baseado na convolução das respostas de duas FBG114
3.2.2	Interrogador modelo sm130 da Micron Optics116
3.2.3	Interrogador modelo FS2200 da Fiber Sensing118
3.2.4	Sistema de aquisição de dados modelo USB-6251 da National
	Instruments119
3.2.5	Sistema de aquisição de dados modelo ADS2002IP-B-3 da Lynx121
3.3	Arranjos experimentais125
3.3.1	Ensaios térmicos e mecânicos realizados no laboratório da EFO-S .125
3.3.2	Ensaios térmicos realizados no laboratório LSI-SMT129
3.3.3	Ensaios de deformação mecânica realizados no laboratório LSO131
3.3.3.1	Montagem do dispositivo mecânico com o parafuso micrométrico138
3.3.3.2	Montagem do dispositivo mecânico com o disco excêntrico139
3.3.3.3	Montagem do dispositivo mecânico com o movimentador vertical141
3.3.4	Ensaios térmicos realizados no laboratório LSI142
3.3.4.1	Ensaio térmico das FBG coladas na superfície da peça metálica146
3.3.4.2	Ensaio térmico da FBG tripla dentro do tubo de papelão148
3.3.4.3	Ensaio térmico dos sensores FBG dentro da caixa de papelão150
3.3.5	Caracterização das FBG produzidas no IEAv e dos sensores FBG
	comerciais151
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS152
4.1	Resultados dos ensaios térmicos e mecânicos realizados no
	laboratório da EFO-S152
4.1.1	Ensaios térmicos152
4.1.2	Ensaios mecânicos162
4.2	Resultados dos ensaios térmicos realizados no laboratório LSI-SMT
4.3	Resultados dos ensaios de deformação mecânica realizados no
	laboratório LSO178
4.3.1	Ensaios mecânicos de degraus de carga182

4.3.2	Ensaios mecânicos dinâmicos	.188
4.3.3	Ensaios mecânicos para verificação da estabilidade da carga	.191
4.4	Resultados dos ensaios térmicos realizados no laboratório LSI	.196
4.4.1	Ensaio térmico das FBG coladas na superfície da peça metálica	.196
4.4.2	Ensaio térmico da FBG tripla dentro do tubo de papelão	.206
4.4.3	Ensaio térmico dos sensores FBG dentro da caixa de papelão	.212
4.5	Resultados da caracterização das FBG produzidas no IEAv e dos	
	sensores FBG comerciais	.216
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	.220
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	.222
6.1	Conclusões	.222
6.2	Trabalhos futuros	.223
REFERÊNCIAS		

#### 1 INTRODUÇÃO

Um país que detém a tecnologia de medição garante parte importante de seu progresso, uma vez que a metrologia representa um instrumento vital para o desenvolvimento das suas atividades econômicas, científicas e tecnológicas. O campo das comunicações pode ser considerado outra alavanca para o destaque tecnológico de uma nação, levando-se a considerar que uma das bases para o progresso é o acesso à informação, seja no recolhimento de parâmetros fidedignos de um processo nos âmbitos civis ou militares, seja na transmissão confiável e segura de dados, imagens e voz. Por este motivo, as áreas de instrumentação e medição, bem como a de comunicação, têm se desenvolvido e expandido rapidamente nos últimos anos.

Com o avanço da tecnologia e a necessidade da integração dos dispositivos eletrônicos e ópticos, a fim de diminuir seu tamanho e aumentar sua confiabilidade e precisão, as técnicas de microeletrônica têm ganhado grande relevância no cenário mundial. Inúmeras técnicas de fabricação e topologias lograram êxitos na obtenção de dispositivos de dimensões cada vez mais reduzidas no decorrer do desenvolvimento tecnológico.

Acompanhando o desenvolvimento dos sensores integrados, os sensores baseados em técnicas ópticas também têm sido sujeitos a incessantes desenvolvimentos desde o surgimento das fibras ópticas.

O advento das fibras ópticas e da construção de dispositivos com arranjo denominado *pigtail* (segmento de fibra óptica acoplado a um componente óptico ou optoeletrônico) tornou as montagens mais estáveis e simples de serem implementadas, além de reduzirem as perdas de acoplamento e tornarem os sistemas finais menores e mais confiáveis.

Embora os dispositivos e arranjos experimentais em óptica volumétrica já possuíssem características de desempenho bastante elevadas antes mesmo do surgimento das fibras ópticas, eles eram extremamente sensíveis a perturbações

externas e desalinhamentos, principalmente quando se utilizavam técnicas interferométricas. Com a utilização das fibras para a construção de transdutores ópticos, os problemas de alinhamento foram minimizados e, adicionalmente, ligações flexíveis entre os dispositivos ópticos foram possíveis, bem como a monitoração remota destes sensores.

Com vultosos investimentos em laboratórios das áreas militares e de comunicação de países desenvolvidos na década de 70, a tecnologia das fibras ópticas alcançou extenso progresso, tanto em relação à própria fibra quanto aos componentes acessórios e às fontes ópticas. Com a redução expressiva do custo desses componentes devido à grande sinergia entre as áreas de telecomunicações e a metrologia óptica, o leque de aplicações desses sensores tem se ampliado de forma significativa, tornando-os cada vez mais presentes em nosso dia a dia.

A descoberta da fotossensibilidade de fibras ópticas com núcleo dopado com germânio em 1978 permitiu o desenvolvimento de dispositivos como, por exemplo, as grades de Bragg inscritas em fibra. Em 1989, 11 anos mais tarde, verificou-se a possibilidade de utilização dessas grades como sensores de temperatura e de deformação, muito embora a influência destes parâmetros na resposta de saída desses dispositivos já houvesse sido apontada no final da década de 70, conforme será apresentado adiante no texto.

Atualmente, sensores baseados em redes, ou grades de Bragg em fibra óptica estão cada vez mais acessíveis no campo de instrumentação industrial, de pesquisa ou laboratorial, devido a inúmeras vantagens em relação aos sensores convencionais. Essa acessibilidade leva a crer que estes dispositivos deixarão de ser apenas uma solução para ensaios especiais e passarão a ser cada vez mais utilizados em aplicações comuns.

#### 1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é o estudo, o desenvolvimento e a caracterização da resposta dinâmica de transdutores de deformação mecânica e de temperatura baseados em grades de Bragg inscritas em fibras ópticas para monitoramento de parâmetros em estruturas, de modo a buscar soluções compactas, simples, robustas, imunes a interferências eletromagnéticas (EMI), com respostas rápidas, de elevada sensibilidade e de baixo custo.

Em virtude da grande aplicabilidade dos sensores FBG, do rápido desenvolvimento tecnológico em curso nessa área e da possibilidade de capacitação profissional proporcionada pelo aprofundamento dos conhecimentos nas técnicas relacionadas às FBG, existe um grande interesse, tanto do ponto de vista acadêmico quanto industrial, na realização deste trabalho.

O desenvolvimento conjunto de transdutores FBG de deformação e de temperatura com resposta dinâmica rápida é de grande importância, já que existe um amplo leque de aplicações em que uma das grandezas, ou ambas, variam rapidamente. Um problema que se apresenta em muitos casos é que, dependendo da configuração do arranjo experimental e da grandeza física principal a ser medida, um sensor adicional de temperatura deve ser utilizado para compensação da influência desta grandeza nas leituras do mensurando principal. Este procedimento é necessário, uma vez que as grades de Bragg são afetadas, de maneira intrínseca, simultaneamente pelos parâmetros físicos de deformação e de temperatura. Nesses casos, diferenças em termos de tempos de resposta entre os sensores utilizados para medição de deformação e os usados para compensação de temperatura podem acarretar em erros significativos nas medidas, o que pode até inviabilizar o uso dos sensores a grades de Bragg em tais aplicações. Como não se tem encontrado referências diretas na literatura da área tratando da caracterização da resposta dinâmica de sensores de temperatura e deformação a grades de Bragg, decidiu-se realizar este trabalho com ênfase nesse aspecto pouco explorado da performance desses sensores.
Como parte constituinte da motivação do trabalho desenvolvido nessa dissertação está a realização de ensaios em colaboração e cooperação com a subdivisão de sensores (EFO-S) do IEAv, a qual possui interesse na utilização de sensores FBG para monitoração de estruturas aeronáuticas e aeroespaciais, as quais apresentam solicitações em termos de velocidade de resposta dos sensores bastante severas e, portanto, constituindo-se em excelentes exemplos das aplicações às quais se dedica este trabalho. Assim sendo, os resultados de ensaios mecânicos e térmicos realizados numa peça W6, um reforço do revestimento inferior da asa da aeronave AT-26 Xavante, da empresa EMBRAER, fabricada em liga Alclad 2024-T3, são apresentados nesse trabalho.

Os ensaios térmicos realizados nesse trabalho tiveram a colaboração e apoio do grupo de pesquisa do Laboratório de Mecânica Computacional (LMC) do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações (PEF) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), cujo principal interesse é na utilização dos sensores FBG na monitoração de estruturas civis (*smart structures*), a qual também constituiu-se num tipo de aplicação de interesse fundamental para esse trabalho.

# 1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 1 desta dissertação é apresentada uma introdução sobre a relevância dos dispositivos ópticos, em especial os construídos em fibra óptica, nos campos das telecomunicações e da metrologia. A importância do surgimento destes dispositivos e a grande perspectiva do seu uso em diversas áreas também são tratados neste item introdutório. A motivação para esta pesquisa e os objetivos deste trabalho são apresentados neste capítulo.

Um resumo histórico sobre a tecnologia das grades de Bragg em fibra óptica, abrangendo um breve estudo sobre a teoria, a modelagem, os métodos de simulação e o uso desses dispositivos como sensores de deformação e de temperatura são expostos no Capítulo 2. No Capítulo 3 são apresentadas algumas características ópticas das grades de Bragg produzidas no IEAv, bem como o método utilizado para a inscrição dessas grades em fibras ópticas também é descrito. As características ópticas e mecânicas dos sensores comerciais de deformação e temperatura utilizados nos experimentos e as principais características dos sistemas interrogadores utilizados nos ensaios de caracterização das grades de Bragg e dos sensores comerciais são mostradas no neste capítulo. A detecção da posição central do pico do espectro da luz refletida pela FBG foi a técnica empregada nos interrogadores comerciais utilizados em todos os arranjos experimentais realizados neste trabalho. O interrogador desenvolvido pelo IEAv utiliza a técnica de interrogação por convolução de espectros de reflexão parcialmente superpostos de pares casados de FBG, sendo uma usada como grade sensora e a outra como referência e será melhor detalhado adiante.

Os resultados experimentais dos ensaios térmicos e de deformação mecânica são apresentados no Capítulo 4.

No Capítulo 5 é apresentado um sumário dos resultados obtidos nos capítulos anteriores e uma análise à luz da revisão bibliográfica proposta é realizada, de modo a avaliar a relevância dos trabalhos executados.

As considerações finais, os trabalhos futuros e uma análise dos problemas encontrados, são apresentados no Capítulo 6.

#### 2 DESENVOLVIMENTO

# 2.1 REVISÃO HISTÓRICA DAS FIBRAS ÓPTICAS E DAS FBG

Desde os primeiros esboços de experimentos com guias de luz utilizando jatos d'água, <sup>(1)</sup> passando pelas primeiras transmissões de informações utilizando a luz <sup>(2)</sup> e pela captação de imagens com tubos de vidro em instrumentos médicos, <sup>(3)</sup> até o que conhecemos atualmente como fibras ópticas, <sup>(4)</sup> muita coisa mudou em termos das formas, tecnologias utilizadas e fins de aplicação, muito embora o princípio básico envolvido continue inalterado.

Antes do aproveitamento das fibras ópticas nas comunicações, o principal uso da nova tecnologia estava direcionado para o campo da endoscopia no exame do interior de certos órgãos ou cavidades do corpo humano. <sup>(5)</sup>

A inovação da fibra óptica emergiu lentamente no mundo até o início da década de 70, época em que ocorreu um grande salto na sua utilização com a verificação da possibilidade do seu uso em sistemas de comunicação por Kao e Hockham <sup>(6)</sup>. A fibra óptica mostrou-se muito atrativa no campo das comunicações, devido à sua característica de largura de banda elevada, característica essa que lhe confere a capacidade de transportar grande número de informações de vários usuários do sistema simultâneos em um único canal de transmissão. A partir desse período, as fibras ópticas passaram a ser uma opção muito interessante em substituição aos métodos de transmissão tradicionais (baseados em condutores de cobre ou em transmissões por ondas de rádio, como as micro-ondas). <sup>(7)</sup>

Em 1971, o pesquisador Elias Snitzer, em seus trabalhos no campo da óptica fez importantes observações, verificando que as fibras ópticas poderiam ter grande utilidade, pois transportavam informações de fase que poderiam ser relacionadas à modulação física dos parâmetros da fibra. <sup>(8)</sup>

Na segunda metade da década de 70, quando a fibra óptica já havia despontado para o uso em telecomunicações, surgiram os primeiros trabalhos com

sensores utilizando modulação de fase em fibra óptica. Pode-se considerar os trabalhos citados a seguir como marcos do início das pesquisas no campo da metrologia usando fibras ópticas, como, por exemplo: um giroscópio, <sup>(9)</sup> que utilizou a técnica de interferometria de Sagnac totalmente construído em fibra, um hidrofone,<sup>(10)</sup> que utilizou a modulação de fase causada por ondas acústicas numa fibra imersa em um fluido em um arranjo interferométrico e um sensor de corrente elétrica <sup>(11)</sup> que usou o efeito magneto-óptico do material de fabricação da fibra para obtenção do mensurando, ou seja, a grandeza que se está querendo medir e, adicionalmente, mostrou a possibilidade tanto de medir quanto de transmitir os parâmetros captados através da mesma fibra óptica.

Em 1978, no Canadá (Canadian Communications Research Centre - CRC), Ken Hill e seus colaboradores <sup>(12)</sup> em seus estudos sobre propriedades não-lineares das fibras ópticas de sílica dopadas com germânio acabaram estabelecendo um efeito de fotossensibilidade, até então não conhecido. No experimento original, eles injetaram um intenso feixe de luz gerado por um laser de íon-argônio (comprimento de onda central em 488 nm e potência de 250 mW) em uma fibra e observaram um aumento da intensidade da luz refletida depois de alguns minutos de exposição. Observaram também que, em função do tempo de exposição, esse efeito aumentava até que quase toda a luz injetada era refletida. Medidas espectrais mostraram que a reflexão era forte apenas em uma faixa estreita de comprimentos de onda, levando à especulação de que uma estrutura periódica havia sido formada na fibra. Essa especulação parecia ser razoável, uma vez que a fibra com que estavam trabalhando terminava em aberto e estava clivada. O processo era causado inicialmente pela interferência do sinal injetado no núcleo da fibra com o feixe refletido por efeito Fresnel (~4%) na face clivada do fim da fibra que criava uma onda estacionária. Essa onda estacionária gerava permanentemente um padrão de índices de refração no núcleo da fibra, onde nos máximos desse padrão da onda estacionária a mudança do índice de refração era máxima e nos mínimos a mudança de índice era muito fraca. (13)

Kawasaki, Hill e colaboradores, além de mostrarem que essas variações periódicas do índice de refração do núcleo da fibra formavam um filtro com banda

extremamente estreita, mostraram também que a resposta em frequência deste filtro poderia ser ajustada indiretamente por variações de temperatura e de deformações mecânicas na fibra óptica. <sup>(12; 14; 15)</sup>

A modulação periódica no índice de refração criada no núcleo da fibra é dita permanente no sentido de ser extremamente estável ao longo dos anos e que eventual degradação na refletividade devida à exposição da fibra à temperatura elevada pode ser minimizada, se o guia de onda óptica sofrer um recozimento apropriado. <sup>(16)</sup>

A essa estrutura gerada no núcleo da fibra óptica, exemplificada na Figura (2.1.1.), chamou-se rede, ou grade de Bragg em fibra óptica (FBG, do inglês *Fiber Bragg Grating*). Inicialmente a estrutura também foi chamada de grade de Hill (*Hill's grating*). <sup>(15)</sup>



Figura 2.1.1. – Reflexão de parte do espectro óptico por uma grade de Bragg inscrita em fibra óptica Fonte: desenho baseado em imagem do trabalho de Haase. <sup>(17)</sup>

Alguns anos mais tarde, a caracterização desses filtros foi discutida por Lam e Garside, <sup>(18)</sup> que mostraram a relação entre a qualidade da grade (filtro) e a intensidade da luz laser usada para formá-la. O tempo de exposição desta luz no núcleo da fibra também foi usado como parâmetro de controle para a formação do dispositivo. Por fim, concluíram que a largura de banda espectral e a perturbação de

índice induzida eram proporcionais ao quadrado da intensidade da potência de inscrição da grade de Bragg. Este trabalho, assim como o de Bures <sup>(19)</sup> sugeriram que o fenômeno da fotossensibilidade ocorrido no núcleo da fibra dopada com germânio pudesse ser um processo de absorção de dois-fótons, como sendo o possível mecanismo responsável pela mudança do índice de refração. <sup>(20)</sup>

Embora as grades de Bragg inscritas no núcleo das fibras ópticas tenham sido descobertas em 1978, foi somente a partir de 1989, com os trabalhos de Meltz, Morey e Glenn, <sup>(21)</sup> mostrando uma técnica de inscrição lateral de um padrão de grade de Bragg no núcleo da fibra óptica usando um método de interferometria holográfica de dois feixes provenientes de uma fonte coerente de luz ultravioleta (UV), que as grades começaram a ser mais amplamente utilizadas nos dispositivos ópticos, pela relativa facilidade e repetibilidade de construção. A nova técnica permitiu a construção desses filtros em fibras com diâmetros comerciais e tornou possível obter reflexões em comprimentos de onda entre 1300 nm e 1500 nm, viabilizando a utilização dessas estruturas em equipamentos de telecomunicações.

No experimento de Meltz, Morey e Glenn, o período da interferência máxima e a mudança no índice de refração, foram ajustados por meio da variação do ângulo entre os dois feixes e do comprimento de onda (em torno de 244 nm) da radiação UV, de maneira muito mais eficiente do que pela injeção de radiação na faixa do visível (em 488 nm) dentro da fibra. Tal experimento mostrou pelo menos duas vantagens principais. A primeira, que a grade podia ser inscrita no núcleo sem a necessidade da remoção da casca da fibra e a segunda, que o período da grade dependia do ângulo entre os dois feixes. Os feixes UV utilizados na inscrição lateral do núcleo da fibra se encontravam na faixa de defeito de vacância do oxigênio do dopante germânio, basicamente centrado em torno do comprimento de onda de 245 nm. <sup>(13; 15)</sup>

Foi em outra publicação desses autores, no mesmo ano, voltada à utilização dessa tecnologia para uso destinado à metrologia, <sup>(22)</sup> em que era demonstrado um dispositivo óptico de medida de deformação e de temperatura construído diretamente na fibra, que esses sensores, conhecidos atualmente como FBG,

começaram a receber uma atenção especial da comunidade científica. Desde então, devido às suas características únicas, as FBG vem sendo alvos de rápidos e contínuos desenvolvimentos no campo da metrologia óptica. <sup>(23)</sup>

Nos últimos anos, grupos de pesquisa do mundo todo têm conseguido avanços em inscrições ópticas diretas no núcleo da fibra para formação de grades da alta qualidade utilizando várias técnicas, tais como a interferometria, <sup>(21)</sup> máscara de fase, <sup>(24; 25)</sup> exposição ponto-a-ponto de luz laser ultravioleta, <sup>(26; 27; 28; 29; 30)</sup> dentre outras. As técnicas não invasivas de inscrição em núcleo, dependendo das características requeridas, proporcionam a formação de grades com características atraentes, como grande largura de banda e alta refletividade, de forma rápida e eficiente. Essas grades são utilizadas para construção de dispositivos com baixas perdas. <sup>(13)</sup>

No Quadro (2.1.1.), são apresentadas as vantagens e desvantagens de três técnicas de fabricação das FBG.

Técnica de fabricação	Interferométrica	Ponto a Ponto	Máscara de fase
Vantagens	Boa flexibilidade para produção de grades com diferentes comprimentos de onda de Bragg	Possibilidade de modificação do período da grade ( <i>A</i> ) e de gravar grades muito longas	Simplicidade na escrita das grades, insensibilidade a vibrações mecânicas e estabilidade
Desvantagens	Susceptível a vibrações mecânicas e a correntes de ar	Processo de fabricação demorado. Efeitos térmicos e pequenas variações na deformação da fibra podem produzir erros de espaçamento nas grades	Necessária uma máscara para cada comprimento de onda de Bragg desejada

Quadro 2.1.1. – Comparação de técnicas de gravação de FBG

Fonte: tradução baseada no trabalho de Týnek. (31)

As vantagens das técnicas de construção apresentadas acima, a relativa facilidade de construção das grades de Bragg em fibra e a tendência da redução dos custos dos dispositivos ópticos, devido à sinergia com a área das telecomunicações, têm acentuado o crescimento do uso desta tecnologia nas mais diversas aplicações

no campo da metrologia óptica em âmbito mundial, haja vista o crescente número de publicações nas áreas acadêmica e de pesquisas <sup>(32)</sup> e o aumento na demanda pela tecnologia óptica <sup>(33)</sup> nos últimos anos.

## 2.1.1 Características dos sensores a fibra óptica

Várias características chaves dos sensores a fibras ópticas fazem com que esta tecnologia conquiste cada vez mais espaço no campo da metrologia, em relação aos sensores eletrônicos convencionais. <sup>(34)</sup>

O Quadro (2.1.2.), a seguir, apresenta um resumo dessas características e as vantagens com as quais as mesmas se relacionam nas aplicações metrológicas dos sensores a fibras ópticas.

Características	Vantagens
Dimensões e peso reduzidos	Permite a instalação em materiais sem que haja degradação estrutural significativa. O tamanho reduzido faz com que as fibras instaladas sejam alvos menos óbvios para vândalos e ladrões.
Imunidade a interferências eletromagnéticas – EMI	Exigências de blindagem e problemas associados com " <i>loop</i> " de terra, quedas de raios (relâmpagos) e danos elétricos são eliminados.
Eletricamente passivos	O que torna os dispositivos intrinsecamente seguros.
Baixo consumo de potência elétrica	Atrativo especial quando se necessita de um grande número de sensores para realização de medidas em campo.
Sensibilidade e largura de banda elevadas	Permite a implementação de sensores operando com larga faixa dinâmica de leitura e elevada resposta em frequência, mantendo grande sensibilidade.
Resistência a ambientes hostis	As fibras podem operar em altas e baixas temperaturas e ainda podem ser embutidas em materiais compósitos.
Possibilidade de multiplexagem óptica e elétrica	Permite a implementação de muitos sensores na mesma fibra e a multiplexação óptica e/ou elétrica dos canais de entrada dos sensores, aumentando ainda mais a possibilidade de pontos de leitura, consequentemente reduzindo o custo por unidade sensora do sistema.
Tecnologia complementar às de telecomunicações e de optoeletrônica	Possibilidade de futuras construções de dispositivos de baixo custo e alta performance, devido ao alto grau de sinergia entre os mercados de telecomunicações e optoeletrônica
Capacidade de multifuncionalidades	Diversos parâmetros, ou mensurandos, podem ser detectados ao longo de uma mesma fibra simultaneamente, como por exemplo, deformações multieixos, pressão, corrosão, temperatura e posição, entre outros.

Quadro 2.1.2. – Características e vantagens dos sensores a fibra óptica para aplicação em metrologia

Fonte: resumo de baseado no trabalho de Daher. (34)

Embora os sensores baseados em FBG possuam desempenhos comparáveis aos dos já estabelecidos sensores convencionais, sua exploração comercial tem se limitado a mercados de pequenos volumes devido ao seu alto custo em relação aos sensores convencionais e à sua difícil manipulação. Essas limitações fazem com que nichos específicos de exploração desses sensores tenham mais destaque, como é o caso das aplicações em ambientes hostis e perigosos ou em áreas especializadas onde haja a necessidade de tamanho reduzido e o mínimo de intrusão do dispositivo e do cabeamento no local da medida, como por exemplo, as áreas aeroespacial, elétrica, civil e de óleo e gás. <sup>(35)</sup>

São apresentados nos itens a seguir alguns tópicos teóricos com o intuito de contribuir para uma compreensão dos princípios básicos da fabricação e do funcionamento das FBG.

## 2.2 FOTOSSENSIBILIDADE EM FIBRAS ÓPTICAS

Após a descoberta da fotossensibilidade das fibras ópticas por Hill, como visto anteriormente, <sup>(12)</sup> diversos estudos surgiram com o objetivo de desenvolver modelos que explicassem o fenômeno da fotossensibilidade. Muito embora existam diversos modelos que possuam resultados teóricos validados pelas evidências experimentais, ainda não existe consenso em relação aos processos físicos associados a este mecanismo de alteração do índice de refração. <sup>(20)</sup>

Sabe-se que o processo de mudança do índice de refração depende das características do material de construção da fibra, da intensidade e do comprimento de onda da luz da fonte óptica de exposição ultravioleta e de alguns processos de preparação da amostra. <sup>(13)</sup> Esse processo tem sido amplamente estudado empregando diversas técnicas com diferentes tipos de fontes ópticas e fibras com características distintas quanto ao tipo e aos materiais de construção. <sup>(36)</sup>

Os modelos mais conhecidos e que apresentam melhores resultados em relação ao processo de mudança do índice de refração em fibras ópticas são citados nos itens a seguir.

#### 2.2.1 Modelo dos centros de cor

O modelo dos centros de cor proposto por Hand e Russel <sup>(37; 38; 39)</sup> foi desenvolvido quando ainda se acreditava que a fotossensibilidade nas fibras ópticas só era possível na presença de germânio, entretanto, com as publicações dos trabalhos realizados com fibras dopadas com outros elementos como: európio, <sup>(40)</sup> cério <sup>(41)</sup> e érbio/germânio <sup>(42)</sup> verificou-se que a fotossensibilidade não se devia exclusivamente a presença do germânio.

No modelo dos centros de cor a modificação do índice de refração se deve as mudanças no espectro de absorção devido aos defeitos na estrutura eletrônica das ligações GeO no núcleo da fibra e pode ser estimada através da relação de *Kramers-Kronig.* <sup>(13)</sup> Esses defeitos na estrutura do material são conhecidos como centros de absorção ou centros de cor devido a fortes absorções que modificam a aparência cromática do material quando este é exposto à luz UV com comprimento de onda próximo ao pico de absorção dos defeitos do germânio que está em um intervalo de 240 - 250 nm. <sup>(43)</sup>

#### 2.2.2 Modelo dos dipolos

A base do modelo dos dipolos faz referência à formação de um campo elétrico devido à fotoexcitação dos defeitos na fibra óptica. A fotoionização dos centros deficitários de oxigênio, Ge-Si ou Ge-Ge, origina centros carregados positivamente e elétrons livres. Durante o processo de gravação de uma rede de Bragg, quando a fibra é exposta a radiação ultravioleta espacialmente periódica, os elétrons livres das regiões de maior intensidade são difundidos até serem aprisionados nos defeitos das zonas de menor intensidade. Esta nova distribuição estática de campos na fibra irá criar, por efeito de Kerr, uma alteração periódica no índice de refração. <sup>(13; 36)</sup>

### 2.2.3 Modelo da compactação ou densificação

Os pesquisadores Fiori e Devine, (44; 45) verificaram que a aplicação de uma irradiação laser a 248 nm em sílica amorfa induzia, por efeito térmico, uma

compactação linear reversível na densidade da matriz vítrea do material constituinte da fibra óptica, originando alterações no índice de refração. O modelo da compactação foi então proposto por Bernardin e Lawandy <sup>(46)</sup> e tratou justamente da possibilidade da densificação do material devido à aplicação de uma radiação UV. Estudo mais detalhado sobre a compactação da sílica sob irradiação UV pode ser encontrada na publicação de Rothschild, Erlich e Shaver. <sup>(47)</sup>

### 2.2.4 Modelo de alívio de tensão

Em contraposição ao modelo da compactação, o modelo de alívio de tensão mostra que a exposição à radiação UV provoca um relaxamento total das tensões acumuladas durante o processo fabricação da fibra e com isso causa a diminuição do índice de refração da fibra. Esse modelo foi proposto por Sceats e Poole, <sup>(48)</sup> entretanto, alguns anos depois, Fonjallaz *et al.*, <sup>(49)</sup> mostraram através da publicação dos seus resultados experimentais que a exposição à luz ultravioleta aumenta a tensão no núcleo das fibras e não alivia como alega o modelo de alívio de tensão. <sup>(50)</sup>

#### 2.2.5 Técnicas de melhoria da fotossensibilidade em fibras ópticas

Desde a descoberta da fotossensibilidade e da primeira demonstração de formação de grades em fibras ópticas de germano-silicato, um grande esforço tem sido dispensado para a compreensão e o aumento da fotossensibilidade. <sup>(13)</sup> Dentre as técnicas mais comuns utilizadas para o incremento da fotossensibilidade estão os processos de hidrogenação, o de co-dopagem e o de varredura a chama.

Acredita-se que mais de um processo citado nos itens acima esteja envolvido na mudança do índice de refração fotoinduzida no núcleo da fibra óptica, ainda assim, na maioria das fibras comuns essa alteração é muito pequena para aplicações baseadas em grades de Bragg. As técnicas de melhoria da fotossensibilidade tornam o núcleo da fibra óptica mais sensível à radiação UV, permitem uma redução no tempo de exposição e resultam na fabricação de grades de Bragg mais precisas, estáveis e com elevada refletividade. As técnicas de melhoria da fotossensibilidade em fibras ópticas não é o foco central deste trabalho, assim um estudo mais aprofundado sobre o assunto pode ser encontrado na literatura. <sup>(13; 36; 43; 51)</sup>

### 2.2.5.1 Hidrogenação

A técnica de hidrogenação ou carga de hidrogênio foi proposta por Lemaire e seus colaboradores <sup>(52)</sup> e consiste em manter a fibra óptica a alta pressão e baixa temperatura em uma atmosfera de hidrogênio por um determinado período de tempo. Este processo permite que até mesmo fibras ópticas convencionais utilizadas em telecomunicações <sup>(13)</sup> exibam excelente fotossensibilidade à radiação UV, podendo ser superior em duas ordens de grandeza em relação às fibras comuns. <sup>(53)</sup> Embora técnicas de hidrogenação em baixa pressão de hidrogênio e altas temperaturas <sup>(54; 55)</sup> também tenham sido propostas, as maiores variações no índice de refração são conseguidas com a exposição da fibra óptica a um ambiente de elevada pressão de hidrogênio e temperaturas baixas. <sup>(43)</sup>

### 2.2.5.2 Co-dopagem

Na técnica de co-dopagem outros elementos dopantes são combinados com o GeO<sub>2</sub> para melhorar a fotossensibilidade de fibras de germano-silicato, como é o caso do boro, <sup>(56)</sup> que possibilita alterações no índice de refração da ordem de  $10^{-3}$ , enquanto as mesmas fibras sem adição de boro exibem índices na faixa de  $10^{-5}$ . Embora as fibras co-dopadas com boro possuam elevada atenuação em torno de 115 dB/km a 1550 nm e fraca estabilidade térmica, elas ainda são as mais facilmente encontradas comercialmente. Uma alternativa interessante para essas fibras dopadas com boro é a utilização de fibras co-dopadas com estanho, uma vez que elas possuem elevada fotossensibilidade e apresentam perdas por atenuação inferiores a 25 dB/km a 1550 nm, além de que as grades de Bragg gravadas nessas fibras suportam temperaturas mais elevadas. <sup>(50)</sup>

#### 2.2.5.3 Varredura a chama

A técnica de varredura a chama (*flame brushing*) <sup>(13; 57)</sup> baseia-se num processo simples para aumentar a fotossensibilidade em fibras de germano-silicato. A região da fibra onde será fotossensibilizada é varrida diversas vezes por uma chama de hidrogênio (chama rica em hidrogênio) e uma pequena quantidade de oxigênio. A chama atinge uma temperatura de cerca de 1700 °C, assim, a estas temperaturas, o hidrogênio se difunde no núcleo da fibra muito rapidamente e reage com o vidro de germano-silicato para produzir centros de germânio com deficiência de oxigênio. Técnicas como a de varredura a chama também são utilizadas para fotoinduzir mudanças no índice de refração de fibras dopadas ou não com germânio.

## 2.3 TEORIA DAS GRADES DE BRAGG EM FIBRAS ÓPTICAS (FBG)

Antes de começar o estudo da teoria das FBG propriamente dita, será realizada uma análise da teoria da propagação da onda eletromagnética em guias de onda cilíndricos.

### 2.3.1 Propagação de ondas eletromagnéticas em fibras ópticas

A propagação da onda eletromagnética guiada pela fibra óptica pode ser analisada matematicamente recorrendo às soluções das equações de Maxwell considerando a geometria cilíndrica da fibra com condições de contorno apropriadas, tais como diâmetro do núcleo, comprimento de onda, abertura numérica, etc. <sup>(43; 58; 59; 60)</sup> As equações de Maxwell na sua forma diferencial, para materiais lineares, homogêneos, isotrópicos, sem perdas e livres de cargas, são as apresentadas a seguir:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f \tag{2.3.1}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2.3.2}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$
(2.3.3)

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$
(2.3.4)

onde:

 $\vec{D}$  é o vetor deslocamento campo elétrico ou densidade de fluxo elétrico;

- $\vec{E}$  é o vetor campo elétrico;
- $\vec{B}$  é o vetor de densidade de fluxo magnético;
- $\vec{H}$  é o vetor campo magnético;
- $\vec{j}$  é o vetor densidade de corrente;
- $\rho_{\rm f}$  é a densidade volúmica de cargas livres no material.

As Equações (2.3.1) e (2.3.2) representam, respectivamente, as Leis de Gauss para a eletricidade e para o magnetismo, a Equação (2.3.3) a Lei da indução de Faraday e a Equação (2.3.4) representa a Lei de Ampère-Maxwell.

Em materiais lineares as densidades de fluxo  $\vec{D}$  e  $\vec{B}$ , e a densidade de corrente  $\vec{J}$ , estão relacionadas com os campos  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  através das seguintes equações constitutivas: <sup>(61)</sup>

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \tag{2.3.5}$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M})$$
(2.3.6)

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \tag{2.3.7}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} \tag{2.3.8}$$

onde:  $\varepsilon_0$  é a permissividade elétrica e  $\mu_0$  a permeabilidade magnética do vácuo, onde ambas são grandezas escalares,  $\varepsilon$  é a permissividade elétrica e  $\mu$  a permeabilidade magnética do meio,  $\vec{P}$  é a polarização elétrica induzida,  $\vec{M}$  é a polarização magnética induzida,  $\sigma$  é a condutividade elétrica do material e c é a velocidade de propagação da luz no vácuo.

E que:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \tag{2.3.9}$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \tag{2.3.10}$$

onde:  $\varepsilon_r$  é a permissividade elétrica e  $\mu_r$  a permeabilidade magnética relativas.

Para um meio dielétrico, homogênio e não condutor como no caso das fibras ópticas de silica, adimiti-se que não existam cargas livres no material, assim:  $\rho_f = 0$ , que por ser um material não condutor não há circulação de corrente, assim:  $\sigma = 0$  e portanto  $\vec{J} = 0$  e que pela ausência de materiais ferromagnéticos,  $\vec{M} = 0$ .

Portanto tem-se que:

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \tag{2.3.11}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$
(2.3.12)

Sabe-se que a polarização induzida ou densidade de polarização pode ser expressa por: <sup>(43)</sup>

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi_{ij}^{(1)} \vec{E}$$
(2.3.13)

onde  $\chi_{ij}^{(1)}$  é a susceptibilidade elétrica linear, ou seja, de ordem 1. A susceptibilidade é parâmetro que indica quão facilmente o material dielétrico se polariza em resposta a um campo elétrico aplicado e está relacionado com a permissividade relativa através da expressão:

$$\varepsilon_{ij} = 1 + \chi_{ij}^{(1)}$$
 (2.3.14)

Usando a segunda forma da Equação (2.3.5) na Equação (2.3.12), tem-se:

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \right]$$
(2.3.15)

Aplicando-se o operador rotacional em ambos os lados da Equação (2.3.3) e substituindo a primeira forma da Equação (2.3.6) na Equação (2.3.12), tem-se:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla \times \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\nabla \times \vec{B}\right) = -\mu \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\nabla \times \vec{H}\right) = -\mu \cdot \frac{\partial^2 D}{\partial t^2}$$
(2.3.16)

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla \left( \nabla \cdot \vec{E} \right) - \nabla^2 \vec{E}$$
(2.3.17)

#### Vetor identidade de Lagrange

Utilizando o vetor identidade (2.3.17), a Equação (2.3.11) e a derivada no tempo da Equação (2.3.15) na Equação (2.3.16) é possível obter, a partir das equações diferencias de primeira ordem de Maxwell a equação de onda de segunda ordem que descreve a propagação do campo elétrico no meio:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2}$$
(2.3.18)

ou

Utilizando as Equações (2.3.13) e (2.3.14) em (2.3.18) pode-se chegar à equação da onda na seguinte forma: 
$$^{\rm (43)}$$

$$\nabla^{2}\vec{E} = \mu \cdot \varepsilon_{0} \frac{\partial^{2}}{\partial t^{2}} \left[1 + \chi_{ij}^{(1)}\right] \cdot \vec{E}$$
(2.3.19)

Ou como:

$$\nabla^{2}\vec{E} = \mu \cdot \varepsilon_{0} \cdot \varepsilon_{ij} \cdot \frac{\partial^{2}\vec{E}}{\partial t^{2}} = \mu \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial^{2}\vec{E}}{\partial t^{2}}$$
(2.3.20)

Similarmente, pode-se encontrar uma equação de onda que descreve a propagação do campo magnético no meio.

#### 2.3.2 Propriedades lineares e não lineares das fibras

Para dar continuidade na resolução da equação da onda descrita em (2.3.18), deve-se encontrar uma relação entre a polarização elétrica induzida  $\vec{P}$  e o campo elétrico  $\vec{E}$ . De uma forma geral, a descrição da relação entre  $\vec{P}$  e  $\vec{E}$  requer a utilização da mecânica quântica, <sup>(61)</sup> que não será apresentada neste trabalho por não ser o foco desse estudo, muito embora esta abordagem seja necessária quando a frequência óptica é da ordem da ressonância do meio. As soluções da equação de onda correspondem a modos discretos de propagação, que podem ser vistos como ondas propagantes ao longo do eixo da fibra e modos de onda estacionária na seção transversal. Os modos de onda estacionária são semelhantes às funções de onda de uma partícula em um poço de potencial descrito na física quântica.

A resposta de um meio dielétrico, como é o caso da sílica, se torna não linear na presença de um campo eletromagnético de elevado valor de intensidade. A resposta não linear está relacionada ao movimento não harmônico dos elétrons sob a influência desse campo aplicado. <sup>(61)</sup> Assim, em um material em que a polarização total induzida por dipolos é não linear, a polarização pode ser expandida da forma:

$$\vec{P}(\vec{r},t) = \varepsilon_0 \cdot (\chi^{(1)}(\vec{r},t) \cdot \vec{E}(\vec{r},t) + \chi^{(2)}(\vec{r},t) : \vec{E}(\vec{r},t)\vec{E}(\vec{r},t) + \chi^{(3)}(\vec{r},t) : \vec{E}(\vec{r},t)\vec{E}(\vec{r},t) + ...)$$
(2.3.21)

A principal contribuição para o vetor polarização é a susceptibilidade linear ou de primeira ordem  $\chi^{(1)}$ , que é responsável pelas propriedades lineares da fibra. Os seus efeitos estão incluídos no índice de refração e no coeficiente de atenuação do material. A susceptibilidade de segunda ordem  $\chi^{(2)}$  é responsável pela geração de harmônicos de segunda ordem e geração de frequência soma (SFG) e pode ser desprezada em função da simetria molecular da sílica fundida e da não existência de direções preferenciais no meio. No entanto, os momentos de quadripólo elétrico e dipolo magnético podem gerar efeitos não lineares de segunda ordem fracos. Defeitos ou centros de cor no interior o núcleo de fibra podem também contribuir para a geração de segundo harmônico, sob certas condições. Os efeitos não lineares de ordem superior são governados pela susceptibilidade de terceira ordem

 $\chi^{(3)}$  e susceptibilidades de maior ordem podem ser desprezadas. (61; 62)

Com isso pode-se reescrever a Equação (2.3.21) apenas com as duas componentes não desprezadas, ou seja, componente de polarização linear  $\vec{P}_L$  e a componente de polarização não linear  $\vec{P}_{NL}$ , tal que,  $\vec{P}_{NL} \ll \vec{P}_L$ .

$$\vec{P}(\vec{r},t) = \vec{P}_L(\vec{r},t) + \vec{P}_{NL}(\vec{r},t)$$
(2.3.22)

As polarizações linear e não linear estão relacionadas com o campo elétrico com as seguintes relações:

$$\vec{P}_L(\vec{r},t) = \varepsilon_0 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \chi^{(1)}(t-t') \cdot \vec{E}(\vec{r},t') dt'$$
(2.3.23)

$$\vec{P}_{NL}(\vec{r},t) = \varepsilon_0 \cdot \iiint_{-\infty}^{\infty} \chi^{(3)}(t-t_1,t-t_2,t-t_3) \\ \vdots \times \vec{E}(\vec{r},t_1) \\ \vec{E}(\vec{r},t_2) \\ \vec{E}(\vec{r},t_3) \\ dt_1 \\ dt_2 \\ dt_3$$
(2.3.24)

As duas relações acima são válidas na aproximação de dipolos elétricos e se for assumido que a resposta do meio é local. Já as Equações (2.3.18), (2.3.22) a (2.3.24), proveem um formalismo geral para o estudo de efeitos não lineares de terceira ordem em fibras ópticas. Devido à sua complexidade é necessário realizar várias aproximações para simplificação. Uma simplificação importante é considerar que a polarização não linear é uma perturbação insignificante em relação à polarização induzida total.

Considerando que o campo elétrico em notação complexa é descrito por:

$$\vec{E}(\vec{r},t) = \frac{1}{2} \cdot \hat{x} \Big[ \vec{E}(\vec{r},t) \cdot e^{(-j\omega_0 t)} + cc \Big]$$
(2.3.25)

onde:  $\vec{r}$  é a distância axial em relação à origem do sistema de eixos,  $\hat{x}$  é o versor polarização,  $E(\vec{r},t)$  é a função que define o envelope do campo elétrico com uma lenta variação temporal, relativo ao período óptico e cc é o complexo conjugado do termo anterior.

Analogamente as polarizações  $\vec{P}_L$  e  $\vec{P}_{NL}$  podem ser expressas, como:

$$\vec{P}_L(\vec{r},t) = \frac{1}{2} \cdot \hat{x} \cdot \left[ P_L(\vec{r},t) \cdot e^{(-j \cdot \omega_0 \cdot t)} + cc \right]$$
(2.3.26)

$$\vec{P}_{NL}(\vec{r},t) = \frac{1}{2} \cdot \hat{x} \cdot \left[ P_{NL}(\vec{r},t) \cdot e^{(-j \cdot \omega_0 \cdot t)} + cc \right]$$
(2.3.27)

Substituindo a Equação (2.3.26) na Equação (2.3.23) pode-se obter a polarização linear:

$$P_{L}(\vec{r},t) = \varepsilon_{0} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \chi_{xx}^{(1)}(t-t') \cdot \vec{E}(\vec{r},t') \cdot e^{[j \cdot \omega_{0} \cdot (t-t')]} dt'$$

$$P_{L}(\vec{r},t) = \frac{\varepsilon_{0}}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \chi_{xx}^{(1)}(\omega) \cdot E(\vec{r},\omega-\omega_{0}) \cdot e^{[j \cdot (\omega-\omega_{0})t]} d\omega$$
(2.3.28)

onde:  $E(\vec{r}, \omega - \omega_0)$  é a transformada de Fourier de  $\vec{E}(\vec{r}, t')$ .

Substituindo a Equação (2.3.27) na Equação (2.3.24) e assumindo que a resposta não linear é instantânea, o resultado pode ser simplificado significadamente, tornando-se a forma reduzida a seguir:

$$P_{NL}(\vec{r},t) = \varepsilon_0 \cdot \chi_{xxxx}^{(3)} \vdots \vec{E}(\vec{r},t') \vec{E}(\vec{r},t') \vec{E}(\vec{r},t')$$
(2.3.29)

A suposição de que a resposta linear é instantânea acaba negligenciando a contribuição das vibrações moleculares dada pela susceptibilidade de terceira ordem  $\chi^{(3)}$  (efeito Raman). Os efeitos não lineares usualmente não são considerados em sistemas de comunicação óptica.

Considerando as Equações (2.3.18) e (2.3.22) obtém-se a equação de onda que rege a propagação de pulsos em fibras não lineares:

$$\nabla^{2}\vec{E} - \frac{1}{c^{2}}\frac{\partial^{2}\vec{E}}{\partial t^{2}} = \mu_{0} \cdot \frac{\partial^{2}\vec{P}_{L}}{\partial t^{2}} + \mu_{0} \cdot \frac{\partial^{2}\vec{P}_{NL}}{\partial t^{2}}$$
(2.3.30)

Assumindo os seguintes pressupostos, pode-se simplificar a Equação (2.3.30): (61)

1.  $\vec{P}_{NL}$  é considerada uma pequena perturbação de  $\vec{P}_L$ , ou seja,  $\vec{P}_{NL} \approx 0$ ;

 O campo eletromagnético é polarizado linearmente segundo um dos eixos de coordenadas e considera-se que o estado de polarização se mantém ao longo do comprimento da fibra, de modo que se possa utilizar uma aproximação escalar para o tensor da susceptibilidade;

3. O campo eletromagnético é quasi-monocromático, ou seja, o seu espectro está centrado em  $\omega_0$  com uma largura espectral de  $\Delta \omega / \omega_0$ , tal que  $\Delta \omega / \omega_0 \ll 1$ .

Agora, considerando apenas a parcela linear em função de *E* e reescrevendo a Equação (2.3.30) no domínio da frequência, tem-se:

$$\nabla^2 E(\vec{r},\omega) - \varepsilon(\omega) \frac{\omega^2}{c^2} E(\vec{r},\omega) = 0$$
(2.3.31)

onde:  $\vec{E(r,\omega)}$  é a transformada de Fourier de  $\vec{E}(\vec{r},t)$  definida como:

$$E(\vec{r},\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}(\vec{r},t) \cdot e^{(j\omega t)} dt$$
(2.3.32)

A permissividade apresentada na Equação (2.3.14) pode ser reescrita dependente da frequência (*ω*):

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \chi_{xx}^{(1)}(\omega) \tag{2.3.33}$$

onde:  $\chi_{xx}^{(1)}(\omega)$  é a transformada de Fourier de  $\chi_{xx}^{(1)}(t)$ . Como  $\chi_{xx}^{(1)}(\omega)$  é geralmente complexo, assim, é possível relacionar suas partes real e imaginária com o coeficiente do índice de refração linear  $n(\omega)$  e o coeficiente de absorção linear  $\alpha(\omega)$  pela definição: <sup>(61)</sup>

$$\varepsilon = \left(n + j\frac{\alpha \cdot c}{2 \cdot \omega}\right)^2 \tag{2.3.34}$$

Com a análise das equações apresentadas é possível determinar o índice de refração e a atenuação em função das componentes dos tensores susceptibilidade linear e não linear da sílica. Assim, das Equações (2.3.33) e (2.3.34), *n* e  $\alpha$  são relacionados com  $\chi_{xx}^{(1)}$  pelas seguintes expressões:

$$n(\omega) = 1 + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Re}\left[\chi_{xx}^{(1)}(\omega)\right]$$
(2.3.35)

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega}{n \cdot c} \cdot \operatorname{Im}\left[\chi_{xx}^{(1)}(\omega)\right]$$
(2.3.36)

onde: Re é a parte real e Im é a parte imaginária.

As relações de *n* e  $\alpha$  com a parte não linear da susceptibilidade  $\chi_{xxxx}^{(3)}$  são apresentadas a seguir:

$$n_{2NL}(\omega) = \frac{3}{8 \cdot n} \cdot \operatorname{Re}\left[\chi_{xxxx}^{(3)}(\omega)\right]$$
(2.3.37)

$$\alpha_{2NL}(\omega) = \frac{3 \cdot \omega}{4 \cdot n \cdot c} \cdot \operatorname{Im}\left[\chi_{xxxx}^{(3)}(\omega)\right]$$
(2.3.38)

onde:  $n_{2NL}$  é o coeficiente do índice de refração não linear e  $\alpha_{2NL}$  é o coeficiente de absorção não linear de dois fótons.

Essas relações não serão detalhadas neste trabalho, porém um estudo mais aprofundado pode ser encontrado na literatura citada. <sup>(61)</sup>

Duas outras simplificações podem ser feitas antes de resolver a Equação (2.3.31). Em primeiro lugar, por causa das baixas perdas das fibras ópticas na região de comprimentos de onda de interesse, a parte imaginária de  $\varepsilon(\omega)$  é pequena em comparação com a parte real, assim, pode-se substituir  $\varepsilon(\omega)$  por  $n^2(\omega)$ . Em segundo lugar, como  $n(\omega)$  é muitas vezes independente das coordenadas espaciais, tanto no núcleo quanto na casca de fibras de índice degrau. Com essas simplificações, pode-se determinar uma nova forma para a Equação (2.3.31):

$$\nabla^{2} E + n^{2}(\omega) \frac{\omega^{2}}{c^{2}} E = 0$$
(2.3.39)

#### 2.3.3 Guias de onda cilíndricos

Nas análises adiante será considerado o sistema coordenado representado na Figura (2.3.1.), a seguir.



Figura 2.3.1. – Eixos de coordenadas em um guia de onda cilíndrico.

Em qualquer frequência  $\omega$ , as fibras ópticas podem suportar um número finito de modos guiados. O que define cada um desses modos é a distribuição espacial  $\vec{E(r,\omega)}$  ser uma solução da equação de onda (2.3.39) e satisfazer todas as condições de contorno apropriadas. Além disso, a fibra pode suportar modos contínuos de radiação não guiada. (61; 63; 64)

Assim, dando continuidade à análise da Equação (2.3.39), pode-se dizer que as soluções para as equações de propagação da onda para um meio homogênio e isotrópico são bastante simplificadas se for assumida a existência dos modos fracamente guiados <sup>(65)</sup>, o que permite a decomposição dos modos em um conjunto de modos linearmente polarizados ortogonal e transversalmente. <sup>(66; 67)</sup>

Considerando a simetria cilíndrica das fibras ópticas e utilizando transformação trigonométrica padrão é usual expressar a equação de propagação de onda em coordenadas cilíndricas em função de  $\rho$ ,  $\phi$ , e z:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial E}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial \phi} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + n^2 \cdot k_0^2 \cdot E = 0$$
(2.3.40)

onde:  $k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$  e *E* é a transformada de Fourier do campo elétrico *E*, definido

como:

$$\vec{E}(\vec{r},t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(\vec{r},\omega) \cdot e^{(-j\omega t)} d\omega$$
(2.3.41)

Já o índice de refração *n* é uma função da distância radial  $\rho$  e é dado por:

$$n(\rho) = n_1 \qquad \qquad \rho \le a \qquad (2.3.42)$$

$$n(\rho) = n_2 \qquad \qquad \rho > a \qquad (2.3.43)$$

onde: *a* é o raio do núcleo e  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração do núcleo e da casca, respectivamente.

Similarmente ao campo elétrico  $\vec{E}(\vec{r},t)$ , existe a relação para o campo magnético  $\vec{H}(\vec{r},t)$  que satisfaz as equações de Maxwell. Somente duas ( $E_z \in H_z$ ) das seis componentes dos campos de saída são independentes e normalmente são utilizadas nos cálculos.

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial\rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial\rho} + \frac{1}{\rho^2}\cdot\frac{\partial^2}{\partial\phi} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2\cdot k_0^2\right]\cdot\left[\frac{E_z}{H_z}\right] = 0$$
(2.3.44)

A equação da onda para  $E_z$  é resolvida utilizando o método de separação de variáveis e admite uma solução do tipo:

$$E_{z}(\vec{r},\omega) = A(z,\omega) \cdot F(\rho) \cdot e^{(\pm jm\phi)} \cdot e^{(j\beta z)}$$
(2.3.45)

onde:  $A(z, \omega)$  é uma função normalizadora com uma variação lenta ao longo da propagação z, A é a constante de normalização, m é um número inteiro que quantifica o modo de propagação,  $\beta$  é a constante de propagação e  $F(\rho)$  é a função da distribuição modal do campo elétrico, cuja solução é dada por:

$$\frac{d^2 F(\rho)}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dF(\rho)}{d\rho} + \left(n^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{\rho^2}\right) F(\rho) = 0$$
(2.3.46)

onde: o índice de refração  $n = n_1$  para  $\rho \le a$  em uma fibra com núcleo de raio a e valor  $n = n_2$  fora do núcleo ( $\rho > a$ ), ou seja, na casca.

A equação (2.3.46) é conhecida como a forma diferencial da função de Bessel (Jm). A solução geral dentro do núcleo da fibra óptica é uma combinação linear entre uma função de Bessel e uma função de Neumann de ordem m.

$$F(\rho) = C_1 \cdot J_m(\kappa \cdot \rho) + C_2 \cdot N_m(\kappa \cdot \rho)$$
(2.3.47)

onde: Jm é a função de Bessel, Nm é a função de Neumann e as constantes  $C_1$  e  $C_2$  são determinadas usando as condições de contorno.

E:

$$\kappa = (n_1^2 \cdot k_0^2 - \beta^2)^{1/2}$$
(2.3.48)

Como  $N_m(\kappa \cdot \rho)$  tem uma singularidade em  $\rho = 0$ , é necessário impor a condição  $C_2 = 0$  para que se tenha uma solução finita no núcleo. A constante  $C_1$  pode ser absorvida pela constante *A* da equação (2.3.45). Assim:

$$F(\rho) = J_m(\kappa \cdot \rho), \qquad \rho \le a \qquad (2.3.49)$$

Na região da casca, a solução  $F(\rho)$  deve ser tal que, cai exponencialmente para grandes  $(\rho \rightarrow \infty)$ , ou seja, o campo eletromagnético se propaga primordialmente no núcleo da fibra e se esvaece na casca, onde deve tender rapidamente a zero. A função modificada de Hankel  $K_m$  representa tal solução. Por isso:

$$F(\rho) = K_m(\gamma \cdot \rho), \qquad \rho > a \qquad (2.3.50)$$

onde:  $\gamma$  é a constante de decaimento do campo evanescente, definida como:

$$\gamma = (\beta^2 - n_2^2 \cdot k_0^2)^{1/2}$$
(2.3.51)

Para valores de  $\gamma \gg 0$  o modo é fortemente confinado no núcleo e quando  $\gamma = 0$  o campo na casca deixa de ser guiado e chama-se modo irradiado.

O mesmo procedimento pode ser seguido para obter a componente de campo magnético  $H_z$ . Assim:

$$\left[\frac{E(\rho,t)}{H(\rho,t)}\right] = \left[\frac{A}{B}\right] J_1(\kappa \cdot \rho) e^{\pm j\phi} \qquad \rho \le a \qquad (2.3.52)$$

$$\left\lfloor \frac{E(\rho,t)}{H(\rho,t)} \right\rfloor = \left[ \frac{C}{D} \right] K_1(\gamma \cdot \rho) e^{\pm j\phi} \qquad \qquad \rho > a \qquad (2.3.53)$$

onde: A, B, C, e D são constantes arbitrárias.

Para que as funções de Bessel e Hankel,  $J_m$  e  $K_m$ , respectivamente, descrevam o comportamento do campo corretamente, ou seja, oscilação no núcleo e decaimento exponencial na casca, as constantes  $\kappa$  e  $\gamma$  devem ser puramente reais, impondo uma restrição na faixa de variação possível da constante de propagação  $\beta$  da seguinte forma:

$$n_2 \cdot k_0 \le \beta \le n_1 \cdot k_0 \tag{2.3.54}$$

е

е

$$\kappa^2 + \gamma^2 = (n_1^2 - n_2^2)k_0^2 \tag{2.3.55}$$

A aplicação das condições de contornos necessárias à continuidade das componentes tangenciais de campo de *E* e *H* ao longo da interface núcleo/casca exige que  $E_z$ ,  $H_z$ ,  $E_{\phi}$ , e  $H_{\phi}$  sejam iguais quando  $\rho = a$ . A igualdade destas componentes de campo em  $\rho = a$  e a nulidade do campo no infinito leva a uma equação de autovalor, apresentada em (2.3.56), cujas soluções determinam a constante de propagação  $\beta$  para os modos de uma fibra de índice degrau. Essa equação de autovalor possui diversas soluções de  $\beta$  para cada valor inteiro de *m* e

cada autovalor  $\beta$  corresponde a um modo específico suportado pela fibra. (66; 67; 68)

$$\left[\frac{J_{m}^{'}(\kappa \cdot a)}{\kappa \cdot J_{m}(\kappa \cdot a)} + \frac{K_{m}^{'}(\gamma \cdot a)}{\gamma \cdot K_{m}(\gamma \cdot a)}\right] \left[\frac{J_{m}^{'}(\kappa \cdot a)}{\kappa \cdot J_{m}(\kappa \cdot a)} + \frac{n_{2}^{2}}{n_{1}^{2}}\frac{K_{m}^{'}(\gamma \cdot a)}{\gamma \cdot K_{m}(\gamma \cdot a)}\right] = \left(\frac{m \cdot \beta \cdot k_{0}(n_{1}^{2} - n_{2}^{2})}{a \cdot n_{1} \cdot \kappa^{2} \cdot \gamma^{2}}\right)^{2}$$
(2.3.56)

Geralmente, as configurações de campos ou modos suportados em uma fibra de índice degrau apresentam seis componentes de campos não nulos, sendo eles os modos transversal elétrico ( $TE_{mn}$ ), transversal magnético ( $TM_{mn}$ ) e os modos híbridos ( $HE_{mn}$  ou  $EH_{mn}$ ). Costuma-se enumerar tais soluções em ordem numérica descendente e denotá-las por  $\beta_{mn}$  para um dado número inteiro m, varia-se n=0,1,2,... Cada valor de  $\beta_{mn}$  corresponde a um possível modo de propagação, cuja distribuição espacial de campo obedece às equações das componentes  $E_z, H_z, E_\rho, H_\rho, E_\phi, H_\phi$  do núcleo e da casca da fibra.

Para fibras ópticas que possuam diferença muito pequena entre o índice de refração do núcleo e da casca ( $\Delta n \ll 1$ ), as soluções podem ser simplificadas, como visto anteriormente, se forem assumidos os modos fracamente guiados.

#### 2.3.4 Fibra monomodo

O número de modos suportados por uma fibra ótica em um determinado comprimento de onda depende, fundamentalmente, de parâmetros de construção do guia, como por exemplo, raio do núcleo (*a*) e da diferença entre os índices de refração do núcleo e da fibra  $(n_1 - n_2)$ . <sup>(61)</sup>

Um parâmetro importante para cada modo é a frequência de corte, que é determinada pela condição ( $\gamma = 0$ ). O valor de  $\kappa$  quando ( $\gamma = 0$ ) para um determinado modo determina a frequência de corte obtida através da Equação (2.3.55). Isto é útil para definir a frequência normalizada V pela relação:

$$V = \kappa_c \cdot a = k_0 \cdot a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$
(2.3.57)

.....

onde:  $\kappa_c$  é obtido da Equação (2.3.55) definindo ( $\gamma = 0$ ).

A equação de autovalor (2.3.56) pode ser usada para determinar os valores de *V* para cada modo quando se atinge a frequência de corte. Esse processo é complicado, mas tem sido descrito na literatura. <sup>(66; 67; 68)</sup> Como apenas fibras monomodo são de interesse neste trabalho, a discussão será limitada à condição de corte que permite à fibra oferecer suporte a um único modo. Uma fibra monomodo é aquela que suporta apenas o modo híbrido  $HE_{11}$ , também conhecido como o modo fundamental. Na aproximação dos modos fracamente guiados, o modo híbrido  $HE_{11}$  é considerado idêntico ao modo  $LP_{01}$ . Uma fibra só suportará um único modo de propagação se  $V < V_c$ , onde  $V_c$  é a menor solução de  $J_0(V_c) = 0$  ou  $V_c \approx 2,405$ . Com isso pode-se obter o comprimento de onda de corte  $\lambda_c$  para fibras monomodo, utilizando:  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_c}$  e  $V_c = 2,405$  na Equação (2.3.57). Assim:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda_c} \cdot a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \le 2,405$$
(2.3.58)

O número de modos suportados por uma fibra óptica é reduzido com a diminuição do diâmetro do núcleo da fibra ou quando comprimentos de onda maiores são injetados no núcleo. Fibras ópticas do tipo monomodo que operam nas regiões do visível e do infravermelho do espectro geralmente necessitam de núcleo de apenas alguns micrometros de diâmetro.

### 2.3.5 Rede de Bragg em fibra óptica

Pode-se dizer, de uma forma bem sucinta, que uma grade de Bragg em fibra óptica consiste em uma modulação periódica ou quasi-periódica do índice de refração no núcleo de uma fibra monomodo ao longo do eixo longitudinal, coincidente com o eixo z. <sup>(13)</sup> A modulação do índice de refração pode ser formada pela exposição do núcleo fotossensível a um padrão de interferência intenso, criando planos paralelos de maior e menor amplitude de índice de refração perpendiculares ao eixo longitudinal z.

O princípio fundamental por trás do funcionamento de uma FBG é a reflexão

de Fresnel, a qual exprime que a luz propagando entre meios com diferentes índices de refração pode ser refletida ou refratada na interface. Assim, como visto anteriormente, uma rede de Bragg atua como um filtro específico a certos comprimentos de onda, refletindo-os e transmitindo o restante do espectro da luz incidente.

Na Figura (2.3.2.) é apresentado um desenho ilustrativo de uma grade de Bragg em fibra óptica e um gráfico representando o perfil da variação do índice de refração no núcleo da fibra.



Figura 2.3.2. – Desenho ilustrativo de uma grade de Bragg uniforme inscrita em fibra óptica Fonte: desenho baseado em imagem do trabalho de Nogueira. <sup>(50)</sup>

As grades de Bragg do tipo uniforme, representadas pela Figura (2.3.2), cujos planos paralelos possuem período fixo e são perpendiculares ao eixo longitudinal da fibra geralmente possuem um perfil de modulação do índice de refração senoidal. Essas grades são fundamentais para o estudo de outros tipos de grades com outros tipos de estruturas. <sup>(13)</sup>

Os planos de índice de refração induzidos no núcleo podem ser descritos como uma perturbação do índice efetivo do(s) modo(s) guiado(s) pela seguinte equação: <sup>(69; 70)</sup>

$$\delta n_{ef}(z) = \overline{\delta n_{ef}}(z) \left\{ 1 + Ap(z) \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \varphi(z)\right] \right\}$$
(2.3.59)

onde:  $\delta n_{ef}(z)$  representa a variação média do índice de refração ao longo da região da FBG,  $\varphi(z)$  é a aperiodicidade espacial da modulação, ou seja, é o gorjeio (*chirp*) da grade e  $\Lambda$  é a período da grade.

As propriedades óticas de uma FBG, essencialmente, são determinadas pela variação da mudança induzida no índice  $\delta n_{ef}$  ao longo do eixo z da fibra.

O termo Ap(z) que está multiplicando o co-seno é a função de apodização e pode assumir diversas configurações dependendo do perfil da perturbação do índice de refração do núcleo. Outros perfis como, por exemplo, tangente hiperbólica, coseno elevado, senoidal, gaussiano com nível "dc" zero, de Blackman, de Cauchy, entre outros, podem ser encontrado na literatura. <sup>(36; 43)</sup>

Na Figura (2.3.3.) são apresentados alguns tipos de perfis de variação do índice de refração ao longo do eixo da fibra.



Figura 2.3.3. – Desenho ilustrativo de exemplos de perfis de índice de refração de grades de Bragg inscritas em fibra óptica. a) perfil uniforme, b) perfil apodizado gaussiano c) perfil apodizado gorjeio ou *chirped* e d) perfil apodizado gaussiano com média zero ou nível dc zero.

Será abordado nesta dissertação apenas o perfil uniforme, o qual possui a seguinte expressão:

$$Ap_{\mu}(z) = \upsilon(z) \tag{2.3.60}$$

onde:  $Ap_u(z)$  é a função para uma rede uniforme sem apodização e v(z) é a visibilidade das franjas de intensidade do índice, que pode assumir valores entre 0 e 1.

$$\upsilon = \frac{\delta n_{\text{max}} - \delta n_{\text{min}}}{\delta n_{\text{max}} + \delta n_{\text{min}}}$$
(2.3.61)

Nas grades com perfil uniforme, o fim abrupto da modulação do índice de refração nos extremos da grade ocasiona no espectro de resposta da rede um efeito similar ao que ocorre na resposta de filtros digitais quando os dados utilizados são truncados, como por exemplo, numa função retangular. <sup>(71)</sup> Esse início e fim abruptos se assemelham a uma função retangular, cuja transformada de Fourier produz como resposta do espectro de reflexão a função sinc com seus lóbulos laterais associados. A apodização tem como objetivo minimizar os lóbulos laterais do espectro de resposta de uma FBG, assim como o janelamento (*windowing*) tem o propósito de minimizar os lóbulos laterais do espectro de resposta do espectro de resposta do espectro de resposta de uma FBG, assim como o janelamento (*windowing*) tem o propósito de minimizar os lóbulos laterais do espectro de resposta de uma filtro calculado digitalmente. <sup>(72)</sup>

Na prática, a apodização permite a supressão dos lóbulos laterais no espectro de reflexão pelo aumento gradual do coeficiente de acoplamento na entrada da grade, assim como a diminuição gradual na saída da grade. Os benefícios da apodização não se manifestam apenas na qualidade do espectro de reflexão, mas também nas características de dispersão, pois a apodização pode essencialmente, reduzir o tempo de atraso de grupo de uma grade com perfil *chirp*. <sup>(73)</sup>

Se uma fibra óptica de perfil de índice em degrau tiver gravada em seu núcleo uma variação de índice de refração  $\delta n_1(z)$  com perfil uniforme, pode-se encontrar uma relação para determinar a perturbação do índice efetivo, como segue:

$$\delta n_{ef}(z) \cong \Gamma \delta n_1(z) \tag{2.3.62}$$

onde:  $\Gamma$  é o fator de confinamento de potência no núcleo.

O fator de confinamento no núcleo para o modo de interesse pode ser obtido pela resolução da equação de autovalor característica dos guias de onda combinando os campos e as adequadas condições de contorno: <sup>(67; 69)</sup>

$$V\sqrt{1-b}\frac{J_{l-1}(V\sqrt{1-b})}{J_{l}(V\sqrt{1-b})} = -V\sqrt{b}\frac{K_{l-1}(V\sqrt{b})}{K_{l}(V\sqrt{b})}$$
(2.3.63)

sendo que:

$$V = k_0 a \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$
(2.3.64)

$$b = \frac{(n_{ef}^2 - n_2^2)}{(n_1^2 - n_2^2)}$$
(2.3.65)

onde: *V* é a frequência normalizada,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  é o número de onda, *l* é a ordem azimutal do modo considerado na função de Bessel de primeiro tipo *J* e na função de Bessel modificada de segundo tipo *K*, *a* é o raio do núcleo, *b* é o índice efetivo normalizado e  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração do núcleo e da casca, respectivamente.

Assim, uma vez conhecidos  $V \in b$ , pode-se encontrar o fator de confinamento:

$$\Gamma = \frac{b^2}{V^2} \left[ 1 - \frac{J_l^2 (V \sqrt{1-b})}{J_{l+1} (V \sqrt{1-b}) J_{l-1} (V \sqrt{1-b})} \right]$$
(2.3.66)

O modo de interesse no caso da fibra monomodo é o  $LP_{01}$ , que, com a aproximação da teoria dos modos fracamente guiados, tem  $b_{01}$  como a solução da

relação de dispersão apresentada na Equação (2.3.65)(2.3.63).

#### 2.3.5.1 Teoria dos modos acoplados

A teoria dos modos acoplados <sup>(66; 67; 69; 74; 75)</sup> apresenta uma formulação elegante e completa da descrição física das redes de difração em fibra óptica, a qual inclui as redes de Bragg.

De acordo com a teoria dos modos acoplados, a modulação no índice de refração efetivo promove a transferência de energia entre modos guiados numa fibra óptica, favorecendo assim o aparecimento de ressonâncias em determinadas direções. Nas grades de Bragg em fibra óptica, considera-se a existência de duas direções, a propagante e a contrapropagante. A ressonância é observada para esta última sempre que se verifique uma determinada relação entre o comprimento de onda do campo eletromagnético incidente e o período espacial de modulação do índice de refração do meio. Esta relação é genericamente conhecida por condição de Bragg. A condição de Bragg pode ser deduzida por meio da conservação da energia e da conservação do momento e é fundamental na modelagem da FBG como sensor.

A luz guiada ao longo do núcleo de uma fibra óptica será espalhada em cada um dos planos paralelos e, se a condição de Bragg não for satisfeita, a luz refletida em cada um dos planos subsequentes se tornará progressivamente fora de fase, chegando a se cancelar. Quando a condição de Bragg é satisfeita, as contribuições da luz refletida de cada plano da grade somam-se construtivamente na direção contrapropagante para formar uma banda de reflexão com um comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede. <sup>(13)</sup>

Pela aproximação da teoria dos modos acoplados, pode-se assumir que a componente transversal do campo elétrico pode ser escrita como a superposição dos modos ideais, referenciados pelo índice j, em um guia de onda ideal e sem perturbações na grade, de acordo com: <sup>(69)</sup>

$$\vec{E}_{t}(x, y, z, t) = \sum_{j} \left[ A_{j}(z) e^{(i\beta_{j}z)} + B_{j}(z) e^{(-i\beta_{j}z)} \right] \cdot \vec{e}_{jt}(x, y) e^{(-i\omega t)}$$
(2.3.67)

onde:  $A_j(z)$  e  $B_j(z)$  representam, respectivamente as amplitude do modo de índice *j* para as direções propagante e contrapropagante, em função da posição. O parâmetro  $\vec{e}_{jt}(x, y)$  representa o modo transversal do campo ou os modos de radiação *LP* no núcleo, como mostrado em (2.3.67), mas poderia também descrever os modos da casca.

Em condições ideais, os modos são ortogonais e, portanto, não trocam energia entre eles. Contudo, a presença de uma perturbação periódica no índice de refração provoca geralmente o acoplamento entre os vários modos. Assim sendo, as amplitudes  $A_j(z)$  e  $B_j(z)$  passam a variar com a posição de acordo com as equações seguintes:

$$\frac{dA_{j}}{dz} = i \sum_{k} A_{k} (K_{kj}^{t} + K_{kj}^{z}) e^{\left[i(\beta_{k} - \beta_{j})z\right]} + i \sum_{k} B_{k} (K_{kj}^{t} - K_{kj}^{z}) e^{\left[-i(\beta_{k} - \beta_{j})z\right]}$$
(2.3.68)

$$\frac{dB_{j}}{dz} = -i\sum_{k} A_{k} (K_{kj}^{t} - K_{kj}^{z}) e^{\left[i(\beta_{k} - \beta_{j})z\right]} - i\sum_{k} B_{k} (K_{kj}^{t} + K_{kj}^{z}) e^{\left[-i(\beta_{k} - \beta_{j})z\right]}$$
(2.3.69)

onde:  $K_{kj}^{t}$  e  $K_{kj}^{z}$  são respectivamente os coeficientes de acoplamento transversal e longitudinal dos os modos j e k, sendo que este último pode ser desprezado para modos guiados em fibra óptica. Assim sendo, o coeficiente transversal  $K_{kj}^{t}(z)$  pode ser determinado por:

$$K_{kj}^{t}(z) = \frac{\omega}{4} \iint_{\infty} \Delta \varepsilon(x, y, z) \cdot \vec{e}_{kt}(x, y) \cdot \vec{e}_{jt}^{*}(x, y) dxdy$$
(2.3.70)

onde:  $\Delta \varepsilon \cong 2n\delta n$  é a amplitude da perturbação da permissividade elétrica.

Na maioria das grades em fibra a mudança induzida no índice  $\delta n(x, y, z)$  é uniforme em todo o núcleo e inexistente fora dele. Portanto, pode-se reescrever a

equação (2.3.59) com a substituição de  $\bar{\delta n_{ef}}(z)$  por  $\bar{\delta n_1}(z)$ .

$$K_{kj}^{t}(z) = \sigma_{kj}(z) + 2\kappa_{kj}(z)\cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \varphi(z)\right]$$
(2.3.71)

E definido os dois novos coeficientes como:

$$\sigma_{kj}(z) = \frac{\omega n_1}{2} \overline{\delta n_1}(z) \iint_{nucleo} \vec{e}_{kl}(x, y) \cdot \vec{e}_{jl}^*(x, y) dxdy$$
(2.3.72)

$$\kappa_{kj}(z) = \frac{\upsilon}{2} \sigma_{kj}(z) \tag{2.3.73}$$

onde:  $\sigma_{kj}(z)$  representa o coeficiente de acoplamento "dc" enquanto que  $\kappa_{kj}(z)$  designa o coeficiente de acoplamento "ac".

Considerando apenas o acoplamento entre os dois modos de núcleo propagante e contrapropagantes de amplitude  $A_j(z)$  e  $B_j(z)$ , respectivamente, e desprezando quaisquer contribuições provenientes de outros modos, de núcleo e de casca, pode-se simplificar o sistema formado pelas equações (2.3.68) e (2.3.69), uma vez que na proximidade da situação de ressonância, ocorre a sobreposição da reflexão da componente de amplitude  $A_j(z)$  com a componente de amplitude  $B_j(z)$ , permitindo que o sistema passe a ser definido pelas componentes transmitida e refletida do modo guiado que se propaga segundo +z. <sup>(76)</sup>

$$\begin{cases} \frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}R(z) + i\kappa S(z) \\ \frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) - i\kappa^* R(z) \end{cases}$$
(2.3.74)

onde:  $S(z) = A(z)e^{i\delta_d z - \frac{\varphi}{2}}$  designa a amplitude da componente refletida e  $R(z) = B(z)e^{-i\delta_d z + \frac{\varphi}{2}}$  a amplitude da componente transmitida. O termo  $\hat{\sigma}$  é um coeficiente mais geral de acoplamento médio ou acoplamento "dc", definido por:

$$\hat{\sigma} = \delta_d + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz}$$
(2.3.75)

onde:  $\sigma$  é o coeficiente de acoplamento médio para uma grade de Bragg em fibra óptica monomodo, que pode ser definido como: <sup>(43)</sup>

$$\sigma = \frac{2\pi\delta \bar{n}_{ef}(z)}{\lambda}$$
(2.3.76)

O coeficiente de acoplamento "ac"  $\kappa$  é dado em função do coeficiente médio e da visibilidade por:

$$\kappa = \sigma(z)\frac{\upsilon}{2} = \pi \upsilon \frac{\bar{\delta n_{ef}}(z)}{\lambda}$$
(2.3.77)

O termo  $\delta_d$  na Equação (2.3.75) refere-se ao desvio entre o vetor de propagação da onda incidente e o vetor de onda da rede, sendo por isso denominado por vetor de dessintonia, definido através da seguinte expressão:

$$\delta_d = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} \tag{2.3.78}$$

onde:  $\beta = \frac{2\pi n_{ef}}{\lambda}$ .

Podendo se reescrito da forma:

$$\delta_d = 2\pi n_{ef} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right)$$
(2.3.79)

### 2.3.5.2 Condição de Bragg

Na situação de ressonância o vetor dessintonia se anula no comprimento de

onda de Bragg e a Equação (2.3.78) se converte na condição de Bragg:

$$\lambda_{B} = 2n_{ef}\Lambda \tag{2.3.80}$$

onde:  $\lambda_{B}$  é o comprimento de onda central no espaço livre da luz de entrada que será refletida pela rede de Bragg,  $n_{ef}$  é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra para o comprimento de onda central no espaço livre e  $\Lambda$  é a periodicidade da grade.

O espectro de reflexão da rede de Bragg apresenta um pico centrado aproximadamente em  $\lambda_B$  e o período de uma rede de Bragg  $\Lambda$  é pequeno, tipicamente da ordem de  $1\mu m$ .

Se uma grade de Bragg tem perfil uniforme ao longo de z, então o valor médio da amplitude de modulação do índice de refração  $\delta n_{ef}(z)$  é constante e a derivada que descreve a aperiodicidade (*chirp*) da grade é nula,  $\frac{d\varphi}{dz} = 0$ . Para este tipo de grade, o sistema de equações diferenciais (2.3.74) pode ser resolvido analiticamente com determinadas condições de contorno, uma vez que os coeficientes  $\kappa$ ,  $\sigma$ , e  $\hat{\sigma}$  possuem valores constantes.

Para uma grade de Bragg uniforme e de comprimento *L*, a refletividade pode ser encontrada assumindo-se que o campo de propagação incidente vem de  $z = -\infty$ , implicando que R(-L/2)=1 e que nenhum campo contrapropagante exista para  $z \ge L/2$ , isto é, S(L/2)=0. O coeficiente de reflexão em amplitude do campo elétrico  $\rho = S(-L/2)/R(-L/2)$  e a refletividade  $R = |\rho|^2$  são dados por:

$$\rho = \frac{-\kappa senh\left(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L\right)}{\hat{\sigma}senh\left(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L\right) + i\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}cosh\left(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L\right)}$$
(2.3.81)

е

$$R = \frac{\operatorname{senh}^{2}\left(\sqrt{\kappa^{2} - \hat{\sigma}^{2}}L\right)}{\operatorname{cosh}^{2}\left(\sqrt{\kappa^{2} - \hat{\sigma}^{2}}L\right) - \frac{\hat{\sigma}^{2}}{\kappa^{2}}}$$
(2.3.82)
Analisando o comportamento da refletividade em relação ao argumento das funções hiperbólicas apresentada na Equação (2.3.82), pode-se verificar que a função *R* se anula, em comprimentos de onda em que ocorre  $\hat{\sigma} = |\kappa|$ . Para os comprimentos de onda em que o argumento das funções hiperbólicas é complexo, a função tem um comportamento oscilatório, uma vez que as funções hiperbólicas tornam-se funções trigonométricas ordinárias. Esse regime ocorre quando  $\hat{\sigma} > |\kappa|$  e quando  $\hat{\sigma} < |\kappa|$ , casos em que a refletividade cresce e decresce ao longo da FBG.

Utilizando a Equação (2.3.82), obtém-se que a refletividade máxima de uma grade de Bragg é dada por:

$$R_{max} = tanh^2 (\kappa L) \tag{2.3.83}$$

O que ocorre quando  $\hat{\sigma} = 0$  ou no comprimento de onda:

$$\lambda_{max} = \left(1 + \frac{\bar{\delta n_{ef}}}{n_{ef}}\right) \lambda_B$$
(2.3.84)

Para grades fracas, onde  $\kappa L \ll 1$ , os valores de  $\lambda_{max}$  e  $\lambda_{B}$  se tornam muito próximos. Apesar dos comportamentos de ambos coincidirem para perturbações uniformes de temperatura ou de deformação na FBG, os valores absolutos de  $\lambda_{max}$  e  $\lambda_{B}$ , nunca são exatamente os mesmos.

# 2.3.5.3 Largura de banda da grade de Bragg

A largura da faixa de passagem ou a largura de banda de uma FBG pode ser definida como a largura entre os primeiros zeros laterais (FWFZ) ao máximo de refletividade  $\lambda_{max}$ :

$$\frac{\Delta\lambda_{FWFZ}}{\lambda} = \frac{\upsilon \delta n_{ef}}{n_{ef}} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_B}{\upsilon \delta n_{ef}L}\right)^2}$$
(2.3.85)

Para as redes fracas, o sinal atravessa a rede na sua totalidade, pelo que é observável um incremento no valor da refletividade máxima com o comprimento da mesma. Assim, para grades fracas, ou seja, quando  $\nu \delta n_{ef} L \rightarrow 0$  a largura de banda é inversamente proporcional ao comprimento da grade:

$$\frac{\Delta \lambda_{FWFZ}}{\lambda} \approx \frac{\lambda_B}{Ln_{ef}} \approx \frac{2}{N}$$
(2.3.86)

onde:  $N = \frac{L}{\Lambda}$  é o número de períodos da grade.

Para grades fortes, ou seja, quando  $v\delta n_{ef} \gg \lambda_B L$ , a largura de banda é independente do comprimento da grade. Neste caso, o acoplamento entre modos contrapropagantes é de tal intensidade que a luz não chega a penetrar em toda a extensão da FBG, sendo totalmente refletida antes disso ocorridos. Para essas redes, a largura FWFZ tem aproximadamente o mesmo valor que a largura total a meia altura (FWHM) e pode ser determinada por:

$$\frac{\Delta \lambda_{FWHM}}{\lambda} \approx \frac{\upsilon \lambda_B}{n_{ef}}$$
(2.3.87)

A presença de máximos secundários na refletividade é observada para ambos os tipos de grades. Como visto anteriormente, sabe-se que essas ressonâncias devem-se à ocorrência de reflexões múltiplas na extremidade da rede, decorrentes da descontinuidade no índice de refração, originando assim um efeito semelhante às cavidades de Fabry-Perot, contudo, a técnica de apodização revela-se eficaz na supressão dessas ressonâncias.

## 2.3.5.4 Atraso de grupo e dispersão da grade de Bragg

As propriedades dispersivas das FBG são de grande interesse dependendo da aplicação das grades, como por exemplo, compensação de dispersão,

estreitamento de pulso e componentes a laser semicondutor e a fibra óptica. (69)

Os parâmetros da dispersão da luz refletida de uma grade e o atraso de grupo podem ser determinados através do coeficiente de reflexão  $\rho$  e da fase. Na Equação (2.3.81) foi apresentada uma solução analítica para o coeficiente de reflexão em amplitude,  $\rho$ , para uma FBG com perfil uniforme. Como esta grandeza é complexa, existe uma fase do sinal refletido,  $\theta_{o}$ , a ela associada, dada por:

$$\theta_{\rho} = \operatorname{arctg}\left[\frac{\operatorname{Imag}(\rho)}{\operatorname{Real}(\rho)}\right]$$
(2.3.88)

A partir da fase do sinal refletido é possível deduzir a expressão para o atraso de grupo sofrido pelo sinal refletido. Considerando  $\theta_{\rho} \equiv phase(\rho)$ , tem-se que a decomposição de  $\theta_{\rho}$  em uma série de Taylor em torno de  $\omega_0$  tem sua primeira derivada proporcional à frequência  $\omega$ , sendo a mesma definida como o atraso de tempo ou atraso de grupo:

$$\tau_{\rho} = \frac{d\theta_{\rho}}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta_{\rho}}{d\lambda}$$
(2.3.89)

A dispersão imposta por uma fibra óptica ao sinal por ela refletido é dada pela derivada do atraso de grupo em função do comprimento de onda,  $D = \frac{d\tau_{\rho}}{d\lambda}$ :

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2 \theta_{\rho}}{d\omega^2}$$
(2.3.90)

# 2.4 SIMULAÇÃO DE GRADES DE BRAGG

A determinação teórica do espectro de reflexão de grade de Bragg com perfil uniforme pode ser feita de uma maneira relativamente simples utilizando ferramentas como a transformada de Laplace, ou servindo-se de técnicas numéricas para sistemas de equações diferenciais, como por exemplo, o método de Runge-Kutta para a resolução do sistema de equações da teoria dos modos acoplados apresentado na Equação (2.3.74). Já a análise de grades de Bragg com estruturas mais complexas, como grades com *chirp* ou com perfis de modulação do índice de refração apodizados, exige técnicas de simulação computacional, uma vez que tratar diretamente esses casos com a teoria de modos acoplados pode ser bastante trabalhoso.

Diversas técnicas de análise permitem resolver o sistema de equações dos modos acoplados com relativo esforço de processamento numérico, porém cada técnica possui suas limitações inerentes. A técnica desenvolvida por Rouard <sup>(77)</sup> para a análise de guias de onda metálicos e extendida por Weller-Brophy e Hall <sup>(78; 79)</sup> adota a análise de camadas menores que um comprimento de onda, permitindo a análise de grades com perfis incomuns, como um perfil em forma de dente de serra, entretanto, suas desvantagens são que o tempo de processamento computacional se torna elevado e que parte da exatidão é perdida devido a erros de arredondamento do processamento. <sup>(80)</sup>

Outra técnica utilizada para a resolução de funções de transferência de FBG complexas é a que utiliza a aproximação da teoria de Bloch <sup>(81)</sup> e possibilita uma análise física mais profunda nas características de dispersão das grades.

Mais recentemente, Peral *et al.* <sup>(82)</sup> apresentaram uma aproximação baseada no método de espalhamento inverso de Gel'Fand-Levitan-Marchenko, que está fundamentada na integração das equações de acoplamento e permite o projeto de grades com características bastante particulares, porém possui o defeito de tornar pouco compreensível o problema que está sendo resolvido.

Uma técnica rápida, simples e precisa que utiliza como ferramenta de cálculo o método das matrizes de transferência (TMM), <sup>(83)</sup> permite uma análise do comportamento espectral de uma estrutura com um perfil de índice de modulação complexo utilizando a combinação do método matricial e a aplicação da teoria dos modos acoplados.

No método das matrizes de transferência a FBG é dividida em segmentos longitudinais suficientemente pequenos e contíguos de forma que possam ser considerados uniformes. Para cada um desses segmentos obtém-se uma matriz de transferência. A resposta individual ou função de transferência de cada segmento pode ser obtida utilizando o sistema de Equações (2.3.74) da teoria dos modos acoplados. Calculadas as matrizes e desde que seja garantida a continuidade de fase entre elementos pode-se obter a função de transferência total da FBG multiplicando a função de transferência de todos os segmentos.

Assim, pelas características apontadas anteriormente, optou-se por utilizar essa técnica para a realização das simulações das grades de Bragg apresentadas nessa dissertação.

## 2.4.1 Método matricial

Cada segmento deve possuir um número inteiro de períodos e os parâmetros de saída calculados para essa seção, como a refletividade, a transmissividade e a fase são utilizadas como parâmetros de entrada no segmento adjacente da FBG. Dessa forma, cada segmento então poderá ter seu comportamento próprio em função do comprimento z.

Por ser um dispositivo passivo, uma rede de comprimento L pode ser tratada como um quadripolo e pode ser modelada matricialmente. <sup>(84)</sup>

A Figura (2.4.1.), a seguir, apresenta um desenho ilustrativo de uma FBG como um quadripolo.



Figura 2.4.1. – Desenho representativo de uma FBG como um quadripolo. Fonte: desenho baseado em imagem do trabalho de Neves. <sup>(84)</sup>

Primeiramente discretiza-se a rede em  $N_s$  seções uniformes de comprimento  $\Delta l$ , de forma que  $L = N_s \Delta l$ . A cada seção associa-se um sistema de coordenadas local cuja origem se localiza no centro da seção. Assim, todos os sistemas de coordenadas locais se iniciam em  $-\Delta l$  e terminam em  $\Delta l$ .

Para encontrar as condições de contorno assume-se uma onda incidente proveniente de  $z = -\infty$  e que no início da rede a transmissão normalizada será máxima R(0)=1, ou  $R(-\Delta l/2)=1$  (no sistema de coordenada z' do primeiro segmento, n=1) e, como não há reflexão além da rede, ou seja, para  $z \ge L$ , implica que S(L)=0, ou  $S(\Delta l/2)=0$  (no sistema de coordenada z' do último segmento,  $n=N_c$ ).

Assim, como o interesse da análise recai sobre a parcela da onda refletida pela grade, ao se considerar cada segmento de comprimento  $\Delta l$  como um dispositivo quadripolo, os campos propagante  $R(\Delta l/2)$ , que se propaga no mesmo

sentido que o campo da onda incidente, e o contrapropagante  $S(\Delta l/2)$ , que se propaga no sentido contrário ao campo da onda incidente, na entrada da seção quando multiplicados por uma matriz de transferência  $[F_i]$ , resulta nos campos contrapropagante  $S(-\Delta l/2)$  e propagante  $R(-\Delta l/2)$  após a luz atravessar a seção, como segue: <sup>(83)</sup>

$$\begin{bmatrix} R(-\Delta l/2) \\ S(-\Delta l/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R(\Delta l/2) \\ S(\Delta l/2) \end{bmatrix}$$
(2.4.1)

onde:

$$F_{11} = \left[ \cosh(\gamma_B) - i\Delta l\hat{\sigma} \frac{\operatorname{senh}(\gamma_B)}{\gamma_B} \right] \cdot e^{\left(-i\frac{\varphi_B}{2}\right)}$$
(2.4.2)

$$F_{12} = \left[ -i\Delta l\kappa \frac{senh(\gamma_B)}{\gamma_B} \right] \cdot e^{\left(i\frac{\varphi_B}{2}\right)}$$
(2.4.3)

$$F_{21} = \left[ i\Delta l\kappa \frac{\operatorname{senh}(\gamma_B)}{\gamma_B} \right] \cdot e^{\left(-i\frac{\varphi_B}{2}\right)}$$
(2.4.4)

$$F_{22} = \left[ \cosh(\gamma_B) + i\Delta l\hat{\sigma} \frac{\operatorname{senh}(\gamma_B)}{\gamma_B} \right] \cdot e^{\left(i\frac{\varphi_B}{2}\right)}$$
(2.4.5)

Nas expressões anteriores  $\gamma_B = \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} \Delta l$  e  $\varphi_B$  é o desvio de fase em cada seção uniforme, dado por:

$$\varphi_{B} = \frac{4\pi n_{ef}}{\lambda} \Delta l \tag{2.4.6}$$

Assim, se houver alguma perturbação do índice efetivo, deve-se resolver a equação de dispersão da fibra para cada segmento uniforme.

Dados os campos iniciais, obtém-se a função de transferência da FBG por meio da multiplicação das  $N_s$  matrizes  $[F_i]$ , dadas pela equação (2.4.1), portanto:

$$\begin{bmatrix} R(-\Delta l/2) \\ S(-\Delta l/2) \end{bmatrix} = \underbrace{[F_{Ns}] \cdot [F_{N-1}] \cdot \dots \cdot [F_{2}] \cdot [F_{1}]}_{[F]} \cdot \begin{bmatrix} R(\Delta l/2) \\ S(\Delta l/2) \end{bmatrix}$$
(2.4.7)

onde: [F] é a função de transferência da FBG equivalente ao produtório  $\left(\prod_{i=1}^{N_s} [F_N]\right)$  de matrizes.

Assim, com as condições de contorno:

$$\begin{bmatrix} R(0) \\ S(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R(L) \\ S(L) \end{bmatrix} \therefore \begin{bmatrix} 1 \\ S(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R(L) \\ 0 \end{bmatrix}$$
(2.4.8)

Tem-se:

$$\begin{bmatrix} 1\\S(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & R(L)\\F_{21} & R(L) \end{bmatrix}$$
(2.4.9)

Assim, da equação (2.4.9) conclui-se que  $R(L) = \frac{1}{F_{11}}$ . Portanto, a amplitude refletida para cada comprimento de onda pode ser encontrada através de:

$$r(\lambda) = \frac{R(0)}{S(0)} = \frac{R(0)}{1} = \frac{F_{21}}{F_{11}}$$
(2.4.10)

sendo a potência refletida dada por:

$$P_r = \left| r(\lambda) \right|^2 \tag{2.4.11}$$

Assim, a refletividade *R* pode ser escrita como:

$$R(\lambda) = \left|\frac{F_{21}}{F_{11}}\right|^2$$
(2.4.12)

Analogamente, a amplitude transmitida será dada por:

$$t(\lambda) = \frac{R(L)}{R(0)} = \frac{R(L)}{1} = \frac{1}{F_{11}}$$
(2.4.13)

e a potência transmitida dada por:

$$P_t = \left| t\left(\lambda\right) \right|^2 \tag{2.4.14}$$

Assim, a transmissividade T pode ser escrita como:

$$T\left(\lambda\right) = \left|\frac{1}{F_{11}}\right|^2 \tag{2.4.15}$$

Dessa forma tem-se que R+T=1.

O número de seções  $N_s$  não deve ser arbitrariamente grande, uma vez que as aproximações feitas na teoria dos modos acoplados, que permitiram a derivação do sistema de Equações (2.3.74) não são válidas quando o comprimento da seção  $\Delta l$  é da mesma ordem de grandeza do período da rede L. <sup>(83)</sup> Portanto, para se obter uma boa precisão da teoria dos modos acoplados deve-se fazer  $\Delta l \gg \Lambda$ , o que implica em:

$$N_s \ll \frac{2n_{ef}}{\lambda_B} \tag{2.4.16}$$

Portanto, é possível obter a transmissão e a reflexão para cada comprimento de onda em um intervalo de interesse obtendo-se assim o espectro de transmissão e reflexão da rede de Bragg. <sup>(76)</sup>

#### 2.4.2 Simulação de FBG pelo método matricial

Como visto anteriormente, uma FBG com perfil uniforme possui solução analítica que pode ser utilizada para calcular a respectiva característica espectral, entretanto, em aplicações práticas, a maioria das grades utilizadas não possui o perfil uniforme. Para os tipos de grades não uniformes, não existe uma forma simples de obter uma solução analítica dado que a constante de acoplamento,  $\kappa(z)$ e o período,  $\Lambda(z)$ , são arbitrários e afetam coletivamente a função de transferência. O método das matrizes de transferência utilizado para a resolução das equações dos modos acoplados é uma excelente ferramenta para a solução desse problema.

Para demonstrar a eficiência dessa ferramenta, ou seja, que o TMM torna possível a obtenção de um resultado bastante preciso, de forma rápida e simples, foi implementado no aplicativo MatLab<sup>®</sup> um programa para simular as propriedades espectrais de grades de Bragg em fibra óptica com perfil uniforme. Para isso, foram utilizadas as equações da teoria dos modos acoplados, em especial a Equação (2.3.82) da refletividade *R* e as equações do método das matrizes de transferência apresentadas anteriormente.

Foi realizada uma simulação com três FBG uniformes, distintas apenas pela diferença no parâmetro da variação do índice de refração induzido no núcleo. Os dados utilizados na simulação foram os seguintes: Tabela 2.4.1. – Características da fibra óptica utilizada na simulação e das FBG com diferentes valores de variação do índice de refração induzido no núcleo.

Comprimento da FBG	L = 10 mm
Período da FBG	$\Lambda = 0,536 \ \mu m$
Comprimento de onda de projeto	$\lambda_{B} = 1550 \ nm$
Visibilidade adotada	v=1
Índice de refração induzido no núcleo	$n_1 = 1,447$
Índice de refração induzido na casca	$n_2 = 1,444$
Variação do índice de refração induzido no núcleo FBG-A	$\bar{\delta n_{ef-A}} = 1,0 \times 10^{-4}$
Variação do índice de refração induzido no núcleo FBG-B	$\overline{\delta n_{ef-B}} = 5,0 \times 10^{-5}$
Variação do índice de refração induzido no núcleo FBG-C	$\bar{\delta n_{ef-C}} = 1,0 \times 10^{-5}$

Na Figura (2.4.2.) é apresentado um desenho com as curvas do espectro de reflexão simulado de três FBG com diferentes variações do índice de refração induzido no núcleo  $\overline{\delta n_{ef}}$ .



Figura 2.4.2. – Desenho ilustrativo do espectro de reflexão de grades de Bragg em fibra óptica com diferentes variações do índice de refração induzido.

Analisando os resultados apresentados acima, pode-se verificar que quanto mais intensa a variação do índice de refração induzido no núcleo, mais fortemente o sinal é refletido pela grade de Bragg. Do mesmo modo, foi realizada uma simulação com três FBG com igual variação do índice de refração induzido no núcleo, porém com diferentes comprimentos de grade *L*.

Tabela 2.4.2. – Características da fibra óptica utilizada na simulação e das FBG com diferentes comprimentos de grade.

Comprimento da FBG-A	$L_A = 12 mm$
Comprimento da FBG-B	$L_{B} = 8 mm$
Comprimento da FBG-C	$L_c = 5 mm$
Período da FBG	$\Lambda = 0,536 \ \mu m$
Comprimento de onda de projeto	$\lambda_{B} = 1550 \ nm$
Visibilidade adotada	$\upsilon = 1$
Índice de refração induzido no núcleo	$n_1 = 1,447$
Índice de refração induzido na casca	$n_2 = 1,444$
Variação do índice de refração induzido no núcleo FBG	$\bar{\delta n_{ef}} = 1,0 \times 10^{-4}$

Na Figura (2.4.3.) é apresentado um desenho com as curvas do espectro de reflexão simulado de três FBG com diferentes comprimentos *L*.



Figura 2.4.3. – Desenho ilustrativo do espectro de reflexão de grades de Bragg em fibra óptica com diferentes comprimentos de grade.

Analisando os resultados apresentados acima, observa-se que, quanto maior for o comprimento da grade, maior será sua refletividade.

Pode-se perceber na análise das Figuras (2.4.2.) e (2.4.3.) que as curvas do espectro de reflexão de uma FBG uniforme são semelhantes à função sinc. A largura de banda e a refletividade do pico são dependentes da variação do índice de refração induzido e do comprimento da grade e ambos são afetados por perturbações mecânicas e térmicas que provocam um deslocamento do comprimento de onda central  $\lambda_{R}$ .

## 2.5 FBG COMO SENSORES DE DEFORMAÇÃO E DE TEMPERATURA

Além das características espectrais apresentadas no item anterior, se faz necessário o conhecimento do comportamento das FBG sob influências externas, tais como, a temperatura e a deformação ou perturbação mecânica. Outros parâmetros como polarização e pressão acústica e hidrostática <sup>(85)</sup> também são capazes de alterar o índice modal ou a periodicidade da rede, provocando mudança espectral devida à alteração no comprimento de onda de Bragg.

Em função dos tensores fotoelásticos (elasto-ópticos) e termoelástico (termoópticos) de uma fibra óptica não serem nulos, tanto a variação da temperatura quanto a deformação mecânica alteram o índice de refração da fibra e o período da grade de Bragg  $\Lambda$ . Como o comprimento de onda de Bragg em uma FBG depende do índice de refração efetivo do núcleo e da periodicidade da grade, como visto na Equação (2.3.80), as variações desses dois parâmetros físicos provocam um deslocamento  $\Delta \lambda_B$  no comprimento de onda central do espectro de reflexão da grade de Bragg  $\lambda_B$ . <sup>(36)</sup>

Portanto, o deslocamento do comprimento de onda de Bragg  $\Delta \lambda_B$  pode ser representado por:

$$\Delta\lambda_{B} = 2\left(\Lambda\frac{\partial n_{ef}}{\partial l} + n_{ef}\frac{\partial\Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda\frac{\partial n_{ef}}{\partial T} + n_{ef}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\right)\Delta T$$
(2.5.1)

O primeiro termo da Equação (2.5.1) representa o efeito de uma deformação mecânica sobre a fibra óptica. Esse termo corresponde à variação da periodicidade da grade resultante da deformação elástica e à mudança no índice de refração pelo efeito fotoelástico, ambos devido à variação no comprimento da fibra de  $\Delta l$  provocado por uma força externa longitudinal ao eixo z da fibra óptica.

Assim, pode-se reescrever a Equação (2.5.1) da seguinte maneira:

$$\Delta\lambda_{B} = \lambda_{B} \left[ \underbrace{\left( \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial l} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l}_{(2.5.2)} + \underbrace{\left( \frac{1}{n_{ef}} \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T}_{(2.5.2)} \right]$$

O primeiro termo da Equação (2.5.2) geralmente é apresentado na literatura como sendo a sensibilidade à deformação longitudinal, tanto para tração quanto para compressão. Esse termo pode ser reescrito em função da deformação mecânica longitudinal aplicada  $\varepsilon_z$  e da constante efetiva elasto-óptica  $p_e$ , obtendo-se: <sup>(15)</sup>

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon_z \tag{2.5.3}$$

Sendo que  $p_e$  é definida como:

$$p_e = \frac{n_{ef}^2}{2} \left[ p_{12} - \nu (p_{11} + p_{12}) \right]$$
(2.5.4)

onde:  $p_{11}$  e  $p_{12}$  são componentes do tensor elasto-óptico e v é a razão de Poisson.

Para uma fibra óptica monomodo de germano-silicato tem-se que os valores típicos de  $p_{11} = 0,121$ ,  $p_{12} = 0,270$ , v = 0,165 e  $n_{ef} = 1,465$ , assim o coeficiente elasto-óptico para essa fibra óptica é  $p_e \approx 0,22$ . <sup>(85)</sup> Encontra-se na literatura <sup>(59; 86; 87; 88; 89)</sup> valores desses parâmetros diferentes dos apresentados, dependendo do material utilizado na fabricação da fibra óptica e do comprimento de onda da luz.

Pode-se calcular a sensibilidade de uma grade de Bragg em função da deformação mecânica substituindo os parâmetros acima nas Equações (2.5.3) e (2.5.4). Por exemplo, para uma grade com comprimento de onda de Bragg  $\lambda_{B} = 1550 nm$ , obtém-se a sensibilidade a deformação  $S_{\Delta l}$ , quando a grade não está sujeita às perturbações térmicas,  $\Delta T = 0$ :

$$S_{\Delta l} \approx \frac{1,2\,pm}{\mu\varepsilon}$$
 (2.5.5)

A lei de Hook estabelece que, para alongamentos pequenos, a deformação é diretamente proporcional à tensão aplicada no ponto:

$$\sigma_z = E \cdot \varepsilon_z \tag{2.5.6}$$

onde:  $\sigma_z$  é a tensão mecânica agindo na direção do eixo z, dada em Pascal [*Pa*], *E* é o coeficiente de proporcionalidade denominado módulo de Young ou módulo de elasticidade de primeiro gênero e tem seu valor relatado na literatura <sup>(90)</sup> entre 70 *GPa* e 75 *GPa* para a fibra de sílica e  $\varepsilon_z$  é a deformação longitudinal, cuja unidade é adimensional representada por microépsilon [ $\mu\varepsilon$ ], *microstrain* [ $\mu$ *S*], micrometro por metro [ $\mu$ *m*/*m*] ou ainda em percentual [%].

Assim, de acordo com a Equação (2.5.6), em uma fibra cilíndrica, a força externa longitudinal F (no sentido do eixo z) em função da deformação é dada por:

$$F = E \cdot \varepsilon_z \frac{d^2}{4} \pi \tag{2.5.7}$$

onde: d é o diâmetro, que para uma fibra monomodo padrão de sílica é igual a  $125 \ \mu m$ .

A tensão de ruptura da fibra de sílica sem gravação da rede é de aproximadamente 6000 MPa, porém esse valor diminui drasticamente para valores em torno de 700 MPa quando a FBG é gravada utilizando técnicas convencionais. <sup>(91; 92; 93)</sup> Na verdade, as fibras são fragilizadas na maioria das técnicas de escrita das grades, devido à remoção do revestimento primário das mesmas, na região de escrita, para que o núcleo seja exposto à radiação UV.

Existem técnicas que permitem que o núcleo da fibra seja gravado sem que haja a necessidade da remoção da casca, sendo que uma delas baseia-se na técnica de pulso único, na qual as redes são gravadas durante o processo de fabricação da fibra, logo após o seu puxamento e antes de ser recoberta com o revestimento primário. <sup>(94)</sup>. Outras técnicas propostas para a gravação da FBG por cima da sua cobertura são limitadas a alguns recobrimentos de acrilato, tais como os sem dopantes antioxidantes. <sup>(95)</sup>

Na Figura (2.5.1.), a seguir, são apresentados gráficos ilustrativos de espectros de saída de grades de Bragg funcionando como sensores de deformação. No gráfico da direita, tem-se a resposta da FBG sem a influência de deformação. No gráfico central pode-se observar uma variação positiva da resposta espectral da FBG, devido ao aumento da periodicidade da grade quando está sob influência de uma tração mecânica. Quando a FBG é submetida a uma compressão mecânica, o período da grade de Bragg diminui e a resposta espectral da FBG apresenta uma variação negativa do comprimento de onda.



Figura 2.5.1. – Desenho ilustrativo da resposta de uma FBG atuando como sensor de deformação Fonte: desenho baseado em imagem do trabalho de Quintero. <sup>(96)</sup>

As fibras ópticas de sílica possuem resistência à compressão mecânica cerca de 20 vezes maior que a resistência à tração, entretanto, em função das fibras ópticas possuírem um comportamento similar ao de um pilar esbelto e linearmente elástico, a ocorrência do fenômeno da flambagem faz com que, na prática, os limites à compressão sejam menores que os limites à tração em fibras com comprimentos normalmente utilizados na fabricação de sensores. <sup>(84)</sup>

Assim, para que uma fibra óptica com grade de Bragg não sofra flambagem e ainda seja sensível tanto à tração quanto à compressão mecânica, a fibra deve ser colada pré-tensionada no local de medição ou no substrato base do sensor.

O segundo termo da Equação (2.5.2) representa o efeito da temperatura sobre a fibra óptica. Este termo corresponde a uma variação na periodicidade da grade e a uma mudança no índice de refração induzida pela expansão térmica da fibra. O deslocamento do comprimento de onda de Bragg devido ao fato da expansão térmica mudar o índice de refração induzida pela variação da temperatura,  $\Delta T$ , é dado por:

$$\Delta \lambda_{B} = \lambda_{B} \left( \alpha_{\Lambda} + \alpha_{n} \right) \Delta T \tag{2.5.8}$$

onde:  $(\alpha_{\Lambda})$  é o coeficiente de expansão térmica da fibra e  $(\alpha_{n})$  é o coeficiente termoóptico da fibra.

Para uma fibra com núcleo e casca de sílica, o coeficiente de expansão térmica é  $\alpha_{\Lambda} \approx 0.55 \times 10^{-6} \circ C^{-1}$  e o coeficiente termo-óptico da fibra com núcleo de sílica dopado com germânio é  $\alpha_n \approx 8.3 \times 10^{-6} \circ C^{-1}$ . <sup>(22; 36)</sup> Assim, pode-se calcular a sensibilidade de uma grade de Bragg por efeito da temperatura. Por exemplo, para uma grade com comprimento de onda de Bragg de  $\lambda_B = 1550 nm$ , obtém-se a sensibilidade à temperatura  $S_T$ , quando a grade não está sujeita a perturbações mecânicas,  $\Delta l = 0$ :

$$S_T \approx \frac{13,7\,pm}{^{\circ}C} \tag{2.5.9}$$

#### 2.6 SENSIBILIDADE CRUZADA EM FBG

Analisando a Equação (2.5.2), que apresenta a variação no comprimento de onda de Bragg em função da deformação mecânica e da temperatura, observa-se que as grades de Bragg podem ser utilizadas como sensores, pois qualquer variação em pelo menos um desses parâmetros irá produzir uma variação no comprimento de onda de Bragg da FBG.

Em função desta dupla influência simultânea não é possível a distinção direta entre as variações do comprimento de onda de Bragg induzidas pela deformação e pela temperatura, tornando esse efeito uma desvantagem para os sensores baseados em FBG. Essa característica de simultaneidade de sensibilidade a esses dois parâmetros físicos torna indistinguível a discriminação da origem da perturbação com apenas a análise do comprimento de onda de Bragg. Esta incapacidade de distinção da origem da perturbação é provavelmente a limitação mais significativa de sensores baseados em grade de Bragg e traz sérias implicações para sensores de deformação projetados para medir sinais lentos ou quase-estáticos, onde qualquer variação de temperatura ao longo da fibra pode ser indistinguível da deformação. Para medida dinâmica de deformação isso não é um problema, desde que eventuais flutuações térmicas ocorram em baixa frequência e que não venham coincidir com a frequência de ressonância de interesse. <sup>(36)</sup>

Várias técnicas têm sido relatadas e demonstradas para eliminar ou minimizar esta limitação, <sup>(36; 97)</sup> incluindo a que utiliza grades de dois comprimentos de onda, <sup>(98)</sup> a técnica de cancelamento da resposta térmica da grade <sup>(99)</sup> e o uso de grades de referência, <sup>(100; 101)</sup> as quais são protegidas da influência da deformação medindo só a temperatura. Além dessas, técnicas de isolamento da influência de um dos parâmetros têm sido propostas <sup>(102; 103; 104; 105; 106; 107)</sup>, assim como arranjos para medir os dois parâmetros simultaneamente. <sup>(108; 109; 110)</sup>

Provavelmente a técnica mais popular relatada para distinção das respostas de deformação e de temperatura seja a de multiplexação de uma ou mais FBG de referência no sistema. As grades de Bragg de referência são mantidas isoladas da influência da deformação, mas são imersas no mesmo ambiente térmico dos elementos sensores FBG ativos. <sup>(111)</sup> Essa técnica de uso de grade FBG de referência facilita a separação de resposta dos dois parâmetros físicos e foi a escolhida para a realização dos experimentos nesse trabalho.

# **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Como dito anteriormente, o interesse desse trabalho recai sobre aplicações em que se deseja utilizar sensores de grades de Bragg inscritas em fibras ópticas para medir temperatura e deformação em situações em que comparecem variações rápidas de ambas as grandezas simultaneamente. Nessas circunstâncias é necessário verificar até que ponto pode-se afirmar que a medida de temperatura da grade de referência efetivamente pode ser utilizada para compensar dinamicamente a medida da grade de Bragg utilizada para medir deformações.

Para tanto, foram planejados vários experimentos visando caracterizar o grau de correlação entre as medidas de grades de Bragg submetidas aos mesmos estímulos térmicos e mecânicos, tanto em regime quase-estático quanto rapidamente variável.

Nesse capítulo, inicialmente é apresentada uma descrição do método utilizado para a obtenção das FBG e um compêndio das principais características dos sensores comerciais e dos equipamentos utilizados nesse trabalho. Em seguida, os procedimentos, recursos e materiais utilizados em cada ensaio são apresentados

# 3.1 GRADES DE BRAGG INSCRITAS EM FIBRAS ÓPTICAS E SENSORES FBG

Foram utilizadas neste trabalho diversas grades de Bragg em fibra óptica fabricadas no laboratório da EFO-S do IEAv como sensores em ensaios de temperatura e deformação. Também foram realizados ensaios com sensores comerciais de temperatura e de deformação baseados na tecnologia FBG de dois fabricantes distintos, com o intuito de realizar um estudo comparativo de características de sensores produzidos a partir de grades fabricadas no IEAv com os sensores produzidos por esses fabricantes.

#### 3.1.1 Grades de Bragg fabricadas no IEAv

As grades de Bragg produzidas no laboratório da EFO-S do IEAv foram fabricadas utilizando o método interferométrico de máscara de fase. <sup>(112; 113)</sup> Nesse método, uma máscara de fase, também denominada máscara de difração, é posicionada na saída do feixe da radiação UV, de modo que o feixe incida perpendicularmente no dispositivo. Ao atravessar a máscara de difração, a luz UV é difratada e os feixes de ordem ±1 são direcionados até dois espelhos distintos e são recombinados para formar um padrão de interferência. A fibra óptica é posicionada a uma distância determinada onde ocorre o padrão de interferência periódica devido à superposição dos dois feixes. Este padrão de interferência é reproduzido no núcleo da fibra já descascada e hidrogenada. <sup>(114)</sup>

O arranjo experimental apresentado a seguir foi construído e publicado por Barbosa e seus colaboradores <sup>(115)</sup> e posteriormente detalhado por Cazo <sup>(80)</sup> em seu trabalho de mestrado. Parte das grades de Bragg em fibra ópticas fabricadas durante os trabalhos desses pesquisadores foi gentilmente cedida para a utilização nos ensaios expostos nessa dissertação, em razão da colaboração entre o Laboratório de Sensores Ópticos (LSO) da USP e o laboratório da EFO-S do IEAv.

O arranjo experimental utilizado nesse trabalho para a fabricação das grades de Bragg em fibras ópticas é baseado no arranjo do interferômetro de Talbot modificado <sup>(116)</sup> e está esquematizado na Figura (3.1.1.), abaixo:



Figura 3.1.1. – Desenho ilustrativo do arranjo experimental utilizado no laboratório da EFO-S do IEAv para a gravação de rede de Bragg em fibra óptica através do método interferométrico de máscara de fase.

Fonte: desenho baseado em imagem do trabalho de Barbosa. (115)

A máscara de fase utilizada para a gravação das FBG apresentadas nesse trabalho foi o modelo PM-248-1.0526-25A fabricada pela empresa Lasiris, com período de  $1,0526 \,\mu m$  e comprimento de onda de  $248 \, nm$ . De acordo com informações do fabricante, os feixes de ordem +1 e -1, difratados pela máscara de difração, possuem eficiências da ordem de 37,6% e 37,4%, respectivamente.

Os dois espelhos utilizados no arranjo são próprios para a emissão UV e possuem coeficiente de reflexão próximo a 100% na faixa entre 229 nm e 264 nm. Os espelhos foram montados sobre dispositivos posicionadores rotativos motorizados, modelo M-495CC da empresa Newport com movimento contínuo e uma resolução de 0,001°. O padrão de interferência criado na recombinação dos dois feixes é determinado pelo ângulo dos espelhos de reflexão.

O laser utilizado no experimento para a inscrição lateral das grades de Bragg em fibra é o modelo 95-SHG fabricado pela empresa Lexel Laser, Inc, que possui seu funcionamento baseado em um laser de íons de argônio com potência de 6 W . Esse laser produz múltiplas linhas no modo  $TEM_{00}$  na faixa visível entre 457 nm e 528,7 nm . Sua cavidade é constituída por dois espelhos e é projetada de forma a permitir que a frequência de suas raias espectrais seja dobrada, de onde advém a extensão SHG, acrônimo do inglês *Second Harmonic Generation*, produzindo a segunda harmônica do laser na faixa do ultravioleta, o que é feito utilizando-se um cristal de Beta Borato de Bário (BBO – BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). O feixe produzido tem potência óptica da ordem de 250 mW para comprimentos de onda entre 229 nm e 264 nm , operando no modo contínuo (CW).

As principais características da fonte de luz laser utilizada nesse trabalho são apresentadas na Tabela. (3.1.1.), a seguir.

Tabela 3.1.1. – Características da fonte de luz laser utilizada no laboratório EFO-S do IEAv.

Parâmetro	Valor
Modo de operação:	$TEM_{00}$
Seção transversal elíptica do feixe:	$0,8 \times 0,9 \text{ mm}$
Divergência do feixe:	$0, 6 \times 0, 6$ mrad
Polarização do feixe:	vertical
Estabilidade da potência:	$\pm 1\%$ , (com controle de intensidade de luz acionado)
Ruído óptico:	$<\!1\%\ rms$ , (na faixa entre $10Hz$ e $2MHz$ )

Fonte: Dados obtidos no manual do laser modelo 95-SHG da empresa Lexel Laser, Inc.

Esse laser possui elevadas coerências espacial e temporal, além de alta estabilidade de potência de saída, ou seja, possui os requisitos necessários para a inscrição lateral de grades de Bragg em fibra óptica através do método interferométrico de máscara de fase. <sup>(117; 118)</sup> Essas características são importantes para que o padrão de interferência gerado sobre a fibra se mantenha constante, permitindo a geração da modulação do índice de refração na fibra.

Esse método de gravação que utiliza a combinação da técnica da máscara de fase com o processo de interferometria é relativamente vantajoso em relação às outras técnicas de gravação apresentadas anteriormente devido à possibilidade de se poder variar o período das grades de Bragg alterando apenas o ângulo dos espelhos onde os feixes são refletidos. Essa técnica apresenta também menor sensibilidade a flutuações no comprimento de onda do laser de escrita, o que

permite a gravação de grades com melhor qualidade espectral, mesmo que o tempo de gravação seja longo.

Sabe-se que uma grade de difração em fibra óptica obedece às mesmas leis que as redes de difração em espaço livre. Portanto, o efeito da grade sobre uma onda eletromagnética incidente com um determinado ângulo  $\theta_i$  pode ser descrito pela equação das redes de difração: <sup>(119)</sup>

$$\Lambda \left( n_m sen \theta_m - n_i sen \theta_i \right) = m\lambda \tag{3.1.1}$$

onde:  $\Lambda$  é o período da grade,  $\theta_i$  é o ângulo da luz incidente,  $\theta_m$  é o ângulo do raio difratado de ordem *m*,  $n_i$  e  $n_m$  são os índices de refração dos meios das ondas incidentes e refratadas, respectivamente, *m* é a ordem de difração e  $\lambda$  o comprimento de onda da onda incidente.

O uso da Equação (3.1.1) possibilita a cálculo dos ângulos  $\theta_m$  onde ocorrem os máximos de interferência construtiva em redes de difração no espaço livre e no caso das grades de difração em fibra, pode ser utilizada para calcular o comprimento de onda que permite acoplar, da forma mais eficiente, luz entre dois modos de propagação.

Na Figura (3.1.2.) a seguir, é mostrada uma representação geométrica dos parâmetros das redes de Bragg apresentados na Equação (3.1.1).



Figura 3.1.2. – Desenho representativo da difração de uma onda eletromagnética por uma rede de difração.

No caso da montagem do arranjo experimental apresentado na Figura (3.1.1.) é interessante determinar a dependência do comprimento de onda de gravação em função da posição dos espelhos.

Assim, analisando a Figura (3.1.3.), a seguir, pode-se verificar a dependência do ângulo de incidência na fibra,  $\alpha$ , com o ângulo  $\theta$  do espelho em relação ao eixo *X*.



Figura 3.1.3. – Desenho representativo dos ângulos formados no percurso óptico de um dos lados do interferômetro do arranjo experimental utilizado no laboratório da EFO-S do IEAv para gravação de FBG apresentado na Figura (3.1.1.).

Analogamente, o estudo também é válido para o espelho do outro lado da montagem, considerando a simetria da montagem e que  $\theta$  nesse caso é  $-\theta$ .

Analisando a Figura (3.1.3.), conclui-se que  $\alpha$  pode ser descrito como:

$$\alpha = \theta_m + 2\theta \tag{3.1.2}$$

Utilizando a Equação (3.1.1), das redes de difração, considerando m=1 e assumindo uma incidência normal ( $\theta_i = 0$ ), pode-se concluir que o ângulo de saída da máscara de difração é dado por:

$$\theta_m = \arcsin\left(\frac{m\lambda_{UV}}{\Lambda_{MF}}\right) \tag{3.1.3}$$

onde: *m* é o modo de difração da máscara,  $\lambda_{UV}$  é o comprimento de onda UV do laser utilizado para inscrição e  $\Lambda_{MF}$  é período da máscara de difração ou de fase.

No caso, foram utilizados os modos  $m\pm 1$ , por conterem cada um deles, aproximadamente, 37,5% da potência do feixe incidente. O modo de difração m=0possui 0,5% da potência do feixe incidente, sendo considerado desprezível no processo de inscrição. Esses dados foram fornecidos pelo fabricante da máscara de fase.

No acoplamento dos modos guiados propagantes para os contrapropagantes, verifica-se a relação  $\theta_i = -\theta_m = \pi/2$ , assim considerando uma difração de primeira ordem onde m = -1, a Equação (3.1.1) pode ser reescrita como:

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{ef}\Lambda \tag{3.1.4}$$

Como visto anteriormente, a Equação (3.1.4) é designada como condição de Bragg e só ocorre para períodos de modulação,  $\Lambda$ , submicrométricos.

De uma forma geral, o feixe ultravioleta que foi dividido em dois, com amplitudes praticamente idênticas, pela máscara de fase são refletidos pelos espelhos e recombinam-se no núcleo da fibra com um ângulo  $2\alpha$  entre eles, formando um padrão de interferência. O período das franjas de interferência é dado por:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2n_{ef}sen(\alpha)}$$
(3.1.5)

onde:  $\Lambda \acute{e}$  o período espacial da grade,  $n_{ef}$  é o índice de refração efetivo da fibra,  $\lambda_{rrv}$  é o comprimento de onda UV do laser utilizado para inscrição.

Substituindo as Equações (3.1.2) e (3.1.3) na Equação (3.1.5), tem-se: (50)

$$\lambda_{Bragg} = 2\left(n_{ef} + \delta \overline{n}_{ef}\right)\Lambda$$

$$\lambda_{Bragg} = \frac{\left(n_{ef} + \delta \overline{n}_{ef}\right)\lambda_{UV}}{sen\left[arcsen\left(\frac{\lambda_{UV}}{\Lambda_{MF}}\right) + 2\theta\right]}$$
(3.1.6)

Pela análise da Equação (3.1.6), verifica-se que, se os espelhos estiverem paralelos ao eixo *X*, ou seja,  $(\theta = 0)$ , o comprimento de onda de gravação é o mesmo que o comprimento de onda de uma rede gravada diretamente pela máscara de fase e que uma pequena alteração nos ângulos dos espelhos origina uma diferença considerável no comprimento de onda de gravação.

Pode-se reescrever a Equação (3.1.6) da seguinte forma:

$$\lambda_{Bragg} = \frac{n_{ef} \lambda_{UV}}{sen(\theta_{w} \pm 2\theta)}$$
(3.1.7)

onde:  $\theta$  pode variar de forma positiva ou negativa, o que representa um ângulo mais agudo ou obtuso, respectivamente, em relação a posição original  $\theta = 0$ .

O incremento mínimo de comprimentos de onda com que se consegue gravar em função da resolução angular dos espelhos rotativos pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$\frac{d\lambda_{Bragg}}{d\theta} = \frac{-2\left(n_{ef} + \delta \overline{n}_{ef}\right)\lambda_{UV}cos\left[arcsen\left(\frac{\lambda_{UV}}{\Lambda_{MF}}\right) + 2\theta\right]}{sen^{2}\left[arcsen\left(\frac{\lambda_{UV}}{\Lambda_{MF}}\right) + 2\theta\right]}$$
(3.1.8)  
$$\frac{d\lambda_{Bragg}}{d\theta} = -2\lambda_{Bragg}cot\left[arcsen\left(\frac{\lambda_{UV}}{\Lambda_{MF}}\right) + 2\theta\right]$$

ou seja:

$$\Delta \lambda_{Bragg} = -2\lambda_{Bragg} \cot\left[ \arccos\left(\frac{\lambda_{UV}}{\Lambda_{MF}}\right) + 2\theta \right] \Delta \theta$$
(3.1.9)

No caso de valores de  $\theta$  próximos de zero, tem-se:

$$\Delta \lambda_{Bragg} \approx -2\lambda_{Bragg} \cot \left[ \frac{\lambda_{UV}}{\Lambda_{MF}} + 2\theta \right] \Delta \theta$$
(3.1.10)

Quando o ângulo dos espelhos é alterado a distância  $d_f$  onde ocorre a sobreposição dos feixes das ordens  $m\pm 1$  também varia. Essa distância depende da distância entre os espelhos,  $d_e$ , e é dado por: <sup>(50)</sup>

$$d_{f} = \frac{\cot(\theta_{m} + 2\theta)d_{e}}{2}$$

$$d_{f} = \frac{\cot\left[\arccos\left(\frac{\lambda_{UV}}{\Lambda_{MF}}\right) + 2\theta\right]}{2}$$
(3.1.11)

Por exemplo, no caso da inscrição de uma grade de Bragg com comprimento de onda central de  $\lambda_{Bragg} = 1550 \text{ nm}$  em uma fibra monomodo com índice de refração efetivo  $n_{ef} = 1,4681$ , a utilização de um laser com comprimento de onda UV de  $\lambda_{UV} = 257 \text{ nm}$  e uma máscara de fase com período de  $\Lambda_{MF} = 1052,6 \text{ nm}$ , implica que a luz laser difratada dos modos  $m \pm 1$  sai da máscara de fase com o ângulo  $\theta_m = 14,13^{\circ}$ 

e que o ângulo  $\theta$  dos espelhos deve ser tal que, o ângulo de incidência na fibra seja mais agudo que o original, nesse caso  $\theta = -0,02^{\circ}$ . Os valores dos ângulos  $\theta_m$  e  $\theta$  podem ser calculados utilizando as Equações (3.1.3) e (3.1.7), respectivamente.

Nesse trabalho foi utilizada para a fabricação das FBG uma fibra óptica monomodo de uso comercial na área de telecomunicações modelo SMF-28<sup>™</sup> da empresa Corning, a qual foi submetida ao processo de hidrogenação para se elevar a fotossensibilidade do núcleo da fibra. Essas fibras ópticas foram mantidas durante uma semana em um tubo de cobre, hermeticamente fechado com hidrogênio de alta pureza sob pressão de aproximadamente 120 PSI (8,2 atm) em temperatura de aproximadamente 20 °C.

Embora os valores de pressão e de temperatura utilizados no processo de hidrogenação tenham sido menores do que os praticados por Lemaire e seus colaboradores, <sup>(52)</sup> que foram da ordem de 20 a 750 atm para a pressão e de 20 a 70 °C para a temperatura, os resultados do processo de fotosenssibilização foram satisfatórios. Sabe-se, no entanto, que quanto maior for o tempo e a pressão de hidrogenação, maior será a largura de banda da grade, para o mesmo tempo de exposição do núcleo da fibra óptica. <sup>(50)</sup>

O índice de refração efetivo adotado para essa fibra é  $n_{ef} = 1,4681 \text{ a } 1550 \text{ nm}$  e foi obtido em um documento de informação sobre o produto do fabricante da fibra óptica. <sup>(120)</sup>

A gravação ou a inscrição da grade foi acompanhada em tempo real através de um analisador de espectro óptico (OSA) modelo Q8347 fabricado pela empresa Advantest e o arranjo experimental utilizado para o levantamento das características das grades de Bragg é apresentado esquematicamente na Figura (3.1.4.), a seguir.



Figura 3.1.4. – Esquemático do arranjo experimental para caracterização em tempo real de uma *rede* de Bragg em fibra óptica.

Fonte: desenho baseado em imagem do trabalho de Cazo. (80)

O analisador de espectro óptico modelo Q8347 utilizado no arranjo experimental tem como principais características as apresentadas na Tabela. (3.1.2.), a seguir.

Tabela 3.1.2. – Características do analisador OSA modelo Q8347 utilizado no laboratório da EFO-S do IEAv.

Parâmetro	Valor		
Modo de operação:	Baseado no interferômetro de Michelson		
Faixa de análise:	350 a 1750 nm		
Resolução do comprimento de onda:	10 pm @ 1550 nm		
Precisão do comprimento de onda:	$\leq \pm 10 \text{ pm}$		
Faixa dinâmica:	$\geq$ 35 dB		

Fonte: Dados obtidos no manual de operação do OSA modelo Q8347 da empresa Advantest. (121)

Em função da indisponibilidade do OSA modelo Q8347 no laboratório da EFO-S do IEAv em determinados períodos da análise de algumas FBG, esse equipamento foi substituído pelo analisador de espectro óptico modelo MS9710B fabricado pela empresa Anritsu, cujas características podem ser encontradas na literatura. <sup>(122)</sup> O OSA MS9710B utilizado para monitorar e gravar em disquete as posições espectrais das FBG foi programado para operar com resolução de 1 nm e estabilidade em comprimento de onda de  $\pm 5 \text{ pm}$ .

Em referência à Figura (3.1.4.), o sinal CW da fonte óptica ligada à porta 1 do acoplador direcional é proveniente de um diodo ELED, modelo ETX 1550FC-M do fabricante EPITAXX, Inc., cujo pico de comprimento de onda é 1550 nm @ 25 °C, com largura espectral de 75 nm e potência óptica de  $25 \mu$ W @ 100 mA. Devido a essas características, um diodo superluminescente poderia substituir o ELED, uma vez que ambos possuem grande largura espectral com potência de saída estável. A estabilidade do sinal CW transmitido pela fonte óptica garante medidas precisas de características como a transmissividade e refletividade, pois evita que possíveis flutuações do sinal influenciem a leitura desses parâmetros.

A potência óptica que entra pela porta 1 do acoplador é transmitida às portas 3 e 4, de acordo com o fator de acoplamento do acoplador direcional, no caso, de 3 dB. Na extremidade do terminal 3 foi aplicado um gel casador de índice de refração, a fim de evitar reflexão espúria na interface fibra–ar (reflexões de Fresnel) da face clivada.

O terminal 4 também foi clivado, porém, nenhum gel foi aplicado a sua extremidade. Sem a presença do gel há a ocorrência de uma pequena reflexão, cerca de 4 %, da luz do ELED na face clivada devido ao efeito conhecido por reflexão de Fresnel. Esse sinal refletido serve de referência para a determinação da intensidade de reflexão da grade de Bragg que será gravada. Após o início do crescimento da grade de Bragg a extremidade do braço 4 foi quebrada ou macerada de modo a eliminar a reflexão de Fresnel.

O sinal transmitido à porta 4, cerca de 50 % da potência óptica de entrada, segue diretamente para a grade de Bragg em análise, a qual reflete parcial ou totalmente um determinado componente espectral do sinal e transmite os demais comprimentos de onda, criando um "vale" no espectro transmitido. A análise direta da transmissividade poderia ser realizada monitorando o sinal após a grade de Bragg, entretanto, se o sinal refletido do espectro for baixo, a medida de refletividade baseada na medida direta da transmissividade torna-se imprecisa. A caracterização mais adequada da FBG faz-se pela análise direta da refletividade, que é possível através da porta 2, onde se pode medir diretamente o sinal que foi refletido. Assim,

essa montagem permite medir simultaneamente a transmissividade, refletividade e comprimento de onda de Bragg de uma FBG que opere perto do comprimento de onda central da fonte óptica.

O acoplador direcional utilizado no arranjo experimental pode ser substituído por um circulador óptico. Essa substituição possibilita que quase toda luz proveniente da fonte óptica seja injetada na FBG, o que faz com que o sinal refletido tenha uma amplitude maior do que quando comparado com o resultado da montagem com acoplador direcional, o que proporciona uma melhor relação sinal/ruído.

Nas condições descritas, o processo de inscrição das grades de Bragg na fibra óptica convencional saturada com hidrogênio demora em torno de 10 a 15 min.

A seguir, na Tabela (3.1.3.), são apresentadas as características principais das FBG gravadas em fibra óptica com núcleo fotossensibilizado através do processo de hidrogenação. Os parâmetros de comprimento de onda central, de largura de banda e da amplitude do pico central foram obtidos através de analisador de espectro óptico, conforme listado na tabela.

FBG	Comprimento de onda central [nm]	Largura espectral [pm]	Amplitude pico [dBm]	Tipo da fibra óptica	OSA	Data da gravação
FBG-1 simples	1551,612	812	-49,17	SMF-28	Q8347	02/03/2009
FBG-2 simples	1550,916	928	-46,79	SMF-28	Q8347	02/03/2009
FBG-5 simples	1560,333	900	-49,42	SMF-28	Q8347	09/03/2009
FBG-6 simples	1541,705	3750	-46,18	SMF-28	Q8347	09/03/2009
FBG-7 simples	1544,00	720	-51,88	SMF-28	MS9710B	06/08/2009
FBG-8 simples	1536,76	320	-48,20	SMF-28	MS9710B	06/08/2009
FBG-11 simples	1534,96	1360	-39,35	SMF-28	MS9710B	06/08/2009
FBG-17 simples	1538,28	960	-47,28	SMF-28	MS9710B	07/08/2009
FBG-22 simples	1538,251	882	-46,89	SMF-28	Q8347	11/03/2009
FBG-31 simples	1534,273	850	-49,34	SMF-28	Q8347	11/03/2009
FBG-37 simples	1538,825	921	-47,67	SMF-28	Q8347	11/03/2009
FBG-D1 dupla	1537,312 1540,280	1095 1670	-46,32 -46,80	SMF-28	Q8347	05/02/2009
FBG-T2 tripla	1538,584 1556,792 1560,306	1190 1100 1900	-45,89 -47,05 -49,10	SMF-28	Q8347	05/02/2009
FBG-T3 tripla	1531,258 1562,493 1581,073	1010 866 815	-49,23 -50,15 -49,76	SMF-28	Q8347	05/02/2009

Tabela 3.1.3. – Características das grades de Bragg em fibra óptica hidrogenada fabricadas pelo laboratório da EFO-S do IEAv.

Fonte: Dados obtidos através dos analisadores de espectros ópticos (OSA).

As grades de Bragg fabricadas no laboratório da EFO-S do IEAv, cujas características principais são apresentadas na Tabela (3.1.3.), acima, foram projetadas propositalmente para apresentarem grande largura espectral, uma vez que, o intuito foi de utilizá-las em um sistema de interrogação baseado na convolução entre as respostas espectrais de duas FBG, sendo uma delas servindo de referência e a outra grade como elemento sensor.

Mesmo tendo o objetivo de se gravar FBG com grande largura espectral, alguns fatores de processo ocasionaram uma variação nos valores da largura espectral, maior do que a esperada. Um dos fatores que provavelmente contribuiu para o alargamento da banda de reflexão das FBG gravadas no IEAv pode ter sido proporcionado pelo baixo valor de pressão aplicado no processo de hidrogenação, o qual ficou bem abaixo dos valores utilizados por Lemaire. <sup>(52)</sup>

Sabe-se, como visto anteriormente, <sup>(43)</sup> que a presença de H<sub>2</sub> intersticial reage com o oxigênio formando íons hidroxila (OH). Outro efeito provocado pela presença do hidrogênio é a reação com o íon Ge para formar GeH, o que altera consideravelmente a estrutura da banda na região do UV. Assim, quando a fibra óptica de germano-silicato hidrogenada é exposta a radiação UV essas moléculas são dissociadas para formar ligações de Si-OH e/ou Ge-OH. Adicionalmente, centros deficientes de germânio (GeO) são formados alterando o índice de refração da sílica. Assim, pode-se dizer que a presença de H<sub>2</sub> intersticial auxilia na geração de defeitos nas ligações da rede de átomos do núcleo da fibra, que a quantidade de defeitos é uma função da concentração de hidrogênio e que com a exposição do núcleo por radiação UV, ocorre a mudança do índice de refração da região exposta à luz. A variação do índice de refração será dada em função da quantidade dos defeitos.

Portanto, como a pressão de H<sub>2</sub> utilizada na hidrogenação das fibras foi baixa, a geração dos defeitos pela presença do hidrogênio deve ter sido menor e, portanto, a fotossensibilização dessa região também deve ter sido diminuída. Essa baixa variação do índice de refração é característica das grades fracas, as quais têm a largura da banda inversamente proporcional ao comprimento da grade.

O tempo de exposição elevado, as folgas no arranjo mecânico e a falta de controle da temperatura ambiente também podem ter contribuído para o alargamento do espectro de reflexão das FBG.

A sala do laboratório onde o arranjo experimental foi montado possui sistema de condicionador de ar central, porém não goza de nenhum tipo de controle da temperatura, a qual oscila entre valores de 18 a 30 °C, conforme a estação do ano. Essa falta de controle na temperatura diminui a repetibilidade dos resultados dos

experimentos, uma vez que variações na temperatura influenciam o índice de refração efetivo da fibra e o período da grade de Bragg, como visto anteriormente.

O uso de fibras intrinsecamente fotossensíveis com alta concentração de germânio e co-dopada com boro, como a fibra modelo PS1200/1500 da empresa *FiberCore*, <sup>(123)</sup> poderia resolver o problema da baixa fotossensibilidade apresentada no processo de hidrogenação, pois o uso dessas fibras permitem a gravação de FBG com elevada refletividade sem a necessidade da realização da carga de hidrogênio. Outra vantagem do uso dessa fibra para a gravação de FBG é que o tempo de exposição à radiação UV pode ser bastante reduzido, se comparado às fibras hidrogenadas, o que as torna menos sensíveis a possíveis interferências externas. Além disso, as fibras modelo PS1200/1500 podem ser utilizadas para a gravação das FBG mesmo tendo se passado muito tempo da sua fabricação, diferentemente das fibras hidrogenadas, que devem ser gravadas logo em seguida ao processo de carga de hidrogênio, uma vez que após a retirada das fibras da câmara barométrica, o hidrogênio começa a se difundir para fora do núcleo dos guias de onda, perdendo-se gradativamente a capacidade de fotossensibilização.

Analisando os valores dos parâmetros apresentados na Tabela (3.1.3.), acima, é possível verificar que as grades produzidas no IEAv possuem grande largura espectral, se comparadas aos sensores comerciais baseados na tecnologia FBG. A largura espectral dos sensores comerciais está em torno de 200 pm, no caso dos sensores da empresa Micron Optics <sup>(124; 125)</sup> e nos sensores fabricados pela empresa Fiber Sensing <sup>(126; 127)</sup> os valores da largura espectral são menores que 200 pm. Pode-se verificar também que os valores dos parâmetros da largura espectral e da amplitude do pico central das FBG inscritas do IEAv estão bastante dispersos. Acredita-se que essa grande variação se deva à ocorrência de possíveis movimentações mecânicas nos dispositivos do arranjo experimental, bem como à falta de controle da temperatura na sala, apontadas anteriormente.

A grande largura espectral apresentada como uma característica desejável nas FBG gravadas no IEAv para uso em seu interrogador baseado na convolução das respostas de duas FBG, não é adequada para o uso com o interrogadores comerciais, uma vez que, em princípio, esses equipamentos são ajustados para realizar leitura de FBG com largura espectral de cerca de 200 pm. Na prática, essas FBG produzidas no IEAv apresentaram um nível de ruído de fundo mais elevado do que os valores obtidos com os sensores baseados em FBG que possuem estreita largura espectral, como poderá ser visto oportunamente.

## 3.1.2 Sensores baseados em FBG fabricados pela Micron Optics

Foram utilizados nesse trabalho dois modelos de sensores baseados em FBG das fabricados pela empresa Micron Optics, sendo um deles o sensor de deformação mecânica do tipo soldável modelo OS3100 e o outro o sensor de compensação de temperatura modelo OS4100.

O sensor de deformação mecânica soldável modelo OS3100 possui encapsulamento em aço inoxidável e pode ser soldado através de solda ponto ou colado na estrutura mecânica, conforme instrução do próprio fabricante. Já o sensor OS4100 possui um encapsulamento em aço inoxidável 302 que permite que ele seja aparafusado no local de medida ou soldado através de solda ponto. Este dispositivo pode ser utilizado sozinho para realização de medidas de temperatura ou em conjunto com o sensor de deformação modelo OS3100, como compensador da temperatura.

Na Tabela (3.1.4.), a seguir, são apresentadas as principais características desses transdutores de deformação e de temperatura:
Tabela 3.1.4. – Características dos sensores FBG de deformação modelo OS3100 e de temperatura modelo OS4100.

Parâmetro \ Identificação	OS3100-D	OS4100-T
Modelo do sensor	OS3100	OS4100
Sensibilidade – deformação: $\left[ pm/\mu\epsilon  ight]$	1,2	-
Faixa de medida – OS4100: $\left[\mu\epsilon ight]$	±2500	-
Sensibilidade – temperatura: $[pm/^{\circ}C]$	-	~ 28,9 (±0,5 pm/°C)
Repetibilidade de curto termo: $[^{\circ}C]$	-	±0,75 (±21 pm)
Drift: [°C]	-	±1 (±29 pm)
Largura espectral - FWHM apodizada: $[pm]$	250 (±	50 pm)
Refletividade: [%]	>	70

Fonte: Folha técnica OS3100 - Strain e OS4100 - Temperature Sensors, Micron Optics. (124; 125)

Na Tabela (3.1.5.), a seguir, são apresentados os dados referentes à calibração realizada pelo fabricante dos sensores de deformação modelo OS3100 e o de temperatura OS4100 que foram utilizados nesse trabalho.

Tabela 3.1.5. – Dados de calibração dos sensores de temperatura FBG de deformação modelo OS3100 e de temperatura modelo OS4100.

Parâmetro \ Identificação	OS3100-D	OS4100-T
Modelo do sensor	OS3100 soldável	OS4100 parafuso/soldável
Fabricante	Micron Optics	Micron Optics
Número de série	A100A09	A1005BB
Pico central: [nm] CWL@22 °C	1562,9	1546,6
Sensibilidade:	1,2 pm/με	28,9 pm/°C

Fonte: Cartão de calibração OS3100 - Strain Gage Sensor e OS4100 – Temperature Compensation Sensor - 2008.

# 3.1.3 Sensores baseados em FBG fabricados pela Fiber Sensing

Foram utilizados nesse trabalho sensores baseados em FBG das séries FS6200 e FS6300 fabricados pela empresa Fiber Sensing. Os sensores da série FS6200 são dispositivos de medição de deformação mecânica e são divididos nos seguintes tipos: soldável, compósito, para embutir, compensado e de poliamida. Já os da série FS6300 são sensores de medição de temperatura e são divididos nos seguintes tipos: de uso geral, soldável e para embutir.

Nesse trabalho os transdutores de deformação do tipo poliamida, soldável e compensado foram sujeitos a experimentos de ciclo térmico e não a ensaios mecânicos. O tipo compósito foi caracterizado apenas a título de comparação dos parâmetros com os outros transdutores e as FBG produzidas no IEAv através de leituras realizadas com os interrogadores comerciais e os resultados foram apresentados nessa dissertação.

Na Tabela (3.1.6.), a seguir, são apresentadas as principais características desses transdutores de deformação:

Tabela 3.1.6. – Características dos sensores FBG de deformação modelo FS6200.

Parâmetro	١	Tipo	FS6210	FS6220	FS6230	FS6250
Tipo do concor			Poliamida	Soldável	Compósito	Embutido
ripo do sensor			(polyimide)	( <i>weldable</i> )	( <i>composite</i> )	( <i>embedded</i> )
Material do encaps	sulament	0	Filme poliamida	Aço inox	CFRP	Aço inox
Sensibilidade: [pn	n/με]		1,2			
Faixa de medida:	[με]		± 4000			
Precisão: $[\mu\epsilon]$			± 2			
Largura espectral	- FWHM:	[pm]	< 200			
Refletividade: [%]			>75			

Fonte: Folha técnica FS6200 - Strain Sensors, Fiber Sensing. (126)

Dos sensores da série FS6200, o tipo poliamida tem seu encapsulamento constituído de um filme de Kapton<sup>®</sup>, um tipo de poliamida marca registrada da empresa DuPont e tem seus aspectos físicos semelhantes aos dos extensômetros elétricos de resistência (EER) tradicionais, bem como seu campo de aplicação nas áreas das engenharias civil e mecânica.

Na Tabela (3.1.7.), a seguir, são apresentados os dados referentes à calibração realizada pelo fabricante dos sensores de deformação modelo FS6200 com encapsulamento de poliamida e que foram utilizados nessa pesquisa.

Tabela 3.1.7. – Dados de calibração dos sensores FBG de deformação com encapsulamento de poliamida modelo FS6210.

Parâmetro \ Identificação	FS6200-1P	FS6200-2P
Modelo do sensor	FS6210-110-301 poliamida	FS6210-110-301 poliamida
Número de série	046.840.602.931-B	046.840.602.936-E
Faixa de medida: $\left[ \mu\epsilon  ight]$	±4000	±4000
Pico central: [nm] CWL@T. Amb.	1534,880	1553,634
Sensibilidade de 1ª ordem: $\left[\mu\epsilon/nm\right]$	826,8	816,8
Data da calibração	23/09/2008	23/09/2008

Fonte: Folha de calibração FS6200 – Strain Sensors (19 abril 2011).

O sensor tipo soldável é encapsulado em uma lâmina de aço inoxidável e tem a área da mecânica como principal campo de aplicação, contudo, esse tipo de sensor não foi utilizado nesse trabalho.

O sensor do tipo compósito é construído com um material polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP) e tem como principal área de aplicação a construção civil

Na Tabela (3.1.8.), a seguir, são apresentados os dados referentes à calibração realizada pelo fabricante dos sensores de deformação modelo FS6200 com encapsulamento de compósito que foram utilizados nessa pesquisa.

Tabela 3.1.8. – Dados de calibração dos sensores FBG de deformação com encapsulamento de compósito modelo FS6230.

Parâmetro \ Identificação	FS6200-1C	FS6200-2C
Modelo do sensor	FS6230-110-301 compósito	FS6230-110-301 compósito
Número de série	046.840.602.943-D	046.840.602.944-E
Faixa de medida: $\left[ \mu\epsilon  ight]$	±4000	±4000
Pico central: [nm] CWL@T. Amb.	1547,763	1554,893
Sensibilidade de 1ª ordem: $\left[\mu\epsilon/nm\right]$	819,9	816,2
Data da calibração	23/09/2008	23/09/2008

Fonte: Folha de calibração FS6200 – Strain Sensors (19 abril 2011).

Os sensores do tipo para embutir e o compensado são fabricados em aço inoxidável e têm o campo da engenharia civil como principal foco na utilização em materiais como concreto, asfalto, entre outros. O sensor compensado possui duas FBG no mesmo corpo do transdutor, sendo que uma das grades é insensível à deformação, servindo, portanto, como referência de temperatura para compensação desse parâmetro para a FBG que mede simultaneamente a deformação mecânica e a temperatura.

Na Tabela (3.1.9.), a seguir, são apresentados os dados referentes à calibração dos sensores de deformação modelo FS6200 realizada pelo fabricante:

Tabela 3.1.9. – Dados de calibração dos sensores FBG de deformação com encapsulamento para embutir e compensado modelo FS6250.

Parâmetro \ Identificação	FS6200-1E	FS6200-1EC
Modelo do sensor	FS6250-110-301 embutido	FS6200 custom compensado
Número de série	046.840.606.497 – D	046.840.601.576-EF
Faixa de medida: $[\mu\epsilon]$	±4000	±4000
Dice control: [nm] CWI @T Amb	1547.010	1554,28 (temperatura)
	1347,919	1560,75 (deformação)
Sensibilidade de 1ª ordem: $\left[\mu\epsilon/nm ight]$	672,9	816,2
Data da calibração	-	-

Fonte: Folha de calibração FS6200 - Strain Sensors (19 abril 2011).

Dos sensores de temperatura citados abaixo, apenas o do tipo soldável foi utilizado em experimentos de ciclo térmico e os resultados são apresentados nesse trabalho.

Na Tabela (3.1.10.), a seguir, são apresentadas as principais características desses transdutores de temperatura:

Parâmetro \	Tipo	FS6300	FS6320	FS6350
Tipo do concor		Uso geral	Soldável	Embutido
		(general purpose)	( <i>weldable</i> )	( <i>embedded</i> )
Material do encapsulame	nto	Aço inoxidável	Aço inoxidável	Aço inoxidável
Sensibilidade: $[pm/^{\circ}C]$		10		
Faixa de medida: $[^{\circ}C]$		-20 a +80		
Precisão: [°C]		$\pm 0,5$		
Largura espectral - FWHN	Л: [pm]	< 200		
Refletividade: [%]		>75		
Sensibilidade cruzada: []	om/°C]	10		

Tabela 3.1.10. – Características dos sensores FBG de temperatura modelo FS6300.

Fonte: Folha técnica FS6300 - Temperature Sensors, Fiber Sensing. (127)

O encapsulamento do sensor de temperatura tipo soldável FS6320, possui características mecânicas semelhantes às do sensor de deformação do tipo soldável FS6220, apresentado anteriormente. O sensor de temperatura é encapsulado em uma lâmina de aço inoxidável, diferenciando do sensor de deformação apenas na altura do encapsulamento, na forma de fixação da fibra óptica na lâmina e na maneira de fixação da lâmina na peça a ser monitorada pelo transdutor.

Nas Tabelas (3.1.11.) e (3.1.12.), a seguir, são apresentados os dados referentes à calibração realizada pelo fabricante dos sensores do tipo soldável modelo FS6320 e que foram utilizados nessa pesquisa.

O primeiro conjunto de sensores foi utilizado em ensaios de ciclo térmico nos diversos experimentos realizados no Laboratório de Sistemas Integráveis.

Tabela 3.1.11. – Dados de calibração do conjunto 1 de sensores FBG de temperatura do tipo soldável modelo FS6320.

Parâmetro \ Identificação	FS6300-1S	FS6300-2S
Modelo do sensor	FS6320-110-301 soldável	FS6320-110-301 soldável
Número de série	046.840.602.949-D	046.840.602.950-E
Pico central: [nm] CWL@30 °C	1548,118	1554,450
Max. erro de histerese: [%]	0,7	0,5
Max. erro FOS: [%]	0,6	0,4
Expressão sensibilidade	$-13,6x^2 + 103,0x + 30$	$-12,9x^2 + 102,9x + 30$
Data da calibração	23/09/2008	23/09/2008

Fonte: Folha de calibração FS6300 – Weldable Temperature Sensor (Set.2008).

Na Tabela (3.1.12.), a seguir, são apresentados os dados referentes à calibração do segundo conjunto de sensores, o qual foi utilizado nos ensaios de ciclo térmico nos experimentos realizados no Laboratório da linha de montagem SMT do LSI.

Tabela 3.1.12. – Dados da calibração do conjunto 2 de sensores FBG de temperatura do tipo soldável modelo FS6320.

Parâmetro \ Identificação	FS6300-3S	FS6300-4S
Modelo do sensor	FS6320-110-301 soldável	FS6320-110-301 soldável
Número de série	046.840.602.948-C	046.840.602.951-F
Pico central: [nm] CWL@30 °C	1541,785	1560,590
Max. erro de histerese: [%]	0,5	0,5
Max. erro FOS: [%]	0,5	0,5
Expressão sensibilidade	$-13,5x^2 + 102,9x + 30$	$-12,7x^2 + 102,0x + 30$
Data da calibração	23/09/2008	23/09/2008

Fonte: Folha de calibração FS6300 – Weldable Temperature Sensor (Set.2008).

#### 3.2 SISTEMAS INTERROGADORES

Com o intuito de realizar um levantamento dos parâmetros ópticos e verificar o comportamento das grades de Bragg produzidas no laboratório da EFO-S do IEAv e dos sensores comerciais, três sistemas de interrogação independentes foram utilizados. Um dos sistemas interrogadores utilizados foi implementado no laboratório da EFO-S do IEAv e suas características serão apresentadas no item a seguir. Os outros dois sistemas interrogadores utilizados são dispositivos de medição comerciais, sendo um deles o modelo sm130 fabricado pela empresa Micron Optics e o outro o modelo FS2200 da empresa Fiber Sensing. As características de ambos são apresentadas adiante.

#### 3.2.1 Interrogador baseado na convolução das respostas de duas FBG

Foi implementado no laboratório da EFO-S do IEAv um sistema interrogador baseado na convolução das respostas espectrais de duas FBG casadas, ou seja, que têm os comprimentos de onda de Bragg muito próximos e suas larguras de espectro de resposta são semelhantes.

O arranjo experimental desse sistema interrogador está esquematizado na Figura (3.2.1.), a seguir:



Figura 3.2.1. – Esquemático do arranjo experimental do interrogador com circulador óptico de 4 portas desenvolvido pelo laboratório EFO-S do IEAv.

O sistema é constituído por um amplificador óptico a fibra dopada com érbio (EDFA), um circulador óptico de quatro portas, duas grades de Bragg casadas, um fotodetector e um amplificador de transimpedância.

O diodo laser de bombeamento utilizado no arranjo experimental foi o modelo LD850-5A do fabricante Lasermate, que opera em uma das bandas de absorção do érbio, sendo que as mais eficientes estão em 980 nm e 1480 nm. O diodo laser foi alimentado por meio do controlador modelo LDC 3722B da empresa ILX LightWave. A corrente de excitação do diodo foi ajustada para operar em 200 mA e a temperatura mantida estável em 20,0 °C por um elemento termoelétrico tipo Peltier (TEC).

A potência óptica do diodo laser em 980 nm foi injetada na porta 1 do acoplador que opera com multiplexação por divisão de comprimentos de onda (WDM), cuja função é acoplar em uma mesma fibra a potência óptica do laser de bombeamento e o sinal óptico a ser amplificado. Esse acoplador está ligado a um segmento limitado de fibra óptica dopada com íons de terras raras, mais especificamente o elemento químico érbio que exibe um alto ganho no comprimento de onda em 1550 nm e é o responsável pelo processo de amplificação. Na extremidade da fibra dopada com érbio é feita uma clivagem em ângulo para impedir a reflexão da fluorescência.

O isolador óptico, insensível à polarização, impede a realimentação óptica da radiação em 1550 nm (o que alteraria o espectro da superfluorescência).

A saída do circulador foi conectada à entrada do fotodetector e a saída deste à entrada do amplificador de transimpedância, modelo 13 AMP 005 (*Wide Bandwidth Amplifier*) da empresa Melles Griot. A saída do amplificador foi conectada a um canal analógico do sistema de aquisição de dados, modelo NI USB-6251 da empresa National Instruments (NI), cujas principais características são apresentadas adiante. A saída do circulador do arranjo experimental do interrogador apresenta um sinal proporcional à convolução dos espectros das grades FBG-a e FBG-b. Essas duas grades casadas possuem os valores de comprimento de onda próximos, de forma que as curvas dos seus espectros de resposta fiquem parcialmente sobrepostas.

Um sensor de temperatura do tipo termistor com coeficiente de temperatura positivo (PTC) foi utilizado no experimento como referência do parâmetro de temperatura. Esse sensor foi posicionado junto às grades de Bragg na superfície da peça mecânica e sua monitoração foi realizada através de um segundo canal analógico do sistema de aquisição de dados modelo NI USB-6251.

Na Tabela (3.2.1.), abaixo é mostrada a configuração dos canais do equipamento de aquisição de dados modelo NI USB-6251 e os dispositivos a ele conectados.

Tabela 3.2.1. – Configuração	dos canais o	do sistema	de aquisição	de dados NI	USB-
6251 da National Instruments.					

Parâmetro	Canal 00	Canal 03
Nome sinal	Trans-Z	Temperatura
Configuração do canal	Floating Sourcing (FS)	Ground ref. Source (GS)
Excitação	-	5 V <i>(digital port)</i>
Tipo do sensor	Fotodetector	Termistor PTC $10~\mathrm{k}\Omega$
Fabricante	Melles Griot	Newport Corp.

### 3.2.2 Interrogador modelo sm130 da Micron Optics

Um dos sistemas interrogadores de uso comercial utilizado foi o modelo sm130-200 fabricado pela empresa Micron Optics, que possui dois canais de entrada e taxa máxima de aquisição de 100 Hz.

Esse sistema opera emitindo radiação produzida por um laser sintonizável que varre o comprimento de onda da luz injetada na fibra óptica na faixa de 1510 nm a 1590 nm e tem seu funcionamento baseado na tecnologia proprietária de filtro óptico sintonizável de Fabry-Perot em fibra (FFP-TF).

Na Figura (3.2.2.), a seguir, é apresentada uma foto ilustrativa do sistema interrogador óptico modelo sm130 da MOI:



Figura 3.2.2. – Foto ilustrativa do interrogador óptico comercial modelo sm130 com 4 canais da MOI. Fonte: Foto retirada do site do fabricante MOI.

Na Tabela (3.2.2.), a seguir, são apresentadas algumas características do interrogador óptico modelo sm130 utilizado:

Tabela 3.2.2. – Características do interrogador de espectros ópticos modelo sm130.

Parâmetro	sm130
Faixa de varredura comp. onda: $[nm]$	1510 a 1590
Precisão absoluta: [pm]	2,0 típico, 5,0 max.
Repetibilidade: [pm]	1,0
Faixa dinâmica: [dB]	25 (com ganho selecionável pelo usuário)
Frequência de amostragem: [Hz]	100
Canais de entrada:	2

Fonte: Folha técnica *sm130* – *Optical Sensing Interrogator, Micron Optics*. <sup>(128)</sup>

Para máxima performance do equipamento o fabricante *Micron Optics* recomenda o uso de sensores FBG apodizados de alta refletividade (>90 %) com modo de supressão lateral >15 dB e largura de banda óptica de  $250 \text{ pm} (\pm 50 \text{ pm})$ . O fabricante informa que qualquer aumento na largura de banda óptica poderá resultar em uma redução líquida na faixa dinâmica efetiva do sistema e qualquer redução na refletividade pode resultar numa redução no desempenho da repetibilidade. <sup>(129)</sup>

O *Enlight* é o programa padrão fornecido pelo fabricante MOI para que seja realizada a programação, o controle e a operação dos interrogadores ópticos de sua fabricação, inclusive o modelo sm130 utilizado. A versão v1.0.38 do programa *Enlight* foi obtida por meio da página da *internet* do fabricante MOI e foi utilizada nas aquisições dos sinais das FBG produzidas no IEAv e dos sensores comerciais.

# 3.2.3 Interrogador modelo FS2200 da Fiber Sensing

O outro sistema interrogador de uso comercial utilizado foi o modelo FS2200 fabricado pela empresa *Fiber Sensing* (FS), que possui quatro canais de entrada e taxa máxima de aquisição de 1 Hz.

O sistema FS2200 é uma unidade de medida óptica do tipo *BraggMeter* de uso industrial baseada na varredura contínua de laser sintonizável que opera na faixa de leitura de 1500 nm a 1600 nm.

Na Figura (3.2.3.), a seguir, é apresentada uma foto ilustrativa do sistema interrogador modelo FS2200.



Figura 3.2.3. – Foto ilustrativa do interrogador óptico industrial modelo FS2200 com 4 canais. Fonte: Foto retirada do site do fabricante FS.

Na Tabela (3.2.3.), a seguir, são apresentadas algumas características do interrogador modelo FS2200 utilizado:

Parâmetro	FS2200	
Faixa de varredura comp. onda: $[nm]$	1500 a 1600	
Resolução: [pm]	1,0	
Precisão absoluta: [pm]	2,0	
Repetibilidade: [pm]	1,0	
Frequência de amostragem: [Hz]	1	
Canais de entrada:	4	

Tabela 3.2.3. – Características do interrogador de espectros ópticos modelo FS2200.

Fonte: Manual do usuário do FS2200 - Industrial BraggMeter, Fiber Sensing. (130)

O programa utilizado para a programação, controle e operação do interrogador óptico da FS utilizado nas aquisições das FBG produzidas no IEAv e dos sensores comerciais foi a versão v3.1.0. do *Measurement Unit Software* (MU) do fabricante Fiber Sensing.

# 3.2.4 Sistema de aquisição de dados modelo USB-6251 da National Instruments

O sistema de aquisição de dados da série M modelo NI USB-6251 da empresa National Instruments é um equipamento de múltiplas funções, compacto e de alta velocidade de amostragem composto por entradas e saídas analógicas, entrada de contagem de pulsos, portas de entrada e saída digitais e comunicação com o microcomputador via porta USB.

Esse sistema de aquisição de dados foi utilizado apenas para a coleta de parâmetros como o sinal da voltagem referente à saída do amplificador de transimpedância e o sinal do sensor PTC relativo à temperatura monitorada nos ensaios realizados com o arranjo experimental do interrogador baseado na convolução das respostas de duas FBG implementado no laboratório do IEAv.

Na Figura (3.2.4.), a seguir é apresentada uma foto ilustrativa do sistema de aquisição de dados modelo NI USB-6251 da NI:



Figura 3.2.4. – Foto ilustrativa do sistema de aquisição de dados modelo USB-6251 da National Instruments. Fonte: Foto retirada do site do fabricante NI.

Na Tabela (3.2.4.), a seguir, são apresentadas algumas características do sistema de aquisição de dados modelo NI USB-6251 utilizado:

Tabela 3.2.4. – Características do sistema de aquisição de dados modelo USB-6251.

Parâmetro	NI USB-6251	
Canais de entrada analógica	16 (simples / não diferencial)	
Resolução entrada analógica: $[bits]$	16	
Taxa de amostragem: [amostras/s]	até $1,00 \ge 10^6$ (múltiplos canais)	
Faixa de entrada: $\begin{bmatrix} V \end{bmatrix}$	$\pm 10, \pm 5, \pm 2, \pm 1, \pm 0, 5, \pm 0, 2 e \pm 0, 1$	

Fonte: Manual do usuário do USB-6251 – High-Speed M series Multifunction DAQ for USB, NI. (131)

Um programa desenvolvido na linguagem de programação LabVIEW foi utilizado para a aquisição de sinais com o sistema modelo USB-6251.

#### 3.2.5 Sistema de aquisição de dados modelo ADS2002IP-B-3 da Lynx

O sistema de aquisição de dados da série ADS2000 modelo ADS2002IP-B-3 fabricado pela empresa Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda foi utilizado para a coleta de sinais de sensores termopar do tipo K, extensômetros elétricos de resistência (EER) e de sensor de temperatura do tipo Pt100 nos ensaios realizados nos laboratórios LSI-SMT, LSO e LSI, descritos adiante.

Esse equipamento é composto por um módulo controlador e conversor analógico/digital (CAD) modelo AC2122VB com interface de rede padrão *ethernet* com protocolo UDP/IP que permite a comunicação usando interfaces de rede disponíveis na maioria dos microcomputadores e por um gabinete com capacidade de acondicionar até dois módulos condicionadores de sinais.

Os equipamentos da série ADS2000, por serem modulares, permitem expansão da capacidade de leitura para até 64 canais de entrada analógica por gabinete com a simples adição de módulos condicionadores de sinais, como por exemplo, o módulo AI2161VB e/ou o módulo AI2164VA. A concepção desse sistema permite que se realize a leitura sincronizada de até 256 canais de entrada analógica utilizando outros sistemas da série ADS2000.

Na Figura (3.2.5.), a seguir é apresentada uma foto ilustrativa do sistema de aquisição de dados modelo ADS2002IP-B-3 com dois módulos condicionadores de sinais, sendo o superior o modelo Al2164VA e o central o modelo Al2161VB:



Figura 3.2.5. – Foto ilustrativa do sistema de aquisição de dados modelo ADS2002IP-B-3 da Lynx. Fonte: Foto retirada do site do fabricante Lynx.

Na Tabela (3.2.5.), a seguir, são apresentadas algumas características do sistema de aquisição de dados modelo ADS2002IP-B-3 utilizado:

Tabela 3.2.5. – Características do sistema de aquisição de dados modelo ADS2002IP-B-3.

Parâmetro	Sistema de aquisição de dados ADS2002IP-B-3	
Modelo do conversor A/D	AC2122VB	
Quantidade de canais:	16 multiplexados	
Resolução conversor A/D: [bits]	16	

Fonte: Manual do sistema ADS2002IP e AqDados - Guia rápido de instalação e uso, Lynx. (132)

Os dois modelos de módulos condicionadores apresentados anteriormente foram utilizados para o condicionamento dos sinais proveniente dos sensores.

O módulo condicionador de sinais modelo Al2161VB é configurável através de chaves do tipo *DIP switch*. A configuração do tipo de entrada e da faixa de ganho é realizada através dessas chaves, já o ganho dentro dessas faixas, os filtros passabaixas analógicos com função *anti-aliasing*, ou seja, para evitar a subamostragem, o balanceamento e a aplicação da resistência de *shunt cal* são configuráveis através do programa AqDados.

No módulo Al2164VA a configuração do tipo de entrada, faixa de ganho, filtros, excitação dos sensores, balanceamento e *shunt cal* são configurados através do programa AqDados, não sendo necessária a retirada do módulo do gabinete para a realização de alteração na configuração dos canais analógicos.

Esses dois módulos possibilitam o condicionamento de sinais de corrente de 4 a 20 mA, de tensão de  $\pm 10 \text{ V}$ , de acelerômetros piezoelétricos com amplificador de carga tipo ICP<sup>®</sup>, de circuitos em ponte resistiva, como por exemplo, célula de carga, além dos já citados sinais de extensômetros elétricos e sensores de temperatura do tipo termopar e Pt100.

Na Tabela (3.2.6.), a seguir, são apresentadas algumas características dos módulos condicionadores de sinais compatíveis com o sistema ADS2002IP-B-3.

Parâmetro	Condicionador Al2161VB	Condicionador Al2164VA
Número de série	NS 52036	NS 49298
Quantidade de canais	16 por placa	16 por placa
Tipo de entrada*	V, I, Pt100, ponte R, tp, pot,	V, I, Pt100, ponte R, tp, pot,
	IPz *	IPz *
Modo de configuração da entrada	DIP-Switch e software	software
Faixa de ganho:	x1 a x5000	x1 a x5000
Modo de configuração do ganho	DIP-Switch e software	por <i>software</i>
Filtro passa-baixas: $\left[ Hz  ight]$	5/20/100/200 e 2k	3/30/100/1k e 3k
Modo de configuração do filtro	software	software
Tensão de excitação (VEXC): $\begin{bmatrix} V \end{bmatrix}$	0,25/0,5/0,75/2,5/5,0 e 7,5	0,125/2,5/5,0/7,5 e 10,0
Modo de configuração VEXC	jumpers	software

Tabela 3.2.6. – Características dos módulos condicionadores de sinais modelos Al2161VB e Al2164VA da Lynx.

Fonte: Manual do sistema ADS2002IP e AqDados - Guia rápido de instalação e uso, Lynx. (132)

\* onde:

- V: tensão até  $\pm 10,0$  V;
- I: corrente até  $\pm 20,0$  mA;

- Pt100: sensor de temperatura de platina;

- ponte R: ponte resistiva completa,  $\frac{1}{4}$  e  $\frac{1}{2}$  ponte em 120 e 350  $\Omega$ ;

- tp: termopar tipos B, E, N, J, K, R, S, T;

- pot: potenciômetro;

- IPz: sensores piezoelétricos alimentados por corrente.

O programa de aquisição de dados utilizado é o AqDados 7.02 <sup>(133)</sup> da Lynx, o qual permite os procedimentos operacionais necessários para a calibração dos sensores de forma rápida e precisa, bem como possibilita a gravação dos sinais proveniente do ADS2002IP em arquivos de série temporal num microcomputador tipo PC.

Para a análise e processamento dos dados coletados o programa AqDAnalysis 7, <sup>(134)</sup> também da Lynx, foi utilizado. Com esse programa foi possível, quando pertinente, a filtragem do sinal coletado, a execução de operações matemáticas entre os sinais, como a subtração entre duas curvas e a exportação dos sinais em padrão ASCII ou compatível com outros programas de análise, como o aplicativo MatLab.

O microcomputador utilizado para armazenamento dos dados e para a comunicação com o sistema de aquisição de dados ADS2002IP-B-3 e com o sistema interrogador óptico sm130 é um computador portátil (*notebook*), com processador Intel<sup>®</sup> Core 2 Duo<sup>™</sup> T7300 com velocidade de 2,0 GHz e memória RAM de 3,0 GB. O sistema operacional instalado é o Windows 7 Ultimate de 32 *bits* da Microsoft.

# 3.3 ARRANJOS EXPERIMENTAIS

Nos itens a seguir, são apresentados e caracterizados os arranjos e procedimentos experimentais realizados nos diversos laboratórios utilizados. Sempre que materiais ou condições especiais forem empregados eles serão descritos no próprio experimento em questão descrito no Capítulo 4.

# 3.3.1 Ensaios térmicos e mecânicos realizados no laboratório da EFO-S

Foram utilizados nos ensaios térmicos e nos de deformação mecânica realizados no Laboratório da Subdvisão de Sensores a Fibra Óptica (EFO-S) do IEAv os seguintes equipamentos e materiais:

- 05 Grades de Bragg em fibra óptica produzidas no IEAv, identificadas anteriormente como: FBG-1, FBG-2, FBG-22, FBG-31 e FBG-37;
- 01 Interrogador laboratorial baseado na convolução das respostas de duas FBG;
- 01 Interrogador comercial modelo sm130 da Micron Optics;
- 01 Sistema de aquisição de dados modelo USB-6251 da National Instruments;
- 01 Multímetro modelo 34401A fabricado pela Agilent;
- 01 Câmara térmica modelo TBO-1 fabricada pela empresa Tenney;
- 01 Peça do reforço metálico denominado W6 construído em liga Alclad 2024-T3;
- 01 Dispositivo posicionador para ensaio de deformação mecânica de viga em balanço produzido no IEAv;
- 01 Caixa de papelão;
- 01 Tubo de papelão.

Como visto anteriormente, a peça W6 (DTA-AT-26 CDP-W6) é um reforço do revestimento inferior da asa da aeronave modelo EMB-326 Xavante da Embraer. O MB-326 é uma aeronave monomotora a jato para o treinamento militar desenvolvida pela companhia italiana Aermacchi e produzida sob concessão pela empresa brasileira Embraer tendo sua versão também conhecida como AT-26 Xavante pela Força Aérea Brasileira (FAB). <sup>(135)</sup>

O material de construção da peça W6 é o duralumínio, mais especificamente a liga metálica denominada Alclad 2024-T3 da empresa Alcoa, cujos principais elementos da composição são o alumínio (Al), o cobre (Cu), o manganês (Mg) e o magnésio (Mn). Outros elementos químicos podem compor o material de forma secundária, como pode ser observado na literatura. <sup>(136; 137)</sup>

As ligas de Al-Cu-Mg 2024 com tempera T3 são reconhecidas por sua alta tenacidade (termo em inglês: *toughness*) e excelentes propriedades mecânicas, como a elevada resistência mecânica conferida após o tratamento térmico de endurecimento por precipitação. Entretanto, apesar dessa vantagem, apresentam algumas desvantagens quando comparadas com outros tipos de ligas de alumínio, que vão desde a resistência à corrosão relativamente baixa e a conformabilidade limitada, sendo pouco adequadas a processos com elevada deformação, como a extrusão, por exemplo. Outra deficiência é a soldabilidade igualmente restrita, uma vez que, em geral, são soldadas somente por processos de resistência elétrica. <sup>(138)</sup>

Como ponto fraco, a liga 2024 possui baixa resistência a corrosão, motivo pelo qual uma camada de alumínio puro é depositada na superfície da chapa, de onde advém o sufixo CLAD (que indica revestimento, do inglês *cladding*). <sup>(139)</sup> A adição do alumínio puro confere ao material elevada resistência à corrosão, devido à formação de uma camada de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), muito fina, transparente e extremamente aderente que concede essa característica ao evitar o prosseguimento da oxidação e, principalmente, a remoção dos óxidos, ou seja, o fenômeno conhecido como passivação. <sup>(138)</sup>

Embora os valores da resistência a tração (400 - 427 MPa, termo em inglês: *ultimate tensile strength*) e do limite de escoamento (269 – 276 MPa, termo em inglês: *yield strength*) da liga 2024-T3, sejam pouco menores do que, por exemplo, os obtidos com o aço 1040 laminado a frio, que também é um material utilizado em estruturas aeronáuticas, a sua massa específica é cerca de 2,85 vezes menor do que do aço. Portanto, o duralumínio é um material relativamente resistente com peso muito menor do que o aço, característica essencial na indústria de transportes, pois representa menor consumo de combustível, menor desgaste, mais eficiência e maior capacidade de carga. (140)

Os valores da resistência a tração e do limite de escoamento para o aço 1040 laminado a frio, são de 585 MPa e 490 MPa, respectivamente, quanto que para o alumínio puro recozido esses valores são de 48 MPa e 12,7 MPa, respectivamente. (140; 141)

Na Figura (3.3.1.), a seguir é apresentada uma foto ilustrativa da peça W6 utilizada nos ensaios.



Figura 3.3.1. – Foto ilustrativa do reforço do revestimento da asa da aeronave AT-26 Xavante da Embraer denominado W6.

Os ensaios de ciclo térmico realizados no laboratório da EFO-S, consistiram em dispor as FBG sob a superfície da peça W6 ou simplesmente ordená-las, sem a peça W6, dentro de uma caixa ou de um tubo de papelão e elevar a temperatura da câmara até um determinado valor, para então desligá-la. Após o desligamento da câmara e decorrido algum tempo dessa ação, a porta do forno foi deixada entreaberta a fim que a queda da temperatura no interior da câmara fosse acelerada.

A câmara modelo TBO-1 possui capacidade volumétrica interna de cerca de 42 litros e potência máxima de 1700 W. Esse forno possui ventilação forçada e a temperatura da câmara, que pode chegar a valores de até 300 °C, é controlada por um indicador e controlador digital da série 981 da empresa Watlow.

Na Figura (3.3.2.), a seguir, é apresentada uma foto ilustrativa da câmara térmica modelo TBO-1 fabricada pela empresa Tenney.



Figura 3.3.2. – Foto ilustrativa da câmara térmica modelo TBO-1 da Tenney. Fonte: Foto de um equipamento similar ao utilizado no IEAv.

Nos ensaios mecânicos a peça W6, que tinha 04 FBG dispostas em sua superfície, foi engastada em balanço no dispositivo mecânico posicionador construído no IEAv e foi submetida a esforços de flexão controlados por um parafuso micrométrico. Esse dispositivo apresentou problemas de projeto e construção que inviabilizaram os resultados apresentados, assim um novo dispositivo de teste foi construído e os resultados podem ser vistos no item que trata dos ensaios realizados no laboratório LSO, adiante.

A sala do laboratório onde os ensaios mecânicos foram realizados possui condicionador de ar central, mas não tem controle algum da temperatura, assim nos dias da realização dos ensaios mecânicos o valor da temperatura da sala ficou entre 19 e 21 °C, de acordo com o horário do dia.

No item (4.1.), a seguir, são apresentados os resultados dos ensaios térmicos e mecânicos realizados no laboratório da EFO-S, bem como os detalhes e as questões operacionais de cada um dos arranjos experimentais.

#### 3.3.2 Ensaios térmicos realizados no laboratório LSI-SMT

Após a conclusão dos ensaios descritos no item anterior, por motivo de logística, os ensaios térmicos passaram a serem realizados no laboratório da linha de montagem SMT do LSI (LSI-SMT) da EPUSP. Nesses ensaios os seguintes equipamentos e materiais foram utilizados:

- 02 sensores de temperatura baseados em FBG modelo FS6320 (soldável) fabricados pela FS, identificados anteriormente como: FS6300-1S e FS6300-2S;
- 01 sensor FBG comercial de temperatura modelo OS4100 produzido pela MOI, identificado anteriormente como: OS4100-T;
- 01 sensor FBG comercial de deformação mecânica modelo OS3100 produzido pela MOI, identificado anteriormente como: OS3100-D (não foi usado para ensaios, mas apenas para caracterização);
- 01 Interrogador comercial modelo sm130 da Micron Optics;
- 01 Sistema de aquisição de dados modelo ADS2002IP-B-3 da Lynx;
- 02 Sensores de temperatura termopares tipo K modelo 20110K45-72 da Exacta;
- 01 Sensor de temperatura termoresistência de platina tipo Pt100 modelo EX-28-PB-S3-316-06-20-C-00/00 da Exacta;
- 01 Câmara climática modelo CC-200H fabricada pela empresa SuperOhm;
- 01 Peça metálica retangular construída em liga Alclad 2024 T3;
- 01 Caixa de papelão.

Os ensaios de ciclo térmico consistiram em dispor os sensores FBG sob a superfície da peça metálica retangular ou simplesmente ordená-los, sem a peça citada, dentro de uma caixa de papelão e elevar a temperatura da câmara até um determinado valor, para então desligá-la. Após o desligamento da câmara e decorrido algum tempo dessa ação, a porta do forno foi deixada entreaberta a fim que se acelerasse a queda da temperatura no interior da câmara.

A câmara climática modelo CC-200H possui capacidade volumétrica interna para até 200 litros e pode simular temperaturas ambientes desde -80 °C até +300 °C e umidades relativas de 20 a 98 %.

Na Figura (3.3.3..), a seguir, é apresentada uma foto ilustrativa da câmara térmica modelo CC-200H fabricada pela empresa SuperOhm.



Figura 3.3.3. – Foto ilustrativa da câmara climática modelo CC-200H da SuperOhm. Fonte: Foto de um equipamento similar retirada do site do fabricante SuperOhm.

A circulação de ar no interior da câmara é feita através de um sistema especial de ar forçado que proporciona uma excelente uniformidade de temperatura e umidade. A temperatura da câmara é controlada por meio de um circuito de controle em malha fechada (PID) e supervisionada por um microcomputador. O sistema utiliza sensores de platina do tipo Pt100 para a medição da temperatura interna da câmara, tendo ótima repetibilidade e excepcional estabilidade.

No item (4.2.), a seguir, são apresentados os resultados dos ensaios térmicos realizados no laboratório LSI-SMT, bem como os detalhes e as questões operacionais de cada um dos arranjos experimentais.

### 3.3.3 Ensaios de deformação mecânica realizados no laboratório LSO

Foram realizados diversos ensaios de deformação mecânica no Laboratório de Sensores Ópticos (LSO) da EPUSP e os seguintes equipamentos e materiais foram utilizados:

- 03 Grades de Bragg em fibra óptica produzidas no IEAv, identificadas anteriormente como: FBG-5, FBG-6 e FBG-17;
- 01 Interrogador comercial modelo sm130 da Micron Optics;
- 01 Sistema de aquisição de dados modelo ADS2002IP-B-3 da Lynx;
- 02 Sensores de temperatura termopares tipo K de fabricante desconhecido;
- 02 Extensômetros elétricos modelo KFG-10-120-C1-11 da marca Kyowa;
- 01 Peça metálica retangular construída em liga Alclad 2024 T3;
- 01 Dispositivo posicionador para ensaios estáticos e dinâmicos de deformação mecânica de viga em balanço;

As grades FBG5, FBG-6 e FBG-17, todas produzidas no IEAv, foram coladas em uma das superfícies da chapa metálica. Adicionalmente, foram colados na superfície posterior da chapa dois extensômetros elétricos de resistência para medição de deformação, os quais serviram de referência para esse parâmetro.

Tanto as FBG quanto os EER foram posicionados e colados na região central da chapa. Procurou-se realizar o alinhamento longitudinal das grades e o alinhamento longitudinal e o transversal dos extensômetros, de maneira a minimizar os problemas decorrentes de possíveis desalinhamentos diagonais e maximizar a sensibilidade dos sensores na direção da aplicação da força. A distância de colagem entre as grades foi de aproximadamente 1,0 mm.

Antes da colagem das FBG e dos EER na chapa de Alclad, a superfície da peça foi preparada de modo a permitir uma boa aderência dos sensores. A preparação consistiu no processo de abrasão da superfície da peça utilizando uma lixa d'água para a retirada de possíveis mossas. Em peças, cuja superfície é muito irregular, o uso de grosas para ferreiros e de limas dos tipos bastardas, de segundo

corte e murças é necessário para o acabamento da peça trabalhada. Após o lixamento da superfície, a peça foi lavada com detergente para o desengorduramento e limpeza da superfície. Em seguida a peça foi seca com toalhas de papel e uma segunda limpeza, agora com algodão embebido em álcool isopropílico, foi realizada para a retirada de resíduos.

Uma cola a base de cianoacrilato, modelo Super Bonder 495 Loctite<sup>®</sup> da *Henkel* foi utilizada para aderir as FBG e os EER na superfície da peça.

O processo de colagem das grades FBG-5, FBG-6 e FBG-17 foi estabelecido com a seguinte ordenação: primeiramente, um dos lados da fibra óptica foi colado na superfície da chapa, enquanto que o outro lado foi colado em um pedaço de fibra óptica de sacrifício, ou seja, que foi inutilizada posteriormente. A fibra de sacrifício estava colada em um corpo com massa de 154 g. Após o tempo de cura da cola de aproximadamente 1 h 30 min, a chapa metálica foi colocada na posição vertical de modo que o peso do corpo exercesse uma força de tração de aproximadamente 1,51 N na fibra óptica.

Após a estabilização dos movimentos do corpo, o outro lado da fibra óptica contendo a FBG foi colado na superfície da chapa. O tempo de cura do segundo ponto de colagem para a grade FBG-5 foi de apenas 20 min, enquanto que para a grade FBG-17 o tempo foi de 2 h 30 min. A grade FBG-6 foi colada sem o prétensionamento, pois a cola escorreu na pela região ativa da grade antes que a fibra óptica pudesse ser tracionada.



Na Figura (3.3.4.), a seguir é apresentada uma foto das três FBG coladas na superfície da chapa.

Figura 3.3.4. – Foto da chapa metálica com as FBG-5, FBG-6 e FBG-17 coladas na superfície.

Os dois EER foram colados na face posterior da chapa metálica, de acordo com os procedimentos recomendados pelo fabricante dos extensômetros. <sup>(142)</sup> Procurou-se também, quando possível, seguir as recomendações e cuidados para a redução e eliminação de erros nas medidas com extensômetros. <sup>(143; 144)</sup>

Na Figura (3.3.5.), a seguir é apresentada uma foto dos dois EER colados na superfície da chapa.



Figura 3.3.5. – Foto da chapa metálica com os EER colados na superfície posterior da chapa.

Para a realização das medidas de deformação nos ensaios mecânicos, foi utilizada a técnica de medida de ponte de Wheatstone na configuração de ¼ de ponte com ligação a três fios para a leitura dos EER. Essa configuração consiste em substituir uma das resistências dos braços da ponte por um extensômetro colado no material a ser ensaiado.

Na Figura (3.3.6.), a seguir é apresentado um desenho ilustrativo de uma ponte de Wheatstone com ligação em ¼ de ponte a três fios.



Figura 3.3.6. – Desenho ilustrativo da ligação de ¼ de ponte de Wheatstone em ligação a três fios.

O uso da conexão a três fios pode minimizar os efeitos da variação da resistência dos cabos com as variações da temperatura e diminuir o deslocamento do nível zero do sinal de saída (V<sub>S</sub>) provocado pela inclusão dessas resistências de cabo (r), uma vez que elas afetam os braços adjacentes da ponte.

O EER colado na direção longitudinal é o elemento ativo da ponte, o qual é sensível às deformações longitudinais decorrentes de forças de tração ou de compressão provocadas pelos movimentos de flexão realizados na chapa metálica por meio do dispositivo mecânico posicionador.

A princípio a configuração de ¼ ponte, utilizada nos ensaios mecânicos é suficiente para que se consiga uma medida razoavelmente precisa da deformação, mesmo sendo essa configuração considerada a mais simples e de menor custo. No entanto, essa configuração é limitada, quando comparada as configurações de ½

ponte e ponte completa. Mesmo assim, optou-se por utilizar essa configuração, pois os ensaios realizados no LSO foram de curta duração e porque se esperava que a temperatura da sala, mesmo não possuindo controle algum ou sistema de condicionador de ar, não sofreria grandes variações nos dias dos ensaios, o que se confirmou.

A realização de ensaios térmicos no LSI com a chapa metálica, cujos resultados são mostrados no item a seguir, exigiu a ligação de um segundo EER e a utilização da configuração em ½ ponte.

A utilização de dois EER, um colado no sentido de medição da força e outro no sentido transversal ao sentido de medição, reduzem o efeito causado pela variação da temperatura nos extensômetros. <sup>(143)</sup>

Na Figura (3.3.7.), a seguir, um desenho ilustrativo mostra uma configuração de dois EER, onde um deles é o elemento ativo (EER longitudinal) e o outro extensômetro (EER transversal), chamado de *dummy gage*, é colocado na direção perpendicular ao eixo de aplicação da carga (força).





O segundo EER colado na direção transversal ao eixo de aplicação da carga pode ser considerado como elemento passivo para as deformações longitudinais ocorridas no material, pois possui baixíssima sensibilidade às deformações nessa direção, no entanto é um elemento ativo para as deformações na direção transversal. Sabe-se que, quando uma barra é tracionada por uma força axial, como representada na figura acima, um fenômeno conhecido como tensão de Poisson causa o estreitamento da barra no sentido transversal, ou seja, na direção perpendicular à força aplicada. <sup>(143)</sup> Portanto, esse EER medirá as deformações transversais devido ao efeito Poisson, quando a chapa for deformada no sentido longitudinal.

Nesse arranjo todas as mudanças na temperatura afetam ambos EER da mesma maneira, já que pela montagem próxima, a temperatura dos dois sensores deve ser praticamente a mesma.

Desta forma a relação entre suas resistências não muda, dado que ambas variam na mesma ordem de grandeza com a temperatura, fazendo com que a tensão de saída da ponte (V<sub>S</sub>) não mude e, consequentemente, resultando numa minimização dos efeitos de mudança de temperatura.

Na Figura (3.3.8.), a seguir, é apresentado um desenho ilustrativo do circuito em ½ ponte com ligação a três fios e do esquema representativo da fixação dos EER na chapa engastada.



Figura 3.3.8. – Desenho ilustrativo da ligação de ½ ponte de Wheatstone em ligação a três fios.

Idealmente, a resistência do EER deveria mudar somente em resposta a deformação aplicada, entretanto, o material de fabricação dos extensômetros, assim como o material do espécime em que ele foi colado, no caso a chapa metálica, responderá também às mudanças de temperatura. Os fabricantes dos EER tentam

minimizar a sensibilidade à temperatura processando o material de fabricação do extensômetro de forma a compensar a expansão térmica do material do espécime a que o EER é destinado. Esses EER compensados têm baixa sensibilidade térmica, porém não são totalmente imunes às variações de temperatura.

O sensor utilizado nos experimentos é o extensômetro uniaxial de filme metálico modelo KFG-10-120-C1-11 da Kyowa. Esse EER tem região ativa de 10 mm, resistência de  $119,8 \Omega \pm 0,2 \Omega$ , *gage factor* de  $2,11 \pm 1 \%$ , sensibilidade transversal de 0,2 % e possui compensação de temperatura para uso com aço comum. Embora o modelo de EER utilizado não possua compensação de temperatura para utilização com liga de Alclad, seu uso foi considerado adequado para a realização dos ensaios mecânicos, uma vez que o maior interesse da análise era quanto ao comportamento do sinal e não no seu valor absoluto da deformação.

Para a realização dos ensaios mecânicos estáticos e dinâmicos, um novo dispositivo mecânico posicionador foi projetado e construído no LSO. Esse dispositivo possibilitou a execução dos mais variados tipos de experimentos com a simples troca de acessórios de montagem, como poderá ser visto nos itens adiante.



Na Figura (3.3.9.), a seguir é apresentado um desenho ilustrativo do dispositivo mecânico posicionador com a chapa metálica engastada e em balanço.

Figura 3.3.9. – Desenho ilustrativo do dispositivo mecânico projetado e construído no LSO.

Os locais de colagem das FBG e dos EER, bem como as distâncias referenciadas do engaste e dos pontos de aplicação do deslocamento (ou carga) são apresentados no desenho ilustrativo, a seguir.



Figura 3.3.10. – Desenho ilustrativo da chapa engastada e as referências das medidas mecânicas.

Adicionalmente, foram instalados dois termopares convencionais do tipo K para a medição da temperatura na superfície da chapa e do ambiente da sala onde os experimentos foram realizados.

A sala do laboratório onde os ensaios mecânicos foram realizados não possui condicionador de ar e, portanto, mas não tem controle algum da temperatura ambiente, a qual varia de acordo com a temperatura ambiente ao longo do dia.

#### 3.3.3.1 Montagem do dispositivo mecânico com o parafuso micrométrico

Nos ensaios mecânicos de degraus de carga, a chapa metálica foi engastada no dispositivo mecânico posicionador e por meio de ajustes realizados no parafuso micrométrico, foram executados deslocamentos verticais de forma a provocar patamares de flexão na barra.



Na Figura (3.3.11.), a seguir, é mostrada uma foto da montagem do dispositivo mecânico posicionador com o parafuso micrométrico.

Figura 3.3.11. – Foto do dispositivo mecânico posicionador com parafuso micrométrico e da chapa metálica engastada.

A barra foi engastada no bloco de alumínio e o ponto de aplicação da força (deslocamento) dista 321 mm do engaste, o EER e as grades de Bragg estão colados a uma distância de 160 mm do engaste.

No item (4.3.1.) são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos realizados no laboratório LSO, bem como os detalhes e as questões operacionais de cada um dos arranjos experimentais.

### 3.3.3.2 Montagem do dispositivo mecânico com o disco excêntrico

Os ensaios mecânicos dinâmicos consistiram em flexionar a chapa metálica de forma cíclica e com velocidades diferentes. Para isso, foi utilizado um dispositivo de montagem composto por um disco excêntrico acoplado a um motor elétrico de corrente contínua (DC). A velocidade de rotação do motor foi controlada por um circuito eletrônico de modulação por largura de pulso (PWM).

O disco foi construído em politetrafluoretileno (PTFE), também conhecido como teflon<sup>®</sup>, a fim de diminuir o atrito no contato com a chapa metálica durante a sua movimentação. Foram feitos furos em três distâncias diferentes do centro da circunferência do disco, de modo a permitir faixas de deslocamentos variadas.

Nesses ensaios, o disco excêntrico foi posicionado na parte inferior do corpo de prova (chapa metálica), assim, nos ensaios dinâmicos de flexão, o ponto de aplicação da carga, representado pela superfície inferior da chapa, é colocado num estado de tração, ao passo que a superfície superior encontra-se em compressão.

Na Figura (3.3.12.), a seguir, é mostrada uma foto da montagem do dispositivo mecânico posicionador com o disco excêntrico acoplado a um motor elétrico.



Figura 3.3.12. – Foto do dispositivo mecânico posicionador com disco excêntrico.

No item (4.3.2.), a seguir, são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos realizados no laboratório LSO, bem como os detalhes e as questões operacionais de cada um dos arranjos experimentais.

## 3.3.3.3 Montagem do dispositivo mecânico com o movimentador vertical

A montagem de um terceiro dispositivo no arranjo mecânico possibilitou a realização de ensaios de flexão da chapa metálica com diversas velocidades de execução. Nesses ensaios a chapa foi submetida ao movimento flexural até um determinado ponto, permanecendo nessa posição por um período de tempo para verificação da estabilidade da carga aplicada. Decorrido o tempo determinado, voltou-se a posição inicial de repouso, ou seja, sem flexão alguma.

Na Figura (3.3.13.), a seguir, é mostrada uma foto da montagem do dispositivo mecânico posicionador com o mecanismo de movimentação vertical.



Figura 3.3.13. – Foto do dispositivo mecânico com o movimentador vertical.

O mecanismo de movimentação vertical é composto por um eixo dotado de rosca sem fim, duas engrenagens dentadas com raios diferentes para redução de velocidade, um motor elétrico DC controlado por um circuito PWM, uma fonte de alimentação de 24 VDC e diversos suportes mecânicos. Uma chave tipo fim de curso foi instalada para desligar o circuito de alimentação ou inverter a rotação do motor, dependendo da função definida na chave de seleção do circuito.

Na Figura (3.3.14.), a seguir, é mostrada uma foto do mecanismo de movimentação vertical em detalhe.



Figura 3.3.14. – Foto do mecanismo de movimentação vertical em detalhe.

A barra foi engastada no bloco de alumínio e o ponto de aplicação da força (deslocamento) dista 321 mm do engaste, o EER e as grades de Bragg estão colados a uma distância de 160 mm do engaste.

No item (4.3.3.), a seguir, são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos realizados no laboratório LSO, bem como os detalhes e as questões operacionais de cada um dos arranjos experimentais.

### 3.3.4 Ensaios térmicos realizados no laboratório LSI

Com o intuito de verificar o comportamento das FBG produzidas no IEAv e dos sensores comerciais em função da sua posição dentro da câmara térmica diversos ensaios térmicos foram realizados no Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da EPUSP, nos quais foram utilizados os seguintes equipamentos e materiais:

- 06 Grades de Bragg em fibra óptica produzidas no IEAv, identificadas anteriormente como: FBG-5, FBG-6, FBG-7, FBG-8, FBG-11 e FBG-17;
- 01 Grade de Bragg dupla em fibra óptica produzida no IEAv, identificada anteriormente como: FBG-D1;
- 02 Grades de Bragg triplas em fibra óptica produzidas no IEAv, identificadas anteriormente como: FBG-T2, e FBG-T3;
- 02 sensores de deformação baseados em FBG modelo FS6210 (poliamida) fabricados pela FS, identificados anteriormente como: FS6200-1P e FS6200-2P;
- 02 sensores de deformação baseados em FBG modelo FS6230 (compósito) fabricados pela FS, identificados anteriormente como: FS6200-1C e FS6200-2C;
- 02 sensores de deformação baseados em FBG modelo FS6250 (embutido e compensado) fabricados pela FS, identificados anteriormente como: FS6200-1E e FS6200-1EC;
- 02 sensores de temperatura baseados em FBG modelo FS6320 (soldável) fabricados pela FS, identificados anteriormente como: FS6300-3S e FS6300-4S;
- 01 sensor FBG comercial de temperatura modelo OS4100 produzido pela MOI, identificado anteriormente como: OS4100-T;
- 01 sensor FBG comercial de deformação mecânica modelo OS3100 produzido pela MOI, identificado anteriormente como: OS3100-D;
- 01 Interrogador comercial modelo sm130 da Micron Optics;
- 01 Interrogador comercial modelo FS2200 da Fiber Sensing;
- 01 Sistema de aquisição de dados modelo ADS2002IP-B-3 da Lynx;
- 02 Sensores de temperatura termopares tipo K de fabricante desconhecido;
- 02 Extensômetros elétricos modelo KFG-10-120-C1-11 da marca Kyowa;
- 01 Câmara térmica modelo Q-317M33 fabricada pela empresa Quimis;
- 01 Peça metálica retangular construída em liga Alclad 2024 T3;
- 01 Caixa de papelão;
- 01 Tubo de papelão.
A câmara térmica utilizada é uma estufa para secagem modelo Q-317M33 da Quimis com capacidade volumétrica interna para até 81 litros e potência elétrica de 1000 W. A câmara possui um controlador PID eletrônico microcontrolado de temperatura e um indicador digital com mostrador duplo, o qual apresenta a temperatura programada e o valor da temperatura lida em um ponto da câmara. O valor máximo de temperatura a que essa câmara pode chegar é +300 °C.

Na Figura (3.3.15.), a seguir é apresentada uma foto ilustrativa da câmara térmica modelo Q-317M33 fabricada pela empresa Quimis.



Figura 3.3.15. – Foto ilustrativa da câmara térmica modelo Q-317M33 da Quimis. Fonte: Foto retirada do site do fabricante Quimis.

Os ensaios de ciclo térmico consistiram em dispor as FBG e os sensores FBG sob a superfície da peça metálica retangular ou simplesmente ordená-los, sem a peça citada, dentro de uma caixa ou de um tubo de papelão e elevar a temperatura da câmara até um determinado valor, para então desligá-la. Após o desligamento da câmara e decorrido algum tempo dessa ação, a porta do forno foi deixada entreaberta a fim que se acelerasse a queda da temperatura no interior da câmara.



Na Figura (3.3.16.), a seguir, é apresentada uma foto do arranjo experimental utilizado nos ensaios descritos nesse item.

Figura 3.3.16. – Foto do arranjo experimental utilizado nos ensaios térmicos realizados no LSI.

A sala de processo do laboratório onde os ensaios térmicos foram realizados possui condicionador de ar central e controle dos parâmetros de temperatura e umidade do ambiente, assim nos dias da realização dos ensaios térmicos e de caracterização das FBG e sensores comerciais o valor da temperatura da sala foi de  $20 \ ^{\circ}C \ (\pm 2 \ ^{\circ}C)$  e a umidade de  $40 \ \% \ (\pm 5 \ \%)$ .

Simultaneamente à realização dos ensaios térmicos com as FBG, dois sensores termopar tipo K foram utilizados para a medição da temperatura na superfície da chapa.

Embora os experimentos sejam para verificação de comportamento térmico das grades e sensores FBG, foram realizados ensaios com os dois EER colados na superfície da chapa para a medição da deformação decorrente à dilatação térmica do espécime em teste. Os valores de temperatura e de deformação obtidos por meio dos respectivos sensores convencionais (termopar e EER) serviram como referência para os parâmetros físicos utilizados na calibração das FBG. Os sinais dos termopares e dos extensômetros foram lidos pelo sistema de aquisição de dados ADS2002IP-B-3.

Os valores de comprimento de onda de resposta das grades FBG-5, FBG-6, FBG-17 e FBG-T3, foram convertidos para valores de temperatura utilizando o método de regressão linear implementado no programa de MatLab<sup>®</sup>.

## 3.3.4.1 Ensaio térmico das FBG coladas na superfície da peça metálica

Nos ensaios descritos a seguir, a chapa metálica com as grades FBG-5, FBG-6 e FBG-17 foi posicionada biapoiada sobre um recipiente redondo de vidro refratário. Esse recipiente é modelo 817 Marinex<sup>®</sup>, cujo diâmetro é de 295 mm e a altura de 40 mm. O recipiente foi posto sob uma base de alumínio a uma distância de 175 mm do assoalho da câmara.

Na Figura (3.3.17.), a seguir, é mostrada uma foto do arranjo experimental utilizado para o ensaio térmico com a chapa.



Figura 3.3.17. – Foto da montagem para ensaio térmico das FBG coladas na chapa de Alclad.

Os experimentos seguiram a seguinte sequência de ações: primeiramente, com a câmara térmica desligada e com a porta fechada foram coletados dados durante 5 min. Após esse período a câmara foi ligada e seu circuito de controle do aquecimento foi ativado, elevando o valor da temperatura interna da câmara para cerca de 80 °C, conforme valor apresentado pelo mostrador digital. Decorridos 40 min do início da coleta de dados a câmara foi desligada e a porta foi aberta em um ângulo de 90 ° em relação à posição de fechamento, a fim de aumentar a velocidade da queda da temperatura. Após 120 min do início do experimento a gravação dos dados foi interrompida.

A circulação de ar dentro das câmaras térmicas não é perfeitamente uniforme, o que pode criar gradientes de temperatura no corpo de prova em teste e, por consequência, nas grades e sensores FBG solidários ao espécime em teste. Assim, com o intuito de averiguar a existência de possíveis influências de fluxo térmico na resposta das grades e sensores FBG, foram realizados ensaios com diversas configurações de montagem.

Na Figura (3.3.18.), a seguir, são mostradas as diversas configurações de montagem realizadas.





A propósito, as quatro posições, denominadas 0°, 45°, 90° e 180°, são determinadas pelo ângulo formado entre eixo longitudinal da peça metálica e a porta frontal da câmara.

No item (4.4.1.), a seguir, são apresentados os resultados dos ensaios térmicos com a chapa de Alclad realizados no laboratório LSI, bem como os detalhes e as questões operacionais de cada um dos arranjos experimentais.

## 3.3.4.2 Ensaio térmico da FBG tripla dentro do tubo de papelão

Para a realização desse ensaio, a grade tripla, denominada FBG-T3, foi colocada dentro de um tubo de papelão juntamente com os dois termopares TMP-K1 e TMP-K2. O tubo de papelão foi posicionado verticalmente no centro da câmara térmica e colocado diretamente sob uma caixa de papelão. A caixa foi colocada em

cima de uma base de alumínio a uma distância de 175 mm da base inferior da câmara. O tubo de papelão teve as duas extremidades tampadas com isopor, sendo que em um dos lados um furo foi aberto para a entrada dos sensores.

Também foram realizados ensaios com o tubo de papel posicionado horizontalmente no centro da câmara térmica. Nesse caso, porém, o tubo de papel foi colocado em cima de uma caixa de papelão disposta sob uma base de alumínio a uma distância de 175 mm da base inferior da câmara.

Na Figura (3.3.19.), a seguir, é mostrada uma foto do arranjo experimental utilizado para o ensaio térmico com a FBG-T3 tripla colocada dentro do tubo de papelão horizontalmente posicionado.



Figura 3.3.19. – Foto da montagem para ensaio térmico da FBG tripla colocada no tubo de papelão horizontalmente posicionado na câmara.

No item (4.4.2.), a seguir, são apresentados os resultados dos ensaios térmicos com a FBG tripla realizados no laboratório LSI, bem como os detalhes e as questões operacionais de cada um dos arranjos experimentais.

## 3.3.4.3 Ensaio térmico dos sensores FBG dentro da caixa de papelão

Nesse experimento os sensores FBG foram posicionados com suas faces inferiores encostadas uma à outra e embrulhados entre duas folhas de papelão. Posteriormente, os sensores foram colocados dentro de uma caixa de papelão, que estava posicionada sob uma base de alumínio a uma distância de 175 mm do assoalho da câmara.

Na Figura (3.3.20.), a seguir, é mostrada uma foto da montagem realizada para o ensaio térmico dos sensores FBG comerciais colocados dentro da caixa de papelão.



Figura 3.3.20. – Foto da montagem para ensaio térmico dos sensores FBG comerciais colocados dentro da caixa de papelão.

Os dois sensores FBG foram ligados em série e conectados em apenas um canal do interrogador óptico, diferentemente dos experimentos descritos no item (3.3.2.), no qual cada sensor foi ligado em um canal distinto.

No item (4.4.3.), a seguir, são apresentados os resultados dos ensaios térmicos com os sensores FBG comerciais realizados no laboratório LSI, bem como os detalhes e as questões operacionais de cada um dos arranjos experimentais.

## 3.3.5 Caracterização das FBG produzidas no IEAv e dos sensores FBG comerciais

Adicionalmente, foram realizados ensaios para a caracterização e levantamento dos parâmetros ópticos das FBG produzidas no IEAv e dos sensores comerciais utilizados nesse trabalho.

Nas execuções desses experimentos foi utilizada a função de análise espectral (OSA) disponível no interrogador FS2200. A utilização desse interrogador foi importante, pois além da apresentação e da coleta do valor numérico do comprimento de onda central de Bragg das FBG, foi possível o levantamento das curvas espectrais de resposta das grades, o que possibilitou uma análise mais detalhada do comportamento da resposta das FBG e sensores.

Os parâmetros dos sensores averiguados são apresentados e discutidos no item (4.5.1.).

### **4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

As características particulares dos ensaios realizados nos laboratórios: da EFO-S, LSI-SMT, LSO e LSI, bem como os resultados obtidos em cada um deles são apresentados nesse capítulo.

## 4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS TÉRMICOS E MECÂNICOS REALIZADOS NO LABORATÓRIO DA EFO-S

Os ensaios térmicos e mecânicos foram realizados de acordo com o procedimento descrito no item (3.3.1.).

### 4.1.1 Ensaios térmicos

O primeiro ensaio térmico a ser apresentado consistiu em dispor as grades produzidas no IEAv denominadas FBG-1, FBG-2, FBG-22 e FBG-31 paralelamente umas às outras na região central da superfície da peça W6 (DTA-AT-26 CDP-W6).

Uma pasta térmica foi utilizada para tentar melhorar o fluxo de calor e uniformizar as temperaturas das quatro FBG, além de auxiliar a adesão das grades na peça. A pasta térmica utilizada no experimento é fabricada pela empresa Implastec Eletroquímica e possui condutividade térmica de 2,0 W/m.K, coloração branca levemente brilhante, consistência pastosa e tem como componente básico um silicone de alto peso molecular. Esse tipo de pasta térmica é o mesmo usado em eletrônica para melhorar o acoplamento térmico na interface entre componentes e dissipadores de calor.

As duas grades denominadas FBG-1 e FBG-2 foram conectadas nos canais 1 e 2, respectivamente, do interrogador modelo sm130 da MOI e as outras duas grades de Bragg denominadas FBG-22 e FBG-31 foram ligadas no interrogador do IEAv, de acordo com o arranjo experimental apresentado na Figura (3.2.1.), respectivamente nas posições das grades FBG-a e FBG-b.

A peça W6 foi colocada dentro de uma caixa retangular de papelão preenchida com flocos de poliestireno expandido (EPS), também conhecido como isopor<sup>®</sup> e posicionada dentro da câmara térmica modelo TBO-1 (NS: TB12811-2).

Elevou-se a temperatura até o mostrador digital da câmara indicar 80 °C e então ela foi desligada. Após determinado intervalo de tempo de aproximadamente 90 min a porta da câmara foi deixada entreaberta para que a queda de temperatura fosse mais acentuada.

O interrogador sm130 foi configurado de acordo com a parametrização apresentada na Tabela (4.1.1.), a seguir.

Tabela 4.1.1. – Configuração do interrogador sm130 – MOI utilizado no ensaio térmico na peça W6 (arquivo: Aquisicao1-17-03-2009).

Parâmetro	Canal 1 Canal 2		
Frequência de aquisição ( $\mathit{sampling frequency}$ ): $\left[ \mathrm{Hz} \right]$	100		
Intercalamento de dados (data interleave)	1		
Média do comprimento de onda (WVL average)	100	100	
Ganho ( <i>gain</i> ): [dB]	3,0 6,0		
Limiar de ruído ( <i>noise threshold</i> ): [-4096 a 4096]	100	100	

No Gráfico (4.1.1.) são mostradas as curvas do sinal da diferença entre os comprimentos de onda das grades FBG-1 e FBG-2 (denominado FBG-1 – FBG-2), do sinal de saída do amplificador de transimpedância do interrogador do IEAv referente a convolução das grades FBG-22 e FBG-31 (denominado Trans-Z) e do sinal de temperatura de referência do termistor PTC (denominado Temp. PTC).



Gráfico 4.1.1. – Gráficos da diferença entre os comprimentos de onda das grades (FBG-1 – FBG-2), da saída do amplificador de transimpedância (FBG-22 e FBG-31) e da temperatura (Temp. PTC). Fonte: Dados experimentais (arquivo: Aquisicao1 do dia 17/03/2009).

No Gráfico (4.1.1.) pode-se observar na curva da diferença entre as grades FBG-1 e FBG-2 que a diferença entre os comprimentos de onda das grades é mais acentuada no trecho de elevação da temperatura na câmara térmica, indicando que o deslocamento do comprimento de onda das duas grades nesta região não ocorreu de forma proporcional. Pode-se verificar que na curva de saída do amplificador de transimpedância (Trans-Z) que mesmo utilizando o interrogador do IEAv baseado na convolução das duas FBG, este efeito na diferença entre os comprimentos de onda das outras duas grades também ocorre.

Esse efeito do distanciamento dos comprimentos de onda das grades de Bragg será analisado apropriadamente no decorrer desse trabalho, uma vez que ele pode se tornar muito importante em casos onde se necessite de um segundo sensor para se compensar, por exemplo, a temperatura de sensores não compensados. A preocupação é que esse efeito possa se tornar catastrófico em ensaios dinâmicos, caso a temperatura venha a exibir uma taxa de variação acentuada, como por exemplo, na fuselagem de uma aeronave em voo. No Gráfico (4.1.2.) são mostrados os sinais normalizados dos comprimentos de onda das duas grades de Bragg monitoradas pelo interrogador sm130 e da diferença entre elas.



Gráfico 4.1.2. – Curvas dos comprimentos de onda das grades FBG-1 e FBG-2 normalizados e da diferença entre eles (FBG-1 – FBG-2) em picometros do ensaio térmico na peça W6. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Aquisicao1 do dia 17/03/2009).

Em análise da curva da diferença (Diferença, cor verde) entre os comprimentos de onda das grades FBG1 e FBG2 monitoradas pelo interrogador sm130 pode-se verificar que a variação apresentada por estas FBG chegou a valores próximos a  $\Delta\lambda_B \approx 20 pm$ . Esse valor representa uma diferença de temperatura entre as duas grades de aproximadamente  $\Delta T \approx 1,41^{\circ}C$ , considerandose a sensibilidade de uma grade de Bragg por efeito da temperatura de aproximadamente  $\Delta\lambda_B \approx 14,18 pm/^{\circ}C$ .

O aparecimento desta variação de temperatura não era esperada no caso do ensaio realizado, uma vez que as grades estavam praticamente em equilíbrio térmico e localizadas muito próximas umas das outras.

Num primeiro momento acreditou-se que, em termos dinâmicos, a diferença na variação entre os comprimentos de onda das grades tivesse sido causada pela distância ou pelo alinhamento no posicionamento das fibras na superfície da peça W6, pela não uniformidade da camada de pasta térmica utilizada ou por possíveis alterações de características da própria pasta devido ao processo de envelhecimento, uma vez que a data de sua fabricação remonta ao ano de 1998.

Embora as grades tenham sido inscritas em fibras pela mesma técnica de gravação, possuam as mesmas características mecânicas e ópticas e sejam monitoradas pelo mesmo sistema de interrogação, o efeito do distanciamento entre os comprimentos de onda das grades ocorre.

Assim, um segundo ensaio foi realizado nas mesmas condições do experimento anterior, entretanto, devido a oscilações apresentadas no sinal da grade FBG-2 colocada no canal 2 do interrogador MOI não foi possível realizar a análise dos dados.

No Gráfico (4.1.3.) são mostrados os sinais do comprimento de onda das duas grades de Bragg monitoradas pelo interrogador sm130, onde o sinal da FBG-2 está degradado.



Gráfico 4.1.3. – Curvas do comprimento de onda da grade FBG-1 e da degradação do sinal da grade FBG-2. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Aquisicao1 do dia 18/03/2009).

É possível que essa oscilação nos valores do comprimento de onda da grade FBG-2 tenha ocorrido devido à baixa refletividade da grade, largura espectral elevada, baixo ganho do canal de entrada ou ainda por problemas de alinhamento entre a fibra e o conector de fibra nua utilizado.

Foi observado que com o uso de conectores de fibra nua nas grades fabricadas no IEAv a qualidade do sinal apresentado nos interrogadores era fortemente degradada com a movimentação da fibra ou mesmo pequenas rotações no conector. Uma solução para este problema foi realizar a emenda de um rabicho conectorizado (*pigtail*) com a fibra com a FBG inscrita, o que a princípio sanou o problema de degradação.

Em função da manipulação e movimentação da peça W6, a grade de Bragg FBG-22 ligada no arranjo experimental do IEAv (grade FBG-a) sofreu dano físico e precisou ser trocada. Ela foi substituída pela FBG-37, que também formava par casado com a FBG-31.



Após a substituição da grade de Bragg danificada, um novo ensaio de ciclo térmico foi realizado e os resultados são mostrados no Gráfico (4.1.4.), a seguir.

Gráfico 4.1.4. – Curvas da diferença entre os comprimentos de onda das grades (FBG-1 – FBG-2), da saída do amplificador de transimpedância (FBG-37 e FBG-31) e da temperatura (Temp. PTC). Fonte: Dados experimentais (arquivo: Aquisicao2 do dia 18/03/2009).

Embora a grade de Bragg FBG-22 da abordagem de interrogação do IEAv tenha sido trocada pela FBG-37, é possível notar no Gráfico (4.1.4.), que tanto na curva (FBG-1 – FBG-2), que representa a diferença entre os comprimentos de onda das grades FBG-1 e FBG-2 conectadas no interrogador sm130 quanto na curva Trans-Z, que representa a convolução dos comprimentos de onda das grades monitoradas pelo interrogador com circulador óptico de 4 portas do arranjo experimental do IEAv, o efeito reportado anteriormente ocorre, evidenciando o distanciamento dos comprimentos de onda das grades de Bragg independentemente das grades utilizadas.

No Gráfico (4.1.5.) são mostrados os sinais normalizados dos comprimentos de onda das duas grades de Bragg monitoradas pelo interrogador sm130 e da diferença entre elas.



Gráfico 4.1.5. – Curvas dos comprimentos de onda das grades FBG-1 e FBG-2 normalizados e da diferença entre eles (FBG-1 – FBG-2) em picometros do ensaio térmico na peça W6. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Aquisicao2 do dia 18/03/2009).

Com o intuito de descartar quaisquer possíveis influências de inércia térmica ou de gradiente de temperatura na superfície da peça metálica nas grades de Bragg, um novo ensaio foi realizado sem a utilização do reforço W6. Neste ensaio apenas os sinais provenientes das grades de Bragg FBG-1 e FBG-2 conectadas no interrogador sm130 foram coletados.

As grades FBG-1 e FBG-2 foram posicionadas dentro de um tubo cilíndrico de papelão, de forma a não entrarem em contado com a superfície interna do mesmo. O tubo foi colocado dentro de uma caixa retangular fabricada em espuma de polietileno expandido de cor rosa e flocos de poliestireno expandido ou isopor<sup>®</sup> foram utilizados para preencher os espaços vacantes dentro da caixa, a fim de evitar que o fluxo de ar proveniente do sistema de ventilação da câmara térmica atingisse diretamente as grades dentro do tubo.

O ciclo térmico deste ensaio consistiu na elevação da temperatura da câmara até que o valor apresentado pelo seu mostrador atingisse 100 °C e então desliga-la. O monitoramento da temperatura foi realizado através do sensor Pt100 da própria câmara. Após determinado tempo de ensaio decorrido (aproximadamente 120 min ) a tampa da câmara foi deixada entreaberta, a fim de que a queda de temperatura fosse acentuada.

Na Tabela (4.1.2.), a seguir, são mostradas as configurações dos parâmetros do sistema interrogador modelo sm130 da MOI.

Tabela 4.1.2. – Configuração do interrogador sm130 – MOI utilizado no ensaio térmico das FBG no tubo papel (arquivo: Aquisicao2-FBG-Tubo-papel de 24-03-2009).

Parâmetro	Canal 1	Canal 2	
Frequência de aquisição ( <i>sampling frequency</i> ): [Hz]	20		
Intercalamento de dados (data interleave)	5		
Média do comprimento de onda (WVL average)	100	100	
Ganho ( <i>gain</i> ): $[dB]$	6,0 6,0		
Limiar de ruído ( <i>noise threshold</i> ): [-4096 a 4096]	100	100	

A taxa de amostragem do interrogador sm130 foi diminuída com um fator de cinco, devido à grande quantidade de dados que se estava coletando nos ensaios realizados. Chegou-se a considerar o uso de uma taxa de amostragem ainda menor, devido às características da curva de resposta das FBG em função da variação da temperatura. O ganho do canal 1 foi dobrado, a fim de amplificar o sinal de resposta da FBG detectado pelo equipamento. Como o parâmetro de resposta de interesse é o comprimento de onda, acredita-se que com a alteração do ganho do canal, os dados coletados não sofreram alteração na resposta.

No Gráfico (4.1.6.) são mostrados os sinais normalizados dos comprimentos de onda das duas grades de Bragg monitoradas pelo interrogador sm130 e da diferença entre elas.



Gráfico 4.1.6. – Curvas dos comprimentos de onda das grades FBG-1 e FBG-2 normalizados e da diferença entre eles (FBG-1 – FBG-2) em picometros do ensaio térmico realizado no tubo de papel. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Aquisicao2-FBG-Tubo-papel do dia 24/03/2009).

Pode-se observar no Gráfico (4.1.6.) que o efeito do distanciamento entre os comprimentos de onda das FBG ocorre mesmo quando as grades de Bragg não estão em contato com a superfície metálica. Nota-se pelo gráfico que quanto maior a taxa variação da temperatura mais brusca é variação na diferença entre os comprimentos de onda, como se pode observar no momento da abertura da porta, identificada no gráfico.

Ainda que os resultados apresentados com dois sistemas interrogadores independentes e que utilizam técnicas de interrogação diferentes indiquem um comportamento não desejável na resposta das grades de Bragg, não é possível afirmar que seja um problema intrínseco da técnica FBG. Assim, decidiu-se realizar mais uma série de ensaios térmicos com outro sistema interrogador e sensores comerciais. Esses ensaios foram realizados e os dados são apresentados na sequência desse trabalho.

### 4.1.2 Ensaios mecânicos

A seguir são apresentados os resultados de ensaios mecânicos realizados com quatro grades produzidas pelo IEAv dispostas na superfície da peça W6 com o intuito de medir deformações estáticas impostas à peça. Neste ensaio duas FBG foram apenas apoiadas e as outras duas FBG foram coladas pré-tensionadas na superfície da peça.

As grades FBG-1 e FBG-2 foram ligadas no interrogador modelo sm130 da MOI e as grades FBG-37 e FBG-31 foram ligadas no arranjo experimental do IEAv. Essas quatro grades foram posicionadas na superfície da peça de forma paralela. As grades FBG-1 e a FBG-37 foram apenas dispostas na superfície da peça, sem o uso de pasta térmica e as grades FBG-2 e a FBG-31 foram coladas na superfície da peça com uma força de 0,1 N de tração, aplicada por meio de um dinamômetro a mola com capacidade de medida de 1 N fabricado pela 3B Scentific. Para fixar as FBG na superfície da peça uma cola a base de cianoacrilato, modelo Super Bonder Loctite<sup>®</sup> da Henkel foi utilizada.

Uma das pontas da peça W6 foi fixada na mesa óptica através de placas niveladoras e grampos com bases quadradas e a outra ponta da peça ficou em balanço. Um dispositivo mecânico posicionador com parafuso micrométrico foi colocado a uma distância pré-determinada do ponto de fixação da peça. O valor dessa distância não precisou ser considerado, uma vez que o interesse estava voltado para o comportamento da resposta do sistema e não em seu valor numérico.

O parafuso micrométrico foi ajustado até o limiar de toque do dispositivo posicionador com a peça e essa posição foi considerada como referência 0 mm. A partir deste ponto foram incrementados deslocamentos verticais do posicionador de 0,5 mm até um deslocamento máximo de 10 mm.



Foram realizados dois ciclos completos de carga na peça e os resultados são mostrados no Gráfico (4.1.7.), a seguir.

Gráfico 4.1.7. – Gráfico normalizado dos comprimentos de onda das grades de Bragg FBG-1 e FBG-2 fabricadas no IEAv do ensaio de deformação mecânica na peça W6. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Aquisicao4 do dia 24/03/2009).

Na curva do sinal de comprimento de onda da grade FBG-2 apresentada no Gráfico (4.1.7.), pode-se verificar em uma inspeção visual dos dois patamares inferiores da curva que existe uma diferença nos valores do comprimento de onda referente ponto inicial de aplicação do deslocamento do primeiro ciclo em relação ao mesmo ponto do segundo ciclo de cerca de 15,42 pm. Esse valor foi obtido por meio cálculo da diferença do valor médio de 200 amostras do primeiro e do segundo patamar referente ao deslocamento 0 mm.

Essa diferença ou histerese pode ser devida a uma não repetibilidade do aparato mecânico utilizado no arranjo experimental. Uma possível justificativa para essa histerese está relacionada à forma de construção do aparato mecânico, uma vez que a ponta do parafuso micrométrico não toca diretamente a superfície da peça W6. Devido à forma de montagem do aparato mecânico, a extremidade do parafuso primeiramente entra em contato com uma chapa metálica e essa, por sua vez, faz a

transferência do movimento para a peça W6. No entanto, esse arranjo provoca pontos de contato múltiplos e faz com que dependendo do comportamento da peça no movimento de flexão e de qual região da chapa entra em contato com a peça, uma grande dispersão nos resultados seja verificada.

Ainda analisando o Gráfico (4.1.7.) é possível observar na curva referente ao sinal do comprimento de onda da FBG-1 que esta grade também sofreu influência da deformação da peça W6, mesmo não tendo sido colada na superfície da peça. Essa pequena variação sentida pela grade deve-se ao fato de que a fibra acompanhou o contorno da superfície da peça e, portanto, o deslocamento de flexão por ela sofrido.

A insensibilização flexural da grade FBG utilizada para a compensação da temperatura é um grande obstáculo na fabricação de sensores que utilizam a técnica de compensação por grade de referência. No entanto, formas estruturais mais aprimoradas podem minimizar ou até mesmo eliminar esse problema. Por exemplo, no arranjo mecânico apresentado por Quintero <sup>(96)</sup>, uma viga de aço teve uma das suas extremidades engastada em uma estrutura de aço inox enquanto que o outro lado ficou em balanço. O arranjo possibilitou posicionar duas FBG na viga metálica, de modo que uma foi colada numa região sujeita tanto a esforços de deformação mecânica (longitudinais e flexurais) quanto à temperatura (denominada FBG-T/D), enquanto que a outra grade (FBG-T) foi posicionada na região posterior ao engaste da chapa, o que a tornou praticamente insensível às deformações mecânicas sofridas pela parte em balanço da viga. A insensibilização da FBG-T a esforços mecânicos longitudinais (tração e compreensão) pode ser melhorada com a colagem de apenas um dos lados do trecho de fibra óptica.

Na Figura (4.1.1.), a seguir, é apresentado um desenho representativo do arranjo proposto por Quintero <sup>(96)</sup>.



Figura 4.1.1. – Desenho ilustrativo do sensor de deformação com a grade de compensação de temperatura com baixa sensibilidade a deformação mecânica. Fonte: desenho baseado no trabalho de Quintero (96).

O sinal de saída do arranjo experimental do IEAv foi monitorado por meio de um multímetro modelo 34401A fabricado pela Agilent. Os valores obtidos estão anotados na Tabela (4.1.3.), como resultados do ensaio mecânico da peça W6 com as grades monitoradas pelo interrogador do IEAv. A histerese apresentada no sinal de saída do interrogador do IEAv corrobora com o que foi dito a respeito da não repetibilidade do aparato mecânico utilizado no ensaio.

sistema interrogador do IEAV.					
Primeira ram	pa de subida	Primeira ramp	a de descida		
Saída transimpedância	Deslocamento vertical	Saída transimpedância	Deslocamento vertical		
[mV]	[mm]	[mV]	[mm]		
000 74		<b>F7</b> 4 40	10.0		

Tabela 4.1.3	Dados	experimentais	do	ensaio	mecânico	na	peça	W6	utilizando	0
sistema interrog	jador do	) IEAv.								

	Ja de Subida	Filitiella faitipa de descida			Filineira rampa de descida	
Saída transimpedância	Deslocamento vertical	Saída transimpedância	Deslocamento vertical			
[mV]	[mm]	[mV]	[mm]			
-386,71	0,0	-571,40	10,0			
-394,80	0,5	-560,10	9,5			
-403,20	1,0	-549,60	9,0			
-411,70	1,5	-539,34	8,5			
-420,30	2,0	-529,54	8,0			
-428,70	2,5	-519,55	7,5			
-437,90	3,0	-509,90	7,0			
-446,93	3,5	-500,90	6,5			
-456,40	4,0	-490,90	6,0			
-465,65	4,5	-481,09	5,5			
-475,02	5,0	-471,33	5,0			
-484,65	5,5	-461,80	4,5			
-494,20	6,0	-452,23	4,0			
-504,28	6,5	-443,08	3,5			
-513,40	7,0	-434,22	3,0			
-523,08	7,5	-425,40	2,5			
-532,69	8,0	-416,69	2,0			
-542,21	8,5	-407,67	1,5			
-552,20	9,0	-398,95	1,0			
-562,30	9,5	-390,09	0,5			
-572,10	10,0	-382,20	0,0			

Segunda ram	pa de subida	Segunda ramp	gunda rampa de descida		
Saída transimpedância	Deslocamento vertical	Saída transimpedância	Deslocamento vertical		
[mV]	[mm]	[mV]	[mm]		
-382,38	0,0	-568,79	10,0		
-390,61	0,5	-557,99	9,5		
-399,46	1,0	-548,87	9,0		
-408,30	1,5	-537,52	8,5		
-417,10	2,0	-527,50	8,0		
-425,90	2,5	-517,39	7,5		
-435,00	3,0	-507,70	7,0		
-444,16	3,5	-498,13	6,5		
-453,40	4,0	-488,10	6,0		
-462,90	4,5	-478,50	5,5		
-471,70	5,0	-469,20	5,0		
-481,35	5,5	-459,90	4,5		
-491,03	6,0	-450,55	4,0		
-501,11	6,5	-441,60	3,5		
-510,90	7,0	-432,40	3,0		
-520,00	7,5	-423,50	2,5		
-530,46	8,0	-414,90	2,0		
-540,70	8,5	-406,17	1,5		
-550,42	9,0	-397,50	1,0		
-560,70	9,5	-388,67	0,5		
-570,70	10,0	-381,10	0,0		

Fonte: Dados experimentais do ensaio mecânico na peça W6.

A fim de minimizar, ou mesmo eliminar a não repetibilidade dos resultados apresentada pelo aparato mecânico descrito anteriormente nesse item, um novo dispositivo para ensaios mecânicos estáticos e dinâmicos foi construído. Esse novo dispositivo permite o incremento manual da carga aplicada na peça para a realização de ensaios estáticos, bem como possibilita a realização de ensaios dinâmicos de deformação no dispositivo em teste.

# 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS TÉRMICOS REALIZADOS NO LABORATÓRIO LSI-SMT

Os ensaios térmicos foram realizados de acordo com o procedimento descrito no item (3.3.2.).

A hipótese de que as FBG podem originar sensores estáveis, fidedignos, confiáveis e com respostas rápidas é de extrema importância para a fixação das grades de Bragg como solução de sensoriamento nas áreas onde o uso de sensores convencionais não é possível ou apresenta obstáculos.

Assim sendo, uma série de ensaios foi realizada a fim de averiguar o comportamento térmico de sensores comerciais de temperatura e de deformação mecânica de dois fabricantes de equipamentos de instrumentação óptica e de sensores, a MOI e a FS. A leitura dos sensores foi realizada utilizado o interrogador modelo sm130 da empresa MOI.

No primeiro ensaio, cujos resultados são apresentados a seguir, dois sensores de temperatura FBG modelo FS6320 soldáveis fabricados pela FS foram utilizados e identificados como FS6300-1S e FS6300-2S. Esses sensores foram dispostos na superfície de uma chapa de liga metálica de Alclad 2024-T3, cujas dimensões de comprimento, largura e espessura são: 400 mm, 40 mm e 2,54 mm, respectivamente. Os sensores foram posicionados paralelamente um em relação ao outro no centro da chapa metálica e nenhum tipo de pasta térmica ou cola foi utilizado para aderir os sensores à peça, apenas uma fita adesiva foi utilizada para fixar os sensores na superfície da mesma.

Após a fixação dos sensores na peça metálica, esta foi colocada dentro da câmara térmica apoiada sobre um bloco de madeira. Uma câmara climática modelo CC-200H-417 (número de série: OS464) fabricada pela Superohm foi utilizada para a realização dos ensaios.

Um termopar tipo K, modelo 20110K45-72 (certificado LT084/05) da empresa Exacta, foi posicionado na região onde os sensores FBG estavam dispostos na barra metálica, a fim de fornecer uma referência de temperatura. Um sistema de aquisição de dados modelo ADS2000IP-B-3 e um condicionador de sinais de 16 canais, modelo Al2164-VA da empresa Lynx, foram utilizados para a leitura e monitoração do sinal desse termopar.

O ciclo térmico desse ensaio consistiu em elevar a temperatura da câmara térmica até o valor próximo à 80 °C. Após a temperatura alcançar esse valor, o forno foi então desligado. Embora a câmara térmica tenha a disposição um sistema de leitura de temperatura, optou-se por utilizar o valor da temperatura proveniente do

termopar tipo K (TMP-K) como referência, uma vez que esse sensor foi posicionado mais próximo a região de fixação das FBG. Decorrido um determinado tempo do desligamento do forno, a porta da câmara foi deixada entreaberta, a fim de que a queda de temperatura fosse acelerada.

Na Tabela (4.2.1.), a seguir são mostradas as configurações dos parâmetros do sistema interrogador modelo sm130 da MOI.

Tabela 4.2.1. – Configuração do interrogador sm130 – MOI utilizado no ensaio térmico dos sensores FS6300 na barra metálica (arquivo: Ensaio-1 de 05-05-2009).

Parâmetro	Canal 1	Canal 2	
Frequência de aquisição ( $\mathit{sampling frequency}$ ): $\left[ Hz \right]$	1		
Intercalamento de dados (data interleave)	100		
Média do comprimento de onda (WVL average)	10	10	
Ganho ( <i>gain</i> ): [dB]	6,0	6,0	
Limiar de ruído ( <i>noise threshold</i> ): [-4096 a 4096]	100	100	
Identificação do sensor	FS6300-1S	FS6300-2S	

Os dois sensores denominados FS6300-1S e FS6300-2S foram conectados nos canais 1 e 2, respectivamente do interrogador modelo sm130.

Os dados em comprimento de onda obtidos por meio do interrogador óptico foram convertidos para valores de temperatura utilizando-se a expressão disponível na folha de calibração dos referidos sensores. As características ópticas, bem como a função de calibração dos sensores baseados em FBG estão descritas no item (3.1.3.). Depois de realizada a conversão de comprimento de onda para temperatura, a diferença entre os valores foi calculada, amostra a amostra.

Verificou-se que mesmo aplicando a função de segundo grau de calibração desses sensores, o valor da temperatura apresentou uma diferença inicial de cerca de -0,471 °C, revelando um erro nos valores de temperatura mesmo aplicando os coeficientes de correção dos sensores.

No Gráfico (4.2.1.) são mostradas as curvas dos sinais de temperatura dos dois sensores modelo FS6320 dispostos na superfície da peça metálica sem a adição de pasta térmica e a curva da diferença de temperatura entre eles.



Gráfico 4.2.1. – Curvas de temperatura dos dois sensores FS6320 e da diferença entre os valores (FS6300-1S – FS6300-2S) do ensaio térmico realizado na peça metálica sem pasta térmica. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Ensaio-1 do dia 05/05/2009).

Para a apresentação do gráfico da diferença de temperatura entre os sensores, o valor inicial da diferença foi descontado do cálculo das amostras posteriores, de modo a considerar nula a diferença de temperatura inicial.

Em análise dos dados da curva "Diferença (FS6300-1S - FS6300-2S)", verifica-se que a diferença de temperatura entre os valores: máximo e mínimo é de cerca de 0,746 °C. Essa variação pode ser crítica para a utilização das grades FBG em conjunto com transdutores que necessitam compensação de temperatura com relativa velocidade, como, por exemplo, acelerômetros e medidores de deformação mecânica dinâmica ou vibração.

Embora sensores comerciais apropriados para monitoramento de temperatura tenham sido utilizados neste experimento, pode-se observar que a diferença entre

os comprimentos de onda dos sensores denominados FS6300-1S e FS6300-2S varia em função da taxa de variação da temperatura, assim como ocorre com as FBG sem encapsulamento produzidas no IEAv.

Foi realizado outro ensaio com o mesmo arranjo experimental anterior, entretanto, uma camada de pasta térmica foi adicionada nas superfícies dos sensores que estavam em contato com a peça. Houve também uma alteração na configuração do ganho dos canais do interrogador. O valor do ganho foi reduzido para metade do valor anterior, uma vez que com ganho de 6,0 dB os sinais de reflexão dos sensores FBG estavam saturando os canais do sistema de leitura.

Apesar dos sistemas interrogadores (sm130 e FS2200) utilizarem para a medição do sinal o parâmetro de comprimento de onda e não a amplitude, o elevado fator de amplificação pode prejudicar a precisão nas leituras, uma vez que a faixa espectral que será interrogada pelos sistemas será mais larga, originando uma inexatidão na detecção do valor correto do pico de onda central. Outro problema que pode ocorrer é a detecção dos lóbulos laterais das grades não apodizadas e a detecção de comprimentos de onda de filtros espúrios ou não desejáveis que porventura tenham sido criados por falhas na gravação da FBG principal.

Na Figura (4.2.2.), a seguir, é apresentada a curva espectral da grade FBG-11 fabricada no IEAv e interrogada por meio do sistema FS2200.



Figura 4.2.2. – Tela do programa MU com a curva espectral da grade FBG-11 com sinal saturado.

O gráfico foi obtido por meio da função de analisador de espectros ópticos (OSA) disponível no programa MU da FS. O ganho do canal foi aumentado de modo a saturar a amplitude do sinal de leitura do espectro de reflexão da grade.

O ciclo térmico dos ensaios apresentados a seguir, consistiu em elevar a temperatura da câmara térmica até o valor próximo à 100 °C. Após a temperatura alcançar esse valor, o forno foi então desligado.

Na Tabela (4.2.2.), a seguir, são mostradas as configurações dos parâmetros do sistema interrogador modelo sm130 da MOI com a alteração no ganho.

Tabela 4.2.2. – Configuração do interrogador sm130 – MOI utilizado no ensaio térmico dos sensores FS6300 na barra metálica (arquivo: Ensaio-3 de 07-05-2009).

Parâmetro	Canal 1 Canal 2			
Frequência de aquisição ( $\mathit{sampling frequency}$ ): $\left[ \mathrm{Hz}  ight]$	1			
Intercalamento de dados (data interleave)	100			
Média do comprimento de onda (WVL average)	10 10			
Ganho ( <i>gain</i> ): [dB]	3,0	3,0		
Limiar de ruído ( <i>noise threshold</i> ): [-4096 a 4096]	100	100		
Identificação do sensor	FS6300-1S	FS6300-2S		

No Gráfico (4.2.2.) são mostradas as curvas dos sinais de temperatura dos dois sensores modelo FS6320 dispostos na superfície da peça metálica com pasta térmica e a curva da diferença de temperatura entre eles.



Gráfico 4.2.2. – Curvas de temperatura dos dois sensores FS6320 e da diferença entre os valores (FS6300-1S – FS6300-2S) do ensaio térmico realizado na peça metálica com pasta térmica. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Ensaio-3 do dia 07/05/2009).

Analisando os dados da curva "Diferença (FS6300-1S - FS6300-2S)", verificou-se que a diferença de temperatura entre o valor máximo e o mínimo foi de cerca de 1,08 °C.

Com o intuito de verificar a existência de alguma influência do canal do sistema interrogador nas medidas, foi realizada a troca de canais dos sensores, ou seja, o sensor FS6300-1S antes ligado ao canal 1 do interrogador foi ligado ao canal 2 e vice-versa, e um novo ensaio foi realizado.

A configuração dos parâmetros do sistema interrogador modelo sm130 foi a mesma da apresentada na Tabela (4.2.2.), exceto pela inversão dos sensores nos canais do interrogador.

No Gráfico (4.2.3.) são mostradas as curvas dos sinais de temperatura dos dois sensores modelo FS6320 dispostos na superfície da peça metálica com pasta térmica e a curva da diferença de temperatura entre eles.



Gráfico 4.2.3. – Curvas de temperatura dos dois sensores FS6320 e da diferença entre os valores (FS6300-1S – FS6300-2S) do ensaio térmico realizado na peça metálica com pasta térmica e canais de entrada trocados.

Fonte: Dados experimentais (arquivo: Ensaio-4 do dia 07/05/2009).

Em análise dos dados da curva "Diferença (FS6300-1S - FS6300-2S)", verifica-se que a diferença de temperatura entre o valor máximo e o mínimo é de cerca de 1,03 °C.

A princípio, esse ensaio comprovou que não há influência significativa do canal do interrogador nas medidas.

No ensaio descrito a seguir os sensores FS6300-1S e FS6300-2S foram retirados da superfície da peça metálica e passaram a ser posicionados com suas faces inferiores encostadas uma à outra. Foi adicionada na interface das faces dos sensores uma camada de pasta térmica.

A configuração dos parâmetros do sistema interrogador modelo sm130 foi a mesma da apresentada na Tabela (4.2.2.).

Os sensores foram colocados no interior de uma caixa de papelão, cujas dimensões de comprimento, largura e altura são: 200 mm, 150 mm e 60 mm, respectivamente. A caixa foi posicionada entreaberta dentro da câmara térmica e um sensor de temperatura termopar tipo K (TMP-K) foi colocado dentro desse recipiente, porém sem estar encostado nos sensores FBG.

No Gráfico (4.2.4.) são mostradas as curvas dos sinais de temperatura dos dois sensores modelo FS6320 dispostos com as faces inferiores encostadas uma à outra, a curva da diferença de temperatura entre eles e do termopar tipo K.



Gráfico 4.2.4. – Curvas de temperatura do ensaio térmico realizado com dois sensores FS6320 com as faces inferiores encostadas uma à outra e as curvas do TMP-K e da diferença entre os valores das grades (FS6300-1S – FS6300-2S).

Fonte: Dados experimentais (arquivo: Ensaio-7 do dia 22/05/2009).

Analisando os dados da curva "Diferença (FS6300-1S - FS6300-2S)", verificou-se que a diferença de temperatura entre o valor máximo e o mínimo foi de cerca de 1,27 °C.

Foi realizada a troca de canais dos sensores FBG conectados no interrogador sm130, ou seja, o sensor FS6300-1S ligado no canal 1 do interrogador foi trocado pelo sensor que estava ligado no canal 2 e vice-versa, e um novo ensaio foi realizado.

A configuração dos parâmetros do sistema interrogador modelo sm130 foi a mesma da apresentada na Tabela (4.2.2.), exceto pela inversão dos sensores nos canais do interrogador.

No Gráfico (4.2.5.) são mostradas as curvas dos sinais de temperatura dos dois sensores modelo FS6320 dispostos com as faces inferiores encostadas uma à outra e a curva da diferença de temperatura entre eles.



Gráfico 4.2.5. – Curvas de temperatura do ensaio térmico realizado com dois sensores FS6320 com as faces inferiores encostadas e a curva da diferença entre os valores (FS6300-1S – FS6300-2S). Fonte: Dados experimentais (arquivo: Ensaio-8 do dia 22/05/2009).

Analisando os dados da curva "Diferença (FS6300-1S - FS6300-2S)", pode-se verificar que a diferença de temperatura entre o valor máximo e o mínimo é de cerca de 0,89 °C.

Todos os ensaios anteriores, realizados com sensores similares e do mesmo fabricante, mostraram que existem diferenças em termos de resposta dinâmica entre os sensores para variações rápidas da temperatura.

Foi realizado um ensaio de ciclo térmico com dois sensores de temperatura de dois fabricantes distintos e com características ópticas e construtivas diferentes. Os dois sensores FBG denominados FS6300-1S da FS e o OS4100-T da MOI foram conectados nos canais 1 e 2, respectivamente, do interrogador modelo sm130. Os sensores foram posicionados com sua face inferior encostada uma à outra e colocados no interior da caixa de papelão, dentro da câmara térmica. A caixa foi deixada entreaberta, a fim de evitar ou minimizar a incidência direta do ar proveniente do sistema de circulação da câmara térmica no corpo dos sensores.

No Gráfico (4.2.6.) são mostrados os sinais normalizados dos dois sensores de temperatura e da diferença do comprimento de onda entre eles.



Gráfico 4.2.6. – Curvas térmicas normalizadas pelo valor máximo dos comprimentos de onda dos sensores FS6300-1S e OS4100-T e a curva da diferença entre os valores (FS6300-1S – OS4100-T). Fonte: Dados experimentais (arquivo: Ensaio-13 do dia 28/05/2009).

A utilização de grades FBG com especificações diferentes dificulta a comparação das medidas, uma vez que as sensibilidades dos sensores são diferentes. Para que a comparação possa fazer algum sentido foi necessário aplicar o método de normalização por amplitude (min-max), a fim de fazer com que o patamar inferior da curva de medida da FBG-1 se equipare ao da FBG-2. Assim procedendo, obtém-se o Gráfico (4.2.7.), a seguir.



No Gráfico (4.2.7.) são mostrados os sinais normalizados pela amplitude dos dois sensores de temperatura e da diferença do comprimento de onda entre eles.

Gráfico 4.2.7. – Curvas térmicas normalizadas pelo min-max dos comprimentos de onda dos sensores FS6300-1S e OS4100-T e a curva da diferença entre os valores (FS6300-1S – OS4100-T). Fonte: Dados experimentais (arquivo: Ensaio-13 do dia 28/05/2009).

## 4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO MECÂNICA REALIZADOS NO LABORATÓRIO LSO

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos realizados no LSO, de acordo com o procedimento descrito no item (3.3.3.).

Após a colagem das grades FBG-5, FBG-6 e FBG-17 na chapa metálica, essa foi mantida em repouso, ou seja, sem ação de forças de flexão, de tração ou de compressão. O sinal de comprimento de onda de resposta das FBG foi coletado por meio do interrogador sm130.

As curvas de resposta do sinal refletido pelas grades são apresentadas no Gráfico (4.3.1.), a seguir:



Gráfico 4.3.1. – Curvas de comprimento de onda das grades FBG-5, FBG-6 e FBG-17 coladas na chapa de liga Alclad em estado de repouso. Fonte: Dados experimentais (arquivos: Estatico-001 do dia 01/11/2010 e Colagem-FBG17 do dia 13/12/2010).

Foi utilizado o programa AqDAnalysis para realizar a junção dos sinais dos dois arquivos distintos gerados pelo programa Enlight e para efetuar uma análise estatística dos dados.

Na Tabela (4.3.1.), a seguir, são mostrados os principais resultados estatísticos obtidos da análise das curvas do gráfico acima.

Tabela 4.3.1. – Dados estatísticos das FBG-5, FBG-6 e FBG-17 coladas na chapa metálica em estado de repouso mecânico.

Comprimento de onda da grade	FBG-5	FBG-6	FBG-17
Valor inicial (gravação): [nm]	1560,333	1541,705	1538,280
Valor máximo: [nm]	1561,416	1541,382	1540,173
Valor mínimo: [nm]	1561,404	1541,321	1540,158
Valor médio: [nm]	1561,410	1541,352	1540,165
Desvio padrão: [pm]	1,625	10,299	1,859
Diferença entre Médio e Inicial: $[nm]$	1,077	-0,431	1,894
Analisando os dados estatísticos acima, pode-se verificar que o valor do comprimento de onda central inicial da grade FBG-5 sofreu um deslocamento de cerca de 1,077 nm, valor esse menor do que o apresentado pela grade FBG-17 que foi em torno de 1,894 nm, após pré-trensionamento e colagem das fibras. Provavelmente, essa diferença entre os valores do deslocamento do comprimento de onda central das FBG-5 e FBG-17, está relacionada com a duração de manutenção da força de pré-tensionamento praticada no tracionamento das fibras ópticas e com o tempo do processo de cura da cola adesiva.

Além do fato da FBG-6 ter sido colada sem o pré-tensionamento, a pequena variação, e ainda por cima, negativa apresentada na diferença entre o comprimento de onda inicial da grade da FBG-6 e o valor médio do sinal medido, pode estar relacionada à constrição da fibra óptica devido à criação de tensões mecânicas originadas no processo de cura da cola. Outro fator que pode ter contribuído para essa variação negativa é a possível variação nos valores das temperaturas ambiente do local onde a grade foi gravada e onde foi feita a medida.

Observando os valores do desvio padrão das grades apresentadas acima, pode-se verificar que o nível de ruído de fundo da grade FBG-6 é quase seis vezes maior que o das grades FBG-5 e FBG-17.

Como dito anteriormente, um dos fatores que contribui para elevar o ruído de fundo nos sistemas de interrogação por comprimento de onda é a largura espectral. Assim, é possível verificar através da análise dos dados da Tabela (3.1.3.) e dos espectros mostrados nas figuras abaixo que a grade FBG-6 possui largura espectral de cerca de 3750 pm, ou seja, em torno de quatro vezes maior que a largura espectral das grades FBG-5 e FBG-17, que são de 900 pm e 960 pm, respectivamente.

Nas Figuras (4.3.1.a.), (4.3.1.b.) e (4.3.1.c.), a seguir, são apresentados os espectros de resposta das grades FBG-5, FBG-6 e FBG-17 obtidos por meio da função OSA do programa MU.



Figura 4.3.1. – Telas da função OSA do programa MU referente aos espectros de resposta das grades após colagem na chapa metálica: a) FBG-5, b) FBG-6 e c) FBG-17.

Como a identificação dos picos das grades está sujeita as discrepâncias associadas ao processo de interrogação, as FBG devem ter, preferencialmente, boa refletividade e larguras de banda estreitas.

Com o intuito de minimizar o ruído de fundo do sinal de resposta das FBG, os dados coletados pelo interrogador foram filtrados utilizando um filtro passa-baixas de 4<sup>a</sup> ordem do tipo IIR, com frequência de corte de 5 Hz. Essa ação foi efetuada utilizando a opção de filtragem do programa ICGen da Lynx.

### 4.3.1 Ensaios mecânicos de degraus de carga

Foi utilizado nos ensaios mecânicos de degraus de carga apresentados nesse item, o arranjo experimental descrito no item (3.3.3.1).

As curvas de variação da diferença de comprimento de onda das grades apresentadas adiante foram obtidas utilizando o seguinte procedimento de cálculo: primeiramente o valor da diferença entre os comprimentos de onda foi subtraído do valor médio das duzentas primeiras amostras do sinal em repouso e esse resultado, então, foi multiplicado por um fator de conversão de escala, para a obtenção do valor em picometros.

A chapa metálica com as FBG coladas na superfície foi montada no dispositivo mecânico de forma que as grades ficaram voltadas para cima. As grades dispostas nessa face estavam suscetíveis aos esforços de tração mecânica, resultante do movimento de flexão realizado por meio da movimentação vertical do parafuso micrométrico.

O parafuso micrométrico foi ajustado até o limiar de toque do dispositivo posicionador com a peça e essa posição foi considerada como referência 0 mm. A partir deste ponto foram incrementados deslocamentos verticais do posicionador de 0,5 mm até um deslocamento máximo limitado mecanicamente.

Os resultados do ensaio de flexão da chapa (tração das FBG) são apresentados no Gráfico (4.3.2.), a seguir:



Gráfico 4.3.2. – Curvas de comprimento de onda das grades FBG-5 e FBG-6 coladas na face superior da chapa de liga Alclad em resposta a movimentação flexural. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Rampa-carga-001\_SE do dia 06/11/2010).

Analisando os dados das curvas acima, verificou-se a ocorrência da histerese, ou seja, o não retorno do comprimento de onda das FBG ao valor inicial, após um ciclo de carga, mesmo com a utilização do novo aparato mecânico. As diferenças dos valores dos dois patamares de repouso, cerca de -3,45 pm para a FBG-5 e de -4,63 pm para a FBG-6, são menores do que a apresentada no uso do dispositivo construído no IEAv, que foi de 15,42 pm, conforme visto anteriormente. Acredita-se que essa diferença nos valores do comprimento de onda, seja provavelmente devida à falta de controle da temperatura da sala onde o experimento foi realizado. No entanto, essa confirmação não pode ser totalmente atribuída apenas aos aspectos ambientais, uma vez que nesse ensaio a temperatura da região próxima à montagem das FBG não foi monitorada.

Outro problema que também pode ter contribuído para essa diferença no comprimento de onda das FBG, envolve um problema de construção do dispositivo mecânico. Por exemplo, a extremidade do parafuso micrométrico que toca a chapa metálica possui a extremidade reta, o que pode causar pontos múltiplos de contato com a peça, mesmo que, em uma pequena área. Uma solução para esse problema

poderia ser a substituição da ponta reta do parafuso por outra com formato de semiesfera. No entanto, como não se utilizou um sensor de referência para monitoração da deformação, também não se pode dizer que a histerese tenha ocorrido predominantemente em decorrência do problema mecânico.

Um segundo ensaio mecânico de degraus de carga utilizando o mesmo arranjo experimental foi realizado e os resultados são apresentados no Gráfico (4.3.3.), a seguir.



Gráfico 4.3.3. – Curvas de comprimento de onda das grades FBG-5 e FBG-6 coladas na face superior da chapa de liga Alclad em resposta a movimentação flexural. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Rampa-carga-001-MOI\_SE do dia 14/11/2010).

As diferenças dos valores dos dois patamares de repouso, cerca de 2,24 pm para a FBG-5 e de 2,72 pm para a FBG-6, são diferentes das apresentadas no gráfico anterior. Ainda que tenham sido praticados os mesmos procedimentos e utilizado o mesmo arranjo experimental do ensaio anterior, ocorreram variações menores nos valores de comprimento de onda dos patamares inicial e final.

Para se tentar verificar as influências de cada parâmetro nos resultados foram instalados sensores de temperatura e de deformação.

A temperatura na região de colagem das FBG foi monitorada por meio de um termopar tipo K colocado em contato com a chapa metálica e seu valor ficou em média em torno de  $22,85 \,^{\circ}C \pm 0,05 \,^{\circ}C$ , durante o tempo do ensaio.

Para a medição da deformação mecânica um EER foi colado na face oposta de fixação das FBG. O EER foi ligado em ¼ de ponte, balanceado e calibrado por meio do sistema ADS2002IP e do programa AqDados.

No Gráfico (4.3.4.), a seguir, são apresentadas as curvas de temperatura do TMP-K e de deformação do EER.



Gráfico 4.3.4. – Curvas de temperatura do TMP-K e de deformação do EER (tração das FBG) no ensaio de degraus de carga. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Rampa-carga-001-ADS\_SE do dia 14/11/2010).

Os valores da temperatura no início e no final do ensaio foram de 22,75 °C e 22,77 °C, respectivamente, enquanto que os valores da deformação medida por meio do EER foram de  $0,26 \,\mu\epsilon$  no início e  $1,17 \,\mu\epsilon$  no término do experimento. Assim, no caso dos sensores convencionais, a diferença entre o valor inicial e o final, foi de  $0,02 \,^{\circ}$ C para a temperatura e  $0,91 \,\mu\epsilon$  para a deformação.

Considerando os valores da sensibilidade das FBG à temperatura  $(S_T \approx 13,7 pm/^{\circ}C)$  e da sensibilidade à deformação  $(S_{\Delta I} \approx 1,2 pm/\mu\epsilon)$  apresentados nas Equações (2.5.5) e (2.5.9), respectivamente, pode se verificar que o valor da

histerese representaria uma variação de temperatura ou de deformação de 0,16 °C ou  $1,87 \mu\epsilon$  para a FBG-5 e de 0,19 °C ou  $2,26 \mu\epsilon$  para a FBG-6. Evidentemente, que a consideração desses valores é válida quando um dos parâmetros não varia, uma vez que pode ocorrer o cruzamento dos dois efeitos.

Nota-se que os valores apresentados pelas FBG, considerando a análise de um parâmetro físico por vez, são praticamente os mesmos dos apresentados pelos sensores convencionais. É possível, que a pequena diferença apresentada se deva aos problemas já citados anteriormente, como a grande largura espectral das FBG, a variabilidade da temperatura ambiente da sala onde o ensaio foi realizado e os múltiplos pontos de contato da ponta do parafuso micrométrico com a chapa metálica.

A chapa metálica foi rotacionada em torno do eixo Y e novamente montada no dispositivo mecânico de forma que as grades ficaram voltadas para baixo. As grades dispostas nessa face estavam suscetíveis aos esforços de compressão mecânica e um novo ensaio foi realizado.

Os resultados do ensaio de flexão da chapa (compressão das FBG) são apresentados no Gráfico (4.3.5.), a seguir:



Gráfico 4.3.5. – Curvas de comprimento de onda das grades FBG-5 e FBG-6 coladas na face inferior da chapa de liga Alclad em resposta a movimentação flexural. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Rampa-carga-002-MOI\_SE do dia 14/11/2010).

As diferenças dos valores dos dois patamares de repouso, cerca de -2,95 pm para a FBG-5 e de -4,65 pm para a FBG-6, são praticamente as mesmas das apresentadas no ensaio anterior, exceto por serem valores negativos.

A temperatura na região de colagem das FBG foi monitorada e seu valor ficou em média em torno de  $22,80 \ ^{\circ}C \pm 0,07 \ ^{\circ}C$ , durante o tempo do ensaio.

No Gráfico (4.3.6.), a seguir, são apresentadas as curvas de temperatura do TMP-K e de deformação do EER.



Gráfico 4.3.6. – Curvas de temperatura do TMP-K e de deformação do EER (compressão das FBG) no ensaio de degraus de carga. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Rampa-carga-002-ADS\_SE do dia 14/11/2010).

Os valores da temperatura no início e no final do ensaio foram de 22,65 °C e 22,82 °C, respectivamente, enquanto que os valores da deformação medida por meio do EER foram de  $0,05 \ \mu\epsilon$  no início e  $-0,53 \ \mu\epsilon$  no término do experimento.

Pode-se verificar nos resultados apresentados acima que a histerese entre os patamares de repouso, após um ciclo completo de carga, manifestou-se em todos os ensaios mostrados. Essa diferença entre os valores inicial e final foi observada tanto no sinal das FBG quanto no sinal proveniente dos sensores convencionais.

Analisando a os gráficos da variação da diferença (FBG-5 – FBG-6), pode-se observar a ocorrência da variação entre os comprimentos de onda das grades, assim como ocorreu nos ensaios térmicos, anteriormente apontados.

### 4.3.2 Ensaios mecânicos dinâmicos

Foi utilizado nos ensaios mecânicos dinâmicos apresentados nesse item, o arranjo experimental descrito no item (3.3.3.2). O arranjo possibilitou a flexão da chapa metálica por meio de um disco excêntrico em velocidades de rotação distintas.

No ensaio dinâmico, cujo resultado é apresentado a seguir, foram executados 12 ciclos de compressão das FBG e tração do EER colados no corpo de prova. O circuito de controle da velocidade do motor foi ajustado de modo que um ciclo completo do movimento de flexão da chapa ficou em torno de 50,0 s.

As curvas apresentadas no Gráfico (4.3.7.), a seguir, são referentes à realização do ensaio dinâmico com o disco excêntrico.



Gráfico 4.3.7. – Curvas de comprimento de onda das grades FBG-5 e FBG-6 coladas na face superior da chapa de liga Alclad em resposta a movimentação flexural dinâmica de 20 mHz. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Dinamico-Slow-001\_SE do dia 13/11/2010).

Pode-se observar no gráfico acima a ocorrência da histerese no sinal de resposta das FBG, que pode ser explicada pelo aumento da temperatura ambiente no laboratório, aproximadamente 0,6 °C entre o início e fim do teste.

O uso do disco excêntrico para a realização dos ensaios dinâmicos apresentou uma limitação a ser estudada. Na análise do sinal coletado bruto, ou seja, sem o processamento de filtragem, observou-se que com a movimentação do disco rotativo, após seu contato com o corpo de prova, o ruído referente à oscilação da chapa se pronunciou. O ruído provavelmente tem sua causa justificada pelo atrito do disco na chapa e na oscilação harmônica do braço do corpo de prova em decorrência do seu longo comprimento em balanço até o ponto de engaste.

No Gráfico (4.3.8.), a seguir, são apresentadas as curvas de comprimento de onda das grades FBG-5 e FBG-6 de um ciclo do ensaio dinâmico.



Gráfico 4.3.8. – Curvas em detalhe de um ciclo do ensaio mecânico com as FBG-5 e FBG-6. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Dinamico-Slow-001\_SE do dia 13/11/2010).

Uma possível solução para evitar a oscilação gerada pela vibração do corpo de prova consiste em montar o disco excêntrico de forma que o seu deslocamento vertical mínimo do ciclo de rotação tangencie a superfície inferior da chapa em seu estado de repouso. A grade FBG-5 apresentou instabilidade no seu funcionamento e foi substituída pela FBG-17. O motor DC utilizado no ensaio anterior também foi substituído por um motor de passo com redução mecânica. Essa substituição proporcionou uma redução significativa no ruído devido à oscilação da barra provocada por vibração mecânica.

Após as trocas da FBG e do motor um segundo ensaio dinâmico de flexão (compressão das FBG) com ciclo de rotação de 60,0 s foi realizado e os resultados são apresentados no Gráfico (4.3.9.), a seguir.



Gráfico 4.3.9. – Curvas de comprimento de onda das grades FBG-17 e FBG-6 coladas na face superior da chapa de liga Alclad em resposta a movimentação flexural dinâmica de 16,67 mHz. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Dinamico-001-MOI\_SE do dia 13/12/2010).

As diferenças dos valores dos dois patamares de repouso (inicial e final), foram cerca de -1,69 pm para a FBG-17 e de -1,93 pm para a FBG-6.

No Grafico (4.3.10.), a seguir, são apresentadas as curvas de temperatura do TMP-K e de deformação do EER.



Gráfico 4.3.10. – Curvas de temperatura do TMP-K e de deformação do EER (compressão das FBG) no ensaio dinâmico. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Dinamico-001-ADS\_SE do dia 13/12/2010).

Os valores da temperatura no início e no final do ensaio foram de  $26,07 \ ^{\circ}C$  e  $26,31 \ ^{\circ}C$ , respectivamente, enquanto que os valores da deformação medida por meio do EER foram de  $0,24 \ \mu\epsilon$  no início e  $-0,94 \ \mu\epsilon$  no término do experimento.

# 4.3.3 Ensaios mecânicos para verificação da estabilidade da carga

Os ensaios apresentados nesse item foram realizados utilizando o arranjo experimental descrito no item (3.3.3.3).

O corpo de prova foi mantido em repouso durante o tempo de 5 min, quando então o mecanismo de movimentação vertical foi acionado, de forma que o pino de aplicação de carga provocou a flexão da chapa metálica. A rampa de carga foi de aproximadamente  $600 \,\mu\epsilon/s$  e a carga máxima aplicada foi em torno de  $900 \,\mu\epsilon$ .

A deformação suportada pela chapa foi medida por meio de um EER e o valor desse o parâmetro foi utilizado como referência para a calibração das FBG.

No Gráfico (4.3.11.), a seguir, são apresentados os resultados de um ensaio flexural (tração nas FBG) utilizando o acessório de movimentação vertical do dispositivo mecânico posicionador.



Gráfico 4.3.11. – Curvas de deformação mecânica das grades FBG-5 e FBG-17 coladas na face superior da chapa de liga Alclad em resposta a flexão com tempo de transição de 1,5 s. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Rampa-003-MOI\_F10Hz\_A\_F2Hz do dia 21/12/2010).

Na Tabela (4.3.2.), a seguir, é possível verificar os valores de comprimento de onda e de deformação nos estados de repouso e de flexão da chapa.

Tabela 4.3.2. – Valores de comprimento de onda e de deformação das grades FBG-5 e FBG-17 nos estados de repouso e de flexão da chapa (tração das FBG).

Parâmetro	FBG-5	FBG-17
Comprimento de onda no repouso: $[nm]$	1561,466	1540,194
Comprimento de onda na flexão: [nm]	1562,621	1541,273
Deformação no repouso: $[\mu\epsilon]$	0,11	0,13
Deformação na flexão: $[\mu\epsilon]$	884,47	893,70
Sensibilidade calculada: $[pm/\mu\epsilon]$	0,77	0,83

Observa-se também que os picos de variação de deformação apresentados, foram em média de aproximadamente  $\pm 16,0 \,\mu\epsilon$ , o que representa um erro em torno de 1,8 % numa faixa de leitura de aproximadamente de  $0 \,\mu\epsilon$  a 900  $\mu\epsilon$ .

A chapa metálica foi rotacionada em torno do eixo Y e novamente montada no dispositivo mecânico de maneira que as grades ficaram voltadas para baixo. As grades dispostas nessa face estavam suscetíveis aos esforços de compressão mecânica.

No Gráfico (4.3.12.), a seguir, são apresentados os resultados de um ensaio flexural (tração nas FBG) utilizando o acessório de movimentação vertical do dispositivo mecânico posicionador.



Gráfico 4.3.12. – Curvas de deformação mecânica das grades FBG-5 e FBG-17 coladas na face inferior da chapa de liga Alclad em resposta a flexão com tempo de transição de 1,5 s. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Rampa-001-MOI\_F10Hz\_A\_F2Hz do dia 22/12/2010).

Na Tabela (4.3.3.), a seguir, é possível verificar os valores de comprimento de onda e de deformação nos estados de repouso e de flexão da chapa.

Tabela 4.3.3. – Valores de comprimento de onda e de deformação das grades FBG-5 e FBG-17 nos estados de repouso e de flexão da chapa (compressão das FBG).

Parâmetro	FBG-5	FBG-17
Comprimento de onda no repouso: [nm]	1561,252	1539,995
Comprimento de onda na flexão: [nm]	1560,112	1538,892
Deformação no repouso: $[\mu\epsilon]$	-0,06	-0,06
Deformação na flexão: $[\mu\epsilon]$	842,17	849,62
Sensibilidade calculada: $[pm/\mu\epsilon]$	0,74	0,77

Observa-se também que os picos de variação de deformação apresentados, foram em média de aproximadamente  $\pm 16,5 \,\mu\epsilon$ , o que representa um erro em torno de 1,9 % numa faixa de leitura de aproximadamente de  $0 \,\mu\epsilon$  a  $-850 \,\mu\epsilon$ .

Observando os Gráficos (4.3.11.) e (4.3.12.), pode-se verificar que independentemente do tipo de esforço sofrido pelas grades (tração ou compressão), a variação da diferença (FBG-5 – FBG-17) possui comportamento similar. É possível visualizar nas curvas acima, que após a transição do degrau de carga a diferença entre os valores de deformação mecânica das grades começa a cair exponencialmente com o decorrer do tempo.

Inicialmente, acreditou-se que o efeito apresentado tratava-se do processo conhecido como fluência (termo em inglês: *creep*) de materiais sólidos. A fluência é um processo pelo qual o material, quando sujeito a esforços mecânicos, sofre deformação permanente. Essa deformação é uma função das propriedades do material, da duração da carga aplicada, da temperatura, a qual o material está exposto e da carga aplicada. <sup>(145; 146)</sup>

No entanto, mesmo sabendo que tanto a fibra óptica quanto a chapa de liga de Alclad estão sujeitas ao processo de fluência, o que se verifica nas curvas de deformação não é o efeito desse processo, mas o efeito do distanciamento do

comprimento de onda apresentado nos ensaios térmicos, anteriormente discutidos.

Analisando os gráficos acima, verifica-se que a diferença existente entre os valores das deformações experimentadas pelas duas FBG tem um decaimento exponencial com o tempo e que o tempo aproximado para que o valor das diferenças seja igual ao valor inicial, ou seja, antes do degrau de carga, é maior do que 5 min.

# 4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS TÉRMICOS REALIZADOS NO LABORATÓRIO LSI

Os ensaios descritos a seguir, foram realizados utilizando o arranjo experimental descrito no item (3.3.4.).

### 4.4.1 Ensaio térmico das FBG coladas na superfície da peça metálica

O arranjo experimental utilizado na realização dos ensaios apresentados nesse item tem sua descrição detalhada no item (3.3.4.1). Os ensaios realizados tiveram o propósito de verificar as possíveis causas do efeito da variação ou do distanciamento entre os comprimentos de ondas das grades FBG expostas às mesmas condições térmicas, conforme apontado anteriormente nos itens (4.1.) e (4.2.).

Foram utilizadas nesse ensaio apenas as grades FBG5 e FBG-17, que foram ligadas, respectivamente, nos canais 1 e 2 do interrogador sm130 e o sensor FS6200-1EC foi conectado no canal 1 do interrogador FS2200.

A colocação dos termopares na superfície da chapa metálica em teste possibilitou a comparação entre o comportamento desses sensores convencionais com o das FBG coladas no espécime. Os sinais dos termopares e do EER foram lidos pelo sistema de aquisição de dados ADS2002IP-B-3.

No ensaio, cujo resultado é mostrado no Gráfico (4.4.1.), a chapa metálica de Alclad foi colocada dentro da câmara térmica na posição 0°, conforme ilustrado na Figura (3.3.18.a.) do item (3.3.4.1.).



Gráfico 4.4.1. – Curvas da temperatura das grades FBG-5 e FBG-17 coladas na face superior da chapa de liga Alclad na posição 0° dentro da câmara térmica. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-002-MOI\_F2Hz\_A\_F1Hz do dia 28/12/2010).

No Gráfico (4.4.2.), a seguir, são apresentados os resultados da leitura dos termopares colocados na superfície da chapa metálica na posição 0°.



Gráfico 4.4.2. – Curvas da temperatura dos termopares TMP-K1 e TMP-K2 encostados na superfície da chapa de liga Alclad na posição 0° dentro da câmara térmica. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-002-ADS\_F2Hz TMP-K1\_K2 do dia 28/12/2010).

Os resultados mostrados no Gráfico (4.4.3.), a seguir, são referentes ao ensaio realizado na chapa metálica de Alclad colocada dentro da câmara térmica na posição 45°, conforme ilustrado na Figura (3.3.18.b.) do item (3.3.4.1.).



Gráfico 4.4.3. – Curvas da temperatura das grades FBG-5 e FBG-17 coladas na face superior da chapa de liga Alclad na posição 45° dentro da câmara térmica. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-003-MOI\_F2Hz\_A\_F1Hz do dia 28/12/2010).

No Gráfico (4.4.4.), a seguir, são apresentados os resultados da leitura dos termopares colocados na superfície da chapa metálica na posição 45°.



Gráfico 4.4.4. – Curvas da temperatura dos termopares TMP-K1 e TMP-K2 encostados na superfície da chapa de liga Alclad na posição 45° dentro da câmara térmica. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-003-ADS\_F2Hz TMP-K1\_K2 do dia 28/12/2010).

Os resultados mostrados no Gráfico (4.4.5.), a seguir, são referentes ao ensaio realizado na chapa metálica de Alclad colocada dentro da câmara térmica na posição 90°, conforme ilustrado na Figura (3.3.18.c.) do item (3.3.4.1.).



Gráfico 4.4.5. – Curvas da temperatura das grades FBG-5 e FBG-17 coladas na face superior da chapa de liga Alclad na posição 90° dentro da câmara térmica. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-001-MOI\_F2Hz\_A\_F1Hz do dia 29/12/2010).

No Gráfico (4.4.6.), a seguir, são apresentados os resultados da leitura dos termopares colocados na superfície da chapa metálica na posição 90°.



Gráfico 4.4.6. – Curvas da temperatura dos termopares TMP-K1 e TMP-K2 encostados na superfície da chapa de liga Alclad na posição 90° dentro da câmara térmica. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-001-ADS\_F2Hz TMP-K1\_K2 do dia 29/12/2010).

Os resultados mostrados no Gráfico (4.4.7.), a seguir, são referentes ao ensaio realizado na chapa metálica de Alclad colocada dentro da câmara térmica na posição 180°, conforme ilustrado na Figura (3.3.18.d.) do item (3.3.4.1.).



Gráfico 4.4.7. – Curvas da temperatura das grades FBG-5 e FBG-17 coladas na face superior da chapa de liga Alclad na posição 180° dentro da câmara térmica. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-001-MOI\_F2Hz\_A\_F1Hz do dia 28/12/2010).

No Gráfico (4.4.8.), a seguir, são apresentados os resultados da leitura dos termopares colocados na superfície da chapa metálica na posição 180°.



Gráfico 4.4.8. – Curvas da temperatura dos termopares TMP-K1 e TMP-K2 encostados na superfície da chapa de liga Alclad na posição 45° dentro da câmara térmica. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-001-ADS\_F2Hz TMP-K1\_K2 do dia 28/12/2010).

Analisando os Gráficos (4.4.1., 4.4.3., 4.4.5. e 4.4.7.), acima, verifica-se que, independentemente da posição de montagem da chapa dentro da câmara térmica não se observou alterações relevantes no comportamento da diferença entre as temperaturas das FBG. Essa observação, a princípio, mostra que não existe uma influência significativa do fluxo térmico no comportamento da variação da diferença de comprimento de onda das FBG nesses arranjos utilizados. Evidentemente que o fluxo térmico poderia produzir um gradiente de temperatura tal que, causasse uma variação representativa entre os valores de resposta das FBG, no entanto, isso poderia se constatado com a inversão da posição das grades, o que não se observou nos resultados dos teste nas quatro posições angulares.

Na análise da variação das diferenças entre os termopares apresentadas nos Gráficos (4.4.2., 4.4.4., 4.4.6. e 4.4.8.), acima, pode-se observar um comportamento similar em todas as posições angulares testadas. Do mesmo modo pode-se observar nos gráficos uma variação razoável entre os valores máximos e mínimos da amplitude das diferenças. Essa variação pode ter sido causada pelo posicionamento inadequado dos termopares na superfície da chapa, uma vez que a ponta dos termopares era apenas encostada na chapa, sem que algum tipo de fixação do sensor fosse executado.

Comparando as curvas dos gráficos da variação da diferença das grades e dos termopares, pode-se verificar que os erros entre os sensores convencionais são mais elevados do que os erros obtidos com o uso das FBG, o que, a princípio, pode ser uma vantagem da técnica óptica.

Concomitantemente com a realização dos ensaios térmicos mostrados acima, foram coletados sinais de deformação mecânica devido à dilatação térmica da chapa de liga Alclad. A medição foi feita por meio de um EER ligado em ¼ de ponte a 3 fios ligado no sistema de aquisição de dados ADS2002IP.

No Gráfico (4.4.9.), a seguir, são apresentados os resultados do experimento realizado para a medição da deformação utilizando apenas um extensômetro em ligação de ¼ de ponte.



Gráfico 4.4.9. – Curvas da temperatura do termopar TMP-K1 e da deformação devido à dilatação térmica na chapa de liga Alclad medida por meio de um único EER ligado em ¼ de ponte a 3 fios. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-001-ADS\_F2Hz do dia 27/12/2010).

Analisando as curvas apresentadas no gráfico acima, pode-se verificar que em função de uma variação de temperatura de 51,53 °C, a chapa de liga de Alclad atingiu uma deformação mecânica de cerca de 513,70  $\mu\epsilon$ , devido à dilatação térmica do material.

No entanto, considerando o coeficiente de dilatação ou expansão térmica  $\alpha = 23,5 \times 10^{-6} \text{ °}C^{-1}$  para a liga de Alclad 2024-T3 <sup>(147)</sup> e a expressão abaixo da dilatação térmica linear de um objeto provocada pela variação de sua temperatura:

$$\Delta_L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta_T \tag{4.4.1}$$

E sabendo que a deformação no material pode ser determinada por (143):

$$\varepsilon = \frac{\Delta_L}{L_0} \tag{4.4.2}$$

Tem-se que:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta_T \tag{4.4.3}$$

onde:  $\Delta_L$  é a variação do comprimento,  $L_0$  é o comprimento inicial e  $\Delta_T$  é a variação da temperatura, sendo todos os parâmetros referentes ao espécime.

Assim, o valor calculado da deformação da chapa de Alclad, sujeita à variação de temperatura do ensaio acima, deveria ser aproximadamente  $\varepsilon = 1210,95 \ \mu\epsilon$ . Nota-se que o valor da deformação mecânica obtido com o sistema de aquisição de dados  $(513,27 \ \mu\epsilon)$  é menos que a metade do valor calculado utilizando as expressões acima.

Provavelmente essa diferença entre os valores tenha diversas causas, como por exemplo, a utilização do modelo de EER autocompensado para aplicação em aço (KFG-10-120-C1-11). Esse EER possui um fator de compensação da expansão térmica de 11,7  $\mu\varepsilon/^{\circ}C$  (11,7  $ppm/^{\circ}C$ ). Como o coeficiente de expansão térmica da liga de Alclad ( $\alpha_{Alclad} = 23,5 \times 10^{-6} \ ^{\circ}C^{-1}$ ) é cerca de duas vezes maior do que o do aço ( $\alpha_{Aco} = 11,7 \times 10^{-6} \ ^{\circ}C^{-1}$ ), com isso, o valor da deformação em função da dilatação térmica será praticamente metade do valor esperado, se o EER não tivesse compensação alguma.

Assim, para a medição da deformação por efeito da dilatação térmica, o uso de um EER não compensado poderia minimizar a diferença entre o valor prático e o valor teórico. No caso da necessidade de medições da deformação devido apenas às solicitações mecânicas, o uso de EER autocompensado específico para cada tipo de material é necessário.

Outra possível causa da diferença entre os valores pode estar relacionado aos erros inerentes à calibração do sensor EER e ao sistema de aquisição de dados.

O uso de um único EER não compensado, ou no caso, parcialmente compensado com ligação em ¼ de ponte para medição de deformação mecânica é considerado adequado apenas quando a temperatura do espécime em teste possui

comportamento dentro de uma pequena faixa especificada.

Como dito anteriormente, a montagem utilizando um único EER com ligação em ¼ de ponte, apesar de ser mais simples e de ter um custo de instalação menor do que as montagens em ½ ponte e ponte completa, apresenta diversos problemas de estabilidade e de fidedignidade das medições quanto instalados em ambientes cujas condições ambientais são hostis, como por exemplo, em ensaios de fuselagem de aeronaves em voo, onde a variação de temperatura pode ser da ordem de dezenas de graus em poucos minutos.

Assim, se o interesse da medida for apenas a leitura da deformação decorrente de esforços mecânicos, como de tração, de compressão, de flexão, de torção, de flambagem e de cisalhamento, o uso de EER não compensados ligados em ¼ de ponte não é o mais apropriado.

Assim, para minimizar eventuais problemas de origem térmica é importante a utilização de EER autocompensados especificados de acordo com o material a ser ensaio. O uso de um segundo EER com ligação em ½ ponte pode, praticamente, eliminar a sensibilidade do circuito à variação de deformação oriunda da expansão térmica do material, passando a ter sensibilidade apenas às solicitações de ordem mecânica.

No Gráfico (4.4.10.), a seguir, são apresentados os resultados do experimento realizado para a medição da deformação utilizando dois extensômetros em ligação de <sup>1</sup>/<sub>2</sub> ponte.



Gráfico 4.4.10. – Curvas da temperatura do termopar TMP-K1 e da deformação devido à dilatação térmica na chapa de liga Alclad medida por meio de um único EER ligado em ¼ de ponte a 3 fios. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-001-ADS\_F2Hz do dia 28/12/2010).

Analisando as curvas apresentadas no gráfico acima, pode-se verificar que embora a variação da temperatura da superfície da chapa tenha sido de 48,08 °C, o valor da deformação mecânica lida pelo EER oscilou em torno do zero e teve seu valor máximo acerca de  $14,48 \,\mu\epsilon$ . Essa pequena variação apresentada revela a baixa sensibilidade do circuito em ½ ponte à dilatação térmica do material.

Um fator que pode ter contribuído para essa variação está relacionada à forma de apoio utilizada na montagem da chapa no arranjo experimental. Como a chapa foi biapoiada no recipiente refratário é possível que o efeito da dilatação térmica tenha causado eventuais esforços de flexão. Essa flexão pode, por exemplo, ter origem nos esforços devido ao peso do cabo de ligação do EER.

# 4.4.2 Ensaio térmico da FBG tripla dentro do tubo de papelão

O arranjo experimental utilizado na realização dos ensaios apresentados nesse item tem sua descrição detalhada no item (3.3.4.2).

O intuito da realização dos ensaios com três FBG gravadas no mesmo segmento de fibra óptica descritos nesse item é de descartar quaisquer possíveis influências de inércia térmica ou de gradiente de temperatura da superfície da peça metálica nas grades de Bragg.

As três grades da FBG-T3 foram ligadas no canal 1 do interrogador sm130 e os termopares TMP-K1 e TMP-K2 foram ligados, respectivamente, nos canais 2 e 3 do sistema de aquisição de dados ADS2002IP-B-3.

No Gráfico (4.4.11.), a seguir, são apresentados os resultados do experimento térmico realizado com a grade tripla FBG-T3 dentro do tubo de papelão posicionado verticalmente no interior da câmara térmica.



Gráfico 4.4.11. – Curvas do comportamento térmico da grade tripla FBG-T3 dentro do tubo de papelão posicionado verticalmente na câmara e da variação das diferenças de temperatura entre as grades.

Fonte: Dados experimentais (arquivo: Tubo-001-MOI\_F2Hz\_A\_F1Hz do dia 29/12/2010).

Analisando as curvas do gráfico acima, observa-se a ocorrência de divergência entre a temperatura das grades, principalmente em função da taxa de variação da temperatura do forno. Aparentemente quanto maior a taxa de variação da temperatura maior é a diferença entre as temperaturas, como pode ser visto nos instantes das ocorrências da perturbação e do desligamento da câmara e abertura da porta. O evento da perturbação está relacionado com a abertura parcial da porta por um pequeno intervalo de tempo e o seu fechamento posterior.

Verifica-se também que a diferença entre os valores de temperatura não é a mesma entre as grades. Essa diferença, provavelmente está relacionada com o processo de calibração das grades. A utilização de apenas três pontos para a interpolação da curva de calibração pode ter originado esse erro entre os valores das grades.

Outra possível fonte de erro está relacionada à própria medida da temperatura utilizada como valor padrão. Os sinais dos dois termopares tipo K colocados juntamente com a fibra óptica das grades FBG-T3 no interior do tubo de papelão serviram de referência para a calibração das grades.

No Gráfico (4.4.12.), a seguir, são apresentados os resultados da leitura dos termopares colocados dentro do tubo de papelão juntamente com a FBG-T3.





Fonte: Dados experimentais (arquivo: Tubo-001-ADS\_F2Hz\_A\_TMP-K1\_K2 do dia 29/12/2010).

Analisando o gráfico da variação da diferença de temperatura entre os dois termopares é possível verificar que a discrepância entre os valores desses sensores é da mesma magnitude do que os apresentados pelas FBG.

Um segundo ensaio foi realizado com a FBG-T3 dentro do tudo de papelão horizontalmente posicionado em cima de uma caixa de papelão, conforme mostrado na Figura (3.3.19.).

Nos Gráficos (4.4.13.) e (4.4.14.), a seguir, são apresentados os resultados do experimento térmico realizado com a grade tripla FBG-T3 dentro do tubo de papelão posicionado horizontalmente no interior da câmara térmica.



Gráfico do comportamento térmico da grade tripla FBG-T3 ( $\lambda_{p}$ : 1531,25, 1562,52 e 1581,19)

Gráfico 4.4.13. – Curvas do comportamento térmico da grade tripla FBG-T3 dentro do tubo de papelão posicionado horizontalmente na câmara térmica. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-001-MOI\_F2Hz\_A\_F1Hz do dia 07/01/2011).

No Gráfico (4.4.14.), são apresentadas as curvas de variação da diferença entre os comprimentos de onda e as temperaturas das grades da FBG-T3.



Gráfico 4.4.14. – Curvas da variação da diferença entre os comprimentos de onda e as temperaturas das grades da FBG-T3: a) (1562,52 –1531,25), b) (1581,19 – 1562,52) e c) (1581,19 – 1531,25). Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-001-MOI\_F2Hz\_A\_F1Hz do dia 07/01/2011).

Analisando os dados das curvas do Gráfico (4.4.14.), é possível se extrair os seguintes parâmetros apresentados na Tabela (4.4.1.), a seguir:

Tabela 4.4.1. – Valores da variação máxima de comprimento de onda e de temperatura das grades da FBG-T3.

Parâmetro	Curva a)	Curva b)	Curva c)
Variação máxima comprimento de onda: $\left[ pm ight]$	25,85	18,26	32,31
Variação máxima da temperatura: $\left[ {^\circ C}  ight]$	2,49	2,23	3,56

Utilizando a sensibilidade teórica para calcular variação máxima da temperatura em função dos valores de comprimento de onda apresentados na tabela acima, poderia se constatar que os valores medidos divergem dos calculados. É provável que o método utilizado para a calibração das FBG seja o responsável por essa divergência.

A sensibilidade das três grades da FBG-T3 foi calculada por meio da divisão da média aritmética de duzentas amostras de três regiões distintas (23,75 °C, 45,00 °C e 74,70 °C) da curva. A curva do sinal do termopar TMP-K1 foi utilizada como referência de temperatura. A sensibilidade das grades FBG-T3-1531,25; FBG-T3-1562,52 e FBG-T3-1581,19 está listada na Tabela (4.4.2.), a seguir:

Tabela 4.4.2. – Valor da sensibilidade das três grades da FBG-T3.

Parâmetro	FBG-T3-1531,25	FBG-T3-1562,52	FBG-T3-1581,19
Sensibilidade: $[pm/^{\circ}C]$	8,66	8,88	8,96

Observa-se que os valores obtidos para a sensibilidade são menores do que a sensibilidade teórica da FBG descrita na Equação (2.5.9.), que é  $S_T \approx 13.7 \text{ pm/°C}$ . Essa diferença se deve aos valores dos parâmetros, como o coeficiente de expansão térmica ( $\alpha_{\Lambda}$ ) e o coeficiente termo-óptico ( $\alpha_n$ ), adotados no cálculo do valor teórico. <sup>(36)</sup> É possível que divergências nos valores das características ópticas relacionadas ao material de fabricação das fibras, também tenham contribuído para essa diferença.

#### 4.4.3 Ensaio térmico dos sensores FBG dentro da caixa de papelão

O arranjo experimental utilizado na realização dos ensaios apresentados nesse item tem sua descrição detalhada no item (3.3.4.3).

O propósito dos experimentos descritos nesse item foi de se interrogar os sensores comerciais com um sistema óptico diferente do utilizado nos ensaios térmicos apresentados no item (4.2.).

Os resultados mostrados no Gráfico (4.4.15.), a seguir, são referentes ao ensaio térmico realizado com as FBG-5 e FBG-6 coladas na chapa metálica de Alclad.



Gráfico 4.4.15. – Curvas de comprimento de onda das grades FBG-5 e FBG-6 coladas na face superior da chapa de liga Alclad dentro da câmara térmica. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-001-FS\_A do dia 29/12/2010).

Nesse experimento as grades FBG-5 e FBG-6 foram ligadas nos canais 1 e 2, respectivamente, do interrogador FS2200. Pode-se observar no gráfico acima que a diferença de comprimento de onda em função da variação da temperatura atingiu cerca de 82,3 pm. Como o valor dessa diferença foi muito mais alto do que os obtidos com o interrogador sm130 da MOI, suspeita-se que tenham ocorrido erros na configuração dos parâmetros de calibração dos sensores no interrogador FS2200.

Adicionalmente, foi realizado um experimento para a verificação do comportamento térmico do sensor de deformação compensado FS6200-1EC. Esse sensor foi posicionado dentro do recipiente refratário e ligado no canal 2 do interrogador FS2200. O sinal de resposta da grade FBG-6 foi lido simultaneamente pelo canal 1 do interrogador e foi utilizado para uma comparação com os sinais provenientes do sensor compensado.

No Gráfico (4.4.16.), a seguir, são apresentados os resultados do experimento realizado com a grade FBG-6 e com o sensor compensado FS6200-1EC.





Gráfico 4.4.16. – Curvas do comportamento térmico do sensor compensado FS6200-1EC em comparação à FBG-6 colada na chapa de Alclad. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-001-FS do dia 27/12/2010).

Analisando as curvas do gráfico acima, verifica-se que o comportamento térmico da FBG-6 é bastante semelhante ao da grade do sensor compensado, responsável pela medição da deformação (FS6200-1EC/D). Nota-se também que a grade do sensor compensado, que responde à temperatura (FS6200-1EC/T), possui um tempo de reposta menor do que a grade responsável por medir a deformação. Essa diferença no tempo de resposta das grades de um sensor compensado pode ser uma limitação para o uso desse tipo de sensor em aplicações dinâmicas, quando, por exemplo, a temperatura variar de forma rápida.

No Gráfico (4.4.17.), a seguir, são apresentados os resultados do experimento realizado com o sensor compensado FS6200-1EC.



Gráfico 4.4.17. – Curvas de comprimento de onda do sensor compensado FS6200-1EC e da variação da diferença entre as grades do dispositivo. Fonte: Dados experimentais (arguivo: Termico-001-FS A do dia 05/01/2011).

Nota-se que devido às diferentes respostas de comportamento térmico a variação da diferença de comprimento de onda ultrapassou o patamar de 620,0 pm. Alguma diferença já era prevista, uma vez que os tempos de resposta das grades são diferentes. Mesmo estando próximas e dispostas no mesmo encapsulamento do sensor as grades são fixadas de forma específica para o tipo de parâmetro a ser medido.

Foram realizados ensaios de comportamento térmico com um par de sensores de deformação modelo FS6210 ligado em série em um único canal do interrogador óptico. Os sensores foram montados conforme arranjo experimental mostrado na Figura (3.3.20.).

O intuito desse ensaio foi de realizar um procedimento experimental diferente dos testes realizados no item (4.2.), os quais tiveram as grades ligadas em canais distintos do interrogador. No Gráfico (4.4.18.), a seguir, são apresentados os resultados do experimento realizado com dois sensores de poliamida FS6210 ligados em série.



Gráfico 4.4.18. – Curvas de comprimento de onda dos sensores de poliamida FS6200-1P e FS6200-2P ligados em série em um canal do interrogador óptico FS2200. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-001-FS\_FS6200P\_F1Hz do dia 05/01/2011).

Pode-se verificar na curva da variação da diferença das grades dos sensores de poliamida a ocorrência de uma elevada discrepância entre os valores de comprimento de onda. Acredita-se que esse comportamento seja devido às tensões mecânicas geradas pelo aquecimento dos materiais que compõem os sensores, uma vez que cada material, como o filme de poliamida, a fibra óptica e a cola adesiva, possui um coeficiente de expansão térmica distinto.

Adicionalmente, foram realizados ensaios com dois sensores de temperatura modelo FS6320 ligados em série em um único canal do interrogador óptico. Os sensores foram montados conforme arranjo experimental mostrado na Figura (3.3.20.).
No Gráfico (4.4.19.), a seguir, são apresentados os resultados do experimento realizado com dois sensores metálicos soldáveis modelo FS6320 ligados em série.



Gráfico 4.4.19. – Curvas de comprimento de onda dos sensores soldáveis FS6300-3S e FS6300-4S ligados em série em um canal do interrogador óptico FS2200. Fonte: Dados experimentais (arquivo: Termico-002-FS\_FS6300S\_F1Hz do dia 05/01/2011).

Verifica-se que, diferentemente do ocorrido no ensaio com os sensores de poliamida, esses sensores metálicos possuem uma resposta diferencial mais rápida e precisa.

# 4.5 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS FBG PRODUZIDAS NO IEAV E DOS SENSORES FBG COMERCIAIS

Foi realizado um levantamento do sinal de resposta das grades de Bragg produzidas pelo IEAv e dos sensores FBG comerciais da Fiber Sensing e da Micron Optics.

Na Tabela (4.5.1.), a seguir, são mostradas algumas características das grades e dos sensores FBG utilizados neste trabalho.

	Dados de fabricação			Parâmetros e dados do sm130 (N2)			Parâmetros e dados medidos do FS2200 <sup>(N2)</sup>			
FBG/Sensor	Pico central	Refletividade	Largura FMHW	Ganho	Limiar ruído	Amplitude	Ganho	Limiar ruído	Amplitude	Largura FMHW
	[nm]	[dBm]	[pm]	[dB]	[dB]	[ua]	[dB]	[dB]	[ua]	[pm]
FBG-1	1551,612	-49,17	812	0,00	0,2	330	15	0,3	22,10	800
FBG-2	1550,916	-46,79	928	0,00	0,2	1190	15	0,3	102,45	920
FBG-5	1560,33	-49,42	900	0,00	0,2	300	15	0,1	18,26	910
FBG-6	1541,70	-46,18	3750 <sup>(N1)</sup>	0,00	0,2	1300	15	0,3	110,84	2360
FBG-8	1536,76	-48,2	320	0,00	0,2	700	15	0,3	55,79	1025
FBG-11	1534,96	-39,35	1360	0,00	0,2	1875	15	0,85	999,76	1330
FBG-17	1538,28	-47,28	960	0,00	0,2	720	15	0,3	57,51	870
FS6200-1E soldável	1547,86 046840606497-D	> 75	< 200	0,00	0,2	1670	15	0,3	94,95	184
FS6200-1EC compensado	1554,28 1560,75 046840601576-EF	> 75	< 200	0,00	0,2	1200 1240 -	15	0,3	46,38 43,76 -	106 87 -
FS6200-1P poliamida	1534,880 046840602931-B	> 75	< 200	0,00	0,2	1160	15	0,3	88,87	110
FS6200-2P poliamida	1553,634 046840602936-E	> 75	< 200	0,00	0,2	1330	15	0,3	91,75	130
FS6200-1C compósito	1547,763 046840602943-D	> 75	< 200	0,00	0,2	1300	15	0,3	90,28	130
FS6200-2C compósito	1554,893 046840602944-E	> 75	< 200	0,00	0,2	1190	15	0,3	78,00	104
FS6300-1S soldável	1548,118 046840602949-D	> 75	< 200	0,00	0,2	1120	15	0,3	79,50	125
FS6300-2S soldável	1554,450 046840602950-E	> 75	< 200	0,00	0,2	1250	15	0,3	85,47	120
FS6300-3S soldável	1541,785 046840602948-C	> 75	< 200	0,00	0,2	1270	15	0,3	86,09	104
FS6300-4S weldable	1560,590 046840602951-F	> 75	< 200	0,00	0,2	1580	15	0,3	78,76	134
OS3100/D	1562,9 A100A09	> 70	-250 (± 50pm)	0,00	0,175	200	15	0,3	65,82	226
OS4100/T	1546,6 A1005BB	> 70	250 (+ 50pm)-	0,00	0,2	410	15	0,3	57,99	200

Tabela 4.5.1. – Características das grades de Bragg produzidas no IEAv e de sensores FBG comerciais.

<sup>N1</sup> - Não foi possível realizar uma medida precisa na curva gerada pelo analisador de espectro óptico por que ela estrapolava o tamanho da folha;
<sup>N2</sup> - Temperatura ambiente no dia da realização dos ensaios: 30,2 a 30,5 °C (temperatura não controlada);

Analisando os dados acima, verifica-se que as FBG produzidas no IEAv possuem larguras espectrais (valor médio:  $1173,6 \text{ pm} \pm 550,7 \text{ pm}$ ) maiores do que as das grades dos sensores comerciais da FS (valor médio:  $121,6 \text{ pm} \pm 31,4 \text{ pm}$ ) e que as das grades dos sensores da MOI ( $213,0 \text{ pm} \pm 18,4 \text{ pm}$ ), além de um elevado desvio padrão.

Em relação à amplitude do espectro refletido é possível verificar que os valores apresentados pelas grades produzidas no IEAv, em média, (valor médio: 195,3 ua  $\pm$  365,5 ua) são maiores que os apresentados pelas grades dos sensores da FS (valor médio: 76,3 ua  $\pm$  22,0 ua) e das grades dos sensores da MOI (valor médio: 62,0 ua  $\pm$  5,5 ua). No entanto, pode-se notar que o valor da amplitude do espectro de reflexão da grade FBG-11 foi excessivamente mais alto do que o das outras FBG.

Embora a refletividade apresentada em catálogo das grades dos sensores da Micron Optics seja maior que a refletividade medida das grades produzidas no IEAv, o valor da amplitude dos sinais apresentados não apresentou diferenças significativas, como se pode ver na Tabela (4.5.1.).

Assim, pode-se verificar, tanto pela análise dos valores da largura espectral quanto dos valores da amplitude do espectro refletido, que as grades produzidas no IEAv não tiveram uma uniformidade paramétrica, como observado nos dados dos sensores comerciais.

A largura espectral de resposta da grade de Bragg é um parâmetro importante a ser controlado no seu processo de fabricação, pois dependendo da largura do espectro, algumas características, como por exemplo, sensibilidade e precisão na medida podem ser prejudicadas no uso destas FBG como sensores.

Na prática, a largura do espectro depende de vários fatores, dentre eles o tempo de exposição da fibra ao laser no processo de fabricação e do alinhamento e da estabilidade dos sistemas mecânicos de posicionamento do laser e da grade para gravação da FBG. Sensores construídos com FBG que possuem banda espectral muito larga limitam a faixa dinâmica e permitem a utilização de um número menor de

sensores numa determinada banda de comprimentos de onda.

## **5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Pôde-se observar nos resultados dos ensaios térmicos realizados tanto com as FGB produzidas no IEAv quanto com as grades dos sensores comerciais a ocorrência de um efeito não linear no comportamento dinâmico desses dispositivos. Verifica-se também que efeito similar ocorre no uso de sensores de temperatura do tipo termopar colocados juntamente com as FBG nos mesmos ensaios. Verifica-se também que a amplitude da diferença entre os valores dos sensores convencionais é maior do que a diferença apresentada com o uso das FBG.

Com os resultados apresentados dos ensaios térmicos realizados com as FBG coladas na superfície da placa metálica posicionada em diferentes orientações dentro da câmara térmica, pôde-se, praticamente, descartar a influência do fluxo térmico na ocorrência do efeito do distanciamento dos comprimentos de onda das FBG.

Mesmo nos ensaios térmicos utilizando três grades inscritas na mesma fibra e com espaçamento de poucos milímetros uma da outra, como foi o caso da grade FBG-T3, foi observada a ocorrência do efeito do distanciamento dos comprimentos de onda entre as três grades.

Verificou-se também a ocorrência desse efeito não linear nos ensaios mecânicos, o qual foi evidenciado com a realização do ensaio de estabilização de carga. Pôde-se averiguar nos gráficos da diferença entre os comprimentos de onda das FBG, que após o degrau de carga aplicado em pelo menos duas grades simultaneamente, o tempo de equiparação dos comprimentos de onda das FBG teve comportamento exponencial e seu valor foi bastante elevado, quando comparado ao nomeadamente tempo de resposta do sensor.

Portanto, acredita-se que independentemente da FBG ter sido fabricada na mesma fibra ou não, de possuírem comprimentos de onda muito próximos ou bastante distantes ou de serem inscritas praticamente na mesma hora ou em períodos bem afastados, esse efeito não linear, em menor ou maior grau, parece estar sempre presente quando se compara duas ou mais FBG sujeitas às mesmas condições térmicas ou mecânicas.

Em relação à produção das FBG no laboratório da EFO-S do IEAv, ficou patente que o processo de inscrição das grades de Bragg uniformes pode ser melhorado, de modo a se conseguir um processo que tenha boa reprodutibilidade no que diz respeito à obtenção de grades com pequena largura espectral e elevada amplitude do espectro de reflexão.

Acredita-se que o procedimento utilizado no processo de hidrogenação das fibras ópticas, em princípio, foi o principal motivo da obtenção de FBG com baixa refletividade, enquanto que os possíveis desalinhamentos do aparato mecânico no processo de gravação das grades tenha sido a maior causa da grande largura espectral das grades produzidas no IEAv.

Estas observações visam contribuir para que possam crescer o conhecimento e o domínio em âmbito nacional dos processos de fabricação desses dispositivos, uma vez que, além de facilitar a obtenção de resultados de pesquisa cada vez mais específicos e avançados, para que a produção desses dispositivos se torne comercialmente atrativa no Brasil, o controle de um processo de fabricação de FBG mais efetivo, que produza grades com uma menor dispersão dos parâmetros e que seja capaz de inscrever grades com comprimentos de onda específicos e com refletividades pré-determinadas é indispensável.

### 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

#### 6.1 CONCLUSÕES

Como o foco do trabalho era justamente a implementação e caracterização da resposta dinâmica de transdutores de deformação e temperatura a fibras ópticas baseados em grades de Bragg, pode-se considerar que o objetivo proposto para o trabalho foi cumprido.

Os resultados obtidos nos experimentos foram satisfatórios em relação à demonstração do efeito do distanciamento entre os comprimentos de onda de duas ou mais grades FBG sujeitas às mesmas condições ambientais ou às mesmas solicitações de esforços mecânicos. O conjunto de experimentos e procedimentos realizados no âmbito deste trabalho teve o mérito de apresentar e alertar sobre uma possível fonte de erro nas medidas dos parâmetros de temperatura e de deformação utilizando sensores baseados na técnica de FBG, quando pelo menos um desses parâmetros é rapidamente variável. Entretanto, é incontestável que a tecnologia de sensoriamento à FBG, mesmo apresentando esse efeito do distanciamento, tem sua aplicabilidade inquestionável em diversas áreas de aplicação da engenharia, principalmente naquelas que apresentam variações quase-estáticas das grandezas medidas.

O uso de sensores baseados em grades de Bragg em fibras ópticas em arranjos experimentais que necessitam de compensação de temperatura pode apresentar limitações no funcionamento dinâmico do sistema devido ao tempo de estabilização na diferença dos comprimentos de onda das grades de Bragg,como por exemplo, no caso do monitoramento de estruturas aeronáuticas e aeroespaciais em vôo, que podem ser submetidas a variações de temperatura de dezenas de graus Celsius em períodos muito curtos de tempo. Essa limitação também pode gerar problemas em aplicações em áreas da engenharia civil, como por exemplo, o uso das FBG em estruturas inteligentes (*smart structures*) ou em áreas da engenharia elétrica, para o uso na medição de temperatura de transformadores de

alta tensão, ou medidas de deformação em cabos de transmissão de energia, caso um dos parâmetros (temperatura ou deformação) seja rapidamente variável.

Não foi observado até o término da pesquisa na literatura consultada, trabalho algum que trate deste efeito do distanciamento entre os comprimentos de onda de duas grades de Bragg de forma dinâmica. Sendo, assim pode-se considerar esse trabalho como uma contribuição para o entendimento do comportamento funcional das grades de Bragg em fibra ópticas.

#### 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como não até a data da conclusão deste trabalho ainda não foi encontrada explicação que permitisse compreender completamente o fenômeno físico causador do comportamento reportado, que demonstra diferenças de respostas dinâmicas entre duas grades de Bragg sujeitas às mesmas condições ambientais de temperatura ou de solicitações mecânicas externas semelhantes, devem-se realizar testes adicionais que contribuam com mais dados sobre o fenômeno e ajudem a elucidar suas causas. No caso da resposta a variações de temperatura, por exemplo, podem ser feitos novos testes de comportamento térmico dinâmico onde se tenha melhor controle térmico do ambiente, como o que pode ser obtido com a utilização de um sistema de controle de temperatura por meio de um *hot plate* disposto dentro de uma câmara térmica, ou com o uso de um calorímetro.

Adicionalmente, devem ser realizados ensaios mecânicos para se tentar caracterizar o comportamento exponencial da diferença dos tempos de resposta entre as duas grades, a fim de verificar qual a correlação desse comportamento em relação a parâmetros como: a velocidade da aplicação da força, o valor da deformação aplicada, a temperatura ambiente ou ainda, se existe alguma dependência com parâmetros característicos das FBG, como comprimento de onda, largura espectral, entre outros.

Formas geométricas e matérias-primas para a construção de encapsulamentos de transdutores de deformação mecânica e de temperatura também devem ser estudados para que, posteriormente, possam ser construídos dispositivos que possuam performances adequadas e estáveis, de acordo com suas aplicações.

Métodos de minimização da sensibilidade cruzada (*cross-sensitivity*) devem ser estudados, para posterior implementação, a fim de diminuir os problemas encontrados na compensação da temperatura em arranjos experimentais que utilizam FBG para este fim.

A implementação de sensores de deformação com grades de Bragg fabricadas pelo IEAv, bem como o estudo de materiais para construção de encapsulamentos para esses sensores também são temas a serem explorados em trabalhos futuros.

Por fim, a melhor caracterização dos comportamentos dinâmicos dos sensores de temperatura e deformação a grades de Bragg inscritas em fibras ópticas pode levar ao desenvolvimento de técnicas de compensação baseadas em métodos numéricos (talvez envolvendo cálculos de derivadas temporais das variáveis medidas) aplicáveis a sistemas de processamento digital de sinais em tempo real. Os estudos de tais técnicas também deverão ser objeto de trabalhos futuros, uma vez que elas poderão viabilizar a utilização desses sensores em situações nas quais, atualmente, os erros acarretados pelas respostas dinâmicas díspares entre sensores, encontrados numa análise baseada nas observações deste trabalho, possam ser considerados proibitivos.

## REFERÊNCIAS

1. **Colladon, Daniel.** "On the reflections of a ray of light inside a parabolic liquid stream". Oct. 24, 1842, Vol. Comptes Rendus, 15, pp. 800–802.

2. Bell, Alexander Graham. "The photophone". Scientific American. Supplement 246, Sept. 18, 1880, pp. 3921–3923.

3. **Prof. Roth, and Dr. Reuss,.** "A new method of illuminating internal organs". The Lancet. Jan 5, 1889, p. 52.

4. **Hecht, Jeff.** "City of Light: The Story of Fiber Optics". revised and expanded edition. New York - USA : Oxford University Press, 2004. p. 368. ISBN-10: 0195162552, ISBN-13: 978-0195162554.

5. **Hopkins, H. H. and Kapany, N. S.** "A Flexible Fibrescope, using Static Scanning". Nature. 173, 1954, pp. 39-41.

6. **Kao, C. K. and Hockham, G. A.** "Dielectric fiber surface waveguides for optical frequencies". Proceedings Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 1966, Vol. 113, p. 1151.

7. **Ribeiro, A. B. Lobo.** "Esquemas de Multiplexagem de Sensores de Fibra Óptica". Departamento de Física, Faculdade de Ciência da Universidade do Porto. Portugal : sem, 1996. Tese de doutoramento. ISBN.

8. **Snitzer, E.** "Apparatus for controlling the propagation characteristics of coherent light within an optical fiber". Patent 3.625.589 USA, 1971.

9. Vali, V., Shorthill, R. W. "Fiber ring interferometer". Applied Optics. 1976, Vol. 15, pp. 1099-1100.

10. Bucaro J. A., Dardy, H. D., and Carome, E. F. "Fiber optic hydrophone". Journal of the Acoustical Society of America. 1977, Vol. 52, p. 1302.

11. **Rogers, A.J.** "Optical methods for measurement of voltage and current in power systems". Optics & Laser Technology. 1977, Vol. 9, pp. 273–283.

12. Hill, K.O., Fujii, Y., Johnson, D.C. and Kawasaki, B. S. "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication". Applied Physics Letters. 1978, Vol. 32, 10, pp. 647-649.

13. **Othonos, Andreas.** "Fiber Bragg Gratings". Review of Scientific Instruments. December 1997, Vol. 68, 12, pp. 4322-4327.

14. Kawasaki, B. S., Hill, K. O., Johnson, D. C. and Fujii, Y. "Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers". Optics Letters. 1978, Vol. 3, pp. 66–68.

15. **Hill, K.O. and Meltz, G.** "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview". Journal of Lightwave Technology. 1997, Vol. 15, 8, pp. 1263-1276, .

16. Erdogan, T., Mizrahi, V., Lemaire, P. J. and Monroe, D. "Decay of ultravioletinduced fiber Bragg gratings". Journal of Applied Physics. 1994, Vol. 76, pp. 73–80.

17. **Haase, K.** "Strain sensors based on bragg gratings". IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference. Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), 2007.

18. Lam, D. K. W. and Garside, B. K. "Characterization of single-mode optical fiber filters". Applied Optics. 1981, Vol. 20, 3, pp. 440-445.

19. **Bures, J., Lacroix, S. and Lapiere, J.** "Bragg reflector induced by photosensitivity in an optical fibre: model of growth and frequency response". Applied Optics. 1982, Vol. 21, 19, p. 3052.

20. **Kashyap, R.** "Fiber Bragg Gratings". San Diego, USA : Academic Press, 1999. p. 458. ISBN-10:0-12-400560-8, ISBN 13: 978-0-12-400560-0.

21. **Meltz, G., Morey, W. W. and Glenn, W. H.** "Formation of Bragg grating in optical fiber by the transverse holographic method". Optics Letters. 1989, Vol. 14, 15, pp. 823–825.

22. Morey, W.W., Meltz, G. and Glenn, W.H. "Fiber optic Bragg grating sensors". Proceedings of SPIE - Fiber Optic and Laser Sensor VII. 1989, Vol. 1169, pp. 98-107.

23. **Rao, Y.J.** "Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors". Optics and Lasers in Engineering. 1999, Vol. 31, pp. 297-324.

24. Hill, K. O., Malo, B., Bilodeau, F., Johnson, D. C. and Albert, J. "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask". Applied Physics Letters. 1993, Vol. 62, 10, pp. 1035-1037.

25. Anderson, D.Z., Mizrahi, V., Erdogan, T. and White, A. E. "Production of infibre gratings using a diffractive optical element". Electronics Letters. 1993, Vol. 29, 6, pp. 566-568.

26. Hill, K.O., Malo, B., Vineberg, K. A., Bolideau, F., Johnson, D.C., Skinner, I. "Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings". Electronics Letters. 1990, Vol. 26, 16, pp. 1270-1272.

27. Askins, C.G., Tsai, T.-E., Williams, G.M., Putnam, M.A., Bashkansky, M., Friebele, E.J. "Fiber Bragg reflectors prepared by a single excimer pulse". Optics Letters. 1992, Vol. 17, 11, pp. 833-835.

28. Archambault, J. L., Reekie, L., Russel, P. St. J. "High reflectivity and narrow bandwidth fibre gragings written by single excimer pulse". Electronics Letters. 1993, Vol. 29, 1, pp. 28-29.

29. —. "100% Reflectivity Bragg reflectors produced in optical fibres by single excimer laser pulses". Electronics Letters. 1993, Vol. 29, 5, pp. 453-455.

30. Malo, B., Hill, K.O., Bolideau, F., Johnson, D.C., Albert, J. "Point-by-point fabrication of micro-Bragg gratings in photosensitive fibre using single excimer pulse refractive index modification techniques". Electronics Letters. 1993, Vol. 29, 18, pp. 1668-1669.

31. **Týnek, Jaroslav.** "Manufacturing of the Fiber Bragg Gratings". International Interdisciplinary Student Competition and Conference, Honeywell EMI, Brno University of Technology. 2005. Doctoral Degree Programme.

32. Lee, B. "Review of the present status of optical fiber sensors". Optical Fiber Technology. 2003, Vol. 9, 2, pp. 57-79.

33. **Méndez, A., Morse, T. F.** "Specialty Optical Fibers Handbook". USA : Academic Press - Elsevier, 2007. p. 798. ISBN-10: 012369406X.

34. **Daher, B. W.** "Use of Sensors in Monitoring Civil Structures". Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology (MIT). USA : s.n., 2004. p. 145, Master Thesis.

35. **Shing, Cheung Chi.** "An investigation of chirped fibre Bragg gratings Fabry-Perot interferometer for sensing applications". Centre for Photonics and Optical Engineering, Cranfield University. United Kingdom : s.n., march 2005. PhD Thesis.

36. **Othonos, A., and Kalli, K.** "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing". Boston, London : Artech House Optoelectronics Library, 1999. ISBN-10: 0890063443, ISBN-13: 978-0890063446.

37. Hand, D. P., and Russel, P. St, J. "Photoinduced Refractive-Index Changes in Germanosilicate Fiber". Optics Letters. 1990, Vol. 15, 2, pp. 102-104.

38. **Russell, Philip S., Poyntz-Wright, L. J. and Hand, Duncan P.** "Frequency doubling, absorption, and grating formation in glass fibers: effective defects or defective effects?". Proceedings of SPIE - Fiber Laser Sources and Amplifiers II. 1990, Vol. 1373, 126.

39. Russell, Philip S., Hand, Duncan P., Chow, Yuk T. and Poyntz-Wright, L. J. "Optically induced creation, transformation, and organization of defects and color centers in optical fibers". Proceedings of SPIE. 1991, Vol. 1516, 47.

40. **Hill, K.O., Malo, B., Bilodeau, F., Johnson, D.C., Morse, T.F., Kilian A., et al.** "Photosensitivity in Eu2+:Al2O3 doped-core fibre: Preliminary results and application to mode converters". Proceedings of Conference on Optical Fiber Communications, OFC'91. 1991, paper PD3-1, pp. 14–17.

41. **Broer, M.M., Cone, R.L., Simpson, J.R.** "Ultraviolet-induced distributed-feedback gratings in Ce3+ doped silica optical fibres". Optics Letters. 1991, Vol. 16, 18, pp. 1391–1393.

42. Bilodeau, F., Johnson, D. C., Malo, B., Vineberg, K. A., Hill, K. O., Morse, T. F., Kilian, A. and Reinhart, L. "Ultraviolet-light photosensitivity in Er3+–Ge-doped optical fiber". Optics Letters. 1990, Vol. 15, 20, pp. 1138-1140.

43. **Kashyap, R.** "Fiber Bragg Gratings". 2nd ed. San Diego, USA : Academic Press, november 2009. p. 632. ISBN-10: 0-12-372579-8, ISBN-13: 978-0-12-372579-0.

44. **Fiori, C., and Devine, R. A. B.** "Ultraviolet irradiation induced compactation and photoetching in amorphous thermal SiO2". Materials Research Society Symposium Proceedings. 1986, Vol. 61, pp. 187-195.

45. **Fiori, C. and Devine, R. A. B.** "Evidence for a wide continuum of polymorphs in a-SiO2". Physical Review B. 1986, Vol. 33, pp. 2972-2974.

46. **Bernardin, J.P. and Lawandy, N.M.** "Dynamics of the formation of Bragg gratings in germanosilicate optical fibers". Optics Communications. 1990, Vol. 79, p. 194.

47. **Rothschild, M., Erlich, D.J., Shaver, D.C.** "Effects of excimer irradiation on the transmission, index of refraction, and density of ultraviolet grade fused silica". Applied Physics Letters. 1989, Vol. 55, 13, p. 1276.

48. **Sceats, M. G. and Poole, S. B.** "Stress-relief: the mechanism of photorefractive index control in fiber cores". Sixteenth Australian Conference on Optical Fiber Technology. 1991, pp. 302–305.

49. Fonjallaz, P. Y., Limberger, H. G., Salathé, R. P., Cochet, F. and Leuemberger, B. "Tension increase correlated to refractive-index change in fibers containing UVwritten Bragg gratings". Optics Letters. 1995, Vol. 20, pp. 1346-1348.

50. **Nogueira, Rogério Nunes.** "Redes de Bragg em fibra óptica". Departamento de Física, Universidade de Aveiro. Portugal : s.n., 2005. p. 318, Tese de doutorado.

51. **Poumellec, B., Kherbouche, F.** "The Photorefractive Bragg Gratings in the Fibers for Telecommunications". Journal of Physics. 1996, Vol. 6, 12, pp. 1595–1624.

52. Lemaire, P. J., Atkins, R. M., Mizrahi, V. and Reed, W. A. "High pressure H2 loading as a technique for achieving ultrahigh sensitivity in GeO2 doped optical fibres". Electronics Letters. 1993, Vol. 29, 13, pp. 1191-1193.

53. Lemaire, P. J. "High pressure hydrogen sensitization of fibers for enhanced photosensitivity". Proceedings of Lasers and Electro-Optics Society (IEEE), LEOS '94. 1994, Vol. 2, p. 124.

54. Williams, D.L., Ainslie, B.J., Kashyap, R., Maxwell, G.D., Armitage, J.R., Campbell, R.J. and Wyatt, R. R. "Photosensitive index changes in germania-doped silica glass fibers and waveguides". Proceedings of SPIE. 1993, Vol. 2044, pp. 55–68.

55. **Maxwell, G.D., Ainslie, B.J., Williams, D.L. and Kashyap, R.** "UV written 13 dB reflection filters in hydrogenated low loss planar silica waveguides". Electronics Letters. 1993, Vol. 29, pp. 425-426.

56. **Williams, D. L., Ainslie, B. J., Armitage, J. R., Kashyap, R., Campbell, R.,.** "Enhanced UV Photosensitivity in boron codoped germanosilicate fibres". Electronics Letters. 1993, Vol. 29, pp. 45-47.

57. Bilodeau, F., Malo, B., Albert, J., Johnson, D.C., Hill, K. O., Hibino, Y., Abe, M. and Kawachi, M. "Photosensitization of Optical Fiber and silica-on-silicon/silica Waveguides". Optics Letters. 1993, Vol. 18, pp. 953-955.

58. Yeh, Pochi, Yariv, Amnon and Marom, Emanuel. "Theory of Bragg fiber". Journal Optical Society of America. 1978, Vol. 68, 9, pp. 1196-1201.

59. **Yariv, Amnon and Yeh Pochi.** "Optical Waves in Crystals". New York : John Wiley and Sons, 1984. p. 608. ISBN-10: 0471430811, ISBN-13: 978-0471430810.

60. **Yariv, A. and Nakamura, M.** "Periodic structures for integrated optics". Quantum Electronics (IEEE). 1977, Vol. 13, 4, pp. 233-253.

61. **Agrawal, Govind P.** "Nonlinear Fiber Optics". 3rd ed. San Diego, USA : Academic Press, 2001. p. 467. ISBN-10: 0120451433, ISBN-13: 978-0120451432.

62. André, Paulo Sérgio de Brito. "Componentes optoelectrónicos para redes fotónicas de alto débito". Departamento de Física, Universidade de Aveiro. Aveiro, Portugal : s.n., 2002. p. 306, Tese de doutorado.

63. **Keiser, Gerd.** "Optical Fiber Communications". 3rd ed. [S.I.] : McGraw-Hill Science, 1999. p. 624. ISBN-10: 0072360763, ISBN-13: 978-0072360769.

64. Borges, Benhur Viana, Romero, Murilo Araújo and César, Amílcar Careli. "Sensores Ópticos Integrados e a Fibra". [book auth.] Júlio César Adamowski. Sensores: Tecnologias e Aplicações. São Paulo : s.n., 2004, Vol. 1, 7.

65. Gloge, D. "Weakly guiding fibres". Applied Optics. 1971, Vol. 10, 10, pp. 2252-2258.

66. **Snyder, Allan. W. and Love, John. D.** "Optical Waveguide Theory". London : Chapman and Hall, 1983. p. 734. ISBN-10: 0-412-099500, ISBN-13: 0412242508.

67. **Marcuse, D.** "Theory of Dielectric Optical Waveguides". London : Academic Press, 1991. p. 408. ISBN-10: 0124709516, ISBN-13: 978-0124709515.

68. Buck, J. A. "Fundamentals of Optical Fibers". 2th Edition. New York : John Wiley and Sons, 2004. p. 352. ISBN-10: 0-471-22191-0, ISBN-13: 978-0-471-22191-3.

69. Erdogan, Turan. "Fiber Grating Spectra". Journal of Lightwave Technology. 1997, Vol. 15, 8, pp. 1277-1294.

70. **Sipe, J. E., Poladian, L. and Martijn de Sterke, C.,.** "Propagation through nonuniform grating structures". Journal of the Optical Society of America A. 1994, Vol. 11, 4, pp. 1307-1320.

71. **Paterno, Aleksander Sade.** "Sistemas de sensoriamento em fibra ótica - Análise e implementação com aplicações na instrumentação de processos petroquímicos". Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba : s.n., 2006. p. 140, Tese de doutorado.

72. **Oppenheim, A. V., Shafer, R. W. and Buck, R.** "Discrete-Time Signal Processing". 2nd ed. [S.I.] : Prentice Hall, 1999. p. 870. ISBN-10: 0137549202, ISBN-13: 978-0137549207.

73. **Qiu, Yue and Sheng, Yunlong.** "Fiber Bragg Grating Modeling". Center for Optics, Photonics and Laser, Laval University. Quebec, G1K 7P4, Canada : s.n., 2008. FBG Course.

74. **Poladian, L.** "Resonance mode expansions and exact solutions for nonuniform gratings". Physical Review E. 1996, Vol. 54, 3, pp. 2963-2975.

75. **Kogelnik, H.** "Filter response of nonuniform almost-periodic structures". Bell System Technical Journal. 1976, Vol. 55, pp. 109-126.

76. **Neto, Berta Maria Barbosa.** "Redes de Bragg dinamicamente reconfiguráveis para a compensação da dispersão cromática". Departamento de Física, Universidade de Aveiro. Aveiro : s.n., 2005. p. 90, Dissertação de mestrado.

77. **Rouard, M. P.,.** "Etudes des propriétés optiques des lames métalliques très minces". Annales de Physique (Paris). II, 1937, Vol. 7, pp. 291-384.

78. **Weller-Brophy, L. A. and Hall, D. G.,.** "Analysis of waveguide gratings: application of Rouard's method". Journal of Optical Society of America A. 1985, Vol. 2, 6, pp. 863-871.

79. —. "Analysis of waveguide gratings: a comparison of the results of Rouard's method and coupled-mode theory". Journal of Optical Society of America A. 1987, Vol. 4, 1, pp. 60-65.

80. **Cazo, Rogério M.** "Sistemas Interrogadores de Sensores Baseados em Grade de Bragg". Departamento de Engenharia Eletrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). São José dos Campos, Brasil : s.n., 2001. p. 118, Tese de Mestrado.

81. Elachi, C.,. "Waves in active and passive periodic structures: A review". Proceedings of the IEEE . 1976, Vol. 26, 12, pp. 1666-1698 .

82. **Peral, E., Capmany, J. and Marti, J.,.** "Iterative solution to the Gel'Fand-Levitan-Marchenko coupled equations and application to synthesis of fiber gratings". IEEE Journal of Quantum Electronics. 1996, Vol. 32, 12, pp. 2078 - 2084.

83. **Yamada, M. and Sakuda, K.,.** "Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach". Applied Optics. 1987, Vol. 26, 16, pp. 3474-3478.

84. **Neves Júnior, Paulo de Tarso.** "Análise temporal do espectro óptico em redes de Bragg em fibra". Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná : s.n., 2008. p. 137, Tese de doutorado.

85. Xu, M.G., Reekie, L., Chow, Y.T. and Dakin, J.P. "Optical in-fibre grating high pressure sensor". Electronics Letters. 1993, Vol. 29, 4, pp. 398-399.

86. **Bertholds, A. and Dändliker, R.** "Determination of the individual strain-optic coefficients in single-mode optical fibres". Journal of Lightwave Technology. 1988, Vol. 6, 1, pp. 17-20.

87. **Primak, W. and Post, D.,.** "Photoelastic constants of vitreous silica and its elastic coefficient of refractive index". Journal of Applied Physics. 1959, Vol. 30, 5, pp. 779-788.

88. **Borelli, N.F. and Miller, R.A.,** "Determination of the individual strain-optic coefficients ofglass by an ultrasonic technique". Applied Optics. 1968, Vol. 7, 5, pp. 745-750.

89. Hocker, G. B. "Fiber-optic sensing of pressure and temperature". Applied Optics. 1979, Vol. 18, 9, pp. 1445-1445.

90. Mohammad, N., Szyszkowski, W., Zhang, W. J., Haddad, E. I., Zou, J., Jamroz, W. and Kruzelecky, R.,. "Analysis and Development of a Tunable Fiber Bragg Grating Filter Based on Axial Tension/Compression". Journal of Lightwave Technology. 2004, Vol. 22, 8, pp. 2001-2013.

91. **Mencek, J.,.** "Strength and Fracture of Glass and Ceramics". Netherlands : Elsevier Science Publishers, 1992. p. 356. ISBN-10: 0444986855, ISBN-13: 978-0444986856.

92. **Carman, G. P., and Sendeckyj, G. P.,** "Review of the mecanics of the embedded optica Isensors". Journal Composites Technology Researc. 1995, Vol. 17, 3, pp. 183-193.

93. **Starodubov, D. S., Grubsky, V., and Feinberg, J.,.** "Ultrastrong fiber gratings and their applications". Proceedings of SPIE. Optical Fiber Reliability and Testing, 1999, Vol. 3848, pp. 178-185.

94. **Dong, L., Archambault, J. L., Reekie, L., J. Russell, St.P. and Payne, D.N.,** "Single pulse Bragg gratings written during fibre drawing". Electronics Letters. 1993, Vol. 29, 17, pp. 1577-1578.

95. **Costa, Rita Zanlorensi Visneck.** Produção, estabilização e caracterização de redes fotorrefrativas de período longo em fibras óticas para sensores. Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Paraná : s.n., 2009. p. 251, Tese de doutorado.

96. **Quintero, Sully Milena Mejía.** "Aplicações de Sensores a Rede de Bragg em Fibras Ópticas na Medição de pH e Deformação de Filmes Finos de Alta Dureza". Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro : s.n., 2006. p. 124, Dissertação de Mestrado.

97. Lu, P., Men, L. and Chen, Q. "Resolving cross sensitivity of fiber Bragg gratings with different polymeric coatings". Applied Physics Letters. 2008, Vol. 92, p. 171112.

98. Xu, M. G., Archambault, J. L., Reekie, L. and Dakin, J. P. "'Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors". Electronics Letters. 1994, Vol. 30, pp. 1085-1087.

99. Yoffe, G. W., Krug, P. A., Ouellette, F. and Thorncraft, D. A. "Passive temperature-compensating package or optical fiber gratings". Applied Optics. 1995, Vol. 34, pp. 6859-6861.

100. Kersey, A. D., Berkoff, T. A. and Morey, W. W. "'Fibre optic Bragg grating strain sensor with drift compensated high resolution interferometric wavelength shift detection". Optics Letters. 1993, Vol. 18, pp. 72-74.

101. Rao, Y. J., Cooper, M. R., Jackson, D. A., Pannell, C. N. and Reekie L. "Simultaneous measurement of displacement and temperature using in fibre Bragg grating base extrinsic Fizeau sensor". Electronics Letters. 2000, Vol. 36, pp. 1610-1611. 102. Kim, S., Kwon, J., Kim, S. and Lee, B. "Temperature-independent strain sensor using a chirped grating partially embedded in a glass tubeTemperature-independent strain sensor using a chirped grating partially embedded in a glass tube". Photonics Technology Letters (IEEE). 2000, Vol. 12, 6, pp. 678–680.

103. Liu, H. B., Liu, H. Y., Peng, G. D. and Chu, P. L. "Strain and temperature sensor using a combination of polymer and silica fibre Bragg gratings". Optics Communications. 2003, Vol. 219, 1-6, pp. 139-142.

104. **Tian, K., Liu, Y. and Wang, Q.** "Temperature-independent fiber Bragg grating strain sensor using bimetal cantilever". Optical Fiber Technology. 2005, Vol. 11, 4, pp. 370-377.

105. Chehura. E., James, Stephen W. and Tatam, Ralph P. "Temperature and strain discrimination using a single tilted fibre Bragg grating". Optics Communications. 2007, Vol. 275, 2, pp. 344-347.

106. **Siqueira Dias, J.A., Leite, R.L. and Ferreira, E.C.** "Electronic technique for temperature compensation of fibre Bragg gratings sensors". AEU - International Journal of Electronics and Communications. 2008, Vol. 62, 1, pp. 72-76.

107. Patrick, H.J., Williams, G.M., Kersey, A.D., Pedrazzani, J.R. and Vengsarkar, A.M. "Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination". IEEE Photon. Technol. Letters. 1996, Vol. 8, pp. 1223–1225.

108. James, S. W., Dockney, M. L. and Tatam, R. P. "Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors". Electronics Letters. 1996, Vol. 32, pp. 1133-1134.

109. **Song, M., Lee, S.B., Choi, S.S. and Lee, B.** "Simultaneous measurement of temperature and strain using two fiber Bragg gratings embedded in a glass tube". Optical Fiber Technology. 1997, Vol. 3, pp. 194–196.

110. **Fernández-Valdivielso, C., Matias, I.R. and Arregui, F.J.** "Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber Bragg grating and a thermochromic material". Sensors and Actuators A: Physical. 2002, Vol. 101, pp. 107–116.

111. Rao, Y. J., Webb, D. J., Jackson, D. A., Zhang, L. and Bennion, I. "High resolution wavelength division multiplexed in fibre Bragg grating sensor system". Electronics Letters. 1996, Vol. 32, pp. 924-925.

112. Kashyap R., Armitage, J. R., Campbell, R. J., Williams, D. L., Maxwell, G. D. and Ainslie B.,. "Light sensitive optical fibres and planar waveguides". BT Technology Journal. 1993, Vol. 11, 2, pp. 150-158.

113. **Dockney, Michael L., James, Stephen W. and Tatam, Ralph P.** "Fibre Bragg gratings fabricated using a wavelength tuneable laser source and a phase mask based interferometer". Measurement Science and Technology. 1996, Vol. 7, 4, pp. 445–448.

114. Ferdinand, P., Magne, S., Dewynter-Marty, V., Martinez, C., Rougeault, S. and Bugaud M. "Applications of Bragg grating sensors in Europe". Proceedings of the Optical Fiber Sensors Conference. 1997, Vol. 12, pp. 14-19.

115. Barbosa, C. L., Rabelo, R. C., Lisbôa, O., Almeida, V. R., Hattori, H. T. and Cazo, R. M.,. "Técnica da máscara de fase para a fabricação de grades de Bragg em fibras ópticas". Revista Científica Periódica - Telecomunicações. IX Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, 2000, Vol. 3, 2, pp. 22-26.

116. **Dyer, P. E., Farley, R. J. and Giedl, R.,.** "Analysis and application of a 0/1 order Talbot interferometer for 193 nm laser grating formation". Optics Communications. 1996, Vol. 129, 1-2, pp. 98-108.

117. **Othonos, Andreas and Lee, Xavier.** "Novel and Improved Methods of Writing Bragg Gratings with Phase Masks". Photonics Technology Letters (IEEE). 1995, Vol. 7, 10, pp. 1183-1185.

118. **Dyer, P.E., Farley R.J. and Giedl, R.** "Analysis of grating formation with excimer laser irradiated phase masks". Optics Communications. 1995, Vol. 115, 3-4, pp. 327-334.

119. **Hecht, Eugene,.** "Optics". 4th ed. [S.I.] : Addison Wesley, 2002. p. 680. ISBN-10: 0805385665, ISBN-13: 978-0805385663.

120. **Corning.** "Corning SMF-28 CPC6 - Single Mode Optical Fiber". 1999, issued: 1/99. pp. 1-4, Product information. PI1036.

121. **Advantest, Corporation.** "Q8347 - Optical Spectrum Analyzer". Japan : s.n., March 20, 1994. Operation Manual. FOE-8324212G02.

122. **Anritsu, Corporation.** "MS9710B - Optical Spectrum Analyzer". Anritsu Corporation. Japan : s.n., 2008. Operation Manual. M-W1283AE-15.0.

123. **FiberCore.** PS series - Photosensitive fiber. www.fibercore.com. [Online] [Cited: 12 10, 2010.]

http://www.fibercore.com/Portals/0/PropertyAgent/576/Files/266/PS%20Fiber.pdf.

124. Micron Optics, Inc. "Optical Strain Gage - os3100". MOI. 2008. Data sheet. 0810.1.

125. —. "Temperature Compensation Sensor - os4100". MOI. 2008. p. 2, Data sheet. 0809.2.

126. **Fiber Sensing, S/A.** "Strain Sensors - FS6200". FiberSensing – Sistemas Avançados de Monitorização, S.A. 2010. p. 2, Data sheet. 22.Jul.2010.

127. —. "Temperature Sensors - FS6300". FiberSensing – Sistemas Avançados de Monitorização, S.A. 2010. p. 2, Data sheet. 22.Jul.2010.

128. **Micron Optics, Inc.** "Optical Sensing Interrogator - sm130". Micron Optics, Inc. (MOI). 2010. p. 2, Data sheet. sm130\_0904.c\_0904.3.

129. **Micron Optics, Inc.** "Optical Sensing Interrogator - sm130". Micron Optics. 4/2008. Product Manual and Technical Reference. sm130\_manual\_Rev\_E.

130. **Fiber Sensing, S/A.** "Industrial BraggMeter - FS2100/FS2200". Fiber Sensing. 10/2010. p. 21, User Manual. version V1.7.

131. **National Instruments.** "High-Speed M Series Multifunction DAQ for USB - 16-Bit, up to 1.25 MS/s, Integrated BNC Connectivity". National Instruments. 2010. User Manual NI USB-6251 BNC.

132. Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda. "Sistema de aquisição de dados ADS2002IP e programa AqDados". Lynx. São Paulo - SP : s.n., 2009. Guia rápido de instalação e uso. H6361-M090012-A.

133. —. "AqDados 7.02 - Programa de Aquisição de Sinais". Lynx . São Paulo - SP : s.n., dezembro de 2008. p. 151, Manual do Usuário. S144U01i - revisão 9.

134. —. "AqDAnalysis 7 - Programa de Análise de Sinais". Lynx. São Paulo - SP : s.n., dezembro de 2008. p. 224, Manual do Usuário. S144U06H - revisão 8.

135. Alamino, Aparecido Camazano. EMB.326GB AT-26 Xavante. Site de Rudnei Cunha. [Online] [Cited: 04 10, 2011.] http://www.rudnei.cunha.com.br/FAB/index.html.

136. **Alcoa.** "2024 Aluminum Alloy Sheet and Plate". Alcoa Mill Products, Inc. [Online] SPD-10-036. [Cited: 09 12, 2010.] http://www.alcoa.com/mill\_products/catalog/pdf/alloy2024techsheet.pdf.

137. —. "6013 Aluminum Alloy Sheet". Alcoa Mill Products, Inc. [Online] SPD-10-009. [Cited: 09 12, 2010.] http://www.alcoa.com/mill\_products/catalog/pdf/alloy6013techsheet.pdf.

138. **Barbosa, Cássio.** Handbook | Metais & Ligas | Alumínio. InfoMet - Informações britadas, fundidas e laminadas. [Online] iMetais Ltda. [Cited: 02 15, 2011.] http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-assuntos.php?cod\_tema=10&cod\_secao=11.

139. **Cerveira, Renato Luiz Lehnert Portela.** "Caracterização experimental do comportamento mecânico sob solicitação multiaxial em junções de chapas AA2024-T3 soldadas por fricção-mistura ('FSW')". Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo : s.n., 2008. p. 150, Dissertação de Mestrado.

140. **ABAL.** O alumínio: características físicas e químicas. Associação Brasileira do Alumínio. [Online] ABAL. [Cited: 04 16, 2011.] http://www.abal.org.br/aluminio/propriedades\_mecanicas.asp.

141. **Davis, Joseph R.** "Metals Handbook Desk Edition". [ed.] ASM International Handbook Committee. Second Edition. s.l. : CRC Press, 1998. p. 2571. Vol. 1. ISBN-10: 9780871706546, ISBN-13: 978-0871706546.

142. **Kyowa.** "What's a Strain Gages - Introduction to Strain Gages". Kyowa Electronic Instruments Co., LTD. Japan : s.n., 2005. p. 16, Folder Technical. Cat. No. 107B-U53 - 03/05 ocs.

143. **Karl, Hoffmann.** "An Introduction to Measurements using Strain Gages". Germany : Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989. p. 291. Vol. 1. ASIN: B0007BSRGG.

144. **Júnior, Euler Barreto.** "Manual Prático de Extensometria". UNESP. Ilha Solteira - SP : s.n. p. 79, Manual.

145. **Spigarelli, S.** "Creep of Aluminium and Aluminium Alloys". Department of Mechanics, University of Ancona, European Aluminium Association (EAA). Ancona, Italy : s.n., 1999. p. 26, Training in Aluminium Application Technologies - Lecture 1253.

146. **Ashby, Michael F. and Frost, Harold J.** "Deformation-Mechanism Maps: The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics". 1st edition. s.l. : Pergamon Press., 1982. p. 184. Vol. 1. ISBN-10: 0080293387, ISBN-13: 978-0080293387.

147. **Cobden, Ron.** "Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys". Alcan. Banbury, UK : s.n., 1994. p. 60, Training in Aluminium Application Technologies - Lecture 1253.