

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ILDA ABE

**REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA:
PRODUÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Informática Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Hypolito José Kalinowski.

Curitiba

2004

DEDICATÓRIA

Ao Marcelo e à Monique

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e CAPES pela concessão de bolsa e apoio financeiro a este projeto.

Ao meu orientador professor Hypolito José Kalinowski, pela orientação e apoio.

Ao professor João Lemos Pinto (Universidade de Aveiro, Portugal), orientador no exterior, pelo acolhimento e apoio a este projeto.

Aos professores José Luís Santos e Orlando Frazão (Universidade de Porto, Portugal), Hugo Fragnito (IF - UNICAMP) e Carmem Lúcia Barbosa (IEAv - CTA), pela colaboração.

Aos amigos e importantes colaboradores de Portugal, professor Paulo Lopes, Rogério Nogueira, Paulo André, Antônio José, Mayra.

Aos professores do CEFET, José Luís Fabris, Carlos Cruz, Alexandre Pohl, Márcia Müller, Elizabeth Penner, Paulo Borges.

Ao Thiago, Arthur, Alexander, Ricardo, Bárbara, cujos projetos de iniciação científica fazem parte deste trabalho.

Maura, Cezar, Euclides, Juliane, pelas contribuições a este trabalho e pela amizade.

Aos amigos do laboratório, Jean, Cícero, Rosane, Meire.

Aos funcionários do CEFET-PR, representados por Ronaldo e Arlene, pela dedicação.

À Marion pelo auxílio experimental.

Aos meus pais, Minoru e Reiko, aos pais do meu esposo, Laertes e Marli, e a Elza, que sempre incentivaram os meus trabalhos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA	5
2.1 REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS	5
2.1.2 Métodos de gravação	8
2.1.3 Princípios das redes de Bragg	14
2.1.4 Sensores baseados em redes de Bragg	17
2.1.5 Caracterização das redes	19
2.2 FIBRAS ÓTICAS DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA	21
2.2.1 Características das fibras de alta birrefringência	21
2.2.2 Birrefringência e temperatura	30
2.2.3 Birrefringência e tensões transversais	30
2.2.4 Análise de tensões em fibras de alta birrefringência	32
2.2.5 Redes de Bragg gravadas em fibras de alta birrefringência	37
3 SENSORES PARA MÚLTIPLOS PARÂMETROS	41
3.1 MEDIDAS SIMULTÂNEAS	42
3.2 MEDIDAS SIMULTÂNEAS DE TENSÃO LONGITUDINAL E TEMPERATURA	43
3.2.1 Diferentes comprimentos de onda	44
3.2.2 Compensação de temperatura	45
3.2.3 Redes em fibras afiniladas	46
3.2.4 Sensores híbridos	47
3.2.5 Redes em fibras com diferentes características	48
3.2.6 Cavidade formada por redes de Bragg	50
3.2.7 Redes em fibras de alta birrefringência	53
3.3 MEDIDAS DE TENSÕES TRANSVERSAIS	56

3.4 MEDIDAS DE TENSÕES EM EIXOS MÚLTIPLOS E TEMPERATURA	59
4 GRAVAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA	63
4.1 CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA	64
4.2 CARACTERIZAÇÃO DE REDES EM FIBRAS DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA	69
4.3 CARACTERIZAÇÃO POR DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA	80
4.3.1 Deformações transversais	80
4.3.2. Deformação longitudinal	94
4.3.3 Temperatura	97
5 APLICAÇÕES DE REDES DE BRAGG EM FIBRAS DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA	103
5.1 DETERMINAÇÃO SIMULTÂNEA DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL E TEMPERATURA	105
5.2 DETERMINAÇÃO SIMULTÂNEA DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL E DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL	109
5.3 DETERMINAÇÃO SIMULTÂNEA DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL, DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL E TEMPERATURA	111
5.3.1 Redes sobrepostas	111
5.3.2 Caracterização por temperatura e deformações	115
5.3.3 Medidas simultâneas	118
5.4 DISPOSITIVO BASEADO EM REDE DE BRAGG EM FIBRA DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA PARA TELECOMUNICAÇÕES	121
6 REDE DE BRAGG EM FIBRA DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA COM DIÂMETRO REDUZIDO	125
6.1 REDE DE BRAGG EM FIBRA COM DIÂMETRO NORMAL E REDUZIDO	126
6.2 CARACTERIZAÇÃO DAS REDES POR DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL E TEMPERATURA	139
6.3 DETERMINAÇÃO SIMULTÂNEA DE TENSÃO TRANSVERSAL E TEMPERATURA COM FIBRAS DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA DE DIÂMETRO REDUZIDO	142
7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	145
TRABALHOS FUTUROS	152
PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA TESE	153
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157

LISTA DE FIGURAS

2.1	Diagrama esquemático do método interferométrico de formação externa de redes de Bragg.	10
2.2	Esquema da técnica de gravação de redes de Bragg pelo método direto utilizando uma máscara de fase.	11
2.3	Diagrama esquemático do arranjo interferométrico com máscara de fase utilizada para a gravação de redes de Bragg nas fibras.	12
2.4	Rede de Bragg uniforme gravada em uma fibra ótica monomodo e os espectros de transmissão e reflexão para uma fonte ótica de banda larga.	16
2.5	Diagrama esquemático do sistema ótico experimental para a obtenção do espectro de reflexão das redes de Bragg em fibras através de um analisador de espectros óticos e um acoplador direcional a fibra.	20
2.6	Diagrama esquemático do sistema ótico experimental para a obtenção do espectro de reflexão das redes de Bragg em fibras através de um analisador de espectros óticos e um circulador a fibra.	20
2.7	Seções transversais dos principais tipos de fibras mantedoras de polarização de alta birrefringência: (a) IEC; (b) PANDA e (c) bow tie. A figura mostra também os eixos, rápido (verticais) e lento (horizontais) das fibras.	22
2.8	Processos de fabricação das fibras de alta birrefringência: (a) colapso, (b) corrosão por gás e (c) furos.	23
2.9	Gráficos dos perfis de índice de refração para os modos de polarização X e Y e birrefringência para a fibra bow tie, ao longo dos eixos: (a) lento e (b) rápido [Loch and Heinlein, 1989].	25
2.10	Gráficos dos perfis de índice de refração para os modos de polarização X e Y e birrefringência para a fibra IEC, ao longo dos eixos: (c) lento e (d) rápido [Loch and Heinlein, 1989].	26
2.11	Padrão de batimento modal e a definição de comprimento de batimento de fibras HiBi.	28
2.12	Configuração do sistema para a determinação da birrefringência através do espectro de batimento modal.	28
2.13	Sistema de coordenadas dos eixos principais da fibra HiBi e a direção da força transversal aplicada.	31
2.14	(a) Malha de elementos finitos usada com a fibra PANDA. (b) Detalhe da malha na região do núcleo.	33
2.15	Representações das malhas utilizadas para a modelagem das fibras HiBi IEC de 125 μm de diâmetro da casca externa (a), bow tie de 125 μm (b) e bow tie de 80 μm .	34
2.16	Gráficos das curvas de deformação obtidas por FEM, para os dois eixos de polarização e aplicação de diferentes cargas sobre a fibra PANDA, segundo os ângulos de pressionamento 0° (a), 45° (b) e 90° (c).	35

2.17	Gráfico de sensibilidade à deformação pelo ângulo da carga aplicada para os eixos X e Y de uma fibra HiBi PANDA.	36
2.18	(a) Rede de Bragg em uma fibra HiBi e as coordenadas X, Y e Z. (b) Gráfico esquemático do espectro de reflexão de uma rede gravada em uma fibra HiBi, com as bandas de polarização correspondente aos eixos lento, X, e rápido, Y, da fibra.	37
2.19	Esquema para o deslocamento em comprimento de onda com o aumento da tensão axial e separação entre os picos com o aumento da tensão transversal.	40
3.1	Esquema experimental de demodulação de um sensor baseado em redes de Bragg sobrepostas para a determinação simultânea de tensão longitudinal e temperatura.	44
3.2	Configuração experimental de um sensor de tensões com compensação de temperatura em que uma parte da rede é colada sobre a placa. A diferença no comprimento de onda de Bragg após a colagem é de aproximadamente 0,4 nm.	45
3.3	Rede com gorjeio em fibra afunilada por corrosão para medidas de tensão e temperatura. A rede possui largura de banda a meia altura de 2 nm e 20 mm de comprimento e a região afunilada 25 mm com variações no diâmetro entre 125 e 78 μm [Xu et al., 1995].	47
3.4	Sensor para medidas simultâneas que utiliza dois tipos de redes em fibras, rede de Bragg e conversor de polarização [Kanellopoulos et al.,1995].	48
3.5	Esquema geométrico do sensor baseado em duas redes de Bragg gravadas em fibras com diferentes diâmetros [James et al.,1996].	49
3.6	Configuração experimental do sensor simultâneo, baseado nas diferentes sensibilidades de redes escritas em dois tipos de fibras, sílica dopada com germânio e sílica dopada com germânio e boro [Cavaleiro et al.,1999].	50
3.7	Cavidade Fabry-Perot formada por duas redes de Bragg em fibra ótica. O material de revestimento do sensor (colado sobre a cavidade) possui coeficientes de temperatura e tensão diferentes da fibra [Du et al., 1999].	51
3.8	Espectro de reflexão de um sensor GFPC. (a) Picos com mesma intensidade ($\lambda_{\text{min}} = \lambda_{\text{B}}$). (b) Picos com intensidades diferentes com aumento da tensão ou da temperatura [Du et al.,1999].	52
3.9	Espectro de reflexão do sensor GFPC com a aplicação de tensão [Du et al.,1999].	53
3.10	Espectro de transmissão de uma rede de Bragg escrita em uma fibra mantenedora de polarização PANDA [Sudo et al.,1997].	55
3.11	Desdobramento do espectro de reflexão de uma rede de Bragg gravada em uma fibra monomodo padrão (telecomunicações) em função da carga aplicada [Zhang et al., 2002].	57
3.12	Espectro de reflexão de uma rede de Bragg gravada em uma fibra birrefringente [Lawrence et al., 1999].	58
3.13	Sensibilidade à variação das bandas de polarização em função do ângulo de pressionamento [Lawrence et al., 1999].	59

3.14	Configuração do sistema de demodulação para o sensor multiparâmetros. O sensor é composto por duas redes em diferentes comprimentos de onda (1300 e 1550 nm), gravadas em uma fibra de alta birrefringência.	60
3.15	(a) Duas redes de Bragg escritas em uma fibra ótica mantenedora de polarização para a região de 1550 nm. (b) Detalhe da estrutura de pico duplo em 1550,5 nm. [Udd et al., 1996].	61
4.1	Microfotografia da seção transversal da fibra HiBi PANDA com 125 μm de diâmetro	65
4.2	Configuração experimental do sistema todo a fibra para a determinação da birrefringência através do espectro de batimento modal.	66
4.3	Espectros obtidos em relação à orientação do analisador segundo os eixos de birrefringência da fibra HiBi IEC, com o SOP linear de entrada lançado a 45° dos eixos.	67
4.4	Espectro de batimento modal para o analisador em orientação de 45° com os eixos de birrefringência.	68
4.5	Espectro de reflexão de uma rede escrita pelo método interferométrico em fibra IEC e respectivo ajuste.	70
4.6	Espectros de reflexão de uma rede escrita pelo método interferométrico em fibra PANDA e respectivo ajuste.	70
4.7	Espectro de reflexão obtido pelo processo de gravação interferométrico do CEFET - PR de uma FBG em fibra HiBi IEC e respectivo ajuste.	72
4.8	Espectros de reflexão das redes escritas pelo método da máscara de fase nas fibras IEC (∇), Panda (O) e bow tie (Δ). As linhas representam o melhor ajuste.	73
4.9	Espectros de reflexão obtidos para uma FBG em fibra HiBi IEC com comprimento curto de 1,3 mm. \square - espectro obtido com a fonte LED. O - espectro obtido com a fonte ASE.	75
4.10	Sistema experimental utilizado para a determinação do grau de polarização de uma fonte ótica. O polarizador funciona como um analisador do SOP.	76
4.11	Gráficos de variação de intensidade pela mudança de orientação do analisador, obtidos para as fontes óticas (a) ASE e (b) LED.	76
4.12	Sistemas utilizados para a caracterização de uma FBG em HiBi. com a variação do estado de polarização incidente.	77
4.13	(a) Gráficos da variação dos espectros de reflexão de uma FBG em fibra HiBi IEC com comprimento de $\sim 1,3$ mm, em função do estado de polarização (SOP) da luz incidente. (b) Curvas de intensidade obtidas para cada uma das bandas de polarização com a mudança de orientação do SOP de entrada.	78
4.14	Bandas de polarização do espectro de reflexão de uma rede de Bragg em fibra de alta birrefringência IEC, com comprimento de 10 mm, em função do estado de polarização da luz incidente.	79

4.15	Configuração do sistema ótico de aquisição e de aplicação de tensões transversais sobre a rede. O detalhe mostra o esquema da seção transversal da fibra HiBi, para uma força aplicada F sobre um ângulo de pressionamento φ .	81
4.16	Configuração mecânica para a aplicação de tensões transversais sobre a rede.	82
4.17	Espectros de reflexão de uma FBG em fibra IEC curta em função das cargas aplicadas.	83
4.18	Variação dos picos das bandas desdobradas devido à aplicação das cargas.	84
4.19	Sistema experimental para a aplicação de cargas transversais e rotacionadores laterais para o posicionamento angular das fibras HiBi.	85
4.20	Esquerda: Variações espectrais para direções particulares de aplicação de força: (a) a 0° (eixo X); (b) a 45° e (c) a 90° (eixo Y). Direita: Dependência do comprimento de onda de Bragg com a magnitude da carga segundo aquelas direções de aplicação.	86
4.21	Curvas de sensibilidade para uma FBG em fibra HiBi IEC, do deslocamento espectral de cada banda de polarização, X e Y, induzido por carga aplicada nas diferentes direções.	87
4.22	Variações no espectro de reflexão de uma FBG em fibra IEC em função da carga transversal aplicada ($\varphi = 0^\circ$).	88
4.23	Retas de calibração com a deformação para as bandas X e Y. Os pontos das curvas Y1 e Y2 são para a evolução dos picos desdobrados da banda Y. Os gráficos da figura mostram também as retas de melhor ajuste aos dados experimentais.	89
4.24	Sistema de pressionamento baseado em um piezoelétrico. Comprimento de deformação 2,3 mm.	91
4.25	Bandas de reflexão de uma FBG em fibra bow tie de 10 mm de comprimento com o pressionamento em apenas uma parte da extensão, 2,3 mm, para os estados de polarização linear de entrada alinhados a: (a) 45° e (b) a 0° .	92
4.26	(a) Evolução espectral das bandas de reflexão de uma FBG de ~ 1 mm em fibra HiBi IEC com o pressionamento. (b) Valores do comprimento de onda de pico das bandas de reflexão e curvas obtidas após a pré-carga com o aumento da tensão elétrica no piezoelétrico. Os pontos das curvas Y1 e Y2 são para a evolução dos picos de desdobramento.	93
4.27	Sistema mecânico para a análise de deformações longitudinais em relação às forças aplicadas nas FBG em fibras HiBi.	94
4.28	Desdobramento espectral das bandas de polarização de uma FBG em fibra HiBi IEC em função da força longitudinal imposta.	95
4.29	Sistema mecânico baseado em posicionadores micrométricos para a análise de deformações longitudinais nas FBG em fibras HiBi.	95
4.30	(a) Variação espectral das bandas de reflexão de uma FBG em fibra HiBi com a deformação longitudinal. (b) Curvas de sensibilidade à deformação longitudinal.	96

4.31	(a) Detalhe do sistema mecânico para aplicações de cargas transversais e o suporte com as células termoeletricas para a variação de temperatura ou manter uma temperatura constante. (b) e (c) Diagrama esquemático de aplicação das cargas.	98
4.32	Variações no espectro de reflexão de uma FBG em fibra IEC em função da mudança de temperatura	99
4.33	Retas de calibração para a posição do comprimento de onda de pico com a temperatura para as bandas X e Y.	100
5.1	Sistema empregado para as análises de multiparâmetros.	104
5.2	Conjunto experimental elaborado para analisar o emprego das FBG em fibras HiBi como sensores simultâneos de múltiplos parâmetros. Cargas transversais são impostas nas fibras HiBi através do “scratch-test”, a mudança de temperatura é realizada por células termoeletricas e tensões longitudinais são aplicadas por microposicionadores laterais.	105
5.3	Espectros óticos de reflexão da estrutura com duas redes de Bragg superpostas em fibra HiBi IEC. As redes foram gravadas usando diferentes máscaras de fase.	112
5.4	Espectro de reflexão de um par de FBG em fibra IEC com incidência de luz polarizada. Linha pontilhada: luz polarizada ao longo do eixo lento (X); linha contínua: polarização ao longo do eixo rápido (Y).	113
5.5	Espectro de reflexão de um par de FBG em fibra bow tie com incidência de luz polarizada ao longo de uma direção arbitrária em relação aos eixos principais da fibra.	114
5.6	Dependência dos comprimentos de onda de pico com a deformação transversal para as bandas de reflexão da estrutura composta por duas FBGs, para a direção de aplicação de carga a 90°. As curvas mostram os dados experimentais para as bandas de polarização X (∇) e Y (\triangle) e as linhas de melhor ajuste.	116
5.7	Variação em comprimento de onda dos picos das bandas de polarização em função da deformação longitudinal nas FBGs sobrepostas. Pontos experimentais para as bandas de X (∇) e Y (\triangle) e as linhas de melhor ajuste.	117
5.8	Curvas dos dados experimentais de variação em comprimento de onda dos picos em função da temperatura, para as bandas de polarização X (∇) e Y (\triangle) e das linhas de melhor ajuste, para as FBGs sobrepostas.	117
5.9	Diagrama da configuração do anel do sistema BOP-FWM que utiliza redes em fibras HiBi como duas bombas ortogonais.	121
5.10	Espectro ótico de um sistema a fibra em que uma rede gravada em fibra HiBi atua como um conversor de comprimento de onda.	122
5.11	Eficiência de conversão do sinal convertido quando o sinal de entrada é deslocado em comprimento de onda ao longo de uma das bombas.	123
6.1	Espectro de reflexão de FBGs em fibras bow tie. Linha contínua: fibra com 80 μm de diâmetro. Linha pontilhada: fibra com 125 μm de diâmetro.	126
6.2	Diâmetro da fibra HiBi IEC em função do tempo de exposição ao ácido hidrófluídrico em concentração de 20 %.	128

6.3	Espectro de reflexão de uma FBG em fibra IEC de diâmetro reduzido, 82 μm (linha contínua), comparada ao de uma fibra com diâmetro normal, 125 μm (linha pontilhada). A fibra HiBi foi atacada por ácido hidrófluorídrico com concentração de 40 %.	129
6.4	Microfotografias das seções transversais de fibras HiBi IEC comercial (a) com 125 μm de diâmetro e, após o ataque químico, (b) diâmetro reduzido para 100 μm e (c) para 86 μm .	131
6.5	Evolução das bandas de reflexão de uma rede de Bragg gravada em fibra HiBi IEC, em função do tempo de exposição. HF com 20 % de concentração.	132
6.6	Posição dos picos das bandas de polarização X e Y de uma FBG em fibra HiBi IEC, em função do diâmetro da fibra, reduzido por corrosão química com HF a 20 %. No gráfico estão indicados os pontos dos resultados experimentais (∇ - polarização Y e Δ - polarização X) e as linhas da regressão linear. Os coeficientes angulares das linhas de melhor ajuste são: 1,24 pm/ μm para a banda de polarização X e -0,23 pm/ μm para a banda de polarização Y.	134
6.7	Birrefringência de fibras IEC em função do diâmetro externo. As corrosões foram realizadas em duas fibras HiBi com diferentes concentrações de HF: ∇ - 40 % e Δ - 20 %.	134
6.8	Microfotografias das seções transversais de fibras HiBi bow tie comercial (a) com 125 μm de diâmetro e após o ataque químico, (b) diâmetro reduzido de 110 μm .	135
6.9	Diâmetro da fibra HiBi bow tie em função do tempo de exposição ao ácido hidrófluorídrico em concentração de 20 %.	136
6.10	Evolução das bandas de reflexão de uma rede de Bragg gravada em fibra HiBi bow tie, em função do tempo de exposição. Ataque realizado com HF em concentração de 20 %.	137
6.11	Posição dos picos das bandas de polarização X e Y de uma FBG em fibra HiBi bow tie, em função do diâmetro da fibra, reduzida por corrosão química com HF a 20 %. Δ - indicam os dados experimentais obtidos para a banda de polarização X e ∇ - para a polarização Y.	138
6.12	Birrefringência de fibras bow tie em função do diâmetro da casca externa. A corrosão foi realizada com a fibra em ácido HF em concentração de 20%.	138
6.13	Dependência do comprimento de onda de Bragg das bandas de polarização, Y (\square) e X (O), com a magnitude da carga aplicada. As linhas representam o melhor ajuste segundo as direções de aplicação de carga: linha pontilhada - 90° e linha sólida - 0°.	139
6.14	Curvas dos dados experimentais de variação em comprimento de onda dos picos em função da temperatura, para as bandas de polarização Y (\square) e X (O). As linhas representam o melhor ajuste.	140

LISTA DE TABELAS

2.1	Valores de tensão σ e deformação ε obtidos através da análise por elementos finitos, para diferentes cargas aplicadas na compressão da fibra HiBi PANDA, para o ângulo $\varphi = 0^\circ$.	35
4.1	Modelos das fibras de alta birrefringência e respectivos fabricantes	64
4.2	Principais dimensões das fibras HiBi obtidos através das microfotografias	65
4.3	Valores de birrefringência de fibras HiBi obtidos através do período de batimento modal e os valores de birrefringência descritos nos catálogos dos fabricantes.	69
4.4	Parâmetros das FBGs curtas escritas em fibras de alta birrefringência pelo método interferométrico obtidos para o melhor ajuste aos espectros experimentais.	71
4.5	Parâmetros das FBGs longas escritas em fibras HiBi pelo método da máscara de fase, obtidos com o melhor ajuste aos espectros experimentais.	74
4.6	Birrefringência de fibras HiBi determinadas pelo melhor ajuste do espectro para redes longas, B_{LG} , e para redes curtas, B_{SG} .	74
4.7	Dependência do comprimento de onda dos picos das bandas de reflexão de FBGs longas em fibras HiBi IEC de $125 \mu\text{m}$ e PANDA de $125 \mu\text{m}$ com a direção de força aplicada e a respectiva sensibilidade à deformação.	90
4.8	Tabela com os valores dos coeficientes angulares e das sensibilidades às deformações, obtidos pelos gráficos de variação dos comprimentos de onda das bandas de polarização com a deformação longitudinal, para a rede gravada na fibra de alta birrefringência IEC de $125 \mu\text{m}$.	97
4.9	Tabela com os valores dos coeficientes angulares para a variação dos comprimentos de onda de pico das bandas de polarização em função de temperatura, para as FBGs gravadas nas fibras de alta birrefringência IEC, PANDA e bow tie de $125 \mu\text{m}$ e bow tie de $80 \mu\text{m}$.	100
5.1	Resultados das medidas simultâneas de temperatura e deformação transversal, obtidas através dos espectros de reflexão da FBG em fibra HiBi IEC. Os valores em negrito de temperatura (primeira linha) e deformação transversal (primeira coluna), foram ajustados pelos equipamentos em uso.	107
5.2	Resultados das medidas simultâneas de temperatura e deformação transversal, obtidas com a FBG em fibra HiBi PANDA. Mesmos detalhes da tabela 5.1	109
5.3	Resultados das medidas simultâneas de deformação longitudinal e deformação transversal obtidas com a FBG em fibras HiBi IEC.	111

5.4	Coefficientes angulares para a dependência dos comprimentos de onda das bandas de polarização com temperatura, deformação transversal e deformação longitudinal, obtidos das curvas de calibração para a estrutura sobreposta em fibra HiBi IEC, com cargas aplicadas ao longo do eixo Y.	118
5.5	Resultados das medidas simultâneas de temperatura e deformação transversal e deformação longitudinal, obtidas com as FBG sobrepostas em fibras HiBi IEC. Os valores impostos para medição foram determinados pelos equipamentos usados na montagem..	120
6.1	Birrefringência das fibras HiBi obtidas para as FBGs utilizadas	127
6.2	Coefficientes de sensibilidade à temperatura e deformação obtidas para a fibra IEC corroída pelo ácido fluorídrico e aqueles obtidos em fibras comerciais, bow tie de 80 μm e IEC de 125 μm .	141
6.3	Medidas simultâneas de temperatura e deformação transversal, obtidas com a FBG em fibra HiBi IEC corroída (diâmetro 82 μm).	142

LISTA DE ALGUMAS ABREVIATURAS E SIGLAS

HiBi	(<i>High Birefringence</i>) Alta birrefringência
FBG	(<i>Fiber Bragg Grating</i>) Rede de Bragg em fibra ótica
IEC	(<i>Internal Elliptical Cladding</i>) Fibra de casca interna elíptica
PANDA	(<i>Polarization maintaining AND Absorption reducing</i>) Fibra mantenedora de polarização com redução de absorção
ASE	(<i>Amplified Spontaneous Emission</i>) Emissão espontânea amplificada
LED	(<i>Light Emitting Diode</i>) Diodos emissores de luz
OSA	(<i>Optical Spectrum Analyzer</i>) Analisador de espectros óticos
WDM	(<i>Wavelength Division Multiplexers</i>) Multiplexadores por divisão de comprimento de onda
FWFZ	(<i>Full Width Full Zero</i>) Largura de banda zero a zero
FWHM	(<i>Full Width Half Maximum</i>) Largura de banda a meia altura
EDFA	(<i>Erbium-doped Fiber Amplifier</i>) Amplificador ótico de fibra dopada com érbio

RESUMO

A produção e a caracterização de redes de Bragg em fibras óticas de alta birrefringência é descrita neste trabalho. A birrefringência é determinada pela dependência do comprimento de batimento com o comprimento de onda e pelas bandas de reflexão das redes de Bragg, para três tipos mais comuns de fibras de alta birrefringência (PANDA, bow tie e casca interna elíptica). A caracterização das redes quando submetidas a deformações longitudinais e transversais e temperatura é relatada. A dependência da birrefringência para fibras bow tie e de casca interna elíptica é também determinada em função do diâmetro externo da fibra ótica. Resultados do uso das redes em fibras de alta birrefringência para medir simultaneamente dois dos parâmetros acima mencionados são apresentados. Estruturas consistindo de duas redes escritas na mesma região foram também produzidas e sua aplicação à medida simultânea de três parâmetros é descrita.

ABSTRACT

We report results concerning the production and characterization of Bragg gratings in high birefringence optical fibers. Birefringence is measured by the wavelength dependence of the beat length, and from the Bragg grating reflection bands, for three common high birefringence fibers (PANDA, bow tie, internal elliptical cladding). Characterization of the gratings when subjected to longitudinal and transversal strain, and temperature, is described. The dependence of the intrinsic birefringence for bow tie and internal elliptical cladding fibers is also determined as a function of the external diameter of the optical fiber. Results of using the gratings in high birefringence fibers to measure, simultaneously, two of the above parameters are described. Structures consisting of two gratings written at the same spot are also produced, and their application to the simultaneous measurement of three parameters is reported.

Capítulo 1

Introdução

As áreas de comunicações e sensores tiveram uma grande evolução a partir da segunda metade do século passado, com o desenvolvimento das fibras óticas de baixas perdas, a invenção do laser nos anos 60 e os avanços na tecnologia de dispositivos óticos como as fontes e fotodetectores baseados em semicondutores, componentes realizados em fibras óticas e outros, a partir da década de 70.

Nessa época ocorreu grande desenvolvimento dos sensores a fibra ótica [Giallorenzi *et al.*, 1982; Culshaw & Dakin, 1996; Dakin & Culshaw, 1988], principalmente após a descoberta da fotossensibilidade das fibras óticas em 1978 [Hill *et al.*, 1978], com a formação de um dispositivo intrínseco a fibra, a rede de Bragg (FBG). Desde então, diversos trabalhos têm sido publicados baseados em redes de Bragg em fibras e suas aplicações. [Kersey *et al.*, 1997; Othonos, 1997].

As redes de Bragg são elementos intrínsecos que podem ser gravadas em fibras de sílica, pela mudança periódica do índice de refração do núcleo e possuem todas as vantagens normalmente relacionadas aos dispositivos a fibras óticas como imunidade à interferência eletromagnética, flexibilidade, baixo peso, pequenas dimensões e capacidade de sensoriamento remoto [Kashyap, 1999; Othonos e Kalli, 1999]. A possibilidade de medidas distribuídas é também um fator de grande importância, pois

um grande número de redes poderia ser multiplexado em uma mesma fibra, reduzindo o volume do cabeamento utilizado.

O sensoriamento de deformações em engenharia de estruturas pode levar a um melhor entendimento sobre o tempo de vida e falhas. Porém, tais conhecimentos podem ser críticos em algumas aplicações como, por exemplo, chapas finas em aeroplanos e veículos aeronáuticos. Nestas áreas o número necessário de sensores pode restringir o uso de transdutores convencionais, tais como extensômetros elétricos, onde a utilização de cabos elétricos não é apropriada, devido ao seu volume e peso.

Sensores a fibra ótica poderiam ser utilizados nessas aplicações. Entretanto, os sensores baseados em redes de Bragg geralmente consistem de uma única rede escrita em fibras óticas padrão (comunicações). O deslocamento em comprimento de onda do pico do espectro refletido destes sensores pode ser usado para medir uma única componente de tensão (normalmente longitudinal) ou a variação na temperatura, mas não ambos simultaneamente. Em medidas de tensão longitudinal, variações na temperatura ou tensões transversais implicam em erros nas medidas [Kersey *et al.*, 1997]. Essa é uma das limitações das redes de Bragg: a sua dupla sensibilidade à temperatura e à tensão. Tensão e temperatura não podem ser determinadas separadamente apenas pela medida do deslocamento em comprimento de onda de um único sensor com rede de Bragg.

Existem diversas aplicações de redes de Bragg (ciências de materiais, compósitos, aeronaves, biomecânica, estruturas civis...) onde o conhecimento da tensão ao longo de todos os eixos principais do material é necessário, envolvendo a medida experimental de ambas as componentes de tensão longitudinal e transversal. Tais medidas podem ser feitas usando diversas redes alinhadas ao longo dos três eixos perpendiculares, mas as dimensões do sistema, sua influência no material onde está inserido e a complexidade associada a demodulação restringem o uso a apenas algumas aplicações. Um único sensor capaz de determinar todas as três componentes de tensão é uma necessidade experimental nestas áreas.

Muitas aplicações propostas de sensores embutidos, como estruturas muito pequenas, monitoração de processos de fabricação, etc., podem se beneficiar com um

sensor capaz de medidas simultâneas de temperatura além de componentes múltiplas de tensão. Em geral, todas as componentes de um estado de tensão e a temperatura não são conhecidas e diversos sensores individuais orientados em diferentes direções seriam necessários para medir todos os parâmetros além daqueles ligados à compensação térmica. Um sensor a fibra ótica para parâmetros múltiplos (três eixos de tensão e temperatura) poderia reduzir o número de sensores requeridos, resultando numa tecnologia potencialmente mais barata e mais aplicável.

Fibras óticas com alto desempenho polarimétrico, baseadas principalmente nas fibras mantedoras de polarização de alta birrefringência (HiBi), propiciaram o desenvolvimento de novos sensores e sistemas de comunicações coerentes. FBGs escritas em fibras HiBi tem sido descritas na literatura como sensores de tensão longitudinal e temperatura, algumas vezes simultaneamente, devido às diferentes sensibilidades a essas grandezas, associadas aos eixos de birrefringência da fibra [Sudo *et al.*, 1997; Araújo *et al.*, 1999; Urbanczyk *et al.*, 2001]. Por causa da anisotropia dessas fibras, diferentes sensibilidades também são obtidas com deformações transversais [Lawrence *et al.*, 1999].

O objetivo geral deste trabalho é o estudo, desenvolvimento e aplicações de redes de Bragg escritas em fibras óticas de alta birrefringência aplicáveis em sensores para parâmetros múltiplos. A vantagem desse sistema é a utilização de um único sensor para determinação simultânea de diversos parâmetros. FBGs em fibras HiBi podem ser usadas para obter componentes de tensão transversal, além da tensão longitudinal e da temperatura. A escolha e a otimização das características das fibras HiBi podem levar a um melhor desempenho de um dispositivo baseado em redes de Bragg.

Os princípios básicos relacionados às redes de Bragg e às fibras de alta birrefringência estão descritos no capítulo 2. A descrição dos principais tipos de fibras HiBi e os métodos de gravação das redes de Bragg utilizados nessa pesquisa são apresentados. As características associadas e a resposta espectral de redes de Bragg gravadas nestas fibras e o princípio de operação de sensores baseados em redes são detalhados nesse capítulo.

O capítulo 3 contém uma revisão dos principais sistemas para medidas simultâneas de tensão longitudinal e temperatura, medidas de tensões transversais e ao longo de múltiplos eixos baseados em redes de Bragg em fibra ótica.

Os resultados experimentais obtidos com as gravação e caracterizações das redes em fibras HiBi são apresentados no capítulo 4. Inicialmente, são analisadas as caracterizações das fibras de alta birrefringência e as diferentes respostas espectrais obtidas com FBGs gravadas nas diversas fibras. As sensibilidades distintas obtidas com esses dispositivos por variações de grandezas externas como temperatura e deformações estão contidas nesse capítulo.

As respostas obtidas com as aplicações simultâneas das FBGs em fibras HiBi são apresentados no capítulo 5.

No capítulo 6 é exposto o estudo comparativo realizado com redes gravadas em fibras HiBi de diâmetro externo normal e reduzido. Com esse estudo também foi possível obter informações qualitativas sobre a estrutura intrínseca das fibras HiBi.

Conclusões, comentários e sugestões deste trabalho são apresentados no capítulo 7.

Capítulo 2

Redes de Bragg em fibras óticas de alta birrefringência

Redes de Bragg em fibras óticas têm sido amplamente estudadas nas últimas décadas, quanto aos aspectos materiais das fibras, fotossensibilidade e os defeitos relacionados; quanto aos tipos de redes e métodos de gravação e quanto às aplicações em telecomunicações e como sensores. Uma coletânea de trabalhos pode ser encontrada na literatura [vide, por exemplo, Kashyap, 1999; Othonos and Kalli, 1999; Erdogan, 1997].

Alguns dos aspectos mais importantes sobre as redes de Bragg, relevantes para este trabalho, são descritos nas próximas seções.

2.1 Redes de Bragg em fibras óticas

A descoberta da fotossensibilidade das fibras foi realizada pelo grupo de pesquisa do Communication Research Center (Canadá) em 1978 [Hill *et al.*, 1978].

O experimento (inicialmente, para estudos de efeitos não-lineares) acoplava a luz de um laser de argônio (488 nm) em uma fibra de sílica dopada com germânio e formava com o feixe refletido na outra extremidade (4% devido à reflexão de Fresnel) um padrão de interferência estacionário fraco. Nos pontos de interferência construtiva houve alteração permanente do índice de refração do núcleo da fibra e esta perturbação possuía a mesma periodicidade do padrão de interferência. A rede gerada atua como um refletor distribuído, acoplando a luz em propagação direta com modos contrapropagantes. O acoplamento modal produz realimentação positiva da luz, aumentando a intensidade do feixe refletido e aumentando a variação no índice de refração do núcleo até a saturação na intensidade da luz refletida. Esse processo resulta em um aumento na atenuação da fibra e um aumento na intensidade da luz refletida. Lam e Garside [1981] demonstram que a modulação do índice de refração aumenta com o quadrado da potência de gravação indicando que o processo é um fenômeno de dois fótons. Embora o processo acima descrito possa ser repetido em outros comprimentos de onda, aquela técnica de gravação (interna) de redes, posteriormente chamadas de redes de Bragg, está limitada ao comprimento de onda de emissão do laser de gravação. Esse método não permite a fabricação de redes com diferentes comprimentos de onda de ressonância, por exemplo, na região do infravermelho, região de interesse para telecomunicações.

A primeira técnica externa de formação de redes de Bragg em fibras óticas (técnica interferométrica) foi demonstrada uma década depois, por Meltz *et al.* [1989]. Era esperado que a modificação do índice de refração por luz UV, através de processo de um fóton, fosse mais eficiente. Os trabalhos realizados pelo grupo mostraram que grandes variações no índice de refração ocorrem quando fibras dopadas com germânio são expostas à luz ultravioleta (UV) próxima ao pico de absorção da vacância de oxigênio no germânio fotoativado, numa faixa de 240 nm a 250 nm. A fibra é irradiada externamente, gravando no núcleo da fibra um padrão de interferência, pois a casca não contém germânio e é transparente à radiação UV.

A flexibilidade na formação de redes a partir deste método e a possibilidade de fabricação de redes na faixa do infravermelho impulsionaram pesquisas para sua produção e aplicação, tanto na área de comunicações óticas como na de sensores. Outras técnicas, como o uso de máscara de fase, impulsionaram ainda mais a pesquisa e aplicações de redes de Bragg.

A fotossensibilidade das fibras pode ser entendida como uma medida da variação permanente que pode ser induzida no índice de refração do núcleo após a exposição ao UV. Essas mudanças dependem das características do material da fibra, da luz da fonte ótica de incidência e de alguns processos de preparação da amostra. A fotossensibilidade tem sido amplamente estudada com o emprego de métodos baseados em diferentes tipos de fontes óticas e fibras com diferentes dopantes [Othonos and Kalli, 1999].

São vários os tipos de defeitos associados à incorporação de átomos de Ge na fibra de sílica. Um dos principais responsáveis pela fotossensibilidade das fibras dopadas com germânio é o defeito do tipo GeO, que ocorre quando o átomo de Ge está ligado a três átomos de oxigênio e uma ligação com um átomo de Si ou Ge. Esse defeito é caracterizado por uma banda de absorção em 240 nm e sua presença na matriz vítrea normalmente aumenta com a concentração de Ge. Um segundo defeito importante é o GeO₂, que surge quando um átomo de Ge substitui um átomo de Si na estrutura do vidro, apresentando uma banda de absorção em 195 nm. Outros defeitos também estão relacionados às mudanças do índice de refração, porém o mecanismo físico responsável pela gravação não é ainda totalmente compreendido [Kashyap, 1999]. Para uma fibra padrão (telecomunicações) a mudança no índice de refração do núcleo, depois da exposição à luz UV, é de 3×10^{-5} , para aproximadamente 3% molar de GeO₂, até valores próximos a $2,5 \times 10^{-4}$, para aproximadamente 20% molar de GeO₂ [Kashyap, 1999].

Lemaire *et al.* [1993] propuseram uma técnica para aumentar a fotossensibilidade das fibras, a hidrogenação. O processo de hidrogenação é a difusão de moléculas de hidrogênio para o núcleo das fibras por alta pressão e

temperatura. Essa técnica resulta em mudanças no índice de refração maiores que 0,01 após a exposição à radiação UV.

Uma das principais vantagens da hidrogenação é que esse processo permite a produção de redes em fibras de germânio/silício, incluindo fibras de telecomunicações padrão, que tem normalmente baixa concentração de germânio e, portanto, baixa fotossensibilidade [Othonos, 1997]. De acordo com Lemaire *et al.* [1993], consegue-se um aumento da fotossensibilidade da fibra submetendo-a a hidrogênio sob alta pressão (20 atm - 750 atm), com a temperatura entre 20°C e 75°C durante vários dias.

Todas as fibras de alta birrefringência utilizadas neste trabalho para a inscrição das redes foram previamente hidrogenadas, com o objetivo de obter o aumento da fotossensibilidade, através de diferentes configurações estruturais de sistemas de hidrogenação, pertencentes ao CEFET-PR, Centro Tecnológico de Aeronáutica, Universidade de Aveiro e Universidade do Porto. Os parâmetros utilizados para a hidrogenação das fibras HiBi nesses sistemas foram baseados nos mesmos parâmetros empregados nas fibras monomodo padrão de telecomunicações [vide, por exemplo, Kashyap, 1999; Othonos and Kalli, 1999; Lemaire *et al.*, 1993]. Os valores aplicados nos diferentes sistemas são de pressão entre 100 e 150 atm, sob temperatura ambiente, por um período superior a 7 dias. Esses valores não puderam ser controlados com rigor, devido a não realização desse processo em um único centro de pesquisa, assim o tempo de exposição das fibras ao hidrogênio dependeu das condições técnicas de trabalho (viagem, período disponível dos laboratórios e materiais, pesquisadores, etc).

2.1.2 Métodos de gravação

Duas técnicas foram empregadas para a gravação das redes deste trabalho: o método direto por máscara de fase e o método interferométrico com máscara de

fase. Esta última é uma combinação de duas técnicas principais, a da máscara de fase e a interferométrica. As técnicas e os arranjos experimentais dos sistemas de gravação das redes que foram utilizados neste projeto são descritos nesta seção. Porém, outras variações desses métodos têm sido demonstradas com o objetivo de gravar redes com características diferentes, como as redes apodizadas, inclinadas ou com gorjeio [Hill *et al.*, 1997, Othonos, 1997, Kashyap, 1999]. É preciso ressaltar que neste trabalho foram gravadas redes em sistemas existentes (CEFET-PR, Centro Tecnológico de Aeronáutica e Universidade do Porto) bem como houve a participação na montagem do interferômetro com máscara de fase no Departamento de Física da Universidade de Aveiro - Portugal.

Basicamente, no processo de gravação interferométrico (vide figura 2.1) a luz ultravioleta (UV) de um laser é dividida em dois feixes de intensidades iguais e é recombinada, posteriormente, para a formação do padrão de interferência no núcleo da fibra. O período da rede de Bragg, Λ , que é idêntico ao período do padrão das franjas de interferência, depende do comprimento de onda da radiação ultravioleta, λ_{UV} , e da metade do ângulo entre os feixes UV interferentes, $\theta/2$. O período da rede é dado por:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2\text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2.1)$$

Os valores do ângulo entre os feixes interferentes, θ , e o comprimento de onda da fonte, λ_{UV} , podem ser ajustados para que a rede de Bragg apresente reflexão em comprimentos de onda específicos. Na prática a fonte de luz tem comprimento de onda definido, de modo que o ângulo θ governa o período da rede.

A principal desvantagem do processo interferométrico é sua dependência com o comprimento de onda da fonte usada. Fontes mais estáveis são requeridas para obter redes de grande eficiência.

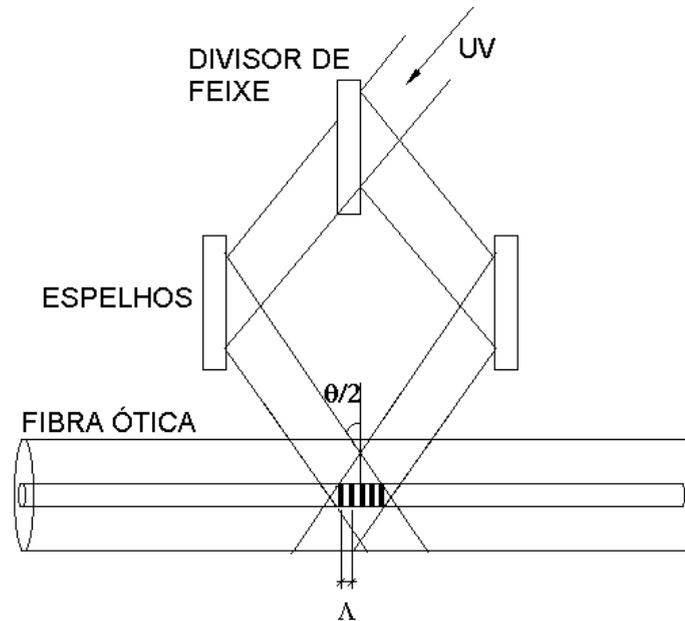


Figura 2.1 – Diagrama esquemático do método interferométrico de formação externa de redes de Bragg.

Outro processo externo de gravação de redes de Bragg em fibras é a técnica da máscara de fase. Uma máscara de fase é um elemento óptico difrator dielétrico. Um feixe de laser UV incidente na máscara de fase grava no núcleo da fibra óptica, posicionada atrás da máscara, o padrão de interferência oriundo dos feixes difratados por ela. Com a incidência normal da radiação UV sobre a máscara de fase, os feixes principais difratados pela máscara correspondem às ordens $m = \pm 1$, como mostra o diagrama da figura 2.2. O padrão de interferência desses dois feixes, sobre a fibra tem um período, Λ , em função do ângulo de difração, $\theta_m/2$, dado por:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2\text{sen}\left(\frac{\theta_m}{2}\right)} = \frac{\Lambda_{pm}}{2} \quad (2.2)$$

onde Λ_{pm} é o período da máscara de fase.

Uma das vantagens desse processo é que o período da rede gravada não depende do comprimento de onda incidente sobre a máscara, apenas do período da máscara de fase.

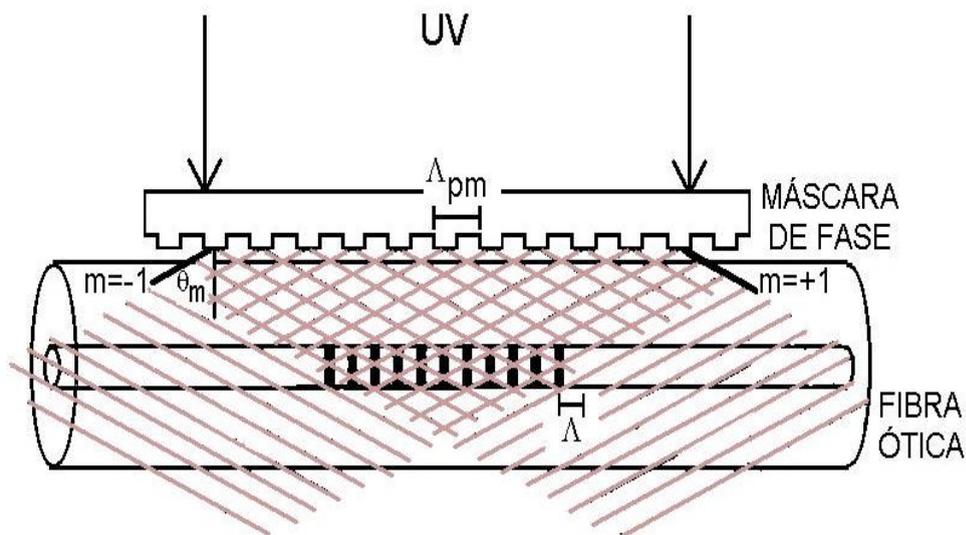


Figura 2.2 – Esquema da técnica de gravação de redes de Bragg pelo método direto utilizando uma máscara de fase.

A figura 2.3 mostra a configuração do sistema interferométrico com máscara de fase. Nessa técnica a máscara de fase é usada como divisor de feixe no interferômetro de inscrição das redes. A máscara pré-define o comprimento de onda de reflexão da rede [Kashyap, 1999]. O feixe de radiação UV ao atravessar a máscara é difratado em direções simétricas com a mesma potência. Após a reflexão nos espelhos, os feixes se recombinaem, gerando um padrão de interferência sobre o núcleo da fibra onde é formada a rede. Feixes laser contínuos possuem uniformidade espacial e redes de grande reprodutibilidade podem ser escritas por este método [Othonos, 1997; Culshaw, 1996].

O espaçamento entre as franjas de interferência depende do comprimento de onda do laser, do período da máscara de fase e do ângulo entre os feixes interferentes [Kashyap, 1999]:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{\theta_m}{2} + \theta\right)} = \frac{\lambda_{UV}}{2 \operatorname{sen}\left[\arcsen\left(\frac{\lambda_{UV}}{\Lambda_{pm}}\right) + \theta\right]} \quad (2.3)$$

Com esse tipo de montagem é possível alterar o período das redes através da variação do ângulo entre os espelhos. Apenas uma pequena variação do ângulo nos espelhos é necessária para obter uma variação considerável no período da rede [Kashyap, 1999]. A correção do ponto focal do padrão de interferência pode ser realizada através da translação da fibra em relação à máscara de fase.

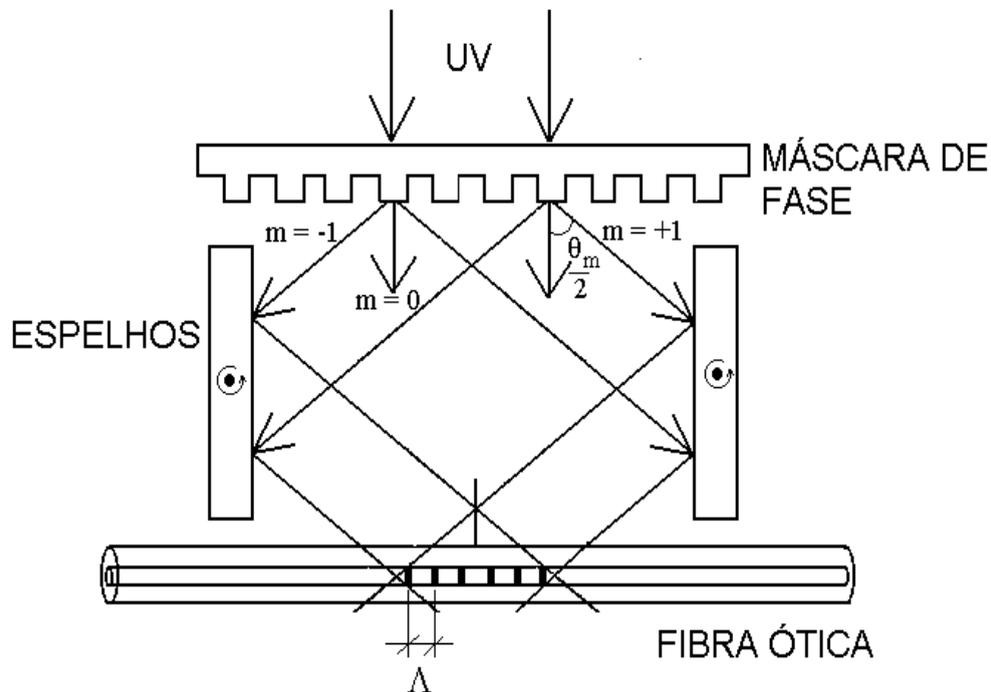


Figura 2.3 – Diagrama esquemático do arranjo interferométrico com máscara de fase utilizada para a gravação de redes de Bragg nas fibras.

Três arranjos baseados no método interferométrico com máscara de fase foram empregados para a gravação das redes neste projeto.

O primeiro arranjo para a gravação das redes foi o interferômetro com máscara de fase que utiliza uma fonte de onda contínua, laser de Argônio com dobrador de frequência para UV (257 nm) (IEAv – Centro Tecnológico de Aeronáutica) [Barbosa *et al.*, 2000]. Os comprimentos das redes escritas com este arranjo estimados a partir da área do feixe de gravação são de 1,0 - 1,3 mm.

O sistema na configuração interferômetro de Talbot do Departamento de Física da Universidade de Aveiro utiliza um laser de onda contínua de Argônio com um cristal dobrador de frequências intracavidade (244 nm). O período da máscara de fase nesse sistema é de 1053,9 nm.

A montagem utilizada na gravação de redes no Laboratório de laser do CEFET – PR utiliza um interferômetro de Talbot com fonte de radiação laser Nd:YAG e dois cristais dobradores de frequência para operar em 266 nm, com uma máscara com período de 1050,50 nm.

Nesses arranjos as ordens +1 e -1 são recombinadas através de dois espelhos e a ordem zero é bloqueada por um anteparo opaco. Os espelhos são montados sobre dois motores que possibilitam o ajuste do padrão de interferência.

A técnica de gravação pelo método direto por máscara de fase do Departamento de Física da Universidade do Porto [vide detalhes em Araújo *et al.*, 1999] utiliza um laser pulsado de excímero em 248 nm, e foi empregada para a gravação de redes com larguras de banda estreitas. A maior vantagem de se escrever redes utilizando sistemas pulsados é a alta intensidade do feixe de luz, assim poucos pulsos são suficientes para escrever a rede e redes de grande estabilidade podem ser obtidas com este método. O período da rede gravada, para uma incidência normal da radiação UV, é metade do período da máscara de fase. As máscaras de fase utilizadas para a gravação das redes mostradas nesse trabalho possuem períodos de 1070 nm e 1072 nm. O comprimento das redes gravadas por esse método, L , é de aproximadamente 10 mm, valor determinado pela dimensão do feixe sobre a máscara de fase.

2.1.3 Princípios das redes de Bragg

A rede de Bragg consiste em uma modulação periódica do índice de refração no núcleo da fibra ótica. O perfil de índice de refração de uma rede de Bragg uniforme no núcleo de uma fibra ótica monomodo com índice de refração n_{co} , pode ser descrito pela equação:

$$n(z) = n_{co} + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (2.4)$$

onde Δn é a amplitude da perturbação induzida no índice de refração, Λ é o período de espaçamento da rede e z é a distância ao longo do eixo longitudinal da fibra.

A difração da luz em redes de Bragg pode ser descrita pela conservação do momento, requerendo que o vetor de onda incidente adicionado ao vetor de onda da rede sejam iguais ao da radiação espalhada [Othonos, 1997]:

$$\mathbf{K}_f = \mathbf{K}_i + \mathbf{K} \quad (2.5)$$

ou seja, para luz incidindo a um ângulo θ_i sobre a rede:

$$\frac{2\pi n}{\lambda} \sin \theta_f = \frac{2\pi n}{\lambda} \sin \theta_i + m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.6)$$

onde θ_f é o ângulo da onda difratada pela rede e m é a ordem da difração, que é igual a -1 para o caso das redes em fibras monomodo. A constante de propagação modal, β , é $2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$, onde $n_{\text{eff}} = n_{co} \sin \theta$ é o índice de refração efetivo. A equação (2.6) pode então ser reescrita:

$$\frac{2\pi n_{\text{eff},f}}{\lambda} = \frac{2\pi n_{\text{eff},i}}{\lambda} - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.7)$$

Considerando o modo final propagando-se na direção oposta ao modo incidente e dois modos idênticos (mesmo número de onda e distribuição transversal de campo), caso das fibras monomodo, a equação (2.7) pode ser simplificada para a condição de primeira ordem de Bragg, que define o comprimento de onda de Bragg por:

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \quad (2.8)$$

O perfil de índice de refração periódico de uma FBG acopla o modo guiado LP₀₁ propagante para o modo LP₀₁ contra-propagante no comprimento de onda de Bragg específico dado por (2.8).

Quando luz de uma fonte ótica de banda larga é lançada na rede, haverá a reflexão em uma banda estreita de frequência, correspondente ao acoplamento devido ao casamento de fase entre os modos no núcleo propagante e contra-propagante, como representado na figura 2.4. O espectro da banda refletida é aproximadamente centrado no comprimento de onda de Bragg, e a largura de banda zero a zero FWFZ (Full Width Full Zero) é relacionada ao perfil da modulação do índice de refração e ao comprimento da rede, L [vide, por exemplo, Kashyap, 1999]:

$$\Delta\lambda_{\text{FWFZ}} = \frac{\lambda_B^2}{\pi n_{\text{eff}} L} \sqrt{(kL)^2 + \pi^2} \quad (2.9)$$

onde k é o coeficiente de acoplamento entre o modo de propagação de entrada e o refletido acoplado pela estrutura da rede :

$$k = \frac{\pi \Delta n \eta}{\lambda_B} \quad (2.10)$$

sendo Δn a amplitude do índice de refração induzido pela perturbação, $\eta = 1 - \frac{1}{V^2}$ é a fração da potência contida no núcleo da fibra, que depende da frequência normalizada da fibra, $V = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right) a \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}$; a é o raio do núcleo, n_{co} é o índice de refração do núcleo e n_{cl} é o índice de refração da casca.

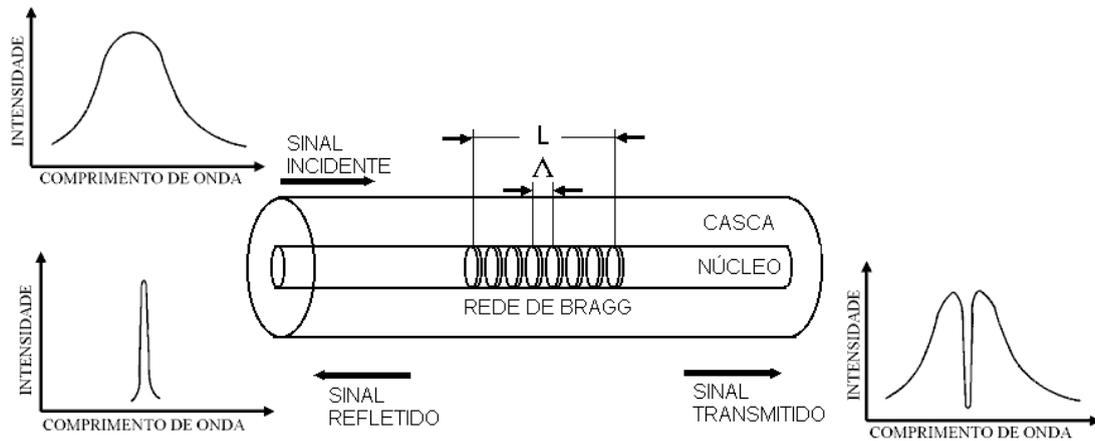


Figura 2.4 – Rede de Bragg uniforme gravada em uma fibra óptica monomodo e os espectros de transmissão e reflexão para uma fonte óptica de banda larga.

A refletividade espectral de uma rede de Bragg pode ser descrita pela teoria de modos acoplados [vide, por exemplo, Erdogan, 1997]:

$$R(\lambda_s) = \frac{k^2 \sinh^2 gL}{g^2 \cosh^2 gL + \left(\frac{\Gamma}{2} \right)^2 \sinh^2 gL} \quad (2.11)$$

onde Γ é o descasamento de fase para um dado comprimento de onda da banda espectral da fonte ótica, λ_s , definido como:

$$\Gamma = \left(2 \frac{2\pi \cdot n_{\text{eff}}}{\lambda_s} \right) - \left(\frac{2\pi}{\Lambda} \right) \quad (2.12)$$

e

$$g = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\Gamma}{2} \right)^2} \quad (2.13)$$

Para o comprimento de onda de Bragg, há casamento de fase e $\Gamma = 0$. A refletividade, para um dado coeficiente de acoplamento k e um comprimento específico L , pode então ser escrita como:

$$R(\lambda_B) = \tanh^2(kL) \quad (2.14)$$

Qualquer grandeza que afete as características da rede de Bragg ou as condições modais de propagação de luz na fibra ótica provocará uma mudança no comprimento de onda de Bragg associado. Esse fato dá origem a inúmeros dispositivos baseados em redes de Bragg, sendo particularmente útil para o desenvolvimento de sensores de fibra ótica.

2.1.4 Sensores baseados em redes de Bragg

O princípio básico de operação normalmente usado em um sensor com FBG consiste na monitoração do deslocamento espectral associado a mudanças no comprimento de onda de Bragg, $\Delta\lambda_B$, devido à ação de uma grandeza externa P (por

exemplo, tensão causando uma deformação ε) e/ou temperatura T . O deslocamento do comprimento de onda de Bragg é dado por:

$$\Delta\lambda_B = \left[2\Lambda \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial P} \right) + 2n_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial P} \right) \right] \Delta P + \left[2\Lambda \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \right) + 2n_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \right] \Delta T \quad (2.15)$$

No caso de uma tensão mecânica longitudinal, a relação entre a variação do comprimento de onda e a sensibilidade à tensão longitudinal (que provoca uma deformação) pode ser expressa por:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \left[1 - \left(\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right] \Delta\varepsilon \quad (2.16)$$

onde p_{11} e p_{12} são coeficientes fotoelásticos da fibra e ν é a razão de Poisson. Para uma fibra de sílica estes valores são: $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$ [Kersey *et al.*, 1997].

A relação entre a variação do comprimento de onda e a sensibilidade à temperatura pode ser escrita como:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda \left[\alpha + \frac{(\partial n / \partial T)}{n_{\text{eff}}} \right] \Delta T \quad (2.17)$$

α é o coeficiente de expansão térmica da fibra, $\alpha = 0,55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [Kersey *et al.*, 1997] e o coeficiente termo-ótico, $\frac{(\partial n / \partial T)}{n}$, é de aproximadamente $8,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para uma fibra de sílica dopada com germânio [Othonos, 1997].

Para uma rede gravada em 1550 nm, com índice de refração efetivo de 1,484, a sensibilidade de variação do comprimento de onda de Bragg com a tensão

é de aproximadamente $1,2 \text{ pm}/\mu\epsilon$. $\mu\epsilon$ (*microstrain*) é a unidade de medida de deformação e significa uma deformação de $1 \text{ }\mu\text{m}$ em uma fibra de 1 m de comprimento. A sensibilidade de variação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura, para a mesma fibra, é de aproximadamente $13,7 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ [Othonos, 1997].

Atualmente muitos projetos para demodulação das redes têm sido elaborados de acordo com os princípios de funcionamento de cada sensor, com o objetivo de otimizar o processo de leitura, além de reduzir o custo dos sistemas a serem implantados.

2.1.5 Caracterização das redes

A forma mais simples para caracterizar o espectro de uma rede de Bragg é através de um analisador de espectros óticos comercial. As redes de Bragg utilizadas neste trabalho foram caracterizadas durante e após o processo de fabricação utilizando as montagens esquematizadas nas figuras 2.5 e 2.6, usando como fontes óticas de banda larga, diodos emissores de luz (LED, ELED) e a emissão espontânea amplificada (ASE) de um amplificador a fibra dopada com érbio.

A figura 2.5 mostra a configuração do sistema ótico de caracterização do sensor baseada em um acoplador a fibra ótica. A fonte de luz de banda larga é direcionada ao sensor através do acoplador 3 dB e apenas 50% da luz da fonte ilumina a rede. A luz refletida pela rede é adquirida e monitorada por um analisador de espectros óticos. A porta não usada do acoplador ótico é colocada em um gel casador de índice para evitar reflexão espúria na interface fibra-ar (reflexões de Fresnel).

A figura 2.6 mostra uma configuração para caracterização baseada em um circulador ótico. A luz da fonte que incide na porta 1 é desviada para a porta onde se encontra a rede. A luz refletida pela rede retorna pela porta 2 e é desviada para a porta 3, que está conectada a um analisador de espectros.

Polarizadores e controladores de polarização em fibra ótica podem ser inseridos nos diversos braços experimentais, para análise com estados definidos de polarização de luz.

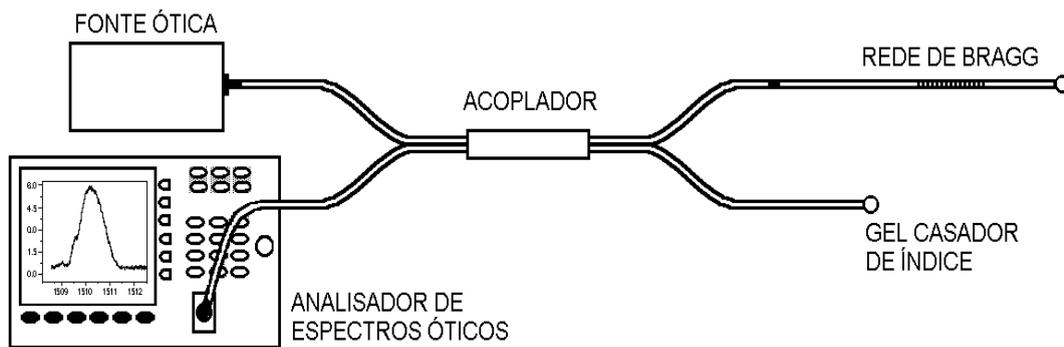


Figura 2.5 – Diagrama esquemático do sistema óptico experimental para a obtenção do espectro de reflexão das redes de Bragg em fibras através de um analisador de espectros óticos e um acoplador direcional a fibra.

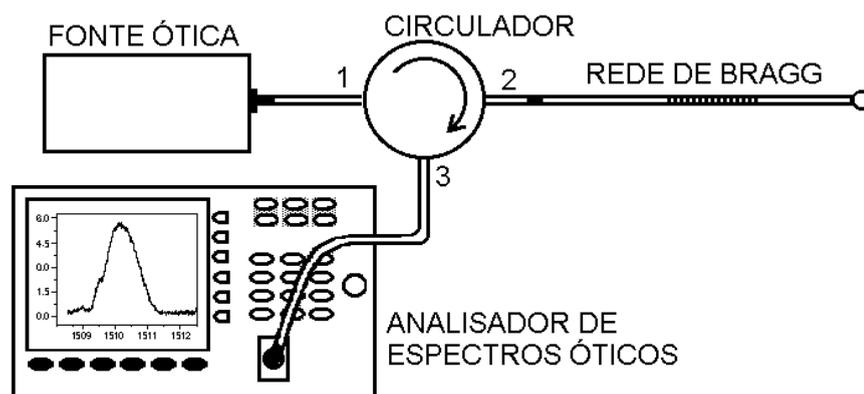


Figura 2.6 - Diagrama esquemático do sistema óptico experimental para a obtenção do espectro de reflexão das redes de Bragg em fibras através de um analisador de espectros óticos e um circulador a fibra.

2.2 Fibras óticas de alta birrefringência

Birrefringência interna em fibras óticas pode ter origem em duas causas: por efeito geométrico do núcleo e por efeito de tensão ao redor do núcleo. Entretanto, a anisotropia induzida por tensão é mais eficiente na geração de birrefringência que o formato geométrico do núcleo, por causa da pequena diferença entre os índices de refração de núcleo e casca [Loch and Heinlein, 1989].

2.2.1 Características das fibras de alta birrefringência

O método mais comum de produção de birrefringência linear é a introdução de tensão assimétrica sobre o núcleo da fibra. Devido à anisotropia, as constantes de propagação são diferentes e os modos ortogonais são desacoplados.

A tensão mecânica anisotrópica pode ser produzida por meio de uma casca interna elíptica, como na fibra IEC (Internal Elliptical Cladding) (figura 2.7 (a)) ou pela fabricação da fibra com duas regiões aplicadoras de tensão laterais de alta dopagem (sílica dopada com boro), localizados em lados opostos do núcleo, como os bastões laterais nas fibras PANDA (Polarization maintaining AND Absorption reducing) (figura 2.7 (b)) e em forma de gravata (lóbulos laterais) nas fibras bow tie (figura 2.7 (c)).

Os eixos principais das fibras HiBi são definidas como: eixo rápido, para o índice de refração mínimo e eixo lento, para o índice de refração máximo. Para qualquer polarização de entrada na fibra, a energia segundo os eixos rápido e lento será mantida.

A tensão mecânica é gerada por estruturas internas à fibra com coeficientes de expansão térmica diferentes da casca externa. Esta tensão é gerada no processo de fabricação da fibra a partir de uma preforma criada utilizando vidros com

diferentes coeficientes (dopagens). As figuras 2.8 (a), (b) e (c) mostram os perfis das preformas e das fibras, após o processo de puxamento, de alguns métodos para a fabricação das fibras HiBi [Noda *et al.*, 1986]. No processo de puxamento da fibra, devido à diferença nos coeficientes de expansão térmica dos vidros utilizados, a tensão anisotrópica sobre o núcleo torna-se permanente.

A técnica para a obtenção de fibras de casca interna elíptica (figura 2.8 (a)) é baseada no colapso com pressão reduzida de uma preforma. O fator que determina o formato elíptico é a diferença de viscosidade, isto é, a diferença de amolecimento com a temperatura entre o tubo suporte e a camada dopada. O processo de fabricação das fibras bow tie utiliza a corrosão por gás para criar uma área perfurada em uma preforma (figura 2.8 (b)). A técnica para a obtenção das fibras PANDA é baseada na fabricação e inserção de dois bastões em uma preforma com furos laterais e núcleo (figura 2.8 (c)) [Dyott, 1995; Noda *et al.*, 1986].

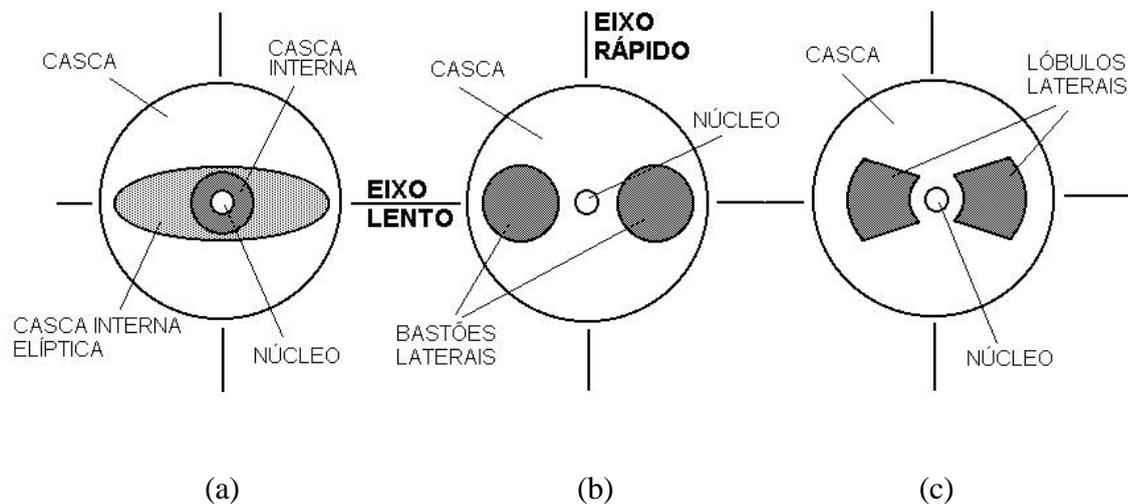


Figura 2.7 – Seções transversais dos principais tipos de fibras mantedoras de polarização de alta birrefringência: (a) IEC; (b) PANDA e (c) bow tie. A figura mostra também os eixos, rápido (verticais) e lento (horizontais) das fibras.

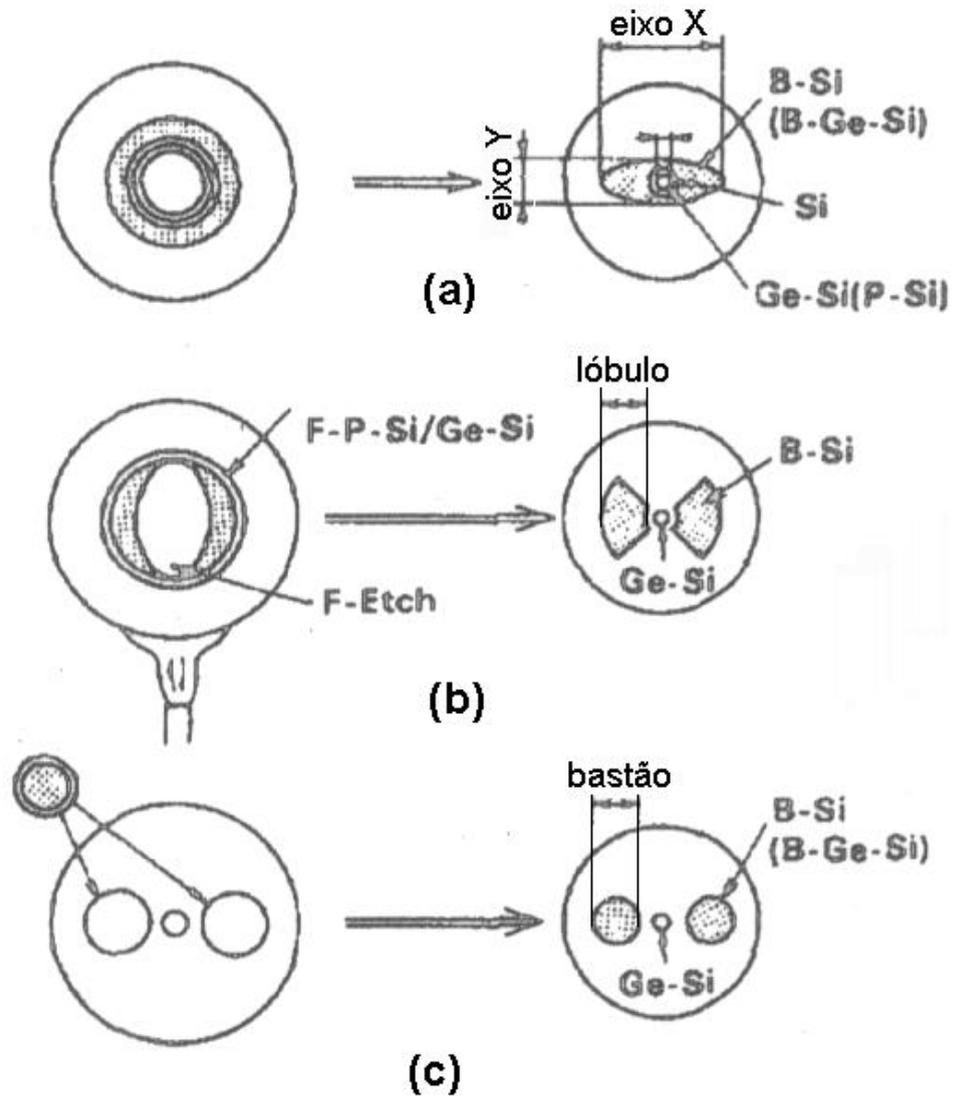


Figura 2.8 – Processos de fabricação das fibras de alta birrefringência: (a) colapso, (b) corrosão por gás e (c) furos.

A grandeza apropriada para caracterizar a anisotropia no índice de refração local dessas fibras é a birrefringência local, B , que pode ser definida pela diferença

do índice de refração dependente de polarização [vide, por exemplo, Namihira, 1985] ao longo de duas direções principais:

$$B = n_x - n_y = C (\sigma_x - \sigma_y) \quad (2.18)$$

onde n_x e n_y são os índices de refração correspondentes aos eixos de polarização principais, σ_x e σ_y representam as tensões principais ao longo dos eixos de polarização, e C é a constante elasto-ótica. Para fibras de sílica monomodo o valor de C é de $3,08 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$ em $\lambda = 1,5 \text{ }\mu\text{m}$ [Namihira, 1985].

Os perfis de distribuição do índice de refração e a birrefringência, para os modos de polarização X e Y de uma fibra bow tie e uma IEC, determinados por Loch and Heinlein [1989], são mostrados para os eixos principais da fibra, na figura 2.9 (a), (b) e figura 2.10 (c), (d), respectivamente. Na região do núcleo de ambas as fibras o índice de refração para o modo de polarização X é maior do que para o modo de polarização Y, de acordo com a terminologia adotada para essas fibras, em que o eixo Y é o eixo rápido e o X é o eixo lento da birrefringência induzida por tensão.

A diferença entre os perfis de birrefringência para as duas fibras está na inclusão das regiões de tensão. Nos lóbulos de tensão isolados da fibra bow tie não há birrefringência significativa em contraste com a birrefringência uniforme ao longo dos eixos X e Y da fibra IEC.

Nos limites entre a casca e as regiões de alta dopagem ao longo do eixo X, existem seções de tensão particularmente alta em ambas as fibras. A tensão diferencial máxima na fibra IEC está localizada aproximadamente na coordenada de $43 \text{ }\mu\text{m}$ a partir do centro da fibra. Nessas regiões de concentração de tensão há uma alta tendência a gerar quebras quando a fibra é clivada [Loch and Heinlein, 1989].

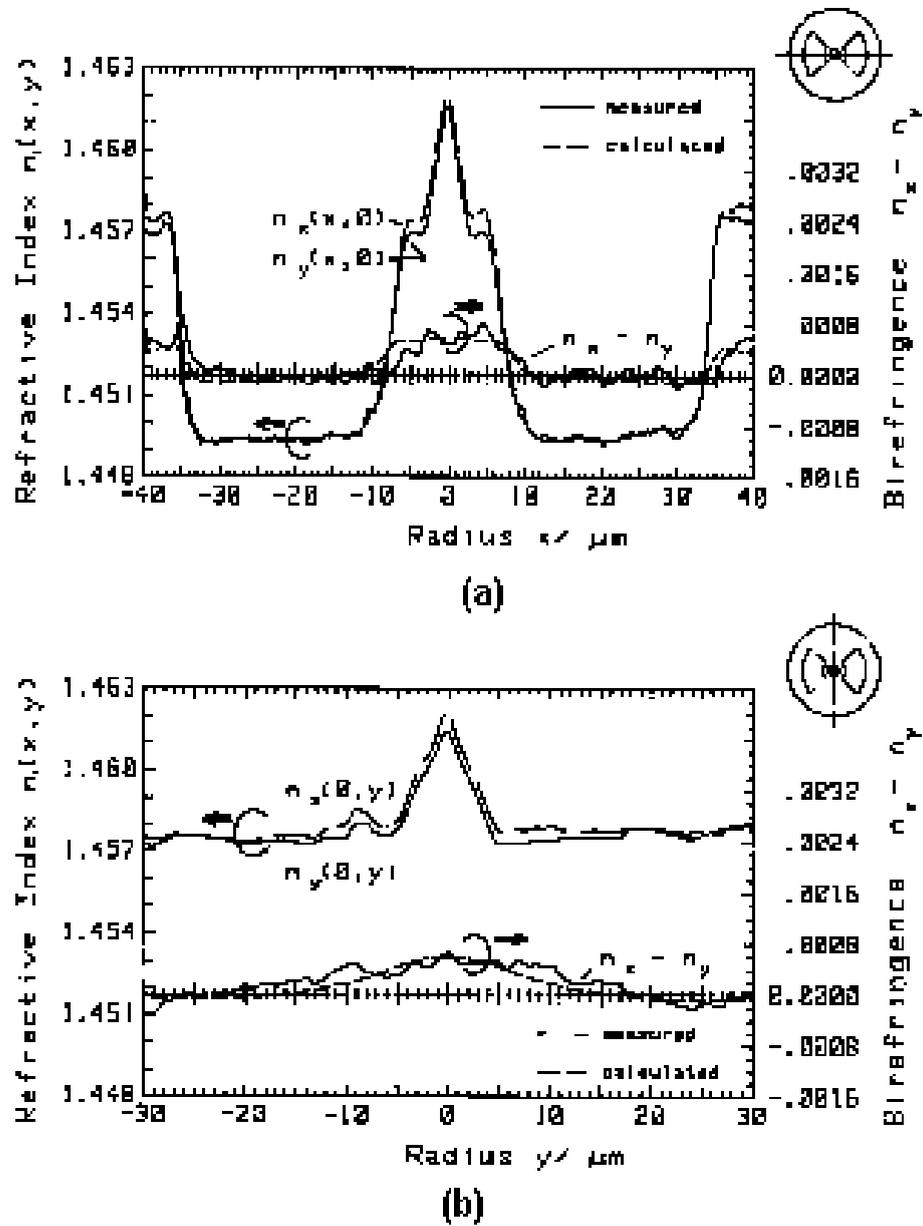
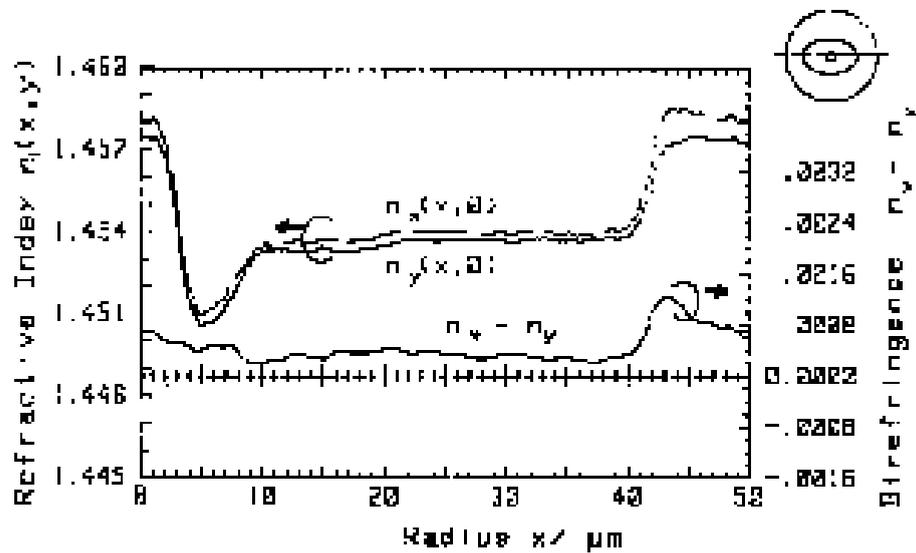
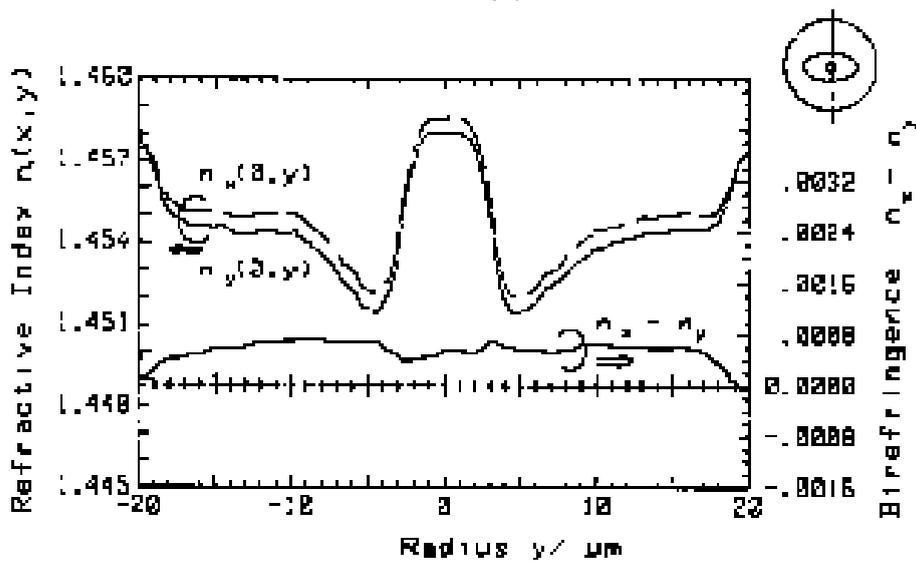


Figura 2.9 – Gráficos dos perfis de índice de refração para os modos de polarização X e Y e birrefringência para a fibra bow tie, ao longo dos eixos: (a) lento e (b) rápido [Loch and Heinlein, 1989].



(c)



(d)

Figura 2.10 – Gráficos dos perfis de índice de refração para os modos de polarização X e Y e birrefringência para a fibra IEC, ao longo dos eixos: (c) lento e (d) rápido [Loch and Heinlein, 1989].

A quebra da simetria axial no perfil de índice de refração das fibras de alta birrefringência define valores diferentes para as constantes de propagação (β_x e β_y) para os modos ortogonais de polarização, HE_x e HE_y , do modo de propagação HE_{11} . Essas polarizações lineares caracterizam os modos lentos e rápidos, associados aos eixos principais da fibra, determinados pelas posições de máximo e mínimo do índice de refração.

A birrefringência modal de uma fibra pode ser expressa por [vide, por exemplo, Wolf, 2000; Kaminow, 1981]:

$$B = \frac{(\beta_x - \beta_y)}{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)} \quad (2.19)$$

Valores de birrefringência típicos para fibras HiBi são da ordem de 10^{-4} [Dyott, 1995].

Considerando luz com o estado de polarização (SOP) linear sendo lançada sobre uma fibra monomodo, com birrefringência linear e aproximadamente constante, a 45° dos eixos de birrefringência da fibra, os dois modos de polarização ortogonal serão excitados. Esses modos, cada um com metade da energia acoplada, possuem constantes de propagação diferentes e a defasagem entre eles varia em função da posição ao longo da fibra:

$$\Phi(z) = (\beta_x - \beta_y) z \quad (2.20)$$

Como as duas componentes de polarização têm diferentes constantes de propagação, elas se propagam evoluindo entre situações em fase e fora de fase por um período que é determinado pela birrefringência da fibra. A figura 2.11 mostra a variação do estado de polarização ao longo da fibra. O período com o qual o padrão de batimento modal se repete, L_B , depende da birrefringência e do comprimento de onda:

$$L_B = \frac{\lambda}{B_F} \quad (2.21)$$

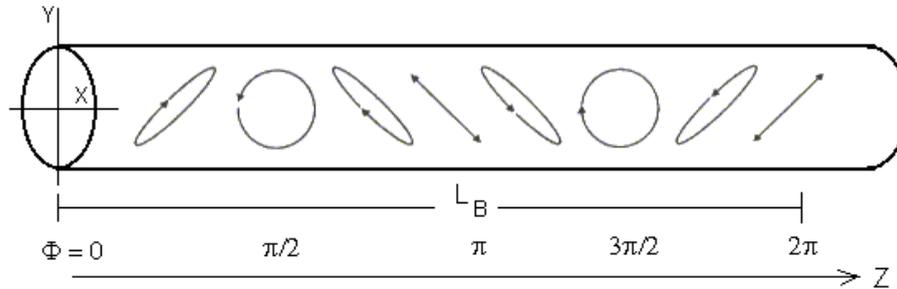


Figura 2.11 – Padrão de batimento modal e a definição de comprimento de batimento de fibras HiBi.

Valores para o comprimento de batimento na ordem de milímetros são típicos para as fibras HiBi [Rashleigh, 1983].

A birrefringência pode ser estimada em função dos dados obtidos da medição do espectro de batimento modal utilizando um polarizador e um analisador a 45° com um dos eixos da fibra (figura 2.12). A intensidade da radiação na saída, após o analisador é função do comprimento de onda [Kikushi and Okoshi, 1983; Rashleigh, 1982].

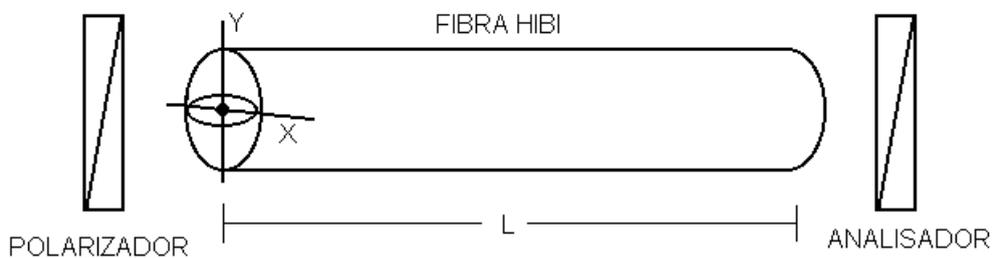


Figura 2.12 – Configuração do sistema para a determinação da birrefringência através do espectro de batimento modal.

No trecho de fibra investigado deve haver comprimentos de onda para os quais a defasagem entre os modos ortogonalmente polarizados acumulada seja um múltiplo inteiro de 2π . Assim, para um dado comprimento de onda λ_1 , a defasagem acumulada ao longo de toda a fibra, L , entre os dois modos de polarização ortogonais, é dada por:

$$\Phi = N \cdot 2\pi \quad \text{para } N = 1, 2, 3, \dots \quad (2.22)$$

Como a defasagem acumulada é menor quanto maior for o comprimento de onda, há um outro comprimento de onda λ_2 , maior que λ_1 , para o qual o estado de polarização é novamente linear e a defasagem acumulada é um múltiplo inteiro de 2π :

$$\Phi = (N + 1) \cdot 2\pi \quad \text{para } N = 1, 2, 3, \dots \quad (2.23)$$

onde N é o número de vezes que o estado de polarização é linear (múltiplo de 2π) ao longo da fibra. A defasagem acumulada ao final da fibra, em termos dos índices de refração efetivos para cada modo de polarização, pode também ser escrita:

$$\Phi(z) = (\beta_x - \beta_y) L = \frac{2\pi}{\lambda} (n_x - n_y) L \quad (2.24)$$

Resolvendo-se o sistema para as defasagens acumuladas para os comprimentos de onda λ_1 e λ_2 , e com a birrefringência dada pela equação 2.19, a birrefringência pode ser estimada a partir dos valores de comprimento de onda para dois picos de intensidade em seqüência no espectro:

$$B = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{1}{L} \quad (2.25)$$

2.2.2 Birrefringência e temperatura

A variação da birrefringência intrínseca de fibras HiBi com a mudança de temperatura tem sido investigada por muitos autores [vide, por exemplo, Ramaswamy *et al.*, 1979; Lacroix, *et al.*, 1984].

Para fibras HiBi com regiões aplicadoras de tensão de sílica dopada com boro, o núcleo de sílica pura expande mais lentamente que a região de sílica dopada e a tensão diminui quando a temperatura aumenta, resultando na redução da birrefringência intrínseca causada pela tensão [Ramaswamy *et al.*, 1979]. Assim, a birrefringência diminui quando a temperatura aumenta.

As curvas de comprimento de batimento com a variação de temperatura, obtidas por Ramaswamy *et al.* [1979] mostram que, para fibras HiBi IEC com região interna elíptica de sílica dopada com boro (birrefringência da ordem de 10^{-5} e comprimento de batimento na ordem de centímetros para o comprimento de onda de 440 nm), a variação é linear até aproximadamente 400 °C, com variações no comprimento de batimento de aproximadamente 2,5 cm. Para a região de temperatura entre 20 e 100 °C, variações no comprimento de batimento menores que 0,5 cm são relatadas.

2.2.3 Birrefringência e tensões transversais

Luz linearmente polarizada ao longo de um dos eixos de birrefringência de uma fibra HiBi mantém o estado de polarização quando se propaga ao longo da fibra. Entretanto, quando uma seção da fibra é lateralmente comprimida em uma direção arbitrária, como mostra a figura 2.13, a orientação dos eixos de birrefringência daquela

seção varia devido ao efeito de compressão e ocorre o acoplamento entre os dois modos de polarização originais da fibra, a menos que a força seja aplicada ao longo de um dos eixos principais.

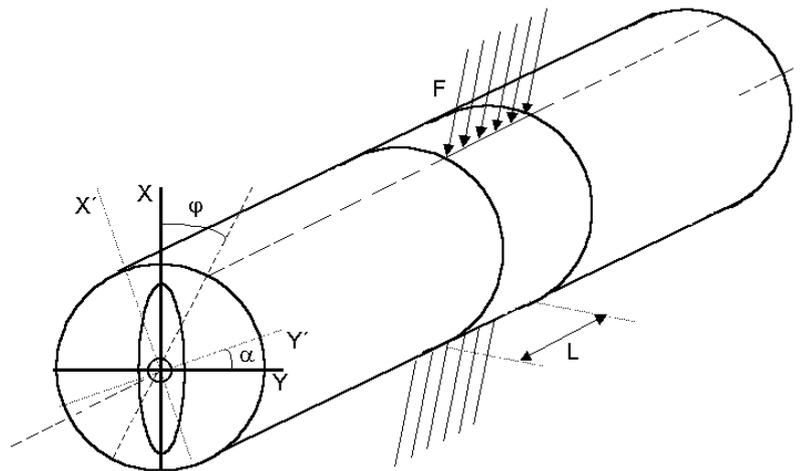


Figura 2.13 – Sistema de coordenadas dos eixos principais da fibra HiBi e a direção da força transversal aplicada.

Fibras HiBi apresentam birrefringência intrínseca B dada pela equação 2.19. Se uma força externa F é aplicada sobre a fibra, formando um ângulo φ com o eixo lento X (figura 2.13), induz uma birrefringência adicional dada por [Carrara *et al.*, 1986]:

$$B_{\text{ext}} = \frac{ACFn_{\text{co}}^3 k_0}{2dL_F} \quad (2.26)$$

onde A é uma constante, igual a 1,58 para fibras circulares, C é a constante elasto-ótica, k_0 é a constante de propagação da luz no vácuo, L_F é o comprimento de aplicação de carga e d é o diâmetro da casca da fibra.

Os novos eixos de birrefringência, na área sob pressão formam um ângulo α com os eixos não perturbados definido por [Carrara *et al.*, 1986]:

$$\tan 2\alpha = \frac{B_{\text{ext}} \sin 2\varphi}{B - B_{\text{ext}} \cos 2\varphi} \quad (2.27)$$

A birrefringência resultante será, então [Carrara *et al.*, 1986]:

$$B_T = \left(B^2 + B_{\text{ext}}^2 - 2B B_{\text{ext}} \cos 2\varphi \right)^{1/2} \quad (2.28)$$

2.2.4 Análise de tensões em fibras de alta birrefringência

O método de elementos finitos (FEM) foi utilizado na análise das fibras HiBi, com o objetivo de determinar a tensão interna no núcleo da fibra quando uma carga é aplicada sobre a superfície externa. Fibras bow tie, PANDA e IEC de 125 μm de diâmetro e uma bow tie de 80 μm foram modeladas. A fibra IEC de 125 μm foi modelada inicialmente para comparar os resultados com os obtidos por outro grupo [Lawrence *et al.*, 1999] e validar o processo de simulação.

As dimensões das fibras foram obtidas através de microfotografias adquiridas por um microscópio ótico. As microfotografias das fibras HiBi podem ser vistas nos capítulos 4 e 6. A tabela 4.2, no capítulo 4, mostra as dimensões obtidas para as fibras.

Como os parâmetros detalhados das constantes elásticas das fibras não são fornecidos, os núcleos e as cascas interna e externa das fibras PANDA, Bow tie e IEC foram modelados como sílica fundida. O valor utilizado para o módulo de Young, Y , é de 70 GPa e para a razão de Poisson, ν , é de 0,19. Os bastões laterais

aplicadores de tensão das fibras bow tie e PANDA e a casca interna elíptica da fibra IEC foram modelados como sílica fundida dopada com B_2O_3 , com os seguintes valores, $Y = 51$ GPa e de $\nu = 0,21$ [Lawrence *et al.*, 1999].

Como o mesmo tipo de material foi utilizado na modelagem dos diferentes tipos de fibras, os resultados obtidos mostram a sensibilidade relativa de um projeto em comparação aos outros, devido apenas à influência da geometria sobre a birrefringência.

A figura 2.14 (a) mostra a representação gráfica da malha da fibra PANDA usada para os cálculos por FEM. A figura 2.14 (b) mostra o detalhe da representação do núcleo dessa fibra. As malhas mostradas nas figuras 2.15 (a), (b) e (c) mostram respectivamente as configurações utilizadas para as fibras IEC e bow tie de $125\ \mu\text{m}$ e bow tie de $80\ \mu\text{m}$ de diâmetro de casca externa.

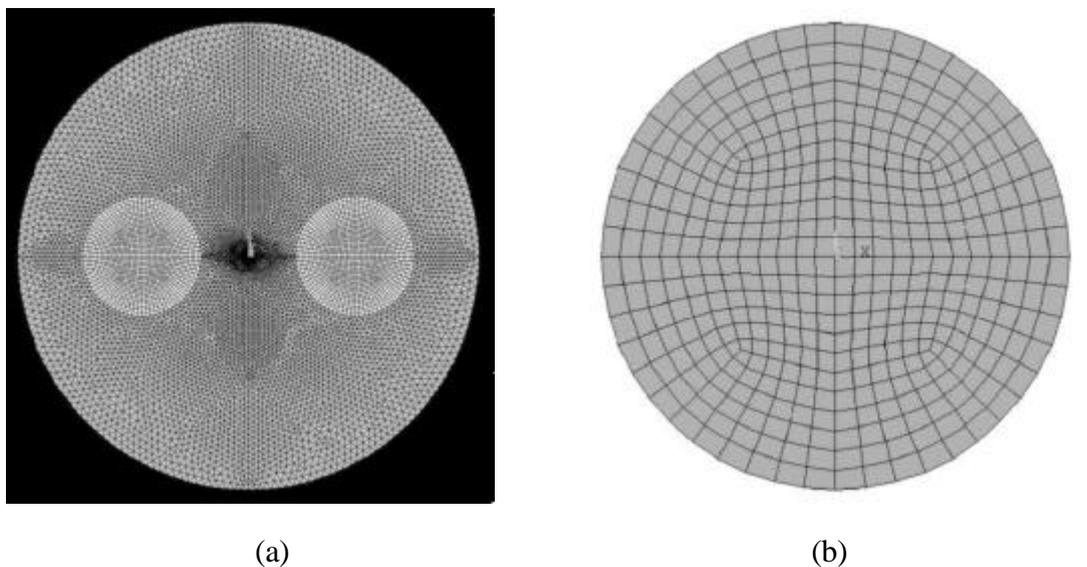


Figura 2.14 – (a) Malha de elementos finitos usada com a fibra PANDA. (b) Detalhe da malha na região do núcleo.

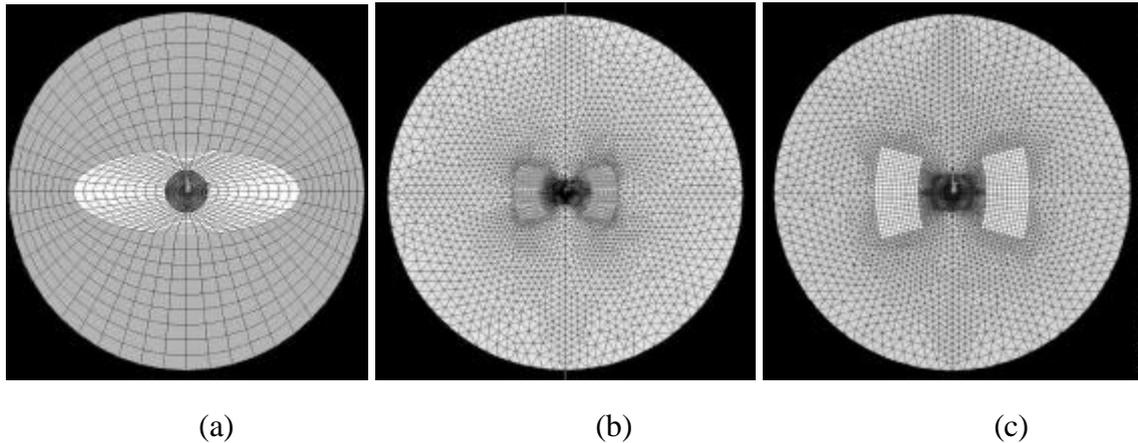


Figura 2.15 – Representações das malhas utilizadas para a modelagem das fibras HiBi IEC de 125 μm de diâmetro da casca externa (a), bow tie de 125 μm (b) e bow tie de 80 μm (c).

As seções transversais das fibras foram modeladas e foram coletados dados referentes à deformação e à tensão ao longo do primeiro quadrante da seção transversal do núcleo da fibra. As simulações foram realizadas com a aplicação de carga sobre uma determinada direção da fibra definida pelo ângulo φ (vide figura 2.14), a fim de obter os valores das deformações ao longo de cada um dos eixos (X e Y). A direção de pressionamento para o ângulo $\varphi = 0^\circ$ é o do eixo X de polarização. Os carregamentos foram aplicados na superfície externa da fibra, de 15 em 15 graus, e os dados coletados ao longo da circunferência da interface núcleo-casca da fibra. O programa utilizado para o cálculo foi o ANSYS5 (versão 5.7), considerando um estado plano de deformação.

Para as simulações realizadas com a aplicação de diferentes cargas de pressionamento com $\varphi = 90^\circ$, os coeficientes obtidos para as fibras PANDA, bow tie e IEC foram, respectivamente, 109,4, 113,22 e 116,49 $\mu\epsilon/\text{N}/\text{mm}$. Para outros ângulos de aplicação de cargas, os coeficientes também apresentam valores próximos.

A tabela 2.1 mostra os valores obtidos com a simulação para a fibra PANDA, para cada carga aplicada na compressão diametral da fibra, de tensão, σ , e de deformação, ϵ .

Tabela 2.1 – Valores de tensão σ e deformação ϵ obtidos através da análise por elementos finitos, para diferentes cargas aplicadas na compressão da fibra HiBi PANDA, para o ângulo $\varphi = 0^\circ$.

P(N/mm) j = 0°	s (MPa)		e (mstrain)	
	Eixo Y	Eixo X	Eixo Y	Eixo X
0,5	2,93	-6,75	62,14	-102,39
1,0	5,86	-13,49	124,29	-204,77
1,5	8,79	-20,24	186,43	-307,16
2,0	11,72	-26,99	248,57	-409,54
2,5	14,65	-33,74	310,71	-511,93
3,0	17,58	-40,49	372,86	-614,31

A figura 2.16 (a), (b) e (c) mostra os gráficos da deformação obtida para a fibra PANDA, ao longo dos eixos X e Y, para três ângulos de pressionamento, em função da carga aplicada. Os coeficientes angulares das retas ajustadas são as sensibilidades às deformações ao longo de cada um daqueles eixos.

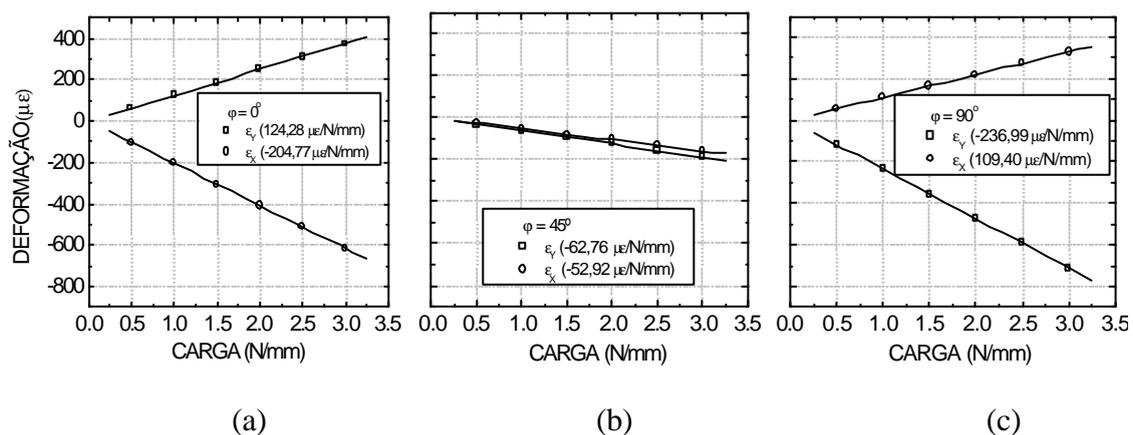


Figura 2.16 – Gráficos das curvas de deformação obtidas por FEM, para os dois eixos de polarização e aplicação de diferentes cargas sobre a fibra PANDA, segundo os ângulos de pressionamento 0° (a), 45° (b) e 90° (c).

Quando a aplicação de carga é feita sobre a direção do eixo X, a análise por elementos finitos indica uma sensibilidade à deformação máxima em compressão para a componente ϵ_X e uma sensibilidade máxima em tração para ϵ_Y . Se a carga fosse aplicada na direção do eixo Y ($\phi = 90^\circ$), a sensibilidade em tração seria máxima para ϵ_X e em compressão para ϵ_Y .

O gráfico da figura 2.17 mostra os valores simulados de sensibilidade à deformação, obtidos para a fibra PANDA, para cada um dos eixos (X e Y), em relação ao ângulo de pressionamento ϕ . A análise foi realizada utilizando uma carga P de 1 N/mm. Pode-se observar os valores de máxima sensibilidade à deformação em compressão e em tensão. A função periódica tem amplitude máxima para a aplicação de cargas sobre o eixo Y. A diferença na amplitude para cada eixo de tensão pode estar associada à diferença de deformação interna induzida pelas estruturas aplicadoras de tensão. Os resultados obtidos para as fibras IEC e bow tie apresentam resultados similares. No caso das fibras IEC os resultados aqui obtidos coincidem com ajustes obtidos por Lawrence *et al.* [1999].

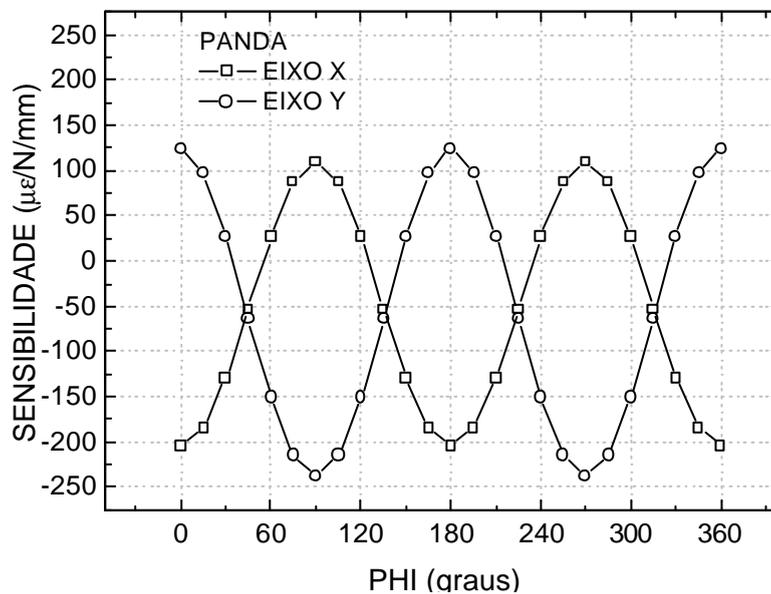


Figura 2.17 – Gráfico de sensibilidade à deformação pelo ângulo da carga aplicada para os eixos X e Y de uma fibra HiBi PANDA.

2.2.5 Redes de Bragg gravadas em fibras de alta birrefringência

As fibras de alta birrefringência, suportam dois modos de polarização linear cujos índices de refração são diferentes, n_x e n_y , para os modos lento e rápido, respectivamente. Quando uma FBG é escrita em uma dessas fibras o período das redes é o mesmo para os dois modos de polarização, porém, como os índices de refração são diferentes, o comprimento de onda de Bragg é diferente para cada modo. A equação 2.8 pode então ser escrita para os modos de polarização ortogonais:

$$\lambda_i = 2 n_i \Lambda, \quad i=X, Y \quad (2.29)$$

onde os λ_i são os comprimentos de onda de Bragg para cada modo de polarização.

A figura 2.18 (a) apresenta um diagrama esquemático de uma FBG em uma fibra HiBi IEC. Os eixos X, Y e Z formam o sistema de coordenadas da fibra. O espectro de reflexão de FBGs escritas em fibras HiBi tem uma estrutura de dois picos correspondendo aos dois modos de polarização ortogonais da fibra, como indicado no gráfico da figura 2.18 (b).

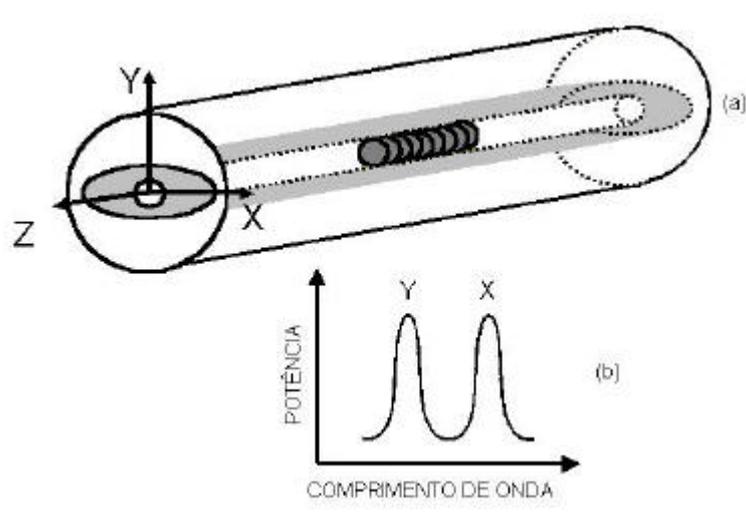


Figura 2.18 – (a) Rede de Bragg em uma fibra HiBi e as coordenadas X, Y e Z. (b) Gráfico esquemático do espectro de reflexão de uma rede gravada em uma fibra HiBi, com as bandas de polarização correspondente aos eixos lento, X, e rápido, Y, da fibra.

A banda de reflexão total de uma rede de Bragg em fibra HiBi é descrita por:

$$R(\lambda) = R_X(\lambda) + R_Y(\lambda) \quad (2.30)$$

onde:

$$R_i(\lambda) = \frac{k_i^2 \sinh^2 g_i L}{g_i^2 \cosh^2 g_i L + \left(\frac{\Gamma_i}{2}\right)^2 \sinh^2 g_i L}, \quad i = X, Y \quad (2.31)$$

Os parâmetros k_i , Γ_i e g_i são descritos respectivamente pelas equações 2.10, 2.12 e 2.13, com as constantes determinadas para cada modo de polarização.

Para $\Gamma_i = 0$, a refletividade pode ser escrita como:

$$R_i(\lambda_B) = \tanh^2(k_i L) \quad (2.32)$$

A largura de banda zero a zero FWFZ para cada banda de polarização será:

$$\Delta\lambda_{\text{FWFZ}i} = \frac{\lambda_{\text{Bi}}^2}{\pi n_{\text{eff}} L} \sqrt{(k_i L)^2 + \pi^2} \quad (2.33)$$

Considerando uma rede de Bragg em uma fibra HiBi sujeita a uma variação de temperatura ΔT e deformações segundo os eixos principais da fibra $\Delta\epsilon_X$, $\Delta\epsilon_Y$ e $\Delta\epsilon_Z$, o deslocamento no comprimento de onda dos dois picos de polarização pode ser descrito pelas equações:

$$\frac{\Delta\lambda_X}{\lambda_X} = \Delta\epsilon_Z - \frac{n_X^2}{2} [p_{11}\Delta\epsilon_X + p_{12}(\Delta\epsilon_Z + \Delta\epsilon_Y)] + \left[\alpha + \frac{(\partial n / \partial T)}{n_X} \right] \Delta T \quad (2.34)$$

$$\frac{\Delta\lambda_Y}{\lambda_Y} = \Delta\varepsilon_Z - \frac{n_Y^2}{2} [p_{11}\Delta\varepsilon_Y + p_{12}(\Delta\varepsilon_Z + \Delta\varepsilon_X)] + \left[\alpha + \frac{(\partial n/\partial T)}{n_Y} \right] \Delta T \quad (2.35)$$

onde n_X e n_Y são os índices de refração efetivos e λ_X e λ_Y são os comprimentos de onda de Bragg para cada modo de polarização.

Nessas equações assume-se que as fibras são isotrópicas, apesar de que as regiões de tensão intrínseca das fibras HiBi podem introduzir anisotropia ótica, térmica e mecânica.

As relações de tensão-deformação para os eixos principais da fibra, são descritas por [Gafsi and El-Sherif, 2000]:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{Y} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (2.36)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{Y} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (2.37)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{Y} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (2.38)$$

onde σ_x , σ_y e σ_z , são as componentes de tensão da fibra.

A relação de tensão-deformação para uma carga transversal aplicada sobre uma fibra cilíndrica, F/L , considerando um estado plano de deformação pode ser escrito como [Gafsi and El-Sherif, 2000]:

$$\varepsilon_Y = -\frac{F}{Y\pi rL} \quad (2.39)$$

onde r é o raio da fibra ($62.5 \mu\text{m}$).

A figura 2.19 mostra um esquema de como seria a resposta espectral para uma rede gravada em fibra HiBi quando sujeita à tensão longitudinal, transversal ou temperatura. Com uma deformação longitudinal ou temperatura os picos de reflexão sofreriam uma translação conjunta em comprimento de onda (figura 2.19 (a)), com uma deformação transversal, a separação entre os picos aumentaria (figura 2.19 (b)). Essa mudança no comportamento é atrativa para sensores destinados a medir múltiplas componentes de esforço mecânico.

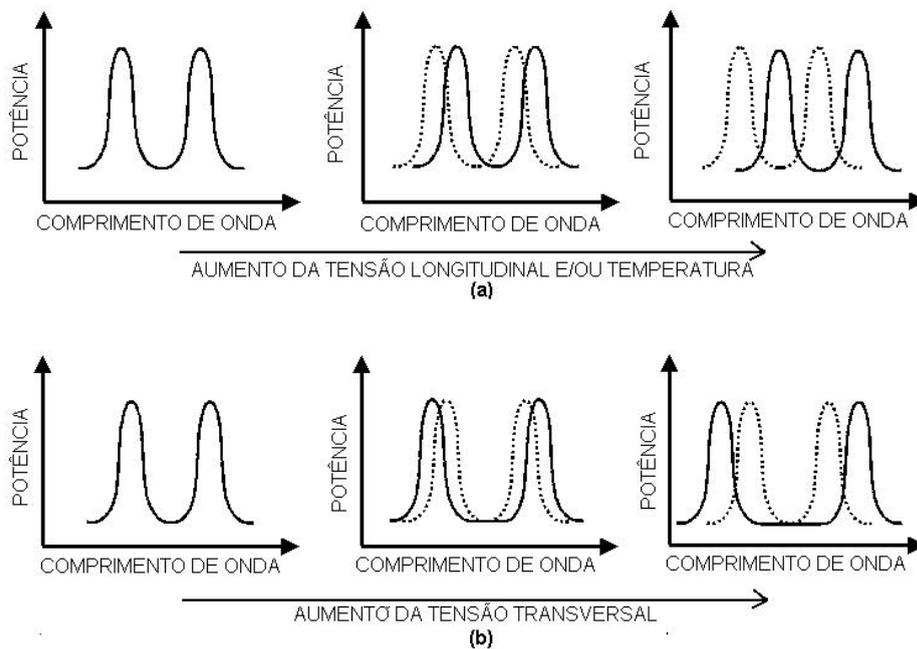


Figura 2.19 - Esquema para o deslocamento em comprimento de onda com o aumento da tensão axial e separação entre os picos com o aumento da tensão transversal.

Neste capítulo foram apresentados os princípios relacionados às redes de Bragg, métodos de gravação e sensores. Foram também expostos os principais aspectos de fibras de alta birrefringência e análises espectrais de redes gravadas nestas fibras. A possibilidade de medidas de temperatura, deformação longitudinal e deformação transversal torna atraente o emprego destes dispositivos para sensores de múltiplos parâmetros simultâneos.

Capítulo 3

Sensores para múltiplos parâmetros

Diversos sistemas sensores têm sido elaborados para a determinação simultânea de múltiplos parâmetros, como temperatura e deformações, utilizando sistemas polarimétricos, Fabry-Perot, lasers a fibra, redes de período longo e redes de Bragg [Higuera, 2002]. Um considerável número de projetos baseados nas redes de Bragg pode ser encontrado na literatura. Esse grande número de trabalhos se deve ao fato da rede de Bragg apresentar vantagens em relação a outros projetos como resistência mecânica superior e de poderem ser inseridos no sistema a ser monitorado, inclusive à análise de sistemas com pequenas dimensões, devido ao tamanho reduzido do dispositivo. Os custos de monitoração podem ser relativamente reduzidos com algumas propostas para os processos de demodulação desses sensores. Além disso, as redes podem ser multiplexadas em comprimento de onda, permitindo que diversos sensores possam ser monitorados em uma única fibra.

As redes de Bragg em fibras óticas têm aplicações interessantes em várias áreas. Perturbações como compressão ou tração, ou variações de temperatura, alteram o comprimento de onda de Bragg refletido. Essa, porém, é também uma das limitações desses sensores: a sua dupla sensibilidade à temperatura e à tensão. Tensão e temperatura não podem ser determinadas separadamente apenas pela medida do deslocamento em comprimento de onda de um único sensor com rede de Bragg. Várias

técnicas têm sido descritas para superar esta limitação. O objetivo no texto a seguir é revisar algumas técnicas para determinação simultânea de múltiplos parâmetros em sistemas baseados em redes de Bragg.

3.1 Medidas Simultâneas

Para o caso geral de um elemento sensor iluminado por uma fonte ótica, com um sistema de demodulação para monitoração de duas grandezas observáveis, ϕ_1 e ϕ_2 , e aplicado à determinação de, por exemplo, temperatura T e deformação ϵ , as relações entre as grandezas monitoradas e os parâmetros a determinar podem ser escritas na forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde $\Delta\phi_1$ e $\Delta\phi_2$ são as variações das grandezas observáveis, descritas pela diferença entre os valores final (f) e inicial (i)

$$\Delta\phi_j = \phi_{jf} - \phi_{ji}, \quad j=1,2 \quad (3.2)$$

ΔT e $\Delta\epsilon$ são as variações de temperatura e de deformação, respectivamente, descritas pela diferença entre os valores final (f) e inicial (i)

$$\Delta T = T_f - T_i \quad (3.3)$$

$$\Delta\epsilon = \epsilon_f - \epsilon_i \quad (3.4)$$

K é uma matriz que contém os elementos K_{1T} , K_{2T} , $K_{1\epsilon}$, $K_{2\epsilon}$, relacionados às variações da temperatura e da deformação com as grandezas observadas. No caso ideal cada

grandeza observável corresponderá a um dos parâmetros a medir e K pode ser escrita como:

$$K = \begin{bmatrix} K_{1T} & 0 \\ 0 & K_{2\varepsilon} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Porém, no caso real cada observável possui sensibilidade para cada parâmetro a ser determinado:

$$K = \begin{bmatrix} K_{1T} & K_{1\varepsilon} \\ K_{2T} & K_{2\varepsilon} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Nesse caso, temperatura e a deformação podem então ser determinadas a partir das observações realizadas, invertendo a equação 3.1:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \phi_1 \\ \Delta \phi_2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

onde K^{-1} é a matriz inversa da matriz K .

3.2 Medidas simultâneas de tensão longitudinal e temperatura

Muitos arranjos de sensores baseados em redes de Bragg para a determinação simultânea de tensão longitudinal e temperatura são citados na literatura. Essas técnicas podem ser divididas em duas grandes áreas: uma em que as redes de Bragg são empregadas como elementos sensores e outra em que o dispositivo é usado simplesmente como espelho em um sistema interferométrico. Entre as técnicas mais conhecidas que utilizam as redes como elementos sensores destacam-se as que utilizam

dois diferentes comprimentos de onda, sensores híbridos, redes em fibras de diferentes diâmetros, redes e cavidades e redes em fibras de alta birrefringência.

3.2.1 Diferentes comprimentos de onda

Uma das primeiras técnicas para medida simultânea, realizada por Xu *et al.* [1994] utiliza duas redes sobrepostas em diferentes comprimentos de onda de Bragg (850 nm e 1300 nm). Uma grande separação entre os comprimentos de onda das redes é necessária para obter uma relação bem condicionada na discriminação de tensão e temperatura.

Como os coeficientes fotoelásticos e termo-óticos são dependentes do comprimento de onda, a variação no comprimento de onda de cada uma das redes sobrepostas será diferente, pois cada rede estará sujeita ao mesmo nível de tensão e/ou temperatura. Estes resultados podem ser usados para medidas simultâneas dessas grandezas, ou compensação para a temperatura durante medidas de tensão.

Os erros nas medidas simultâneas de tensão e temperatura foram de $\pm 5^\circ\text{C}$ e $\pm 10\ \mu\epsilon$. Entretanto, a técnica de dois comprimentos de onda requer duas fontes de banda larga, bastante afastadas espectralmente, para a demodulação do sistema sensor. O esquema da figura 3.1, mostra a configuração utilizada.

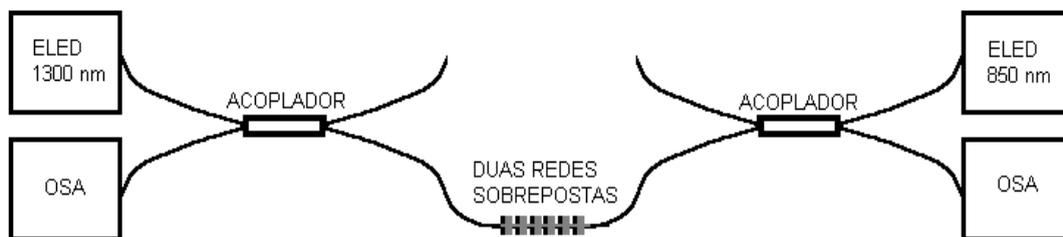


Figura 3.1 – Esquema experimental de demodulação de um sensor baseado em redes de Bragg sobrepostas para a determinação simultânea de tensão longitudinal e temperatura.

3.2.2 Compensação de temperatura

O meio mais simples de compensar efeitos de temperatura em medidas de tensão é medir de maneira independente e simultânea estes dois parâmetros e então usar as medidas de temperatura para corrigir os valores de tensão. A desvantagem desta técnica é que as medidas serão incorretas se houver um gradiente de temperatura através do sensor.

Lo [1998] descreveu um sensor que utiliza uma única rede de Bragg uniforme, pré-tensionada, colada parcialmente em uma estrutura. Esta estrutura resulta em uma seção pré-tensionada, mantida pela colagem, que é sensível a tensão e temperatura e uma seção não tensionada que é sensível apenas a temperatura. A figura 3.2 mostra um diagrama da configuração experimental utilizada.

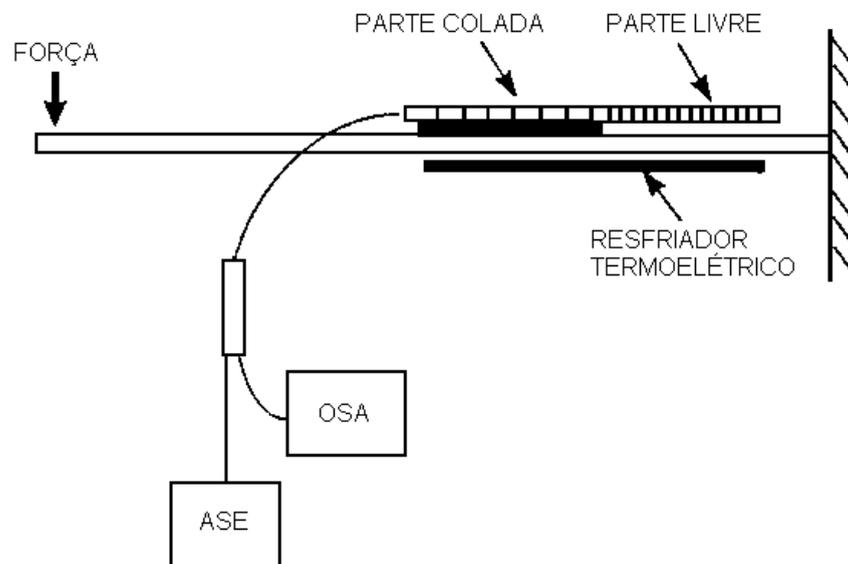


Figura 3.2 – Configuração experimental de um sensor de tensões com compensação de temperatura em que uma parte da rede é colada sobre a placa. A diferença no comprimento de onda de Bragg após a colagem é de aproximadamente 0,4 nm.

As variações no comprimento de onda de Bragg das seções colada (C) e livre (L) são descritas respectivamente pelas equações:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \Big|_C = \left[1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right] \Delta\epsilon_{TM} + \frac{(\partial n / \partial T)}{n} \Delta T \quad (3.8)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \Big|_L = \frac{(\partial n / \partial T)}{n} \Delta T \quad (3.9)$$

onde $\Delta\epsilon_{TM}$ é a deformação termo-mecânica e é dada por $\Delta\epsilon_{TM} = \Delta\epsilon_p + \alpha_p \Delta T$. $\Delta\epsilon_p$ é a deformação da placa e α_p é o coeficiente de expansão térmica da placa.

O método é relativamente simples para análises de tensão e temperatura simultâneas, porém existem discrepâncias entre os resultados obtidos com os sensores a fibra e transdutores elétricos descritos nesse trabalho. Essas discrepâncias foram associadas principalmente a imperfeições mecânicas, entre a placa e a seção colada do sensor, entre a placa e a parte livre do sensor e incerteza nas propriedades termo-mecânicas do adesivo.

3.2.3 Redes em fibras afuniladas

Xu *et al.* [1995] propuseram um método utilizando uma rede com gorjeio em uma fibra afunilada, produzindo um dispositivo em que a largura de banda é uma função da tensão aplicada devido ao gradiente de tensão que foi introduzido ao longo do comprimento da rede. A figura 3.3 mostra um diagrama esquemático do arranjo experimental utilizado. A rede com gorjeio em uma fibra afunilada foi obtida por meio de corrosão diferencial ao longo do comprimento da rede.

A largura de banda de reflexão é independente da temperatura, mas depende das tensões aplicadas na fibra devido à variação na seção transversal. Assim, os valores da tensão aplicada podem ser obtidos através das medidas na largura de banda da rede

enquanto que os valores de temperatura podem ser obtidos através das variações no respectivo comprimento de onda. Resolução em tensão de $4,4 \mu\epsilon$ na faixa total de $4066 \mu\epsilon$ foi demonstrada.

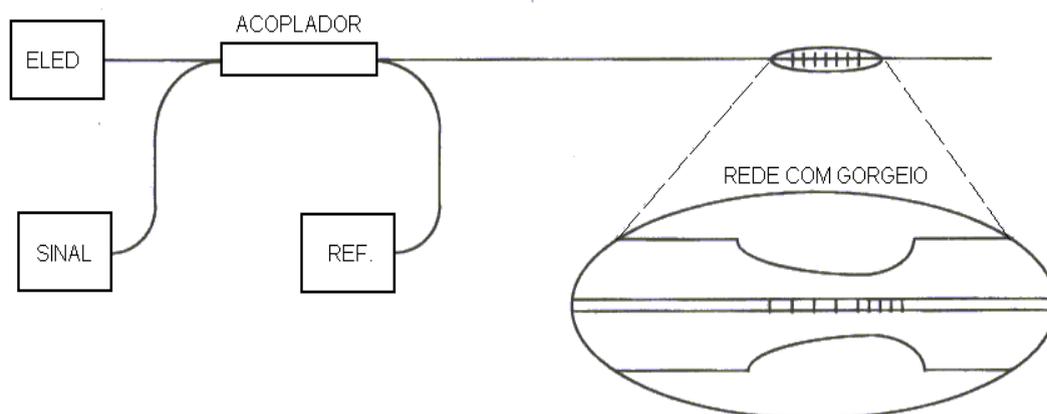


Figura 3.3 – Rede com gorgheio em fibra afunilada por corrosão para medidas de tensão e temperatura. A rede possui largura de banda a meia altura de 2 nm e 20 mm de comprimento e a região afunilada 25 mm com variações no diâmetro entre 125 e 78 μm [Xu *et al.*, 1995].

3.2.4 Sensores híbridos

A técnica é baseada nas diferentes características de deslocamento em comprimento de onda de dois tipos diferentes de sensores. O método foi proposto por Kanellopoulos *et al.* [1995] a partir de dois tipos de redes em fibras óticas, redes de Bragg e conversores de polarização (*polarisation-rocking filters*). O sensor é composto de uma rede de Bragg de 0,7 mm e dois conversores de polarização de 25,5 cm separados pela distância de 2 cm, gravados em uma fibra de alta birrefringência do tipo D (figura 3.4). Como a largura de banda de um conversor de polarização é grande (14 nm) comparado a de uma rede de Bragg (0,7 nm), o objetivo dos dois conversores é a formação de um interferômetro de Mach-

Zehnder, para a determinação com maior resolução de pequenos deslocamentos em comprimento de onda.

Uma das desvantagens desse sensor é o seu comprimento, de aproximadamente 0,5 m, o que é impraticável para muitas aplicações. Para este sensor, erros nas medidas de tensão e temperatura de $\pm 165 \mu\epsilon$ e $\pm 1,5^\circ\text{C}$, foram obtidos.

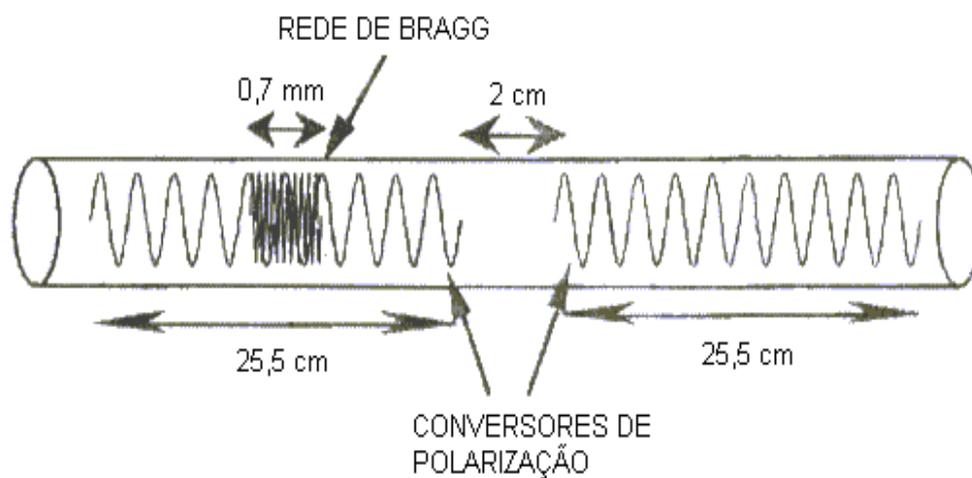


Figura 3.4 – Sensor para medidas simultâneas que utiliza dois tipos de redes em fibras, rede de Bragg e conversor de polarização [Kanellopoulos *et al.*,1995].

3.2.5 Redes em fibras com diferentes características

James *et al.* [1996] descreveram uma técnica para separar medidas de tensão e temperatura usando as respostas de duas redes escritas em fibras de diferentes diâmetros.

As redes, com comprimentos de onda central, de 826 e 837 nm, foram gravadas ao lado da emenda feita com as fibras de diferentes diâmetros, 80 e 125 μm . A figura 3.5 mostra a configuração do sensor.

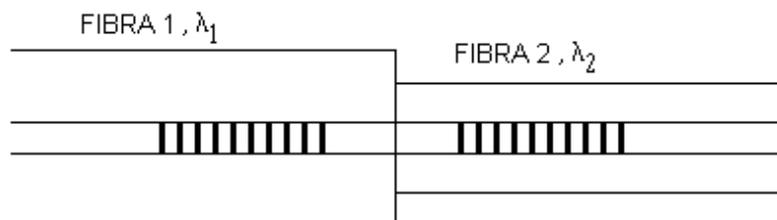


Figura 3.5 – Esquema geométrico do sensor baseado em duas redes de Bragg gravadas em fibras com diferentes diâmetros [James *et al.*,1996].

Os comprimentos de onda centrais das redes de Bragg gravadas nesse sistema precisam ter apenas alguns nanômetros de diferença espectral para obter uma matriz bem condicionada. Esta é uma das vantagens desta técnica, apenas uma única fonte ótica de banda larga é necessária para a análise do sensor. Porém, o processo de fixação do sensor em um substrato deve ser feito com cuidado; pois os pontos de fixação podem afetar as relativas sensibilidades as tensões.

As redes mostram sensibilidades similares à temperatura, mas diferentes respostas de deformação para uma determinada tensão aplicada. Erros máximos de $\pm 17 \mu\epsilon$ e $\pm 1^\circ\text{C}$ foram obtidos nas faixas de medida de $2500 \mu\epsilon$ e 120°C .

Outro sensor descrito por Cavaleiro *et al.* [1999] mostra as medidas simultâneas de tensão e temperatura obtidos com redes de Bragg escritas em duas fibras com mesma geometria, porém diferentes características de dopagem: fibras de sílica dopadas com germânio e fibras de sílica dopadas com germânio e boro.

A figura 3.6 mostra o diagrama esquemático da configuração experimental e uma representação do elemento sensor. O dispositivo é composto pela emenda das duas fibras que possuem redes gravadas com comprimentos de onda próximos (1280 e 1300 nm). Devido à co-dopagem com boro em uma das fibras, o elemento sensor possui mesma sensibilidade a tensões, mas diferentes respostas a temperatura. Erros experimentais máximos de $\pm 18,4 \mu\epsilon$ e $\pm 2,2^\circ\text{C}$ foram obtidos nas faixas de medida de $1000 \mu\epsilon$ e 100°C .

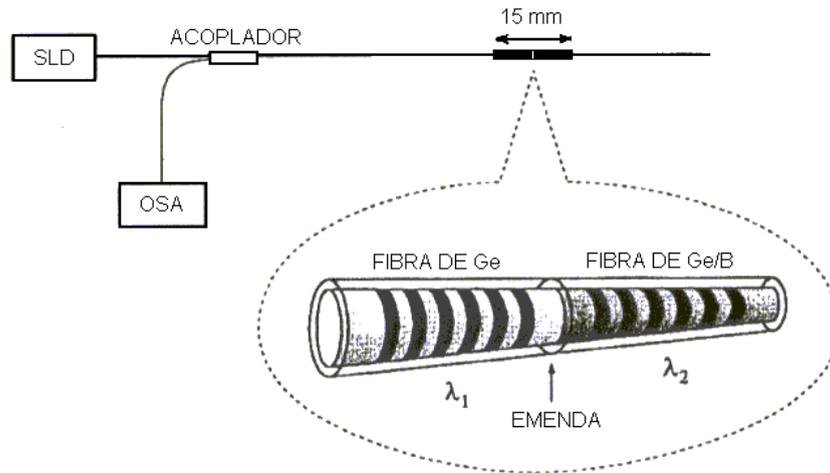


Figura 3.6 – Configuração experimental do sensor simultâneo, baseado nas diferentes sensibilidades de redes escritas em dois tipos de fibras, sílica dopada com germânio e sílica dopada com germânio e boro [Cavaleiro *et al.*,1999].

3.2.6 Cavidade formada por redes de Bragg

O trabalho realizado por Du *et al.* [1999] descreve um sensor curto (5 mm de comprimento), baseado em uma cavidade Fabry-Perot formada por redes de Bragg em linha, GFPC (grating Fabry-Perot cavity). O pico no espectro da luz refletida de um sensor GFPC, além do deslocamento em comprimento de onda, tem sua potência variando linearmente com a tensão longitudinal ou a temperatura. Portanto, medidas do deslocamento no comprimento de onda do pico bem como as variações na potência do pico permitem a determinação simultânea dessas grandezas.

A estrutura do sensor é mostrada na figura 3.7 e consiste de duas redes de Bragg idênticas separadas por uma cavidade curta de comprimento L_C . O espectro de reflexão do sensor, $R_{GFPC}(\lambda)$, é dado por:

$$R_{GFPC}(\lambda) = CR_G(\lambda)F(\phi) \quad (3.10)$$

onde C é uma constante, e $F(\phi)$ é a função de interferência da cavidade:

$$F(\phi)=1+\cos(\phi(\lambda)) \quad (3.11)$$

que é determinada pela diferença de fase $\phi(\lambda)$:

$$\phi(\lambda)=4\pi n_C L_C/\lambda \quad (3.12)$$

entre a luz refletida pelas duas redes. n_C é o índice de refração da cavidade. O espectro de reflexão do sensor é portanto modulado pela variação de fase na cavidade.

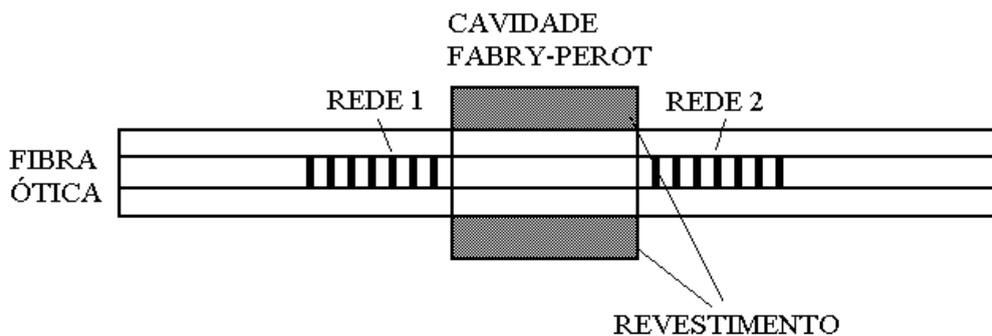


Figura 3.7 – Cavidade Fabry-Perot formada por duas redes de Bragg em fibra óptica. O material de revestimento do sensor (colado sobre a cavidade) possui coeficientes de temperatura e tensão diferentes da fibra [Du *et al.*, 1999].

Os espectros de $R_G(\lambda)$, $F(\lambda)$ e $R_{GFPC}(\lambda)$ de um sensor GFPC são mostrados na figura 3.8 (a). A largura de banda de reflexão zero-a-zero das redes ($\Delta\lambda_{FWFZ}$) é aproximadamente igual a um período de $F(\phi)$, tal que não mais que dois picos aparecem na banda de reflexão principal. Quando o mínimo de $F(\lambda)$ ocorre na banda de reflexão principal, o espectro de reflexão GFPC é dividido em dois picos, um de cada lado do comprimento de onda de Bragg (λ_B). Se este mínimo, λ_{min} , coincide com λ_B a intensidade dos dois picos se tornam iguais.

Entretanto, se as seções da rede e da cavidade tem diferentes coeficientes de tensão e temperatura, λ_B deverá se mover mais rapidamente que λ_{\min} . Isto resulta em uma redução na intensidade do pico 1 e um aumento na intensidade do pico 2 quando a tensão e/ou a temperatura aumentam (vide figura 3.8 (b)). Para que os coeficientes de temperatura e tensão da cavidade sejam diferentes dos das redes, um revestimento com características térmicas diferentes (tubo de alumínio fino) foi aplicado ao redor da cavidade.

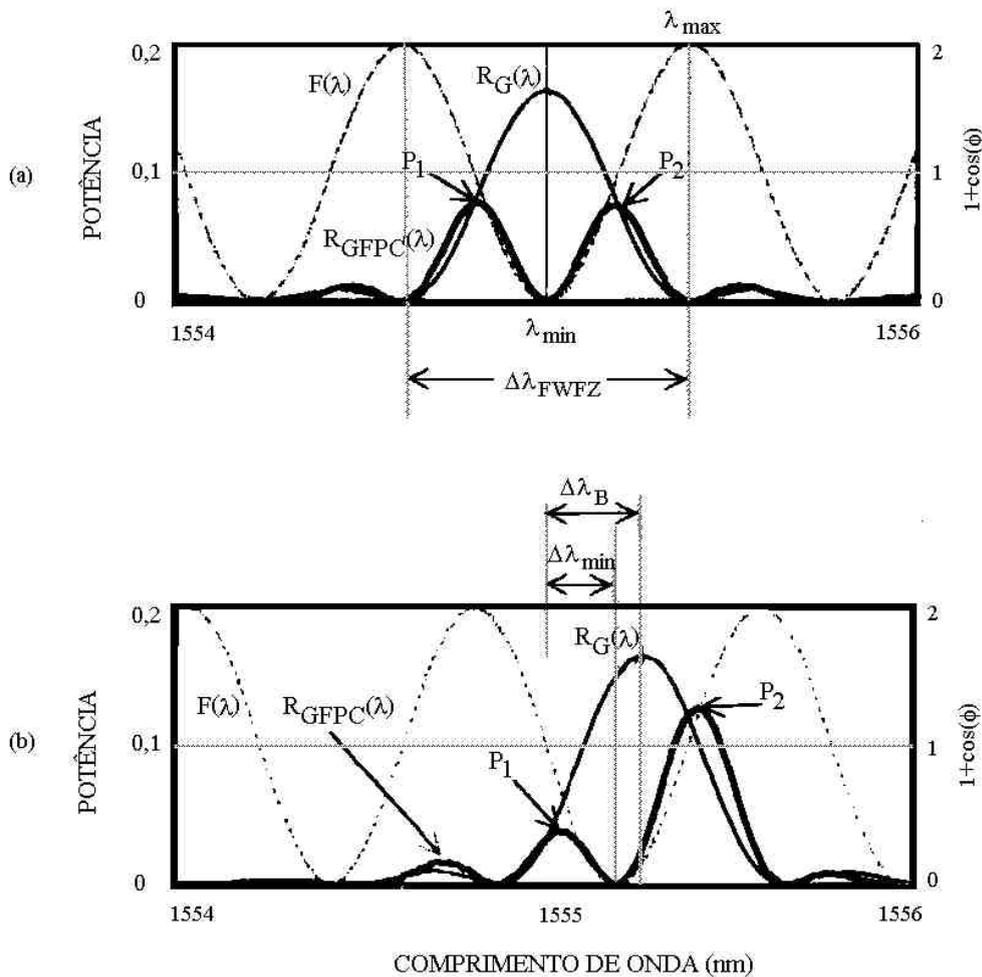


Figura 3.8 - Espectro de reflexão de um sensor GFPC. (a) Picos com mesma intensidade ($\lambda_{\min} = \lambda_B$). (b) Picos com intensidades diferentes com aumento da tensão longitudinal ou da temperatura [Du *et al.*, 1999].

A figura 3.9 mostra, nos resultados obtidos por Du *et al.* [1999] com tensão aplicada no sensor para uma temperatura fixa, os dois picos variando senoidalmente com a tensão.

Os erros obtidos nas medidas de tensão e temperatura foram de $\pm 30 \mu\epsilon$, na faixa de tensão de 0 a 3000 $\mu\epsilon$ e $\pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ na faixa de temperatura de 20 a 60 $^\circ\text{C}$.

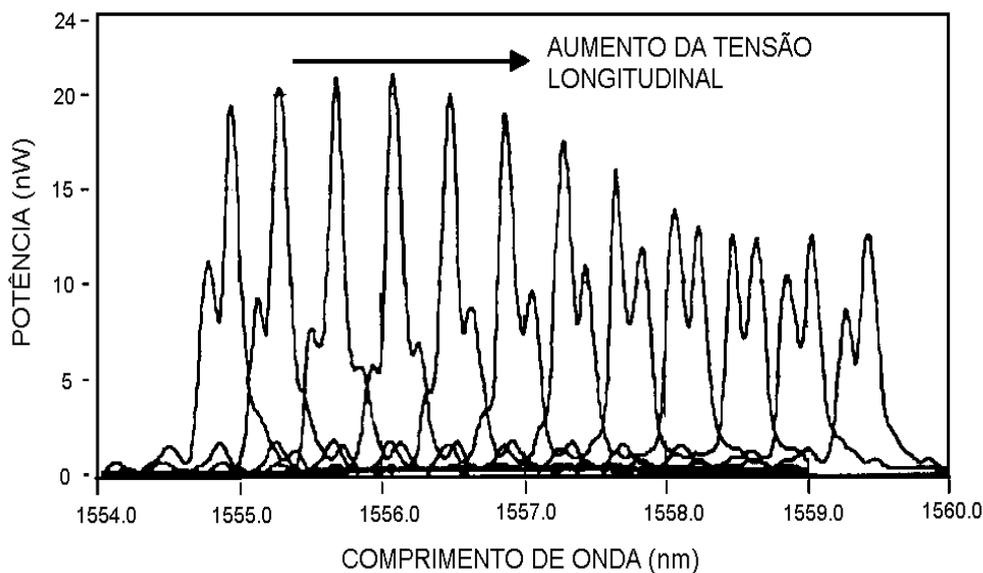


Figura 3.9 - Espectro de reflexão do sensor GFPC com a aplicação de tensão longitudinal [Du *et al.*, 1999].

3.2.7 Redes em fibras de alta birrefringência

Outra técnica para a determinação simultânea de tensão e temperatura é a utilização de uma rede gravada em fibra de alta birrefringência.

As fibras de alta birrefringência, descritas no capítulo 2, possuem índices de refração diferentes, n_x e n_y , e para uma FBG escrita em uma dessas fibras estes

índices definem os comprimentos de onda de Bragg para cada modo de polarização, λ_X e λ_Y .

O princípio sensor consiste na monitoração de variação em comprimento de onda dos dois picos do espectro, $\Delta\lambda_X$ e $\Delta\lambda_Y$, quando a fibra sofre variações de temperatura e tensão simultâneas, pois cada comprimento de onda de reflexão de Bragg tem uma dependência diferente com a temperatura e a tensão. Pode-se escrever então, a equação 3.1 para este sensor:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_X \\ \Delta\lambda_Y \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

onde K é a matriz que contém os elementos de sensibilidade

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\partial\lambda_X}{\partial T} & \frac{\partial\lambda_X}{\partial \epsilon} \\ \frac{\partial\lambda_Y}{\partial T} & \frac{\partial\lambda_Y}{\partial \epsilon} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

A técnica para a determinação simultânea de tensão e temperatura utilizando fibras de alta birrefringência foi descrita por Sudo *et al.* [1997] para uma rede gravada em fibra PANDA. A rede foi gravada através de um laser de excímero e máscara de fase. A fibra PANDA utilizada tem uma birrefringência de $4,5 \times 10^{-4}$ para $1,55 \mu\text{m}$ e o espectro de reflexão da rede possui separação entre as bandas de polarização de $0,46 \text{ nm}$. O espectro de transmissão da rede em fibra de alta birrefringência obtido por Sudo *et al.* [1997] é mostrado na figura 3.10.

As sensibilidades a temperatura obtidas foram de $0,0095$ e $0,0101 \text{ nm/K}$ e as sensibilidades a tensões de $0,001342$ e $0,001334 \text{ nm}/\mu\epsilon$, respectivamente para os modos rápido e lento. A resolução nas medidas de deformação e temperatura foi de $20 \mu\epsilon$ e $2 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente.

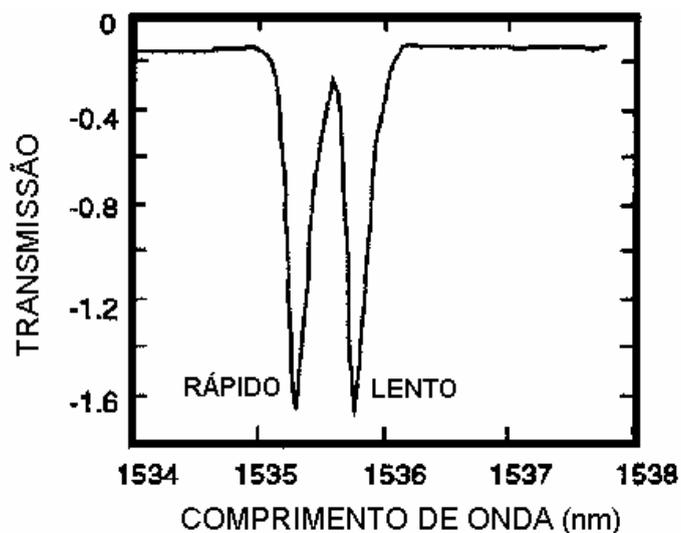


Figura 3.10 - Espectro de transmissão de uma rede de Bragg escrita em uma fibra mantenedora de polarização PANDA [Sudo *et al.*, 1997].

Medidas simultâneas de tensão longitudinal e temperatura usando fibras de alta birrefringência também foram realizadas por Araújo *et al.* [1999] e por Urbanczyk *et al.* [2001]. As duas técnicas são baseadas em redes gravadas em fibras HiBi, porém o que difere os métodos são os processos de demodulação utilizados.

O sistema de demodulação utilizado por Araújo *et al.* [1999] consiste de um interferômetro de Mach-Zehnder todo a fibra, iluminado por uma fonte de diodo superluminescente. O processo consiste nas análises dos deslocamentos de fase correspondentes a cada eixo de polarização. A fibra HiBi utilizada é uma bow tie com birrefringência de 5.5×10^{-4} . A separação entre as bandas de polarização obtidas para uma rede gravada foi de aproximadamente 0,3 nm para a fibra gravada em 1300 nm. As análises foram realizadas mantendo primeiro uma deformação, 511 $\mu\epsilon$, e adquirindo os dados com variação de temperatura até 100 °C, a seguir mantendo uma temperatura fixa de 55 °C adquiriram-se os dados variando a deformação aplicada até 1000 $\mu\epsilon$. Os coeficientes de sensibilidade obtidos para cada banda de polarização mostram diferenças de 5% para a temperatura e 1,5 % para a tensão. Os dados obtidos indicam erros máximos de $\pm 13,5 \mu\epsilon$ e $\pm 1,3$ °C para as medidas de deformação e temperatura.

Na técnica descrita por Urbanczyk *et al.* [2001] o processo de demodulação do sensor FBG em fibra HiBi utilizado é baseado na visualização lateral dos modos LP_{01} e LP_{11} através de uma câmara de CCD. A câmara é utilizada ao invés de um analisador de espectros óticos, devido a análise, que é feita para uma rede em fibra HiBi com dois modos espaciais, LP_{01} e LP_{11} em 850 nm. É necessário nesse caso, um controle sobre qual modo está sendo excitado na fibra sendo testada.

As sensibilidades para deformações longitudinais e temperatura da rede foram determinadas para os modos LP_{01X} , LP_{11X} , LP_{01Y} e LP_{11Y} . Os dados obtidos mostram na faixa de temperatura de 0 a 85 °C variações na sensibilidade para os modos de polarização de LP_{01} de 4% e para LP_{11} de 8 %. Para a sensibilidade em tensão, na faixa de 0 a 1200 $\mu\epsilon$, a diferença é de 2 % para ambos os modos.

Nos projetos descritos acima, apenas a tensão longitudinal é obtida nas medidas simultâneas com a temperatura. Porém, em algumas aplicações, também a determinação das componentes de tensão transversal é necessária para a caracterização precisa de todo o sistema.

3.3 Medidas de tensões transversais

Forças transversais em redes de Bragg têm sido relatados por muitos autores, em fibras padrão de telecomunicações, em dois casos principais: pressionamento em toda a extensão da rede [Mastro, 2000; Kawase *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 2002; Gafsi and El-Sherif, 2000; Wagreich *et al.*, 1996] e pressionamento local, em apenas uma parte da rede [Matos *et al.*, 2001].

Os resultados obtidos para pressionamento sobre toda a rede mostram bandas desdobradas devido à indução de birrefringência (vide figura 3.11). A banda em comprimento de onda menor quase não sofre variação com o aumento da força aplicada, enquanto que a outra banda sofre deslocamento para maiores comprimentos de onda. Entretanto, para cargas aplicadas sobre uma determinada região da rede, o desdobramento provocado pela mudança de fase na estrutura, mostra uma variação

simétrica em comprimento de onda em relação à posição da banda original [Matos *et al.*, 2001].

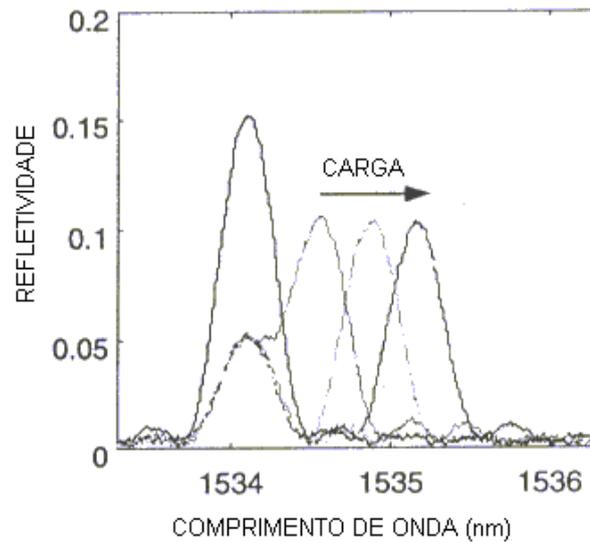


Figura 3.11 - Desdobramento do espectro de reflexão de uma rede de Bragg gravada em uma fibra monomodo padrão (telecomunicações) em função da carga transversal aplicada [Zhang *et al.*, 2002].

A birrefringência das fibras HiBi tem origem na anisotropia da distribuição de tensão intrínseca ao longo da seção transversal da fibra. Devido a essa anisotropia, tensões transversais aplicadas externamente sobre a fibra HiBi provocam mudança em sua birrefringência. Por esse fato FBGs em fibras HiBi têm sido analisadas como sensores, não somente para medidas simultâneas de temperatura e tensão longitudinal, mas também para a determinação de tensões transversais.

Análises de medidas simultâneas de componentes de tensão transversal foram realizadas por Lawrence *et al.* [1999], através um sensor a fibra ótica usando uma rede de Bragg escrita em uma fibra mantenedora de polarização. Esse sensor utiliza uma fibra mantenedora de polarização de casca interna elíptica da 3M (3M-PS-6621) onde a

rede de Bragg foi escrita usando um método interferométrico com uma fonte laser UV de alta intensidade.

Uma rede centrada aproximadamente em 1545 nm foi escrita com um comprimento de aproximadamente 5 mm. A figura 3.12 mostra o espectro de reflexão deste sensor obtido com uma fonte LED de banda larga. Essa figura mostra a estrutura de duplo pico devido à alta diferença nos índices de refração segundo as direções principais da fibra mantenedora de polarização. A caracterização deste sensor foi realizada através de um sistema para aplicações de cargas transversais a fibra e os dados mostram que a resposta do sensor depende da orientação da aplicação de carga em relação aos eixos de polarização da fibra.

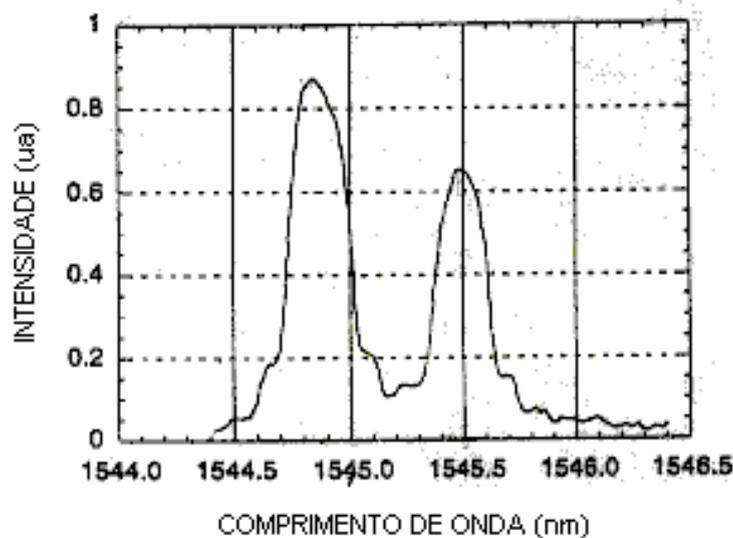


Figura 3.12 - Espectro de reflexão de uma rede de Bragg gravada em uma fibra birrefringente [Lawrence *et al.*, 1999].

Através das medidas de deslocamento do comprimento de onda de Bragg de cada pico, pode-se determinar as componentes de deformações transversais usando a equação 3.7:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_Y \\ \Delta\varepsilon_X \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_Y \\ \Delta\lambda_X \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

O gráfico da figura 3.13 mostra as curvas de sensibilidade obtidas no experimento descrito acima, para cada banda de polarização, com as cargas transversais aplicadas sobre a fibra em diferentes direções.

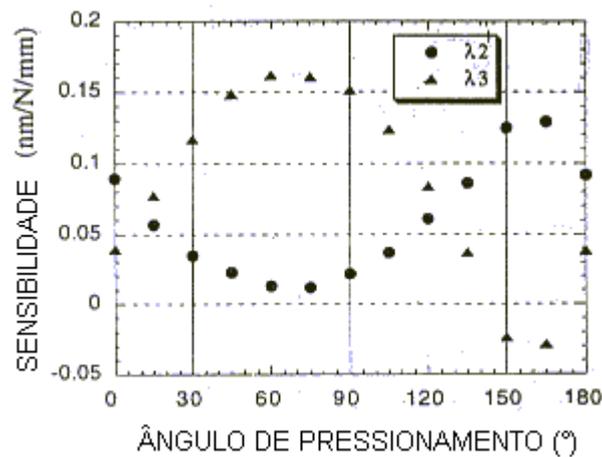


Figura 3.13 – Sensibilidade à variação das bandas de polarização em função do ângulo de pressionamento [Lawrence *et al.*, 1999].

3.4 Medidas de tensões em eixos múltiplos e temperatura

Em muitas aplicações práticas é necessário que o elemento sensor possa ser capaz de fornecer medidas de tensões transversais além da tensão longitudinal e temperatura. No caso geral existem portanto quatro variáveis a serem medidas, deformações ao longo dos eixos principais, transversais, ε_X , ε_Y e longitudinal, ε_Z , e a temperatura, T . Para determinar as quatro variáveis são necessárias quatro observáveis.

Uma maneira para medir os três eixos de tensão e a temperatura simultaneamente é escrever duas redes sobrepostas (em diferentes comprimentos de onda de Bragg) nas fibras birrefringentes, resultando em quatro picos de polarização no espectro de reflexão, pois para cada uma existe um índice de refração efetivo diferente ao longo de cada um dos eixos de polarização. Como os eixos birrefringentes são bem definidos, as deformações transversais, a deformação longitudinal e a temperatura, podem ser obtidos através das quatro equações para as quatro incógnitas. Portanto, a princípio é possível obter quatro variáveis através das variações dos quatro comprimentos de onda, ou seja, determinar os três componentes de tensão e também a temperatura simultaneamente.

Os trabalhos realizados por Udd *et al.* [1997, 1999] mostram os espectros obtidos usando duas redes escritas em fibras mantenedoras de polarização comerciais para 1300 nm e 1550 nm nas medidas de tensões transversais. Para o sistema de demodulação do sensor, são necessárias duas fontes (para cada banda) acopladas por um WDM (vide figura 3.14).

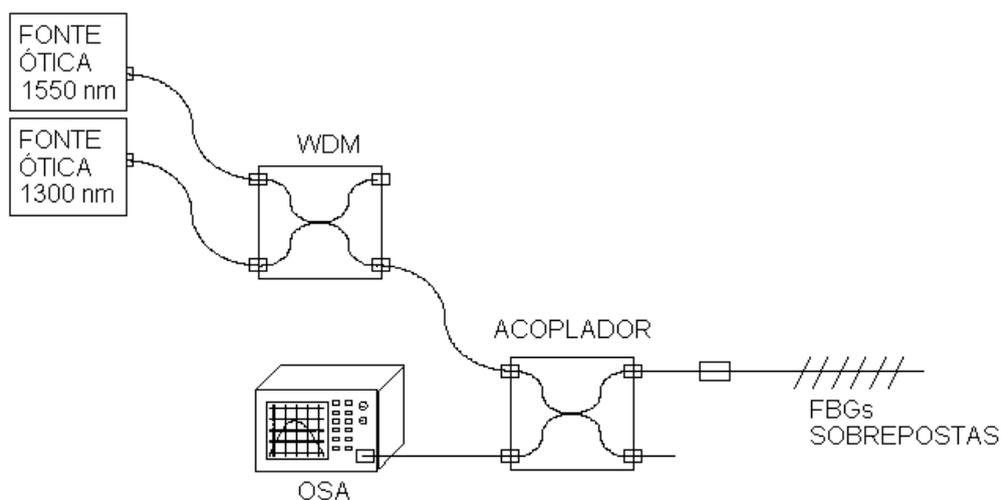


Figura 3.14 – Configuração do sistema de demodulação para o sensor multiparâmetros. O sensor é composto por duas redes em diferentes comprimentos de onda (1300 e 1550 nm), gravadas em uma fibra de alta birrefringência.

Em outro estudo realizado pelo mesmo grupo [Udd *et al.*, 1996], mostram que as redes podem ser escritas em comprimentos de onda próximos, como por exemplo, 1546,5 e 1550,5 nm, apenas uma fonte de banda larga é necessária para o sistema de demodulação do sensor. A figura 3.15 (a) mostra a estrutura de picos duplos obtida com essas redes e o desdobramento por birrefringência da rede em 1550,5 nm pode ser vista com mais detalhes na figura 3.15 (b).

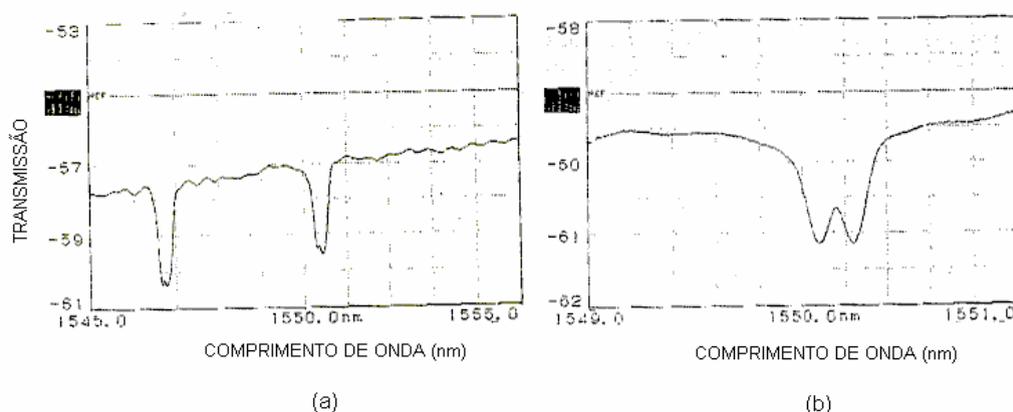


Figura 3.15 - (a) Duas redes de Bragg escritas em uma fibra ótica mantenedora de polarização para a região de 1550 nm. (b) Detalhe da estrutura de pico duplo em 1550,5 nm. [Udd *et al.*, 1996].

Redes superpostas gravadas em comprimentos de onda diferentes nas fibras HiBi podem ser melhor discriminadas devido às diferentes sensibilidades obtidas para comprimentos de onda diferentes. Porém, o custo de demodulação do sensor é maior devido à necessidade de duas fontes óticas de banda larga para as diferentes regiões.

O processo de inscrição de duas redes próximas espectralmente é uma vantagem nesse caso, pois apenas uma fonte de banda larga é necessária para a demodulação de ambos dispositivos. Porém, é necessário que os espectros das redes estejam resolvidos, pois a sobreposição das bandas de polarização devido ao deslocamento espectral em função de grandezas externas poderá restringir a faixa dinâmica, em que o sensor irá atuar.

Outra questão é quanto à orientação da fibra no material de sensoriamento. Estas fibras são simetricamente cilíndricas e marcar a fibra e outros procedimentos apropriados para sua inserção são necessários.

Neste capítulo foram descritos alguns dos principais trabalhos encontrados na literatura sobre medidas simultâneas baseados em redes de Bragg. Quase todos os projetos mostram resultados obtidos para medidas simultâneas de temperatura e deformação longitudinal, incluindo as redes em fibras birrefringentes. Porém, redes escritas nessas fibras também têm demonstrado seu potencial para medidas de deformações transversais, devido às diferentes sensibilidades encontradas em função do ângulo de pressionamento. Além disso, a indicação da possibilidade de análise de mais de dois parâmetros simultâneos, deformação longitudinal, deformação transversal e temperatura, com a inscrição de duas redes sobrepostas em fibras de alta birrefringência, como mostram alguns trabalhos na literatura, motivaram os estudos nessa área. Entretanto, para a utilização das redes em fibras HiBi como elemento sensor é necessário a prévia caracterização destes dispositivos.

Capítulo 4

Gravação e caracterização de redes de Bragg em fibras óticas de alta birrefringência

Um amplo leque de características foi investigado neste trabalho de forma a sistematizar a produção de rede de Bragg nos diversos tipos de fibras HiBi [Abe *et al.*, 2003 (a); Abe *et al.*, 2003 (b)].

As redes de Bragg foram escritas em diferentes tipos de fibras HiBi mantenedoras de polarização com birrefringência intrínseca induzida por tensão, IEC, bow tie e PANDA, com diâmetros externos de 125 e 80 μm .

As redes foram inscritas nas fibras HiBi por métodos distintos de gravação externa descritos no capítulo 2: interferômetro de máscara de fase e gravação direta por máscara de fase, gerando assim, parâmetros diferentes para cada rede, como por exemplo diferentes comprimentos físicos. No processo de inscrição, as fibras HiBi foram previamente hidrogenadas e no trecho onde seria gravada a rede, a casca polimérica de proteção foi retirada.

As respostas obtidas para esses dispositivos, pela ação de agentes externos, principalmente tensões transversais, tensão longitudinal e temperatura são analisadas.

Para minimizar efeitos de birrefringência que poderiam ser geradas nas fibras de conexão e outros componentes, estes foram fixos e após o ajuste inicial procurou-se não mexer

neles. A maior parte das experiências foi realizada com temperatura controlada nos diversos laboratórios.

Um dos principais parâmetros das fibras HiBi investigadas é a birrefringência intrínseca. As medições foram realizadas através das análises espectrais de FBGs gravadas e por incidência de luz polarizada.

4.1 Características das fibras de alta birrefringência

Os códigos e fabricantes dos vários tipos de fibras HiBi investigados nesse trabalho são mostrados na tabela 4.1.

As diferentes características dos elementos de tensão intrínseca das fibras HiBi foram analisadas através das imagens obtidas por um microscópio ótico. A figura 4.1 mostra uma microfotografia da fibra PANDA. Microfotografias das outras fibras podem ser observadas no capítulo 6. Na tabela 4.2 estão dispostos os valores, medidos através das microfotografias, das dimensões dos elementos de tensão internos de algumas das fibras HiBi (vide figura 2.8).

Tabela 4.1 - Modelos das fibras de alta birrefringência e respectivos fabricantes.

Tipo de fibra (modelo)	Fabricante	Comprimento de onda de operação (nm)
IEC (FS-PM-6621)	3M	1300
IEC (FS-PM-7811)	3M	1550
Bow tie (F-SPPC-15)	Distribuída pela Newport	1550
Bow tie (HB-1500G)	Fibercore	1550
PANDA (SM-13-P-7)	Fujikura	1300
PANDA (SM-15-P-8)	Fujikura	1550
PANDA (BF 06734)	OFS	1550

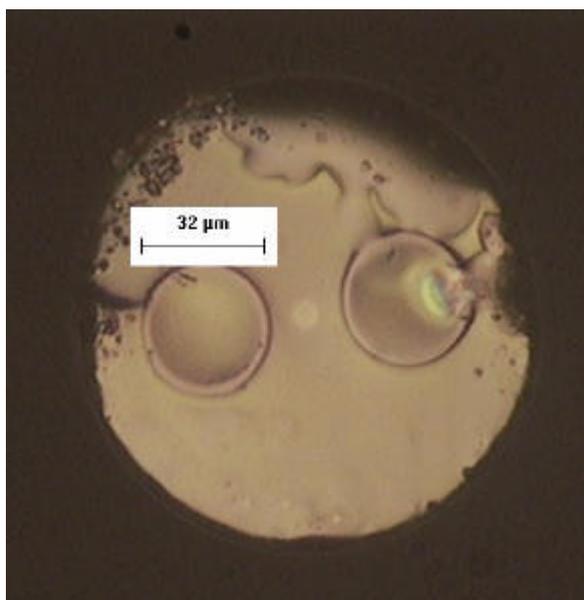


Figura 4.1 - Microfotografia da seção transversal da fibra HiBi PANDA com 125 μm de diâmetro

Tabela 4.2 - Principais dimensões das fibras HiBi obtidos através das microfotografias.

Tipo de fibra (modelo)	Diâmetro de núcleo (mm)	Diâmetro de casca (mm)	Elementos de tensão intrínsecos
IEC (FS-PM-6621)	8	125	Elipse: <ul style="list-style-type: none"> • Eixo maior: 75 μm • Eixo menor: 30 μm
Bow tie (F-SPPC-15)	8	125	Lóbulo da gravata: <ul style="list-style-type: none"> • Largura: 9 μm • Centro do núcleo à borda externa da gravata: 18.4 μm:
Bow tie (HB-1550G)	8	80	Lóbulo da gravata: <ul style="list-style-type: none"> • Largura: 10 μm • Centro do núcleo à borda externa da gravata: 16.5 μm:
PANDA (SM-13-P-7)	8	125	Bastão lateral: <ul style="list-style-type: none"> • Diâmetro: 32 μm • Centro do núcleo à borda externa do bastão: 41 μm:

A birrefringência daquelas fibras foi determinada através da dependência do comprimento de batimento com o comprimento de onda. O processo, descrito no capítulo 2, foi adaptado [Góes *et al.*, 2002] da técnica de varredura em comprimento de onda, que mede o comprimento de batimento através da dependência da diferença de fase entre os dois modos de polarização ortogonais com o comprimento de onda.

Luz de uma fonte de banda larga, polarizada linearmente a 45° com os eixos de birrefringência, é lançada na fibra. O trecho de fibra HiBi foi desenrolado e mantido preso sobre a bancada para minimizar efeitos de birrefringência externa. O espectro resultante, depois do analisador, alinhado na mesma direção, é medido com um analisador de espectros óticos com resolução de 0,1 nm. O diagrama do esquema experimental a fibra ótica é mostrado na figura 4.2. O estado de polarização de entrada pode ser determinado através do polarizador móvel (fabricado pela Anritsu, modelo MPRP 1550 - LAB Series), com direções bem definidas de rotação do SOP alinhados a cada 5° .

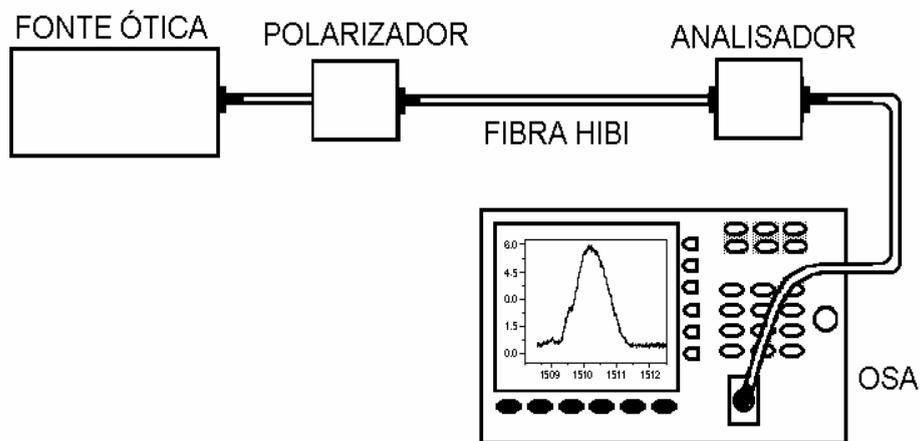


Figura 4.2 – Configuração experimental do sistema todo a fibra para a determinação da birrefringência através do espectro de batimento modal.

Através do analisador é possível selecionar uma componente linear alinhada em relação aos eixos de birrefringência da fibra HiBi. Com polarizador e analisador paralelos com um dos eixos da fibra o espectro de intensidade deverá ser aproximadamente constante e máximo. Girando o analisador até estar perpendicular com aquele eixo da fibra o padrão de intensidades será nulo. Dessa maneira, é possível localizar os eixos de birrefringência da fibra HiBi.

Com o SOP linear da luz lançado a 45° com os eixos de birrefringência, e girando o analisador em relação a esses eixos foi possível obter os espectros mostrados na figura 4.3 (varredura espectral medida no OSA), para uma fibra IEC (FS PM 6621) com comprimento total de 79 cm. O padrão de batimento em função do comprimento de onda para essa fibra (figura 4.4) é obtido para o analisador orientado a 45° com os eixos de birrefringência. Esse padrão é resultante dos diferentes atrasos devido à variação do caminho ótico para cada comprimento de onda (vide seção 2.2.1, capítulo 2).

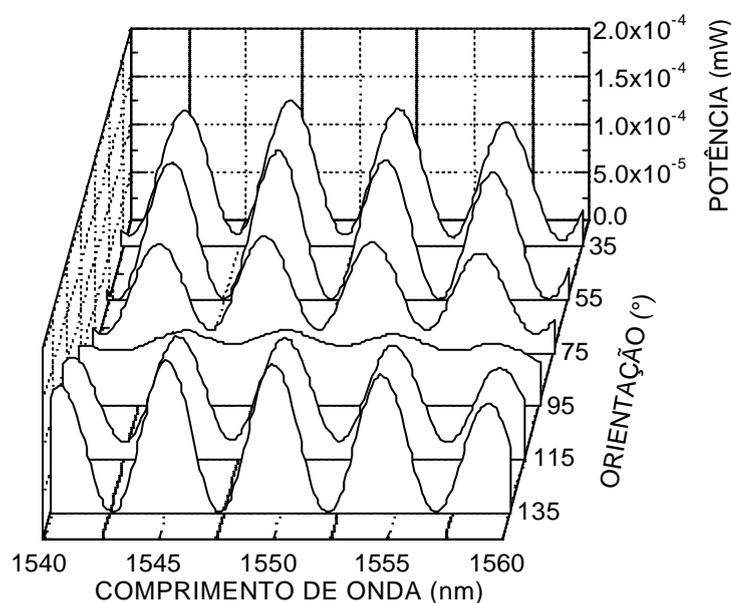


Figura 4.3 - Espectros obtidos em relação à orientação do analisador segundo os eixos de birrefringência da fibra HiBi IEC, com o SOP linear de entrada lançado a 45° dos eixos.

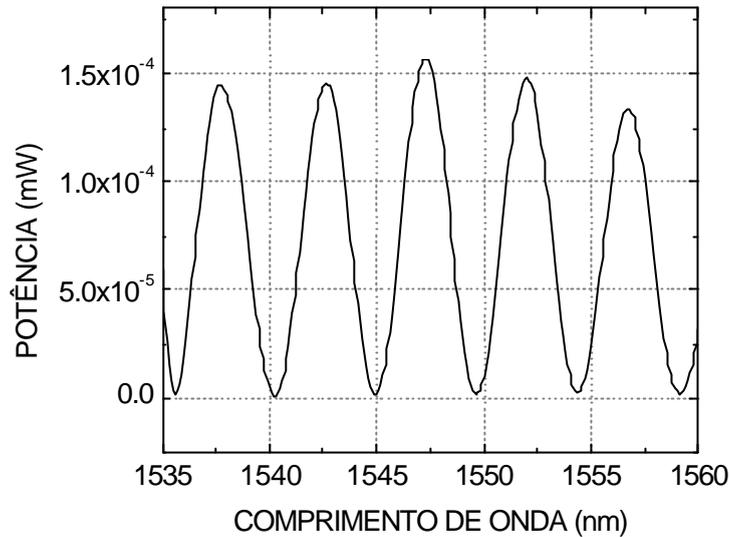


Figura 4.4 - Espectro de batimento modal para o analisador em orientação de 45° com os eixos de birrefringência.

Os valores de birrefringência intrínseca da fibra podem então ser obtidos a partir do período de batimento modal usando a equação 2.25:

$$B_F = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{1}{L_F} \quad (2.25)$$

As fibras HiBi IEC, PANDA e bow tie da tabela 4.1 foram caracterizadas e a tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos. Os valores de birrefringência fornecidos pelos catálogos dos fabricantes também estão inseridos nessa tabela. Valores próximos foram obtidos para as fibras, porém para o caso da fibra IEC a maior discrepância é devido à diferença no comprimento de onda para o qual a birrefringência foi analisada. Para algumas fibras não foi possível realizar essa medida devido à disponibilidade do equipamento (empréstimo).

Tabela 4.3 – Valores de birrefringência de fibras HiBi obtidos através do período de batimento modal e os valores de birrefringência descritos nos catálogos dos fabricantes.

Fibra HiBi (modelo)	B_{BL}	Catálogo
IEC (FS-PM-6621)	$6.53 \times 10^{-4} @ 1550 \text{ nm}$	$4 \times 10^{-4} @ 1300 \text{ nm}$
IEC (FS-PM-7811)	--	$7 \times 10^{-4} @ 1550 \text{ nm}$
Bow tie (F-SPPC-15)	$3.70 \times 10^{-4} @ 1550 \text{ nm}$	--
Bow tie (HB-1550G)	--	$4.5 \times 10^{-4} @ 1550 \text{ nm}$
PANDA (SM-13-P-7)	$4.09 \times 10^{-4} @ 1550 \text{ nm}$	$3.2 \times 10^{-4} @ 1300 \text{ nm}$
PANDA (SM-15-P-8)	$3.87 \times 10^{-4} @ 1550 \text{ nm}$	$3.4 \times 10^{-4} @ 1550 \text{ nm}$
PANDA (BF 06734)	$3.30 \times 10^{-4} @ 1550 \text{ nm}$	$3.1 \times 10^{-4} @ 1550 \text{ nm}$

4.2 Caracterização de redes em fibras de alta birrefringência

FBGs foram inicialmente gravadas nas fibras HiBi através do interferômetro com máscara de fase no IEAv - CTA [Barbosa *et al.*, 2000], descrito no capítulo 2. O comprimento típico das redes escritas por esse método, estimadas a partir da área do feixe de gravação, é de 1,0 - 1,3 mm. As fibras foram previamente hidrogenadas com tempo de exposição médio de 7 dias.

As figuras 4.5 e 4.6 mostram os espectros de reflexão que foram obtidos para as fibras IEC e PANDA, respectivamente. Os espectros foram obtidos utilizando-se uma fonte LED de banda larga e um analisador de espectros óticos com resolução de 0,1 nm.

Os gráficos mostram bandas individuais não completamente definidas, provavelmente devido ao comprimento bastante curto das redes obtidas, pois dependendo das características da rede, vide equações 2.32, 2.33, a estrutura devido à birrefringência pode estar ou não resolvida no espectro ótico da rede.

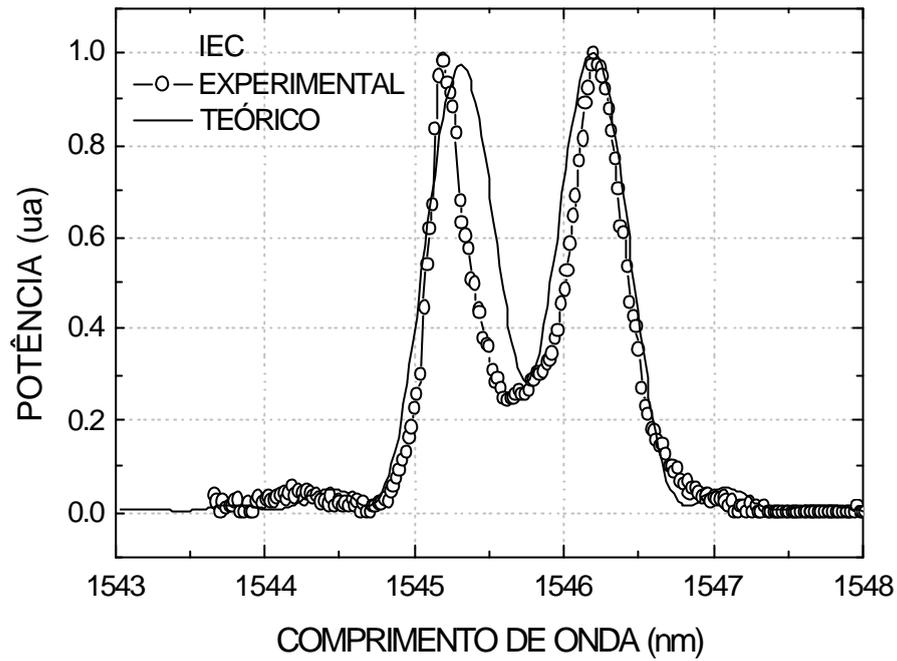


Figura 4.5 – Espectro de reflexão de uma rede escrita pelo método interferométrico em fibra IEC e respectivo ajuste.

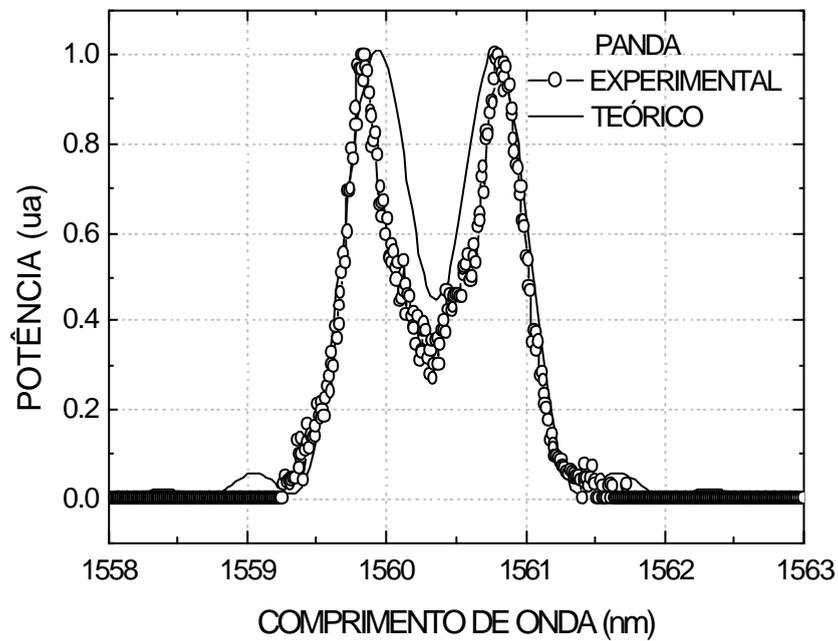


Figura 4.6 – Espectros de reflexão de uma rede escrita pelo método interferométrico em fibra PANDA e respectivo ajuste.

As figuras mostram também as bandas espectrais simuladas usando a equação 2.31, a fim de obter os parâmetros principais das redes e das fibras HiBi pelo melhor ajuste aos dados experimentais [Shenoy *et al.*, 1999]. O comprimento da rede utilizada foi de 1,3 mm. A simulação foi realizada com o ajuste aos dados experimentais tendo maior peso nas bordas externas das bandas.

Os parâmetros principais obtidos pela simulação das bandas, λ_Y e λ_X , são mostrados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros das FBGs curtas escritas em fibras de alta birrefringência pelo método interferométrico obtidos para o melhor ajuste aos espectros experimentais.

Fibras HiBi	Bandas	l (nm)	Dl _{FWFZ} (nm)	n _{eff}	kL	L (nm)
IEC	λ_Y	1545,31	1,28	1,44260	0,18698	535,60
	λ_X	1546,19	1,28	1,44342	0,18676	
PANDA	λ_Y	1559,95	1,3	1,44445	0,18498	539,98
	λ_X	1560,76	1,3	1,44520	0,18479	

As FBGs gravadas com o sistema interferométrico com máscara de fase do CEFET – PR. possuem comprimentos entre 1 e 4 mm, dependendo da abertura da íris interposta no feixe laser de gravação.

O resultado para uma FBG gravada em fibra IEC, com comprimento de rede de aproximadamente 3 mm, obtido da abertura da íris, pode ser visto na figura 4.7. O tempo aproximado de crescimento para as redes é de 15 min, com a fibra hidrogenada durante 10 dias. A figura mostra também as bandas simuladas obtidas para o melhor ajuste, com largura de banda FWFZ de 0,55 nm. O período obtido com a simulação foi de 532 nm.

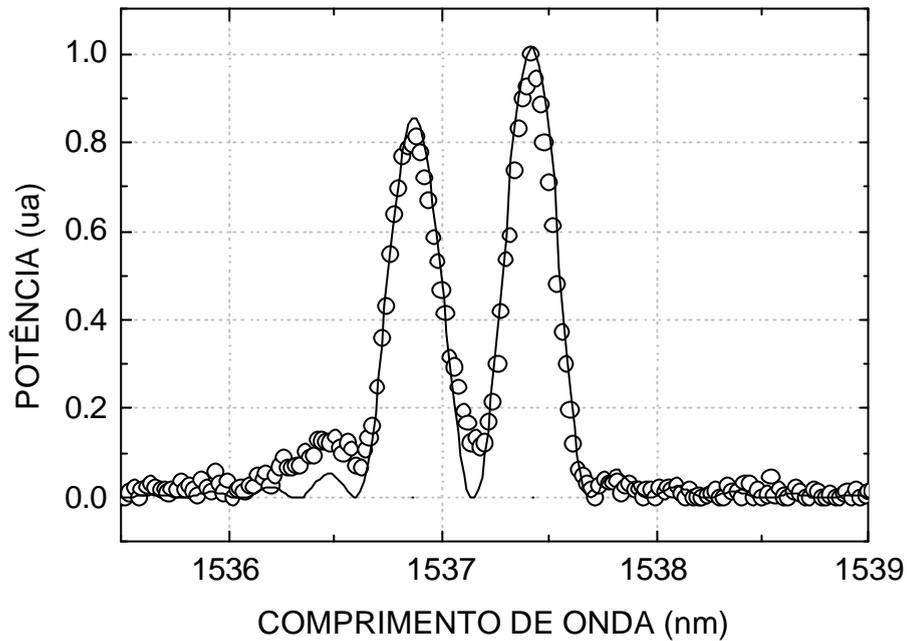
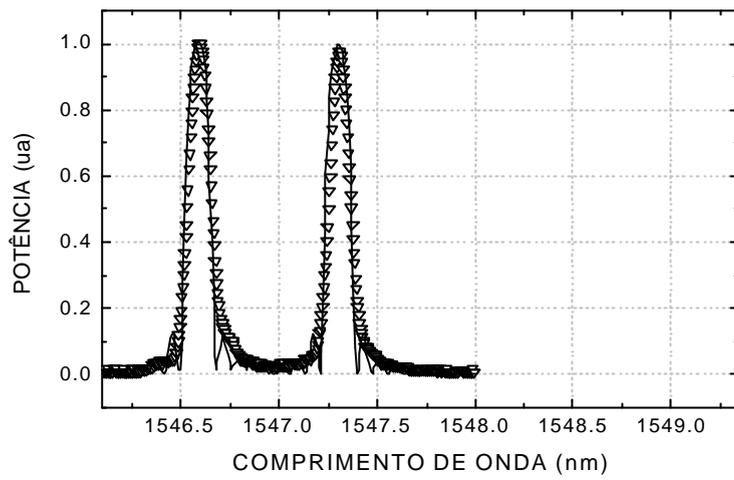


Figura 4.7 – Espectro de reflexão obtido pelo processo de gravação interferométrico do CEFET - PR de uma FBG em fibra HiBi IEC e respectivo ajuste.

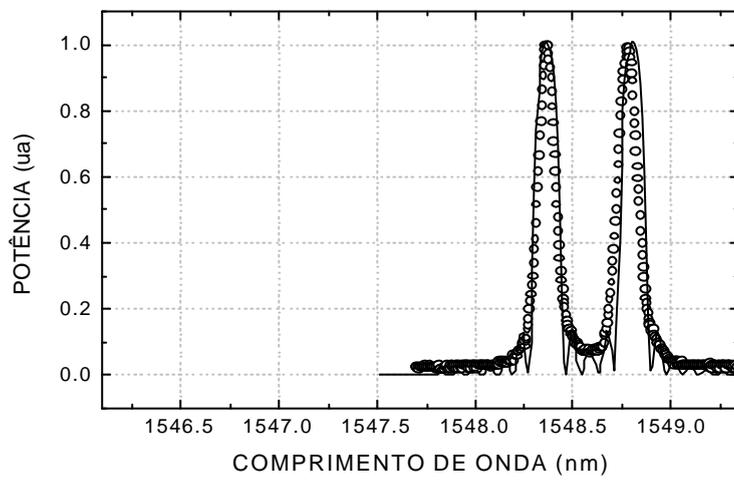
FBGs com comprimentos longos, de aproximadamente 10 mm foram obtidas com a técnica de gravação pelo método direto por máscara de fase. Os espectros de reflexão das redes gravadas em fibras IEC, PANDA e bow tie, de 125 μm , utilizando esse método são mostradas na figura 4.8.

O efeito da birrefringência intrínseca das fibras HiBi pode ser visto nesta figura, onde os espectros mostram que a birrefringência é maior para a fibra IEC, apresentando maior separação entre as bandas de polarização, enquanto que a fibra bow tie apresenta a menor birrefringência. As características dos espectros das FBGs gravadas nas fibras HiBi de 80 μm serão descritas no capítulo 6.

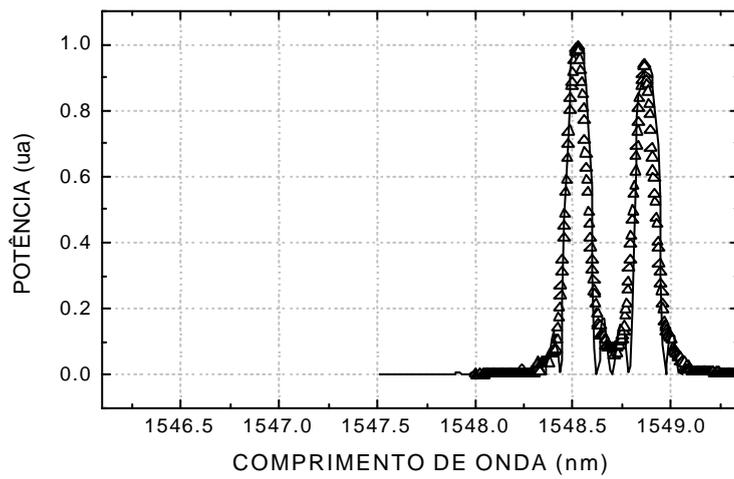
As simulações realizadas também podem ser vistas naquela figura. Os gráficos mostram picos estreitos bastante definidos, devido ao comprimento maior da rede gravada em relação ao método interferométrico. A máscara de fase utilizada para a gravação das redes possui um período de 1070 nm. A tabela 4.5 mostra os parâmetros obtidos com a simulação das bandas.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8 - Espectros de reflexão das redes escritas pelo método da máscara de fase nas fibras IEC (∇), Panda (O) e bow tie (Δ). As linhas representam o melhor ajuste.

Tabela 4.5 – Parâmetros das FBGs longas escritas em fibras HiBi pelo método da máscara de fase, obtidos com o melhor ajuste aos espectros experimentais.

Fibra HiBi	Bandas	l (nm)	Dl _{FWFZ} (nm)	n _{eff}	kL	L (nm)
IEC	λ_Y	1546,57	0,19	1,44539	1,7212	535
	λ_X	1547,29	0,19	1,44606	1,7196	
PANDA	λ_Y	1548,39	0,19	1,44709	1,7172	535
	λ_X	1548,82	0,19	1,44750	1,7162	
Bow tie	λ_Y	1548,61	0,19	1,44730	1,7167	535
	λ_X	1548,95	0,19	1,44762	1,7159	

A tabela 4.6 mostra os valores de birrefringência obtidos pelo melhor ajuste das bandas simuladas ao espectro experimental para as redes curtas e longas. Esses valores para a birrefringência podem ser comparados àqueles obtidos a partir dos espectros de batimento modal e aos valores obtidos nos catálogos dos fabricantes, mostrados na tabela 4.3.

Tabela 4.6 – Birrefringência de fibras HiBi determinadas pelo melhor ajuste do espectro para redes longas, B_{LG} , e para redes curtas, B_{SG} .

Fibra HiBi (modelo)	B_{SG}	B_{LG}
IEC (FS-PM-6621)	$8,2 \times 10^{-4}$ @ 1550 nm	$6,7 \times 10^{-4}$ @ 1550 nm
PANDA (15P8)	$7,5 \times 10^{-4}$ @ 1550 nm	$4,1 \times 10^{-4}$ @ 1550 nm
Bow Tie (SPPC-15)	--	$3,2 \times 10^{-4}$ @ 1550 nm

Os dados obtidos a partir do comprimento de batimento estão razoavelmente de acordo (> 86 %) com os dados determinados pelos espectros para redes longas, porém, uma grande discrepância (~50 %) aparece para os dados obtidos do melhor ajuste das bandas espectrais para redes curtas. A diferença é causada pelo fato de que para estas

redes o comprimento curto não permite uma situação com alto casamento de fase entre os modos de propagação acoplados pela modulação do índice.

Quando luz não polarizada (ou luz polarizada em uma direção arbitrária não coincidente com os eixos de birrefringência) é lançada na rede, o descasamento de fase é maior e isto induz a medida de um comprimento de batimento menor, ou seja, maior valor para a birrefringência (tabela 4.6). Quando luz com um SOP arbitrário é lançada na rede, a resposta depende do comprimento de onda e o espectro de polarização é alargado.

De fato, a forma do espectro das bandas experimentais, é dependente do grau de polarização e da estabilidade da fonte ótica utilizada, principalmente se redes curtas estão sendo analisadas. A figura 4.9 mostra os espectros obtidos para uma FBG em fibras IEC com aproximadamente 1,3 mm de comprimento com a utilização de dois tipos de fontes óticas: a ASE de um amplificador a fibra e um LED. O espectro obtido com o LED mostra bandas de polarização melhor definidas do que o adquirido com a ASE.

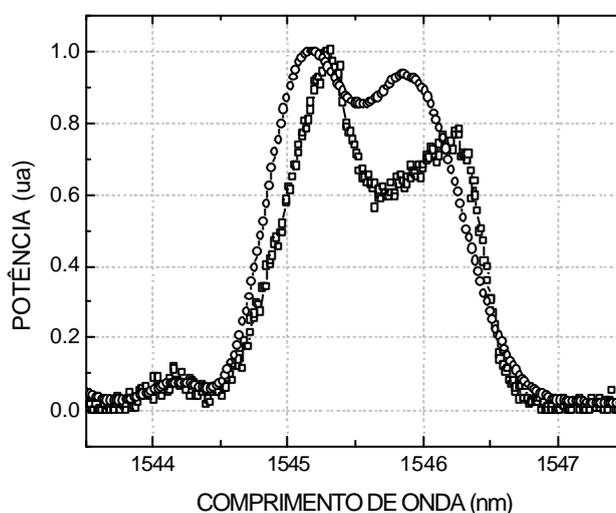


Figura 4.9 - Espectros de reflexão obtidos para uma FBG em fibra HiBi IEC com comprimento curto de 1,3 mm. □ - espectro obtido com a fonte LED. O - espectro obtido com a fonte ASE.

A análise do grau de polarização das fontes óticas foi realizada através de um polarizador como mostra a figura 4.10. Os gráficos obtidos mostram um grau de polarização maior para a fonte LED do que para a fonte ASE (figura 4.11).

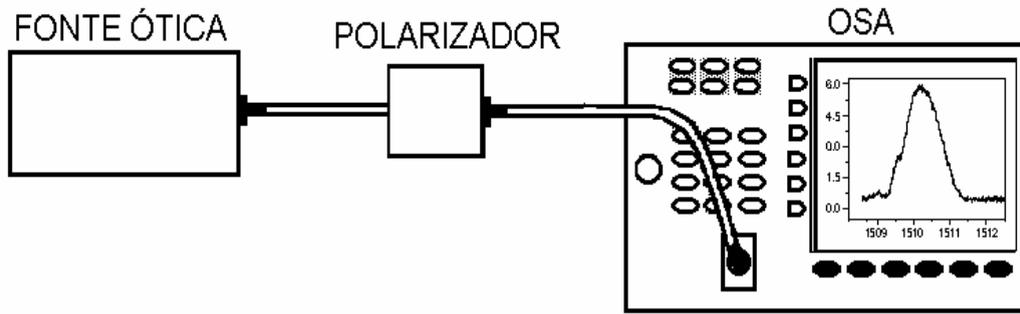
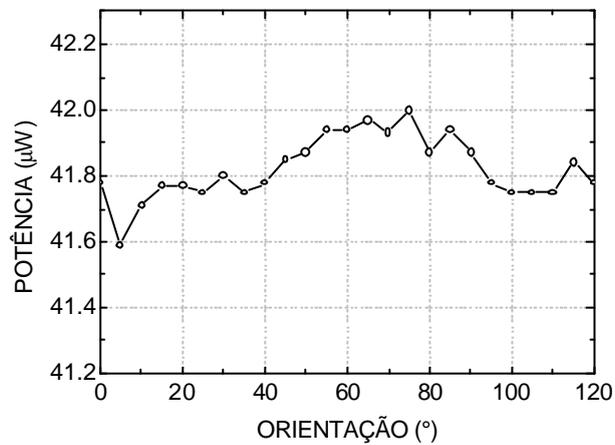
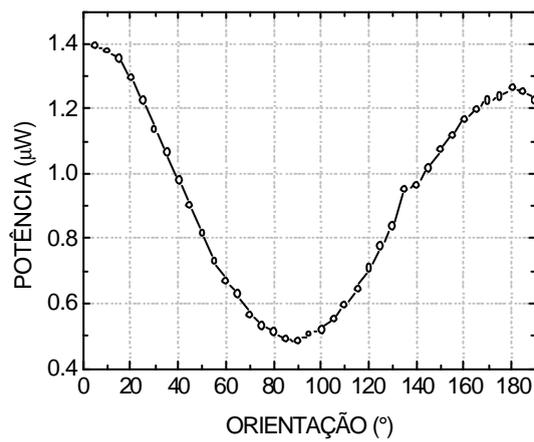


Figura 4.10 - Sistema experimental utilizado para a determinação do grau de polarização de uma fonte ótica. O polarizador funciona como um analisador do SOP.



(a)



(b)

Figura 4.11 - Gráficos de variação de intensidade pela mudança de orientação do analisador, obtidos para as fontes óticas (a) ASE e (b) LED.

A birrefringência efetiva obtida, derivada do comprimento de onda de Bragg para cada banda de reflexão, pode não apresentar o mesmo valor para a rede com comprimentos curtos e longos, produzidas na mesma fibra. A discrepância está parcialmente associada às doses de irradiação UV que não são controladas e não são as mesmas nos sistemas experimentais usados para a gravação. Uma hipótese é que uma dose alta de UV no sistema aumente o índice de refração médio no núcleo em valores diferentes para cada eixo de polarização, resultando em uma modificação diferencial da birrefringência intrínseca da fibra. Essa suposição poderá ser melhor investigada em experiências futuras.

FBGs em fibras HiBi foram caracterizadas através do estado de polarização da luz incidente usando uma fonte de banda larga e um polarizador móvel ou um polarizador fixo e um controlador de polarização (figura 4.12). Dependendo do grau de polarização da fonte e de sua estabilidade apenas um controlador de polarização é suficiente para alinhar o estado linear numa posição qualquer em relação aos eixos de birrefringência.

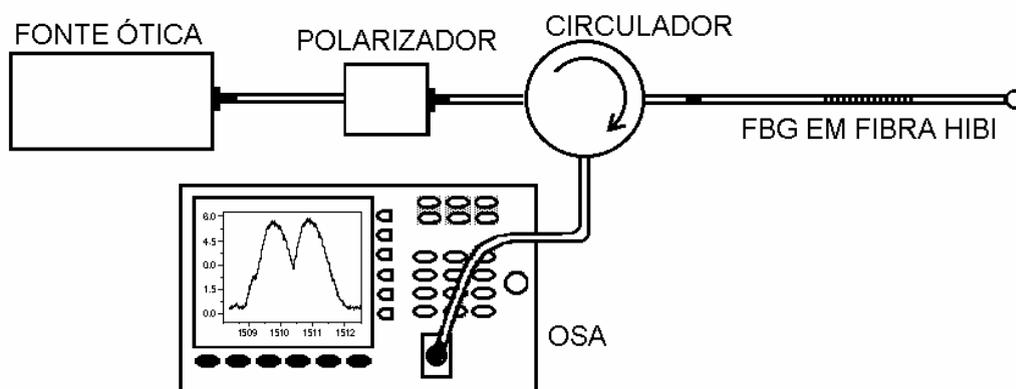
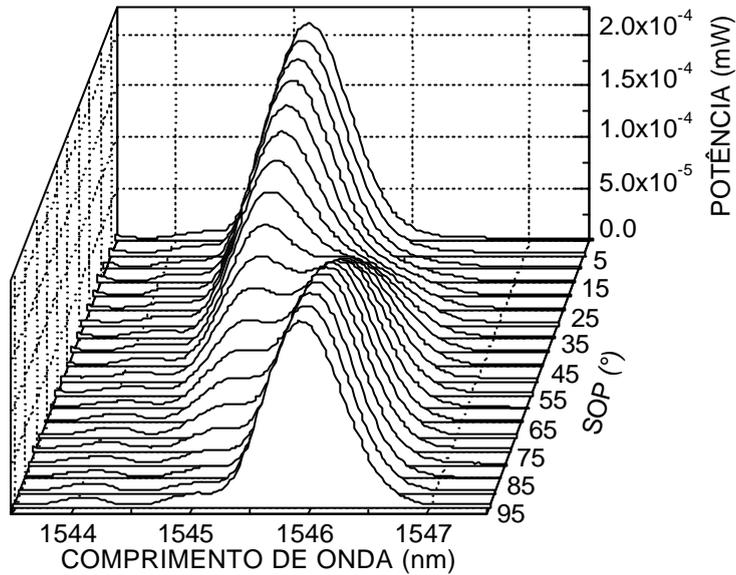


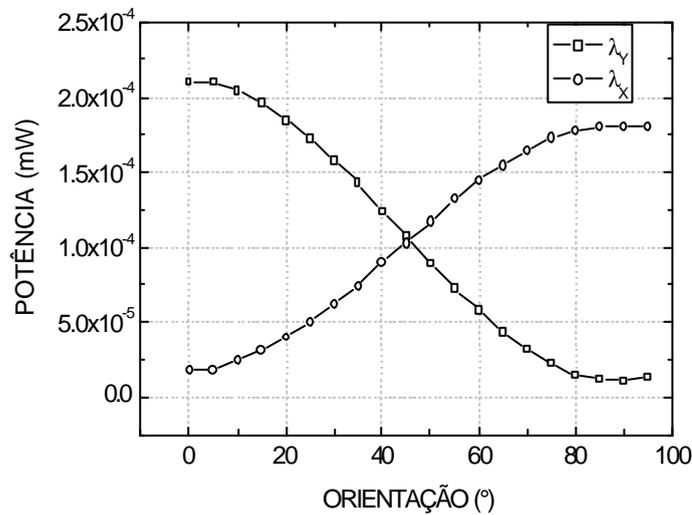
Figura 4.12 - Sistemas utilizados para a caracterização de uma FBG em HiBi. com a variação do estado de polarização incidente.

Com a variação do SOP entre 0 grau (eixo X) a 90 graus (eixo Y), uma das bandas de reflexão é maximizada enquanto a outra é minimizada, como mostram os gráficos da figura 4.13 (a). Os espectros obtidos dão informações sobre a birrefringência da fibra. As curvas da figura 4.13 (b) mostram a variação de intensidade de pico de cada

uma das bandas com o SOP variando naquela faixa. Controlando o SOP de lançamento da luz é possível analisar separadamente cada banda de polarização mesmo com espectros não resolvidos como no caso de redes com comprimentos curtos.



(a)



(b)

Figura 4.13 - (a) Gráficos da variação dos espectros de reflexão de uma FBG em fibra HiBi IEC com comprimento de $\sim 1,3$ mm, em função do estado de polarização (SOP) da luz incidente. (b) Curvas de intensidade obtidas para cada uma das bandas de polarização com a mudança de orientação do SOP de entrada.

A figura 4.14 mostra o espectro para uma rede com comprimento longo em fibra HiBi com as bandas bem definidas. Quando o SOP tem a direção de polarização da luz alinhada com um dos eixos principais da fibra, apenas a banda correspondente está presente no espectro. Para a polarização linear a 45° , ambas as bandas de reflexão estão presentes e possuem aproximadamente a mesma intensidade.

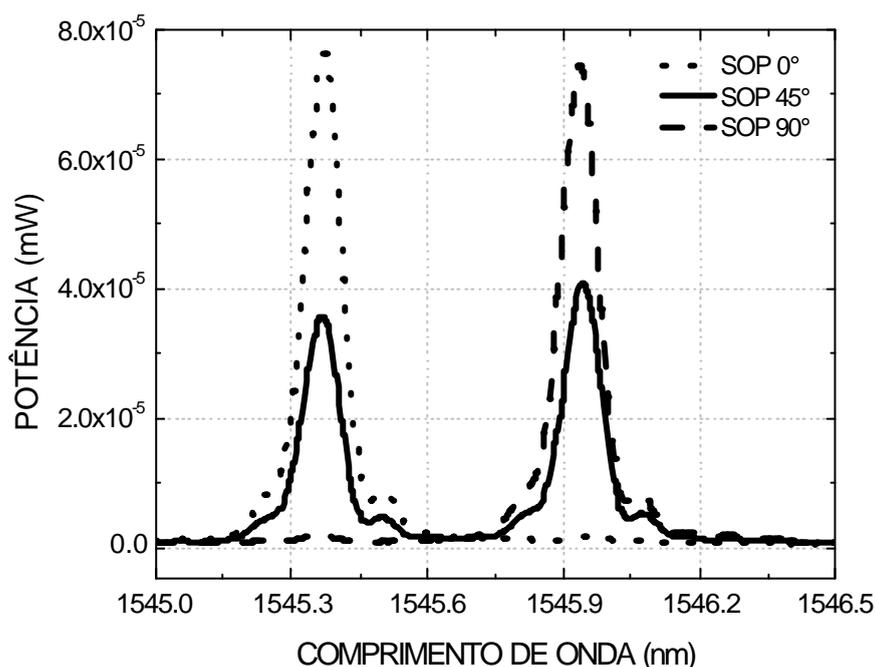


Figura 4.14 - Bandas de polarização do espectro de reflexão de uma rede de Bragg em fibra de alta birrefringência IEC, com comprimento de 10 mm, em função do estado de polarização da luz incidente.

As diferentes características obtidas a partir das análises dos tipos de fibras de alta birrefringência utilizadas e dos parâmetros das redes de Bragg gravadas mostram que é possível obter dispositivos otimizados para aplicações específicas. Além disso, os diversos dispositivos mostraram sensibilidades distintas com a aplicação de grandezas externas.

4.3 Caracterização por deformação e temperatura

O uso das redes de Bragg em fibras de alta birrefringência como sensor de fibra ótica requer a caracterização das propriedades da rede na presença das grandezas a serem medidas, pois a dependência específica dessas propriedades pode induzir diferentes respostas no sistema sensor.

As investigações sobre o efeito de grandezas físicas sobre as FBG em fibras HiBi foram realizadas pelas análises espectrais com a ação de forças transversais e longitudinais à fibra e por temperatura. Diversos sistemas mecânicos foram projetados e empregados nos experimentos, o que possibilitou a formação de uma ampla coletânea de dados, necessários para a caracterização das redes em diferentes configurações de aplicações.

4.3.1 Deformações transversais

Uma das características marcantes das redes escritas nas fibras HiBi é a resposta espectral à aplicação de cargas transversais. Devido à estrutura não homogênea da fibra HiBi, as variações de tensão, para cada um dos eixos principais da fibra, serão diferentes.

Para o pressionamento localizado do sensor inscrito na fibra mantenedora de polarização, através do sistema mecânico, é necessária a determinação do local onde foi inscrita a rede na fibra. Os comprimentos das redes inscritas nas fibras HiBi variam de 1 a 10 mm, dependendo do sistema de gravação (descritos no capítulo 2). A localização da rede foi realizada através de uma varredura pontual por temperatura, sobre toda a região da fibra sem a proteção polimérica. A varredura por temperatura foi realizada utilizando-se a ponta de um ferro de solda com trajetória paralela ao eixo longitudinal da fibra, distanciada de alguns milímetros. Através do sistema de caracterização ótica, o espectro de reflexão da rede foi monitorado. Quando a ponta do ferro se aproxima da região onde está localizada a rede, o espectro se desloca para comprimentos de onda maiores. O ponto de máximo deslocamento é onde está localizada a rede.

Uma pré-localização dos eixos de birrefringência foi realizada através do posicionamento da fibra HiBi em uma máquina de emendas. Através da observação, no microscópio, do padrão de intensidade na lateral da fibra, é possível distinguir as estruturas intrínsecas que compõem as fibras.

As caracterizações por tensões transversais foram realizadas por sistemas mecânicos como mostra o diagrama da figura 4.15. Dois posicionadores de rotação foram colocados no suporte da fibra para a localização dos eixos de birrefringência. A FBG na fibra é posicionada sob o sistema de aplicação de cargas e então pressionada nos pontos próximos aos obtidos com a pré-localização dos eixos. Com a análise dos espectros obtidos por um OSA é possível obter uma localização mais precisa dessas direções.

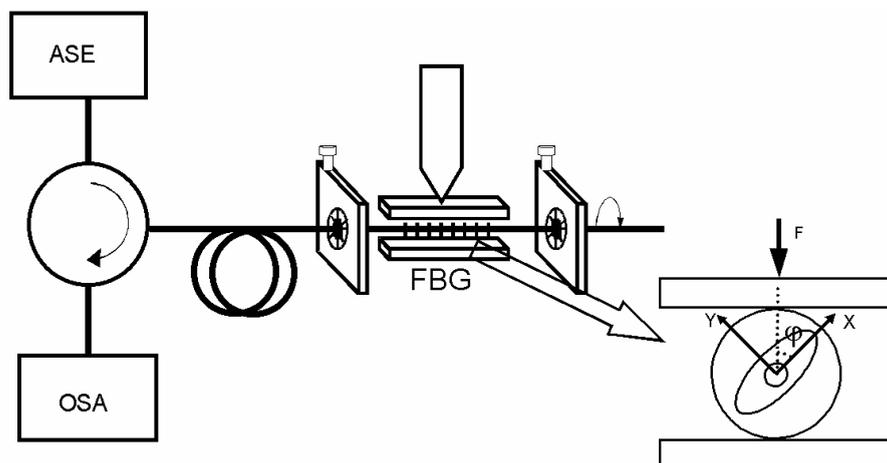


Figura 4.15 – Configuração do sistema óptico de aquisição e de aplicação de tensões transversais sobre a rede. O detalhe mostra o esquema da seção transversal da fibra HiBi, para uma força aplicada F sobre um ângulo de pressionamento ϕ .

Através dos sistemas de caracterização mecânica e óptica, podem ser obtidos os dados de variação do comprimento de onda dos picos espectrais com as cargas de pressionamento aplicadas, para um ângulo determinado em relação aos eixos de birrefringência, ϕ (figura 4.15). O coeficiente angular das retas obtidas da variação do comprimento de onda em relação às cargas aplicadas é a sensibilidade dos picos

($\Delta\lambda_i/\Delta P$, $i=X, Y$) para o ângulo ϕ . O gráfico da sensibilidade dos picos em função do ângulo da carga aplicada deverá exibir uma dependência periódica com a orientação da fibra, com um período de 180° .

Um sistema mecânico construído no laboratório e utilizado para a aplicação de pressão transversal sobre as redes é mostrado na figura 4.16. O comprimento de contato entre a placa de vidro e a fibra é de 10 mm. Duas fibras suportes foram colocadas em lados opostos ao dispositivo a fim de minimizar o escorregamento entre a fibra e as placas de pressionamento. Para cada rede, medidas de deslocamento em comprimento de onda dos dois picos através da aplicação de cargas sobre as fibras (para uma orientação pré-determinada), foram obtidos para a análise de resposta da rede.

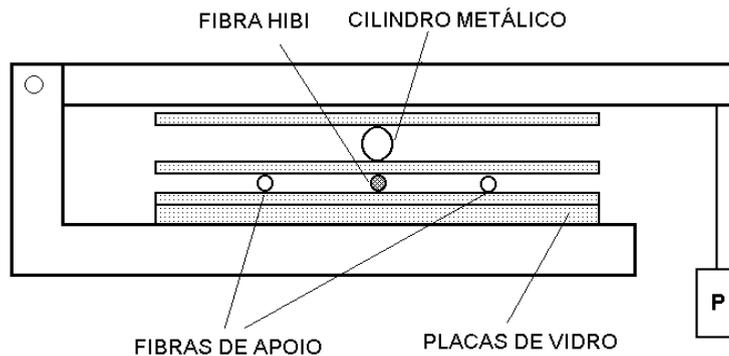


Figura 4.16 - Configuração mecânica para a aplicação de tensões transversais sobre a rede.

Nos primeiros ensaios realizados de pressionamento, redes de Bragg escritas em fibras HiBi PANDA foram submetidas a tensões por esse sistema mecânico. As redes escritas nessa fibra (IEAv - CTA), possuem comprimento aproximado de 1,3 mm e espectro composto de uma banda única de largura de linha FWHM de 1 nm. Nos espectros de reflexão dessas fibras as bandas de polarização não estão resolvidas. É provável que, além do comprimento curto de rede, contribuindo para uma situação pobre no casamento de fase de cada polarização, a constante de acoplamento seja elevada, pois na época não se tinha ainda domínio do processo de gravação. Além disso,

os espectros foram obtidos com a fonte ASE que possui um grau menor de polarização, gerando, portanto espectros menos definidos.

Quando a fibra está sujeita a tensão uniaxial, os espectros não mostram variações até 6 kg. A partir desse ponto o espectro começa a se desdobrar, apresentando um padrão com dois picos não completamente resolvidos, como mostram os gráficos do espectro de reflexão da figura 4.17. Para a máxima massa aplicada, 12 kg, a separação entre os picos experimentais é de 0,8 nm.

A figura 4.18 mostra as curvas obtidas das posições dos picos experimentais com as cargas aplicadas. Pode ser visto que o comportamento não é o mesmo para as duas componentes. Um dos picos se desloca para comprimentos de onda maiores, enquanto o outro pico aparentemente sofre menor deslocamento para comprimentos de onda mais curtos. As cargas comprimem a fibra ao longo de um dos eixos de birrefringência, enquanto simultaneamente induzem uma deformação oposta ao longo do eixo perpendicular. A mudança na birrefringência decorrente das deformações correspondentes contribui para os deslocamentos dos picos nas direções opostas.

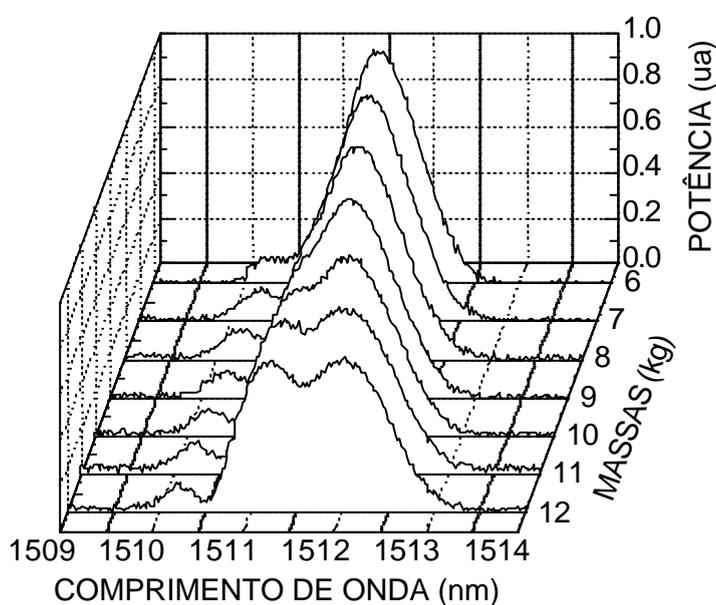


Figura 4.17 - Espectros de reflexão de uma FBG em fibra IEC curta em função das cargas aplicadas.

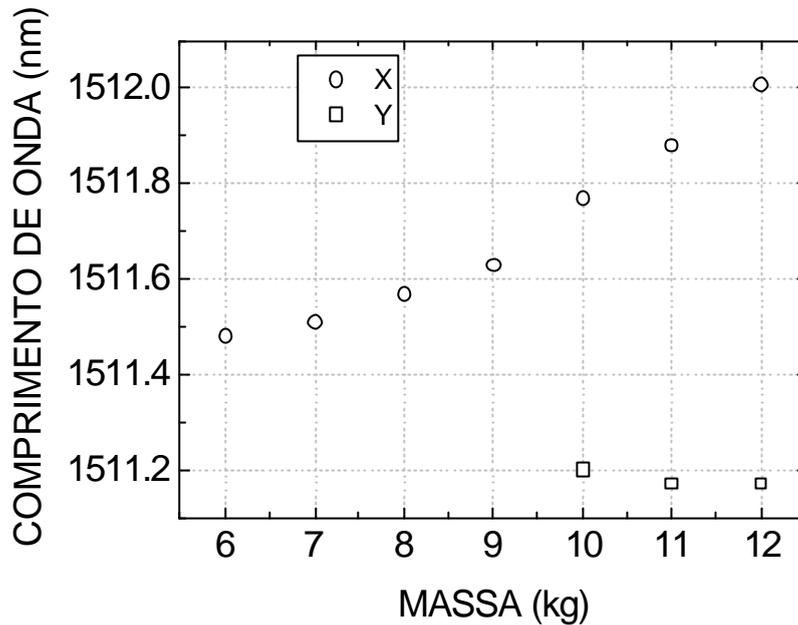


Figura 4.18 - Variação dos picos das bandas desdobradas devido à aplicação das cargas.

Uma análise espectral mais precisa do efeito decorrente das deformações sofridas pelas fibras HiBi com a aplicação de cargas transversais foi realizada através da aplicação de cargas sobre o sensor por um sistema mecânico de “scratch test” (figura 4.19). O diagrama esquemático desse sistema de pressionamento pode ser visto na figura 4.15. O sistema utiliza o indentador como um braço para aplicações de cargas controladas, medidas automaticamente por sensores internos. A rede em fibra HiBi foi colocada sobre dois suportes planos com comprimento de 13 mm, entre duas outras fibras suportes, dispostas paralelamente a FBG, e então submetida a cargas pelo sistema de “scratch test”.

Foram utilizados os dois posicionadores de rotação para o alinhamento dos eixos das fibras segundo um ângulo pré-definido para aplicação de forças.

As redes de Bragg analisadas por esse sistema possuem bandas de polarização bem resolvidas devido ao maior comprimento da rede, 10 mm, e foram escolhidas para uma melhor visualização dos deslocamentos de cada banda de maneira isolada.

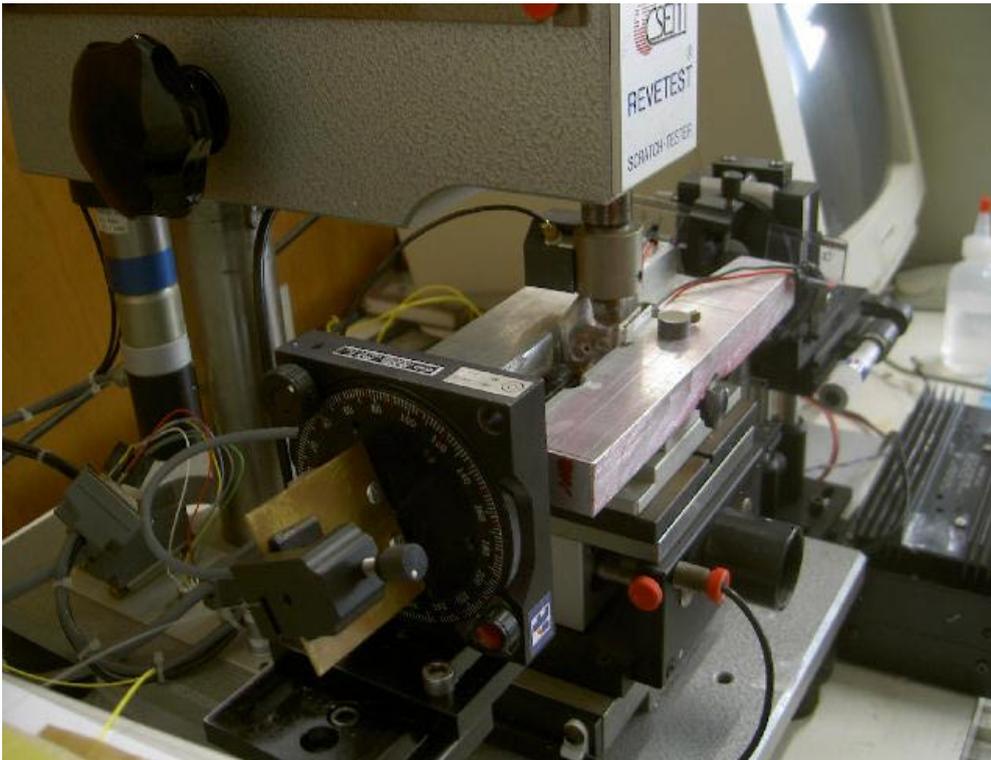
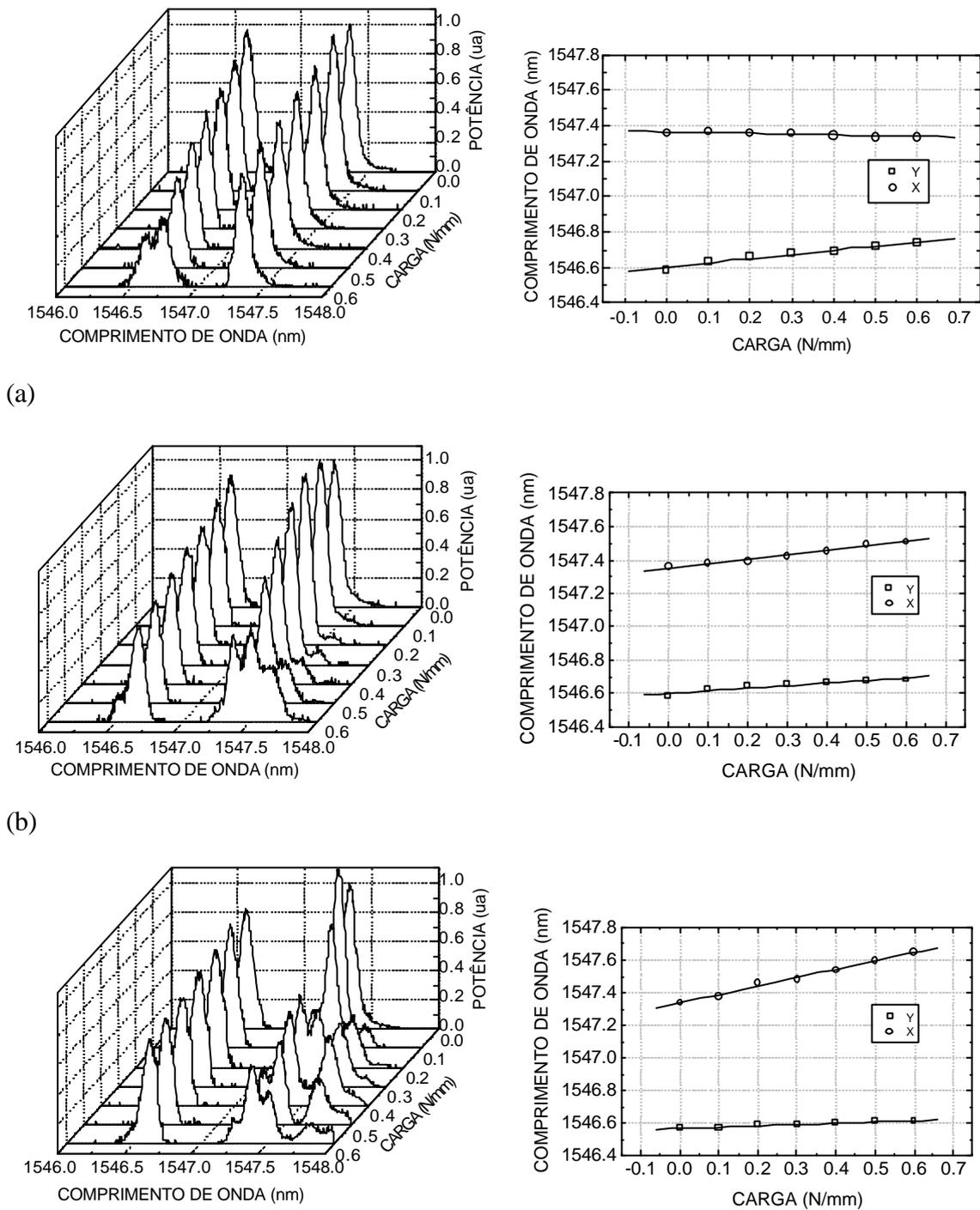


Figura 4.19 - Sistema experimental para a aplicação de cargas transversais e rotacionadores laterais para o posicionamento angular das fibras HiBi.

Para uma FBG gravada em fibra HiBi IEC foram medidos os deslocamentos em comprimento de onda dos dois picos em função da aplicação de cargas sobre as fibras, em orientações pré-determinadas, ϕ , para estudar a sensibilidade do sensor. As figuras 4.20 (a), (b) e (c) mostram os espectros adquiridos em função da carga aplicada ao longo de direções formando ângulos de 0° , 45° e 90° , respectivamente. Também são ali mostrados os gráficos com a evolução dos comprimentos de onda de pico das bandas durante o pressionamento, para as mesmas direções da força aplicada.

Os resultados obtidos mostram que para a aplicação de cargas sob um dos eixos de birrefringência, a banda de polarização do espectro de reflexão da FBG correspondente, sofre pouca variação espectral, enquanto que a banda de polarização oposta possui maior variação espectral, no deslocamento do comprimento de onda e em sua intensidade. Para o ângulo de pressionamento de 45° ambas componentes apresentam variações mais próximas.



(c)

Figura 4.20 - Esquerda: Variações espectrais para direções particulares de aplicação de força: (a) a 0° (eixo X); (b) a 45° e (c) a 90° (eixo Y). Direita: Dependência do comprimento de onda de Bragg com a magnitude da carga segundo aquelas direções de aplicação.

As curvas de sensibilidade obtidas para as duas bandas de polarização, para uma FBG gravada em fibra IEC, são mostradas na figura 4.21. Os gráficos mostram variação periódica das bandas com o ângulo de pressionamento.

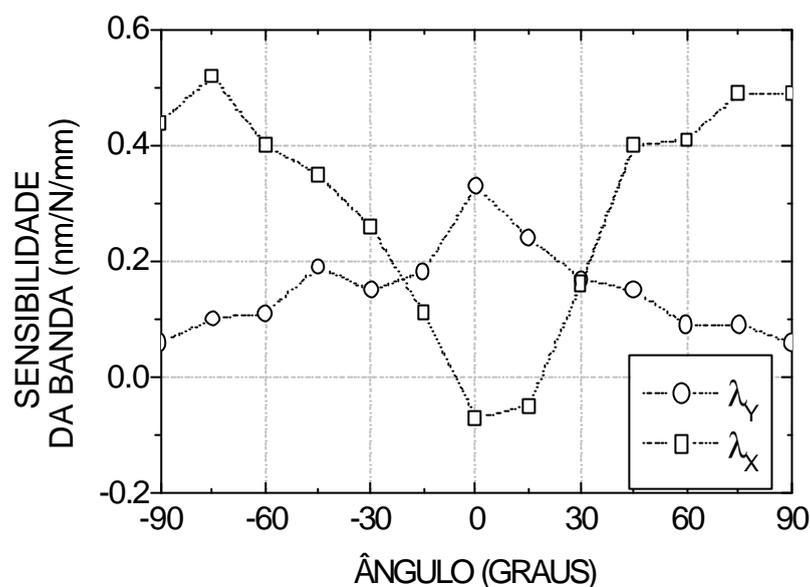


Figura 4.21 – Curvas de sensibilidade para uma FBG em fibra HiBi IEC, do deslocamento espectral de cada banda de polarização, X e Y, induzido por carga aplicada nas diferentes direções.

A resposta espectral pode ainda estar relacionada aos deslocamentos de fase, devido à variação no índice de refração do núcleo com a aplicação de cargas transversais sobre o sensor. Outra hipótese é a variação espectral ser devida à aplicação não homogênea de força sobre toda a extensão da rede. Como o comprimento físico da rede e da placa de pressionamento são relativamente grandes nesse ensaio, na ordem de 10 mm, alterações na distribuição de carga podem ocorrer ao longo da direção longitudinal.

Os desdobramentos nos espectros com as tensões transversais foram observados em todos os ensaios de pressionamento realizados, e o mesmo comportamento foi obtido utilizando outras redes em fibras HiBi, como a PANDA e bow tie.

Para uma análise da variação espectral das bandas em uma faixa maior de cargas aplicadas, foram realizadas medidas com aplicação de carga até 1,33 N/mm. A figura 4.22 mostra os espectros de reflexão obtidos (fonte ótica ASE) com o pressionamento sobre o eixo X para uma FBG em fibra IEC. A banda em comprimento de onda mais curto possui uma variação espectral bastante forte com o aumento da carga aplicada enquanto que a outra banda quase não apresenta variação.

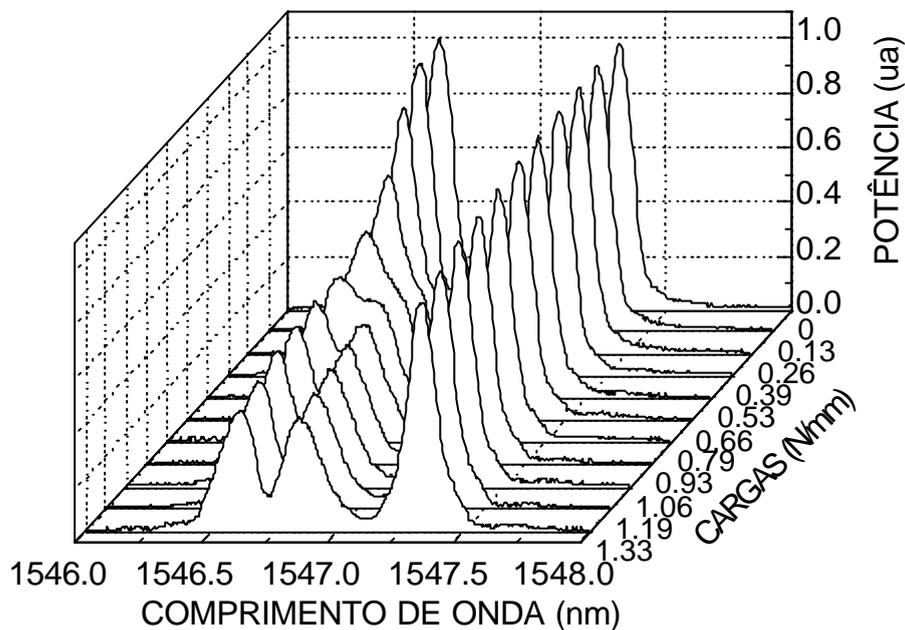


Figura 4.22 – Variações no espectro de reflexão de uma FBG em fibra IEC em função da carga transversal aplicada ($\varphi = 0^\circ$).

A obtenção da reta de calibração com a deformação, para a banda Y, foi realizada com a monitoração dos pontos de máximo (de 0 a 0,39 N/mm), de inflexão (0,53 N/mm) e de mínimo (de 0,66 a 1,33 N/mm). O experimento foi realizado numa temperatura constante de 21 °C. Os coeficientes de deformação, obtidos pela equação 2.39, foram de 1,46 pm/ $\mu\epsilon$ e de 0,21 pm/ $\mu\epsilon$. As curvas de calibração para essas bandas são mostradas no gráfico da figura 4.23.

No gráfico da figura 4.23 é possível observar também as curvas obtidas com o acompanhamento dos picos das bandas laterais, quando o espectro é desdobrado. Para a obtenção desses pontos foram utilizadas duas bandas espectrais simuladas (equação 2.31), superpostas nos pontos iniciais (0,0 - 0,26 nm) para o melhor ajuste aos dados experimentais.

É possível observar também a curva obtida com a evolução dos pontos de vale entre os picos laterais formados. Como pode ser visto naquele gráfico, os valores obtidos nos pontos de vale possuem aproximadamente o mesmo coeficiente angular da reta de calibração para a banda Y e foram utilizados como continuidade desta reta. Esse uso é realçado pelo desdobramento mais simétrico das bandas rotuladas, Y1 e Y2, observado também por outros autores em situações em que a região de pressionamento é inferior à dimensão linear da rede [Trujillo, 2002], resultante de mudança oposta nos valores principais do índice de refração em função das deformações sofridas.

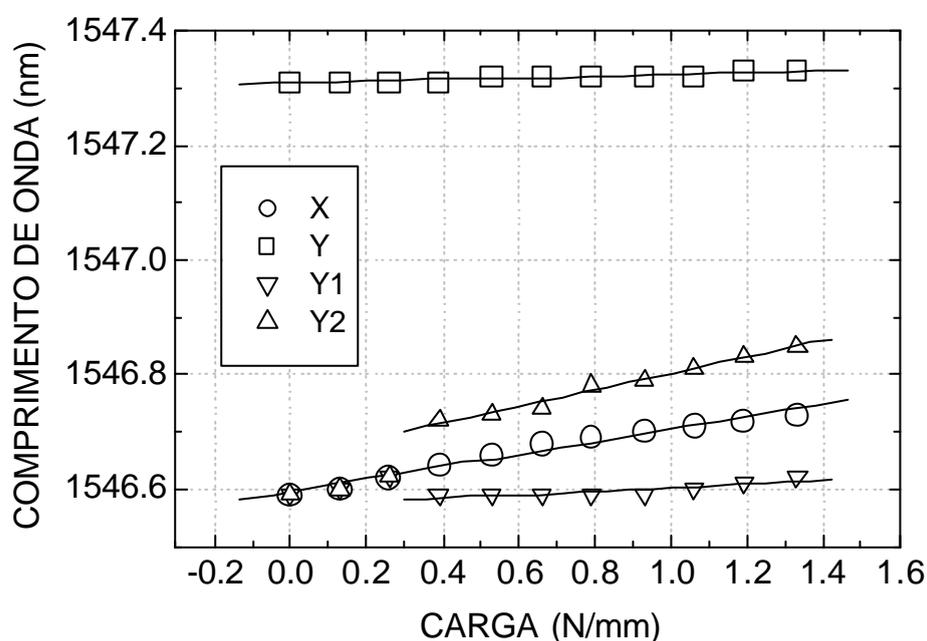


Figura 4.23 – Retas de calibração com a deformação para as bandas X e Y. Os pontos das curvas Y1 e Y2 são para a evolução dos picos desdobrados da banda Y. Os gráficos da figura mostram também as retas de melhor ajuste aos dados experimentais.

A tabela 4.7 resume os valores dos coeficientes angulares e das sensibilidades à deformação para cada uma das bandas de polarização, para as fibras HiBi IEC de 125 μm e PANDA de 125 μm , para duas direções de aplicação da força usando o "scratch test".

Tabela 4.7 – Dependência do comprimento de onda dos picos das bandas de reflexão de FBGs longas em fibras HiBi IEC de 125 μm e PANDA de 125 μm com a direção de força aplicada e a respectiva sensibilidade à deformação (valores em módulo).

Fibra HiBi	Direção da aplicação de carga	Banda de polarização X		Banda de polarização Y	
		Coeficiente angular (nm/N/mm)	Sensibilidade à deformação (pm/me)	Coeficiente angular (nm/N/mm)	Sensibilidade à deformação (pm/me)
IEC 125 mm	$\varphi = 90^\circ$	0.51	7.02	0.07	1.02
	$\varphi = 0^\circ$	0.02	0.29	0.11	1.55
PANDA 125 mm	$\varphi = 90^\circ$	0.46	3.78	0.02	0.24
	$\varphi = 0^\circ$	0.01	0.11	0.13	2.80

Outra configuração utilizada para as análises de deformações transversais nas fibras HiBi, com menor extensão de pressionamento (2,3 mm), é baseada em um parafuso micrométrico de precisão, fixado em suporte metálico, e um cristal piezoelétrico, conforme mostra a figura 4.24. Após uma pré-carga preliminar imposta com o parafuso micrométrico, a deformação da rede é realizada através da aplicação de tensão elétrica contínua no piezoelétrico.

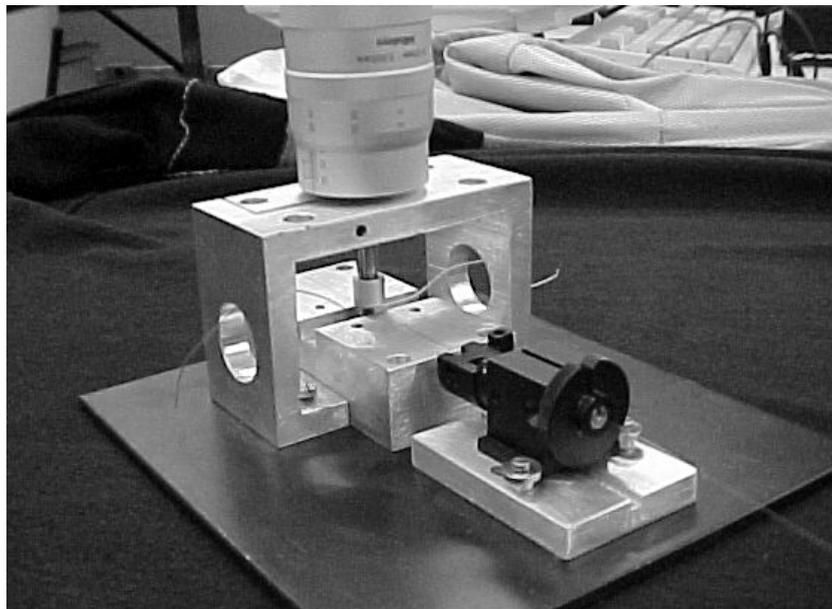
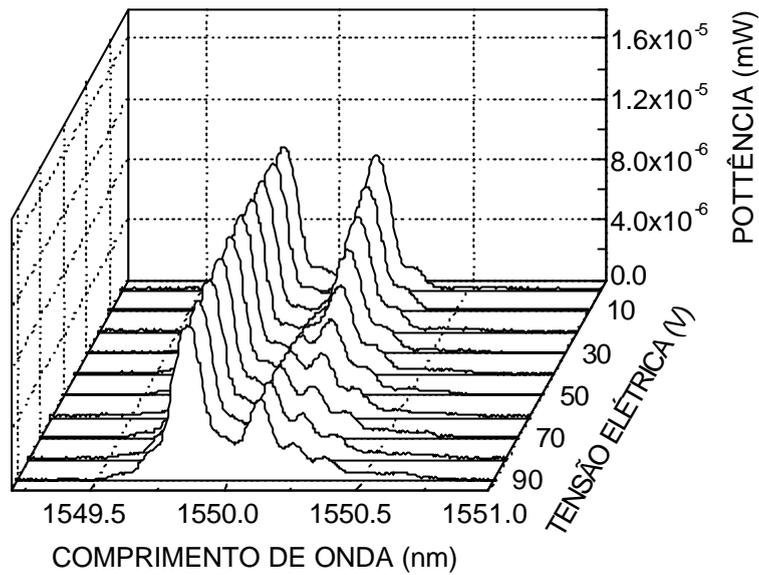


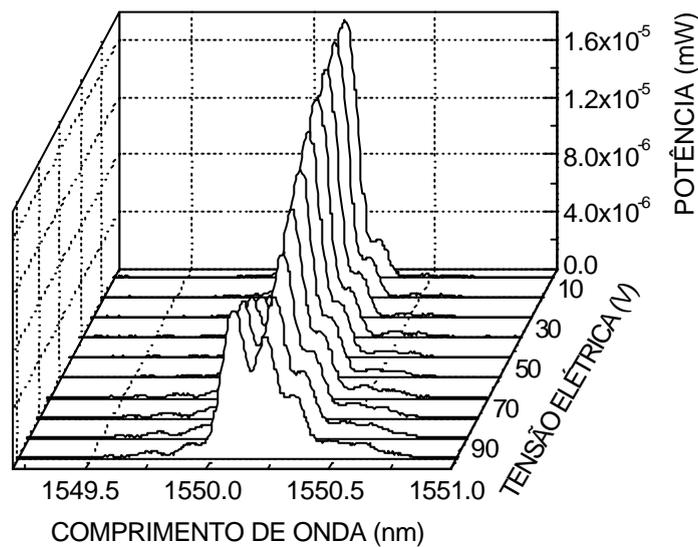
Figura 4.24 - Sistema de pressionamento baseado em um piezoelétrico. Comprimento de deformação 2,3 mm.

Redes de Bragg em fibra HiBi bow tie com 10 mm de comprimento foram pressionadas pelo sistema piezoelétrico. Como o comprimento de pressionamento é menor, as redes não sofrem deformação ao longo de toda a sua extensão. Os ensaios foram realizados para um determinado estado de polarização de entrada. A figura 4.25 (a) mostra os espectros de reflexão obtidos aplicando cargas com o piezoelétrico, para um SOP de entrada alinhado a 45° . Os gráficos mostrados na figura 4.25 (b) são para a mesma direção de pressionamento e valores de carga, porém para um estado de polarização linear a 0° no lançamento.

Os valores de tensão elétrica no piezoelétrico poderão ser convertidos para unidades de força com a utilização de células de carga pré-calibradas, porém tal procedimento não foi realizado nesses experimentos pela inexistência destes equipamentos nos laboratórios até a conclusão deste trabalho.



(a)

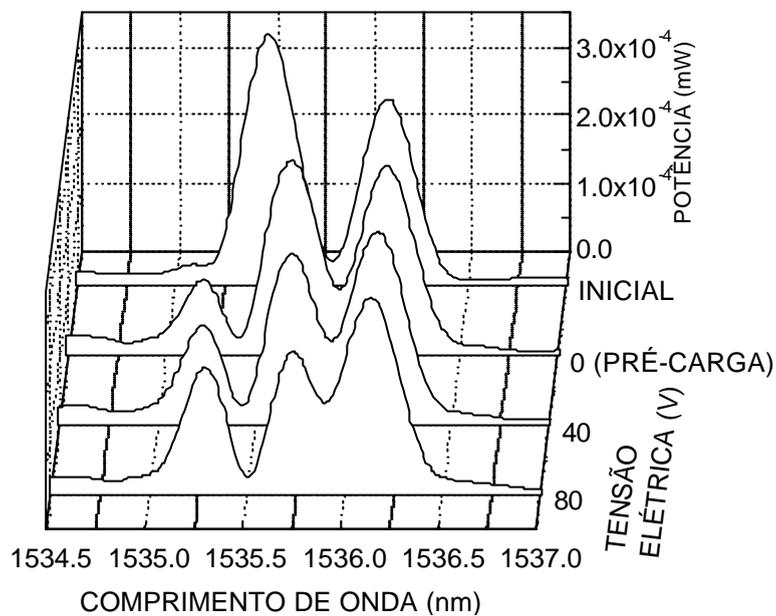


(b)

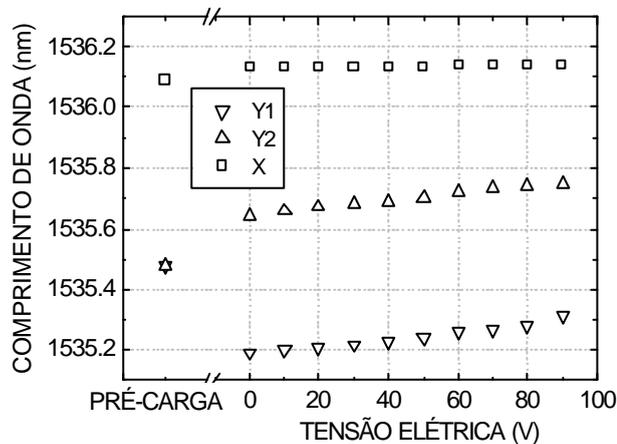
Figura 4.25 - Bandas de reflexão de uma FBG em fibra bow tie de 10 mm de comprimento com o pressionamento em apenas uma parte da extensão, 2,3 mm, para os estados de polarização linear de entrada alinhados a: (a) 45° e (b) a 0° .

Redes de Bragg de comprimento curto (~ 1 mm) também foram caracterizadas pelo sistema de pressionamento com piezoelétrico, para investigar a existência de não homogeneidades na área de aplicação de cargas. Porém, mesmo com a utilização de

redes e áreas de pressionamento menores, verifica-se o desdobramento de uma das bandas com aplicação de cargas, como mostram os gráficos na figura 4.26 (a) e (b).



(a)



(b)

Figura 4.26 - (a) Evolução espectral das bandas de reflexão de uma FBG de ~1 mm em fibra HiBi IEC com o pressionamento. (b) Valores do comprimento de onda de pico das bandas de reflexão e curvas obtidas após a pré-carga com o aumento da tensão elétrica no piezoelétrico. Os pontos das curvas Y1 e Y2 são para a evolução dos picos de desdobramento.

4.3.2. Deformação longitudinal

Caracterizações através da aplicação de forças longitudinais nas FBGs em fibras HiBi foram realizadas através do sistema de polia mostrado na figura 4.27. A fibra HiBi com a FBG é presa em um suporte fixo e após a polia, massas graduadas são suspensas. A polia possui um coeficiente de atrito pequeno, assim, os pesos podem ser relacionados diretamente às trações na fibra.



Figura 4.27 - Sistema mecânico para a análise de deformações longitudinais em relação às forças aplicadas nas FBG em fibras HiBi.

As curvas no gráfico da figura 4.28 mostram os valores de variação dos picos das bandas de polarização com os pesos aplicados. Como esperado, há o deslocamento dos picos para comprimentos de onda maiores, porém não há variação da birrefringência com o aumento da força longitudinal.

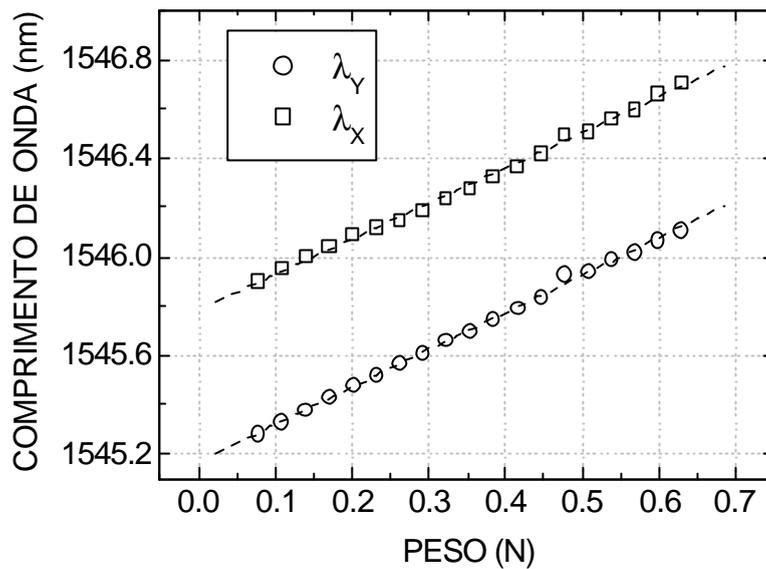
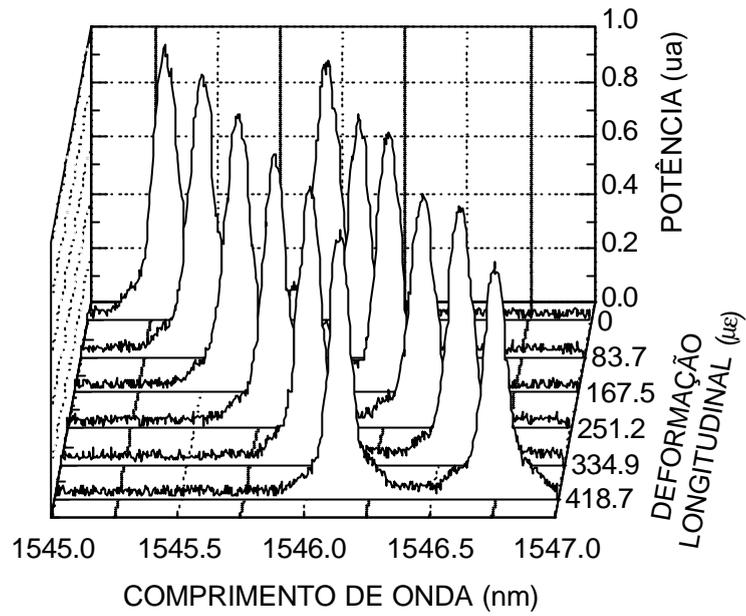


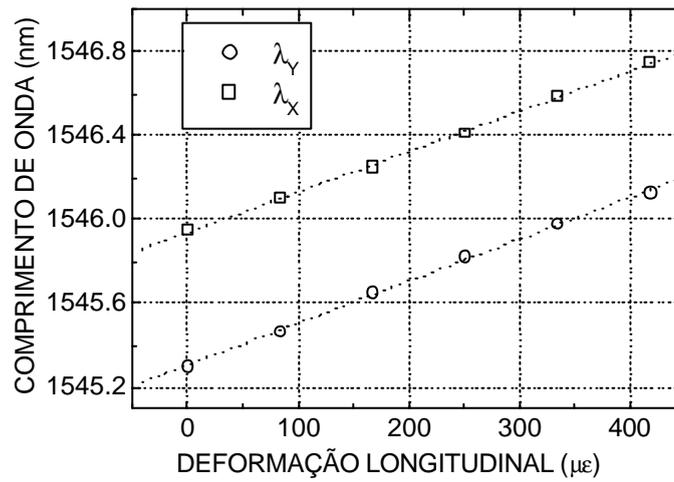
Figura 4.28 - Bandas de polarização de uma FBG em fibra HiBi IEC em função da força longitudinal imposta.

As redes também foram caracterizadas através de dois posicionadores micrométricos para a obtenção precisa dos valores de deformação longitudinal das fibras HiBi (figura 4.29). Os espectros obtidos com a variação do comprimento da fibra através dos posicionadores são mostrados na figura 4.30 (a). Na figura 4.30 (b) estão as curvas de sensibilidade à deformação obtidas.

Figura 4.29 - - Sistema mecânico baseado em posicionadores micrométricos para a análise de deformações longitudinais nas FBG em fibras HiBi.



(a)



(b)

Figura 4.30 - (a) Variação espectral das bandas de reflexão de uma FBG em fibra HiBi com a deformação longitudinal. (b) Curvas de sensibilidade à deformação longitudinal.

Na tabela 4.8 estão os valores dos coeficientes angulares obtidos com os dois sistemas para investigação de deformações longitudinais das fibras HiBi. Pode-se obter um quociente entre a força aplicada e a deformação sofrida pela fibra através das

sensibilidades experimentais obtidas. Valores de $758 \mu\epsilon/N$ para a banda X e $755 \mu\epsilon/N$ para a banda Y foram obtidas para a rede em fibra IEC.

Tabela 4.8 – Tabela com os valores dos coeficientes angulares e das sensibilidades às deformações, obtidos pelos gráficos de variação dos comprimentos de onda das bandas de polarização com a deformação longitudinal, para a rede gravada na fibra de alta birrefringência IEC de $125 \mu\text{m}$.

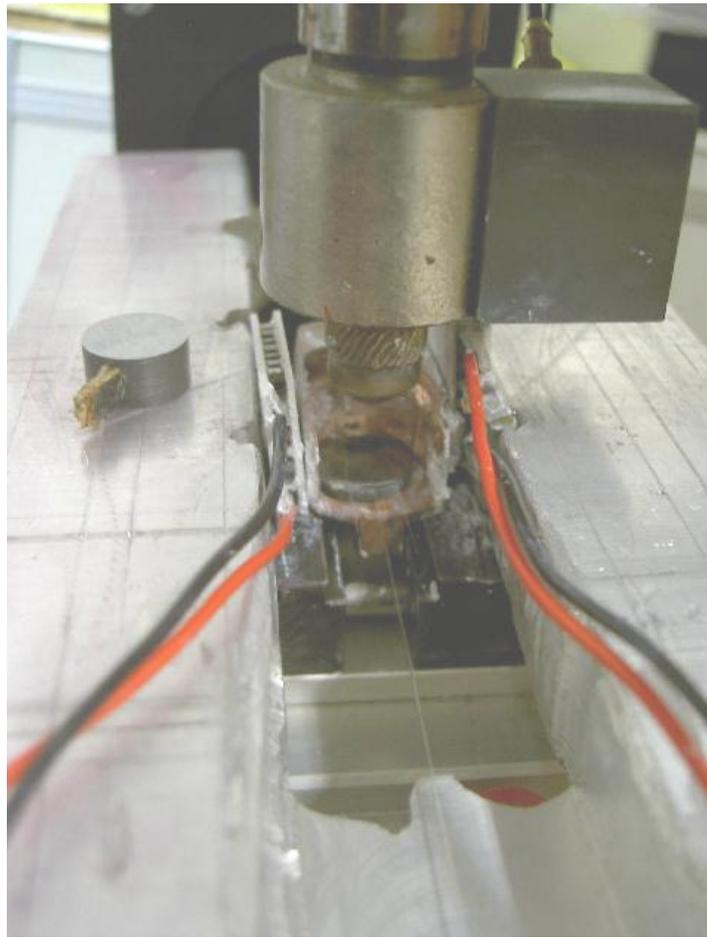
Bandas	Coefficiente angular (nm/N)	Sensibilidade à deformação (pm/me)
Polarização X	1,44	1,9
Polarização Y	1,51	2,0

4.3.3 Temperatura

O sistema de controle de temperatura (aquecimento/refrigeração) utilizado para a caracterização das redes em fibras mantenedoras de polarização por temperatura é composto por dois refrigeradores termoelétricos (célula Peltier) ligados ao sistema eletrônico de controle.

A figura 4.31 (a) mostra o detalhe do braço de aplicações de cargas transversais do "scratch test", o suporte de cobre para a condução de calor para as placas de aço de pressionamento e os refrigeradores termoelétricos nas laterais deste suporte (vide também figura 4.18). Nos ensaios de temperatura, a placa superior foi colocada sobre a rede, a fim de formar um bloco em torno da fibra para uma distribuição homogênea de temperatura. As figuras 4.31 (a) e (b) mostram os diagramas esquemáticos das posições do indentador para o pressionamento das fibras.

O circuito eletrônico que controla os termoelétricos utiliza um termistor, colocado em uma região próxima a FBG, para os ajustes de temperatura. Os valores da temperatura estabilizada do suporte de cobre foram obtidos através da leitura em um termômetro eletrônico (termopar), colocado também nas proximidades da FBG.



(a)

(b)

(c)

Figura 4.31 - (a) Detalhe do sistema mecânico para aplicações de cargas transversais e o suporte com as células termoelétricas para a variação de temperatura ou manter uma temperatura constante. (b) e (c) Diagrama esquemático de aplicação das cargas.

Os espectros obtidos para a fibra IEC de 125 μm de diâmetro são mostrados na figura 4.32. As bandas de polarização sofrem variações em conjunto para maiores comprimentos de onda com o aumento da temperatura. O gráfico com as curvas obtidas para os picos das bandas com a temperatura para essa fibra são mostrados na figura 4.33.

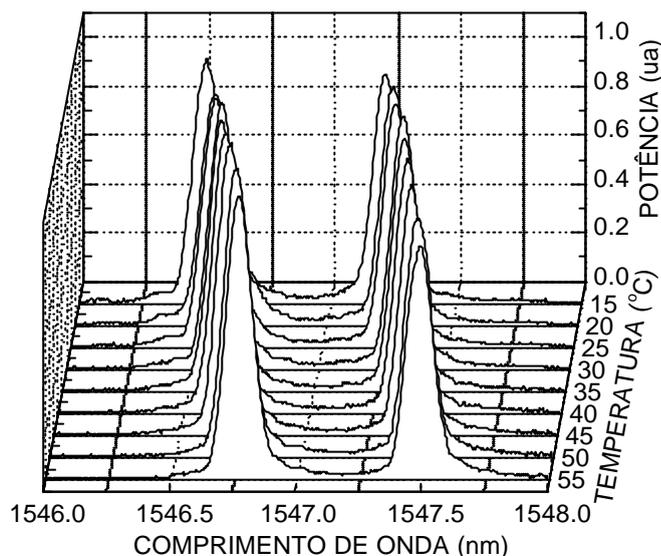


Figura 4.32 – Variações no espectro de reflexão de uma FBG em fibra IEC em função da mudança de temperatura

Na faixa de temperatura em que foram realizados os experimentos para a fibra IEC, de 10 a 60°C, não houve mudança mensurável de separação entre as bandas e, portanto na birrefringência das fibras. Porém, a análise dos espectros obtidos para a FBG em fibra bow tie de 80 μm , para aproximadamente a mesma faixa de medida de temperatura, mostrou uma diminuição na separação em comprimento de onda entre as bandas iniciais e finais de 0,03 nm. Essa variação de birrefringência com a mudança de temperatura em fibras HiBi também foi discutida por outros autores [Araújo *et al.*, 2000], provocada pela presença dos elementos de aplicação de tensão, cujo vidro apresenta diferente coeficiente de expansão térmica.

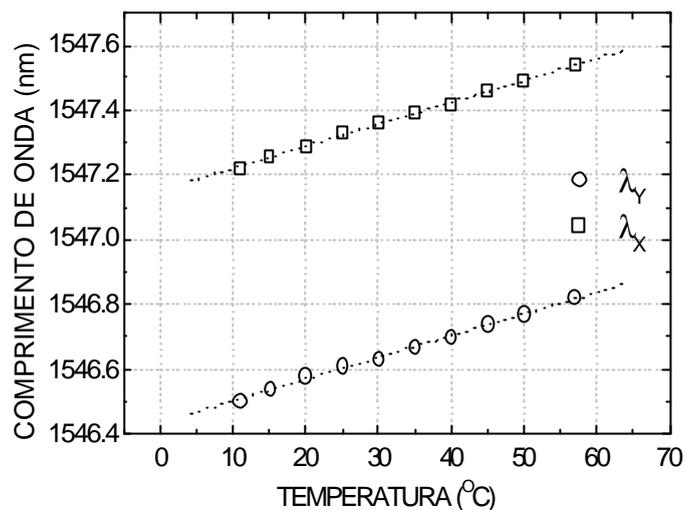


Figura 4.33 – Retas de calibração para a posição do comprimento de onda de pico com a temperatura para as bandas X e Y.

Os ensaios de temperatura também foram realizados para as outras FBGs em fibras HiBi. Os coeficientes angulares de variação de comprimento de onda de pico com a temperatura, obtidos são mostrados na tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Tabela com os valores dos coeficientes angulares para a variação dos comprimentos de onda de pico das bandas de polarização em função de temperatura, para as FBGs gravadas nas fibras de alta birrefringência IEC, PANDA e Bow tie de 125 μm e Bow tie de 80 μm .

Fibra HiBi	Coeficiente angular ($\text{pm}/^\circ\text{C}$)	
	Banda de polarização X	Banda de polarização Y
IEC 125 mm	6,76	6,71
PANDA 125 mm	3,28	3,40
Bow Tie 125 mm	10,93	11,12
Bow Tie 80 mm	8,02	8,46

Nesse capítulo foram realizadas as caracterizações das redes de Bragg em fibras de alta birrefringência, através da análise dos espectros obtidos e das variações espectrais com a aplicação de grandezas externas. Os vários sistemas de inscrição utilizados permitiram a obtenção de dispositivos com diferentes coeficientes de acoplamento e comprimentos de redes.

Foi possível constatar a variação das bandas espectrais para maiores comprimentos de onda com o aumento da tensão longitudinal e da temperatura. Porém, devido a resolução dos equipamentos utilizados, não foi possível constatar a diferença entre os coeficientes angulares de sensibilidade a essas grandezas entre as bandas de polarização, resultado exposto em outros trabalhos na literatura [Ferreira *et al.*, 2000; Sudo *et al.*, 1997].

A análise das FBGs em fibras HiBi com cargas transversais foi realizada em três diferentes situações: para pressionamento sobre toda a superfície da rede, com redes longas (10 mm) e comprimento de pressionamento de 10 mm, com redes curtas (1 mm) e comprimento de pressionamento de 2,3 mm; e para pressionamento em apenas um trecho, com redes longas (10 mm) e comprimento de pressionamento de 2,3 mm.

Quando o pressionamento é realizado sobre toda a extensão da rede, com direção de aplicação de carga sobre um dos eixos de birrefringência, uma das bandas permanece aproximadamente na mesma posição com a aplicação de carga transversal, enquanto a outra sofre variação para maiores comprimentos de onda. Esse resultado foi verificado para as redes com comprimento de 10 mm pressionadas pelo sistema de "scratch test" e também por outros autores em fibras padrão [Zhang *et al.*, 2002].

Se a distribuição de força não for homogênea por toda a superfície da placa aplicadora de tensão (10 mm) então as variações espectrais podem também estar relacionadas à presença de regiões onde existe variação da fase ótica por efeito da mudança de índice de refração com a força, da mesma forma como ocorre para aplicação de força em apenas uma parte da rede.

Quando a região de pressionamento é inferior à dimensão linear da rede ocorre um desdobramento nas bandas [vide, por exemplo, Trujillo, 2002], resultante de

mudança oposta nos valores principais do índice de refração em função das deformações sofridas.

O valor máximo de carga empregada em que foi possível acompanhar o desdobramento e o contínuo re-desdobramento dessas novas bandas foi de aproximadamente 3 N/mm. Por esse motivo as medidas foram realizadas com aplicação de cargas menores que esse valor.

Os resultados obtidos com as caracterizações realizadas demonstram que redes gravadas em fibras de alta birrefringência podem ser utilizadas em vários trabalhos, com a obtenção de dispositivos otimizados (através da mudança dos parâmetros das redes e das fibras HiBi) para aplicações específicas.

Capítulo 5

Aplicações de redes de Bragg em fibras de alta birrefringência

FBGs escritas em fibras HiBi possuem capacidade comprovada para determinação simultânea de deformação longitudinal e temperatura [Urbanczyk *et al.*, 2001; Ferreira *et al.*, 2000; Sudo *et al.*, 1997]. A técnica base para essas medidas é a existência de uma sensibilidade diferencial no comprimento de onda de Bragg para cada uma das grandezas a serem monitoradas.

Entretanto, para uma FBG gravada em fibra HiBi, diferentes sensibilidades são também obtidas com deformações transversais, pois os deslocamentos das bandas de reflexão, para cada polarização, são diferentes e dependem do ângulo de aplicação da força transversal externa. FBGs em fibras HiBi podem ser utilizadas então, como sensores simultâneos para determinação de tensão transversal e temperatura ou tensão longitudinal e tensão transversal.

Em algumas aplicações são ainda necessárias informações sobre as deformações transversais do sistema, além daqueles para tensão longitudinal e temperatura. FBGs sobrepostas possuem um espectro ótico composto, cujos parâmetros podem ser utilizados para a determinação de todas essas grandezas.

Para exemplificar o uso das redes de Bragg em fibras HiBi em sensoriamento, realizamos algumas aplicações em medidas simultâneas a partir dos resultados obtidos no processo de caracterização por grandezas externas. O deslocamento de ambos os comprimentos de onda de Bragg das bandas de polarização foi usado na equação matricial para a determinação das grandezas de interesse.

A figura 5.1 mostra uma visão geral do sistema experimental empregado nas medidas simultâneas. Um analisador de espectros óticos foi utilizado para as aquisições dos espectros de reflexão das redes. Os equipamentos para caracterização por agentes externos das FBGs em fibras HiBi, já descritos no capítulo 4, foram empregados em conjunto na análise de sensores para múltiplos parâmetros (figura 5.2).

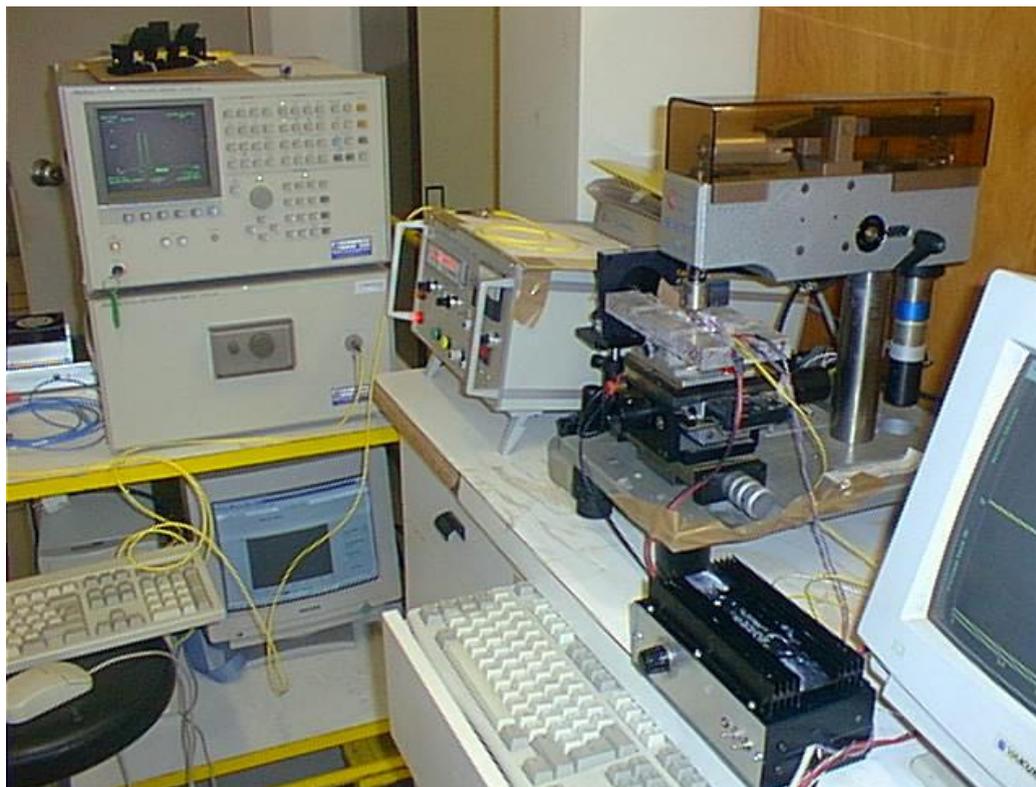


Figura 5.1 - Sistema empregado para as análises de multiparâmetros.

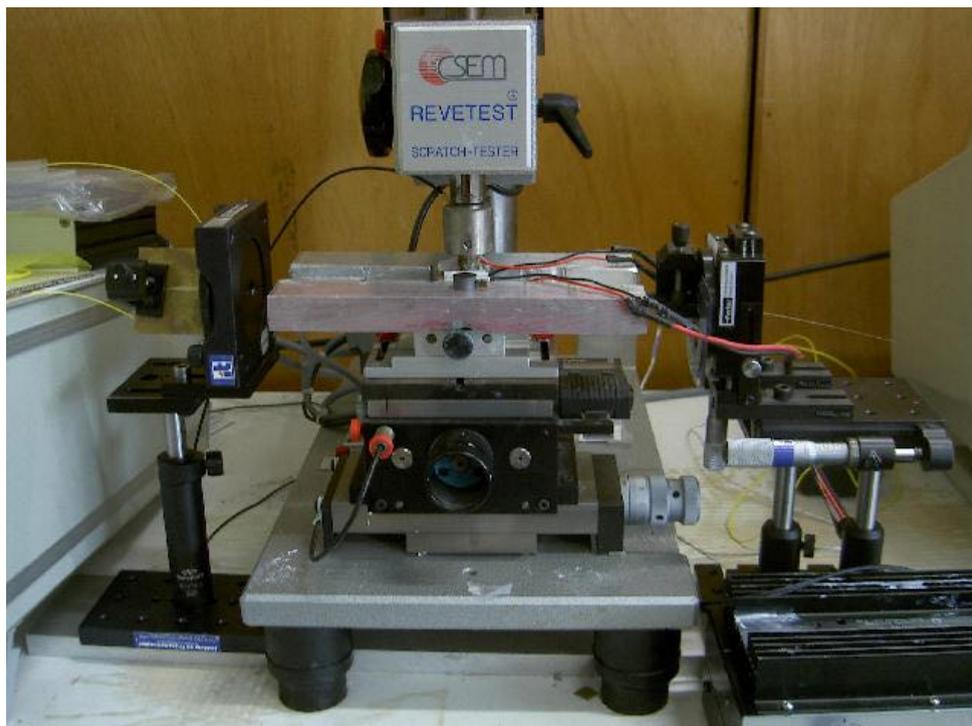


Figura 5.2 - Conjunto experimental elaborado para analisar o emprego das FBG em fibras HiBi como sensores simultâneos de múltiplos parâmetros. Cargas transversais são impostas nas fibras HiBi através do “scratch-test”, a mudança de temperatura é realizada por células termoelétricas e tensões longitudinais são aplicadas por microposicionadores laterais.

5.1 Determinação simultânea de deformação transversal e temperatura

Redes de Bragg gravadas em fibras HiBi foram estudadas para determinação simultânea de deformação transversal e temperatura [Abe *et al.*, 2002]. O sensor é baseado na monitoração do espectro complexo resultante com a aplicação de cargas transversais sobre a fibra.

Quando a fibra sofre variações de temperatura, ΔT , e deformação transversal, $\Delta \epsilon$, simultâneas, cada comprimento de onda de reflexão de Bragg tem

uma dependência diferente com a temperatura e a tensão. Para a aplicação de cargas transversais a 0° , os deslocamentos serão dados por:

$$\Delta\lambda_x = \frac{\partial\lambda_x}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial\lambda_x}{\partial \varepsilon} \Delta\varepsilon_Y \quad (5.1)$$

$$\Delta\lambda_Y = \frac{\partial\lambda_Y}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial\lambda_Y}{\partial \varepsilon} \Delta\varepsilon_Y \quad (5.2)$$

onde $\partial\lambda_x/\partial T$ e $\partial\lambda_Y/\partial T$ são os coeficientes de temperatura e $\partial\lambda_x/\partial\varepsilon$ e $\partial\lambda_Y/\partial\varepsilon$ são os coeficientes de deformação. Nessas equações a componente de deformação relacionada à banda X, $\Delta\varepsilon_X$ é considerada muito pequena (aproximadamente nula) em relação à variação na banda Y.

Assim, a partir da variação em comprimento de onda dos dois picos do espectro, $\Delta\lambda_X$ e $\Delta\lambda_Y$, é possível obter os valores de deformação e temperatura:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon_Y \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_X \\ \Delta\lambda_Y \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

onde K é a matriz que contém os elementos de sensibilidade:

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\partial\lambda_X}{\partial T} & \frac{\partial\lambda_X}{\partial\varepsilon} \\ \frac{\partial\lambda_Y}{\partial T} & \frac{\partial\lambda_Y}{\partial\varepsilon} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

As FBGs utilizadas para as medidas simultâneas foram gravadas nas fibras HiBi pelos métodos descritos no capítulo 2 e caracterizadas através dos sistemas detalhados no capítulo 4.

Medidas simultâneas foram inicialmente realizadas com FBGs em fibra HiBi IEC, com diâmetro de 125 μm , cujos coeficientes de calibração estão dispostos nas tabelas 4.7 e 4.9 do capítulo 4. Os valores dos elementos de sensibilidade obtidos por estas caracterizações e utilizados para a obtenção da matriz K do sensor, para a direção de aplicação de carga a 0° , foram de: 6,76 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ e 6,71 $\text{pm}/^\circ\text{C}$, para os coeficientes de temperatura e 0,29 $\text{pm}/\mu\epsilon$ e 1,55 $\text{pm}/\mu\epsilon$ para os coeficientes de deformação, para sensibilidades ao longo dos eixos X e Y, respectivamente.

Espectros de reflexão foram obtidos enquanto uma aplicação de carga era exercida sobre a fibra, simultaneamente a uma alteração na temperatura. A partir do deslocamento do comprimento de Bragg das bandas de polarização e usando a equação 5.1 os valores de deformação e temperatura podem ser determinados. A tabela 5.1 mostra os valores de deformação e temperatura obtidos desta maneira.

Tabela 5.1 - Resultados das medidas simultâneas de temperatura e deformação transversal, obtidos através dos espectros de reflexão da FBG em fibra HiBi IEC (direção de aplicação de carga a 0°). Os valores em negrito de temperatura (primeira linha) e deformação transversal (primeira coluna), foram adquiridos através dos circuitos eletrônicos de controle dos sistemas experimentais de caracterização. Os números no canto direito de cada célula são as diferenças entre os valores adquiridos através dos circuitos eletrônicos e os valores obtidos pela matriz.

Temperatura Deformação	12 °C	23 °C	31 °C	46 °C
61 $\mu\epsilon$	11.8 °C 0.2 °C	24.6 °C -1.6 °C	31.5 °C -0.5 °C	45.5 °C 0.5 °C
	65 $\mu\epsilon$ -4 $\mu\epsilon$	71 $\mu\epsilon$ -10 $\mu\epsilon$	70 $\mu\epsilon$ -9 $\mu\epsilon$	75 $\mu\epsilon$ -14 $\mu\epsilon$
76 $\mu\epsilon$	12.0 °C 0 °C	25.4 °C -2.4 °C	32.6 °C -1.6 °C	46.3 °C -0.3 °C
	69 $\mu\epsilon$ 7 $\mu\epsilon$	79 $\mu\epsilon$ -3 $\mu\epsilon$	73 $\mu\epsilon$ 3 $\mu\epsilon$	81 $\mu\epsilon$ -5 $\mu\epsilon$
91 $\mu\epsilon$	12.7 °C -0.7 °C	26.8 °C -3.8 °C	34.0 °C -3.0 °C	48.0 °C -2.0 °C
	76 $\mu\epsilon$ 15 $\mu\epsilon$	83 $\mu\epsilon$ 8 $\mu\epsilon$	78 $\mu\epsilon$ 13 $\mu\epsilon$	79 $\mu\epsilon$ 12 $\mu\epsilon$

Os valores de temperatura em negrito foram determinados através do circuito eletrônico que controla os termoeletrônicos. Os valores de deformação em negrito foram adquiridos através do sistema de “scratch-test” que possui um programa para leitura das cargas aplicadas. O cálculo da deformação da fibra (unidade μm), através do valor da carga (unidade N/mm), foi obtido através da equação 2.39 (vide capítulo 2).

Foram determinados erros máximos das medidas de tensão e temperatura com a comparação entre os valores obtidos através dos espectros de reflexão e os valores impostos pelos equipamentos utilizados. Os valores de deformação foram avaliados com erros máximos de $\pm 15 \mu\epsilon$ para o intervalo de medidas de 61 a 91 $\mu\epsilon$, enquanto os erros máximos em temperatura obtidos foram de $\pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$, na faixa de 12 a 46 $^\circ\text{C}$.

O mesmo procedimento foi realizado para FBGs gravada em fibra HiBi PANDA, porém para faixa de medidas de deformação até 51 $\mu\epsilon$. Essa faixa dinâmica, menor do que as medidas realizadas com a FBG em fibra IEC foi escolhida para a determinação dos comprimentos de onda de Bragg das bandas de polarização, antes dos sucessivos desdobramentos das bandas provocados pela aplicação de cargas maiores, que dificultam a determinação desses valores.

Os coeficientes angulares da matriz K, obtidos com as caracterizações (tabelas 4.7 e 4.9, capítulo 4) para a direção de aplicação de carga a 90° , foram de: 3,28 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ e 3,40 $\text{pm}/^\circ\text{C}$, para os coeficientes de temperatura e 3,78 $\text{pm}/\mu\epsilon$ e 0,24 $\text{pm}/\mu\epsilon$ para os coeficientes de deformação, para sensibilidades ao longo dos eixos X e Y, respectivamente. Os resultados na determinação da componente transversal da deformação e da temperatura estão dispostos na tabela 5.2.

Erros máximos de deformação de $\pm 10 \mu\epsilon$ para o intervalo de medidas entre 11 a 51 $\mu\epsilon$, e de $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, na faixa de 7 a 53 $^\circ\text{C}$, foram determinados com a comparação entre os valores obtidos através dos espectros de reflexão e os valores adquiridos com os equipamentos experimentais.

Tabela 5.2 - Resultados das medidas simultâneas de temperatura e deformação transversal, obtidas com a FBG em fibra HiBi PANDA (direção de aplicação de carga a 90°). Mesmos detalhes da tabela 5.1.

Temperatura Deformação	7 °C	21 °C	22 °C	40 °C	53 °C
11 $\mu\epsilon$	7 °C 0 °C	20 °C 1 °C	23 °C -1 °C	39 °C 1 °C	51 °C 2 °C
	12 $\mu\epsilon$ -1 $\mu\epsilon$	12 $\mu\epsilon$ -1 $\mu\epsilon$	9 $\mu\epsilon$ 2 $\mu\epsilon$	11 $\mu\epsilon$ 0 $\mu\epsilon$	10 $\mu\epsilon$ 1 $\mu\epsilon$
21 $\mu\epsilon$	7 °C 0 °C	19 °C 2 °C	22 °C 0 °C	38 °C 2 °C	51 °C 2 °C
	21 $\mu\epsilon$ 0 $\mu\epsilon$	20 $\mu\epsilon$ 1 $\mu\epsilon$	17 $\mu\epsilon$ 4 $\mu\epsilon$	16 $\mu\epsilon$ 5 $\mu\epsilon$	18 $\mu\epsilon$ 3 $\mu\epsilon$
31 $\mu\epsilon$	6 °C 1 °C	18 °C 3 °C	22 °C 0 °C	38 °C 2 °C	53 °C 0 °C
	32 $\mu\epsilon$ -1 $\mu\epsilon$	31 $\mu\epsilon$ 0 $\mu\epsilon$	31 $\mu\epsilon$ 0 $\mu\epsilon$	22 $\mu\epsilon$ 9 $\mu\epsilon$	24 $\mu\epsilon$ 7 $\mu\epsilon$
41 $\mu\epsilon$	5 °C 2 °C	18 °C 0.2 °C	21 °C 0.2 °C	37 °C 0.2 °C	55 °C 0.2 °C
	39 $\mu\epsilon$ 2 $\mu\epsilon$	44 $\mu\epsilon$ -3 $\mu\epsilon$	44 $\mu\epsilon$ -3 $\mu\epsilon$	37 $\mu\epsilon$ 4 $\mu\epsilon$	39 $\mu\epsilon$ 2 $\mu\epsilon$
51 $\mu\epsilon$	5 °C 2 °C	18 °C 3 °C	21 °C 1 °C	37 °C 3 °C	55 °C -2 °C
	43 $\mu\epsilon$ 8 $\mu\epsilon$	42 $\mu\epsilon$ 9 $\mu\epsilon$	48 $\mu\epsilon$ 3 $\mu\epsilon$	41 $\mu\epsilon$ 10 $\mu\epsilon$	43 $\mu\epsilon$ 8 $\mu\epsilon$

5.2 Determinação simultânea de deformação transversal e deformação longitudinal

Nas análises realizadas durante a caracterização das redes produzidas, com cargas aplicadas sobre um dos eixos principais de polarização das fibras HiBi, uma

das bandas quase não sofre mudança espectral, enquanto a outra banda sofre deslocamento para maiores comprimentos de onda e desdobramento. Entretanto, com aplicação de uma tensão longitudinal as duas bandas sofrem deslocamento em conjunto, apresentando curvas de calibração paralelas. Esse resultado pode ser utilizado para medidas simultâneas das componentes longitudinal e (uma) transversal da deformação. A demonstração foi realizada utilizando uma FBG em fibra HiBi IEC.

A FBG foi escrita em uma fibra HiBi IEC, mas pertencente a um lote diferente do dispositivo cujas características foram discutidas na seção 4.3.1 (valores de sensibilidade podem ser vistos na tabela 4.7), e portanto, novas curvas de calibração foram necessárias. Os coeficientes obtidos das curvas de deformação transversal foram de 5,17 pm/ $\mu\epsilon$ e de 1,20 pm/ $\mu\epsilon$, para sensibilidades ao longo dos eixos X e Y, respectivamente, na direção de aplicação de carga a 90°. Os coeficientes de sensibilidade de deformação longitudinal, obtidos anteriormente na caracterização para esse modelo de fibra IEC, foram de: 1,9 pm/ $\mu\epsilon$ e 2,0 pm/ $\mu\epsilon$ (tabela 4.8), para sensibilidades ao longo dos eixos X e Y, respectivamente.

A tabela 5.3 mostra os valores de deformação transversal e deformação longitudinal, obtidos a partir dos espectros de reflexão da rede em fibra IEC. Os valores em negrito de deformação transversal (primeira linha) foram adquiridos através do circuito eletrônico de controle do sistema experimental de caracterização. Os valores em negrito de deformação longitudinal (primeira coluna) foram obtidos através da leitura dos deslocamentos no microposicionador.

Foram determinados erros máximos das medidas de tensão transversal e tensão longitudinal com a comparação entre os valores obtidos através dos espectros de reflexão e os valores adquiridos com os equipamentos experimentais. Os valores de deformação transversal foram avaliados com erros máximos de $\pm 2 \mu\epsilon$ para o intervalo de medidas de 0 a 14 $\mu\epsilon$, enquanto os erros máximos em deformação longitudinal foram de $\pm 22 \mu\epsilon$, na faixa de 83 a 335 $\mu\epsilon$.

Tabela 5.3 - Resultados das medidas simultâneas de deformação longitudinal e deformação transversal obtidas com a FBG em fibras HiBi IEC.

Transversal Longitudinal	0 $\mu\epsilon$	9 $\mu\epsilon$	14 $\mu\epsilon$
83 $\mu\epsilon$	1 $\mu\epsilon$ -1 $\mu\epsilon$	8 $\mu\epsilon$ 1 $\mu\epsilon$	13 $\mu\epsilon$ 1 $\mu\epsilon$
	64 $\mu\epsilon$ 19 $\mu\epsilon$	66 $\mu\epsilon$ 17 $\mu\epsilon$	68 $\mu\epsilon$ 15 $\mu\epsilon$
167 $\mu\epsilon$	1 $\mu\epsilon$ -1 $\mu\epsilon$	8 $\mu\epsilon$ 1 $\mu\epsilon$	13 $\mu\epsilon$ 1 $\mu\epsilon$
	160 $\mu\epsilon$ 7 $\mu\epsilon$	161 $\mu\epsilon$ 6 $\mu\epsilon$	154 $\mu\epsilon$ 13 $\mu\epsilon$
251 $\mu\epsilon$	0 $\mu\epsilon$ 0 $\mu\epsilon$	7 $\mu\epsilon$ 2 $\mu\epsilon$	12 $\mu\epsilon$ 2 $\mu\epsilon$
	240 $\mu\epsilon$ 11 $\mu\epsilon$	246 $\mu\epsilon$ 5 $\mu\epsilon$	244 $\mu\epsilon$ 7 $\mu\epsilon$
335 $\mu\epsilon$	1 $\mu\epsilon$ -1 $\mu\epsilon$	8 $\mu\epsilon$ 1 $\mu\epsilon$	13 $\mu\epsilon$ 1 $\mu\epsilon$
	320 $\mu\epsilon$ 15 $\mu\epsilon$	316 $\mu\epsilon$ 19 $\mu\epsilon$	313 $\mu\epsilon$ 22 $\mu\epsilon$

5.3 Determinação simultânea de deformação transversal, deformação longitudinal e temperatura

5.3.1 Redes sobrepostas

Duas redes de Bragg foram gravadas pelo método direto em fibras HiBi IEC de diâmetro 125 μm usando duas máscaras de fase, de períodos 1064 nm e 1072 nm, com comprimento estimado de 10 mm [Abe *et al.*, 2003 (d)]. Ambas as redes foram inscritas na mesma posição da fibra, apenas com a troca da máscara de fase na gravação. Para os tempos de exposição ao UV (aproximadamente 5 minutos para cada rede), não foi

notada nenhuma influência da dose de luz utilizada durante a gravação da segunda rede sobre a birrefringência da primeira.

O espectro de reflexão da estrutura composta pelas duas redes com a incidência de uma fonte de banda larga é mostrado no gráfico da figura 5.3. Os dois pares de bandas estão associados a cada rede; suas intensidades relativas não são as mesmas, pois o espectro da fonte ótica utilizada não é plano em toda a faixa de comprimento de onda. Esses espectros poderão ser corrigidos através da aquisição do espectro da fonte ótica utilizada, porém nos casos apresentados essa correção não foi realizada, por não apresentarem dificuldades na leitura das bandas de polarização em ambas as redes. As bandas à esquerda de cada par estão relacionadas à banda de polarização Y (eixo rápido); as bandas à direita à polarização X (eixo lento).

A resposta espectral das redes superpostas em relação ao estado de polarização da luz de lançamento é mostrada no gráfico da figura 5.4. É possível notar que a razão de extinção não é 100 %, provavelmente devido ao acoplamento de polarização que faz variar o SOP da luz refletida.

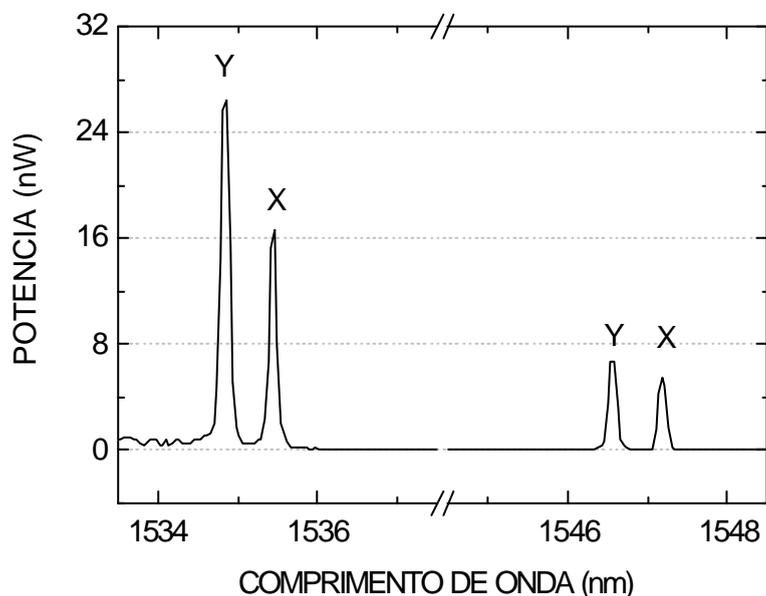


Figura 5.3 - Espectros óticos de reflexão da estrutura com duas redes de Bragg superpostas em fibra HiBi IEC. As redes foram gravadas usando diferentes máscaras de fase.

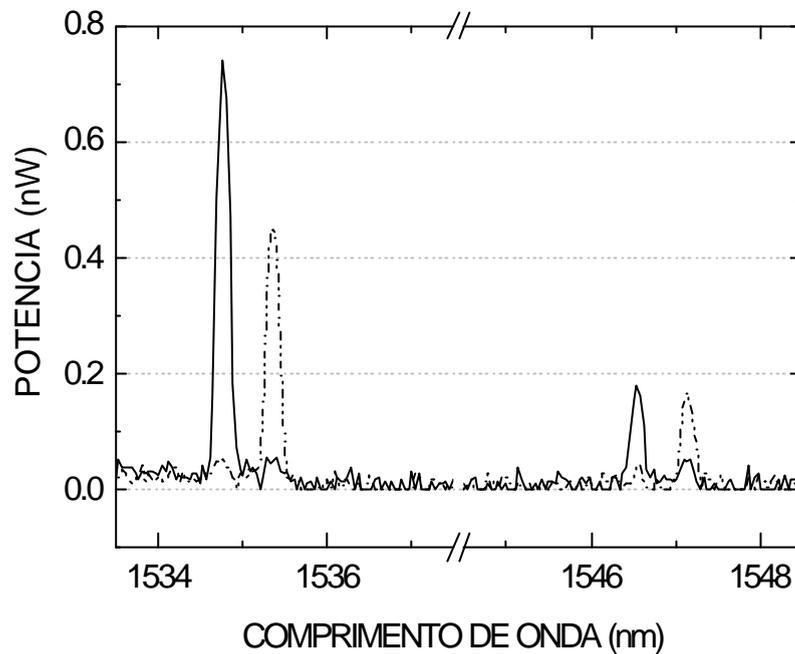


Figura 5.4 - Espectro de reflexão de um par de FBG em fibra IEC com incidência de luz polarizada. Linha pontilhada: luz polarizada ao longo do eixo lento (X); linha contínua: polarização ao longo do eixo rápido (Y).

A hipótese anterior foi investigada com a obtenção dos espectros das redes superpostas para estados de polarização de luz intermediários. A figura 5.5 mostra um espectro de reflexão de FBGs sobrepostas em uma fibra bow tie. O espectro mostra que a primeira estrutura composta (comprimento de onda menor) possui intensidade maior para a banda de polarização X enquanto que para a segunda estrutura (comprimento de onda maior) a intensidade é maior para a banda de polarização Y. Essa resposta espectral pode ser devido ao acoplamento entre as duas componentes de polarização, durante a propagação pela estrutura das redes, já que o comprimento de batimento para essa fibra ($L_{B1} = 4,16$ mm, $L_{B2} = 4,19$ mm, respectivamente para a rede de menor e maior comprimento de onda) é da mesma ordem de grandeza do comprimento das redes (10 mm).

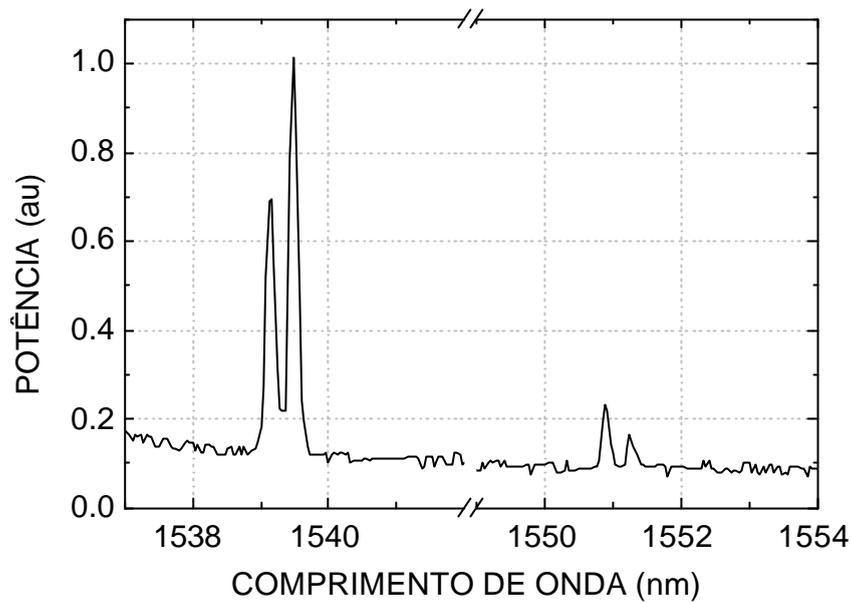


Figura 5.5 - Espectro de reflexão de um par de FBG em fibra bow tie com incidência de luz polarizada ao longo de uma direção arbitrária em relação aos eixos principais da fibra.

A separação espectral em comprimento de onda de pico entre as duas redes em fibra IEC é de aproximadamente 12 nm, enquanto que o desdobramento por polarização das bandas de cada uma é de aproximadamente 0,8 nm. Trabalhos citados na literatura [Zhang *et al.*, 2001] mostram pares de redes (não sobrepostas) cuja separação espectral é menor (devido a escolha de períodos bastante próximos das redes gravadas) que a separação por polarização para o modo LP_{01} . Entretanto tal comportamento, necessário para as propostas da referência (filtro óptico) [Zhang *et al.*, 2001], não é desejável para o uso do par de redes como sensor de múltiplos parâmetros. Primeiro, a aplicação de carga (ou mudança de temperatura) no sensor deverá causar o deslocamento e a divisão das bandas de reflexão. Se a separação do par de redes for menor que a divisão por polarização, será difícil definir a trajetória de uma banda específica para calibração do sensor. Segundo, a pequena separação entre as bandas implica na redução da faixa dinâmica, devido à sobreposição das bandas deslocadas. Portanto, a escolha apresentada em nosso trabalho é a mais adequada para aplicações em sensores.

A birrefringência medida para a fibra IEC pela separação por polarização no espectro de reflexão para cada rede é de $5,7 \times 10^{-4}$. Para comparação, os valores de birrefringência para esta fibra HiBi obtidos pelo comprimento de batimento e pelos catálogos do fabricante estão dispostos na tabela 4.3, no capítulo 4.

5.3.2 Caracterização por temperatura e deformações

As redes superpostas inscritas na fibra HiBi IEC foram caracterizadas, através dos sistemas descritos na seção 4.3 (capítulo 4) por deformação longitudinal, deformação transversal e temperatura.

As medidas para a caracterização de tensões transversais foram realizadas com a fibra orientada segundo os eixos rápido e lento da fibra HiBi, na direção da carga aplicada. A figura 5.6 mostra as curvas de alteração do comprimento de onda de cada banda de reflexão, para cada FBG, com a deformação sofrida pela fibra devido a forças transversais aplicadas ao longo da direção do eixo Y. Para as bandas de polarização das duas FBGs associadas ao eixo de aplicação de carga, as variações espectrais são pequenas em relação aos deslocamentos e desdobramentos das bandas opostas a este eixo.

As curvas de deslocamentos em comprimento de onda para cada banda de polarização com a deformação longitudinal são mostradas na figura 5.7. As quatro bandas apresentam o mesmo comportamento no espectro de deslocamento para maiores comprimentos de onda com o aumento da tensão longitudinal.

A dependência por temperatura das bandas de polarização para ambas as redes pode ser vista na figura 5.8. Ambos os pares de bandas sofrem deslocamento para maiores comprimentos de onda, porém com diferentes sensibilidades entre as bandas de polarização X e Y (indicadas pelo respectivo coeficiente angular).

Apesar das bandas de polarização terem o mesmo comportamento no deslocamento para maiores comprimentos de onda com deformações

longitudinais e mudança de temperatura, o fato das curvas obtidas possuírem coeficientes angulares diferentes possibilita a determinação simultânea dessas duas grandezas. Essa propriedade já foi utilizada por outros autores [Sudo *et al.*, 1997, Ferreira *et al.*, 2000] para uma FBG gravada em fibra HiBi.

A tabela 5.4 mostra os coeficientes obtidos com as curvas de ajuste, das bandas de polarização X e Y, para a caracterização realizada por temperatura, deformação transversal e deformação longitudinal.

Os coeficientes angulares de temperatura e deformação transversal e deformação longitudinal obtidos para a rede composta em fibra IEC estão bem próximos aos valores obtidos para a FBG simples em fibra IEC (vide tabela 4.8, 4.6 e 4.7, respectivamente).

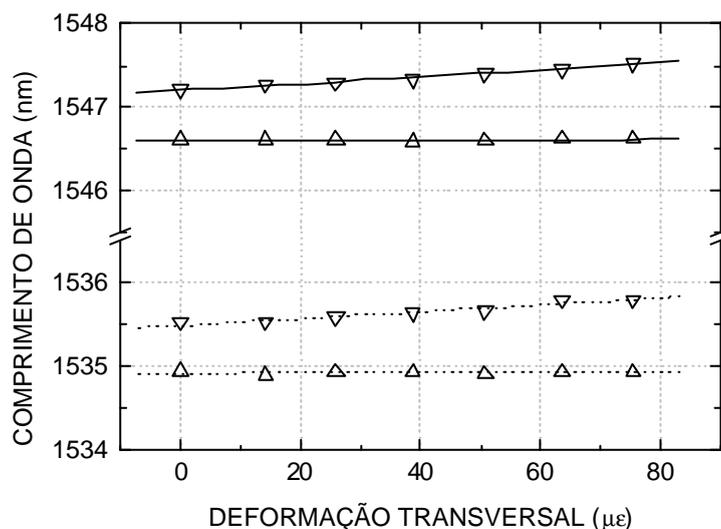


Figura 5.6 - Dependência dos comprimentos de onda de pico com a deformação transversal para as bandas de reflexão da estrutura composta por duas FBGs, para a direção de aplicação de carga a 90° . As curvas mostram os dados experimentais para as bandas de polarização X (∇) e Y (Δ) e as linhas de melhor ajuste.

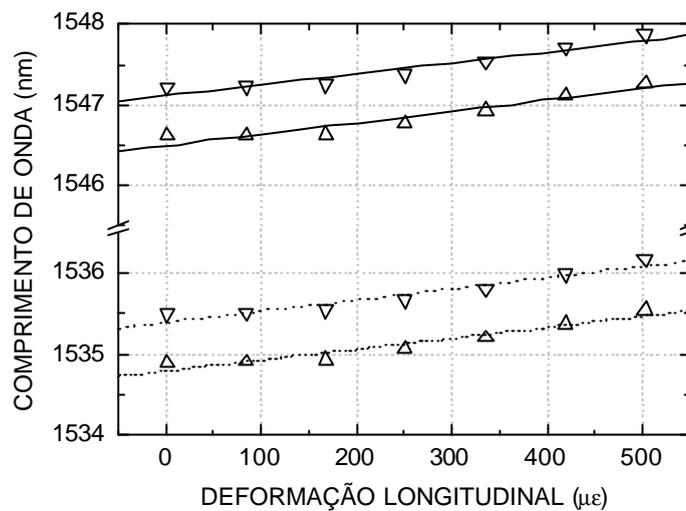


Figura 5.7 - Variação em comprimento de onda dos picos das bandas de polarização em função da deformação longitudinal nas FBGs sobrepostas. Pontos experimentais para as bandas de X (∇) e Y (\triangle) e as linhas de melhor ajuste.

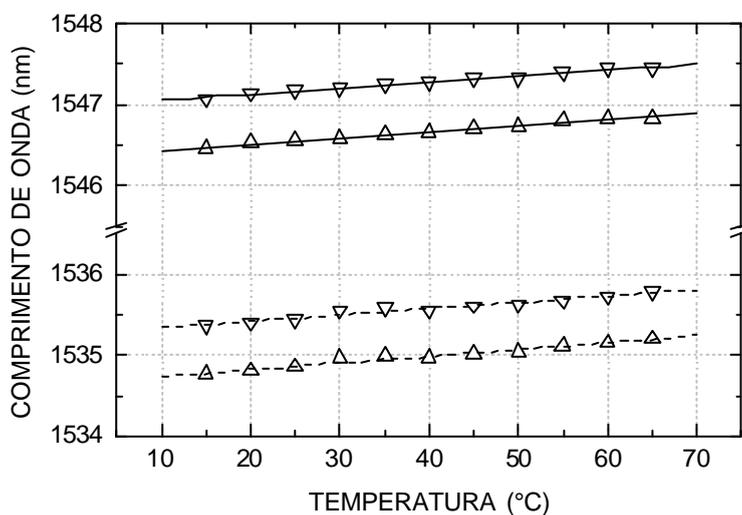


Figura 5.8 - Curvas dos dados experimentais de variação em comprimento de onda dos picos em função da temperatura, para as bandas de polarização X (∇) e Y (\triangle) e das linhas de melhor ajuste, para as FBGs sobrepostas.

Tabela 5.4 - Coeficientes angulares para a dependência dos comprimentos de onda das bandas de polarização com temperatura, deformação transversal e deformação longitudinal, obtidos das curvas de calibração para a estrutura sobreposta em fibra HiBi IEC, com cargas aplicadas ao longo do eixo Y.

Coeficientes	Bandas de Polarização			
	Y1	X1	Y2	X2
$\Delta\lambda / \Delta T$ (pm/°C)	8.4	7.8	7.8	7.5
$\Delta\lambda / \Delta \epsilon_Y$ (pm/me)	0.08	4.02	0.19	4.11
$\Delta\lambda / \Delta \epsilon_Z$ (pm/me)	1.3	1.39	1.39	1.36

5.3.3 Medidas simultâneas

As variações no comprimento de onda de Bragg do espectro de reflexão de ambas FBGs, devido a variações de temperatura ΔT , deformações transversais $\Delta \epsilon_Y$ e deformações longitudinais $\Delta \epsilon_Z$, para cada polarização, são dadas pelas equações:

$$\Delta\lambda_{X1} = \frac{\partial\lambda_{X1}}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial\lambda_{X1}}{\partial \epsilon_Y} \Delta \epsilon_Y + \frac{\partial\lambda_{X1}}{\partial \epsilon_Z} \Delta \epsilon_Z \quad (5.5)$$

$$\Delta\lambda_{Y1} = \frac{\partial\lambda_{Y1}}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial\lambda_{Y1}}{\partial \epsilon_Y} \Delta \epsilon_Y + \frac{\partial\lambda_{Y1}}{\partial \epsilon_Z} \Delta \epsilon_Z \quad (5.6)$$

$$\Delta\lambda_{X2} = \frac{\partial\lambda_{X2}}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial\lambda_{X2}}{\partial \epsilon_Y} \Delta \epsilon_Y + \frac{\partial\lambda_{X2}}{\partial \epsilon_Z} \Delta \epsilon_Z \quad (5.7)$$

$$\Delta\lambda_{Y2} = \frac{\partial\lambda_{Y2}}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial\lambda_{Y2}}{\partial \epsilon_Y} \Delta \epsilon_Y + \frac{\partial\lambda_{Y2}}{\partial \epsilon_Z} \Delta \epsilon_Z \quad (5.8)$$

onde $\partial\lambda_i/\partial T$ ($i=X_1, X_2, Y_1, Y_2$) são os coeficientes de temperatura, $\partial\lambda_i/\partial\varepsilon_Y$ ($i=X_1, X_2, Y_1, Y_2$) são os coeficientes de deformação transversal, e $\partial\lambda_i/\partial\varepsilon_Z$ ($i=X_1, X_2, Y_1, Y_2$) são os coeficientes de deformação longitudinal.

Essas equações podem ser rearranjadas e escritas na forma matricial, com o objetivo de calcular as deformações e temperatura, dadas pelas medidas de variação de comprimento de onda para cada banda de polarização. Por exemplo, considerando a determinação de três parâmetros (temperatura, deformação longitudinal e uma componente de deformação transversal), os valores correspondentes para as medidas podem ser obtidos por (a escolha das bandas de reflexão foi arbitrária) uma extensão da equação 3.4:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon_Y \\ \Delta\varepsilon_Z \end{bmatrix} = \mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{Y1} \\ \Delta\lambda_{X1} \\ \Delta\lambda_{Y2} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Na equação 5.9, \mathbf{K} é a matriz não unitária que contém os elementos de sensibilidade para os comprimentos de onda de Bragg:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\lambda_{Y1}}{\partial T} & \frac{\partial\lambda_{Y1}}{\partial\varepsilon_Y} & \frac{\partial\lambda_{Y1}}{\partial\varepsilon_Z} \\ \frac{\partial\lambda_{X1}}{\partial T} & \frac{\partial\lambda_{X1}}{\partial\varepsilon_Y} & \frac{\partial\lambda_{X1}}{\partial\varepsilon_Z} \\ \frac{\partial\lambda_{Y2}}{\partial T} & \frac{\partial\lambda_{Y2}}{\partial\varepsilon_Y} & \frac{\partial\lambda_{Y2}}{\partial\varepsilon_Z} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

As redes de Bragg previamente caracterizadas foram colocadas novamente no sistema de “scratch test”. Uma tensão longitudinal é aplicada com o micrômetro, enquanto uma carga transversal é imposta na fibra (sobre o eixo Y) e variações na temperatura são geradas pelo sistema de aquecimento/resfriamento.

Usando os coeficientes de temperatura e deformações, mostrados na tabela 5.4, na matriz K, as temperaturas e deformações longitudinal e transversal foram simultaneamente medidas [Abe *et al.*, 2003 (d)]. Alguns dos resultados podem ser vistos na tabela 5.5. Os erros máximos obtidos são altos, porém além dos valores de deformação serem relativamente baixos para medidas diretas através da posição das bandas, a matriz K não está bem condicionada.

Tabela 5.5 - Resultados das medidas simultâneas de temperatura e deformação transversal e deformação longitudinal, obtidas com as FBG sobrepostas em fibras HiBi IEC. Os valores impostos para medição foram determinados pelos equipamentos usados na montagem.

Longitudinal \ Transversal	167 me		251 me	
	15 °C	45 °C	15 °C	45 °C
12 me	12 °C 3 °C	42 °C 3 °C	12 °C 3 °C	37 °C 8 °C
	13 µε -1 µε	10 µε 2 µε	16 µε -4 µε	10 µε 2 µε
	117 µε 50 µε	99 µε 68 µε	228 µε 23 µε	177 µε 74 µε
22 me	16 °C -1 °C	33 °C 12 °C	16 °C -1 °C	43 °C 2 °C
	18 µε 4 µε	16 µε 6 µε	16 µε 6 µε	24 µε -2 µε
	141 µε 26 µε	132 µε 35 µε	252 µε -1 µε	187 µε 64 µε
32 me	16 °C -1 °C	36 °C 9 °C	18 °C -3 °C	43 °C 2 °C
	32 µε 0 µε	29 µε 3 µε	21 µε 11 µε	32 µε 0 µε
	116 µε 51 µε	139 µε 28 µε	236 µε 15 µε	178 µε 73 µε

5.4 Dispositivo baseado em rede de Bragg em fibra de alta birrefringência para telecomunicações

Um dos trabalhos originado dos estudos realizados de gravação e caracterização de redes de Bragg em fibras HiBi na área de comunicações óticas é um conversor de comprimento de onda. O estudo mais detalhado está sendo realizado na Universidade de Aveiro, pelo grupo Nogueira *et al.* [2002].

O conversor de comprimentos de onda é um dispositivo de grande interesse devido ao aumento do tráfego de telecomunicações óticas, pois permite fazer o re-direcionamento ótico em redes WDM (Wavelength Division Multiplexing).

O esquema (mostrado na figura 5.9) utiliza uma forma simplificada do método BOP-FWM [Morgan *et al.*, 1998] (Broadband orthogonal pumps - four wave mixing) para converter o sinal de entrada para a frequência de saída. A vantagem está em usar a rede HiBi para gerar os dois sinais ortogonalmente polarizados que são necessários no BOP-FWM, apenas pelo uso do sinal (ASE) refletido pelas redes de Bragg na cavidade do laser em anel, composta pelo EDFA (Erbium-doped Fiber Amplifier), DSF (Dispersion Shifted Fiber) e controladores de polarização, onde são amplificados para que funcionem como sinais de bombeamento [Nogueira *et al.*, 2002]. Assim, as bombas são geradas a partir do ruído do próprio amplificador, não sendo necessário utilizar lasers em separado, procedimento normalmente utilizado nesses sistemas.

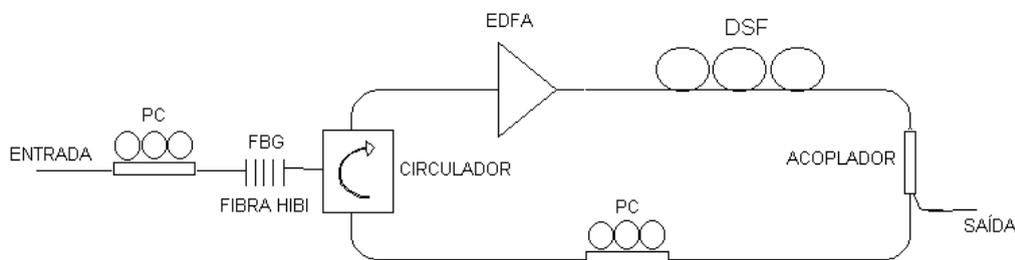


Figura 5.9 - Diagrama da configuração do anel do sistema BOP-FWM que utiliza redes em fibras HiBi como duas bombas ortogonais.

Adicionalmente, as redes podem ser sintonizadas por tensão ou temperatura, permitindo deslocar o sinal convertido em frequência, para o mesmo sinal de entrada. Essa facilidade torna o esquema atrativo para dispositivos de roteamento dinâmico em redes WDM.

A figura 5.10 mostra os espectros de entrada e saída para o caso de uma rede em fibra bow tie em que as bandas de polarização ortogonais funcionam como a bomba 1 (1550.3 nm) e bomba 2 (1551.1 nm), um sinal de entrada (1549.0 nm) e o canal convertido (1553.3 nm).

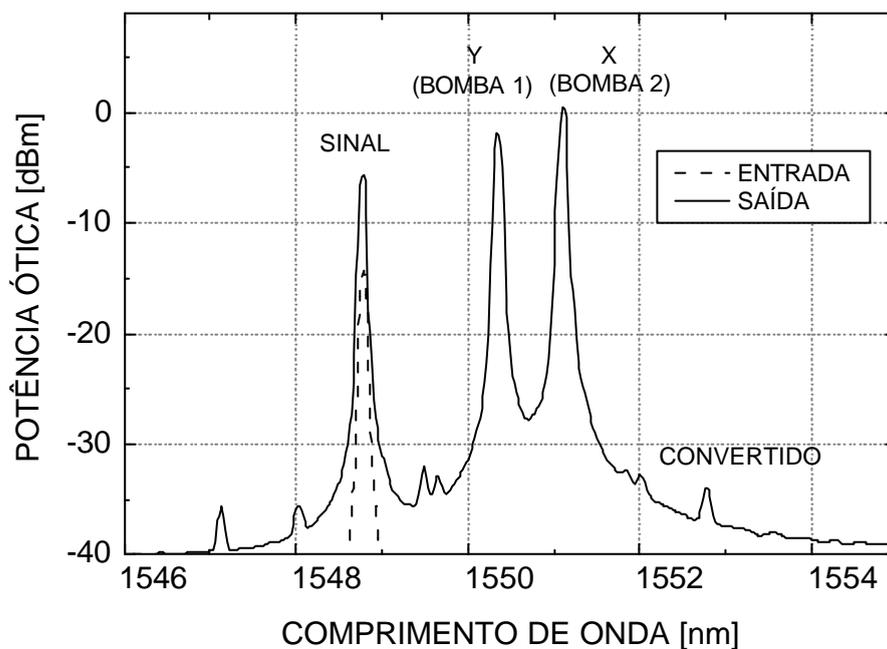


Figura 5.10 - Espectro óptico de um sistema a fibra em que uma rede gravada em fibra HiBi atua como um conversor de comprimento de onda.

As experiências foram realizadas pela formação de bombas ortogonais não apenas por uma FBG em fibra bow tie, mas também por duas redes superpostas na mesma fibra [Nogueira *et al.*, 2003]. Uma faixa dinâmica maior é obtida com

a utilização dessa estrutura. Como já foi explanado na seção 5.3.1, para o caso de duas FBGs sobrepostas em fibra bow tie, dependendo da polarização da luz de entrada, devido ao acoplamento por polarização, pode existir o caso em que bandas de polarização ortogonais relacionadas a cada uma das redes estejam presentes no espectro. Esse fato pode ser utilizado para a formação de bombas ortogonais, dando origem a diferentes deslocamentos espectrais no sinal convertido.

A figura 5.11 mostra um gráfico de eficiência do sinal convertido obtido em outra experiência (com duas FBGs), cujo sinal de entrada é deslocado ao longo de uma das bombas. O gráfico mostra que a eficiência de conversão (razão da potência convertida pela potência de entrada) pode ser alta em algumas regiões espectrais.

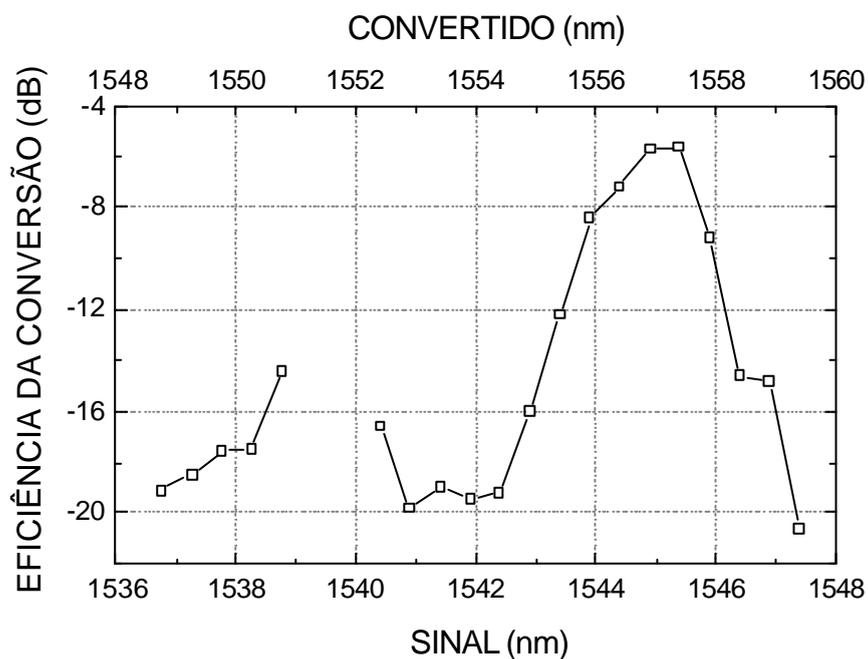


Figura 5.11 - Eficiência de conversão do sinal convertido quando o sinal de entrada é deslocado em comprimento de onda ao longo de uma das bombas.

Em conclusão, redes de Bragg em fibras HiBi foram aplicadas como sensor simultâneo em que um dos parâmetros é uma das componentes de deformação transversal: nas medidas simultâneas de deformação transversal e temperatura e nas medidas simultâneas de deformação transversal e deformação longitudinal. Redes sobrepostas em fibras HiBi foram utilizadas para medidas de deformação longitudinal, transversal e temperatura. Os resultados obtidos com esses trabalhos demonstram a capacidade das redes em fibras HiBi para aplicações como sensores simultâneos. Além disso, a aplicação como conversor de comprimento de onda demonstra a possibilidade de utilização desses dispositivos em telecomunicações. Ainda, com a modificação dos parâmetros das redes e das fibras HiBi é possível obter outras configurações para aplicações otimizadas.

Capítulo 6

Rede de Bragg em fibra de alta birrefringência com diâmetro reduzido

Neste capítulo é investigada a resposta das FBGs gravadas em fibras HiBi, pelo método da máscara de fase, em função de diâmetros externos, normal e reduzido [Abe *et al.*, 2003 (c)]. Foi observado que a birrefringência das fibras HiBi pertencentes à mesma família, mas com diferentes diâmetros possuem características diferentes. A diferença é, obviamente, devido ao fato de que o perfil de tensão intrínseco não é o mesmo.

As fibras HiBi com diâmetro reduzido foram obtidas através de corrosão química da fibra com a monitoração da mudança de birrefringência. Variações no perfil de tensão das fibras HiBi, devido à redução do diâmetro pela corrosão, podem modificar a resposta de um sensor com FBG à tensão ou temperatura; eventualmente pode ser viável otimizar as características das FBG em fibras HiBi para obter um melhor desempenho do sensor.

As FBGs em fibras HiBi corroídas foram caracterizadas por temperatura e tensão transversal. A comparação desses resultados com as de fibras HiBi comerciais e a utilização destes sensores para detecção simultânea de tensão transversal e temperatura também são descritos nesse capítulo.

Além disso, com o estudo das FBG em fibras HiBi sob ataque químico é possível obter informações sobre o comportamento da tensão intrínseca em tais fibras.

6.1 Rede de Bragg em fibra com diâmetro normal e reduzido

Para um estudo inicial, FBGs em fibras HiBi bow tie foram caracterizadas, para dois diferentes diâmetros comerciais de casca. O espectro de reflexão dessas fibras é apresentado na figura 6.1. Os espectros naquela figura foram traçados em relação ao desvio em comprimento de onda da posição central, pois as redes foram gravadas através de diferentes máscaras de fase.

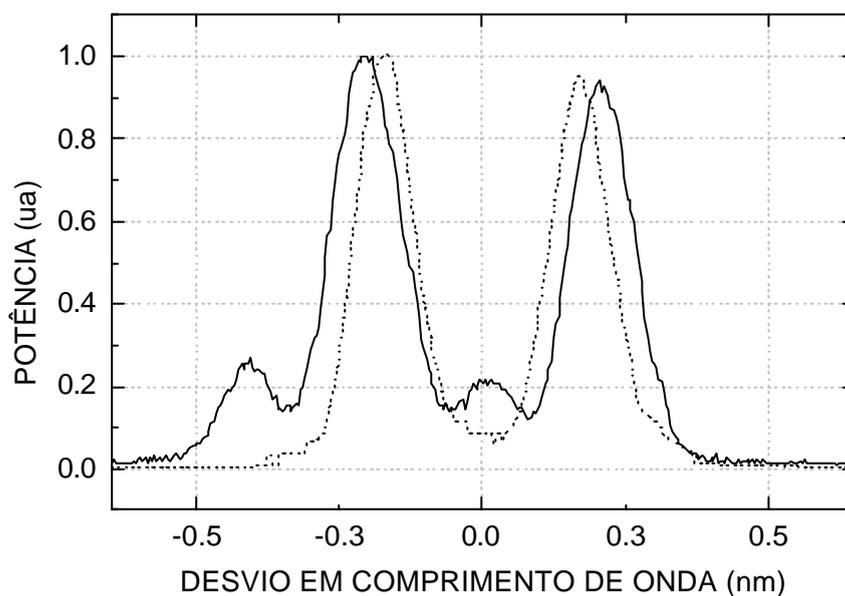


Figura 6.1 - Espectro de reflexão de FBGs em fibras bow tie. Linha contínua: fibra comercial com 80 μm de diâmetro. Linha pontilhada: fibra comercial com 125 μm de diâmetro.

A principal diferença entre os espectros nas duas fibras é o valor da separação entre as bandas, que é devido à birrefringência induzida por tensão intrínseca.

Os valores de birrefringência para essas fibras, mostrados na tabela 6.1, foram obtidos através dos comprimentos de onda de Bragg das bandas de polarização e dos períodos das máscaras de fase empregados durante o processo de inscrição. É possível

notar que a birrefringência é maior em fibras comerciais com diâmetro menor. A diferença de birrefringência entre as fibras de 125 e 80 μm de diâmetro é de aproximadamente 16 %. Outras bandas de menor intensidade são percebidas na FBG gravada na fibra de menor diâmetro (vide figura 6.1), mas não foi possível identificar com segurança sua origem.

Os resultados para as fibras IEC são similares (vide tabela 6.1). Entretanto, a birrefringência obtida para a fibra com 80 μm de diâmetro é cerca de 30 % maior que a da fibra bow tie com 80 μm .

Tabela 6.1 - Birrefringência das fibras HiBi obtidas para as FBGs utilizadas.

Tipo de fibra (diâmetro)	Birrefringência
Bow tie (125 μm) comercial	3.2×10^{-4}
Bow tie (80 μm) comercial	3.7×10^{-4}
Bow tie corroída (82 μm)	3.1×10^{-4}
IEC (125 μm) comercial	5.5×10^{-4}
IEC (80 μm) comercial	7.1×10^{-4}
IEC corroída (80 μm)	4.2×10^{-4}

Para investigar as variações nas propriedades de birrefringência de fibras HiBi em função dos diâmetros das fibras óticas, fibras IEC e bow tie foram quimicamente corroídas por ácido hidrófluorídrico (HF), enquanto os espectros óticos das FBGs, pré-gravadas nas fibras, são monitorados. As corrosões foram realizadas para duas diferentes concentrações de ácido, 20 % e 40 % (partes por volume). A determinação do diâmetro das fibras durante a corrosão é feita através da inserção de diversas amostras do mesmo tipo de fibra no ácido. Essas amostras foram removidas sucessivamente do ácido, enxaguadas em água destilada, secas e

então os diâmetros foram mensurados através de um microscópio com uma escala calibrada.

A figura 6.2 mostra os diâmetros obtidos pelas amostras de fibra IEC em relação ao tempo de exposição dos trechos ao ácido (20 % de concentração). O tempo de exposição para que a fibra atinja o diâmetro de aproximadamente 70 μm é de 44 min nessa concentração.

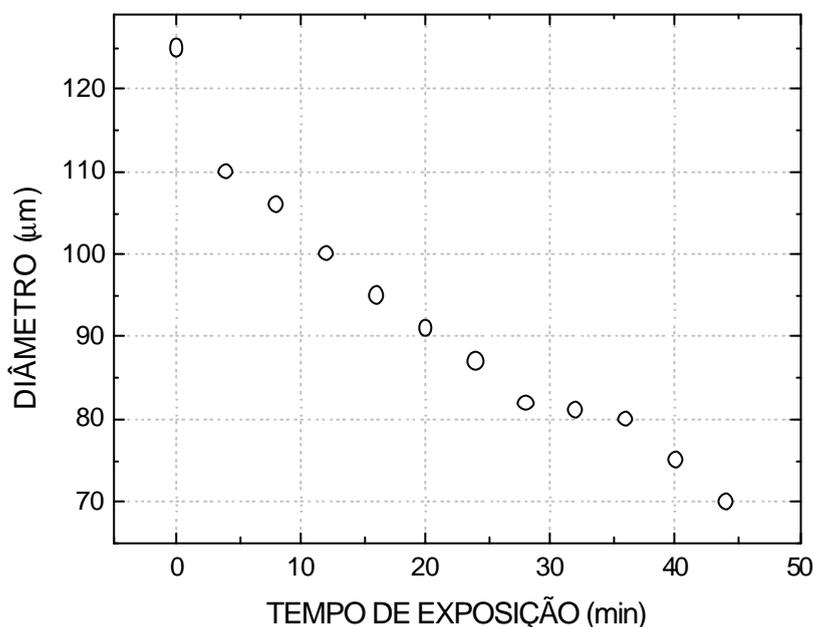


Figura 6.2 - Diâmetro da fibra HiBi IEC em função do tempo de exposição ao ácido hidrófluorídrico em concentração de 20 %.

Um teste inicial foi realizado em uma fibra IEC, com uma FBG pré-gravada, exposta durante 15 minutos em uma solução de ácido hidrófluorídrico a 40 % de concentração. O diâmetro final dessa amostra foi de 82 μm . A figura 6.3 mostra uma comparação do espectro de reflexão dessa rede, antes e depois da corrosão química; o valor de birrefringência determinado pode ser visto na tabela 6.1.

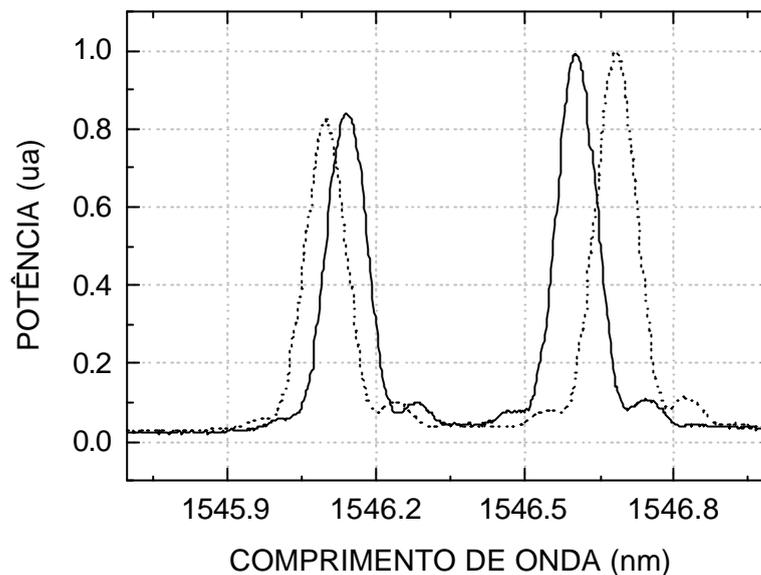


Figura 6.3 - Espectro de reflexão de uma FBG em fibra IEC de diâmetro reduzido, 82 μm (linha contínua), comparada ao de uma fibra com diâmetro normal, 125 μm (linha pontilhada). A fibra HiBi foi atacada por ácido hidrófluorídrico com concentração de 40 %.

O mesmo procedimento foi utilizado para a caracterização prévia da FBG em fibra bow tie com 125 μm de diâmetro. O espectro resultante depois do ataque químico nessa fibra (aproximadamente ~ 80 μm de diâmetro final) é similar ao obtido para a fibra bow tie original, isto é, a variação na birrefringência devido à corrosão é desprezível (tabela 6.1). Esse fato provavelmente decorre da posição interna dos elementos aplicadores de tensão intrínsecos, cujas dimensões maiores apenas alcançam ~ 37 μm . Assim, a corrosão apenas reduz o diâmetro da fibra, mas este valor ainda está longe dos elementos intrínsecos, tal que nenhuma variação significativa na distribuição de tensão é provocada.

A separação entre as bandas de reflexão dos espectros obtidos para a FBG em fibra IEC decresce, isto é, a birrefringência intrínseca para a fibra IEC corroída é menor que a de diâmetro normal. Esse comportamento implica que a diferença

entre as componentes de tensão ao longo dos eixos maior e menor da região de tensão elíptica é menor após a corrosão.

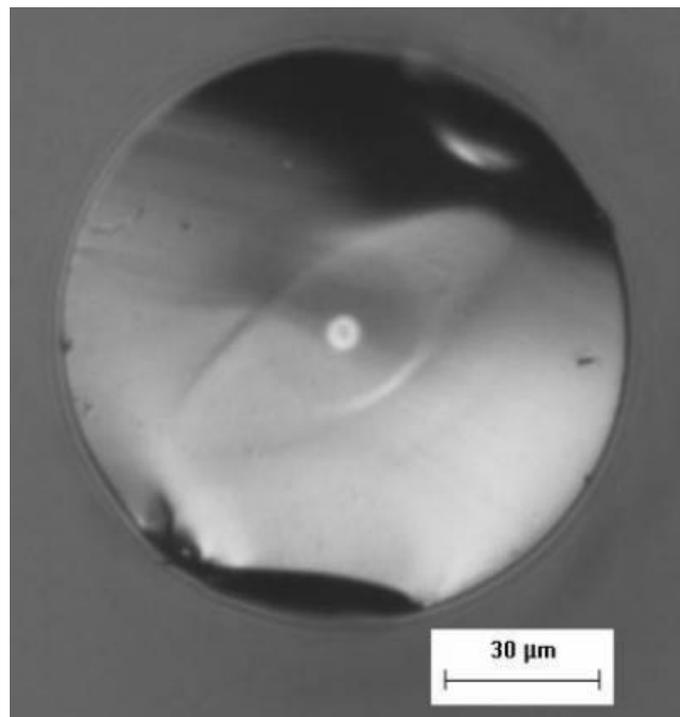
Como a dimensão do núcleo da fibra é ainda muito menor que a da casca remanescente, pode-se assumir que não ocorre variação nas constantes de propagação dos dois modos envolvidos.

A diminuição da birrefringência nas fibras atacadas contrasta com o maior valor dessa grandeza nas fibras comerciais com 80 μm de diâmetro externo, onde o diferencial entre as componentes de tensão é superior.

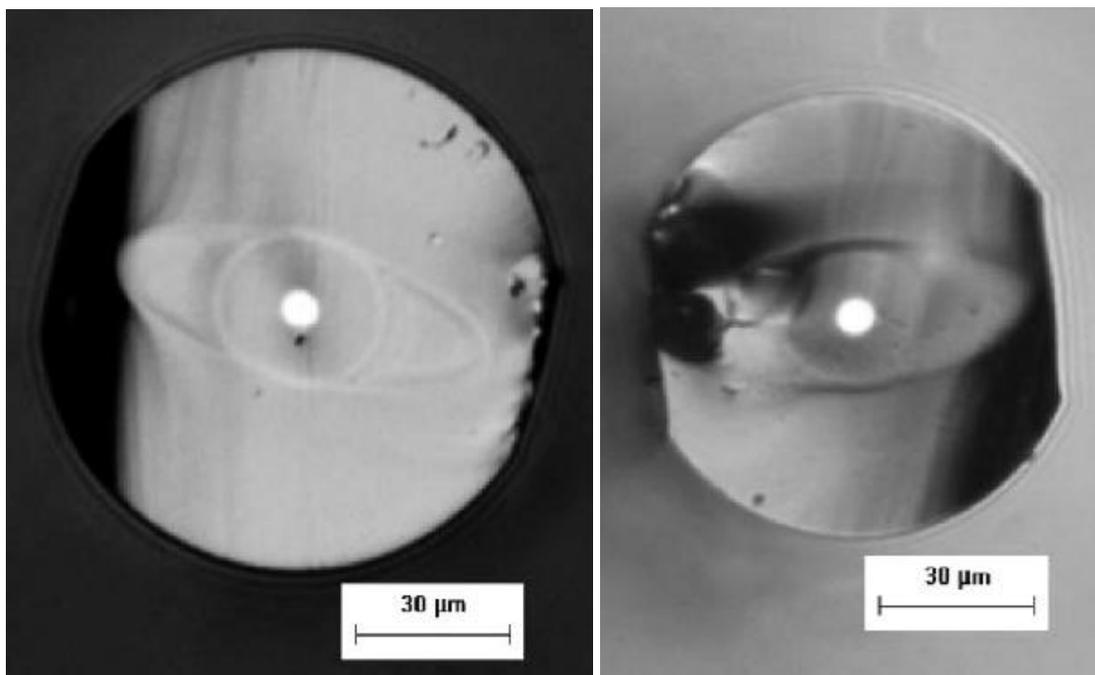
Estudos em fibras IEC [Loch and Heinlein, 1989] revelaram que uma forte tensão diferencial ($\sigma_X - \sigma_Y$) existe na interface entre a casca externa e a elipse (forma geométrica da seção transversal da região aplicadora de tensão elíptica), mas este comportamento foi observado apenas ao longo do eixo maior da elipse (vide capítulo 2, seção 2.2.1). Após um pico na interface, a tensão diferencial na casca ainda apresenta altos valores (maiores que os valores dentro da elipse). Ao longo do eixo menor a tensão diferencial é maior dentro da região elíptica (comparada ao valor de tensão ao longo do eixo maior), e cai a zero na interface com a casca [Loch and Heinlein, 1989].

A taxa de corrosão apresenta um aumento, na região externa à borda da região aplicadora de tensão intrínseca, provavelmente por que regiões com alta tensão interna entram em contato com o ácido e como a corrosão é mais rápida em regiões com maior tensão, é possível corroer mais rapidamente o meio da fibra (ao longo do eixo maior da elipse). A diferente composição do vidro na região elíptica aplicadora de tensão também pode contribuir para a diferença de velocidade do ataque químico. Mantendo a fibra HiBi no ácido, após um certo tempo, a fibra é degradada em duas estruturas cilíndricas unidas pela fibra original na posição perto do nível de imersão.

A figura 6.4 mostra a seção transversal da fibra IEC com 125 μm e as variações na fibra após dois tempos de exposição ao ácido HF com concentração de 20 %. A casca interna elíptica pode ser observada nessas fotografias. O eixo maior da elipse mede aproximadamente 75 μm (tabela 4.2).



(a)



(b)

(c)

Figura 6.4 - Microfotografias das seções transversais de fibras HiBi IEC comercial (a) com 125 μm de diâmetro e, após o ataque químico, (b) diâmetro reduzido para 100 μm e (c) para 86 μm .

A figura 6.5 apresenta o espectro ótico da FBG em fibra IEC obtida em função do tempo de exposição, para caracterizar as variações nas propriedades óticas da rede. O ácido é diluído em 20 % (partes por volume) para reduzir a velocidade da corrosão química e aumentar o número de pontos ao longo do processo.

Os espectros mostram a posição em comprimento de onda dos picos para cada banda de polarização quando o tempo de exposição aumenta. Inicialmente uma pequena redução na separação das bandas (que corresponde à birrefringência da fibra) é percebida. O processo é acelerado após aproximadamente 10 minutos. Pode ser observado que a intensidade da banda de polarização Y decresce, entretanto um pequeno aumento na intensidade da outra banda ocorre.

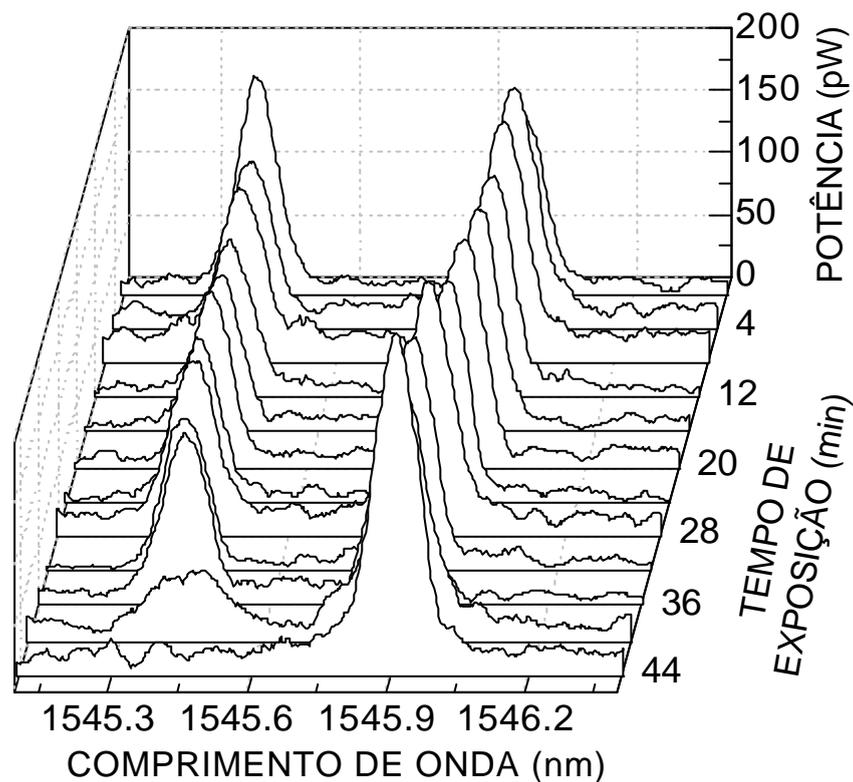


Figura 6.5 - Evolução das bandas de reflexão de uma rede de Bragg gravada em fibra HiBi IEC, em função do tempo de exposição. HF com 20 % de concentração.

Após o tempo de exposição de 44 minutos, o espectro apresenta uma banda única, ou seja, a birrefringência da fibra é aproximadamente nula. É interessante notar que a banda restante é a correspondente ao eixo de polarização X, associada à luz polarizada ao longo do maior eixo da elipse.

Embora não tenha sido registrado, devido ao controle manual para armazenar os espectros no OSA, observou-se uma rápida evolução, entre 36 e 44 min da posição das bandas, que se deslocam até colapsarem.

A corrosão química ao longo da direção do eixo maior atinge a região interna da fibra mais rápido, reduz a tensão e causa o desaparecimento da outra banda. A variação na birrefringência, medida pelos comprimentos de onda de Bragg, pode estar relacionada à modificação da estrutura elíptica e, portanto, à variação da tensão interna nas fibras IEC.

As propriedades espectrais da FBG variam drasticamente depois que o diâmetro da fibra atinge aproximadamente 75 μm (40 minutos de exposição ao ácido). A figura 6.6 mostra as variações na posição dos picos de reflexão em função do diâmetro da fibra HiBi.

O primeiro ponto à esquerda do gráfico aponta para o desaparecimento da birrefringência intrínseca da fibra e o espectro da FBG apresenta apenas uma banda única. Pode ser visto que a variação é aproximadamente linear quando o diâmetro é maior que 85 μm . Os diferentes coeficientes angulares para as bandas de polarização X e Y podem estar relacionados às variações assimétricas da tensão interna devido à casca interna elíptica. O maior coeficiente para a banda de polarização X implica que inicialmente a redução é maior ao longo do eixo maior da elipse.

A figura 6.7 mostra a birrefringência em função do diâmetro para a corrosão com ácido HF em concentração de 20%. Os resultados para as duas medidas pontuais feitas em concentração de 40 % são também mostradas. A birrefringência decresce linearmente com o diâmetro de 125 μm a 85 μm . Após esse ponto, uma redução no diâmetro causa um rápido decréscimo na birrefringência, que é anulada para um diâmetro de aproximadamente 75 μm .

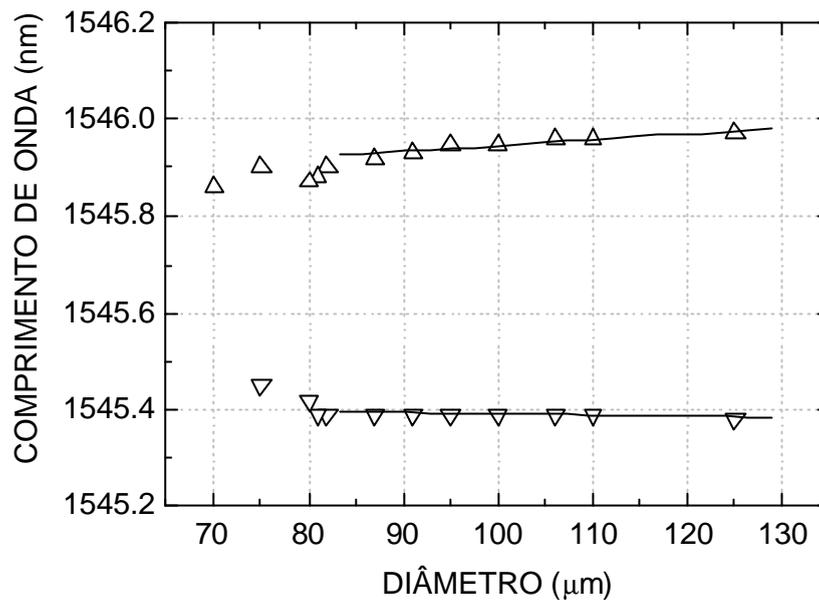


Figura 6.6 - Posição dos picos das bandas de polarização X e Y de uma FBG em fibra HiBi IEC, em função do diâmetro da fibra, reduzido por corrosão química com HF a 20 %. No gráfico estão indicados os pontos dos resultados experimentais (▽ - polarização Y e Δ - polarização X) e as linhas da regressão linear. Os coeficientes angulares das linhas de melhor ajuste são: 1,24 pm/μm para a banda de polarização X e -0,23 pm/μm para a banda de polarização Y.

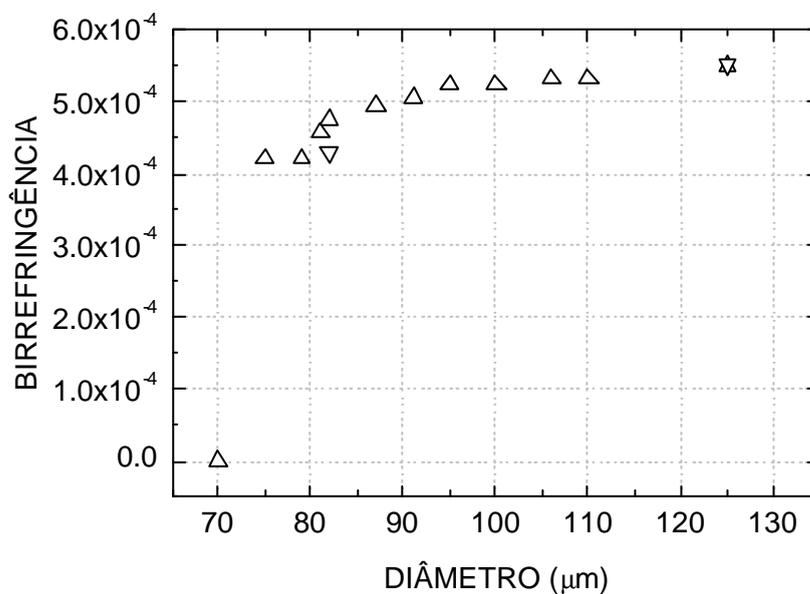


Figura 6.7 - Birrefringência de fibras IEC em função do diâmetro externo. As corrosões foram realizadas em duas fibras HiBi com diferentes concentrações de HF: ▽ - 40 % e Δ - 20 %.

O ataque progressivo em solução ácida para estudo da evolução da birrefringência foi também realizado em FBGs inscritas em fibras bow tie. A figura 6.8 mostra as seções transversais dessa fibra com 125 μm de diâmetro (original) e com 110 μm , após 40 min de exposição ao ácido HF em concentração de 20 %. Para aproximadamente o mesmo tempo de exposição ao ácido, a fibra IEC é reduzida a um diâmetro externo de $\sim 75 \mu\text{m}$. Percebe-se nessas fotos a região aplicadora de tensões.

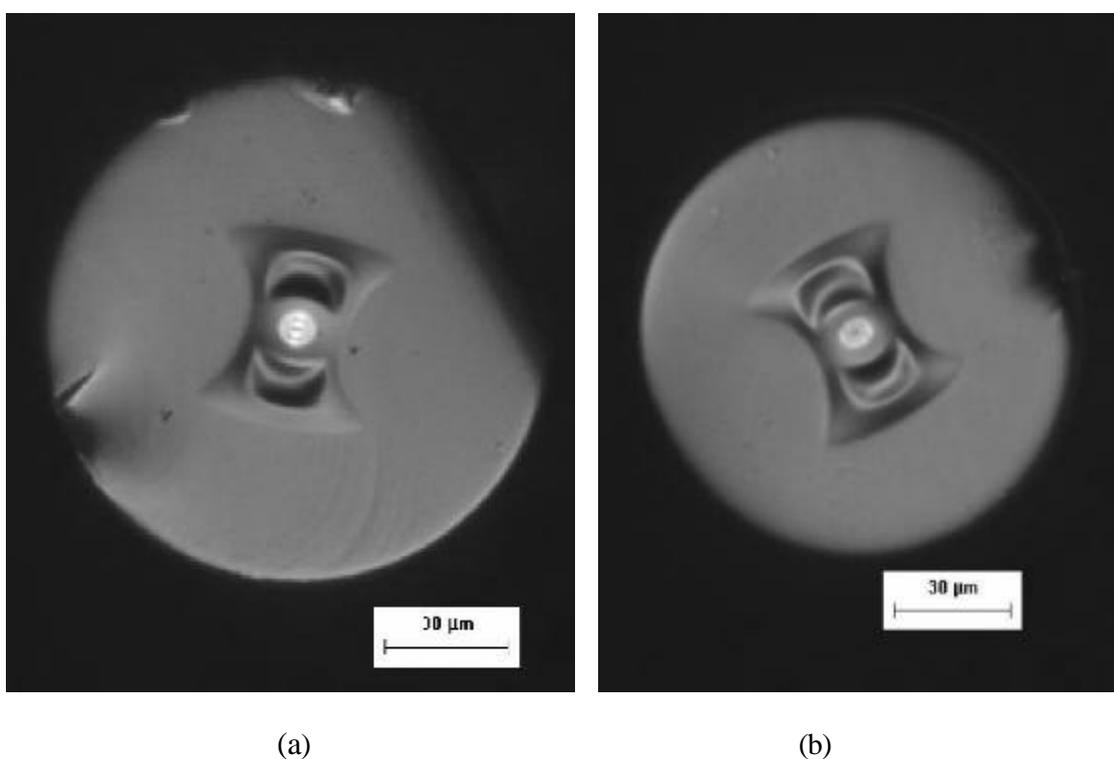


Figura 6.8 - Microfotografias das seções transversais de fibras HiBi bow tie comercial (a) com 125 μm de diâmetro e após o ataque químico, (b) diâmetro reduzido de 110 μm .

A figura 6.9 mostra os diâmetros obtidos pelas amostras de fibra bow tie em relação ao tempo de exposição dos trechos ao ácido (20 % de concentração). Para o tempo de exposição de 190 min o diâmetro é reduzido a 44 μm .

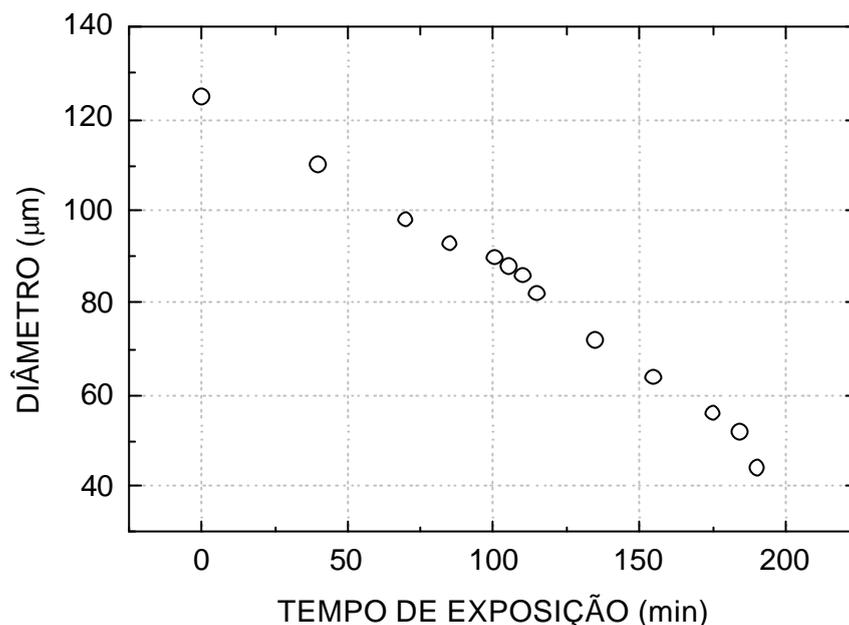


Figura 6.9 - Diâmetro da fibra HiBi bow tie em função do tempo de exposição ao ácido hidrófluorídrico em concentração de 20 %.

O espectro ótico da FBG em fibra bow tie, obtido em função do tempo de exposição, é mostrado na figura 6.10. A redução do espaçamento em comprimento de onda entre as bandas de polarização, ou seja, a diminuição da birrefringência, pode ser claramente visualizada nesse gráfico. Após aproximadamente 170 min as bandas de polarização começam a se sobrepor e, para 185 min, as bandas estão sobrepostas e apenas uma única banda pode ser visualizada no espectro de reflexão.

A menor velocidade de ataque químico nessa situação permite melhor determinação da evolução das bandas quando o diâmetro aproxima-se da região aplicadora de tensão.

A figura 6.11 mostra as variações na posição dos picos de reflexão em função do diâmetro da fibra bow tie. Pode-se perceber pelo gráfico que as bandas se sobrepõem somente quando o diâmetro da fibra, pela corrosão, atinge aproximadamente 44 µm. Esse valor está de acordo com as dimensões dos lóbulos da gravata (elementos

aplicadores de tensão intrínseca) da fibra bow tie, de $\sim 37 \mu\text{m}$. Assim, a birrefringência é anulada quando a corrosão atinge a borda dos elementos intrínsecos, mostrando o mesmo comportamento observado na fibra IEC.

A ligeira tendência das duas bandas para comprimentos de onda maiores, na faixa de diâmetro entre 125 e $65 \mu\text{m}$, está relacionada à redução homogênea da tensão intrínseca nos dois eixos. Quando a corrosão atinge os elementos intrínsecos a variação da tensão é proporcional, ou seja, enquanto existe a diminuição da tensão para o eixo X, a tensão segundo o eixo Y aumenta, resultando na convergência das bandas para um ponto médio.

Os valores de birrefringência da fibra bow tie em função do diâmetro para a corrosão com ácido HF em concentração de 20%, são mostrados na figura 6.12. Até aproximadamente $80 \mu\text{m}$ de diâmetro não há variação da birrefringência da fibra. Após esse valor, a birrefringência decresce monotonamente até atingir zero em $44 \mu\text{m}$.

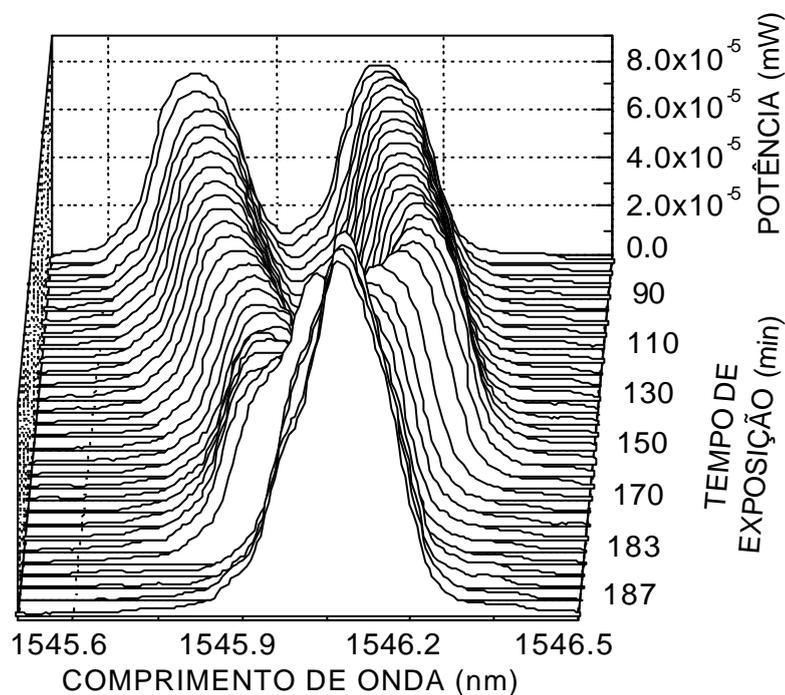


Figura 6.10 - Evolução das bandas de reflexão de uma rede de Bragg gravada em fibra HiBi bow tie, em função do tempo de exposição. Ataque realizado com HF em concentração de 20 %.

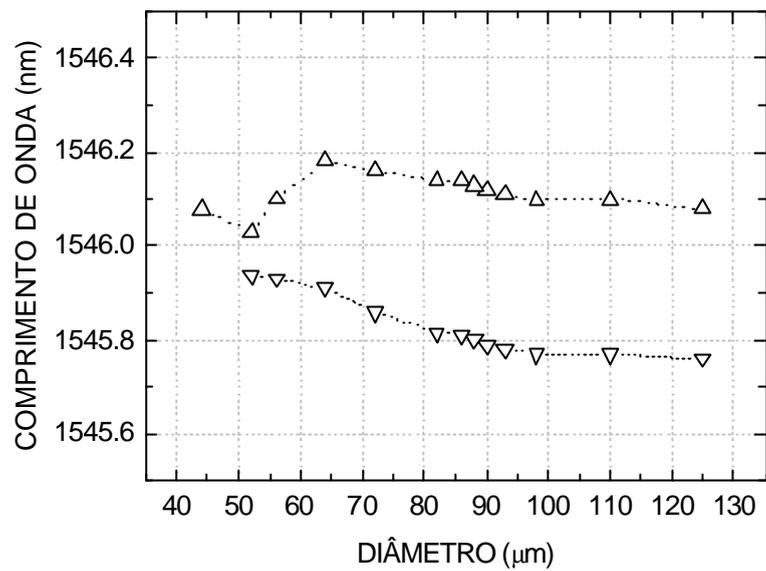


Figura 6.11 - Posição dos picos das bandas de polarização X e Y de uma FBG em fibra HiBi bow tie, em função do diâmetro da fibra, reduzida por corrosão química com HF a 20 %. Δ - indicam os dados experimentais obtidos para a banda de polarização X e ∇ - para a polarização Y.

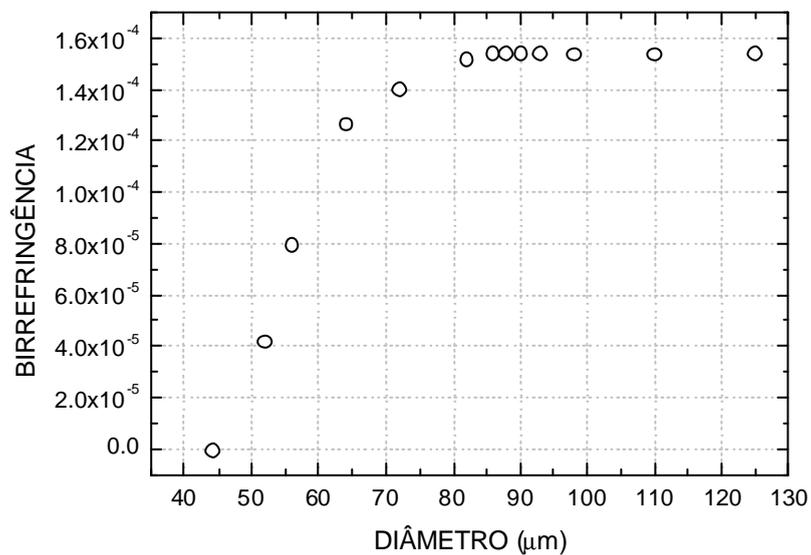


Figura 6.12 - Birrefringência de fibras bow tie em função do diâmetro da casca externa. A corrosão foi realizada com a fibra em ácido HF em concentração de 20%.

6.2 Caracterização das redes por deformação transversal e temperatura

Uma FBG em fibra IEC com diâmetro corroído pelo ácido HF até $82 \mu\text{m}$ de diâmetro, foi caracterizada com a aplicação de cargas transversais e por temperatura [Abe *et al.*, 2003 (c)], através dos sistemas descritos no capítulo 4. O comprimento da rede é de 10 mm.

Os valores da posição em comprimento de onda dos picos do espectro de reflexão com a deformação, para as bandas de polarização X e Y, com a aplicação de cargas a 0° e 90° são mostrados no gráfico da figura 6.13, enquanto a calibração dos valores de comprimento de onda de Bragg com a temperatura, pode ser vista no gráfico da figura 6.14, para aquelas duas bandas.

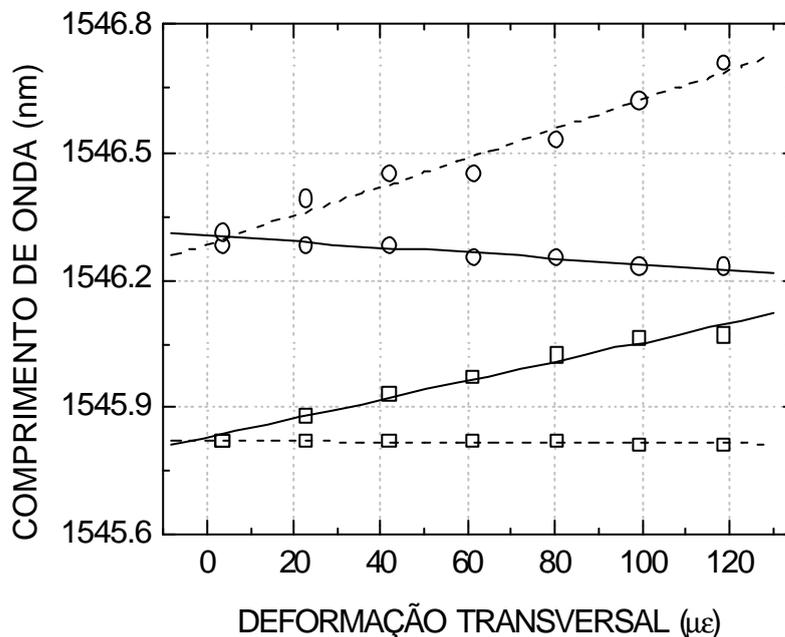


Figura 6.13 - Dependência do comprimento de onda de Bragg das bandas de polarização, Y (\square) e X (\circ), com a magnitude da carga aplicada. As linhas representam o melhor ajuste segundo as direções de aplicação de carga: linha pontilhada - 90° e linha sólida - 0° .

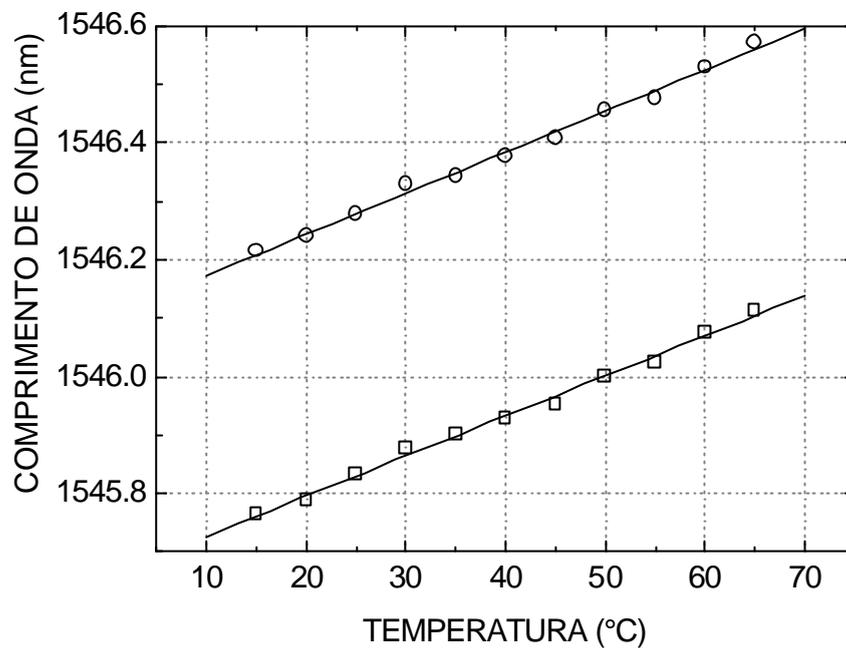


Figura 6.14 - Curvas dos dados experimentais de variação em comprimento de onda dos picos em função da temperatura, para as bandas de polarização Y (□) e X (O). As linhas representam o melhor ajuste.

A tabela 6.2 mostra os valores obtidos para os coeficientes angulares em função de temperatura e deformação, para as redes de Bragg gravadas em fibra IEC com diâmetro reduzido para $82\ \mu\text{m}$ e para as fibras comerciais mostradas no capítulo 4, bow tie de $80\ \mu\text{m}$ e IEC de $125\ \mu\text{m}$, para comparação. Como as amostras de fibras HiBi IEC de $80\ \mu\text{m}$ somente foram adquiridas recentemente, não houve tempo hábil para realização dos experimentos de caracterização das FBGs gravadas nestas fibras.

Os coeficientes angulares de temperatura não possuem valores consideravelmente diferentes para os três tipos de dispositivos. Para os coeficientes angulares de deformação, os valores obtidos para a fibra IEC corroída são superiores, cerca de duas vezes, aos obtidos para a fibra bow tie

comercial de 80 μm , nos dois eixos de aplicação de carga. Para a fibra IEC comercial de 125 μm , segundo o eixo de aplicação de carga Y, o coeficiente é cerca de duas vezes maior, que o obtido para a fibra corroída, porém, para o outro eixo, ocorre o inverso. Dependendo então do eixo de aplicação de carga, um coeficiente angular maior de deformação pode ser obtido com a modificação do diâmetro das fibras HiBi. Para as FBG em fibras IEC de 125 μm a diferença entre os coeficientes angulares máximos para as direções de aplicação de carga, chega quase a 80 %, enquanto que para a FBG em fibra IEC corroída esta diferença é de apenas 20 %.

Tabela 6.2 - Coeficientes de sensibilidade à temperatura e deformação obtidas para a fibra IEC corroída pelo ácido fluorídrico e aqueles obtidos em fibras comerciais, bow tie de 80 μm e IEC de 125 μm .

Fibra (diâmetro)	Temperatura		Deformação	
	$\Delta l_x / \Delta T$ (pm/°C)	$\Delta l_y / \Delta T$ (pm/°C)	$\Delta l_x / \Delta \epsilon$ (pm/me)	$\Delta l_y / \Delta \epsilon$ (pm/me)
IEC corroída (82 mm)	7,00	6,90	- 0,7 (X eixo) 3,4 (Y eixo)	2,23(X eixo) - 0,1 (Y eixo)
Bow tie (80 mm)	8,02	8,46	- 0,02 (X eixo) 1,2 (Y eixo)	1,16 (X eixo) 0,3 (Y eixo)
IEC (125 mm)	6,76	6,71	- 0,29 (X eixo) 7,02 (Y eixo)	1,55 (X eixo) 1,02 (Y eixo)

6.3 Determinação simultânea de tensão transversal e temperatura com fibras de alta birrefringência de diâmetro reduzido

Usando as curvas de sensibilidade a deformação e a temperatura obtidas para a FBG em fibra IEC corroída, medidas simultâneas de deformação e temperatura foram também determinadas, para a aplicação de cargas transversais a 90°. Alguns dos valores estão dispostos na tabela 6.3. Os valores de deformação foram determinados com erro máximo de deformação de $\pm 16 \mu\epsilon$, para o intervalo de medidas entre 33 a 94 $\mu\epsilon$, e de temperatura de $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, na faixa de 14 a 54 $^\circ\text{C}$.

Tabela 6.3 - Medidas simultâneas de temperatura e deformação transversal, obtidas com a FBG em fibra HiBi IEC corroída (diâmetro 82 μm).

Temperatura Deformação	14 $^\circ\text{C}$	24 $^\circ\text{C}$	34 $^\circ\text{C}$	44 $^\circ\text{C}$	54 $^\circ\text{C}$
33 me	15 $^\circ\text{C}$ -1 $^\circ\text{C}$	28 $^\circ\text{C}$ -4 $^\circ\text{C}$	33 $^\circ\text{C}$ 1 $^\circ\text{C}$	44 $^\circ\text{C}$ 0 $^\circ\text{C}$	56 $^\circ\text{C}$ -2 $^\circ\text{C}$
	37 $\mu\epsilon$ -4 $\mu\epsilon$	37 $\mu\epsilon$ -4 $\mu\epsilon$	39 $\mu\epsilon$ -6 $\mu\epsilon$	42 $\mu\epsilon$ -9 $\mu\epsilon$	42 $\mu\epsilon$ -9 $\mu\epsilon$
48 me	17 $^\circ\text{C}$ -3 $^\circ\text{C}$	29 $^\circ\text{C}$ -5 $^\circ\text{C}$	36 $^\circ\text{C}$ -2 $^\circ\text{C}$	47 $^\circ\text{C}$ -3 $^\circ\text{C}$	56 $^\circ\text{C}$ -2 $^\circ\text{C}$
	54 $\mu\epsilon$ -6 $\mu\epsilon$	57 $\mu\epsilon$ -9 $\mu\epsilon$	56 $\mu\epsilon$ -8 $\mu\epsilon$	54 $\mu\epsilon$ -6 $\mu\epsilon$	59 $\mu\epsilon$ -11 $\mu\epsilon$
64 me	17 $^\circ\text{C}$ -3 $^\circ\text{C}$	28 $^\circ\text{C}$ -4 $^\circ\text{C}$	36 $^\circ\text{C}$ -2 $^\circ\text{C}$	46 $^\circ\text{C}$ -2 $^\circ\text{C}$	57 $^\circ\text{C}$ -3 $^\circ\text{C}$
	49 $\mu\epsilon$ 15 $\mu\epsilon$	48 $\mu\epsilon$ 16 $\mu\epsilon$	48 $\mu\epsilon$ 16 $\mu\epsilon$	54 $\mu\epsilon$ 10 $\mu\epsilon$	53 $\mu\epsilon$ 11 $\mu\epsilon$
79 me	17 $^\circ\text{C}$ -3 $^\circ\text{C}$	29 $^\circ\text{C}$ -5 $^\circ\text{C}$	36 $^\circ\text{C}$ -2 $^\circ\text{C}$	48 $^\circ\text{C}$ -4 $^\circ\text{C}$	58 $^\circ\text{C}$ -4 $^\circ\text{C}$
	66 $\mu\epsilon$ 13 $\mu\epsilon$	80 $\mu\epsilon$ -1 $\mu\epsilon$	71 $\mu\epsilon$ 8 $\mu\epsilon$	65 $\mu\epsilon$ 14 $\mu\epsilon$	73 $\mu\epsilon$ 6 $\mu\epsilon$
94 me	17 $^\circ\text{C}$ -3 $^\circ\text{C}$	29 $^\circ\text{C}$ -5 $^\circ\text{C}$	36 $^\circ\text{C}$ -2 $^\circ\text{C}$	48 $^\circ\text{C}$ -4 $^\circ\text{C}$	58 $^\circ\text{C}$ -4 $^\circ\text{C}$
	80 $\mu\epsilon$ 14 $\mu\epsilon$	100 $\mu\epsilon$ -6 $\mu\epsilon$	94 $\mu\epsilon$ 0 $\mu\epsilon$	91 $\mu\epsilon$ 3 $\mu\epsilon$	85 $\mu\epsilon$ 9 $\mu\epsilon$

Em conclusão, os parâmetros das redes e das fibras HiBi foram modificadas através do processo de corrosão e um estudo da distribuição de tensões intrínsecas destas fibras pode ser efetuado.

Com os resultados obtidos de corrosão dos dois tipos de fibras HiBi de 125 μm de diâmetro externo, pode-se observar diferenças na maneira como a birrefringência intrínseca é imposta sobre o núcleo. As curvas das bandas de polarização, mostradas no gráfico da figura 6.6 para a fibra IEC, mostram que com o tempo de exposição ao ácido HF, as curvas sofrem pouca variação, até que o diâmetro se aproxime da borda da região elíptica aplicadora de tensão. Nessa região, a banda Y (comprimento de onda menor) sofre rápida variação no espectro para maiores comprimentos de onda (percebido apenas visualmente, não houve tempo hábil para a gravação manual dos espectros), até colapsar na outra banda.

Uma hipótese levantada é que ao chegar na borda entre a casca externa e a região elíptica (a corrosão atinge primeiro a borda relacionada ao eixo maior da elipse), ocorre a separação entre as duas partes da casca externa, divididas ao longo do plano XZ. Essa separação poderia estar aliviando a tensão sobre o eixo Y, aumentando o índice de refração nessa direção e fazendo com que a banda de polarização relacionada sofra mudança para comprimentos de onda maiores.

Porém, isso só ocorre para a banda de polarização Y, pois como a região elíptica ainda está presente, a tensão aplicada por essa região, ainda mantém a banda de polarização X praticamente na mesma posição.

O mesmo comportamento não ocorre para a fibra bow tie. As curvas das bandas de polarização, mostradas no gráfico da figura 6.11 para a fibra bow tie, mostram que com o tempo de exposição ao ácido HF, ao atingir as bordas dos elementos de aplicação de tensão, há uma redução proporcional e simétrica de tensão em cada direção.

FBG em fibra HiBi IEC corroída foi empregada como sensor simultâneo de deformação transversal e temperatura. Os resultados obtidos nesse ensaio

mostram que o sensor pode ser empregado em uma faixa dinâmica maior de deformação transversal, 61 $\mu\epsilon$, em comparação com os valores obtidos com a FBG em fibra IEC não corroída, de 40 $\mu\epsilon$, para aproximadamente a mesma faixa de erros máximos obtidos, deformação de $\pm 16 \mu\epsilon$ e temperatura de $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Isso pode ser uma vantagem quando a aplicação envolve uma faixa maior de análise.

Capítulo 7

Conclusões e perspectivas

Redes de Bragg foram gravadas em diversos tipos de fibras de alta birrefringência e caracterizadas sistematicamente. Basicamente foram utilizados dois processos de gravação, pelo método direto com máscara de fase e com o interferômetro de máscara de fase. Os diferentes parâmetros das redes de Bragg obtidos com esses sistemas serviram para a realização de um estudo espectral detalhado dos dispositivos gerados. Foram produzidas desde redes com bandas de polarização com largura de linha alta (1,28 nm, FWFZ) e espectro não resolvido até redes otimizadas com separação entre as bandas de 0,7 nm e largura de linha estreita (0,19 nm, FWFZ).

As fibras analisadas são aquelas cuja birrefringência é induzida pela anisotropia de tensões, fibras de casca interna elíptica (IEC), bow tie e PANDA, com 125 μm de diâmetro de casca externa. Também foram analisadas fibras HiBi reduzidas, IEC e bow tie com 80 μm de diâmetro externo.

Diferentes valores para a birrefringência intrínseca são relatados, obtidos através de ajustes de bandas teóricas aos espectros de reflexão experimentais. Esses valores puderam ser comparados aos valores obtidos através das experiências realizadas para determinação do comprimento de batimento por varredura espectral.

Foi realizada a caracterização sistemática de todos os dispositivos em função das grandezas externas: temperatura, tensão transversal e tensão longitudinal.

Os coeficientes de sensibilidade à temperatura obtidos mostram que existe uma grande variação para os diferentes tipos de fibras HiBi. Os valores médios variam entre ~ 3 pm/°C (PANDA com 125 μ m de diâmetro) e ~ 11 pm/°C (IEC de mesmo diâmetro). Para comparação, a sensibilidade à temperatura para uma FBG em fibra padrão monomodo encontrado na literatura é de ~ 14 pm/°C. As experiências mostram também a diferença entre aqueles coeficientes determinados para cada banda de polarização (relacionados aos modos rápido e lento). Para a fibra PANDA, por exemplo, essa diferença é de 0,24 pm/°C. Essa diferença pode ser utilizada para medidas simultâneas de temperatura e deformação longitudinal com uma única FBG.

As medidas com tensões longitudinais nas fibras HiBi IEC foram realizadas através de alongação da fibra por meio de pesos e por meio de microposicionadores. Assim, uma relação entre os coeficientes de sensibilidade pôde ser obtida. Os valores obtidos de sensibilidade à carga longitudinal foram de 1,44 nm/N, para a banda X e de 1,51 nm/N para a banda Y, e os valores de sensibilidade à deformação de 1,9 pm/ μ ϵ para a banda X e 2,0 pm/ μ ϵ para a banda Y. Para comparação, o valor de sensibilidade encontrado na literatura para uma fibra monomodo padrão é de 1,2 pm/ μ ϵ .

O estudo das deformações na fibra HiBi com a aplicação de cargas transversais foi realizado. Curvas de sensibilidade às deformações foram obtidas segundo o ângulo de aplicação da força transversal.

A caracterização por tensões transversais nos dois principais eixos para a fibra IEC com diâmetro 125 μ m, mostraram que a maior sensibilidade é obtido com as direções de cargas a 90°, com coeficiente relativamente alto de 7,02 pm/ μ ϵ para a banda de polarização X em relação a banda de polarização Y (1,55 pm/ μ ϵ). Para essa banda o desdobramento tem início com a aplicações de cargas com valores baixos. Portanto, para uma análise com cargas um pouco maiores, as medidas simultâneas de deformação transversal e temperatura para a fibra IEC foram realizadas com a aplicação de cargas a

0° (sobre o eixo X). O desdobramento das bandas com a aplicação de cargas nesse eixo inicia-se para valores maiores.

Experimentos de tensões transversais também foram realizados para uma fibra PANDA com diâmetro 125 μm . A maior sensibilidade foi encontrada para a aplicação de cargas a 90° com coeficiente maior para a banda X, 3,78 pm/ μE . Em comparação com a fibra IEC, a fibra PANDA mostra uma menor sensibilidade nesta banda (50%), com a aplicação de cargas a 90°.

Os valores de sensibilidade de deformação em função da carga aplicada (figura 2.15), obtidos com a simulação por elementos finitos, podem ser usados para converter os valores de deformação obtidos nas experiências com as cargas aplicadas, N/mm, em *microstrain*, μE , (por exemplo, figura 4.21) para cada ângulo de aplicação de força segundo os eixos de birrefringência X e Y [Lawrence *et al.*, 1999].

O comportamento espectral das bandas de polarização em função das forças transversais, variação para uma delas enquanto a outra permanece aproximadamente constante também foi verificado por outros autores [Lawrence *et al.*, 1999]. As curvas de sensibilidade em relação ao ângulo de direção da carga aplicada, também estão de acordo com os resultados por nós determinados.

Entretanto, os resultados obtidos para os valores de sensibilidade da posição do comprimento de onda dos picos de polarização com a carga aplicada, nm/N/mm, são superiores aos valores obtidos por aqueles autores (vide gráfico da figura 3.13). Essa discrepância pode estar relacionada ao desdobramento obtido com o pressionamento e da sistemática realizada para a obtenção dos valores de variação em comprimento de onda quando a banda sofre desdobramento. Não há comentários no trabalho descrito [Lawrence *et al.*, 1999] sobre o desdobramento das bandas com a força transversal aplicada.

FBGs em fibras HiBi tem sido atualmente alvo de grande interesse, devido ao número de trabalhos sendo publicados nessa área [Sudo *et al.*, 1997; Araújo *et al.*, 1999; Urbanczyk *et al.*, 2001]. Recentemente, foram apresentados trabalhos envolvendo esses dispositivos [Chehura *et al.*, 2003 (a); Chehura *et al.*, 2003 (b); Ottevaere *et al.*, 2003], que expõem caracterizações e aplicações em várias áreas.

No trabalho realizado por Chehura *et al.*, [2003 (a)], a caracterização de vários tipos de fibra HiBi em relação às cargas aplicadas apresenta o mesmo comportamento descrito nesse trabalho, maior valor de sensibilidade para as fibras do tipo IEC em relação aos outros tipos analisados. Os dados por eles tabelados também indicam um maior valor para cargas aplicadas segundo o eixo de birrefringência X (ângulo de 0°) do que para o eixo Y. Porém, também nesse caso, os valores dos coeficientes de sensibilidade apresentam valores menores que os obtidos neste trabalho. Também, não há menção sobre o desdobramento das bandas com as forças aplicadas.

Uma aplicação proposta das redes em fibras HiBi mostrado neste trabalho, na área de telecomunicações, é o conversor de comprimentos de onda. Os resultados iniciais obtidos mostraram que a conversão pode ser alta em determinadas regiões do espectro. Outros ensaios nessa área estão sendo efetuados pela Universidade de Aveiro [Noqueira *et al.*, 2002].

Um estudo importante foi realizado com as redes de Bragg gravadas nas fibras HiBi IEC e bow tie (125 μm de diâmetro externo), modificadas através do processo de corrosão química. A caracterização das fibras com a redução do diâmetro externo foi realizada e os espectros de reflexão das FBGs foram obtidos para a análise da birrefringência. A FBG em fibra HiBi corroída até o diâmetro externo de 82 μm foi caracterizada por forças transversais e temperatura e sensor foi utilizado para medidas simultâneas de deformação transversal e temperatura. A variação espectral e a de birrefringência foram utilizados para o estudo das tensões intrínsecas naqueles dois tipos de fibras HiBi.

Os resultados obtidos com a caracterização realizada para os diversos dispositivos foram aplicados para a determinação simultânea de múltiplos parâmetros. As principais contribuições nessa área são as determinações simultâneas em que uma das componentes é relacionada à tensão transversal. Também o estudo de um sensor para determinação de três parâmetros simultâneos foi verificado com a gravação de FBGs sobrepostas.

Pode-se comparar os resultados de medidas simultâneas de deformação transversal e temperatura obtidos para fibras HiBi, com direção de aplicações de cargas diferentes, sobre os eixos de birrefringência X e Y.

Os valores de deformação foram avaliados com erros máximos de $\pm 15 \mu\epsilon$ para o intervalo de medidas de 61 a 91 $\mu\epsilon$, enquanto os erros máximos em temperatura obtidos foram de $\pm 4^\circ\text{C}$, na faixa de 12 a 46 $^\circ\text{C}$. As análises realizadas numa faixa menor de deformação mostram erros em deformação e temperatura altos, impossibilitando as medidas.

Experimentos foram realizados para faixas menores com a utilização de uma fibra PANDA com diâmetro 125 μm . As medidas simultâneas de deformação transversal e temperatura para a fibra PANDA foram realizadas com aplicação de cargas a 90°. Erros máximos de deformação de $\pm 10 \mu\epsilon$ para o intervalo de medidas entre 11 a 51 $\mu\epsilon$, e de $\pm 3^\circ\text{C}$, na faixa de 7 a 53 $^\circ\text{C}$, foram obtidos.

Esses resultados mostram que a aplicação de FBG como sensor simultâneo de deformação transversal e temperatura depende da faixa de valor de deformação em que será utilizado. Para a determinação desejada a fibra HiBi deverá ser escolhida e orientada (0° ou 90°) de acordo com a faixa de medidas esperada.

Essas diferentes sensibilidades obtidas para cada banda de polarização, com aplicação de cargas transversais em diferentes ângulos, poderiam ser usadas para medidas simultâneas de deformações transversais nos dois eixos. Porém, como a diferença de sensibilidade é relativamente alta, esse fato poderia gerar erros maiores para uma componente do que para outra, dependendo da faixa sendo mensurada.

Para minimizar esse problema na determinação de duas componentes de tensão transversal, um sensor com coeficientes de sensibilidade próximos, para as duas bandas de polarização, poderia ser escolhido. Assim, um sensor otimizado, desenvolvido com base numa FBG em fibra HiBi IEC corroída, cujos coeficientes de sensibilidade máximos são modificados para 3,4 $\text{pm}/\mu\epsilon$ (eixo X) e 2,23 $\text{pm}/\mu\epsilon$ (eixo Y), poderia ser a melhor escolha para essa aplicação.

Medidas simultâneas de três parâmetros, temperatura, tensão longitudinal e uma componente de tensão transversal, foram realizadas, com a gravação de duas redes sobrepostas em comprimentos de onda diferentes, com os grupos de bandas afastadas por aproximadamente 12 nm.

O estudo realizado com a mudança do estado de polarização da luz incidente no dispositivo mostra evidência de que existe acoplamento de polarização entre as redes, resultando em um espectro cuja banda de polarização Y de uma das redes é privilegiada, enquanto o mesmo ocorre para a banda X, da outra rede.

Os ensaios simultâneos foram realizados para a faixa de deformação transversal de 12 a 32 $\mu\epsilon$, deformação longitudinal de 167 e 251 $\mu\epsilon$, e de temperatura 15 e 45°C.

Um dos fatores que podem estar associados aos erros obtidos são os relacionados às deficiências no sistema de estabilização de temperatura, resultando em gradientes de temperatura no aparato que envolve o sistema de pressionamento. Nesse sistema os termoeletricos foram colocados nas laterais do bloco de cobre, que envolve as placas de pressionamento (de aço).

Os erros obtidos com as medidas de parâmetros múltiplos são aceitáveis para várias aplicações, porém outros estudos deverão ser realizados com o objetivo de minimizar as variações experimentais e teóricas na determinação dos parâmetros envolvidos.

Para aplicações desses dispositivos como sensores podemos concluir que redes com bandas individuais não completamente definidas (grande largura de banda FWFZ, $\sim 1,3$ nm), obtidas através da inscrição interferométrica com máscara de fase e comprimentos curtos, podem ser utilizadas para a determinação de deformação longitudinal e temperatura, porém a análise de deformações transversais é dificultada pela sobreposição das bandas com o aumento das cargas externas.

Redes com comprimentos longos (~ 10 mm) possuem larguras de banda FWFZ bastante estreitas ($\sim 0,19$ nm) o que permite o acompanhamento do deslocamento dos espectros em comprimento de onda, porém, o comprimento longo pode levar a uma distribuição não homogênea da força sobre toda a extensão da rede e aos possíveis desdobramentos.

As redes obtidas com o interferômetro no CEFET - PR, com comprimentos entre 1 e 4 mm, apresentaram largura de banda FWFZ de 0,55 nm, não foram caracterizadas pelos parâmetros externos, pois foram obtidas apenas no final deste trabalho. Entretanto, as características espectrais apresentadas mostram que variações das bandas com tensões transversais podem ser analisadas, devido a não sobreposição dos picos. Além disso, o comprimento curto desses dispositivos diminui a possibilidade de distribuição não homogênea de força sobre toda a extensão da rede.

Trabalhos futuros

Um dos trabalhos futuros que poderia ser desenvolvido na área experimental é a construção de um sistema para medidas simultâneas de deformação nos dois eixos de polarização da fibra HiBi. Isso possibilitará a determinação de quatro parâmetros simultâneos com as FBGs sobrepostas.

A faixa de temperatura para a caracterização dos dispositivos neste trabalho, de 10 a 60 °C, foi utilizada apenas devido a existência de dispositivos (termoelétricos) para esse intervalo. Para a aplicação em sistemas sensores os dispositivos deverão ser caracterizados para outras faixas de temperatura. Dados na literatura mostram resultados lineares de variação em comprimento de onda até 140 °C para FBG em fibras HiBi [Ferreira *et al.* 2000].

Os resultados obtidos com as medidas simultâneas mostraram, na elaboração da matriz K, que pequenos desvios nos valores dos comprimentos de onda de pico das bandas de polarização, geram altas variações nos parâmetros determinados, ou seja, a matriz não está bem condicionada. Isso pode ser minimizado utilizando uma matriz que envolva também os coeficientes angulares de deformação obtidos pelo método dos elementos finitos. Esse processo poderá ser efetuado posteriormente.

Outros ensaios de temperatura, deformação longitudinal e transversal deverão ser realizados para análises de histerese e para a obtenção dos coeficientes angulares de sensibilidade, com outras FBG gravadas nos mesmos tipos e lotes de fibras HiBi. Para análises estatísticas de erros, várias medidas de cada conjunto, temperatura e deformação, deverão ser realizadas.

Finalmente, aplicações em outras áreas podem ser esperadas. O trabalho de Ottevaere *et al.* [2003] mostra uma interessante aplicação na área odontológica. Uma segunda aplicação nessa área, estudando as forças normais aplicados pelos aparelhos de correção ortodônticos é objeto de uma proposta de doutoramento [Milczewski, 2003].

Publicações resultantes desta tese

Periódicos

- ABE, I., KALINOWSKI, H. J., NOGUEIRA, R., PINTO, J. L. and FRAZÃO, O., "Production and characterization of Bragg gratings written in high birefringence fibre optics", IEE Proceedings Circuits Devices Systems, London, UK, vol. 150, n. 6, pp 495-500, 2003.
- ABE, I., GÓES, R. E., FABRIS, J. L., KALINOWSKI, H. J., MÜLLER, M., FUGIHARA, M. C., FALATE, R., KAMIKAWACHI, R. C. and BARBOSA, C. L., "Production and characterization of refractive index gratings in high-birefringence fibre optics", Optics and Lasers in Engineering, Elsevier Science, vol. 39, n. 5-6, pp. 537-548, 2003.
- SILVA, J. C. C., ABE, I., CHAVES, R. C., FABRIS, J. L., PINTO, J. L., KALINOWSKI, H. J. and BARBOSA, C. L., "Development of Bragg grating sensors at CEFET-PR", Optics And Lasers In Engineering, Elsevier Science, vol. 39, n. 5-6, pp. 511-523, 2003.
- ANDRÉ, P. S. B., PINTO, J. L., ABE, I., KALINOWSKI, H. J., FRAZÃO, O. and ARAÚJO, F. M., "Fibre Bragg Grating for Telecommunications Applications: Tuneable Thermally Stress Enhanced OADM", Journal of Microwave and Optoelectronics, Brasília, DF, vol. 3, n.3, pp. 32-45, 2001.

Trabalhos em Conferências (Seleção)

ABE, I., FRAZÃO, O., KALINOWSKI, H. J., SCHILLER, M. W., NOGUEIRA, R. and PINTO, J. L., "Characterization of Bragg Gratings in Normal and Reduced Diameter Hi-Bi Fibers" International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2003, pp. 887-891, Iguazu Falls, Brazil, 2003.

NOGUEIRA, R., TEIXEIRA, A. L., ANDRÉ, P. S. B., ABE, I., PINTO, J. L. and ROCHA, J. F., "All-Fiber Self-Pumped Broad Band Orthogonal Pumps Wavelength Converter", Proceedings of 10th International Conference on Telecommunications ICT'2003, pp.646-649, Papeete, French Polynesia, 2003.

ABE, I., FRAZÃO, O., NOGUEIRA, R., KALINOWSKI, H. J., PINTO, J. L. and SANTOS, J. L., "Three-parameter simultaneous measurement using superimposed Bragg gratings in high-birefringence optical fibers", Technical Digest of the 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, IEICE, vol. único, pp. 96-99, Nara, Japan, 2003.

ABE, I., SCHILLER, M. W., NOGUEIRA, R., LOPES, P., FRAZÃO, O., SANTOS, J. L., PINTO, J. L. and KALINOWSKI H. J., "Simultaneous measurement of transverse strain and temperature using FBG written in HiBi fiber", NIST Special Publication - Technical Digest: Symposium on Optical Fiber Measurements, 2002, Washington: U.S Government Printing Office, vol. 988, pp. 87 - 90, Boulder, USA, 2002.

ABE, I., SCHILLER, M. W., NOGUEIRA, R., LOPES, P., FRAZÃO, O., SANTOS, J. L., PINTO, J. L. and KALINOWSKI, H. J., "Characterization of FBG written in HiBi IEC fibre for multiparameter sensor", Proceedings of 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society - IEEE LEOS 2002, IEEE Publishing, vol.1, pp. 173 - 174, Glasgow, UK 2002.

NOGUEIRA, R., TEIXEIRA, A. L., ABE, I., ROCHA, J. F. and PINTO, J. L., "Self-Pumped Wide Range Wavelength Converter", Proceedings of 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society - IEEE LEOS 2002, IEEE Publishing, vol.1, pp. 631-632, Glasgow, UK, 2002.

KALINOWSKI, H. J., ABE, I., NOGUEIRA, R., PINTO, J. L., OSÓRIO, S. P. A., FRAZÃO, O. and SANTOS, J. L., "Characterization of Bragg Gratings written in High Birefringence Fibre Optic for Sensor Applications", Proceedings of 6th International Conference on Optoelectronics, Fibre Optics and Photonics - PHOTONICS 2002, vol. CD-ROM, pp. SNS21-SNS24, Mumbai, India, 2002.

ABE, I., FUGIHARA, M. C., DIESES, B. W., KAMIKAWACHI, R. C., FABRIS, J. L., KALINOWSKI, H. J. and BARBOSA, C. L., "Modeling and production of high birefringence FOBG sensors", 4th Iberoamerican Meeting on Optics and 7th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Their Applications, Proc. Soc. Photo Opt. Instrum. Eng., 2001, vol. 4419, pp. 371 - 374, Tandil, Argentina, 2001.

Referências bibliográficas

- ABE, I., KALINOWSKI, H. J., NOGUEIRA, R., PINTO, J. L. and FRAZÃO, O., "Production and characterization of Bragg gratings written in high birefringence fibre optics", IEE Proceedings Circuits Devices Systems, London, UK, vol. 150, n. 6, pp 495-500, 2003 (a).
- ABE, I., GÓES, R. E., FABRIS, J. L., KALINOWSKI, H. J., MÜLLER, M., FUGIHARA, M. C., FALATE, R., KAMIKAWACHI, R. C. and BARBOSA, C. L., "Production and characterization of refractive index gratings in high-birefringence fibre optics", Optics and Lasers in Engineering, Elsevier Science, vol. 39, n. 5-6, pp. 537-548, 2003 (b).
- ABE, I., FRAZÃO, O., KALINOWSKI, H. J., SCHILLER, M. W., NOGUEIRA, R. and PINTO, J. L., "Characterization of Bragg Gratings in Normal and Reduced Diameter Hi-Bi Fibers" International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2003, pp. 887-891, Iguazu Falls, Brazil, 2003 (c).
- ABE, I., FRAZÃO, O., NOGUEIRA, R., KALINOWSKI, H. J., PINTO, J. L. and SANTOS, J. L., "Three-parameter simultaneous measurement using superimposed Bragg gratings in high-birefringence optical fibers", Technical Digest of the 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, IEICE, vol. único, pp. 96-99, Nara, Japan, 2003 (d).
- ABE, I., SCHILLER, M. W., NOGUEIRA, R., LOPES, P., FRAZÃO, O., SANTOS, J. L., PINTO, J. L. and KALINOWSKI H. J., "Simultaneous measurement of transverse strain

and temperature using FBG written in HiBi fiber", NIST Special Publication - Technical Digest: Symposium on Optical Fiber Measurements, 2002, Washington: U.S Government Printing Office, vol. 988, pp. 87 - 90, Boulder, USA, 2002.

ARAÚJO, F. M. M., "Redes de Bragg em Fibra Óptica", Tese de doutorado, Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 1999.

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", Anais IX Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, 2000.

CARRARA, S. L. A., KIM, B. Y. and SHAW, H. J., "Elasto-optic alignment of birefringent axes in polarization-holding optical fiber", Optics Letters, vol. 11, pp. 470-472, 1986.

CAVALEIRO, P. M., ARAÚJO, F. M., FERREIRA, L. A., SANTOS, J. L. and FARAH, F., "Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Using Bragg Gratings Written in Germanosilicate and Boron-Codoped Germanosilicate Fibers", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 11, n. 12, pp.1635-1637, 1999.

CHEHURA, E., YE, C.C., JAMES, S. W. and TATAM, R. P., "Characterisation of the response of fibre Bragg grating sensors written in different types of high birefringent fibres subjected to transverse load", Proceedings of Optical Fiber Sensors 16, pp. 240-243, Nara, Japan, 2003. (a)

CHEHURA, E., SKORDOS, A. A., YE, C.C., JAMES, S. W., PARTRIDGE, I. K., and TATAM, R. P., "Multi-axial monitoring in curing glass fibre/epoxy composites measured using fibre Bragg grating sensors fabricated in high birefringent fibres", Proceedings of Optical Fiber Sensors 16, pp. 180-183, Nara, Japan, 2003. (b)

CULSHAW, B. & DAKIN, J. (eds.), "Optical Fibre Sensors: Components and Subsystems", Artech House, vol. 3, London, 1996.

- DAKIN, J. & CULSHAW, B. (eds.), "Optical Fibre Sensors: Principles and Components", Artech House, vol.1 e vol.2, London, 1988.
- DU, W. C., TAO, X. M. and TAM, H. Y., "Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 11, n. 1, pp. 105-107, 1999.
- DYOTT, R. B., "Elliptical Fiber Waveguides", Artech House, Boston, 1995.
- ERDOGAN, T., "Fiber Grating Spectra", Journal of Lightwave Technology, vol. 15, n.8, pp. 1277-1294, 1997
- FERREIRA, L. A., ARAÚJO, F. M., SANTOS, J. L. and FARAHI, F., "Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors", Optical Engineering, vol. 39, n. 8, pp. 2226-2233, 2000.
- GAFSI, R. and EL-SHERIF, M. A., "Analysis of Induced-Birefringence Effects on Fiber Bragg Gratings", Optical Fiber Technology, n. 6, pp. 299-323, 2000.
- GIALLORENZI, T. G., ET AL, "Optical Fiber Sensor Technology", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. QE, n. 4, pp. 626-665, 1982.
- GÓES, R., E., "Produção de Acopladores de Polarização em Fibras Óticas de Alta Birrefringência", Tese de Mestrado, CEFET-PR, 2002.
- HIGUERA, J. M. L. (eds.), "Handbook of Optical Fibre Sensing Technology", John Wiley & Sons Ltd., 2002.
- HILL, K. O. and MELTZ, G., "Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview", Journal of Lightwave Technology, vol. 15, n. 8, pp.1263-1276, 1997.
- HILL, K. O., FUFII, Y., JOHNSON, D. C. and KAWASAKI, B. S., "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication", Appl. Phys. Lett., vol. 32, pp. 647-649, 1978.
- JAMES, S. W., DOCKNEY, M. L. and TATAM, R. P., "Simultaneous independent

- temperature na strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors”, *Electronics Letters*, vol. 32, n. 12, pp. 1133-1134, 1996.
- KAMINOW, I. P, “Polarization in Optical Fibers”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 17, n. 1, pp. 15-22, 1981.
- KANELLOPOULOS, S. E., HANDEREK, V. A., and ROGERS, A., J., “Simultaneous strain and temperature sensing with photogenerated in-fiber gratings”, *Optics Letters*, vol. 20, n. 3, pp. 333-335, 1995.
- KASHYAP, R., “Fiber Bragg Grating”, San Diego, Academic Press, 1999.
- KAWASE, L., VALENTE, L. C. G., MARGULIS, W. and CARVALHO, M. C. R., “Force measurement using induced birefringence on Bragg gratings”, *Proceedings of SBMO/IEEE MTT-S IMOC 97*, pp. 394-396, 1997.
- KERSEY, A. D., DAVIS, M. A., PATRICK, H. J., LEBLANC, M. and KOO, K. P., “Fiber Grating Sensors”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, n. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- KIKUCHI, K and OKOSHI, T., “Wavelength-sweeping technique for measuring the beat length of linearly birefringent optical fibers”, *Optics Letters*, vol. 8, n. 2, pp. 122-123, 1983.
- LACROIX, S., PARENT, M., BURES, J. and LAPIERRE, J., “Mesure de la biréfringence linéaire des fibres optiques monomodes par une méthode thermique”, *Applied Optics*, vol. 23, n. 15, pp. 2649-2653, 1984.
- LAM, D. K. W. and GARSIDE, B. K., “Characterisation of single-mode optical fibre filters”, *Applied Optics*, vol. 20, pp. 440-456, 1981.
- LAWRENCE, C. M., NELSON, D. V., UDD, E. and BENNETT, T., “A Fiber Optic Sensor for Transverse Strain Measurement”, *Experimental Mechanics*, vol. 39, n. 3, pp.202-209, 1999.

- LEMAIRE, P. J., ATKINS, R. M., MIZRAHI, V. and REED, W. A., *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 1191-1198, 1993.
- LO, Y. L., "Using in-fiber Bragg-grating sensors for measuring axial strain and temperature simultaneously on surfaces of structures", *Optical Engineering*, vol. 37, n. 8, pp. 2272-2276, 1998.
- LOCH, M. and HEINLEIN, W. E., "High-Resolution Measurement of Birefringence Profiles in Stress-Induced Polarization-Maintaining Fibers", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 7, n. 8, pp. 1213-1216, 1989.
- MASTRO, S. A., "The effect of transverse load on fiber Bragg grating measurements", Thesis of Master, Drexel University, 2000.
- MATOS, C. J. S., TORRES, P., VALENTE, L. C. G., MARGULIS, W., and STUBBE, R., "Fiber Bragg grating (FBG) characterization and shaping by local pressure", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, n.8, pp. 1206-1211, 2001.
- MELTZ, G., MOREY, W. W., and GLENN, W. H., "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method", *Optics Letters*, vol. 14, pp. 823-825, 1989.
- MILCZEWSKI, M. S., *Comunicação pessoal*, 2003.
- MORGAN, T. J., LACEY, J. P. R. and TUCKER, R.S., "Widely Tunable Four-Wave Mixing in Semiconductor Optical Amplifiers with Constant Conversion Efficiency". *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, n. 10, pp. 1401-1403, 1998.
- NAMIHIRA, Y., "Opto-Elastic Constant in Single Mode Optical Fibers", *Journal of Lightwave Technology*, vol. LT-3, n. 5, pp. 1078-1083, 1985.
- NOGUEIRA, R., TEIXEIRA, A. L., ABE, I., ROCHA, J. F. and PINTO, J. L., "Self-Pumped Wide Range Wavelength Converter", *Proceedings of 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society - IEEE LEOS 2002*, IEEE Publishing, vol.1, pp. 631-632, Glasgow, UK, 2002.

- OTHONOS, A. and KALLI, K., "Fiber Bragg Gratings, Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing", Artech House, Boston, 1999.
- OTHONOS, A., "Fiber Bragg Gratings", *Review of Scientific Instruments*, vol. 68 (12), pp. 4309-4341, 1997.
- OTTEVAERE, H., TABAK, M., AZNAR, D., FERNANDEZ, A. F., IERSHOT, S. V., BERGHMANS, F. and THIENPONT, H., "Optical fiber sensors for monitoring stress build-up in dental cements", *Proceedings of Optical Fiber Sensors 16*, pp. 574-577, Nara, Japan, 2003.
- RAMASWAMY, V., STOLEN, R. H., DIVINO, M. D., and PLEIBEL, W., "Birefringence in elliptically clad borosilicate single-mode fibers", *Applied Optics*, vol. 18, n. 24, pp. 4080-4084, 1979.
- RASHLEIGH, S. C., "Origins and Control of Polarization Effects in Single-Mode Fibers", *Journal of Lightwave Technology*, vol. LT-1, n. 2, pp. 312-330, 1983.
- RASHLEIGH, S. C., "Wavelength dependence of birefringence in highly birefringent fibers", *Optics Letters*, vol. 7, n. 6, pp. 294-296, 1982.
- NODA, J., OKAMOTO, K. and SASAKI, Y., "Polarization-Maintaining Fibers and Their Applications", *Journal of Lightwave Technology*, vol. LT-4, n. 8, pp. 1071-1089, 1986.
- NOGUEIRA, R., TEIXEIRA, A. L., ABE, I., ROCHA, J. F. and PINTO, J. L., "Self-Pumped Wide Range Wavelength Converter", *Proceedings of 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society - IEEE LEOS 2002*, IEEE Publishing, vol.1, pp. 631-632, Glasgow, UK, 2002.
- SHENOY, M. R., THYAGARAJAN, K., PRIYE, V. and MADHAVAN, N. S., "Estimation of the characteristic parameters of fiber Bragg gratings from spectral measurements", *SPIE* vol. 3666, pp. 94-99, 1999.
- SUDO, M., NAKAI, M., HIMENO, K., SUZAKI, S., WADA, A. and YAMAUCHI R., "Simultaneous Measurement of Temperature and Strain using PANDA Fiber

- Grating”, 12 th International Conference on Optical Fiber Sensors, Technical Digest Series, vol. 16, pp. 170-173, 1997.
- TRUJILLO, P. I. T., "Análise Teórica e Experimental de Aplicações de Redes de Bragg em Fibra Óptica", Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002.
- UDD, E., SCHULZ, W. L. and SEIM, J., “Multi-axis fiber grating strain sensor applications for structural monitoring and process control”, SPIE vol. 3538, pp. 206-214, 1999.
- UDD, E., NELSON, D. and LAWRENCE, C., “Multiple axis strain sensing using fiber gratings written onto birefringent single mode optical fiber”, 12 th International Conference on Optical Fiber Sensors, Technical Digest Series, vol. 16, pp. 48-51, 1997.
- UDD, E., NELSON, D., LAWRENCE, C., and FERGUSON, B., “Three axis strain and temperature fiber optic grating sensor”, SPIE vol. 2718, pp. 104-107, 1996.
- URBANCZYK, W., CHMIELEWSKA, E. and BOCK, W. J., "Measurements of temperature and strain sensitivities of a two-mode Bragg grating imprinted in a bow-tie fibre", Measurement Science and Technology, vol. 12, pp. 800-804, 2001.
- WAGREICH, R. B., ATIA, W. A., SINGH H., and SIRKIS, J. S., "Effects of diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringent fibre", Electronics Letters, vol. 32, n. 13, pp. 1223-1224, 1996.
- WOLF, E. (ed.), "Progress in Optics", Elsevier Science, vol. XL, 2000.
- XU, M. G., DONG, L., REEKIE, L., TUCKNOTT, J. A., and CRUZ, J. L., “Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in a tapered optical fibre”, Electronics Letters, vol. 31, n. 10, pp.823-825, 1995.
- XU, M. G., ARCHAMBAULT, J. L., REEKIE, L., and DAKIN, P., “Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fiber grating sensors”,

Electronics Letters, vol. 30, pp. 1085, 1994.

ZHANG, A. P., GUAN, B. O., TAO, X. M., and TAM, H. Y., "Experimental and theoretical analysis of fiber Bragg gratings under lateral compression", Optics Communications, vol. 206, pp. 81-87, 2002.

ZHANG, W., WILLIAMS, J. A. R. and BENNION, I., "Polarization Synthesized Optical Transversal Fiber Employing High Birefringence Fiber Gratings", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 13, n. 5, pp. 523-525, 2001.

RESUMO:

A produção e a caracterização de redes de Bragg em fibras óticas de alta birrefringência é descrita neste trabalho. A birrefringência é determinada pela dependência do comprimento de batimento com o comprimento de onda e pelas bandas de reflexão das redes de Bragg, para três tipos mais comuns de fibras de alta birrefringência (PANDA, bow tie e casca interna elíptica). A caracterização das redes quando submetidas a deformações longitudinais e transversais e temperatura é relatada. A dependência da birrefringência para fibras bow tie e de casca interna elíptica é também determinada em função do diâmetro externo da fibra ótica. Resultados do uso das redes em fibras de alta birrefringência para medir simultaneamente dois dos parâmetros acima mencionados são apresentados. Estruturas consistindo de duas redes escritas na mesma região foram também produzidas e sua aplicação à medida simultânea de três parâmetros é descrita.

PALAVRAS-CHAVE

Redes de Bragg, Fibras de alta birrefringência, Sensores a fibra ótica

ÁREA/SUB-ÁREA DE CONHECIMENTO

3.04.06.01-3: Teoria Eletromagnética, Microondas, Propagação de Ondas, Antenas

3.04.06.00-5: Telecomunicações

3.04.02.00-0: Medidas Elétricas, Magnéticas e Eletrônicas; Instrumentação

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)