

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ELAINE CRISTINA GRABSKI**

**MEDIDAS DE TORÇÃO COM REDES DE BRAGG GRAVADAS EM FIBRAS  
ÓTICAS DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA**

**CURITIBA**

**2022**

**ELAINE CRISTINA GRABSKI**

**MEDIDAS DE TORÇÃO COM REDES DE BRAGG GRAVADAS EM FIBRAS  
ÓTICAS DE ALTA BIRREFRINGÊNCIA**

**Torsion measurements with Bragg gratings written in high birefringence  
optical fibers**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Dr.(a) Ilda Abe.

Coorientador: Dr. Rodrigo Fiorin.

**CURITIBA**

**2022**



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

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



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba



ELAINE CRISTINA GRABSKI

**MEDIDAS DE TORÇÃO COM REDES DE BRAGG GRAVADAS EM FIBRAS ÓTICAS DE ALTA  
BIRREFRINGÊNCIA**

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

Data de aprovação: 30 de Setembro de 2022

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

Dra. Mauren Abreu De Souza, Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Pucpr)

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

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 30/09/2022.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha orientadora Prof. Dra. Ilda Abe, pela diligência com que me guiou nesta trajetória e ao meu coorientador Prof. Dr. Rodrigo Fiorin, pelo suporte e dedicação incondicionais.

Agradeço aos professores do CPGEI e em especial aos do grupo de Fotônica e ao Laboratório Multiusuário de Fotônica, UTFPR-CT.

Agradeço à Secretaria do Curso, pela cooperação e à Universidade e aos meus colegas de laboratório pela presteza e disponibilidade de recursos.

Enfim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal a caracterização por torção de redes de Bragg gravadas em fibras óticas (FBGs) de alta birrefringência (HiBi). A pesquisa envolve a caracterização por ensaios de torção de redes de Bragg gravadas em diferentes tipos de fibras óticas de alta birrefringência e a comparação das sensibilidades obtidas nas diferentes medidas. O trabalho reporta gravações das redes de Bragg em diferentes tipos de fibras de alta birrefringência; a caracterização espectral dos dispositivos por torção; o encapsulamento dos sensores com um tubo capilar metálico e a comparação dos resultados de rotação com e sem o encapsulamento. Os resultados obtidos mostram que uma análise de FBGs em diferentes tipos de fibras HiBi podem ser utilizadas para a comparação das sensibilidades à torção. Através dos diferentes espectros, podem ser obtidas as intensidades dos picos de reflexão em função do ângulo de rotação. Diferentes fibras óticas de alta birrefringência podem levar a sensibilidades e a resultados diferentes em resposta à torção, que podem estar relacionados à tensão e birrefringência induzida de forma complexa.

Palavras-chave: redes de Bragg em fibra ótica, torção, fibras óticas birrefringentes.

## **ABSTRACT**

The main objective of the present work is the torsional characterization of Bragg gratings recorded on high birefringence (HiBi) optical fibers (FBGs). The research involves the characterization by torsion tests of Bragg gratings recorded on different types of high birefringence optical fibers and the comparison of the sensitivities obtained in the different measurements. The work reports on recordings of the Bragg gratings on different types of high birefringence fibers; the spectral characterization of the devices by torsion; the coating of the sensors with a metallic material and the comparison of the torsion results with and without the encapsulation. The results obtained show that an analysis of FBGs in different types of HiBi fibers can be used for the comparison of torsional sensitivities. Using the different spectra, the intensities of the reflection peaks as a function of the rotation angle can be obtained. Different high birefringence optical fibers can lead to different sensitivities and results in response to torsion, which may be related to stress and birefringence induced in a complex way).

Keywords: optical fiber Bragg gratings, torsion, birefringence optical fibers.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fibra ótica e plano de polarização da luz incidente quando: (a) nenhuma torção é aplicada sobre a fibra; (b) uma torção é aplicada sobre a fibra. ....	17
Figura 2- Sensor de torção baseado na medição direta da birrefringência circular induzida pela rotação do laço de fibra. ....	18
Figura 3 -Sensor de torção baseado na medição da birrefringência linear através de da fibra HiBi e do interferômetro de Sagnac. ....	20
Figura 4 – Esquemas seccionais de diferentes geometrias de fibras HiBi: Panda, Bow-tie e Casca interna elíptica.....	22
Figura 5 – Rede de Bragg em uma fibra HiBi e as coordenadas X, Y e Z. (b) Espectro de reflexão com as bandas de polarização correspondente aos eixos lento, X, e rápido, Y, da fibra. ....	23
Figura 6 – Intensidades normalizadas das bandas de polarização em função do ângulo de rotação da fibra HiBi. ....	25
Figura 7 – Esquema da técnica de gravação de redes de Bragg pelo método direto utilizando uma máscara de fase, vista lateral.....	25
Figura 8 – Imagens obtidas por um microscópio ótico (ampliação 40X): (a) fibra ótica HiBi Panda de 125 $\mu\text{m}$ de diâmetro; (b) fibra ótica HiBi bow tie de 125 $\mu\text{m}$ de diâmetro; (c) fibra ótica HiBi casca interna elíptica de 80 $\mu\text{m}$ de diâmetro. .	28
Figura 9 – Sistema de gravação de FBG por máscara de fase.....	29
Figura 10 – Representação esquemática do encapsulamento da FBG para medição por reflexão. ....	30
Figura 11 – Montagem laboratorial para ensaios de torção. ....	31
Figura 12 – Espectros (3D) de reflexão das FBGs em fibra HiBi de casca interna elíptica de 80 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação: (a) FBG1 e (b) FBG2. ....	34
Figura 13 – Espectros (2D) de reflexão das FBGs em fibra HiBi de casca interna elíptica de 80 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação: (a) FBG1 e (b) FBG2. ....	34
Figura 14 – Variação do comprimento de onda da FBG em fibra HiBi de casca interna elíptica de 80 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2. ....	35
Figura 15 – Variação da potência ótica linear refletida da FBG em fibra HiBi de casca interna elíptica de 80 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2.....	35
Figura 16 – Variação do comprimento de onda (3D) da FBG em fibra HiBi Panda de 125 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2. ....	37
Figura 17 – Variação do comprimento de onda (2D) da FBG em fibra HiBi Panda de 125 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2. ....	38

Figura 18 – Variação do comprimento de onda da FBG em fibra HiBi Panda de 125 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2. ....	38
Figura 19 – Variação da potência ótica linear refletida da FBG em fibra HiBi PANDA de 125 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2.....	39
Figura 20 – Variação do comprimento de onda (3D) da FBG em fibra HiBi bow tie de 125 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2. ....	40
Figura 21 – Variação do comprimento de onda (2) da FBG em fibra HiBi bow tie de 125 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2. ....	41
Figura 22 – Variação do comprimento de onda da FBG em fibra HiBi bow tie de 125 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2. ....	41
Figura 23 – Variação da potência ótica linear refletida da FBG em fibra HiBi bow tie de 125 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2.....	42
Figura 24 – Variação da potência ótica linear refletida da FBG em fibra HiBi de casca interna elíptica de 80 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação para uma volta completa, eixo X da FBG2: (a) sem o encapsulamento; (b) encapsulada com o tubo capilar metálico. ....	43
Figura 25 – Variação da potência ótica linear refletida da FBG em fibra HiBi Panda de 125 $\mu\text{m}$ em função do ângulo de rotação para uma volta completa, eixo Y da FBG2: (a) sem o encapsulamento; (b) encapsulada com o tubo capilar metálico.....	44

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Sensibilidade em comprimento de onda e em potência ótica refletida para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2 gravadas em fibra HiBi de casca interna elíptica, obtidas para uma variação do ângulo de rotação de 90 graus.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 2 -Sensibilidade em comprimento de onda e em potência ótica refletida para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2 gravadas em fibra HiBi PANDA, obtidas para uma variação do ângulo de rotação de 90 graus.....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 3 - Sensibilidade em comprimento de onda e em potência ótica refletida para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2 gravadas em fibra HiBi bow tie, obtidas para uma variação do ângulo de rotação de 90 graus.....</b>	<b>42</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UV	Ultravioleta
OSA	Analizador de espectro ótico
LED	Diodo emissor de luz
HiBi	Fibras de alta birrefringência
FBG	Rede de Bragg em Fibra ótica
SMF	Fibra monomodo padrão de telecomunicações
MCF	Fibras de múltiplos núcleos
PCF	Fibras de cristal fotônico
MMF	Fibras multimodo
PM	Manutenção de polarização
EMI	Interferência eletromagnética

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>14</b>
1.2.1 Objetivo geral .....	14
1.2.2 Objetivos específicos .....	14
<b>1.3 Estrutura de trabalho</b> .....	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 Sensores de torção em fibras óticas</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2 Fibras óticas de alta birrefringência</b> .....	<b>21</b>
2.2.1 Redes de Bragg gravadas em fibras de alta birrefringência .....	23
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1 Redes de Bragg em fibras óticas de alta birrefringência</b> .....	<b>27</b>
<b>3.2 Caracterização por torção das redes de Bragg em fibras óticas de alta birrefringência</b> .....	<b>30</b>
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>33</b>
<b>4.1. FBG em fibra HiBi de casca interna elíptica de 80 µm de diâmetro</b> .....	<b>33</b>
<b>4.2 FBG em fibra HiBi PANDA de 125 µm de diâmetro</b> .....	<b>36</b>
<b>4.3 FBG em fibra HiBi bow tie de 125 µm de diâmetro</b> .....	<b>40</b>
<b>4.4 FBG em fibra HiBi encapsulada em tubo capilar metálico</b> .....	<b>43</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>45</b>
<b>TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A capacidade dos sistemas de fibras óticas aplicadas nas telecomunicações está sempre evoluindo e alcançando maiores distâncias e taxas de transmissão, fomentada pela demanda crescente da internet. Desde seu desenvolvimento até os dias atuais, ocorreram mudanças no foco das aplicações das fibras óticas para além das telecomunicações, visando também os usos possíveis em fotônica em engenharia, na área de sensores (KASHYAP, 2009).

Um dos dispositivos fotorefrativos de grande interesse no campo da fotônica em engenharia são as chamadas redes de Bragg em fibras óticas (FBGs). Uma FBG é fabricada através de uma alteração no índice de refração induzida por radiação ultravioleta (UV) e foi observada pela primeira vez em 1978, no Centro Canadense de Pesquisa em Comunicações por Ken O. Hill e sua equipe, durante experimentos com fibra de sílica dopada com germânio e radiação laser de íons de argônio no visível. Naquela ocasião, foi relatada a observação da fotossensibilidade manifestada por mudanças de índice de refração induzidas pela luz no núcleo do guia de onda. Foi notado que estas estruturas periódicas formavam refletores de banda estreita na estrutura do guia e os dispositivos resultantes foram empregados como espelhos seletivos em um laser a gás CW no visível (KASHYAP, 2009). Porém, o interesse pela fotossensibilidade só aumentou após a divulgação do método externo de fabricação da rede realizado por Meltz *et al.* em 1987, através do método holográfico transversal o potencial de aplicação das FBGs teve um amplo desenvolvimento (MELTZ *et al.*, 1987).

Os sensores baseados em FBGs têm sido amplamente utilizados como sensores de deformação e temperatura desde que foram propostos pela primeira vez no final dos anos 80 (MELTZ *et al.*, 1987). A aquisição de parâmetros mecânicos através de sensores FBG alcançou uma importância comercial cada vez maior em diferentes setores da indústria. Este interesse é devido a um conjunto de propriedades oferecidas pela tecnologia de sensores FBG em relação aos equivalentes elétricos (por exemplo, os *strain gauges*), incluindo: imunidade à interferência eletromagnética, resistência à radiação, resistência a produtos químicos corrosivos, dimensões

reduzidas (diâmetro de 125 micrometros) e baixo peso. Em termos de fabricação os sensores FBGs podem ser produzidos com razoável repetibilidade dependendo da técnica utilizada e também multiplexados. Além disso, os sensores FBGs fornecem uma medida pouco sensível à flutuação na irradiância da fonte de iluminação, uma vez que a informação é obtida diretamente pela detecção do deslocamento do comprimento de onda do pico do espectro de reflexão induzido por deformação ou mudança de temperatura (MELTZ *et al.*, 1987, KASHYAP, 2009).

Sensores a fibra ótica têm sido aplicados em medições de torção/rotação. Diferentes abordagens e conceitos foram propostos e demonstrados, que envolvem diferentes tipos de dispositivos, materiais e méto

dos de interrogação. Os primeiros trabalhos no campo dos sensores de torção/rotação baseados em fibras óticas surgiram ao final da década de 80. Os sensores podem ser classificados em extrínsecos, intrínsecos ou ainda de acoplamento de modos (SPILLMAN e FUHR, 1988, ITOH; SAITOH e OHTSUKA, 1987, WEST e CHEN, 1989).

Na área de dispositivos fotorefrativos uma grande gama de sensores têm sido aplicados voltados para as análises de torção, tais como redes de período longo, redes inclinadas e FBGs.

Vários tipos de fibras óticas têm sido empregados para estes tipos de sensores além das fibras monomodo padrão de telecomunicações (SMF), fibras multimodo; fibras de múltiplos núcleos, fibras de cristal fotônico e fibras de alta birrefringência (HiBi).

O interesse pelo uso de redes de Bragg gravadas em fibras HiBi na área de sensoreamento foi motivado principalmente devido à sua sensibilidade à tensão mecânica transversal aplicada à fibra, com aplicações potenciais em vários problemas de engenharia (ABE *et al.*, 2003). Na literatura as FBGs em fibras HiBi também têm sido reportadas como sensores de torção principalmente devido à relação direta entre a rotação dos eixos e a intensidade das bandas de polarização verificadas no espectro ótico. Porém, com o surgimento de diferentes tipos de fibras óticas de alta birrefringência comerciais se torna necessária a caracterização das grandezas físicas de interesse para a utilização como sensores. Esta análise comparativa das sensibilidades por diferentes tipos de fibras existentes é um dos principais parâmetros para a obtenção de dispositivos otimizados.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral a caracterização de redes de Bragg em fibras óticas (FBGs) de alta birrefringência (HiBi). A pesquisa envolve a caracterização por ensaios de torção de redes de Bragg gravadas em diferentes tipos de fibras óticas de alta birrefringência e a comparação das sensibilidades obtidas. Através dos espectros, podem ser obtidas as intensidades dos picos de reflexão em função do ângulo de rotação.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos referentes a caracterização das redes de Bragg em relação aos modos de polarização da fibra HiBi são:

- gravações das redes de Bragg em diferentes tipos de fibras de alta birrefringência;
- caracterização espectral dos dispositivos por polarização;
- montagem do sistema de caracterização por torção;
- análise de FBGs em diferentes tipos de fibras HiBi;
- comparação das sensibilidades à torção obtidas.

## 1.3 Estrutura de trabalho

No Capítulo 1 deste trabalho são descritos a introdução ao tema, motivação, objetivos gerais e específicos. O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura com o estado da arte dos tipos de sensores de torção/rotação, as fibras de alta birrefringência e os conceitos teóricos fundamentais das redes de Bragg. O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para a gravação dos sensores e processo de caracterização por torção. No Capítulo 4 são descritos os resultados obtidos nos ensaios com cada tipo de fibra birrefringente. O Capítulo 5 apresenta uma discussão

analítica dos dados obtidos experimentalmente e no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as propostas para os trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os conceitos pertinentes ao objeto de estudo deste trabalho, sendo abordados o estado da arte dos tipos de sensores de torção/rotação encontrados na literatura e uma breve descrição sobre as fibras de alta birrefringência e as redes de Bragg em fibras óticas.

### 2.1 Sensores de torção em fibras óticas

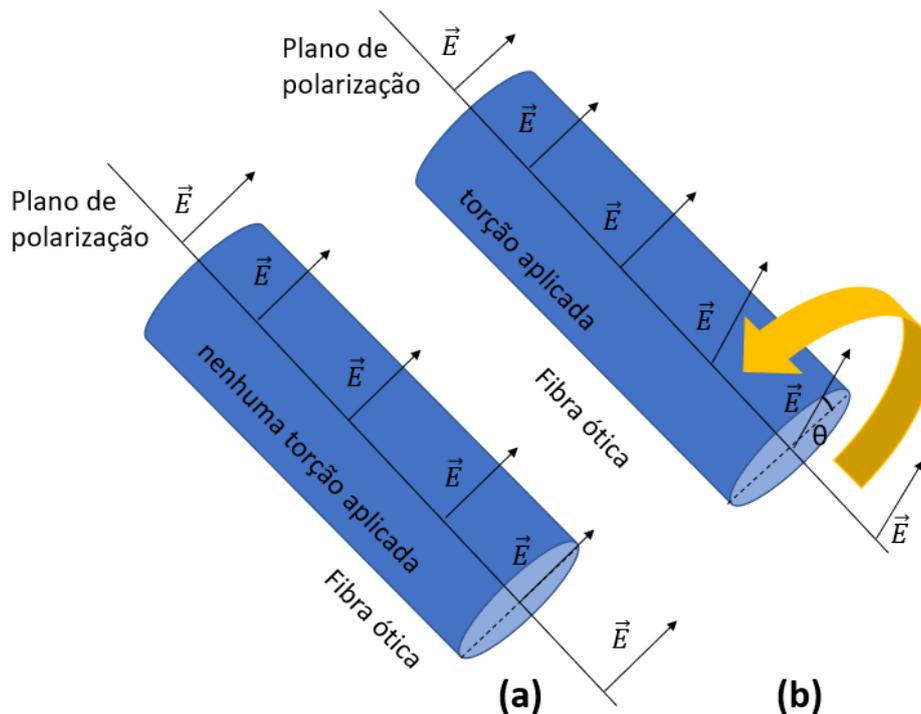
Sensores a fibra ótica para torção/rotação possuem grande interesse em áreas como mecânica, civil e até mesmo biomecânica, devido às características intrínsecas associadas às fibras, como baixo peso, flexibilidade e imunidade a interferências eletromagnéticas.

A birrefringência induzida por torção tem sido um tópico de investigação desde o início dos estudos das fibras óticas. Investigações fundamentais desse fenômeno datam do início dos anos 1980 e continuaram até os últimos anos. Existem basicamente dois efeitos da torção em uma fibra: a indução da birrefringência em uma fibra de baixa birrefringência e a modulação da birrefringência, se a fibra for de alta birrefringência.

A torção de uma fibra ótica induz uma tensão que resulta em um efeito elasto-ótico e que leva ao aparecimento de birrefringência circular. Assim, quando uma fibra perfeitamente circular-simétrica e linear, livre de birrefringência é exposta a uma torção, comporta-se quase como um meio de transmissão perfeita de birrefringência circular. Se uma pequena seção de fibra torcida for excitada por luz polarizada linearmente, a polarização linear da luz lançada será preservada; contudo, o plano de polarização será rodado ao longo do comprimento da fibra. Esta rotação do plano de polarização corresponde a cerca de 0,069 por grau de rotação/torção mecânica da fibra em torno do seu eixo z. A rotação do plano de polarização induzida pela torção mecânica da fibra é portanto relativamente pequena quando comparada com a rotação mecânica da fibra em torno do eixo z. A birrefringência circular induzida por torção é também dependente da temperatura, com um coeficiente de temperatura de cerca de  $9,6 \times 10^{-5} K^{-1}$  (SMITH, 1980).

A Figura 1 mostra um diagrama do núcleo de uma fibra óptica e o plano de polarização representado pelo vetor campo elétrico. A Figura 1 (a) mostra a fibra sem torção aplicada e a Figura 1(b) mostra a variação do plano de polarização quando é aplicada uma torção na fibra.

**Figura 1 - Fibra óptica e plano de polarização da luz incidente quando: (a) nenhuma torção é aplicada sobre a fibra; (b) uma torção é aplicada sobre a fibra.**

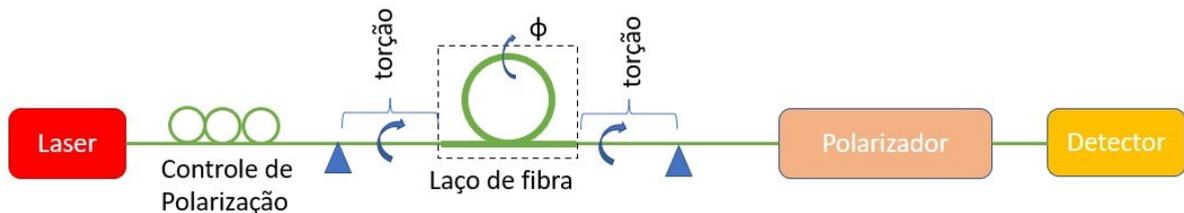


Fonte: Autoria própria

O princípio básico de sensor de torção é a medição direta de birrefringência circular induzida pela torção de uma fibra perfeitamente simétrica e homogênea, ou seja, de baixa birrefringência. Estes sistemas têm sido descritos na literatura desde a década de 90 (MANCIER *et al.*, 1995). A Figura 2 mostra um diagrama de um sistema que é composto por um laço de fibra fixo entre dois pontos e rotacionado em torno do eixo da fibra. A torção causa birrefringência circular que é proporcional ao ângulo de rotação em relação ao plano do laço. A variação do estado de polarização na saída do sensor é correlacionada com a rotação do plano do laço. O sistema de

demodulação consiste de um controle de polarização a fim de ajustar a polarização incidente e de um polarizador na saída.

**Figura 2- Sensor de torção baseado na medição direta da birrefringência circular induzida pela rotação do laço de fibra.**



Fonte: Adaptado de (MANCIER *et al.*, 1995).

Fibras óticas birrefringentes possuem birrefringência linear causada pelos efeitos fotoelásticos ao longo dos eixos rápido e lento devido às simetrias intrínsecas não circulares ou não homogêneas.

Fibras de baixa birrefringência quando torcidas têm sua birrefringência linear dependente da taxa de torção da fibra. Assim, a mudança induzida pela torção na birrefringência linear é proporcional à magnitude da torção e não à simetria circular da fibra e, conseqüentemente, à birrefringência inicial da fibra. Este tipo de medida indireta através da medida da variação da birrefringência linear é mais eficiente que a medida direta pela birrefringência circular da fibra. Quando fibras com birrefringência linear intrínseca baixa, mas não desprezível, são torcidas, a indução de birrefringência circular combina com a modulação de birrefringência linear, o que leva ao aparecimento de birrefringência elíptica (BARLOW; RAMSKOVHANSEN e PAYNE, 1981).

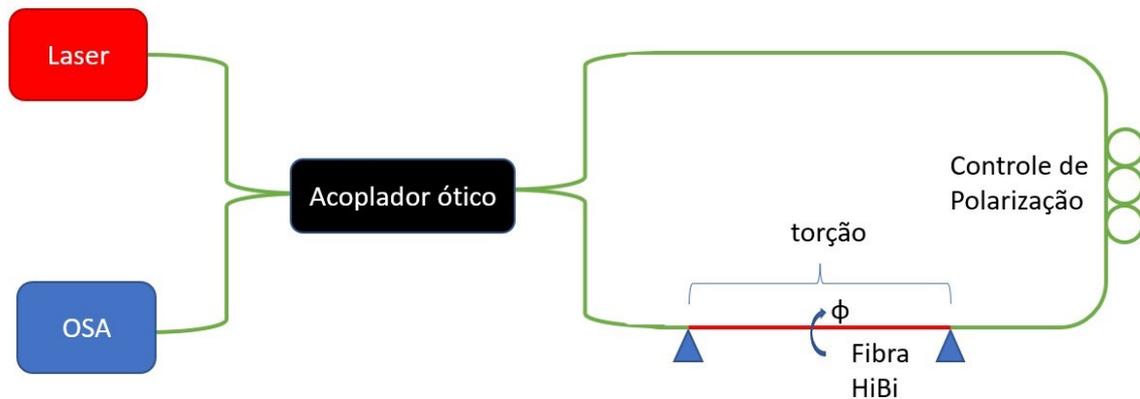
Fibras de alta birrefringência linear (fibras HiBi), quando torcidas, têm os efeitos relacionados à modulação de birrefringência linear dominantes em relação aos efeitos relacionados à presença de birrefringência circular induzida, que se tornam insignificantes. A alta birrefringência linear faz com que os modos linearmente polarizados, nestes tipos de fibra, se propaguem de forma independente ao longo da fibra. Esta alta birrefringência linear evita qualquer rotação do plano de polarização induzida por torção (associado à birrefringência circular). Quando apenas um modo linearmente polarizado é excitado inicialmente, a orientação espacial do vetor campo

elétrico seguirá um dos eixos birrefringentes da fibra, mesmo quando a fibra é exposta a uma forte torção (EL-KHOZONDAR *et al.*, 2009).

Devido a estes fatores, as fibras HiBi têm sido selecionadas preferencialmente para o desenvolvimento de sensores de torção/rotação baseados na modulação da birrefringência. Entretanto, existe uma dependência relativamente elevada da temperatura com a birrefringência linear, que é uma característica intrínseca da birrefringência induzida por tensão em fibras HiBi convencionais. Uma das técnicas que têm sido citadas na literatura para diminuir essa dependência é a utilização de diferentes tipos de fibras HiBi, como as de cristal fotônico com orifícios de ar para indução de birrefringência. Este tipo de fibra diminui consideravelmente a dependência da birrefringência com a temperatura (ZU *et al.*, 2011).

As técnicas utilizadas para as medições de birrefringência linear citadas na literatura normalmente envolvem algum método interferométrico. A Figura 3 mostra um diagrama do interferômetro de Sagnac utilizado comumente para este tipo de sensor. O sistema é composto pelo espelho em anel, formado por um acoplador de 3 dB que divide a luz de entrada em dois feixes contrapropagantes. A direção de polarização individual varia e os dois feixes se interferem na porta de saída. O interferômetro de Sagnac fornece uma maneira direta de medir a birrefringência de uma fibra. A fibra birrefringente induz uma mudança de fase entre as ondas que se propagam em direções opostas dentro do anel. O padrão espectral de franjas de interferência varia com a birrefringência e é máximo quando ambos os modos de polarização são excitados igualmente, sendo necessário portanto um controle de polarização no sistema (FRAZAO; BAPTISTA e SANTOS,2007, BUDINSKI e DONLAGIC,2017).

**Figura 3 -Sensor de torção baseado na medição da birrefringência linear através de da fibra HiBi e do interferômetro de Sagnac.**



Fonte: Adaptado de (BUDINSKI e DONLAGIC, 2017).

Outra técnica utilizada para o monitoramento de torção consiste na utilização de dispositivos fotorrefrativos em fibras óticas como as redes de período longo, redes inclinadas ou redes de Bragg no sistema, através da análise dos espectros obtidos.

A abordagem descrita por Yiping, Wang e Huang (2013) reportam a utilização de uma FBG gravada em uma fibra monomodo submetida à torção. Os resultados do trabalho mostram que a razão da amplitude dos modos de polarização no espectro de reflexão da FBG é dependente de torção. Esta técnica possui a vantagem de estar codificada em comprimento de onda e portanto ser insensível a flutuações da fonte ótica de medição, porém como a fibra é circular e homogênea, a medida da torção está associada à birrefringência circular induzida na fibra através da rotação.

FBG gravada em fibra de alta birrefringência é uma técnica que pode ser utilizada como medida direta da torção através da análise dos espectros óticos. A utilização da fibra HiBi minimiza a birrefringência circular induzida e a medida é associada apenas à variação da birrefringência linear. Uma FBG gravada em fibra HiBi possui duas ressonâncias bem definidas no espectro de reflexão, isto é, modos polarizados ortogonalmente. Quando uma torção é induzida no trecho de fibra com a FBG, haverá mudança na intensidade das bandas de polarização, que pode ser utilizada para a monitoração da rotação. Outra vantagem do uso desta técnica é a insensibilidade às variações de intensidade da fonte de luz devido ao fato de ser

demodulado em comprimento de onda. Contudo, o estado de polarização da luz no método proposto precisa ser controlado, e qualquer mudança na birrefringência, como por exemplo, alteração de posicionamento de trechos de fibra HiBi, precisa ser evitada.

Lo *et al.* (2004) demonstrou um sensor de torção baseado em uma FBG em fibra HiBi. A relação de intensidade de dois comprimentos de onda Bragg refletidos são associada ao ângulo de torção da fibra HiBi. Sensibilidade de 0,3 dB/grau foram reportados pelos autores para estes ensaios.

Mais recentemente, o trabalho de Guo *et al.* (2013) também mostra a determinação do ângulo de rotação sem ambigüidade através da simples detecção de potência das amplitudes relativas dos modos de polarização ortogonais. Ao invés de utilizar uma fonte ótica de banda larga, método comumente utilizado neste tipo de técnica, os autores utilizaram um laser sintonizável de alta velocidade. Os resultados reportados mostram que uma alta sensibilidade à rotação da fibra de 0.09 dB/grau pode ser obtido com esta técnica.

## **2.2 Fibras óticas de alta birrefringência**

Em fibras óticas monomodo qualquer sinal ótico pode ser representado como uma sobreposição linear de dois modos polarizados ortogonalmente. Numa fibra ideal, onde se considera uma simetria cilíndrica do guia de onda, esses dois modos são degenerados em termos das propriedades de propagação. No entanto, em fibras reais existe uma determinada quantidade de anisotropia que origina a perda de simetria cilíndrica da mesma. Essa perda ocorre quer devido à quebra da geometria circular do guia de onda durante o processo de fabricação, quer devido a deformações originadas por campos tensionais não simétricos aplicados à fibra, provocando um alargamento temporal dos impulsos e o aumento da interferência entre símbolos, resultando na degradação no desempenho do sistema (POOLE, 1991).

As fibras HiBi podem ter sua birrefringência intrínseca induzida por estresse no núcleo produzidas sem estresse ou pela simples alteração da geometria do núcleo. Isto faz com que apareça uma anisotropia, isto é, o núcleo não é mais homogêneo pois apresenta índices de refração diferentes para diferentes constantes de

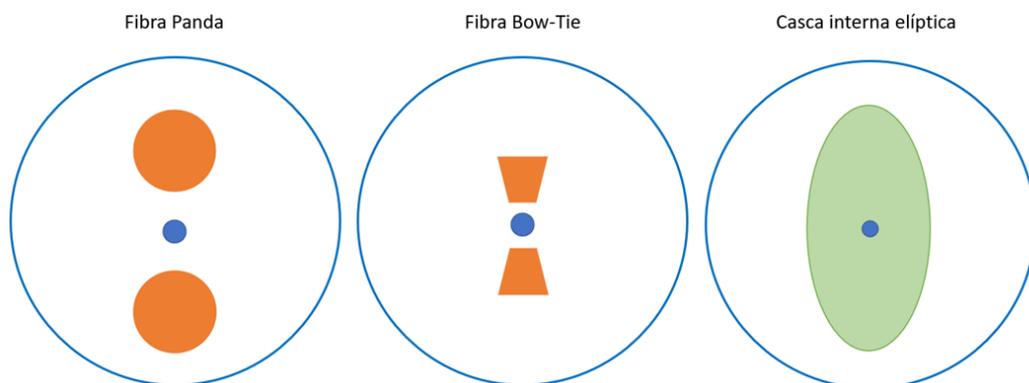
propagação. Dessa forma, devido à anisotropia, as constantes de propagação são diferentes e os modos ortogonais são degenerados (ANDRÉ e PINTO, 2002).

Fibras HiBi com tensão mecânica introduzida no núcleo da fibra podem ser fabricadas através de estruturas inseridas na casca com diferentes coeficientes de expansão térmica. A tensão mecânica gerada no núcleo ocorre no processo de fabricação da fibra durante seu aquecimento, pois o estresse é induzido no núcleo, devido às respostas diferentes para diferentes direções da casca com a temperatura. No processo de resfriamento a tensão anisotrópica permanece constante na fibra. Por esse motivo fibras birrefringentes fabricadas com essa técnica possuem sua birrefringência muito sensível às variações de temperatura (ZHANG e LIT, 1993).

Como exemplo dessa classe de fibra podemos citar fibras Panda (KAWACHI *et al.*, 1982), Bow Tie (VARNHAM *et al.*, 1983) e fibras de casca elíptica (NAMIHIRA, EJIRI e MOCHIZUKI, 1982). Geralmente essas fibras possuem birrefringência da ordem de  $B = 4 \times 10^{-4}$  (SIMPSON *et al.*, 1983), embora seja possível encontrar distintos valores na literatura.

A Figura 4 mostra a seção transversal de dois diferentes tipos de fibras HiBi, fibras Panda e Bow Tie, em que a birrefringência é induzida através do estresse induzido no núcleo. Neste caso o eixo lento está alinhado com a tensão gerada no núcleo da fibra.

**Figura 4 - Esquemas seccionais de diferentes geometrias de fibras HiBi: Panda, Bow-tie e Casca interna elíptica.**



**Fonte: Autoria própria.**

### 2.2.1 Redes de Bragg gravadas em fibras de alta birrefringência

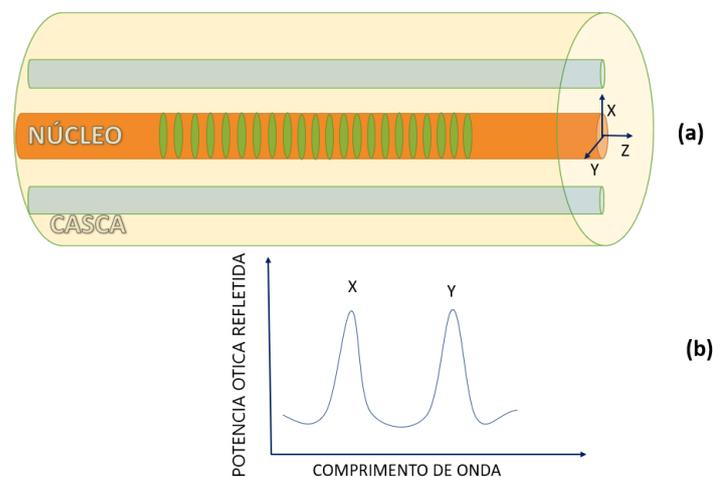
A FBG consiste em uma alteração periódica do índice de refração do núcleo ao longo do eixo longitudinal da fibra. A FBG é caracterizada pelo acoplamento da luz incidente no modo propagante para o modo contrapropagante no núcleo, em uma faixa estreita de comprimentos de onda.

A Figura 5 mostra uma representação de uma FBG gravada em uma fibra HiBi e os espectros de reflexão. Ao incidir luz com espectro de banda larga, ocorre a reflexão de uma fração da banda (espectro refletido) através do efeito de espalhamento coerente nas interfaces que separam as regiões com índices de refração diferentes e o restante da luz incidente é transmitida.

O espectro de reflexão de uma FBG gravada em fibras HiBi, com luz não polarizada lançada na fibra, tem uma estrutura de dois picos correspondente aos dois modos ortogonais de polarização da fibra.

A estrutura de duas bandas dessas redes, causada pelo diferente índice de refração efetivo para luz polarizada ao longo de cada eixo óptico principal, pode ser usada para medir simultaneamente tanto a deformação quanto a temperatura (Xu *et al.*, 1994). Entretanto, há vários pontos a serem levados em consideração ao utilizar a rede HiBi, como por exemplo, o alinhamento óptico mais complexo e a necessidade de medidas extras para uma caracterização óptica completa.

**Figura 5 - Rede de Bragg em uma fibra HiBi e as coordenadas X, Y e Z. (b) Espectro de reflexão com as bandas de polarização correspondente aos eixos lento, X, e rápido, Y, da fibra.**



Fonte: Adaptado de (ABE *et al.*, 2012).

As fibras HiBi suportam dois modos de polarização linear cujos índices de refração são diferentes,  $n_X$  e  $n_Y$ , para os modos lento e rápido, respectivamente. Como os índices de refração são diferentes, quando uma FBG é gravada em uma dessas fibras, o período das FBGs é o mesmo para os dois modos de polarização, porém o comprimento de onda de Bragg é diferente para cada modo:

$$\lambda_i = 2 \cdot n_i \cdot \Lambda, \quad i = X, Y \quad (1)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda de Bragg para cada modo de polarização.,  $n$  é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra e  $\Lambda$  é o período da rede gravada.

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

$$R(\lambda) = R_X(\lambda) + R_Y(\lambda) \quad (2)$$

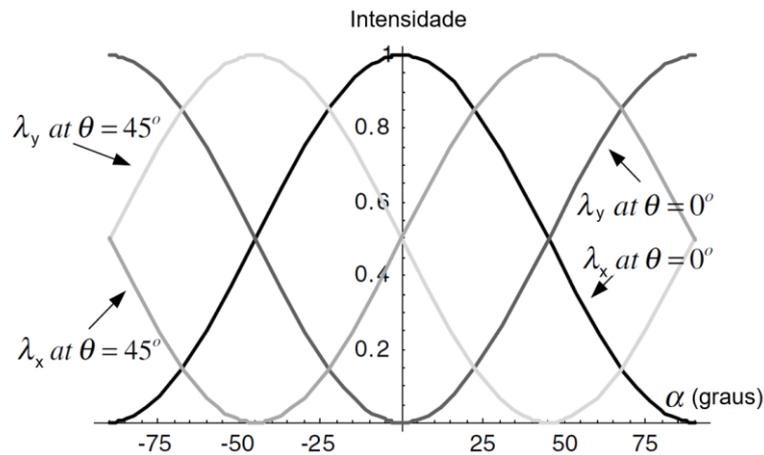
onde

$$R_i(\lambda_B) = \tanh^2(k_i L), \quad i = X, Y \quad (3)$$

em que  $L$  é o comprimento da FBG e  $k$  é o coeficiente de acoplamento entre os modos propagante e contrapropagante.

As intensidades das bandas de reflexão dos dois comprimentos de onda de Bragg, associadas aos dois modos de polarização linear, variam com o ângulo de torção. A razão da intensidade dos dois comprimentos de onda de Bragg refletidos estão associados ao ângulo de torção da fibra HiBi. Quando a intensidade de uma das bandas de polarização aumenta, a outra diminui, a cada período de rotação da fibra de  $90^\circ$ . A Figura 6 mostra a variação da intensidade normalizada em função da rotação para os dois comprimentos de onda X e Y para dois ângulos de polarização incidente,  $\theta$  (em relação ao eixo X),  $0^\circ$  e  $45^\circ$ , demonstrados por Lo et al. (2004).

**Figura 6 - Intensidades normalizadas das bandas de polarização em função do ângulo de rotação da fibra HiBi.**

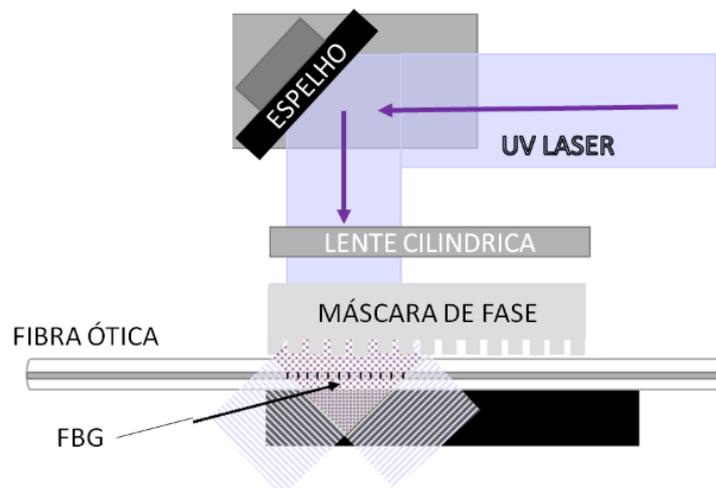


Fonte: Adaptado de (LO et al., 2004).

Diversas técnicas podem ser utilizadas na fabricação das FBGs: a técnica por iluminação direta por máscara de fase, a técnica por interferometria, e a técnica que associa a técnica de máscara de fase com a interferometria. Uma das técnicas mais utilizadas é a técnica de gravação direta por máscara de fase.

A técnica de gravação direta por máscara de fase consiste em utilizar como elemento óptico difrator a máscara de fase, que gera um padrão de interferência e a modulação espacial no índice de refração do núcleo da fibra. A Figura 7 representa o diagrama esquemático de gravação com o resultado final do efeito da difração do feixe UV nesse tipo de gravação.

**Figura 7 - Esquema da técnica de gravação de redes de Bragg pelo método direto utilizando uma máscara de fase, vista lateral.**



Fonte: Autoria própria.

Um padrão interferométrico de franjas no campo próximo é criado, com os feixes combinados nas ordens  $m = +1$  e  $m = -1$  da difração. A máscara de fase é selecionada para que a intensidade da ordem zero difratada seja mínima e a intensidade das ordens do feixe difratado seja máxima.

As franjas têm periodicidade  $\Lambda$ , metade do período da máscara de fase, portanto a modulação no índice de refração do núcleo da fibra ótica é produzida pelo padrão de interferência da máscara dado por  $\Lambda_{pm}$  conforme equação 8 (KASHYAP, 2009), onde  $\lambda_{UV}$  é o comprimento de onda do laser de incidência no UV, e  $\theta_m$  é o ângulo formado pela difração da luz na máscara de fase.

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2 \sin\left(\frac{\theta_m}{2}\right)} = \frac{\Lambda_{pm}}{2} \quad (8)$$

### 3 METODOLOGIA

Uma análise foi realizada com o objetivo de obter a sensibilidade à torção por diferentes tipos de fibras óticas de alta birrefringência.

#### 3.1 Redes de Bragg em fibras óticas de alta birrefringência

Foram gravadas FBGs em três tipos de fibras HiBi. A Figura 8 apresenta as microfotografias tiradas obtidas por um microscópio ótico das fibras HiBi: (a) Panda de 125  $\mu\text{m}$  de diâmetro (Thorlabs, PM1550-XP), (b) Bow tie de 125  $\mu\text{m}$  de diâmetro (Newport, HB1500-T) e (c) de casca interna elíptica de 80  $\mu\text{m}$  de diâmetro (3M, FS-LS-7511). As microfotografias foram obtidas através da clivagem de trechos das fibras HiBi que foram fixadas através de massa de modelar de forma perpendicular às lentes do microscópio. Foi utilizada uma fonte ótica de luz branca, incidindo diretamente nas pontas clivadas, para que as imagens do núcleo da fibra em relação aos elementos intrínsecos ficassem com contraste e pudessem ser observadas.

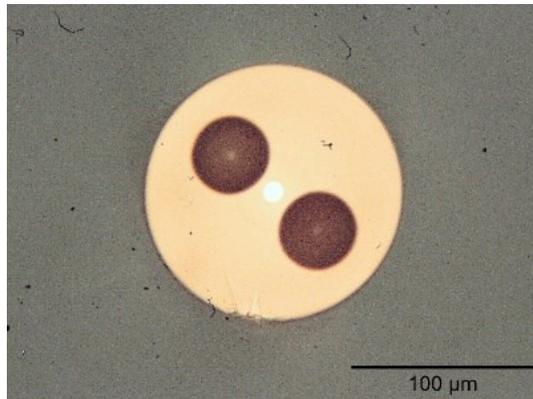
As redes de Bragg gravadas possuem 3 mm de comprimento e foram espaçadas de 10 mm entre si. As máscaras de fase utilizadas possuem períodos de 1073,5 nm e 1058,9 nm, para FBG 1 e FBG 2 respectivamente.

Para gravação das FBGs foi utilizado o laser de excímero ArF (Coherent®, Xantos XS 500, operação em 193 nm), com energia de pulso de 2 mJ por pulso e taxa de repetição de 250 Hz. O monitoramento foi realizado utilizando o interrogador de FBG (Micron-Optics, SM125) com 1 canal, faixa de operação entre 1510 nm e 1590 nm e resolução de 1 pm.

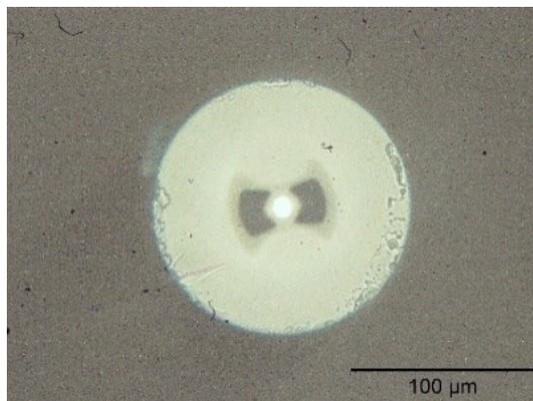
O laser de excímero ArF possui ajuste da taxa de repetição de pulso entre 1 Hz e 500 Hz, pulsos com duração de 5 ns, com energia entre 1 a 5 mJ por pulso e o feixe de saída apresenta dimensões de 3x6 mm.

A Figura 9(a) mostra o esquemático e a Figura 9(b) mostra a foto do sistema experimental utilizado para gravação de FBGs. As máscaras de fase (Ibsen®, *+1/-1 order phase masks*) têm comprimento de onda de operação em 248 nm e possuem comprimentos de 10 mm.

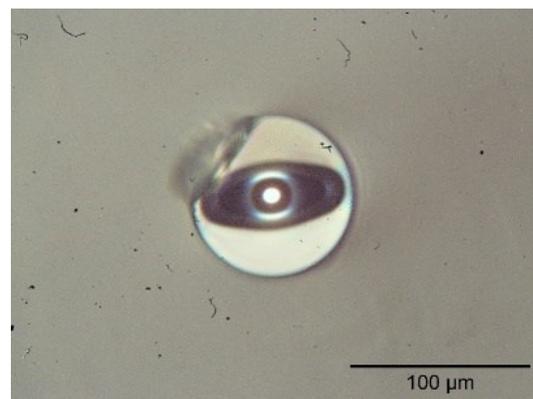
**Figura 8 - Imagens obtidas por um microscópio ótico (ampliação 40X): (a) fibra ótica HiBi Panda de 125  $\mu\text{m}$  de diâmetro; (b) fibra ótica HiBi bow tie de 125  $\mu\text{m}$  de diâmetro; (c) fibra ótica HiBi casca interna elíptica de 80  $\mu\text{m}$  de diâmetro.**



(a)



(b)



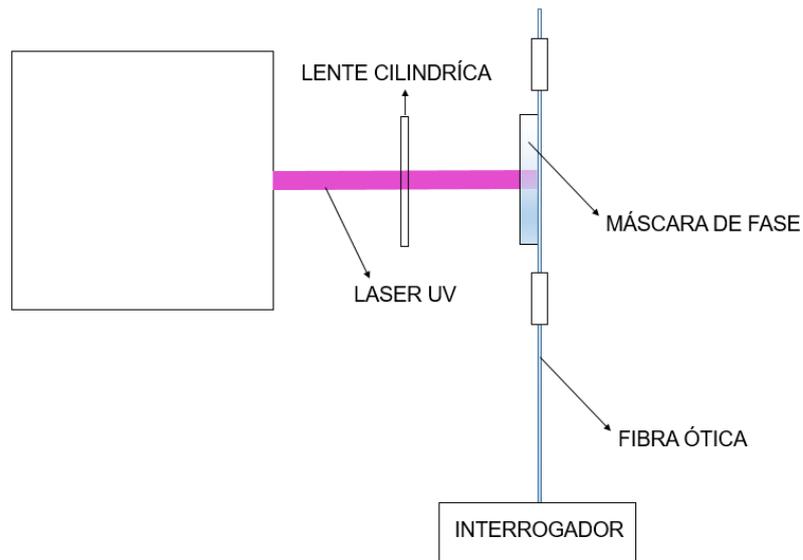
(c)

**Fonte: Aatoria própria.**

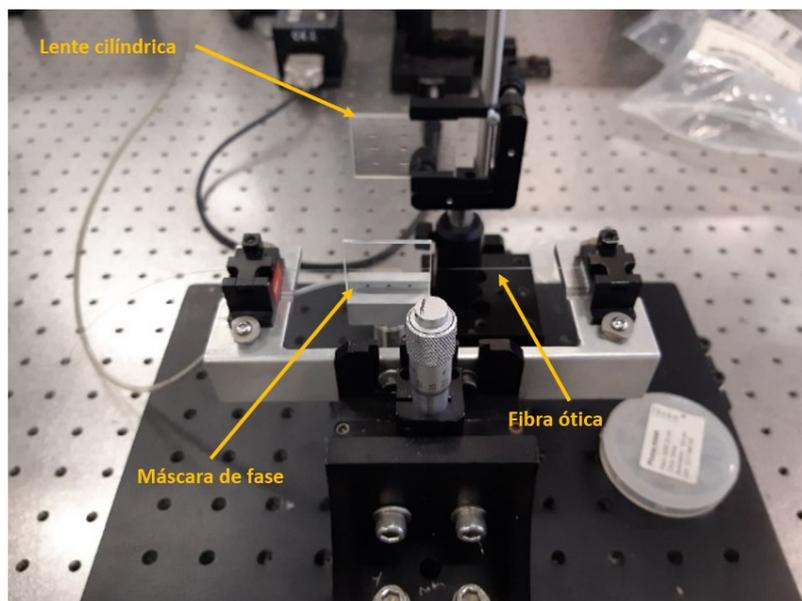
O laser ArF emite o feixe por uma abertura localizada na sua parte frontal superior. Esse feixe de UV é então orientado por dois espelhos planos idênticos, restringido por um obturador ajustável para o comprimento da rede de Bragg  $\leq 3$  mm. Um espelho plano, conduz o feixe até a máscara de fase, onde a lente cilíndrica

focaliza o feixe laser sobre a máscara de fase. Para a fluência normalmente não são utilizados valores específicos, pois experimentalmente interessa somente a amplitude espectral resultante na FBG. Assim a interrupção da gravação é controlada manualmente, assim que o espectro de reflexão atinge aproximadamente a amplitude de interesse (20 dB).

**Figura 9 - Sistema de gravação de FBG por máscara de fase.**



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

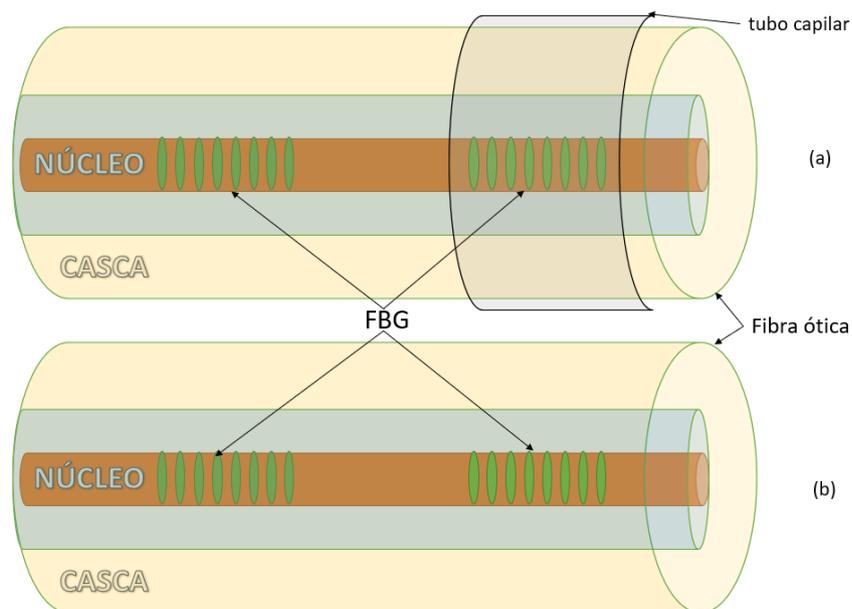
A metodologia proposta neste trabalho consiste no estudo comparativo a partir da realização dos ensaios considerando FBGs com e sem tubo capilar de encapsulamento.

O encapsulamento foi realizado nas fibras óticas em tubos capilares metálicos de aço inoxidável (AISI-304), tal solução acarreta em modificações na sensibilidade dos sensores FBGs e na necessidade de caracterização das fibras.

O processo de encapsulamento consiste em retirar totalmente o acrilato do encapsulamento da fibra, no trecho que contém a fibra e que será submetido à torção ou rotação e inserir nesta região um tubo capilar em aço inox com diâmetro 1,3 mm, parede de 0,3 mm e comprimento de aproximadamente 5 mm.

Na Figura 10 pode-se ver a representação da diferença entre uma FBG para medição em reflexão, sendo (a) encapsulada e (b) uma sem encapsulamento.

**Figura 10 - Representação esquemática do encapsulamento da FBG para medição por reflexão.**



Fonte: Autoria própria

### 3.2 Caracterização por torção das redes de Bragg em fibras óticas de alta birrefringência

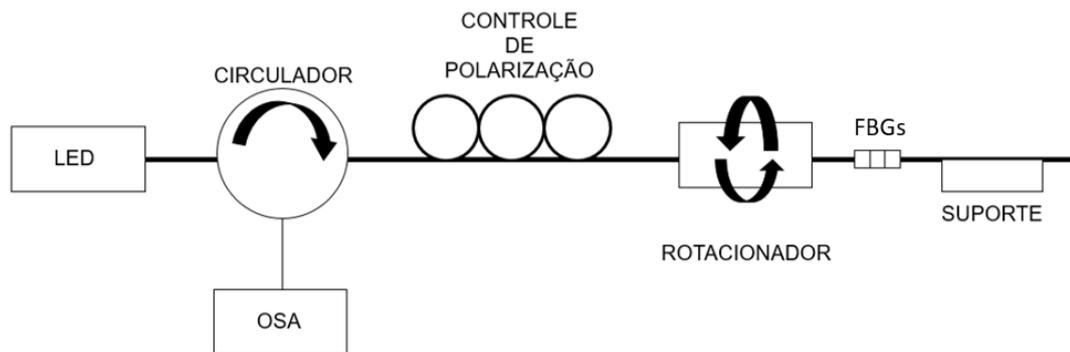
Para a caracterização por torção, as FBGs inscritas em fibras óticas foram posicionadas em um arranjo composto por um analisador de espectro ótico (OSA) (Yokogawa, AQ6375); LED (LED Amonics, ALS 10 M); controle de polarização

(Thorlabs, FPC560); posicionadores de rotação (Thorlabs, HFR007 High Precision Fiber Rotator Quick-Load Bare Fiber); circulador óptico (Thorlabs, 1550 nm). Os equipamentos acima foram posicionados sobre a bancada com a configuração mostrada na no esquemático Figura 11(a) e na foto Figura 11(b):

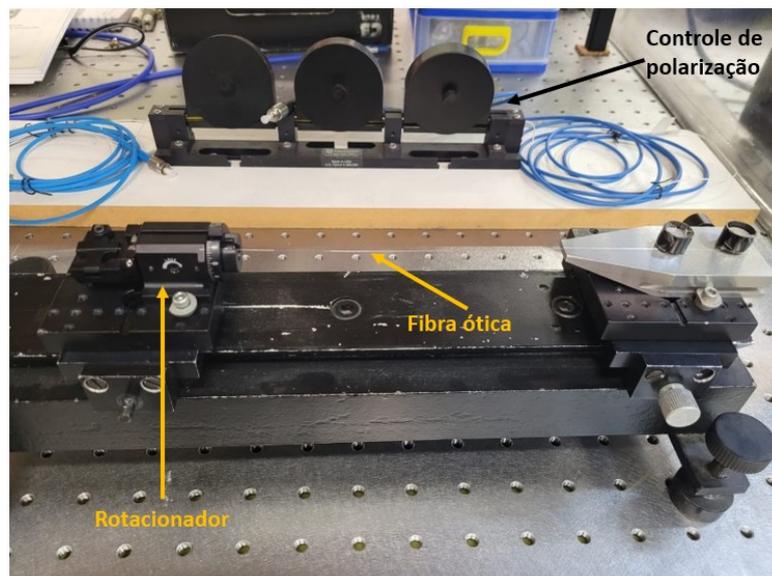
Todos os ensaios de caracterização foram realizados em condições laboratoriais, com temperatura e umidade relativa controlada de 22 °C e ~60%, respectivamente.

No processo de caracterização para cada uma das fibras, estas foram introduzidas no rotacionador e posicionadas de forma que as duas extremidades da fibra ficassem afixadas magneticamente no aparelho e assim a fibra permanecesse tensionada e totalmente esticada durante os ensaios.

**Figura 11 – Montagem laboratorial para ensaios de torção.**



(a)



(b)

**Fonte: Autoria própria**

A posição das FBGs foram identificadas e demarcadas na superfície da fibra para facilitar a visualização durante o ajuste da posição no rotacionador. Após alinhamento das FBGs na região de interesse, a fibra ótica foi alinhada na posição inicial, a fim de obter-se um espaçamento de 10 cm entre os fixadores do rotacionador.

A seguir, foi iniciada a rotação do conjunto no sentido anti-horário, a cada 10 graus e aguardando o ciclo completo de tomada e aquisição de dados do OSA para somente então realizar o próximo movimento.

Este procedimento foi seguido até que tenha sido realizada uma volta completa, ou seja, até 360 graus, retornando a seguir a fibra ótica ao seu ponto inicial desfazendo a torção realizada.

Os dados obtidos foram tratados e a partir dessas aferições foram plotados os gráficos para uma verificação visual do comportamento matemático de cada fibra para efeito comparativo. Devido a característica senoidal observada na análise dos gráficos, foi utilizada uma faixa com tendência linear visando um comportamento mais próximo do que seria a região de maior sensibilidade.

## 4 RESULTADOS

### 4.1. FBG em fibra HiBi de casca interna elíptica de 80 $\mu\text{m}$ de diâmetro

Foram realizados ensaios de torção com a FBG gravada em fibra HiBi de casca interna elíptica de 80  $\mu\text{m}$  de diâmetro (3M, FS-LS-7511).

Com o objetivo de verificar repetitividade das medidas, duas FBGs foram gravadas na fibra HiBi mas em diferentes comprimentos de onda e submetidas a torção de forma simultânea: FBG 1 – comprimento de onda central  $\sim 1532$  nm e FBG 2 – comprimento de onda central  $\sim 1552$  nm). A Figura 12 mostra a variação espectral em função do ângulo de rotação aplicado para ambas as redes. Os espectros para cada FBG mostram o desdobramento das bandas, devido à birrefringência intrínseca da fibra HiBi. A birrefringência da fibra está relacionada à separação entre as bandas no espectro ótico. Quanto maior for a separação em comprimento de onda entre as bandas de polarização, maior é a birrefringência da fibra HiBi. Os espectros mostram que a intensidade das bandas de polarização variam com a torção da fibra e portanto em função da birrefringência linear. A variação espectral mostrada nas Figuras 12 e 13 corresponde a variação total dos espectros no ângulo de rotação de 0 até 360 graus, nos formatos 3D e 2D respectivamente.

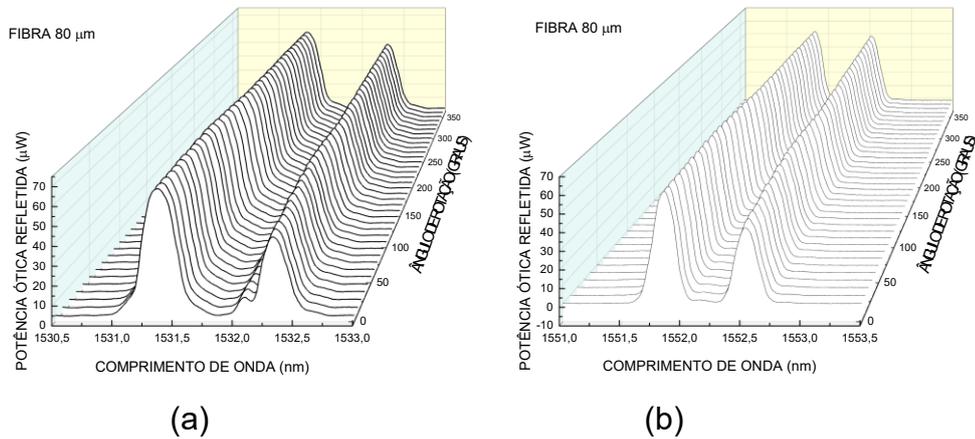
A partir da análise realizada do intervalo de torção de 0 até 90 graus, foram demonstrados os comportamentos de cada banda de polarização de cada uma das FBGs: relacionadas aos eixos lento, X1 e X2, e rápido, Y1 e Y2, da FBG1 e da FBG2 respectivamente.

As Figuras 14 (a) e (b) mostram as variações do comprimento de onda das componentes do eixo lento e as Figuras 14 (c) e (d) para as bandas do eixo rápido, para ambas as redes respectivamente, em função do ângulo de rotação. Os ajustes lineares para os pontos no intervalo de  $90^\circ$  de rotação mostram pequenas variações no comprimento de onda que podem estar relacionadas às deformações longitudinais impostas pela tensão devido à torção da fibra.

As Figuras 15 (a) e (b) mostram as variações da potência ótica das componentes do eixo lento e as Figuras 15 (c) e (d) para as bandas do eixo rápido, para ambas as redes respectivamente, em função do ângulo de rotação. A variação

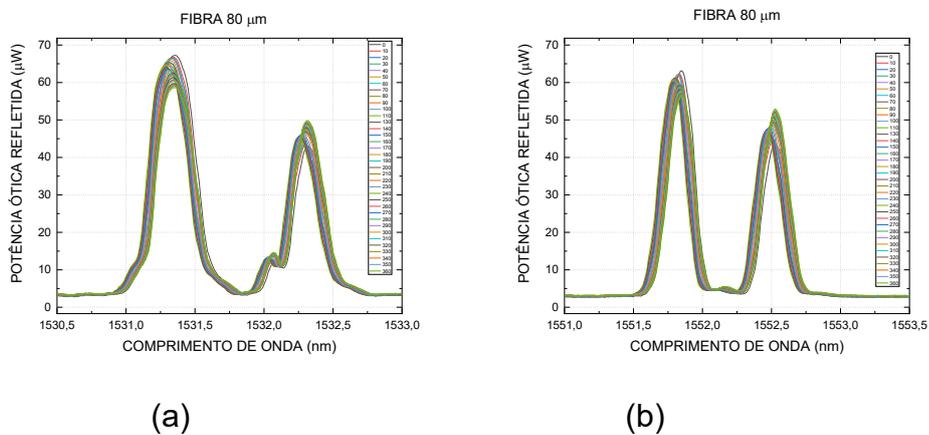
da potência ótica de cada banda de polarização está relacionada à mudança da birrefringência linear devido à torção da fibra.

**Figura 12 – Espectros (3D) de reflexão das FBGs em fibra HiBi de casca interna elíptica de 80  $\mu\text{m}$  em função do ângulo de rotação: (a) FBG1 e (b) FBG2.**



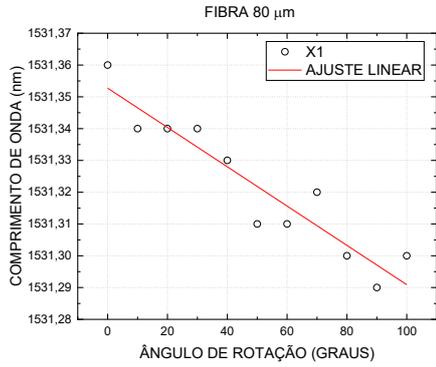
Fonte: Autoria própria

**Figura 13 – Espectros (2D) de reflexão das FBGs em fibra HiBi de casca interna elíptica de 80  $\mu\text{m}$  em função do ângulo de rotação: (a) FBG1 e (b) FBG2.**

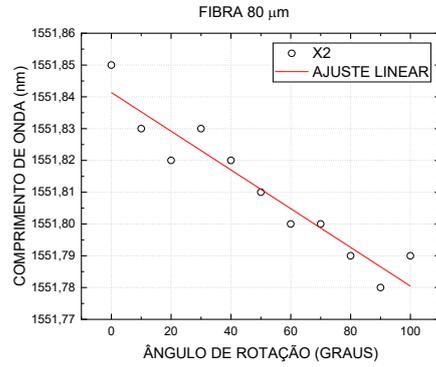


Fonte: Autoria própria

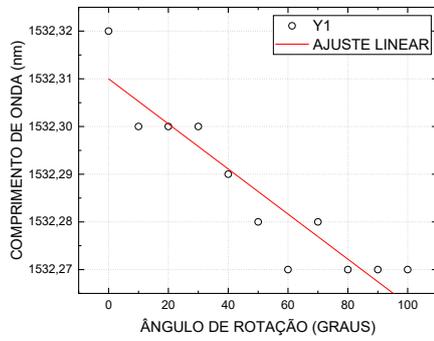
**Figura 14 – Variação do comprimento de onda da FBG em fibra HiBi de casca interna elíptica de 80 µm em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2.**



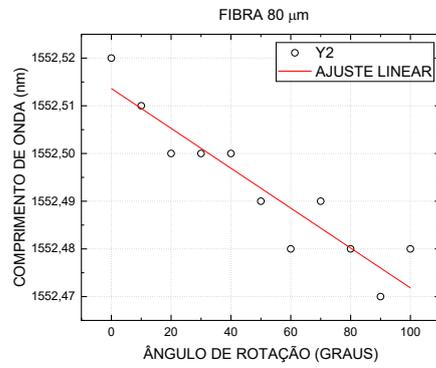
(a)



(b)



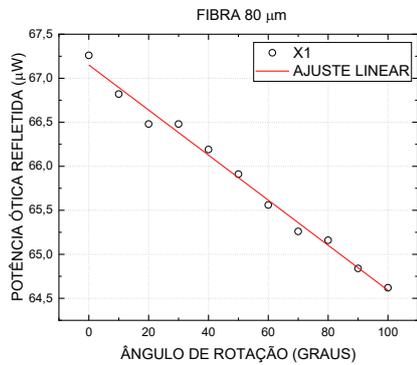
(c)



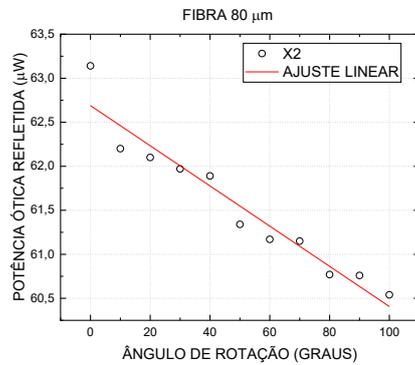
(d)

Fonte: Autoria própria.

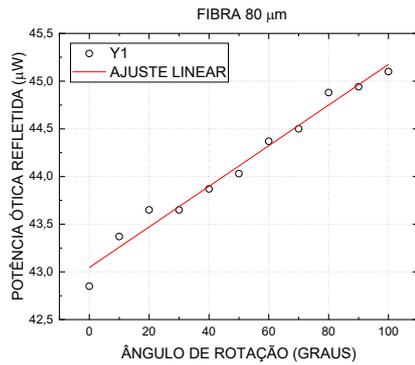
**Figura 15 – Variação da potência óptica linear refletida da FBG em fibra HiBi de casca interna elíptica de 80 µm em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2.**



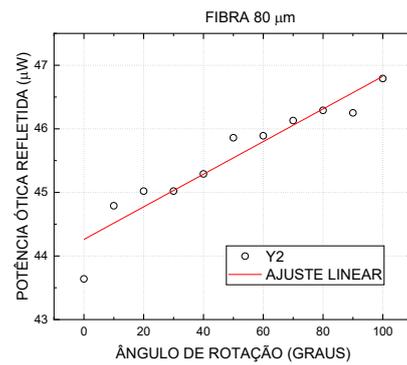
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 1 mostra as sensibilidades em comprimento de onda e em potência óptica obtidos para as FBGs em fibra HiBi de casca interna elíptica.

**Tabela 1 - Sensibilidade em comprimento de onda e em potência óptica refletida para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2 gravadas em fibra HiBi de casca interna elíptica, obtidas para uma variação do ângulo de rotação de 90 graus.**

FBG	Bandas de polarização	Sensibilidade em comprimento de onda (nm/grau)	Sensibilidade em potência óptica (nW/grau)
1	X1	$6,79E-4 \pm 8,15E-5$	$25,78 \pm 1,05$
2	X2	$6,73E-4 \pm 6,47E-5$	$25,2 \pm 2,84$
1	Y1	$5,21E-4 \pm 6,95E-5$	$21,79 \pm 1,29$
2	Y2	$4,73E-4 \pm 5,45E-5$	$28,67 \pm 3,67$

Fonte: Autoria própria.

## 4.2 FBG em fibra HiBi PANDA de 125 µm de diâmetro

Foram realizados ensaios de torção com a FBG gravada em fibra HiBi PANDA de 125 µm de diâmetro (Thorlabs, PM1550-XP). Duas FBGs foram gravadas na fibra HiBi mas em diferentes comprimentos de onda e submetidas a torção de forma simultânea: FBG 1 – comprimento de onda central ~1531,2 nm e FBG 2 – comprimento de onda central ~1552,1 nm. A variação espectral mostrada nas Figuras

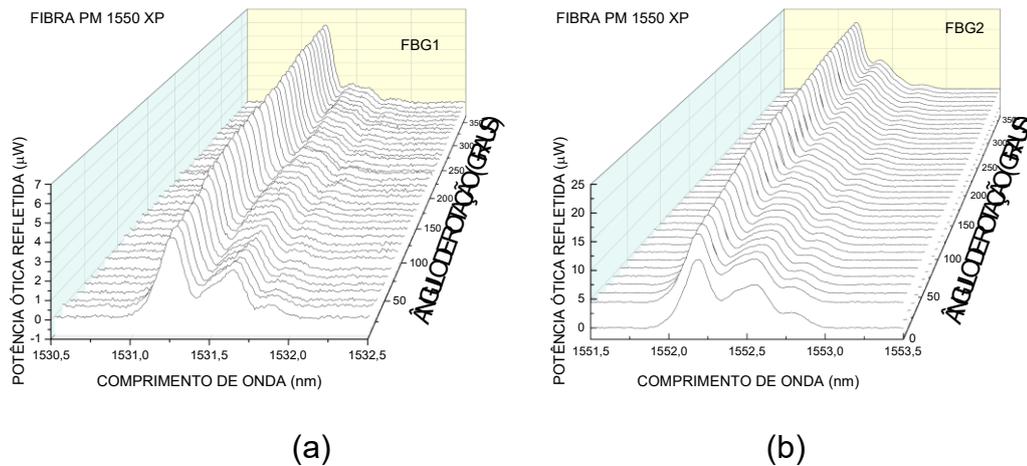
16 e 17 corresponde a variação total dos espectros no ângulo de rotação de 0 até 360 graus, nos formatos 3D e 2D respectivamente.

A partir da análise realizada do intervalo de torção de 0 até 90 graus, foram demonstrados os comportamentos de cada banda de polarização de cada uma das FBGs: relacionadas aos eixos lento, X1 e X2, e rápido, Y1 e Y2, da FBG1 e da FBG2 respectivamente.

As Figuras 18 (a) e (b) mostram as variações do comprimento de onda das componentes do eixo lento e as Figuras 18 (c) e (d) para as bandas do eixo rápido, para ambas as redes respectivamente, em função do ângulo de rotação.

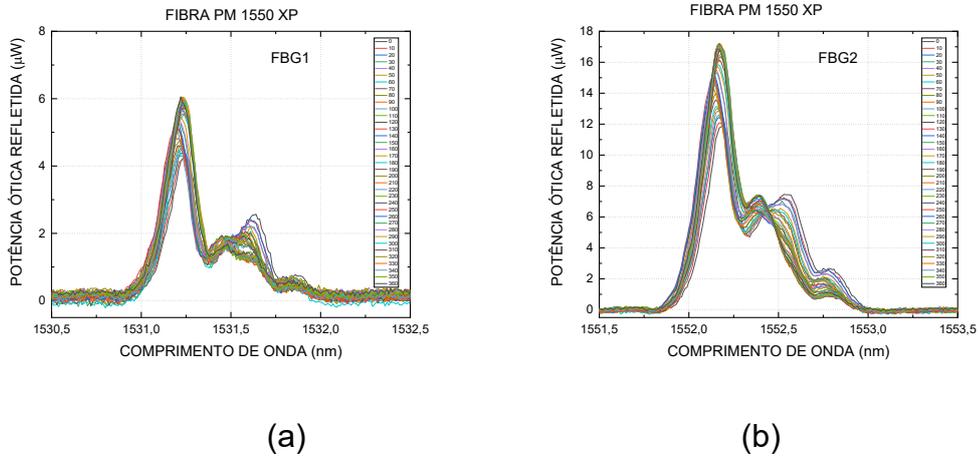
As Figuras 19 (a) e (b) mostram as variações da potência óptica das componentes do eixo lento e as Figuras 19 (c) e (d) para as bandas do eixo rápido, para ambas as redes respectivamente, em função do ângulo de rotação.

**Figura 16 – Variação do comprimento de onda (3D) da FBG em fibra HiBi Panda de 125 µm em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2.**



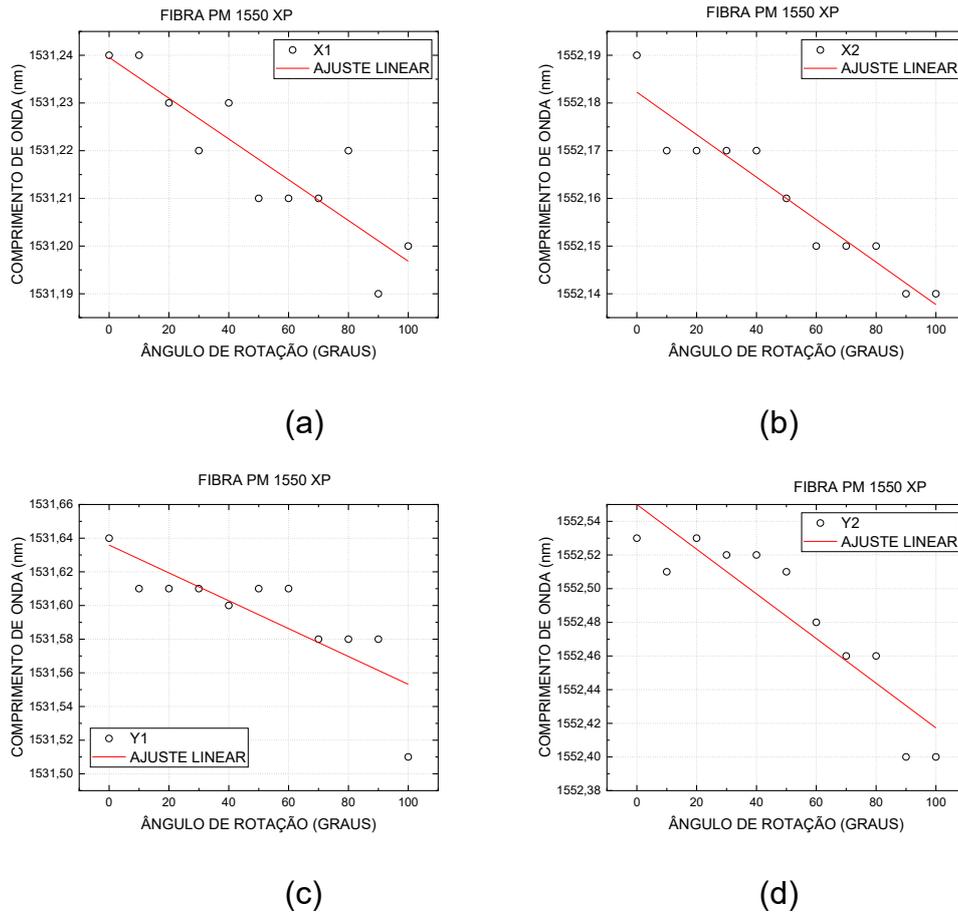
Fonte: Autoria própria.

**Figura 17 – Variação do comprimento de onda (2D) da FBG em fibra HiBi Panda de 125 µm em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2.**



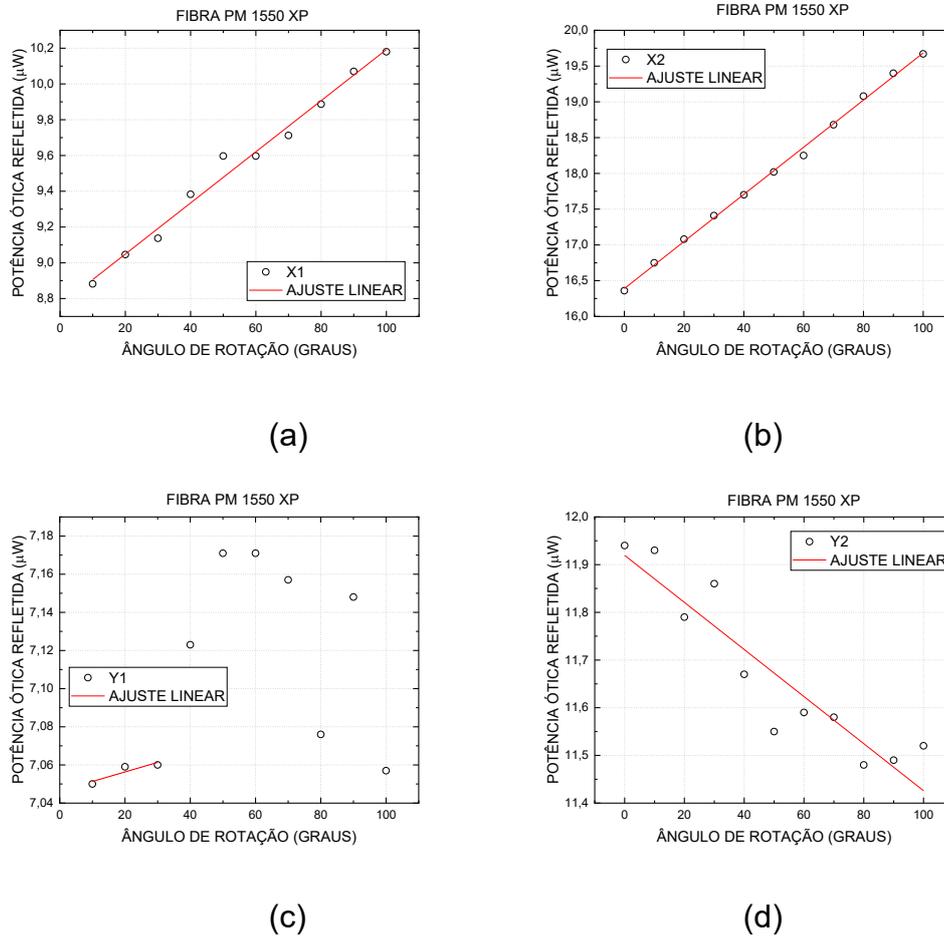
Fonte: Autoria própria.

**Figura 18 - Variação do comprimento de onda da FBG em fibra HiBi Panda de 125 µm em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 19 – Variação da potência ótica linear refletida da FBG em fibra HiBi PANDA de 125 µm em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2.**



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 2 mostra as sensibilidades em comprimento de onda e em potência ótica obtidos para as FBGs em fibra HiBi PANDA.

**Tabela 2 -Sensibilidade em comprimento de onda e em potência ótica refletida para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2 gravadas em fibra HiBi PANDA, obtidas para uma variação do ângulo de rotação de 90 graus.**

FBG	Bandas de polarização	Sensibilida em comprimento de onda (nm/grau)	Sensibilidade em potência ótica (nW/grau)
1	X1	$4,5 \pm 1,13E-4$	$14,6 \pm 0,61$
2	X2	$4,61 \pm 5,64E-5$	$33,04 \pm 0,59$
1	Y1	$11,7 \pm 4,48E-4$	$5,28 \pm 0,43$
2	Y2	$12,1 \pm 6,75E-4$	$5,64 \pm 0,35$

Fonte: Autoria própria.

### 4.3 FBG em fibra HiBi bow tie de 125 $\mu\text{m}$ de diâmetro

Foram realizados ensaios de torção com a FBG gravada em fibra HiBi bow tie de 125  $\mu\text{m}$  de diâmetro (Newport, HB1500-T).

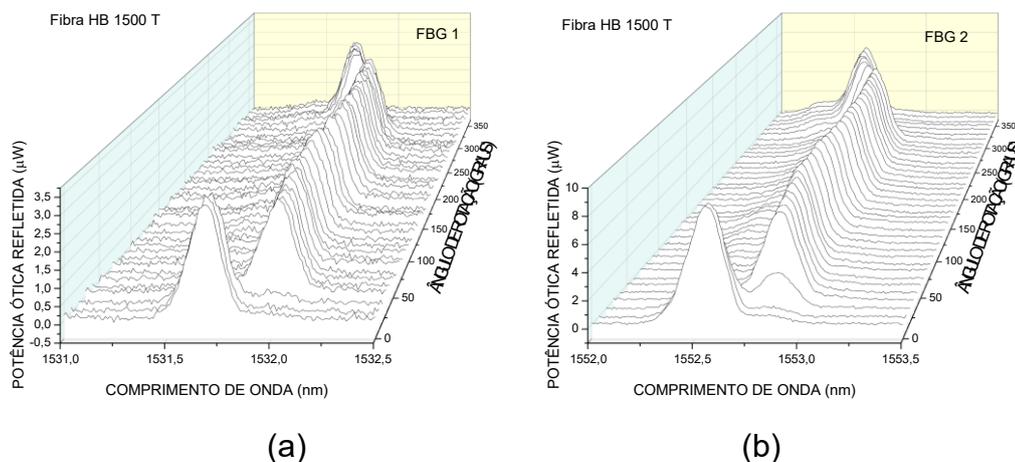
Com o objetivo de verificar repetitividade das medidas, duas FBGs foram gravadas na fibra HiBi mas em diferentes comprimentos de onda e submetidas a torção de forma simultânea: FBG 1 – comprimento de onda central  $\sim 1531,5$  nm e FBG 2 – comprimento de onda central  $\sim 1552,5$  nm). A variação espectral mostrada nas Figuras 20 e 21 corresponde a variação total dos espectros no ângulo de rotação de 0 até 360 graus, nos formatos 3D e 2D respectivamente.

A partir da análise realizada do intervalo de torção de 0 até 90 graus, foram demonstrados os comportamentos de cada banda de polarização de cada uma das FBGs: relacionadas aos eixos lento, X1 e X2, e rápido, Y1 e Y2, da FBG1 e da FBG2 respectivamente.

As Figuras 22 (a) e (b) mostram as variações do comprimento de onda das componentes do eixo lento e as Figuras 22 (c) e (d) para as bandas do eixo rápido, para ambas as redes respectivamente, em função do ângulo de rotação.

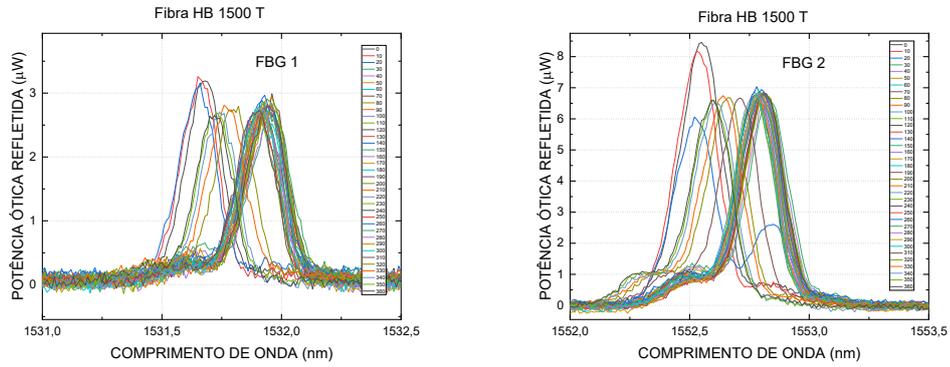
As Figuras 23 (a) e (b) mostram as variações da potência ótica das componentes do eixo lento e as Figuras 23 (c) e (d) para as bandas do eixo rápido, para ambas as redes respectivamente, em função do ângulo de rotação.

**Figura 20 – Variação do comprimento de onda (3D) da FBG em fibra HiBi bow tie de 125  $\mu\text{m}$  em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 21 – Variação do comprimento de onda (2) da FBG em fibra HiBi bow tie de 125 μm em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2.**

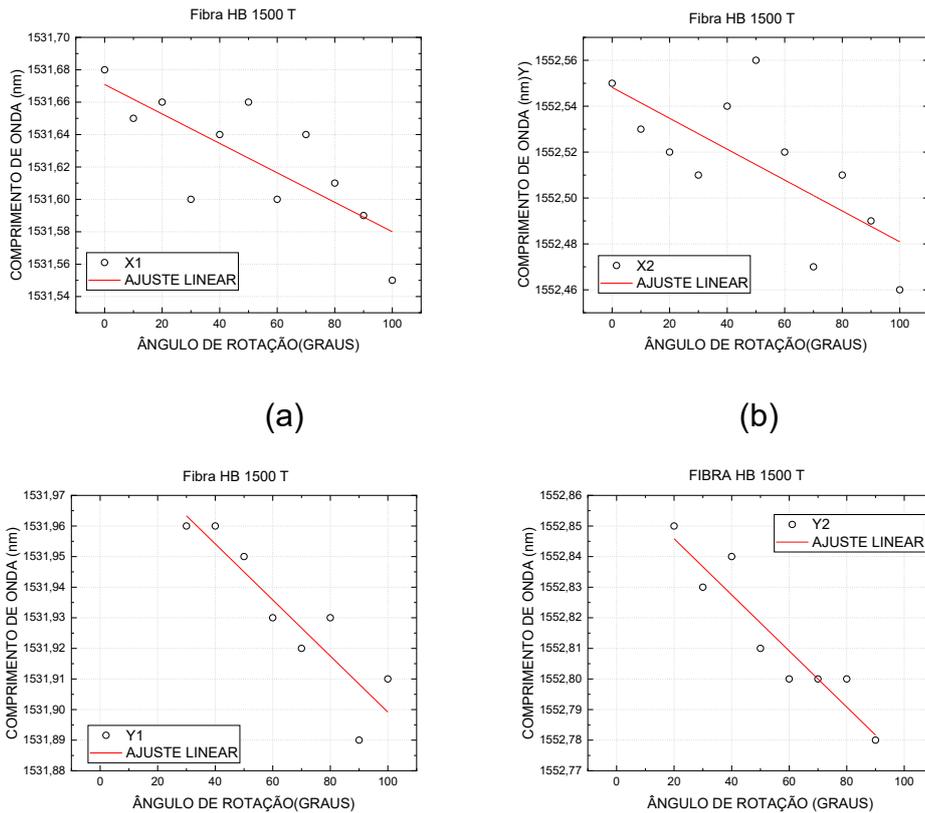


(a)

(b)

Fonte: Autoria própria.

**Figura 22 – Variação do comprimento de onda da FBG em fibra HiBi bow tie de 125 μm em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2.**



(a)

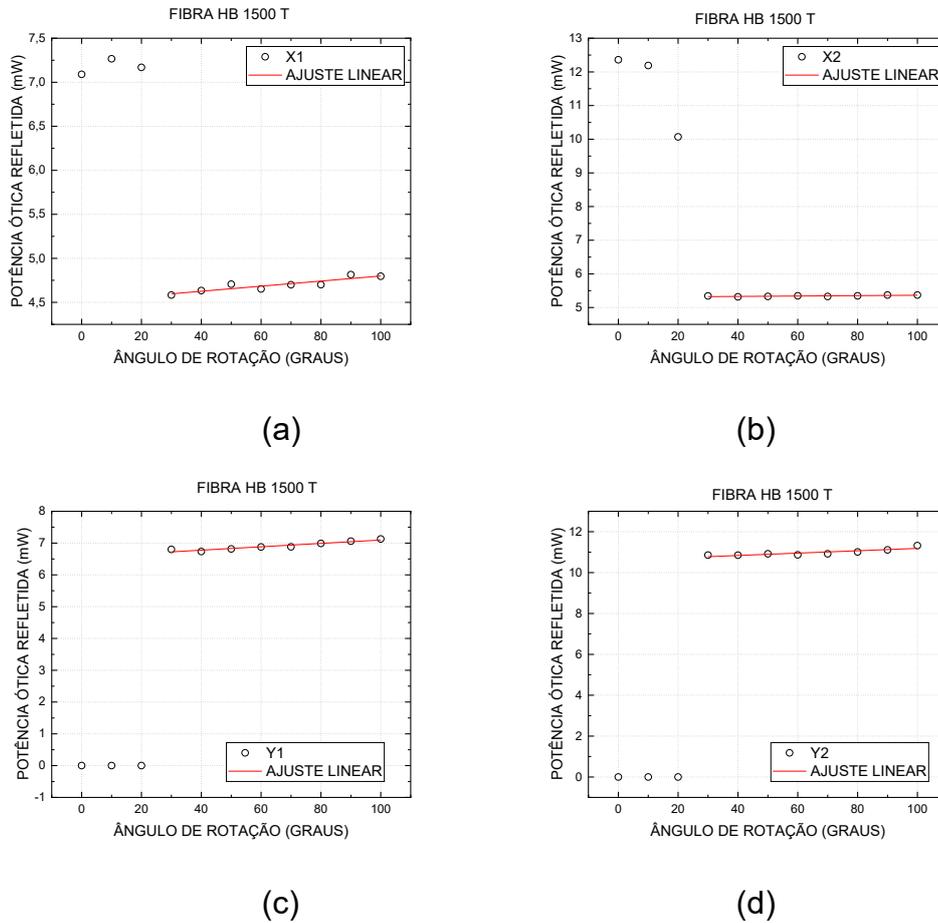
(b)

(c)

(d)

Fonte: Autoria própria.

**Figura 23 – Variação da potência ótica linear refletida da FBG em fibra HiBi bow tie de 125  $\mu\text{m}$  em função do ângulo de rotação para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2.**



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 3 mostra as sensibilidades em comprimento de onda e em potência ótica obtidos para as FBGs em fibra HiBi bow tie.

**Tabela 3 - Sensibilidade em comprimento de onda e em potência ótica refletida para os eixos X e Y da FBG1 e FBG2 gravadas em fibra HiBi bow tie, obtidas para uma variação do ângulo de rotação de 90 graus.**

FBG	Bandas de polarização	Sensibilidade em comprimento de onda (nm/grau)	Sensibilidade em potência ótica (nW/grau)
1	X1	$7,09 \pm 2,6E-4$	$2,94 \pm 7,39E-4$
2	X2	$5,33 \pm 2,54E-4$	$3,11 \pm 6,34E-4$
1	Y1	$10,7 \pm 1,99E-4$	$4,84 \pm 8,63E-4$
2	Y2	$-9,16 \pm 1,34E-4$	$3,85 \pm 9,44E-4$

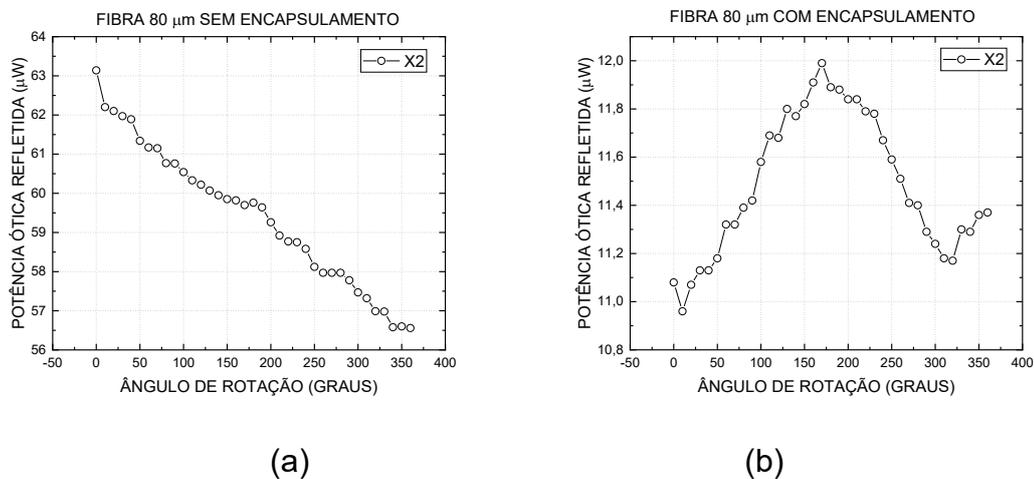
Fonte: Autoria própria.

#### 4.4 FBG em fibra HiBi encapsulada em tubo capilar metálico

As FBG em fibras HiBi foram encapsuladas em tubos capilares metálicos e realizados ensaios de torção com o objetivo de verificar a variação espectral relacionadas às variações na birrefringência linear.

As Figuras 24 (a) e (b) mostram a variação da potência ótica da banda de polarização X em função do ângulo de rotação, obtidos para uma volta completa ( $360^\circ$ ), para a FBG gravada em fibra HiBi de casca interna elíptica de  $80\ \mu\text{m}$  de diâmetro (3M, FS-LS-7511) sem e com o tubo capilar metálico, respectivamente. O gráfico da FBG em fibra Hibi sem tubo mostra um comportamento anômalo da variação de potência ótica de uma das bandas de polarização, diferente do que seria previsto de variação senoidal da potência ótica em função da torção da fibra. Esse comportamento pode estar relacionado à outros fatores, como a indução de tensões de cisalhamento e longitudinais, ou ainda birrefringência circular, além da birrefringência linear. Estes fatores poderiam levar à uma birrefringência complexa. No caso da FBG em fibra HiBi encapsulada com o tubo metálico, a variação senoidal ocorre, conforme o previsto. Isto porque a variação senoidal da potência de cada uma das bandas está relacionada apenas à variação da birrefringência linear, já que com o encapsulamento (a fibra estaria colada ao material metálico) e portanto não deveria sofrer variação de birrefringência ou tensão longitudinal quando a fibra estivesse sendo exposta à torção.

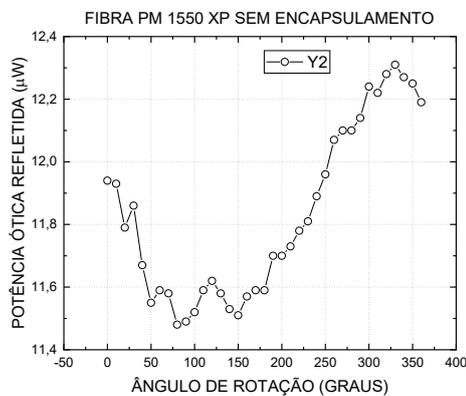
**Figura 24 – Variação da potência ótica linear refletida da FBG em fibra HiBi de casca interna elíptica de  $80\ \mu\text{m}$  em função do ângulo de rotação para uma volta completa, eixo X da FBG2: (a) sem o encapsulamento; (b) encapsulada com o tubo capilar metálico.**



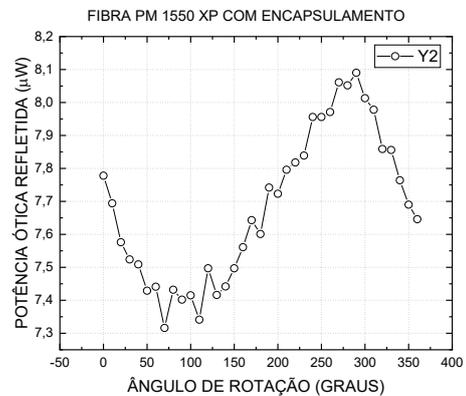
Fonte: Autoria própria.

As Figuras 25 (a) e (b) demonstra a variação da potência ótica da banda de polarização Y para a FBG gravada em fibra HiBi PANDA de 125  $\mu\text{m}$  de diâmetro (Thorlabs, PM1550-XP) sem e com o tubo capilar metálico, respectivamente. Os resultados obtidos para este sensor mostram o mesmo comportamento senoidal antes e após o encapsulamento metálico. Pode-se observar que a amplitude da variação de potência diminuiu para a fibra com o encapsulamento, entretanto, manteve o mesmo comportamento de oscilação para a banda de polarização analisada.

**Figura 25 – Variação da potência ótica linear refletida da FBG em fibra HiBi Panda de 125  $\mu\text{m}$  em função do ângulo de rotação para uma volta completa, eixo Y da FBG2: (a) sem o encapsulamento; (b) encapsulada com o tubo capilar metálico.**



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram descritas as medidas de torção através da monitorização das redes de Bragg gravadas em fibras óticas de alta birrefringência. Três diferentes tipos de fibras HiBi foram utilizadas: fibras de casca interna elíptica com 80  $\mu\text{m}$  de diâmetro, fibras Panda com 125  $\mu\text{m}$  de diâmetro e fibras bow tie com 125  $\mu\text{m}$  de diâmetro.

Ensaio de redes gravadas nos diferentes tipos de fibras HiBi foram realizados. A caracterização também envolve a repetitividade através da gravação e ensaios de torção utilizando duas redes gravadas na mesma fibra em medidas simultâneas. Gráficos mostrando a variação do espectro em função do ângulo de rotação foram obtidos. Através destes gráficos foi possível obter as curvas de variação do comprimento de onda e da potência ótica, para ambas as bandas de polarização (referentes aos dois eixos de propagação na fibra) quando a fibra é rotacionada. Os gráficos obtidos mostram a variação da potência ótica relacionadas diretamente às mudanças na birrefringência linear.

Os sensores FBG também foram encapsulados em material metálico com o objetivo de comparar os resultados e verificar as variações na birrefringência linear, relacionadas às variações espectrais. Os resultados mostraram que os distintos tipos de sensores obtidos através das FBGs em diferentes tipos de fibras HiBi podem apresentar resultados distintos, cuja resposta complexa podem estar relacionadas às tensões de cisalhamento e longitudinais, e birrefringência circular além da birrefringência linear.

Os maiores valores de sensibilidade em potência ótica foram obtidos para a fibra de casca interna elíptica de 80  $\mu\text{m}$  de diâmetro, com média de  $\sim 25$  nW/grau. Este sensor apresentou resultados de coeficiente angulares equivalentes para ambas as FBGs gravadas e para as bandas de polarização X e Y. Os sensores gravados na fibra Panda apresentaram uma grande variação na sensibilidade obtida para as bandas de polarização. Os sensores gravados na fibra bow tie apresentaram resultados semelhantes entre as duas FBGs e bandas de polarização, com média de  $\sim 8$  nW/grau, portanto, quase um terço daqueles resultados apresentados pela fibra de casca interna elíptica.

Os resultados obtidos neste trabalho, oriundos das caracterizações realizadas para cada um desses arranjos experimentais, demonstram a viabilidade de utilização das FBGs em fibras HiBi como sensores de torção, podendo ser otimizados para cada aplicação específica.

## TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento e a utilização dos diferentes tipos de fibras HiBi para aplicações na área de sensores de torção poderão ser realizados em trabalhos futuros. Estes estudos poderão envolver:

- gravação de FBG com comprimentos maiores e portanto menores larguras de banda no espectro, a fim de otimizar a leitura das bandas de polarização;
- ensaios de repetibilidade dos sensores e utilização em aplicações na área de biomecânica.

## REFERÊNCIAS

- ABE, Iida *et al.* Production and characterization of Bragg gratings written in high-birefringence fiber optics. **IEE Proceedings-Circuits, Devices, and Systems**, v. 150, n. 6, p. 495-500, 2003. DOI: 10.1049/ip-cds:20031068
- ANDRÉ, Paulo. S.; PINTO, João. L. Birrefringência e dispersão devido aos modos de polarização em fibras ópticas. **Eletrônica e Telecomunicações**, v. 3, n. 5, p. 375-380, 2002.
- BARLOW, Anders. J.; RAMSKOV HANSEN, Jens J.; PAYNE, David N. Birefringence and polarization mode-dispersion in spun single-mode fibers. **Appl. Opt.** 1981, v. 20, p. 2962–2968.
- BUDINSKI, Vedran; DONLAGIC, Denis. Fiber-optic sensors for measurements of torsion, twist, and rotation: a review. *Sensors*, v. 17, n. 3, p. 443, 2017.
- EL-KHOZONDAR, Hala J. *et al.* Experimental investigation of polarization rotation in twisted optical fibers. In **Proceedings of the 2009 International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT 2009)**, Istanbul, Turkey, 21–23 September 2009; p. 219–222.
- FRAZAO, Orlando.; BAPTISTA, João M.; SANTOS, João L. Recent advances in high-birefringence fiber loop mirror sensors. **Sensors**, v.7, p. 2970–2983, 2007.
- GUO, Tuan, *et al.* VCSEL-powered, and polarization-maintaining fiber-optic grating vector rotation sensor. **Optics Express**, v. 21, n. 16, p. 19097-19102, 2013. DOI: 10.1364/OE.21.019097
- HILL, Ken O., *et al.* "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication." **Applied Physics Letters** 32.10 (1978): 647-649.
- HILL, Ken O., et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. **Applied Physics Letters**, v. 32 n.10, p. 647-649, 1978.
- ITOH, Kazuyoshi; SAITOH, T.; OHTSUKA, Yoshihiro. Optical rotation sensing by the geometric effect of fiber-loop twisting. **Journal of lightwave technology**, v. 5, n. 7, p. 916-919, 1987.
- KASHYAP, Raman. Fiber Bragg gratings. **Academic Press**, 2009. P. 632. 2nd Edition. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/014680300300001789>
- KAWACHI, Masao, *et al.* Fabrication of single-polarisation single-mode-fibre couplers. **Electronics Letters**, v. 22, n. 18, p. 962-964, 1982. DOI: 10.1049/el:19820661
- LO, Yu-Lung; CHUE, Bo-Rong; XU, Shao-Hong. Fiber torsion sensor demodulated by a high-birefringence fiber Bragg grating. **Optics communications**, v. 230, n. 4-6, p. 287-295, 2004.
- MANCIER, Nathalie *et al.* Angular displacement fiberoptic sensor—Theoretical and experimental study. **Appl. Opt.** 1995, 34, 6489–6495. DOI: 10.1364/AO.34.006489
- MELTZ, Gerald *et al.* Fiber optic temperature and strain sensors. In: **Fiber Optic Sensors II**. SPIE, v. 798, p. 104-114, 1987.

NAMIHIRA, Yoshinori; EJIRI, Yoko.; MOCHIZUKI, Keiko Birefringence in elliptical-cladding single-polarisation fibres. **Electronics Letters**, v. 2, n. 18, p. 89-91, 1982.

POOLE, Carl D. *et al.* Fading in lightwave systems due to polarization-mode dispersion. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 3, n. 1, p. 68-70, 1991.

SIMPSON, Jhon *et al.* A single-polarization fiber. **Journal of Lightwave Technology**, v. 1, n. 2, p. 370-374, 1983. DOI: 10.1109/JLT.1983.1072129

SMITH, Alexander M. Birefringence induced by bends and twists in single-mode optical fiber. **Appl. Opt.** 1980, 19, 2606–2611.

SPILLMAN, Whitmer B.; FUHR, Peter L. Fiber-optic rotary displacement sensor with wavelength encoding. **Applied optics**, v. 27, n. 15, p. 3081-3084, 1988. DOI: 10.1364/AO.27.003081

VARNHAM, Malcolm P. *et al.* Performance of bow-tie polarising fibers. 1983.

WEST, Stephen T.; CHEN, Chin-Lin. Optical fiber rotary displacement sensor. **Applied optics**, v. 28, n. 19, p. 4206-4209, 1989. DOI: 10.1364/AO.28.004206

XU Chang-Lian *et al.* A full-vectorial beam propagation method for anisotropic waveguides. **Journal of Lightwave Technology**, v. 12, n. 11, p. 1926-1931, 1994. DOI: 10.1109/50.336056

YIPING, Wang; WANG, Ming; HUANG, Xiaoqin. In fiber Bragg grating twist sensor based on analysis of polarization dependent loss. *Optics Express*, v. 21, n. 10, p. 11913-11920, 2013. DOI: 10.1364/OE.21.011913

ZHANG, Feng; LIT, John WY. Temperature and strain sensitivity measurements of high-birefringent polarization-maintaining fibers. **Applied optics**, v. 32, n. 13, p. 2213-2218, 1993. DOI: 10.1364/AO.32.002213

ZU, Peng *et al.* A temperature-insensitive twist sensor by using low-birefringence photonic-crystal-fiber-based signal interferometer. **IEEE Photonic Technol. Lett.** 2011, 23, 920–922. DOI: 10.1109/LPT.2011.2143400