

## 2

### Sensores de fibra PCF Birrefringente.

#### 2.1

##### Fibras Birrefringentes

Neste capítulo é vista a birrefringência a birrefringência em fibras ópticas microestruturadas. Também é apresentada a utilização dessas fibras para desenvolvimento de sensores de deformação e pressão hidrostática usando fibras PCF de alta birrefringência.

##### 2.1.1

##### Birrefringência

Um material birrefringente é um material que apresenta dois índices de refração diferentes. Birrefringência é uma propriedade que certos materiais possuem de originar dois ou mais raios refratados a partir de um único raio incidente. Essa propriedade foi descoberta em 1669 por Erasmus Bartholinus, que percebeu esse fenômeno em cristais de calcita. Alguns cristais como a turmalina possuem um único eixo óptico, isto é, a luz propaga-se com uma única velocidade dentro do cristal, e são designados por cristais uniaxiais. Outros, tais como a mica e a selenite, possuem dois eixos óticos, pelo que são denominados cristais biaxiais.

A luz incidente em um material birrefringente se divide em duas componentes, uma componente ordinária, que é quando o plano de polarização de um raio coincide ou é paralelo à seção principal (plano que contém o eixo óptico e a direção de propagação). E outra componente extraordinária, que é quando o plano de polarização é perpendicular à seção principal. Isso ocorre porque estes materiais possuem índices de refração diferentes para diferentes direções de propagação da luz. Os índices de refração para cada componente são denominados índices de refração extraordinário e índice de refração ordinário  $n_e$  e  $n_o$ , respectivamente. A diferença entre esses dois índices de refração é conhecido como magnitude de birrefringência de fase, [15] e é expressa como:

$$B = n_e - n_o. \quad (2.1)$$

Assim, pode-se calcular o valor da birrefringência de fase dos materiais pela diferença dos índices de refração de cada componente. As componentes da luz (extraordinária e ordinária), viajam com velocidades diferentes no material, devido ao fato de que seus índices diferem entre si, obedecendo a relação  $v = c/n$ , onde  $v$  é a velocidade da luz no meio,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo, e  $n$  é o índice de refração do meio, que para o caso, é o  $n$  da fibra.

### 2.1.2

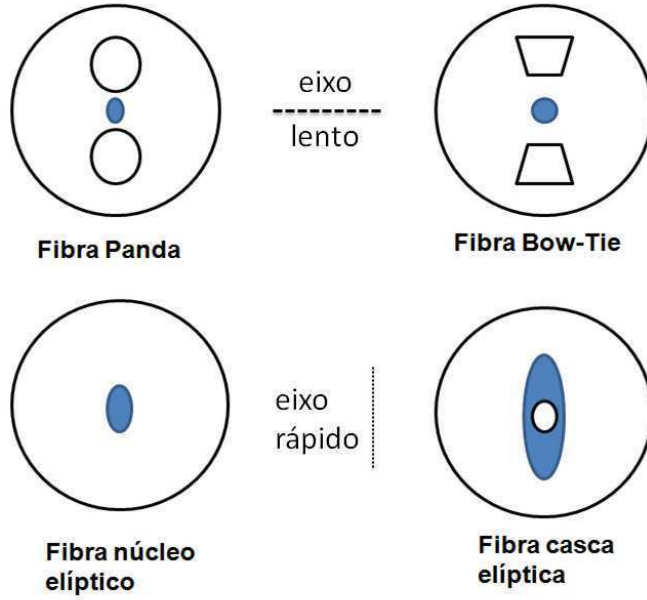
#### Birrefringência em Fibras

Existem duas maneiras de fabricar fibras birrefringentes (HiBi). Uma delas consiste em introduzir um estresse no núcleo de fibras convencionais, antes construídas sem estresse. Isto faz com que apareça uma anisotropia, isto é, o núcleo não é mais homogêneo apresentando 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. A tensão mecânica introduzida no núcleo da fibra é gerada através de estruturas presentes 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 permanente na fibra. Por esse motivo fibras birrefringentes fabricadas com essa técnica possuem sua birrefringência muito sensível às variações de temperatura [16]. Como exemplo dessa classe de fibra podemos citar fibras Panda [17], Bow Tie [18] e fibras de casca elíptica [19]. Geralmente essas fibras possuem birrefringência da ordem de  $B = 4 \times 10^{-4}$  [20]. Entretanto pode-se encontrar distintos valores na literatura.

Uma outra maneira de se fabricar uma fibra HiBi é alterando a geometria do núcleo como no caso das fibras de núcleo elíptico [21], dessa forma o núcleo também não é homogêneo. A birrefringência que se pode conseguir tornando o núcleo elíptico é tipicamente baixa,  $B = 1,47 \times 10^{-5}$ , quando comparada à birrefringência gerada por tensão mecânica. Esse valor depende da fibra e do comprimento de onda usado.

A Fig. 2.1 mostra a seção reta de quatro diferentes tipos de fibras HiBi. Na fibra Panda, Bow Tie, e fibra com casca elíptica 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. A quarta seção reta de fibra HiBi mostrada na Fig. 2.1, é a de núcleo elíptico na qual a birrefringência é induzida

pela mudança na geometria do núcleo.



**Figura 2.1:** Diferentes geometrias de fibras HiBi

A birrefringência de fase de uma fibra pode ser obtida calculando-se o comprimento de batimento  $L_b$ , entre os estados ortogonais de polarização [22]. A relação entre o comprimento de batimento e a birrefringência de fase  $B$ , é expressa por:

$$L_b = \frac{2\pi}{|\beta_x - \beta_y|} = \frac{\lambda}{|n_x - n_y|} = \frac{\lambda}{B}, \quad (2.2)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz,  $\beta_x$  e  $\beta_y$  são as constantes de propagação dos estados ortogonais x e y e  $n_x$  e  $n_y$  são os índices de refração para o eixo lento (eixo x) e o eixo rápido (eixo y) respectivamente. Podemos encontrar a birrefringência de grupo a partir da birrefringência de fase segundo a equação [15]:

$$G = B - \lambda \frac{dB}{d\lambda} \quad (2.3)$$

Fibras com alta birrefringência apresentam grande dependência térmica, induzindo uma variação da birrefringência com a temperatura. Surge então a necessidade de utilização fibras birrefringentes com baixa ou nenhuma

dependência térmica para aplicações em sensoriamento, uma vez que a variação que a variação da birrefringência pode induzir erros em medidas tais como medidas de pressão e/ou deformação.

No ano de 2000, A. Ortigosa Blanch e co-autores [23] propuseram a primeira PCF birrefringente. A simetria da fibra foi modificada com a introdução no interior da fibra, próximo ao núcleo, de dois buracos maiores no interior da fibra, gerando assim uma birrefringência na fibra. Em 2001, M. J. Steel e colaboradores [24] criaram uma fibra PCF birrefringente introduzindo capilares de forma elíptica ao invés de capilares circulares na sua estrutura. Desde então, diversos grupos de pesquisas [25] criaram distintas formas de introduzir birrefringência em fibras PCFs.

### 2.1.3

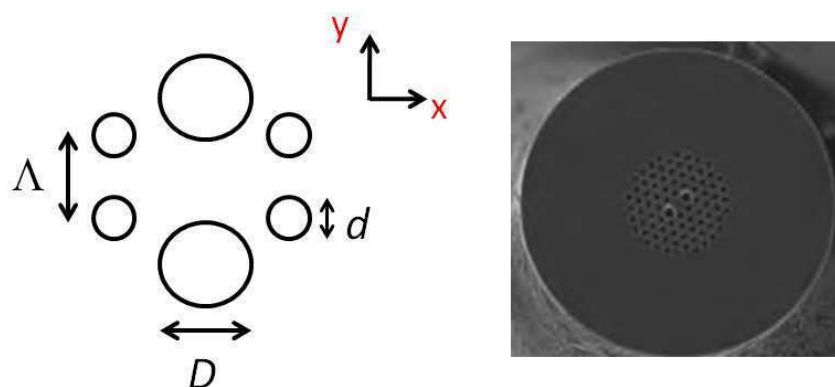
#### Fibra PM 1550-01

Neste trabalho usamos uma fibra PCF comercial com alta birrefringência PM 1550-01, fabricada pela Blazephotonics. A fibra possui uma geometria de sílica-ar (buracos) como mostra a Fig.2.2, onde o diâmetro dos buracos menores é  $d = 2,2 \mu m$ , a distância entre o centro dos buracos, "pitch", é igual a  $\Lambda = 4,4 \mu m$  e o diâmetro dos buracos maiores é igual a  $D = 4,5 \mu m$ . O valor da birrefringência da fibra é de  $B = 8 \times 10^{-4}$ , valor fornecido pela empresa. Consideramos o eixo de propagação y, o eixo que possui os dois buracos maiores, e conseqüentemente o eixo x, como o outro eixo ortogonal. A birrefringência desse tipo de fibra é devido à presença desses dois buracos maiores, que introduzem uma birrefringência no núcleo da fibra.

## 2.2

### Sensores de Deformação e Pressão de fibra PCF Birrefringente.

Um parâmetro importante a ser monitorado na engenharia civil é a deformação de materiais em construções, como pontes, edifícios, etc. Um dos sensores ópticos mais utilizados para esse tipo de medida são sensores que usam as redes de Bragg em fibras (FBG) [26]. Além das vantagens de uso de sensores a fibra óptica discutidas no Capítulo 1, outro fator importante em sensores com FBG é a sensibilidade à deformação ( $1,2 pm/\mu\epsilon$ ) e sua alta repetibilidade quanto à fabricação. Entretanto, a alta dependência com a temperatura ( $13,0 pm/^\circ C$ ) das FBGs [11] faz com que o erro de medidas cruzadas na deformação, calculado como  $\Delta^\circ C/\mu\epsilon$  seja da ordem de  $10,8 \mu\epsilon/^\circ C$ , onde  $\mu\epsilon$  é a deformação aplicada a fibra e  $\Delta^\circ C$  é a dependência térmica da fibra. Portanto, cada grau na variação da temperatura induz um erro de  $10,8 \mu\epsilon$  nas



**Figura 2.2:** Fibra PM 1550-01: Na figura da esquerda esquema da geometria da fibra, onde  $d$  é igual a  $2,2 \mu m$ ,  $D$  é igual a  $4,5 \mu m$ , e  $\Lambda$  é igual a  $4,4 \mu m$ . Na figura da direita imagem de microscópio óptico da seção transversal da fibra de cristal fotônico PM 1550-01. Imagem retirada em <http://www.nktphotonics.com>

medidas. Isso faz com que esse tipo de sensor necessite de um compensador de temperatura quando trabalhe em ambientes onde a temperatura não é constante.

Os primeiros sensores de pressão a fibra foram desenvolvidos com um dispositivo que media as perdas provocadas por uma pressão ou força externa [27]. A fibra era colocada dentro de uma mandíbula, que sofria pressão/força externa, a qual provocava pequenas dobras na fibra, diminuindo, dessa forma, a potência da luz que estava sendo transmitida conforme a pressão era aplicada. Em 1993, Dakin e colaboradores [28] demonstraram o primeiro sensor de pressão usando uma rede de Bragg em fibra, com uma sensibilidade muito baixa ( $3 \text{ pm/MPa}$ ) e uma alta dependência à temperatura ( $10,4 \text{ pm/}^{\circ}\text{C}$ ). O dispositivo (FBG) foi colocado dentro de uma câmara de pressão e foram realizadas medidas para altíssimas pressões ( $70 \text{ MPa}$ ). A vantagem desse tipo de sensor deve-se ao fato de que o elemento sensor é pequeno e pontual, e opera na reflexão, facilitando o seu uso quando comparado a um sensor que opera na transmissão. Porém, a alta dependência com a temperatura faz com que aplicações reais necessitem compensadores de temperatura.

Em 2004, C.L. Zhao e colaboradores [14] demonstraram um interferômetro usando uma fibra com alta birrefringência (HiBi PM 1550). Eles construíram um interferômetro do tipo Sagnac com  $6,5 \text{ m}$  de fibra HiBi, e excitaram os modos da fibra usando um laser sintonizável com sintonia de  $1500 \text{ nm}$  a  $1600 \text{ nm}$ . Uma baixa dependência térmica do dispositivo foi medida, que

era em torno de  $-0,3 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ . No mesmo, ano D.H. Kim e colaboradores [29] demonstraram o mesmo valor da dependência térmica em uma montagem de um interferômetro Sagnac com uma fibra PCF mantedora de polarização da fibra (PM-PCF) PM1550-01

Em 2008, H. Y. Fu e colaboradores [30] demonstraram com esse mesmo interferômetro e com a mesma PCF HiBi, a alta sensibilidade desse tipo de fibra para medidas de pressão hidrostática. Eles usaram um pedaço de 58,4 cm de fibra, e a colocaram dentro de uma câmara de pressão e encontraram uma sensibilidade de  $3,42 \text{ nm}/\text{MPa}$ , um dos maiores valores até então reportado na literatura. A dependência com a temperatura para esse dispositivo foi medida e resultou num valor de  $-2,2 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ . Em 2010 H.Y. Fu [31] e colaboradores utilizaram um interferômetro Sagnac com fibra HiBi para realizar medidas de altas pressões até 20 MPa com uma sensibilidade reportada de  $4,21$  e  $3,24 \text{ nm}/\text{MPa}$  para 1320 nm e 1550 nm, respectivamente. Esse sensor de pressão apresentou uma resposta linear com a mesma sensibilidade para temperaturas até  $293^{\circ}\text{C}$ .

No ano de 2007. X. Dong e colaboradores [32] demonstraram que era possível construir um sensor de deformação com baixa dependência térmica usando um pedaço de 86 mm de fibra PM-PCF (PM 1550-01) inserido em um interferômetro Sagnac. Uma sensibilidade de  $0,23 \text{ pm}/\mu\epsilon$  foi encontrada com uma dependência térmica de  $0,29 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ . No mesmo ano (2007), O. Frazão e colaboradores [33] demonstraram um dispositivo similar, utilizando um elemento sensor com 380 mm e obtiveram um valor de  $1,3 \text{ pm}/\mu\epsilon$  para testes de deformação e aproximadamente um valor de  $0,3 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$  para a dependência térmica. Em 2009, Y. Han [34] demonstrou um interferômetro construído com fibra PM-PCF (PM1550). O interferômetro trabalhava em transmissão e uma sensibilidade de  $1,3 \text{ pm}/\mu\epsilon$  foi encontrada para medidas de deformação. A mesma fibra PM-PCF (PM 1550-01) posicionada entre dois polarizadores foi usada para a demonstração de sensores de torção [35] e sensor de campos magnéticos [36].

À versatilidade do uso de fibra PCF em sensoriamento pode-se acrescentar ao fato de que por serem feitas de sílica pura, isto faz com que elas sejam quimicamente resistente ao hidrogênio [37]. Tornando-as atrativas para aplicações em ambientes com temperaturas elevadas e ricos em hidrogênio, como por exemplo poços de petróleo.

## 2.2.1

**Sensor de Deformação a fibra Birrefringente.**

Nesta seção apresentamos um interferômetro baseado na interferência modal entre os dois modos ortogonais numa fibra PCF HiBi (PM 1550-01), este interferômetro foi testado para respostas de testes de deformação. O princípio de operação está baseado na interação entre os 2 modos de propagação polarizados ortogonalmente que se propagam na fibra. O resultado disso é a excitação dos dois modos da fibra HiBi. Os eixos da fibra possuem valores de índice de refração diferentes, consequentemente as velocidades de propagação serão distintas entre si, devido à diferença entre os dois modos de propagação. Essa interferência entre os modos da PCF-HiBi produz um padrão de máximos e mínimos no espectro de reflexão. A função do sinal de reflexão pode ser escrita como uma função de cosseno, descrita em [32]:

$$R = \frac{[1 - \cos\phi]}{2}, \quad (2.4)$$

onde a fase  $\phi$  entre os dois modos ortogonais é uma função do comprimento da fibra  $L$ , da birrefringência de fase da PCF,  $B$ , e do comprimento de onda  $\lambda$ :

$$\phi = \frac{4\pi LB}{\lambda}. \quad (2.5)$$

Como nosso sensor trabalha em reflexão, consideramos o comprimento da fibra como sendo  $L=2l$ , entretanto, para explorar as equações usamos  $L$ . A mudança de fase ocorre devido a uma variação sofrida no comprimento da fibra quando uma deformação é aplicada sobre a mesma. A deformação é dada por:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (2.6)$$

onde  $L$  é o comprimento inicial da fibra,  $\Delta L$  é a variação sofrida pela fibra e  $\epsilon$  é a deformação aplicada na direção axial da fibra. Escrevemos então que a variação de fase devido a uma variação no comprimento da fibra é dado por:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi[\Delta LB + L\Delta B]}{\lambda}, \quad (2.7)$$

onde podemos escrever que a variação da birrefringência da fibra HiBi devido à variação dos índices para os dois eixos de propagação é dada por :

$$\Delta B = \Delta n_x - \Delta n_y, \quad (2.8)$$

onde  $\Delta n_x$  é a variação do índice de refração para o eixo  $x$  e  $\Delta n_y$  é a variação do índice de refração para o eixo  $y$ . A mudança nos índices de refração dos eixos de propagação do núcleo da fibra está relacionada com a deformação aplicada na fibra ( $\epsilon$ ) e o efeito fotoelástico na fibra. O efeito fotoelástico está associado às mudanças dos índices de refração de cada eixo de propagação da luz na fibra, devido a uma deformação mecânica aplicada na fibra [38]. Este efeito é descrito por dois coeficientes de deformação óptica,  $p_x$ , para o eixo de propagação  $x$  e  $p_y$  para o eixo de propagação  $y$ . Podemos escrever a variação dos índices de refração de cada eixo do núcleo da fibra, considerando que os coeficientes são distintos entre si, como:

$$\Delta n_x = p_x n_x \epsilon \quad (2.9)$$

$$\Delta n_y = p_y n_y \epsilon, \quad (2.10)$$

onde  $p_x$  e  $p_y$  são as constantes fotoelásticas da fibra para o eixo  $x$  e  $y$  respectivamente. Segundo G. Statkiewicz e colaboradores [22], o espaçamento  $S$ , que é a distância entre dois mínimos de interferência, em função da birrefringência de grupo ( $G$ ) é dado por:

$$|S| = \frac{\lambda^2}{2GL}. \quad (2.11)$$

Usando as equações 2.5 e a equação 2.11, podemos escrever que a variação do comprimento de onda como:

$$\Delta \lambda = \frac{S \Delta \phi}{2\pi}. \quad (2.12)$$

Manipulando as equações, 2.8, 2.11 e 2.12 na equação 2.7, chegamos na equação da variação do comprimento de onda pela deformação aplicada à fibra:

$$\Delta \lambda = \lambda(1 + \Delta p)\epsilon, \quad (2.13)$$

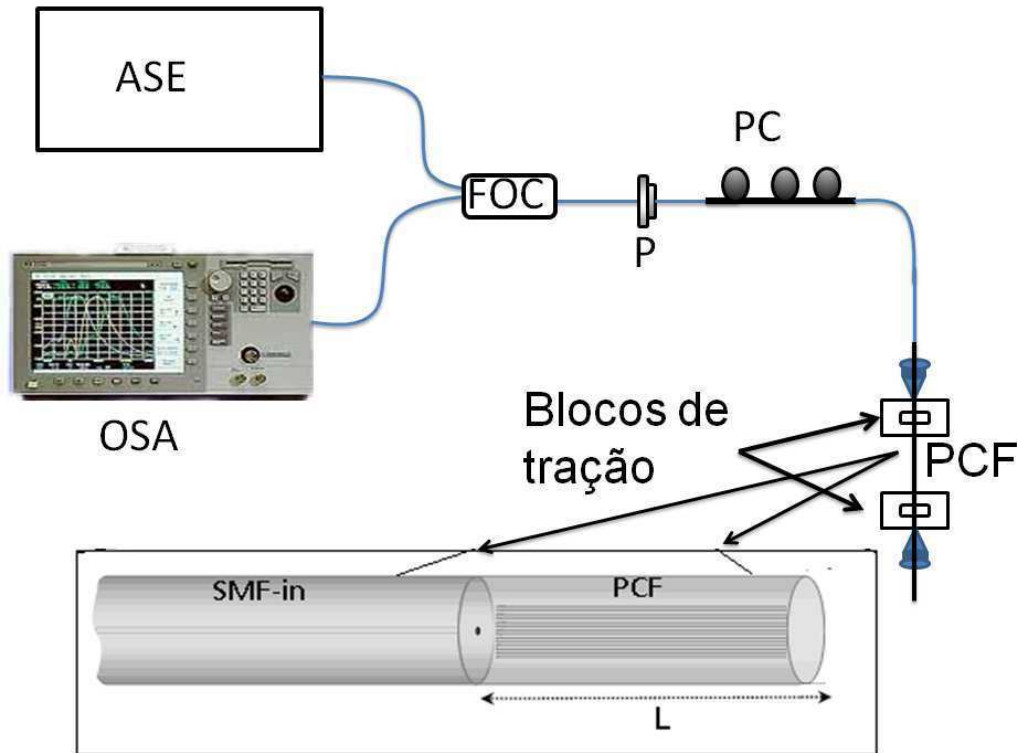
onde  $\Delta p$ , definido através das equações 2.8, 2.9 e 2.10, é igual a  $(n_x p_x - n_y p_y)/B$  e sendo a constante que descreve a variação induzida na birrefringência da fibra PCF pela de deformação aplicada. Assim, concluímos que a variação do comprimento de onda do dispositivo é diretamente proporcional à deformação aplicada à fibra PCF. Com os valores experimentais (que serão mostrados mais adiante) da variação do sinal de reflexão ( $\Delta \lambda$ ) pela deformação aplicada na fibra ( $\mu\epsilon$ ), encontramos que  $\Delta p$  é igual a 0,491.

### 2.2.2

#### Montagem Experimental

A montagem experimental utilizada consiste numa fonte de banda larga (ASE) com largura espectral de 80,0 nm e comprimento de onda central de  $\lambda = 1550,0 \text{ nm}$ , um circulador a fibra óptica (FOC), um analisador de espectro óptico (OSA), um polarizador em fibra e um controlador de polarização (PC), e dois blocos de tração para aplicar deformação na fibra, conforme mostrado na Fig. 2.3. O sinal da fonte óptica passa pelo circulador e segue pelo polarizador. A luz polarizada passa pelo controlador de polarização, o qual tem a função de controlar a polarização da luz de tal forma, que excite igualmente os dois modos da fibra HiBi. Uma das formas de fazer isso acontecer é quando a luz entra num ângulo de  $45^\circ$  em relação a um dos eixos de propagação. Sabemos que a luz polarizada está num ângulo de  $45^\circ$  quando o contraste das franjas do padrão de interferência atinge seu valor máximo. Isso é feito manuseando o controlador de polarização (PC). Como a fibra está clivada na extremidade oposta a qual a luz foi acoplada, ocorre a reflexão de Fresnel, que corresponde a uma reflexão de aproximadamente de 4 % do sinal incidente em interfaces sílica-ar. Desta forma, o sinal de interferência refletido é gerado pela interação dos modos de propagação da fibra HiBi. O sinal gerado é então monitorado pelo OSA.

Uma parte importante da nossa montagem experimental é a fusão de uma fibra PCF-HiBi com uma fibra padrão. A fusão deve ser feita ajustando os parâmetros da máquina de fusão a fibra. Neste trabalho foi utilizada uma máquina comercial Fujikura S40. Os parâmetros foram ajustados para haver o mínimo de colapso dos buracos da fibra PCF mantendo uma rigidez tal que fosse possível a aplicação de deformação na fibra. Quando comparado aos parâmetros de uma emenda SMF-SMF (single mode fiber), o tempo do arco foi reduzido a 25 %, e o calor gerado pelo arco de descarga, foi aumentado em 50 %. Desse modo, a potência não atingia todo o interior da fibra (devido ao pouco tempo do arco), mas era alta suficiente para fazer uma emenda na casca. Perdas da ordem de 2,0 dB foram medidas, que são equivalentes às perdas reportadas na literatura [39]. Na Fig. 2.3 é mostrado um esquema de emenda da fibra PCF com uma fibra padrão.

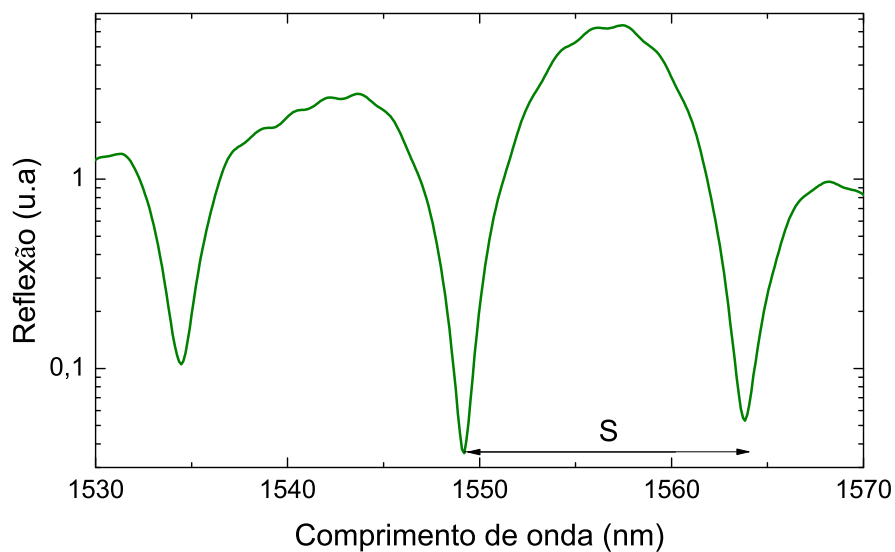


**Figura 2.3:** Montagem experimental do sensor de deformação. ASE é a fonte óptica, OSA é o analisador de espectro óptico, FOC é o circulador óptico, P é o polarizador óptico em fibra, PC é o controlador de polarização, PCF é a fibra usada no experimento (PM 1550-01). Na figura inserida na parte inferior é mostrado um esquema da emenda da fibra PCF com uma fibra padrão. A localização dos dois blocos de tração é mostrada na figura.

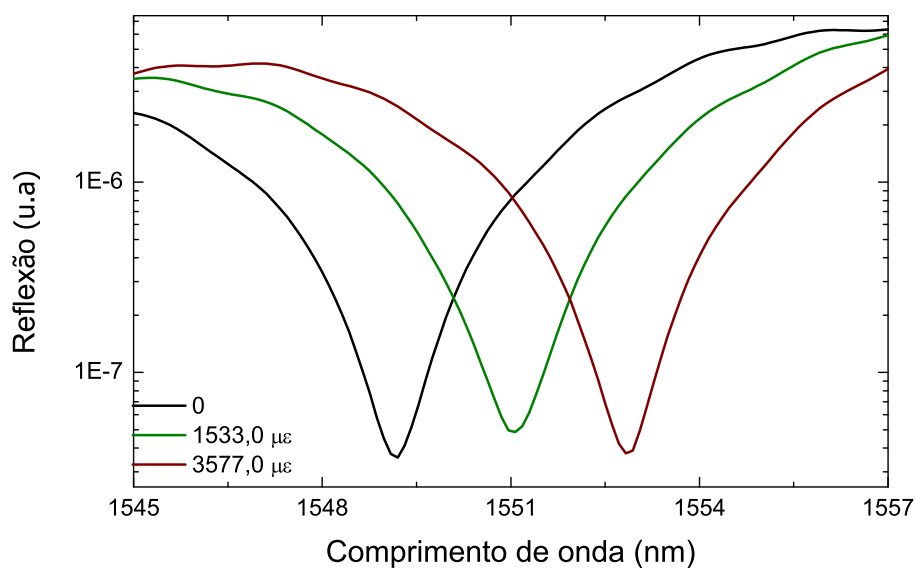
### 2.2.3 Resultados

Com um pedaço de 10,0 cm de fibra comercial PM 1550-01 foi construído o interferômetro descrito na seção anterior, e o sinal de reflexão da interferência foi monitorado (Fig. 2.4). O espaçamento  $S$  foi medido entre dois mínimos de interferência e o valor encontrado foi de  $S = 14,6 \text{ nm}$ , que pela equação 2.12 resulta numa birrefringência de  $8,2 \times 10^{-4}$ . O valor da birrefringência por nós encontrado, difere do valor fornecido pelo fabricante ( $B = 8,0 \times 10^{-4}$ ). Isto deve-se ao fato que as microestruturas da fibra não são uniformes ao longo da fibra, ocasionando assim uma pequena mudança no valor da birrefringência medida experimentalmente com o valor fornecido pelo fabricante.

Inicialmente realizamos testes de deformação com a fibra. Para isso, a fibra foi colocada com super cola em cima de dois blocos de tração, como mostra a Fig. 2.3. Com a ajuda de um parafuso micrométrico, aplicamos uma deformação na fibra. Para cada deslocamento efetuado o sinal da reflexão era

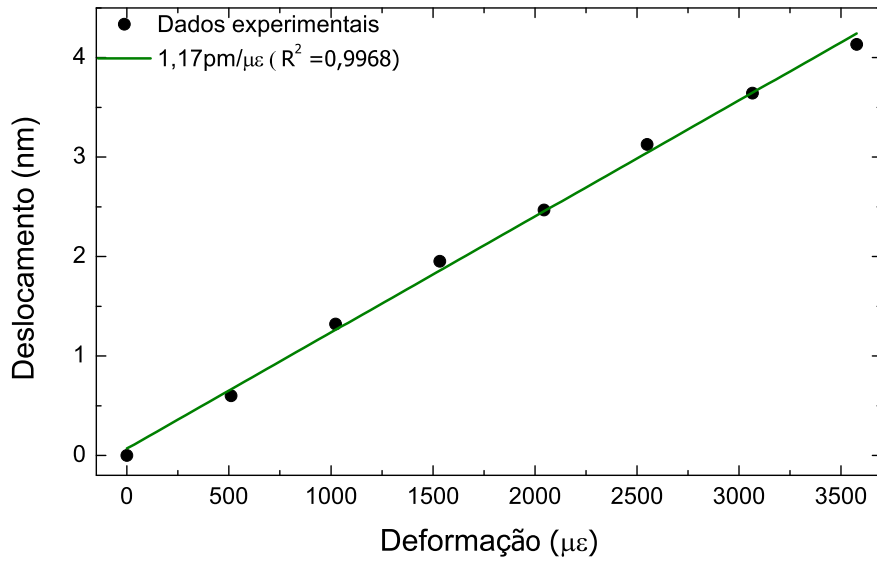


**Figura 2.4:** Sinal de reflexão em função comprimento de onda do interferômetro com fibra PCF 1550-01.

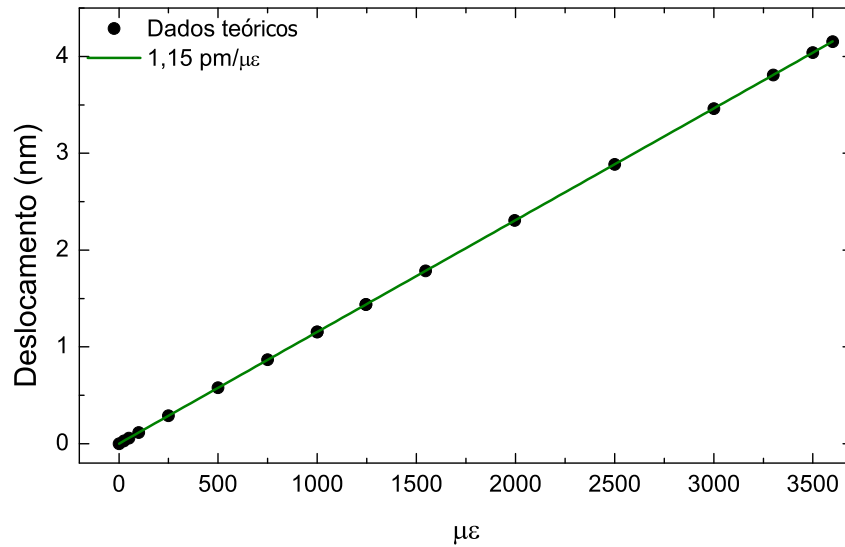


**Figura 2.5:** Espectros para diferentes deformações aplicadas: 0  $\mu\epsilon$ , 1533,0  $\mu\epsilon$ , e 3577,0  $\mu\epsilon$  respectivamente.

adquirido pelo OSA. Na Fig. 2.5 plotamos o sinal de reflexão em função do comprimento de onda para um dos mínimos de interferência para três diferentes valores de deformação aplicada na fibra (0, 1533,0  $\mu\epsilon$  e 3577,0  $\mu\epsilon$ ).



**Figura 2.6:** Variação do comprimento de onda pela deformação. Os pontos pretos são dados experimentais, e linha verde é o ajuste linear com  $R^2 = 0,9968$ .



**Figura 2.7:** Variação do comprimento de onda pela deformação aplicada na fibra teórico, adotando  $\Delta p = 0,491$ .

O teste de deformação consistiu em aplicar uma deformação de 0 a 3577,0  $\mu\epsilon$ . Escolhemos um dos mínimos de interferência e monitoramos seu deslocamento. No gráfico da Fig. 2.6 plotamos o gráfico do deslocamento

do comprimento de onda de um dos mínimos do padrão interferência pela deformação aplicada a fibra.

O resultado encontrado mostrou uma sensibilidade de  $1,17 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , que é similar a outros resultados já demonstrados na literatura [33]. Para comparar nosso resultado experimental com valores teóricos, plotamos o gráfico da variação do comprimento de onda pela deformação aplicada na fibra usando para isso a equação 2.13 e mostrado na Fig. 2.7. Encontramos uma sensibilidade teórica de  $1,15 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , que é muito próximo do valor obtido experimentalmente.

Em resumo, propusemos e demonstramos um sensor de deformação com uma fibra PCF HiBi PM 1550-01, de fácil fabricação e com sensibilidade comparável a sensibilidade apresentada pelas tradicionais FBG ( $1,1 \text{ pm}/\mu\epsilon$  [5]). O resultado obtido experimentalmente é similar ao resultado obtido teoricamente.

## 2.3

### Sensor de Pressão Hidrostática

Nesta seção, apresentamos um sensor à pressão hidrostática e deformação, que utiliza PCF HiBi. Resultados das medidas de sensoriamento de pressão hidrostática e temperatura serão apresentados nesta seção. A função transferência do sinal da reflexão do dispositivo descrito na seção 2.2.1 é escrita como [30]:

$$R = \frac{[1 - \cos\phi]}{2}, \quad (2.14)$$

onde a fase  $\phi$  é escrita como:

$$\phi = \phi_0 + \phi_p + \phi_t, \quad (2.15)$$

onde  $\phi_0$  é a diferença de fase intrínseca da fibra, devido a sua geometria,  $\phi_p$  é a diferença de fase devido à variação de pressão aplicada na fibra e por último  $\phi_t$  é devido a variação de temperatura. Entretanto, como para esse tipo de fibra a variação de temperatura é muito pequena (o resultado da baixa dependência térmica será mostrado a seguir), iremos desprezar o último termo. Podemos escrever a diferença de fase intrínseca da fibra PCF e a diferença de fase devido a variação de pressão aplicada como:

$$\phi_0 = \frac{4\pi LB}{\lambda} \quad (2.16)$$

$$\phi_p = \frac{4\pi(K_p\Delta p)}{\lambda} L, \quad (2.17)$$

onde o coeficiente  $K_p$  é a variação da birrefringência da fibra com a variação da pressão aplicada sobre a fibra [40]:

$$K_p = \frac{\partial n_x}{\partial p} - \frac{\partial n_y}{\partial p}. \quad (2.18)$$

A partir da equação do espaçamento das franjas de interferência (S), Eq. 2.11, e da Eq. 2.17 reescrevemos a variação do comprimento de onda como:

$$\Delta\lambda = \frac{S\phi_p}{4\pi}, \quad (2.19)$$

a partir da Eq 2.19, e trabalhando com as Eq. 2.11 e 2.17 podemos escrever que a variação do comprimento de onda pela pressão aplicada na fibra é dada por:

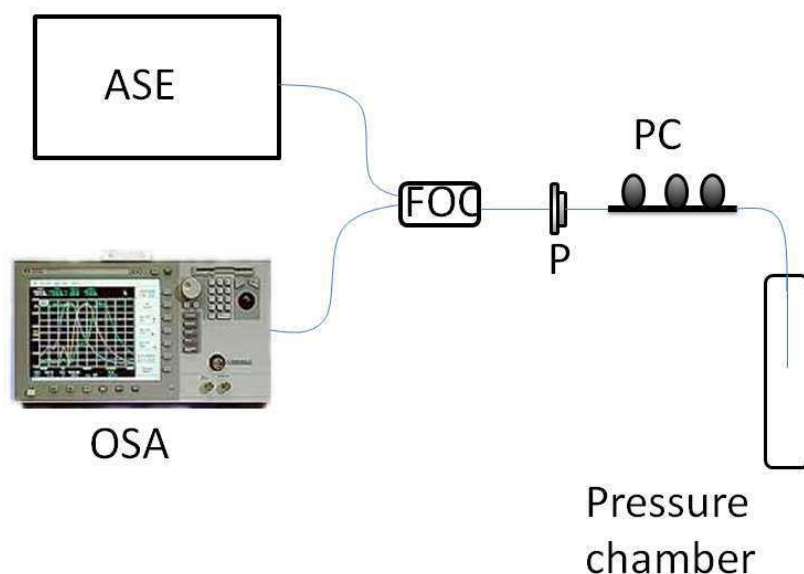
$$\Delta\lambda = \frac{K_p\lambda}{2G}\Delta p, \quad (2.20)$$

o valor da sensibilidade a pressão é tipicamente  $K_p = -1,7 \times 10^{-6} MPa^{-1}$  como foi demonstrado por nosso grupo [41].

### 2.3.1

#### Montagem Experimental

O mesmo cuidado para realização das emendas das fibra (SMF-PCF) anteriormente discutido foi tomado aqui para que ocorresse o mínimo de colapso das microestruturas da PCF. A montagem experimental consiste em uma fonte de banda larga (ASE), um circulador a fibra óptica (FOC), um polarizador a fibra (P), e um controlador de polarização (PC), como é mostrado na Fig.2.8. Os testes de pressão hidrostática realizados no laboratório LSFO do departamento de Engenharia Mecânica PUC-Rio, foram feitos com uma câmara de pressão hidrostática (pressure chamber), a qual continha óleo de silicone. Como nosso dispositivo utiliza a reflexão de Fresnel da extremidade da PCF oposta à emenda da PCF com uma fibra padrão, tivemos a necessidade de criar um mecanismo de preservar o sinal oriundo da reflexão e evitar que o óleo penetrasse nas microestruturas da fibra, aniquilando o sinal. A



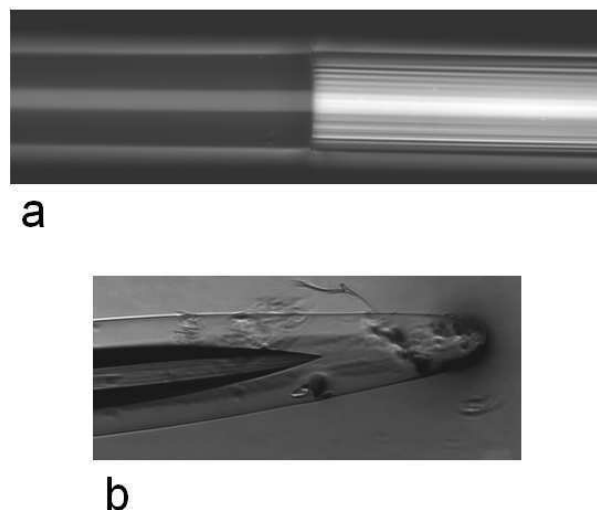
**Figura 2.8:** Montagem experimental do sensor de pressão, onde ASE é a fonte óptica, FOC é o circulador óptico, P polarizador a fibra, PC é o controlador de polarização, OSA é o analisador de espectro óptico.

solução encontrada, foi de emendar um capilar de sílica nessa extremidade de PCF. O capilar tinha diâmetro externo de  $125,0 \mu m$  e diâmetro interno de  $56,0 \mu m$ . Após essa emenda, selamos totalmente a ponta do capilar, usando um arco de descarga de uma máquina de emenda para fibra. Dessa forma, a reflexão de Fresnel estava preservada, pois o óleo não entrava em contato com a extremidade da PCF. A emenda entre a fibra PCF e uma fibra padrão, bem como a ponta selada do capilar podem ser vistas na Fig. 2.9

### 2.3.2

#### Resultados.

O interferômetro usado nessa parte do trabalho possui comprimento da fibra PM 1550-01 de  $11,0 \text{ cm}$  e espaçamento entre as franjas de interferência de aproximadamente  $14,00 \text{ nm}$ , como é mostrado na Fig. 2.10, na qual plotamos o gráfico do sinal da reflexão do interferômetro em função do comprimento de onda. Segundo a equação 2.12, o espaçamento resulta numa birrefringência de aproximadamente  $7,8 \times 10^{-4}$ . O dispositivo, que consiste na PCF e capilar, foi resinado dentro de um tubo metálico de aproximadamente  $360,0 \mu m$  de diâmetro interno e  $2,0 \text{ cm}$  de diâmetro externo e foi inserido numa câmara

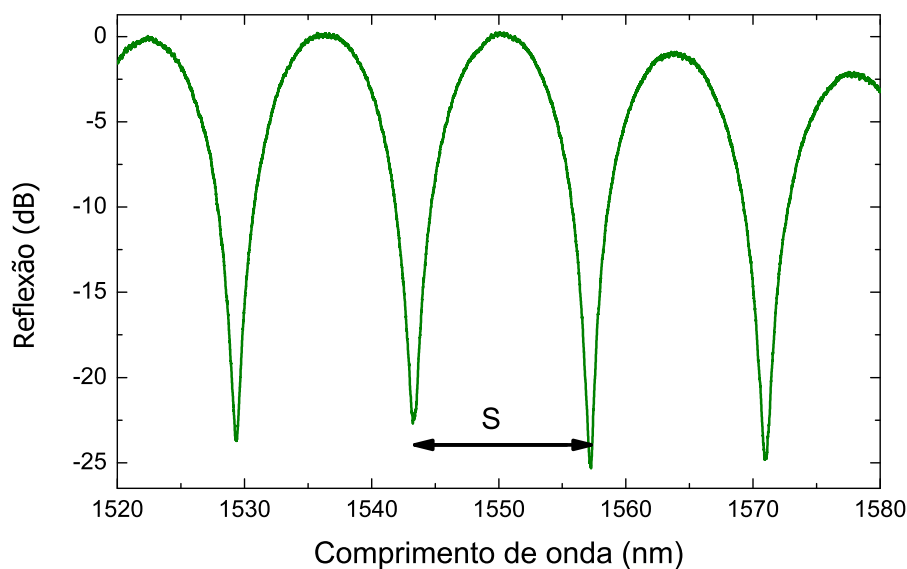


**Figura 2.9:** *a)* Imagem de microscópio óptico da emenda de uma fibra padrão com a fibra PM 1550-01. *b)* Imagem da ponta colapsada do capilar.

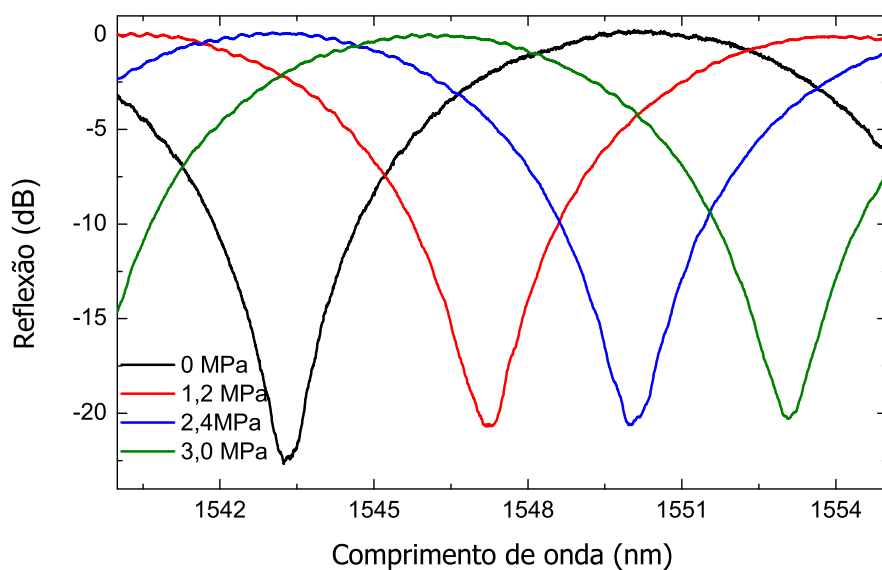
de pressão. Uma das extremidades do dispositivo resinado era a entrada do cabo óptico, e a outra, era a entrada do óleo com o qual aplicava-se pressão diretamente na fibra. A pressão foi monitorada com um medidor de pressão comercial (Fluke P05Ex). A pressão variou de 0 a 3,0 MPa. Mostramos o sinal de reflexão em função da pressão para quatro valores diferentes de pressão, (0; 1,2 MPa, 2,4 MPa e 3,0 MPa) na Fig. 2.11. Podemos observar que a medida que a pressão aplicada aumentava o deslocamento em comprimento de onda aumentava linearmente.

Escolhemos um dos mínimos do padrão de interferência, e monitoramos seu deslocamento com a variação da pressão hidrostática aplicada na fibra. O resultado pode ser visto na Fig. 2.12. Encontramos uma sensibilidade para o dispositivo como 3,32 nm/MPa, que é similar aos resultados de sensores de pressão utilizando o mesmo tipo de fibra [30]. Entretanto, a vantagem do nosso dispositivo, é que ele trabalha em reflexão, e pode ser aplicado para medições de pressões hidrostáticas, independente do líquido, ou gás usado para aplicar pressão, uma vez que o líquido não entra em contato com as microestruturas da fibra PCF.

Usando a Eq. 2.20, plotamos o gráfico da variação do comprimento de onda pela pressão hidrostática aplicada (Fig.2.13) para compararmos

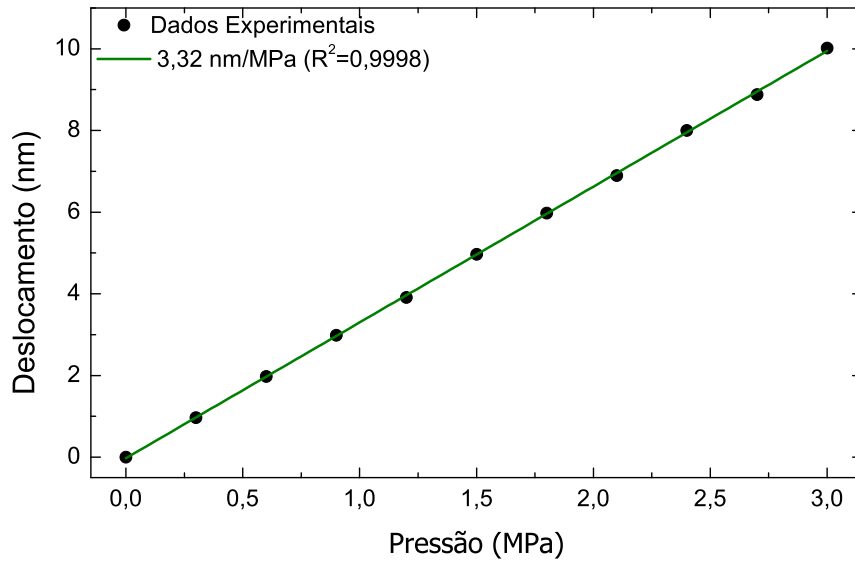


**Figura 2.10:** Sinal de reflexão do interferômetro formado pela fibra PCF e capilar com 11,0 cm de fibra PCF.

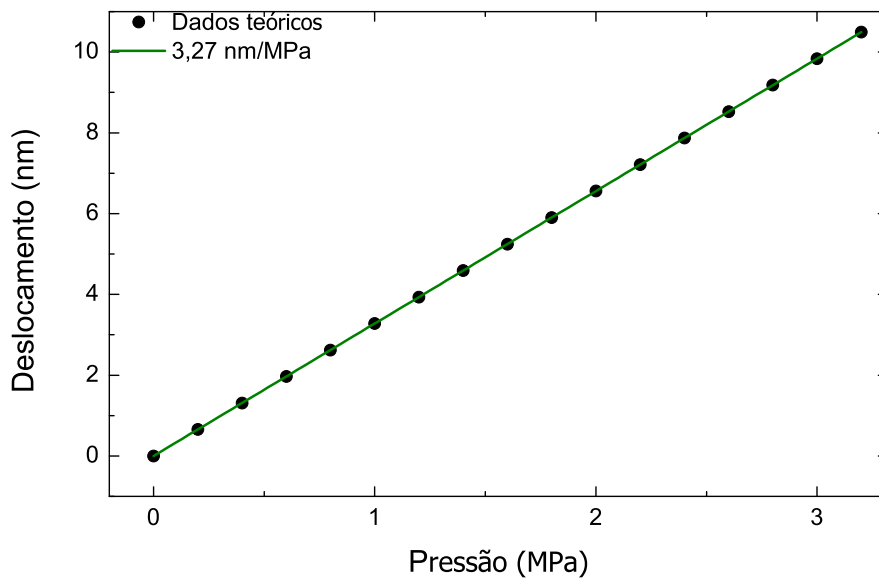


**Figura 2.11:** Sinal de reflexão em função do comprimento de onda para diferentes valores de pressão hidrostática aplicadas ao sensor de pressão com PCF HiBi PM 1550-01.

a sensibilidade do dispositivo obtida experimentalmente e a sensibilidade obtida teoricamente. O resultado encontrado da sensibilidade teórica é de 3,27 nm/MPa, que é muito próximo do valor obtido experimentalmente (3,32



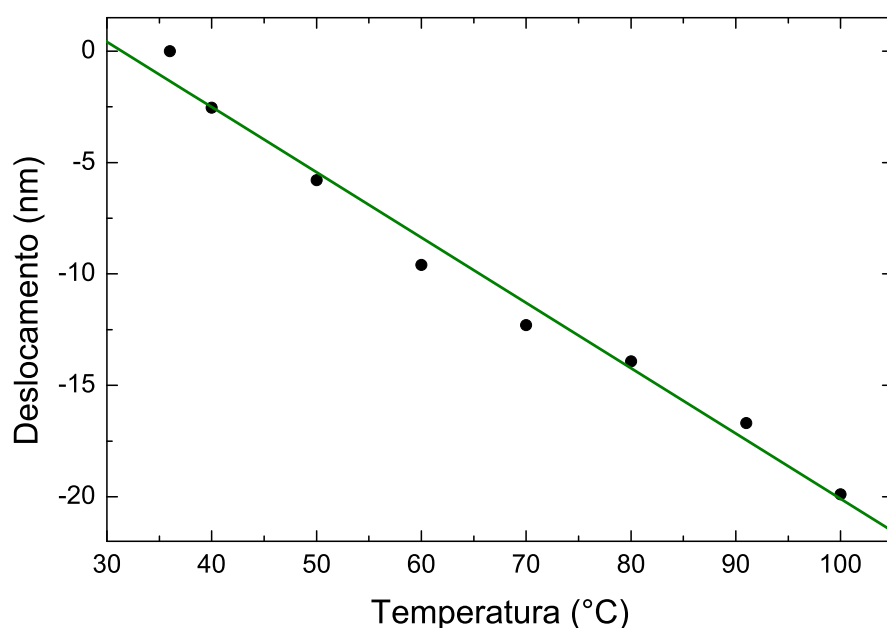
**Figura 2.12:** Deslocamento em comprimento de onda de um mínimo de interferência. Sensibilidade do dispositivo em função da pressão aplicada, 3,32 nm/MPa. Os pontos pretos são dados experimentais e a linha verde é o ajuste linear apresentando um  $R^2 = 0,9998$ .



**Figura 2.13:** Valor teórico do deslocamento em comprimento de onda pela pressão hidrostática aplicada na fibra, calculado a partir da Eq.2.20 e adotando  $K_p = -1,7 \times 10^{-6} MPa^{-1}$ .

nm/MPa). O sistema foi colocado dentro de um forno para realizarmos

medidas da dependência térmica da PCF HiBi com a temperatura. Tivemos o devido cuidado de somente aquecermos a PCF, pois só a PCF foi posta dentro do forno, e a fibra padrão próxima ao forno foi coberta com teflon e lã de vidro. Esse cuidado é necessário, pois ao aquecermos a fibra padrão, qualquer curvatura irá gerar uma birrefringência induzida com a temperatura, ocasionando assim erros nas medidas. A temperatura foi elevada até 100

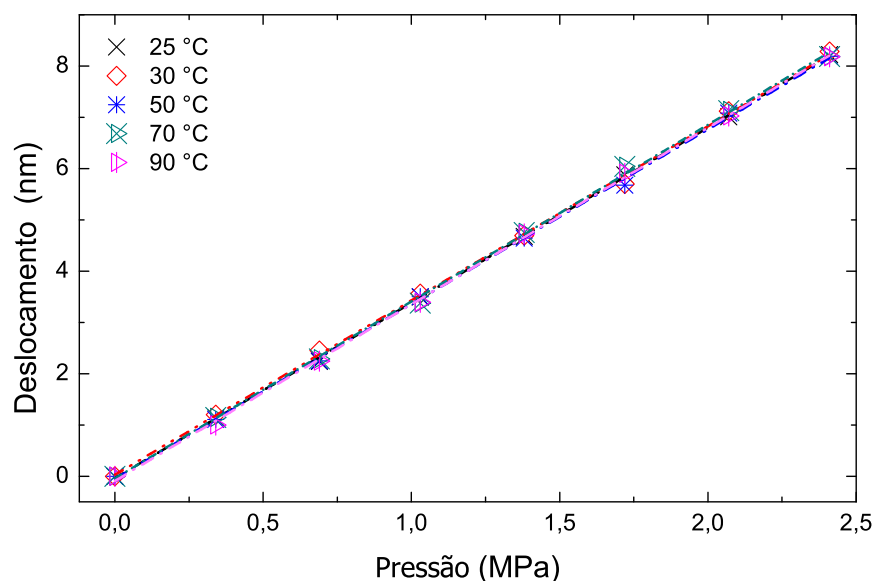


**Figura 2.14:** Gráfico da variação do comprimento de onda pela variação da temperatura para PCF HiBi PM 1550.

°C e escolhemos um dos mínimos do padrão de interferência para medir o seu deslocamento do comprimento de onda com a variação de temperatura, conforme mostrado na Fig.2.14.

O valor encontrado da dependência térmica da PCF, foi de  $-0,29 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ , comparável a outros valores já reportados [30, 33], o que significa que o dispositivo aqui apresentado, tem dependência térmica 34 vezes menor que a dependência térmica de uma FBG. Quando calculamos o erro cruzado com a temperatura para essa fibra, que corresponde à relação entre a dependência térmica com a sensibilidade da fibra a pressão hidrostática, encontramos um valor de  $8,7 \times 10^{-5} \text{ MPa}/^{\circ}\text{C}$ . Isto significa que para cada variação de  $1^{\circ}\text{C}$  da temperatura sobre o dispositivo, temos um erro de apenas  $8,7 \times 10^{-5}$  na medida de pressão hidrostática. Por isso, em nossas análises a dependência térmica foi ignorada.

Para comprovarmos a baixa dependência da PCF com a temperatura, foram realizados também testes de pressão hidrostática para diferentes temperaturas. Todo o dispositivo foi posto numa câmara de pressão hidrostática, a qual era possível aplicar pressão para um certo valor de temperatura. A temperatura variou da temperatura ambiente, até um máximo de 90 °C. Realizamos testes de pressão hidrostática de 0 a 3,0 MPa, para cinco temperaturas diferentes: temperatura ambiente (25 °C), 30 °C, 50 °C, 70 °C e 90 °C. Para análise dos dados realizamos o mesmo procedimento descrito na seção 2.2.3, o qual consistia em monitorar a variação do comprimento de onda de um dos mínimos de interferência. Fizemos isso para todas as temperaturas já mencionadas, e o resultado para o teste de pressão para diferentes temperaturas é mostrado na Fig. 2.15.



**Figura 2.15:** Gráfico da variação do comprimento de onda pela variação de pressão para diferentes temperaturas. Curva preta, teste de pressão para temperatura de 25 °C. Curva vermelha, teste de pressão para temperatura de 30 °C. Curva azul, teste de pressão para temperatura 50 °C. Curva verde, teste de pressão para temperatura de 70 °C. Curva rosa, teste de pressão para temperatura 90 °C

Como podemos notar, em nenhum momento observamos alguma distinção para a variação de pressão para diferentes temperaturas seguindo o mesmo comportamento linear da variação do deslocamento de um mínimo do padrão de interferência com a pressão aplicada. Podemos dizer dessa forma, que a dependência térmica na fibra HiBi pode ser desprezada.

## 2.4

## Conclusão

Neste capítulo apresentamos um dispositivo para medidas de deformação e pressão hidrostática. O dispositivo faz uso de um interferômetro, que utiliza uma fibra PCF como elemento sensor. A interferência foi produzida excitando dois modos de uma fibra PCF de alta birrefringência. Resultados das medidas do deslocamento do padrão de interferência com a deformação e a pressão hidrostática aplicada sobre a fibra foram apresentados. Demonstramos a baixa dependência térmica da fibra PCF com a temperatura, ( $\approx 0,30 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ). O dispositivo apresentou ser promissor para futuras aplicações, devido à facilidade na fabricação, necessitando apenas uma máquina de emenda de fibras, e devido à alta sensibilidade para sensoriamento de deformação, o qual foi encontrado um valor de  $1,17 \text{ pm}/\mu\epsilon$  e devido à boa sensibilidade para sensoriamento de pressão hidrostática, o, qual foi encontrado um valor de  $3,32 \text{ nm}/\text{MPa}$ . Na tabela 2.1 comparamos os dispositivos apresentados nesta seção com outros dispositivos já demonstrados na literatura.

**Tabela 2.1:** Comparação dos resultados para sensores de pressão e deformação à fibra óptica. Onde \*[11], \*\*[27], \*\*\*[32], \*\*\*\*[29].

| Parâmetros                                    | FBG                             | PM 1550-01                            | F. C. Favero                     |
|-----------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Deformação ( $\text{pm}/\mu\epsilon$ )        | 1,2*                            | 1,3***                                | 1,17                             |
| Erro cruzado ( $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ) | 10,8                            | 0,22                                  | 0,24                             |
| Pressão ( $\text{nm}/\text{MPa}$ )            | $3 \times 10^{-3} *$            | 3,42****                              | 3,32                             |
| Erro cruzado ( $\text{MPa}/^\circ\text{C}$ )  | 4,3                             | $8,4 \times 10^{-5}$                  | $8,7 \times 10^{-5}$             |
| Temperatura                                   | 13 $\text{pm}/^\circ\text{C} *$ | -0,29 $\text{pm}/^\circ\text{C} ****$ | -0,29 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ |

Uma das vantagens do dispositivo apresentado aqui, é que ele trabalha na reflexão, facilitando dessa forma sua aplicação, quando comparado a um sensor que trabalha em transmissão. Outra vantagem que devemos mencionar, é que para medidas de pressão, a pressão hidrostática foi aplicada diretamente sobre a fibra, não necessitando nenhum cálculo ou equipamento de conversão. A baixa dependência térmica é outro fator positivo, que faz com que o dispositivo não necessite nenhum tipo de compensador de temperatura em suas aplicações.