



Larissa Maria Beserra Soares

**Fibras ópticas com cavidades Fabry-Perot para
sensoriamento de temperatura, deformação longitudinal e
campo magnético**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Física do
Departamento de Física da PUC-Rio
como requisito parcial para a obtenção do
título de Mestre em Física.

Orientadora: Prof.^a Isabel Cristina dos Santos Carvalho
Co-orientadora: Prof.^a Greice Kelly Bezerra da Costa

Rio de Janeiro
Setembro de 2015



Larissa Maria Beserra Soares

**Fibras ópticas com cavidades Fabry-Perot para
sensoriamento de temperatura, deformação longitudinal e
campo magnético**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Física do Departamento de Física do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Profa. Isabel Cristina dos Santos Carvalho

Orientadora

Departamento de Física – PUC-Rio

Prof. Antonio Carlos Oliveira Bruno

Departamento de Física – PUC-Rio

Profa. Maria Cristina Ribeiro Carvalho

CETUC– PUC-Rio

Profa. Paula Medeiros Proença de Gouvêa
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de setembro de 2015.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e da orientadora.

Larissa Maria Beserra Soares

Graduou-se em Licenciatura em Física pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (2013) e graduou-se em Bacharel em Física pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (2014).

Ficha Catalográfica

Soares, Larissa Maria Beserra.

Fibras ópticas com cavidades Fabry-Perot para sensoriamento de temperatura, deformação longitudinal e campo magnético / Larissa Maria Beserra Soares; orientadora: Isabel Cristina dos Santos Carvalho; co-orientadora: Greice Kelly Bezerra da Costa. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Física, 2015.

v., 86f.: il. (color.); 29,7cm

1. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física.

Inclui referências bibliográficas.

1. Física – Teses. 2. Fibras ópticas. 3. Sensores. 4. Fabry-Perot. 5. Cavidades de ar. 6. Magnetostricção. I. Carvalho, Isabel Cristina dos Santos; Da Costa, Greice Kelly Bezerra. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. III. Título.

CDD: 530

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida.

Às minhas orientadoras, professora Isabel Cristina dos Santos Carvalho e Greice Kelly Bezerra da Costa, por todo o estímulo, amizade, compreensão e parceria para a realização deste trabalho.

A Capes e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, irmãos e cunhados por toda compreensão, paciência e companheirismo.

Ao meu noivo Pedro, por todo amor, amizade, paciência, incentivo e compreensão.

Aos meus colegas da PUC-Rio.

Aos meus amigos do LOPEL/PUC-Rio, Greice, Leonardo, João, Alexandre, Max, Rodrigo, Manuel, Ana.

Aos funcionários e professores do Departamento de Física da PUC-Rio.

Aos meus amigos da UERJ, Alfa e parentes.

Resumo

Soares, Larissa Maria Beserra; Carvalho, Isabel Cristina dos Santos; Costa, Greice Kelly Bezerra da. **Fibras ópticas com cavidades Fabry-Perot para sensoriamento de temperatura, deformação longitudinal e campo magnético.** Rio de Janeiro, 2015. 86p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesta dissertação foram discutidos os resultados obtidos com um interferômetro Fabry-Perot intrínseco (FPI) a fibra óptica, para sensoriamento de deformação longitudinal, temperatura e campo magnético. O FPI foi construído através da emenda de uma fibra capilar entre dois pedaços de fibra padrão de telecomunicação, formando uma cavidade de ar retangular. Esta cavidade, quando atua como um sensor de deformação longitudinal, possui uma sensibilidade nove vezes maior que uma típica rede de Bragg (FBG). Porém, quando atua como sensor de temperatura, a sensibilidade é bem menor que a de uma rede de Bragg, tornando-se bastante útil para diversas aplicações. O sensor de campo magnético foi construído através da colagem da cavidade de ar num material magnetostrictivo, para que este convertesse as mudanças causadas em seu comprimento, devido à aplicação do campo magnético, em deformação longitudinal. Este sensor apresentou uma sensibilidade ao campo magnético quatro vezes maior do que quando o mesmo é construído com uma rede de Bragg.

Palavras-chave

Fibras ópticas; sensores; Fabry-Perot; cavidades de ar; temperatura; deformação longitudinal; magnetostricção; campo magnético.

Abstract

Soares, Larissa Maria Beserra; Carvalho, Isabel Cristina dos Santos (Advisor); Costa, Greice Kelly Bezerra da. (Co-Advisor). **Optical fiber Fabry-Perot cavities for sensing temperature, strain and magnetic field.** Rio de Janeiro, 2015. 86p. MSc. Dissertation– Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis discusses the results obtained with an intrinsic Fabry-Perot interferometer (FPI) fiber, for sensing longitudinal strain, temperature and magnetic field. The FPI was constructed by splicing a capillary fiber between two pieces of standard telecommunication fiber, forming a rectangular air cavity. This cavity, when acting as a longitudinal deformation sensor has a sensitivity nine times greater than a typical Bragg grating (FBG). However, when it acts as a temperature sensor, the sensitivity is much smaller than a Bragg grating, making it useful for various applications. The magnetic field sensor was built placing the air cavity on a magnetostrictive material, so that it converted the changes brought in its length due to the application of the magnetic field in longitudinal deformation. The sensor showed a sensitivity to the magnetic field four times higher than when it is built with a Bragg grating.

Keywords

Optical fibers; sensors; Fabry-Perot; air cavities; temperature; strain; magnetostriction; magnetic field.

Sumário

1.Introdução	15
1.1 Motivação e objetivo	15
1.2 Estado da arte de sensores à fibra óptica	15
1.3 Organização da dissertação	18
2 Fundamentos teóricos de sensores a fibra óptica	20
2.1 Fibras ópticas de vidro	20
2.2 Sensores à fibra óptica	22
2.2.1 Interferômetro de Fabry-Perot	24
2.2.2 Método da matriz de transferência em cavidades FP	25
2.2.3 Sensores à fibra óptica com interferômetro de Fabry-Perot (FPI)	29
2.2.4 Sensores a redes de Bragg	31
2.3 Magnetostricção	34
2.3.1 Sensores baseados em materiais magnetostrictivos	36
2.4. Análise da resposta das cavidades de ar e redes de Bragg, para deformação longitudinal e temperatura	37
2.4.1 Deformação longitudinal (<i>strain</i>) e temperatura: cavidades de ar	37
2.4.2 Deformação longitudinal (<i>strain</i>) e temperatura: fibras com redes de Bragg	38
2.4.3 Deformação longitudinal (<i>strain</i>) e temperatura: comparação entre fibras com redes de Bragg e com cavidades Fabry-Perot	39
3 Metodologia e Montagem Experimental para sensoriamento a fibra óptica	42
3.1 Construção das cavidades Fabry-Perot a fibra	42
3.2 Caracterização das cavidades Fabry-Perot a fibra	44
3.3 Montagem experimental para caracterização do interferômetro Fabry-Perot à fibra com a temperatura	45
3.4 Montagem experimental para caracterização do interferômetro à fibra com a deformação longitudinal	47
3.5 Montagem experimental para caracterização do interferômetro à fibra com o campo magnético	48
4 Resultados	50
4.1 Sinal do interferômetro FP a fibra	50

4.2 Caracterização do sistema FPI em relação à temperatura	51
4.3 Caracterização do sistema FPI em relação à deformação longitudinal (<i>strain</i>)	57
4.4 Caracterização do sistema (FPI) como sensor de campo magnético	61
5 Conclusões	65
Referências bibliográficas	67
Apêndice A- Sensor de índice de refração a fibra óptica com cavidade Fabry-Perot	72
Apêndice B - <i>Script</i> da simulação numérica desenvolvida para este trabalho	77
Apêndice C – Trabalhos	81

Lista de figuras

Figura 1-Desenho esquemático de uma fibra óptica e sua composição.	20
Figura 2-Desenho esquemático da geometria, perfil do índice de refração e da propagação dos raios numa MMF de índice degrau, numa SMF de índice degrau e numa MMF de índice gradual. Adaptado de [28].	21
Figura 3-Visão geral esquemática de um sensor a fibra óptica. Adaptado de [2].	22
Figura 4-Interferômetro de Fabry-Perot, onde E_i é o sinal incidente, E_r é o sinal refletido e E_t é o sinal transmitido.	24
Figura 5-Eschema das reflexões dentro de uma fibra óptica com cavidade FP, utilizando as notações para as componentes do campo [33,34].	27
Figura 6-Configurações básicas de um interferômetro de Fabry- Perot: a) intrínseco. Adaptado de [35]. b) extrínseco. Adaptado de [35].	29
Figura 7-Eschema de uma rede de Bragg iluminada por uma fonte de luz de banda larga espectral, juntamente com os sinais incidente, refletido e transmitido. A faixa de luz refletida é centrada no comprimento de onda de Bragg (λ_B). Adaptado de [36].	32
Figura 8-Efeito do campo magnético nos domínios magnéticos. Eles vão sendo alinhados com o aumento da intensidade do campo magnético aplicado [37, 40].	34
Figura 9- a) Ilustração da variação do comprimento da haste perante um campo magnético externo. b) Ilustração da razão entre a variação do comprimento e o comprimento da haste em função do campo magnético. Adaptado de [37].	35
Figura 10- As etapas da clivagem: a) Processo da retirada do revestimento da fibra, com o auxílio de um alicate de desencape. b) Fibra posicionada no clivador. c) Com um leve clique, a fibra é clivada.	43

Figura 11– a) Desenho esquemático da cavidade de ar produzida. b) Imagem obtida por um microscópio óptico de uma cavidade de ar de 150 μm .	44
Figura 12– Desenho esquemático da montagem experimental para a caracterização do sinal de uma fibra óptica com cavidade Fabry-Perot.	45
Figura 13– a) Desenho esquemático da medida de temperatura. b) Fotografia da medida de temperatura.	46
Figura 14– a) Desenho esquemático da medida de deformação longitudinal. b) Imagem do aparato experimental para a medida de variação da deformação longitudinal. OBS: a imagem da fibra contendo a cavidade de ar não ficou visível devido ao contraste com a mesa.	48
Figura 15– Desenho esquemático da medida de campo magnético.	49
Figura 16– a) Espectro de reflexão simulado de uma cavidade de 160 μm . b) Espectro de reflexão experimental de uma cavidade de 160 μm .	50
Figura 17– Gráfico típico da variação do sinal de uma cavidade FPI de 200 μm quando submetida às variações de temperatura, na faixa de 50°C a 200°C.	52
Figura 18– Gráfico típico da variação do sinal de duas redes de Bragg espacialmente próximas na mesma fibra, centradas em 1541nm e 1548nm, quando submetida às variações de temperatura, na faixa de 50°C a 200°C.	52
Figura 19– Dados experimentais obtidos conforme variação da temperatura para uma cavidade FPI de tamanho 25 μm . A sensibilidade à temperatura obtida para esta cavidade foi de 0,80pm/°C.	53
Figura 20– Resultado típico da variação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura para uma Rede de Bragg, com comprimento de onda inicial centrado em 1542nm. A sensibilidade à temperatura obtida para esta FBG foi de 12pm/°C.	53
Figura 21– Comparação entre a variação do comprimento de onda de uma cavidade FPI de 25 μm , com uma sensibilidade à temperatura de 0,8pm/°C (ajuste linear: reta azul) e a variação do	

comprimento de onda de Bragg centrado em 1542 nm, com uma sensibilidade à temperatura de 12pm/°C (ajuste linear: reta preta). Os símbolos em preto são os dados experimentais tomados para a FBG e os símbolos em azul, se referem à cavidade de ar.	56
Figura 22 – Dados experimentais obtidos conforme variação da temperatura para uma cavidade FPI de tamanho 60 µm, colada no TX e posicionada dentro do forno.	57
Figura 23– Gráfico típico do sinal refletido de uma cavidade FPI de 25 µm em função da deformação, variando de 0 µm a 1709 µm.	58
Figura 24– Deslocamento do comprimento de onda em função da deformação aplicada para cavidades de comprimentos 25 µm, 55 µm e 150 µm.	58
Figura 25– Deformação aplicada para cavidades de comprimentos 25 µm, 55 µm e 150 µm. A sensibilidade foi obtida através de um ajuste linear para as cavidades de 25 µm, 55 µm e 150 µm foi de 0, 0016 N/ µε, 0, 000183 N/ µε e 0, 00167 N/ µε, respectivamente.	61
Figura 26– Gráfico típico da variação do comprimento de onda, $\Delta\lambda$ para uma cavidade FPI de 40 µm e $\Delta\lambda^B$, para uma FBG centrada em 1523nm, em função do campo magnético aplicado.	62
Figura 27–Variação do comprimento de onda em função do campo magnético aplicado para cavidades de tamanhos 40µm, 60µm, 160µm e 648µm, e FBGs com comprimento de onda de Bragg centrados em 1523nm e em 1550nm.	63
Figura 28- Imagem obtida por um microscópio óptico da cavidade de ar utilizada na medida de índice de refração. A cavidade L1 possui um formato esférico enquanto a cavidade L2, formada entre o final da bolha e a ponta da fibra, possui um formato retangular.	73
Figura 29- Desenho esquemático da montagem experimental para a medida de índice de refração.	73
Figura 30– Espectro refletido de uma FPI quando imerso em diferentes líquidos de índice de refração. No detalhe, observa-se a mudança de fase do sinal refletido na FPI à medida que os valores dos índices de refração são maiores do que o da fibra (tipicamente 1.45).	74

Figura 31– Espectro refletido de uma FPI após ter sido imerso em diferentes líquidos de índice de refração e terem sido sujeitos ao procedimento de limpeza.	75
Figura 32- Visibilidade em função de cada índice de refração.	76

Lista de tabelas

Tabela 1– Resumo dos resultados obtidos para diferentes cavidades FPI quanto à sensibilidade à temperatura.	54
Tabela 2– Resumo dos resultados obtidos para diferentes redes de Bragg, quanto à sensibilidade à temperatura.	55
Tabela 3– Sensibilidade à deformação das cavidades FP para diferentes comprimentos de cavidades e para uma FBG.	59
Tabela 4 – Resumo das sensibilidades obtidas de cavidades FPI e FBGs à magnetostricção.	64

1

Introdução

As fibras ópticas têm sido utilizadas para sensoriamento remoto, monitorando uma determinada grandeza à distância. O uso de fibras ópticas se deve às suas diversas vantagens, como facilidade de manuseá-la, rapidez na resposta, sendo bastante estável, baixo peso, imune às interferências eletromagnéticas do meio externo, além de suportar temperaturas elevadas. Neste capítulo introdutório, é apresentado o estado da arte de sensores a fibras ópticas, o objetivo e a organização desta dissertação.

1.1.

Motivação e Objetivo

A investigação do desenvolvimento de um sensor de campo magnético teve como motivação a pesquisa que iniciamos de desenvolvimento de um sensor de índice de refração baseado em cavidades de ar em fibras ópticas, fabricadas pelo Dr. Fernando Fávero (Apêndice A). O resultado desta pesquisa foi apresentado no XXXVII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2014 (Apêndice C). Com esta pesquisa percebeu-se o potencial destas cavidades para aplicações em sensores.

O objetivo do presente trabalho é construir e caracterizar um sensor de campo magnético à fibra óptica com cavidade Fabry-Perot intrínseco, verificando sua resposta a determinados parâmetros físicos, especificamente, temperatura e deformação longitudinal, que serão utilizados para o desenvolvimento de sensor de campo magnético.

1.2.

Estado da arte de sensores a fibra óptica

Em 1978, a fotossensibilidade de fibras ópticas foi descoberta, durante experimentos utilizando fibra de sílica dopada com germânio e laser de íon de

argônio de radiação visível, por Ken Hill *et al.*, no Canadian Communication Research Center [1]. Foi observado que, como uma função do tempo, a luz incidida na fibra, era cada vez mais refletida. Este fato ocorreu devido a uma inscrição de uma grade de índice de refração dentro do núcleo da fibra óptica, como resultado do padrão de intensidade da onda, formada pela reflexão de 4%, devido à reflexão da luz numa extremidade da fibra e a luz incidente. A grade de índice de refração cresceu juntamente com o aumento da reflexão, ocasionando o aumento da intensidade da onda refletida. Esta variação de índice de refração dentro de uma fibra óptica ficou conhecida como rede de Bragg [1].

Lam e Garside, em 1981, reportaram e explicaram que o mecanismo de formação das redes de Bragg em fibras ópticas (FBG), como o reportado por Hill, era um processo de interação entre dois fótons devido à interação de luz ultravioleta (UV) com os defeitos abaixo da banda proibida da sílica formando o núcleo [2]. No experimento original, a radiação do laser, com comprimento de onda de 488 nm, foi refletida do final da fibra, de modo que se produzisse um padrão de onda estacionária. Já neste experimento, um fóton, com comprimento de onda de 244 nm, no ultravioleta, mostrou ser mais eficaz [3]. Mais tarde, Julian Stone demonstrou que pode ser induzida a modificação no índice de refração de fibras ópticas dopadas com germânio. A grade era introduzida no núcleo da fibra por uma radiação laser no espectro verde, refletindo seletivamente a luz no comprimento de onda pré-determinado [2,4].

Já em 1989, Meltz et al. [2], utilizaram a técnica holográfica transversal para escrever a FBG. A radiação, com comprimento de onda de 244 nm, foi dividida em duas e recombinada de modo que se formasse um padrão de interferência no núcleo da fibra. Este padrão de interferência induziu uma mudança permanente, e localizada, do índice de refração. Esta técnica facilitou o desenvolvimento de inscrição de redes de Bragg, pois qualquer comprimento poderia ser refletido [2].

As redes de Bragg tiveram um alto impacto no desenvolvimento do sensoriamento a fibra óptica, pois, a região onde a rede é gravada, é bastante sensível às perturbações externas, como temperatura, deformação longitudinal, entre outros [2]. Além disso, contam com as diversas vantagens inerentes às fibras ópticas. Estas são compactas, imunes a interferência eletromagnética e a radiação ionizante, possuem alta sensibilidade, grande largura de banda e são leves [5],

além da facilidade de implementar sensores multiplexados (envio de vários sinais, através de uma única fonte, de forma seqüencial no tempo) ou distribuídos [6].

Na busca de sensores a fibra óptica, investigou-se sensores baseados em interferômetros. Os primeiros sensores a fibra óptica baseados no interferômetro de Fabry-Perot começaram a ser desenvolvidos em 1980 [7]. Em 1988, um sensor Fabry-Perot foi desenvolvido para diferenciar o aumento e a queda de temperatura, além da direção da diferença de temperatura, como uma função do tempo [7].

Devido a estas vantagens inerentes às fibras ópticas, houve um grande interesse em desenvolver diversas formas de produzir e aplicar interferômetros Fabry-Perot para sensoriamento de vários parâmetros. Nesta investigação foram produzidas cavidades Fabry-Perot esféricas dentro de uma fibra óptica, através da emenda de uma fibra de cristal fotônico (PCF) e uma fibra padrão de telecomunicação (SMF), para sensoriamento de temperatura e deformação longitudinal [8]. Foram produzidas cavidades retangulares dentro de fibras ópticas, emendando uma fibra de cristal fotônico (PCF) e fibra padrão de telecomunicação para sensoriamento de pressão [9], respiração humana [10], índice de refração [11], temperatura [12].

As cavidades Fabry-Perot também foram construídas utilizando uma fibra oca emendada entre duas fibras padrão de telecomunicação (SMF) para sensoriamento de deformação longitudinal colado em um transdutor piezoelétrico, que gera energia elétrica conforme é submetido à compressão [13]. Também se pode produzir duas cavidades numa mesma fibra, através da emenda de uma fibra padrão de telecomunicação e uma fibra de índice gradual, para detecção de índice de refração [14].

A cavidade também pode ser construída através de duas redes de Bragg espacialmente próximas [15]; e através da emenda de duas fibras padrão de telecomunicação, com suas extremidades previamente embebidas num líquido de índice de refração comercial, para sensoriamento de deformação longitudinal [16].

Outro método é utilizar um laser de femtossegundo para criar uma pequena cavidade nas extremidades das fibras (SMF), para emendá-las e depois serem usadas em sensoriamento de índice de refração [17]; e emendar uma fibra padrão de telecomunicação (SMF) com uma fibra oca anular (HACF), para formar uma estrutura híbrida, aplicando em sensoriamento simultâneo de temperatura e

deformação longitudinal, onde uma cavidade é mais sensível à deformação longitudinal e a outra, à temperatura [18]; estes são alguns exemplos de sensores a fibras ópticas.

A primeira proposta para sensores de campo magnético, utilizando a propriedade da deformação longitudinal de uma fibra óptica em conjunto com um material magnetostrictivo, foi feita em 1980, por Yariv e Winsor [19]. Em 1983, Wilson e Jones construíram um sensor de campo magnético, utilizando um filme fino de uma liga amorfa magnetostrictiva ($Fe_{80}B_{20}$) sobre o revestimento da fibra [20]. Atualmente os sensores utilizam materiais magnetostrictivos, como o Terfenol-D (Térbio, Ferro, Naval Ordinance Laboratory, Disprósio), de alta sensibilidade ao campo magnético, e fibras ópticas contendo interferômetros [21, 22] ou redes de Bragg [23-27], para sensoriamento de campo magnético.

Nesta dissertação, é proposto um sensor de campo magnético, com baixa sensibilidade à temperatura e alta sensibilidade à deformação longitudinal. O sensor foi construído através da colagem das cavidades de ar em um material magnetostrictivo semelhante ao Terfenol-D, o TX ($Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,92}$).

As cavidades foram construídas através da emenda de uma fibra capilar entre dois pedaços de fibra padrão de telecomunicação, formando uma cavidade de ar retangular. Os tamanhos das cavidades variaram entre $25\ \mu m$ a $650\ \mu m$, e constituíram um sensor Fabry-Perot intrínseco (FPI) à fibra.

1.3.

Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O capítulo 2 trata dos principais aspectos teóricos deste trabalho, apresentando desde as características das fibras ópticas à definição de magnetostricção e o funcionamento do interferômetro Fabry-Perot.

O capítulo 3 aborda a metodologia utilizada neste trabalho, como a produção das cavidades Fabry-Perot e sua caracterização quanto aos parâmetros físicos.

No capítulo 4 encontram-se os resultados pertinentes às caracterizações, como sensibilidade à temperatura, deformação longitudinal e campo magnético e as respectivas análises.

Por fim, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões acerca deste trabalho.

2

Fundamentos teóricos de sensores a fibra óptica

Neste capítulo são abordados alguns aspectos teóricos importantes para o bom entendimento deste trabalho, como o interferômetro de Fabry-Perot e sensores a fibra óptica, bem como a descrição da magnetostricção.

2.1.

Fibras ópticas de vidro

A fibra óptica é um guia de onda cilíndrico e dielétrico, sendo composta por três partes: revestimento, casca e núcleo. O revestimento evita que a fibra possa sofrer algum tipo de dano. Em geral, a casca é feita de sílica (óxido de silício, SiO_2), e possui o índice de refração menor que o núcleo, que é feito de sílica, podendo ser dopado com germânio. A figura 1 ilustra a composição de uma fibra óptica. [28]

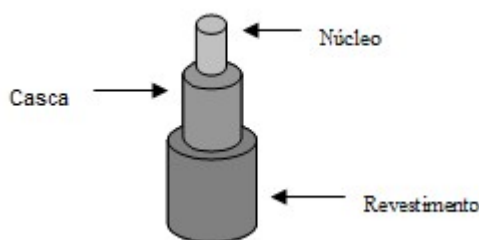


Figura 1-Desenho esquemático de uma fibra óptica e sua composição.

A luz é guiada dentro de uma fibra óptica devido ao princípio de reflexão interna total da luz. Este fenômeno acontece por causa da diferença entre os índices de refração da casca e do núcleo.

As fibras ópticas podem ser classificadas quanto ao modo de propagação (diversas possibilidades de propagação da luz no núcleo da fibra): monomodo ou multimodo. As fibras monomodo (*single-mode fiber*, SMF) suportam apenas um único modo de propagação, pois o diâmetro do núcleo é pequeno, variando entre

$8\ \mu\text{m}$ e $12\ \mu\text{m}$. Já as fibras multimodo (*multi-mode fiber*, MMF) possuem um maior diâmetro do núcleo, entre $50\ \mu\text{m}$ e $100\ \mu\text{m}$, suportando, então, vários modos de propagação. Neste tipo de fibra, os modos possuem diferentes caminhos ópticos, resultando em diferentes atrasos de um pulso que se propague na fibra. Este fenômeno é chamado de dispersão modal. [28]

As fibras também podem ser classificadas quanto ao índice de refração: índice degrau e índice gradual. Nas fibras de índice degrau, o índice de refração do núcleo é constante. Com isto, a refração do pulso ocorre somente entre o núcleo e a casca. Essa categoria engloba tanto a fibra monomodo quanto a multimodo. Nas fibras de índice gradual, o índice de refração do núcleo não é constante, reduzindo, aos poucos, do centro do núcleo até a casca. Logo, a refração ocorre gradualmente, conforme o pulso se aproxima da casca. Essa categoria engloba somente a fibra multimodo. A figura 2 ilustra essas classificações. [28]

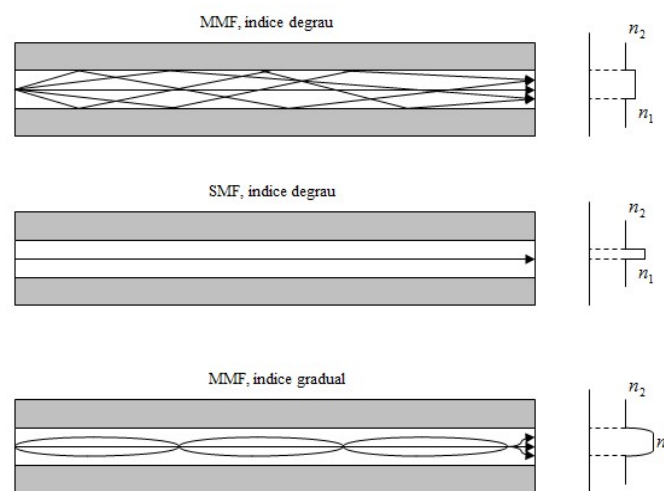


Figura 2-Desenho esquemático da geometria, perfil do índice de refração e da propagação dos raios numa MMF de índice degrau, numa SMF de índice degrau e numa MMF de índice gradual. Adaptado de [28].

Dois tipos de fibras ópticas foram utilizados neste trabalho para construir o interferômetro de Fabry-Perot. Uma delas é produzida pela empresa Corning, modelo SMF 28 padrão de telecomunicação, monomodo. Possui um diâmetro de $125\ \mu\text{m}$, sendo o diâmetro do núcleo de $8,2\ \mu\text{m}$, e com baixa atenuação em $1310\ \text{nm}$ e $1550\ \text{nm}$ [29]. Já a outra, é uma fibra capilar, ou seja, uma fibra óptica

sem núcleo, possuindo apenas revestimento e casca. Esta fibra possui $75\ \mu\text{m}$ de diâmetro interno e foi fornecida pela ACREO.

2.2.

Sensores a fibra óptica

A utilização das fibras ópticas para aplicações práticas começaram somente após o desenvolvimento de fibras ópticas de baixa perda, mesmo já tendo pesquisas que envolvessem as mesmas, iniciadas em 1960. Porém, os primeiros experimentos de sensoriamento com estas novas fibras foram demonstrados por volta da década de 70 [2]. Sensores a fibra óptica podem ser utilizados para monitorar estruturas grandes, como pontes, asas de avião e turbinas de ar, oleodutos, redes de transmissão elétrica etc.

Um sensor a fibra óptica é definido como um dispositivo que detecta a interação da luz guiada numa fibra óptica com um determinado parâmetro seja físico, químico ou biológico, de modo que se produza um sinal óptico modulado correlacionado a estes parâmetros e este seja processado nos devidos instrumentos. Com isto, os dados referentes à medição podem ser analisados [2]. A figura 3 mostra um desenho esquemático desta definição básica, onde uma fibra óptica guia a luz enviada por uma fonte de luz, para a região de interação com o parâmetro externo a ser analisado. A resposta da interação com a fibra pode emitir uma resposta de transmissão e/ou reflexão, sendo enviada para o sistema de detecção.

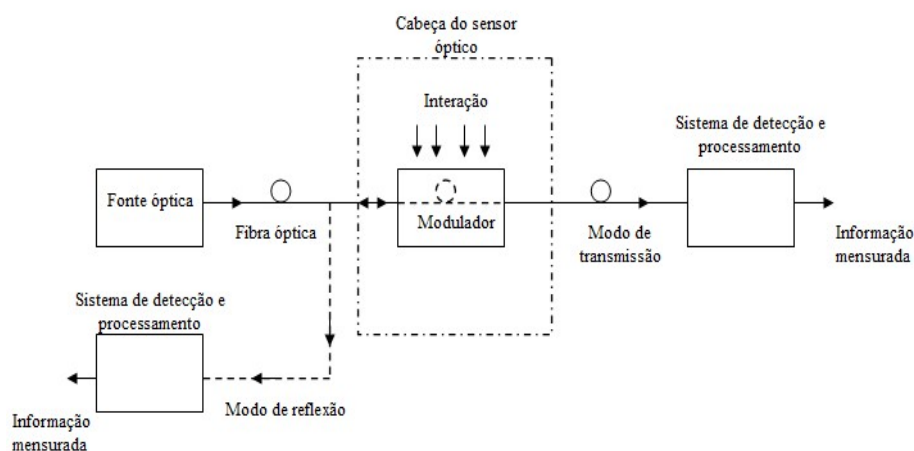


Figura 3-Visão geral esquemática de um sensor a fibra óptica. Adaptado de [2].

Atualmente, os sensores a fibra óptica podem ser classificados em quatro tipos, quanto ao princípio de funcionamento e quanto à distribuição espacial [2]:

- Sensor modulado por intensidade: a luz é guiada na fibra óptica, até que em um determinado ponto, a intensidade dela é modulada por algum meio como, por exemplo, uma curvatura (*optical fiber bending*). Espacialmente, ele é classificado como sensor de ponto, ou seja, em um determinado meio é distribuído ponto a ponto, de modo que para cada medida, há um canal de medição.
- Sensor modulado por fase (sensor interferométrico): se baseia na diferença de fase de uma luz coerente (ondas de mesma frequência e direção, com fase constante entre si), seja na mesma fibra ou em fibras diferentes. Ou seja, se um parâmetro externo produz uma perturbação numa fibra em relação à outra, há uma mudança de fase na luz. Esta mudança de fase é detectada por um interferômetro. Um exemplo é o interferômetro de Fabry-Perot. Espacialmente é classificado como sensor distribuído, pois mede um ou mais parâmetros juntamente com qualquer meio em que está instalado, sendo distribuído uniformemente.
- Sensor modulado por polarização (sensor polarimétrico): detecta mudanças no estado da polarização da luz, com o auxílio de um polarizador, um polarizador-analisador, orientado em 90° . Se a luz é orientada em 45° , por exemplo, em relação ao eixo principal de uma fibra óptica birrefringente, e algum parâmetro externo induzir uma perturbação nesta fibra, o ângulo de polarização será modificado. Esta modificação induz uma alteração da intensidade da luz, que será detectada pelos instrumentos. Espacialmente é dito como um sensor quase-distribuído, pois os parâmetros são mensurados através de pontos discretos (pontos bem específicos) distribuídos ao longo do meio.
- Sensor modulado por comprimento de onda (sensor espectrométrico): possui o comprimento de onda alterado na presença de fatores externos, como temperatura. Um exemplo são

os sensores de redes de Bragg. Espacialmente são ditos como sensores integrados, pois são integrados ao longo de um meio, obtendo-se uma única resposta.

Para este trabalho, foi utilizado o sensor interferométrico de Fabry-Perot e medidas comparativas com o sensor de rede de Bragg foram realizadas.

2.2.1. Interferômetro de Fabry-Perot

O interferômetro de Fabry-Perot, construído em 1897 pelos físicos Charles Fabry (1867-1945) e Alfred Pérot (1863-1925) [30], também conhecido como étalon de Fabry-Perot, é constituído, em geral, por dois espelhos paralelos, de refletâncias R_1 e R_2 , separados por uma distância L . Esta distância é denominada tamanho da cavidade e assim será chamada daqui por diante. Nesta cavidade, a luz sofre múltiplas reflexões, devido às diferenças de índices de refração, com isto ocorre a interferência entre os sinais refletidos e transmitidos, tendo, portanto, os espectros refletidos e transmitidos como função do tamanho da cavidade e do comprimento de onda da luz, e $R_i + T_i = 1$, com $i = 1, 2$.

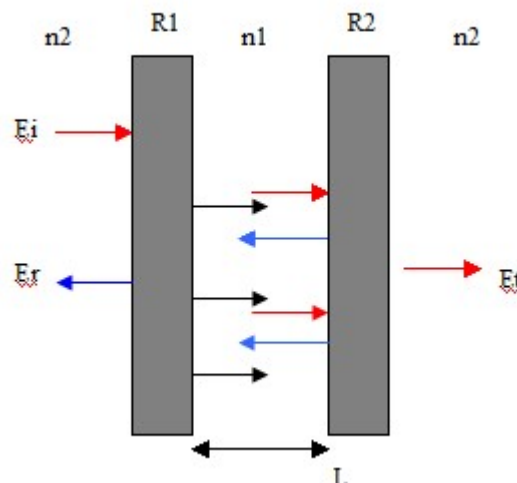


Figura 4-Interferômetro de Fabry-Perot, onde E_i é o sinal incidente, E_r é o sinal refletido e E_t é o sinal transmitido.

Neste interferômetro, a refletância e a transmitância são dadas por [31]:

$$R = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi} \quad (1)$$

$$T = \frac{T_1 T_2}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi} \quad (2)$$

onde R é a razão entre o espectro refletido e o espectro incidente, T é a razão entre o espectro transmitido e o espectro incidente e ϕ é a diferença de fase da propagação, dada por [31]:

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} = \frac{4\pi n f L}{c} \quad (3)$$

onde n é o índice de refração da cavidade, λ é o comprimento de onda da luz no espaço livre, f é a frequência óptica e c é a velocidade da luz.

A faixa espectral livre (em inglês, *free spectral range*, FSR) é definida como a separação entre dois picos de máximo adjacentes, e é dada por [32]:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2nL} \quad (4)$$

onde λ_0 é o comprimento de onda central do pico de transmissão, n é o índice de refração da cavidade e L é o tamanho desta.

2.2.2.

Método da matriz de transferência em cavidades FP

Nos sensores à fibra óptica com cavidades Fabry-Perot, há múltiplas reflexões da luz na cavidade. Estas reflexões geram interferências que podem ser calculadas através de um formalismo matricial, baseado em matrizes ópticas. Estas matrizes descrevem a transformação que a luz incidente sofre ao passar pelo sistema óptico, sendo uma técnica vantajosa, pois consegue decompor um sistema complexo em matrizes simples multiplicadas.

Por definição, a luz incide no sistema da esquerda para a direita. Assim, para uma camada j , a componente do campo que viaja para a direita é denotada por E_{rj} , enquanto que a componente que viaja para a esquerda, E_{lj} . Para os campos do lado esquerdo da camada, a notação não terá um *prime*; já os campos do lado direito, sim. Com isto, pode-se expressar as componentes dos campos na forma de uma matriz coluna: $E_j = \begin{pmatrix} E_{lj} \\ E_{rj} \end{pmatrix}$, para as componentes do lado esquerdo da

camada j , e para as componentes do lado direito, $E'_j = \begin{pmatrix} E'_{lj} \\ E'_{rj} \end{pmatrix}$ [33,34].

A propagação do campo, no sentido da esquerda para a direita, numa camada j , é dada por [33,34]:

$$E_j = L_j E'_j \quad (5)$$

onde L_j é a matriz de propagação numa mesma camada e é definida como [33,34]:

$$L_j = \begin{pmatrix} e^{-i\beta_j} & 0 \\ 0 & e^{i\beta_j} \end{pmatrix} \quad (6)$$

e $\beta_j = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_j d_j$ para incidência normal.

O campo de transição entre duas interfaces, por exemplo, i - j , é dado por [33,34]:

$$E'_i = H_{ij} E_j \quad (7)$$

onde H_{ij} é a matriz de interface, definida como [33,34]:

$$H_{ij} = \frac{1}{\tau_{ij}} \begin{pmatrix} 1 & \rho_{ij} \\ \rho_{ij} & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

em que ρ_{ij} e τ_{ij} são os coeficientes de reflexão e transmissão da interface i - j , respectivamente.

Então,

$$E'_i = H_{ij} E_j \quad (9)$$

Substituindo a equação (5) na equação (9),

$$E'_i = H_{ij} L_j E'_j \quad (10)$$

Substituindo a equação (7) em (10),

$$E'_i = H_{ij} L_j H_{jk} E_k \quad (11)$$

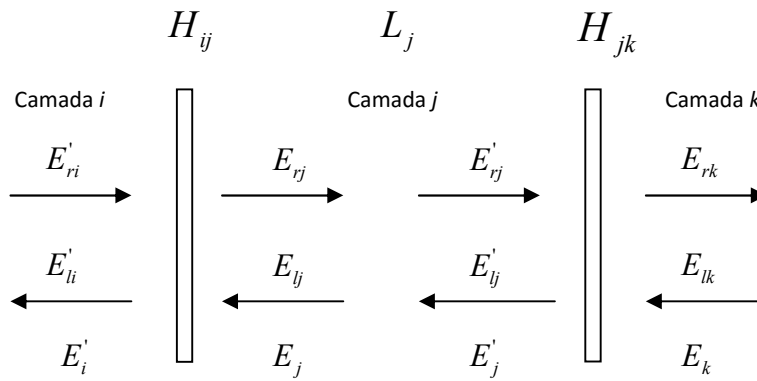


Figura 5-Esquema das reflexões dentro de uma fibra óptica com cavidade FP, utilizando as notações para as componentes do campo [33,34].

Reescrevendo a equação (11), pode-se obter a relação entre os campos do meio inicial e do meio final (N), de um modo simplificado, através da relação [33,34]:

$$E'_i = S_{1N} E_N \quad (12)$$

onde S_{1N} é a matriz de empilhamento que contém todos os efeitos das múltiplas reflexões nas camadas e é dada por [33,34]:

$$S_{1N} = H_{12} L_2 \dots L_{N-1} H_{N-1,N} \quad (13)$$

Se conhecidos os valores de ρ_{ij} , τ_{ij} e β , a matriz de empilhamento pode ser calculada. Escrevendo a equação (12) em forma matricial, tem-se que [33,34]:

$$\begin{pmatrix} E'_{l1} \\ E'_{r1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E_{rN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{12}E_{rN} \\ S_{22}E_{rN} \end{pmatrix} \quad (14)$$

Com isto, a refletância e a transmitância são dadas por:

$$R = |\rho|^2 = \left| \frac{S_{12}}{S_{22}} \right|^2 \quad \text{e} \quad T = \frac{n_N}{n_1} |\tau|^2 = \frac{n_N}{n_1} \left| \frac{1}{S_{22}} \right|^2 \quad (15)$$

Para o caso de uma única cavidade de ar, com índice de refração $n_1 = 1$, entre fibras, de índice de refração $n_2 = 1,45$, as matrizes de empilhamento, interface e propagação podem ser expressas como [33]:

$$S = H_{12} L_2 H_{21} \quad (16)$$

$$H_{12} = \frac{1}{\tau_{12}} \begin{pmatrix} 1 & \rho_{12} \\ \rho_{12} & 1 \end{pmatrix}, \quad H_{21} = \frac{1}{\tau_{12}} \begin{pmatrix} 1 & \rho_{12} \\ \rho_{12} & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$L_2 = \begin{pmatrix} e^{-i\beta} & 0 \\ 0 & e^{i\beta} \end{pmatrix} \quad (18)$$

onde β , que é a mudança de fase da camada, é dado por $\beta = \frac{2\pi d n_2}{\lambda_0} + \varphi'_0$, onde

d é o tamanho da cavidade e φ'_0 é a mudança de fase de acoplamento do desalinhamento.

Então, substituindo as equações (17) e (18) na equação (16), tem-se que:

$$S = \frac{1}{\tau_{12}\tau_{21}} \begin{pmatrix} e^{-i\beta} + \rho_{12}\rho_{21}e^{i\beta} & \rho_{21}e^{-i\beta} + \rho_{12}e^{i\beta} \\ \rho_{12}e^{-i\beta} + \rho_{21}e^{i\beta} & \rho_{12}\rho_{21}e^{-i\beta} + e^{i\beta} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Com isto, pode-se escrever a refletância e a transmitância como:

$$R = \left| \frac{S_{12}}{S_{22}} \right|^2 = \left| \frac{\rho_{21}e^{-i\beta} + \rho_{12}e^{i\beta}}{\rho_{12}\rho_{21}e^{-i\beta} + e^{i\beta}} \right|^2$$

$$T = \frac{n_2}{n_1} \left| \frac{1}{S_{22}} \right|^2 = \frac{n_2}{n_1} \left| \frac{1}{\rho_{12}\rho_{21}e^{-i\beta} + e^{i\beta}} \right|^2 \quad (20)$$

Logo,

$$R = \frac{\rho_{21}^2 + \rho_{12}^2 + 2\rho_{21}\rho_{12}\cos 2\beta}{1 + \rho_{12}^2\rho_{21}^2 + 2\rho_{12}\rho_{21}\cos 2\beta}$$

$$T = \frac{n_2}{n_1} \frac{1}{1 + \rho_{12}^2\rho_{21}^2 + 2\rho_{12}\rho_{21}\cos 2\beta} \quad (21)$$

Estes cálculos foram utilizados para desenvolver uma simulação numérica a fim de investigar o sinal teórico das cavidades de ar deste trabalho.

2.2.3.

Sensores a fibra óptica com interferômetro Fabry-Perot

Por volta dos anos 80, os primeiros trabalhos de fibras ópticas com cavidades Fabry-Perot foram divulgados [35]. Nesta mesma época, essas cavidades começaram a ter diversas aplicações como sensoriamento de deformação longitudinal (*strain*), temperatura, entre outros [35], pois a fase da luz entre as superfícies refletoras é muito sensível a fatores externos, podendo ser alterada. Desde então, este sensor foi pesquisado e desenvolvido, além de ter sido comercializado, passando pela década de 90 [35].

Há dois tipos de sensores Fabry-Perot: extrínseco ou intrínseco à fibra. O interferômetro extrínseco caracteriza-se por não haver conexão permanente entre fibra óptica e cavidade, enquanto que no interferômetro intrínseco existe uma conexão permanente entre fibra e cavidade, conhecida como emenda (em inglês, *Fiber Splices*) (ver figura 6).

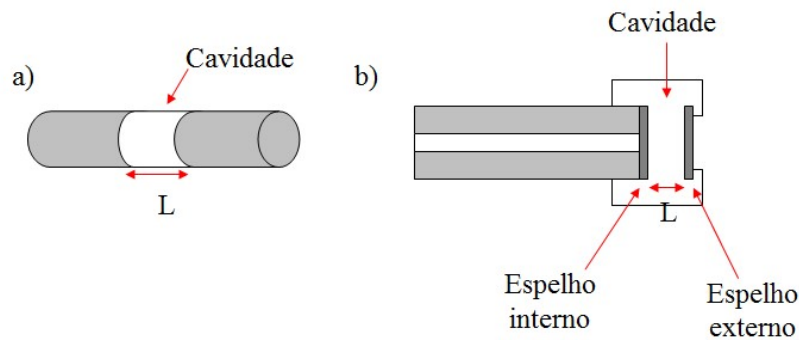


Figura 6-Configurações básicas de um interferômetro de Fabry- Perot: a) intrínseco. Adaptado de [35]. b) extrínseco. Adaptado de [35].

Os interferômetros extrínsecos podem ser construídos de diferentes formas, tais como [2]:

- Utilizando um espelho perto da extremidade clivada da fibra, de modo que a cavidade de ar fique posicionada entre os espelhos interno e externo, de acordo com o tamanho L desejado.
- Utilizando um filme de um material sólido transparente numa extremidade da fibra, de modo que a cavidade seja formada pelas extremidades da fibra e do filme.
- Formando uma cavidade de ar entre as extremidades de uma fibra monomodo e uma multimodo, sendo estas separadas por um tamanho L desejado, posicionadas dentro de um tubo capilar.

Já os interferômetros intrínsecos podem ser construídos de diferentes formas, como [2,35]:

- Por duas redes de Bragg espacialmente separadas por uma distância L na mesma fibra.
- Emendando as extremidades de duas fibras monomodo em uma fibra capilar, de modo que a cavidade de ar fique entre estas extremidades.

Sensores FPI tem sido aplicados em diferentes áreas, como: monitoramento de motor a jato de aeronaves, monitoramento de estruturas, aplicações sísmicas e sonares, oleodutos, poços de petróleo, biomecânica, giroscópios de fibra óptica para navegação, sensoriamento químico e biológico etc, baseados na medição de temperatura, deformação longitudinal (*strain*), pressão, campo magnético, umidade, vibração etc [7].

Ao analisar a equação (1), pode-se ver que o espectro refletido depende da diferença de fase da propagação ϕ . Esta diferença de fase é influenciada por diferentes parâmetros físicos, dados por [7]:

$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi_L + \Delta\phi_f + \Delta\phi_T \quad (22)$$

onde ϕ_0 é a diferença de fase inicial e $\Delta\phi$ são as diferenças de fase relativas à: $\Delta\phi_L$ variação do comprimento da cavidade, $\Delta\phi_f$ variação da frequência óptica e $\Delta\phi_T$ variação da temperatura.

As diferenças de fase devido às variações do comprimento da cavidade ΔL , da frequência óptica Δf e da temperatura ΔT são dadas por [7]:

$$\Delta\phi_L = \frac{4\pi}{\lambda}(n\Delta L + L\Delta n) \quad (23)$$

$$\Delta\phi_f = \frac{4\pi L}{c}\left(n + f \frac{\Delta n}{\Delta f}\right) \quad (24)$$

$$\Delta\phi_T = \frac{4\pi}{\lambda}\left(L \frac{\Delta f}{\Delta T} + n \frac{\Delta L}{\Delta T}\right) \quad (25)$$

onde Δn é a variação do índice de refração.

Portanto, a diferença de fase $\Delta\phi$ é o principal parâmetro para que o sensoriamento de temperatura, deformação longitudinal, entre outras, sejam mensurados em sensores a fibra óptica com interferômetro Fabry-Perot [7].

2.2.4.

Sensores a redes de Bragg

As primeiras redes de Bragg foram comercializadas em 1995 pela 3M e Photonetics e, desde 2000, mais de 20 empresas trabalham na comercialização delas. Utilizá-las como sensores possui diversas vantagens como, possui um tamanho pequeno, são leves e imunes às interferências eletromagnéticas, podem ser posicionadas em áreas de risco, não dependem da distância (conexões maiores que 50km são possíveis) e são resistentes à corrosões, além de serem fáceis de instalá-las e manuseá-las [1].

Uma rede de Bragg em uma fibra óptica (FBG) é uma estrutura que possui uma modulação local e periódica do índice de refração da fibra. Funciona como um filtro óptico, onde a luz é transmitida, exceto num determinado comprimento de onda, que é refletido devido a esta alteração. Este comprimento de onda é

denominado de comprimento de onda de Bragg, λ_B , no qual ocorre essa reflexão, e é dado por [2, 35]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (26)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra e Λ é a periodicidade espacial da modulação do índice de refração. A figura 7 ilustra esse processo.

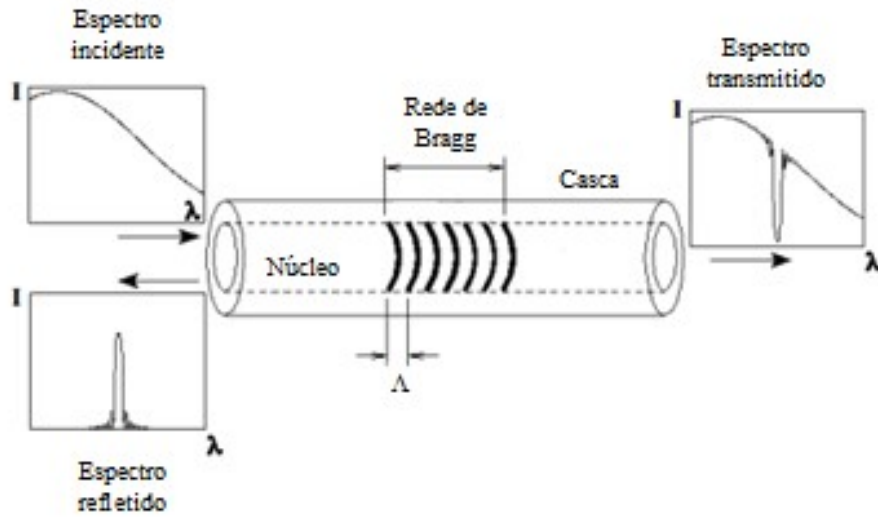


Figura 7-Esquema de uma rede de Bragg iluminada por uma fonte de luz de banda larga espectral, juntamente com os sinais incidente, refletido e transmitido. A faixa de luz refletida é centrada no comprimento de onda de Bragg (λ_B). Adaptado de [36].

O comprimento de onda de Bragg pode mudar devido a fatores externos, como a variação da temperatura e a deformação longitudinal (*strain*, ϵ). Nestes dois casos, o índice de refração da fibra muda devido aos efeitos termo-óptico e foto-elástico, em que ambos provocam o deslocamento do comprimento de onda em questão. Estas variações na rede podem ser descritos matematicamente como [2]:

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial L}\right)\Delta L + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T \quad (27)$$

onde ΔL é a variação do comprimento da fibra e ΔT é a variação da temperatura .

Para um sensoriamento de temperatura, sem variação de comprimento longitudinal da fibra ($\Delta L = 0$), o primeiro termo da equação 27 anula-se, restando, apenas, o segundo termo. Assim, reescrevendo-o em função do coeficiente de expansão térmica da fibra (α_Λ) e do coeficiente termo-elástico do núcleo (α_n), a variação do comprimento de onda torna-se um transdutor de temperatura, dado por [2]:

$$\Delta\lambda = \lambda_B(\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T \quad (28)$$

E para um sensoriamento de deformação longitudinal, sem variação de temperatura ($\Delta T = 0$), o segundo termo da equação 27 anula-se. Este termo restante corresponde à variação da periodicidade da rede e a uma mudança do índice de refração, podendo ser reescrito em termos da deformação e da constante elasto-óptica, de modo que seja dado por [2]:

$$\Delta\lambda = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon \quad (29)$$

sendo que

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (30)$$

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (31)$$

onde ε é o *longitudinal strain*, p_e é a constante elasto-óptica, p_{11} e p_{12} são componentes do tensor elasto-óptico e ν é o coeficiente de Poisson do material da fibra óptica. O coeficiente de Poisson mede a deformação transversal de um material em relação à direção longitudinal da aplicação do estresse.

Por exemplo, para saber o valor teórico da sensibilidade de uma rede centrada em $\lambda_B = 1550$ nm numa fibra óptica de germano-silicato, em relação à variação da temperatura e da deformação longitudinal, basta substituir nas equações 28, 29 e 31 os seguintes valores: $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$, $n_{eff} = 1,482$, $\alpha_\Lambda \approx 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_n \approx 8,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [2]. Com isto, a sensibilidade à temperatura desta rede de Bragg é de $14,2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ e, quando a mesma é submetida a uma deformação de $1 \text{ } \mu\text{m}$, o deslocamento do comprimento

de onda de Bragg é de $1,2 \text{ pm}$. Portanto, através da expressão da equação 27, pode-se perceber que é possível usar redes de Bragg como sensores, onde a luz refletida por estas é mensurada por um sistema detector, pois esta relaciona a variação do comprimento de onda com o parâmetro a ser observado [2].

2.3. Magnetostrição

A magnetostrição foi descoberta em 1842 por James Joule (1818-1889), quando conseguiu relacionar a deformação de um material com o campo magnético aplicado [37]. É um fenômeno que ocorre em materiais ferromagnéticos, onde há uma mudança em sua magnetização, sob a aplicação de um campo magnético, até que atinjam seu ponto de saturação magnetostriativo λ . Ou seja, um material magnetostriativo faz a conversão da energia magnética em energia mecânica. A temperatura também pode influenciar na mudança da magnetização destes materiais [38].

Cada material ferromagnético é dividido internamente por diversas regiões, denominadas domínios magnéticos. Quando há a aplicação de um campo magnético, estes domínios tendem a alinhar-se conforme a direção da aplicação, configurando, assim, a anisotropia magnética [38,39].

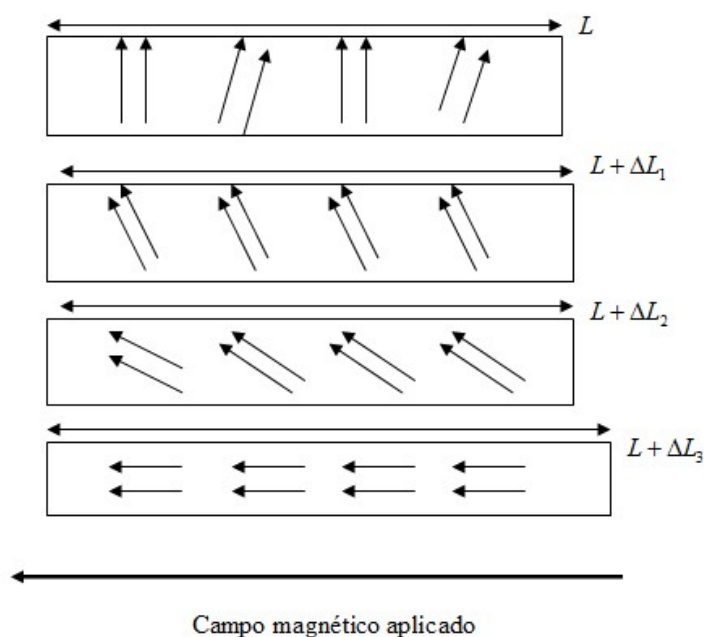


Figura 8-Efeito do campo magnético nos domínios magnéticos. Eles vão sendo alinhados com o aumento da intensidade do campo magnético aplicado [37, 40].

A magnetostricção será positiva caso o material se expanda na presença de um campo magnético. Caso contrário, ela será negativa. É importante saber que nos dois casos não haverá alteração do volume, porque há a produção de uma deformação de sinal contrário na direção perpendicular à deformação provocada [37,40].

A figura 9, letra (a), demonstra o efeito magnetostrictivo. Nela há uma haste de material magnético enrolado com uma espiral de fios por onde passa uma corrente elétrica. Esta haste possui um comprimento L , e assim que um campo magnético é produzido, há uma variação ΔL no seu comprimento. Esta variação ΔL e o comprimento inicial L são relacionados através da constante de magnetostricção (λ), que é dada por: $\lambda = \frac{\Delta L}{L}$. A figura 9, letra (b), ilustra a razão

$\lambda = \frac{\Delta L}{L}$ em função do campo magnético aplicado, além de mostrar que há uma saturação deste efeito para campos magnéticos mais intensos [37].

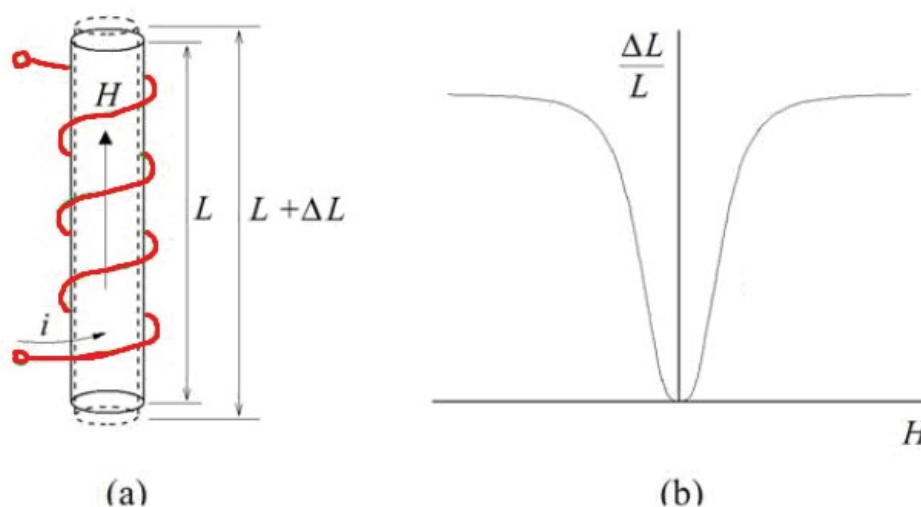


Figura 9- a) Ilustração da variação do comprimento da haste perante um campo magnético externo. b) Ilustração da razão entre a variação do comprimento e o comprimento da haste em função do campo magnético. Adaptado de [37].

Existem outros efeitos magnetostrictivos além do descoberto por Joule, como o efeito Villari, que é um efeito recíproco, e que consiste na aplicação de deformações mecânicas ao material, fazendo com que sua magnetização seja modificada [37-40].

2.3.1.

Sensores baseados em materiais magnetostrictivos

As primeiras utilizações de materiais magnetostrictivos ocorreram durante a primeira metade do século XX, e incluem hidrofones, sonar de varredura, torquímetros etc., desenvolvidos com o níquel e outros materiais magnetostrictivos de baixa magnetostricção. Já os materiais com magnetostricção gigantes começaram a ser utilizados na década de 60, quando foi descoberto que terras raras apresentavam uma alta magnetostricção. Quando materiais baseados em terras raras são acrescidos de ferro, o seu deslocamento magnetostrictivo aumenta. Isto foi descoberto em 1972, por Clark [37,38].

O terfenol-D (Térbio, Ferro, Naval Ordinance Laboratory, Disprósio), de fórmula $Tb_xD_{y1-x}Fe_2$, onde $0,25 < x < 0,3$, é um material magnetostrictivo, desenvolvido por Clark em 1975. É classificado como um material de magnetostricção gigante, pois sua deformação pode chegar a níveis da ordem de 1600×10^{-6} , para campos magnéticos de intensidade de $160kA/m$ ou $0,2T$ [37]. Atualmente, existem materiais semelhantes ao terfenol-D, como o utilizado nesta dissertação, o TX ($Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,92}$), comercializado pela empresa Gansu Ltd.

Os sensores baseados em materiais magnetostrictivos podem ser divididos em três grupos: sensores passivos, ativos e combinados. Os sensores passivos utilizam-se da capacidade de modificação do material perante parâmetros externos, como o efeito Villari, para medir força, pressão, vibração, fluxo etc. Os sensores ativos utilizam-se da excitação interna do material magnetostrictivo para facilitar uma medição de algum parâmetro externo conforme a modificação desse, como a medição de temperatura em função da modificação da permeabilidade do material magnetostrictivo, sensor de torque etc. E, por último, os sensores combinados utilizam o material magnetostrictivo como um elemento ativo para modificar ou alterar um outro material, auxiliando na medida de interessante. Por exemplo, um sensor óptico de campo magnético é baseado na magnetostricção deste tipo de material. Este, ao ser posicionado em um campo magnético, tem seu comprimento alterado. Logo, isto altera o comprimento do percurso óptico de um sensor a fibra óptica. Sensores combinados podem medir choque, tensão, estresse, corrente etc [41].

O sensor de campo magnético proposto nesse estudo é do tipo combinado. A cavidade de ar é colada num material magnetostrictivo, o TX, de forma que este, ao ser posicionado num campo magnético, tem seu comprimento alterado, modificando o percurso óptico da cavidade.

2.4.

Análise da resposta das cavidades de ar e redes de Bragg, para deformação longitudinal e temperatura

As redes de Bragg e as cavidades de ar respondem de formas diferentes quando são submetidos a deformações longitudinais e variações de temperaturas. Nesta seção é discutida e analisada a diferença de sensibilidade com a deformação longitudinal e a temperatura para as Redes de Bragg e as cavidades de ar[42].

2.4.1

Deformação longitudinal (*strain*) e temperatura: cavidades de ar

Em uma cavidade Fabry-Perot de tamanho L , a quantidade de modos que podem ocorrer é dada por:

$$L = m \frac{\lambda_0}{2n} \quad (32)$$

onde m é um número inteiro, λ_0 é o comprimento de onda central do pico de transmissão e n é o índice de refração da cavidade.

Rearranjando os termos, tem-se que:

$$\lambda_0 = \frac{2nL}{m} \quad (33)$$

Com isto, qualquer variação no tamanho da cavidade ou índice de refração, resulta em:

$$\Delta\lambda_0 = \frac{2}{m} \Delta(nL) \quad (34)$$

Dividindo a equação (34) pela equação (33), tem-se que:

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta(nL)}{nL} \quad (35)$$

Substituindo o valor do índice de refração do ar, $n = 1$, em (35), tem-se que:

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta L}{L} = \varepsilon \quad (36)$$

Logo, para um determinado comprimento de onda λ_0 , espera-se que a variação do comprimento de onda seja igual à deformação longitudinal, sendo independente de sua origem.

Quanto à temperatura, pode-se especificar a variação do comprimento de onda como:

$$\Delta\lambda_0 = \lambda_0 \frac{\Delta L}{L} = \lambda_0 \frac{\alpha L \Delta T}{L} = \lambda_0 \alpha \Delta T \quad (37)$$

Então, quando a temperatura induz uma mudança no comprimento de onda, ela é independente do tamanho da cavidade.

2.4.2

Deformação longitudinal (*strain*) e temperatura: fibras com redes de Bragg

A física para fibras com redes de Bragg é muito semelhante ao item anterior, já que as redes são muito semelhantes às cavidades de Fabry-Perot. Para este caso, há somente um modo fundamental ($m = 1$),

$$\lambda_0 = 2nL \quad (38)$$

onde λ_0 é o comprimento de onda central do pico de transmissão, n é o índice de refração da cavidade e L é o comprimento da rede de Bragg.

Novamente, tem-se que:

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta(nL)}{nL} \quad (39)$$

mas, nesse caso, $n \neq 1$. Logo,

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n}{n} \quad (40)$$

$$\Delta\lambda_0 = \lambda_0 \left(\frac{\alpha L \Delta T}{L} + \frac{\Delta n}{n} \right) \quad (41)$$

$$\Delta\lambda_0 = \lambda_0 \left[\alpha \Delta T + \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T \right) \right] \quad (42)$$

$$\Delta\lambda_0 = \left(\lambda_0 \alpha + \lambda_0 \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right) \Delta T + \left(\lambda_0 \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial L} \right) \Delta L \quad (43)$$

onde $\lambda_0 \alpha$ é o coeficiente de expansão térmica da fibra, $\frac{\partial n}{\partial T}$ é o coeficiente termo-óptico e $\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial L}$ é o coeficiente elasto-óptico.

Com isto, para as redes de Bragg, não basta apenas se preocupar com a deformação longitudinal, mas deve-se levar em conta os efeitos termo-óptico e elasto-óptico.

2.4.3

Deformação longitudinal (*strain*) e temperatura: comparação entre fibras com redes de Bragg e com cavidades Fabry-Perot

A diferença na resposta quanto à temperatura entre fibras com cavidades Fabry-Perot e redes de Bragg, pode ser entendida ao compararmos as equações (37) e (40). Para as cavidades Fabry-Perot, foi visto que:

$$\Delta\lambda_0^{F-P} = \lambda_0 \alpha \Delta T \quad (44)$$

Reescrevendo a equação (40), para facilitar a comparação, tem-se que:

$$\Delta\lambda_0^{FBG} = \lambda_0 \left[\alpha \Delta T + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T \right] \approx \lambda_0 \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T \quad (45)$$

onde verifica-se que a maior contribuição é do efeito termo-óptico ($\frac{\partial n}{\partial T}$), e que este possui uma magnitude maior que α .

Já o *strain*, inclusive o induzido pelo campo magnético, é maior nas cavidades Fabry-Perot, pois em fibras com redes de Bragg, o coeficiente de deformação óptica contribui de maneira negativa. Partindo da equação (40), tem-se que:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\lambda_0^{FBG}}{\lambda_0^{FBG}} &= \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta L}{L} \left(1 + \frac{\Delta n}{n} \frac{1}{\varepsilon}\right) = \frac{\Delta L}{L} \left(1 + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \varepsilon} \varepsilon \frac{1}{\varepsilon}\right) \\ \frac{\Delta\lambda_0^{FBG}}{\lambda_0^{FBG}} &= \frac{\Delta L}{L} \left(1 - \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \varepsilon}\right) = \varepsilon(1-p)\end{aligned}\quad (46)$$

onde p é o coeficiente elasto-óptico.

Para uma fibra dopada com germânio, $p \cong 0,22$, espera-se que a relação seja de:

$$\frac{\Delta\lambda^{F-P}}{\Delta\lambda^{FBG}} \cong 1,3 \quad (47)$$

Outro método de comparação é através da relação do módulo de Young. Infere-se que o aumento da sensibilidade seja originada na resposta elástica da cavidade. Embora o módulo de rigidez das paredes da cavidade seja aproximadamente o mesmo que o do núcleo da fibra, a área da secção transversal das paredes da cavidade A^C é significativamente menor que a área da secção transversal A^B da fibra. Com isto, a cavidade sofrerá uma deformação significativamente maior. Através do balanceamento da força, tem-se que:

$$\sigma^B A^B = \sigma^C A^C \quad (48)$$

onde σ^B e σ^C são as tensões, medidas em pascal, nas paredes do núcleo da fibra e da cavidade, respectivamente. Através do módulo de Young, a tensão é relacionada com o estresse. Então, substituindo o módulo de Young nas tensões da equação (48), tem-se que [43]:

$$\varepsilon^C = \frac{Y^B A^B}{Y^C A^C} \varepsilon = \frac{\Delta \lambda_0^C}{\lambda_0^C} \quad (49)$$

onde Y^B e Y^C são os módulos de Young de uma fibra padrão sem núcleo, de valor 69,22 GPa [44] e da sílica 73,1 GPa [45], respectivamente. Considerando o diâmetro externo da fibra, $125 \mu m$, e do diâmetro da cavidade de ar, $75 \mu m$, e substituindo na equação (49), estima-se que

$$\varepsilon^C = 1,48 \varepsilon \quad (50)$$

Ou seja, espera-se que a deformação longitudinal das fibras com cavidades de ar, seja maior que as fibras com redes de Bragg.

3

Metodologia e instrumentação para sensores a fibra óptica

Neste capítulo descreve-se a montagem do sensor Fabry-Perot intrínseco utilizado neste trabalho, além da descrição dos métodos utilizados para caracterizá-lo.

3.1.

Construção das cavidades Fabry-Perot a fibra

Para que se tenha um bom acoplamento da luz na fibra óptica, é necessário clivá-la. Este processo consiste em cortar uma extremidade da fibra, de modo que fique plana. Para isto, retira-se o revestimento da extremidade da fibra, em torno de 10 cm, com o auxílio de um alicate. Depois, com um lenço embebido em álcool isopropílico, se limpa a parte sem revestimento, de modo a se retirar as sujeiras. Com a fibra limpa, pode-se colocá-la no clivador – foi utilizado o modelo *High Precision Cleaver CT30 Fujikura* - de modo que a fibra esteja fixada neste e a região sem revestimento fique exposta para ser clivada. Após isto, com um leve clique do clivador, espera-se que no ponto onde a fibra foi clivada, a fibra esteja plana. Com o auxílio da câmera contida no equipamento para emenda de fibra *Fujikura FSM-30S Fusion Splicer*, verifica-se se a fibra foi clivada corretamente. Caso contrário, repete-se o processo. A figura 10 ilustra esse processo.

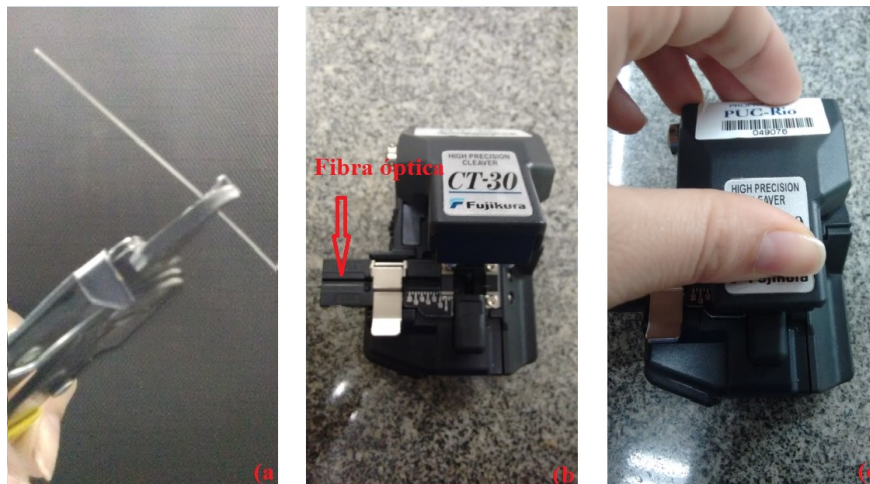


Figura 10- As etapas da clivagem: a) Processo da retirada do revestimento da fibra, com o auxílio de um alicate de desencape. b) Fibra posicionada no clivador. c) Com um leve clique, a fibra é clivada.

Após serem clivadas as extremidades das fibras estão prontas para serem utilizadas na fabricação da cavidade Fabry-Perot.

As cavidades Fabry-Perot utilizadas neste trabalho foram feitas pela doutora Greice Kelly Costa (LIF/COPPE/UFRJ), da seguinte forma: um pequeno pedaço de fibra capilar (fibra sem núcleo, com diâmetro interno de $75\ \mu\text{m}$ e externo de $125\ \mu\text{m}$) foi emendada entre dois pedaços de fibra óptica monomodo padrão (SMF28, com diâmetro de $125\ \mu\text{m}$) de telecomunicação, tendo, como resultado, cavidades de ar retangulares. Ou seja, inicialmente cliva-se uma extremidade de uma fibra óptica SMF28 e uma extremidade de uma fibra capilar (fornecida pela empresa ACREO-Suécia). Após isto, emendam-se as duas fibras. Com o auxílio de um microscópio, determina-se o ponto onde poderá ser clivado. Então, emenda-se essa outra extremidade em outra fibra óptica SMF28 já clivada. As fibras foram emendadas com o auxílio de uma máquina de emenda de fibra óptica, *Fujikura FSM-30S Fusion Splicer* e o comprimento das cavidades foram medidos por inspeção óptica com o auxílio de um microscópio óptico *Carl Zeiss, modelo Axio Scope A1*. Além disso, o tamanho da cavidade produzida pode ser estimado utilizando a equação (4).

Ao observar a figura 11, verifica-se que a cavidade de ar é homogênea, apresentando uma nítida interface com a fibra monomodo.

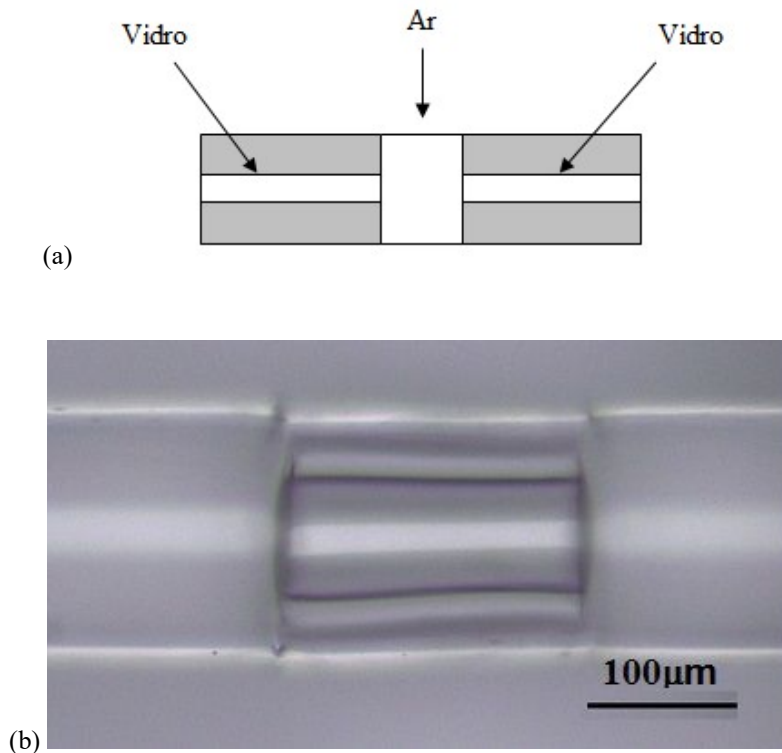


Figura 11– a) Desenho esquemático da cavidade de ar produzida. b) Imagem obtida por um microscópio óptico de uma cavidade de ar de 150 μm .

Foram produzidas cavidades com tamanhos variando entre 25 μm e 650 μm . Assim, pode-se caracterizá-las quanto ao espectro de reflexão característico de cada uma.

3.2. Caracterização das cavidades Fabry-Perot a fibra

Com as cavidades prontas, foi necessário investigar o espectro de reflexão característico das cavidades de ar. Para isso, as fibras contendo as cavidades Fabry-Perot foram emendadas em conectores a fibra óptica, e acopladas um interrogador óptico, o *Micronoptics SM125*. Ele incide luz na fibra com a cavidade de ar e mede o sinal refletido. Este aparelho possui uma precisão do comprimento de onda de 10 pm e um alcance espectral que vai de 1520 nm a 1580 nm.

Para confirmar se o espectro obtido experimentalmente estava de acordo com a teoria, uma simulação numérica foi desenvolvida, inicialmente pelo técnico João Manuel e pelo aluno de iniciação científica do Laboratório de Optoeletrônica, Rodrigo Neumann, e posteriormente adaptado pela autora deste

trabalho, baseada no método da matriz de transferência descrita no capítulo anterior. O *script* desta simulação encontra-se no Apêndice B.



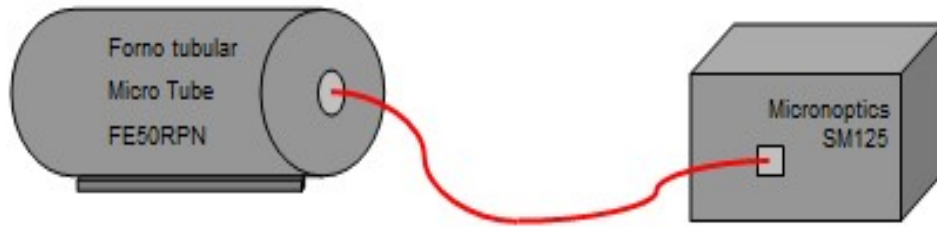
Figura 12– Desenho esquemático da montagem experimental para a caracterização do sinal de uma fibra óptica com cavidade Fabry-Perot.

Após análise dos espectros experimentais e teóricos, e a verificação da concordância entre eles, pode-se caracterizar a resposta das fibras com as cavidades FP quanto à variação de temperatura, deformação longitudinal e aplicação de campo magnético externo. Os resultados obtidos encontram-se na seção 4.1

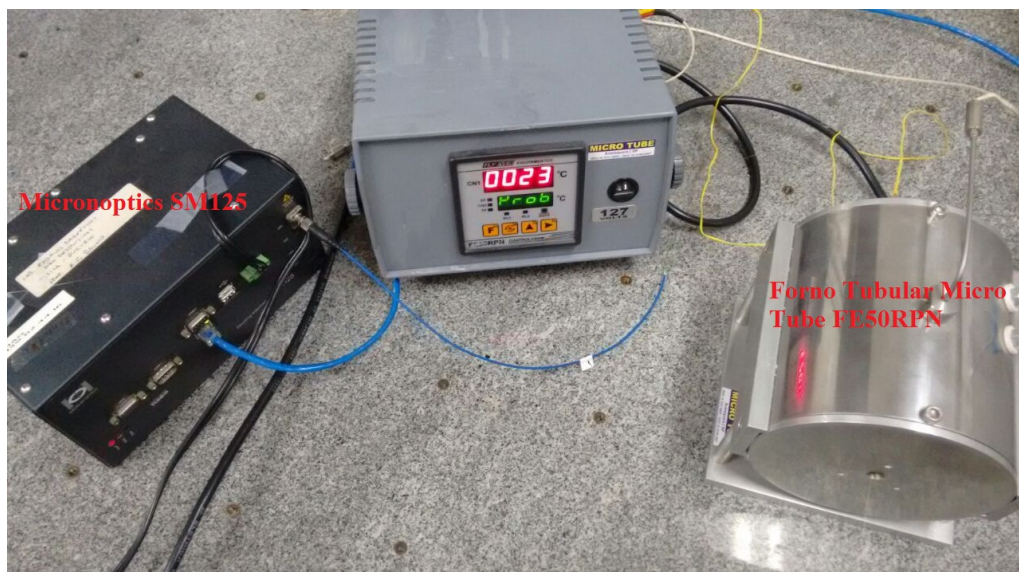
3.3. Montagem experimental para caracterização do interferômetro Fabry-Perot à fibra com a temperatura

Inicialmente, para realizar a medida de temperatura, a cavidade de ar foi colocada dentro de um forno tubular e variou-se a temperatura entre 40°C e 410°C, com um tempo de 3 minutos (primeira calibração), e 10 minutos, (segunda calibração), para cada temperatura. Na primeira calibração, os parâmetros do forno estavam ajustados de modo que a temperatura variasse em $\pm 10^\circ\text{C}$, em torno da temperatura escolhida. Já na segunda calibração, o técnico João Manuel ajustou os parâmetros do forno de modo que a temperatura variasse em $\pm 2^\circ\text{C}$, em torno da temperatura escolhida. Em ambas as calibrações, os resultados foram semelhantes, apenas reduzindo o tempo de medição. A sensibilidade da resposta da cavidade Fabry-Perot com a variação de temperatura foi comparada com a sensibilidade obtida por uma rede de Bragg. O sinal refletido de ambas as fibras (fibra com a cavidade e fibra com a Rede de Bragg), foi mensurado com o auxílio de um

sistema interrogador. A figura 13 mostra o desenho esquemático e a fotografia da montagem experimental para a realização desta medida.



(a)



(b)

Figura 13– a) Desenho esquemático da medida de temperatura. b) Fotografia da medida de temperatura.

De forma a se realizar medidas com um equipamento com resolução maior do que o *Micronoptics SM125*, utilizou-se também outro interrogador óptico, o *FS42 Portable BraggMETER*, da empresa *Fibersensing*. Este interrogador possui uma precisão do comprimento de onda de 1pm e tem um alcance espectral de 1510-1590 nm.

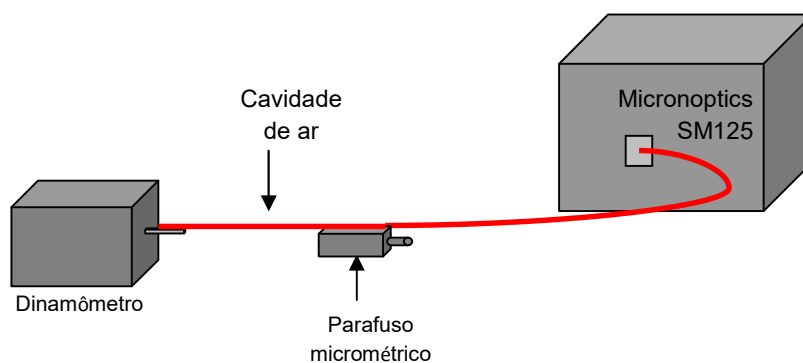
Os resultados obtidos para a caracterização da resposta com a temperatura da cavidade Fabry-Perot na fibra são apresentados na seção 4.2.

3.4

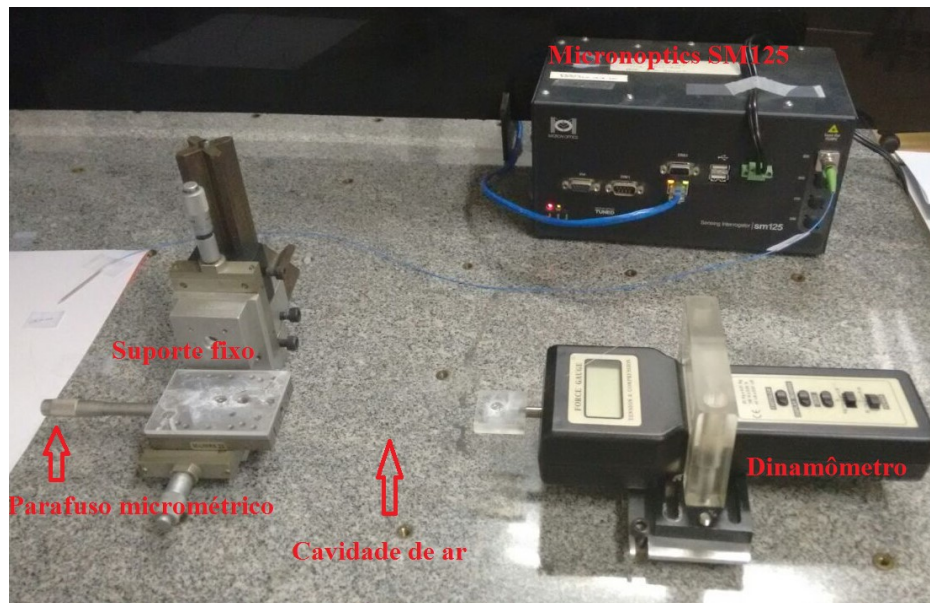
Montagem experimental para caracterização do interferômetro à fibra com a deformação longitudinal

Para realizar a medida de deformação longitudinal, as extremidades da fibra, contendo a cavidade de ar, foram coladas, com a cola *Loctite 416*, em dois suportes alinhados, sendo um deles fixo, ligado a um dinamômetro e o outro móvel, com um parafuso micrométrico, conforme é mostrado na figura 14. Para que o núcleo da fibra SMF não desprendesse do revestimento com a aplicação da tensão, uma parte do revestimento dela foi retirado e foi colocado um pingo de cola sobre a mesma. A medida foi iniciada após 24h, para garantir que a cola estava seca.

O sinal foi mensurado com o auxílio do *Micronoptics SM125*, e a tensão aplicada variou entre 0N e 3,10N.



(a)



(b)

Figura 14– a) Desenho esquemático da medida de deformação longitudinal. b) Imagem do aparato experimental para a medida de variação da deformação longitudinal. OBS: a imagem da fibra contendo a cavidade de ar não ficou visível devido ao contraste com a mesa.

Os resultados obtidos para a caracterização da resposta com a deformação longitudinal da cavidade Fabry-Perot na fibra são apresentados na seção 4.3.

3.5

Montagem experimental para caracterização do interferômetro à fibra com o campo magnético

O sensor de campo magnético foi construído, colando a região que continha a cavidade de ar, com a *Loctite 416*, no centro de uma amostra cúbica de $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,92}$, conhecida como TX, de dimensão 4mm x 4mm x 20mm. Esta amostra com a cavidade de ar foi colocada entre dois pólos magnéticos (norte e sul), modelo *GMW Magnet Systems 3470*, de modo que o campo magnético foi aplicado no eixo de magnetostricção do cubo, conforme mostra a figura 3.6. O campo magnético foi medido com o auxílio de um gaussímetro, modelo *Gauss/Teslameter (F.W.Bell 5080)*, variando de 0 mT até 70 mT. O sinal foi mensurado com o *Micronoptics SM125*. Para comparar os resultados obtidos com a cavidade de ar, uma rede de Bragg foi colada próxima à cavidade e também foi inspecionada com o mesmo sistema de aquisição. Os resultados obtidos para a

caracterização da resposta deste sensor em relação ao campo magnético são apresentados na seção 4.4.

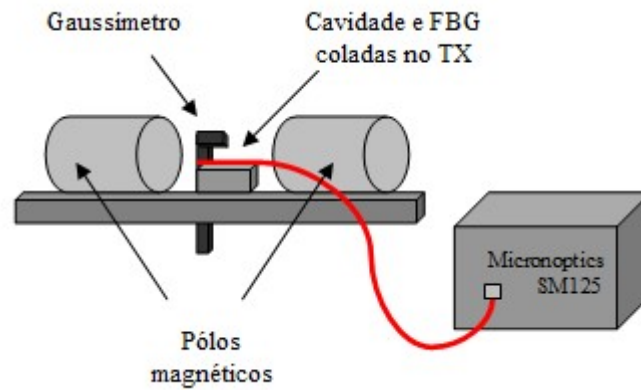


Figura 15– Desenho esquemático da medida de campo magnético.

Posteriormente, este sistema sensor, composto do TX e a fibra com a cavidade de ar, foi testado quanto à resposta à variação de temperatura. Para isto, colou-se uma cavidade de ar, com a *Loctite 416*, no TX. Após 24h e tendo-se colocado este sistema (TX+Cavidade FPI) dentro do forno, iniciou-se a medida, com a temperatura variando entre 40°C e 100°C, durante 10 minutos para cada temperatura. O resultado obtido para a caracterização da resposta com a temperatura deste sensor é apresentado na seção 4.2.

4 Resultados

4.1. Sinal do interferômetro FP a fibra

Cada cavidade de ar tem um espectro de reflexão característico, pois este varia conforme o tamanho de cada uma. Então, para cada cavidade de ar construída nesse trabalho, o espectro de reflexão foi simulado, utilizando o MATLAB (MATrix LABoratory), um *software* de alto desempenho, com finalidade de realizar cálculos numéricos.

A simulação, que ainda está sendo aperfeiçoada, foi baseada nos cálculos apresentados na seção 2.2.2 desta dissertação, para o caso de uma única cavidade de ar na fibra, com tamanho d e índice de refração $n_1 = 1$.

Como exemplo, a figura abaixo (figura 16) apresenta os espectros de reflexão simulado e experimental da cavidade de $160\ \mu\text{m}$.

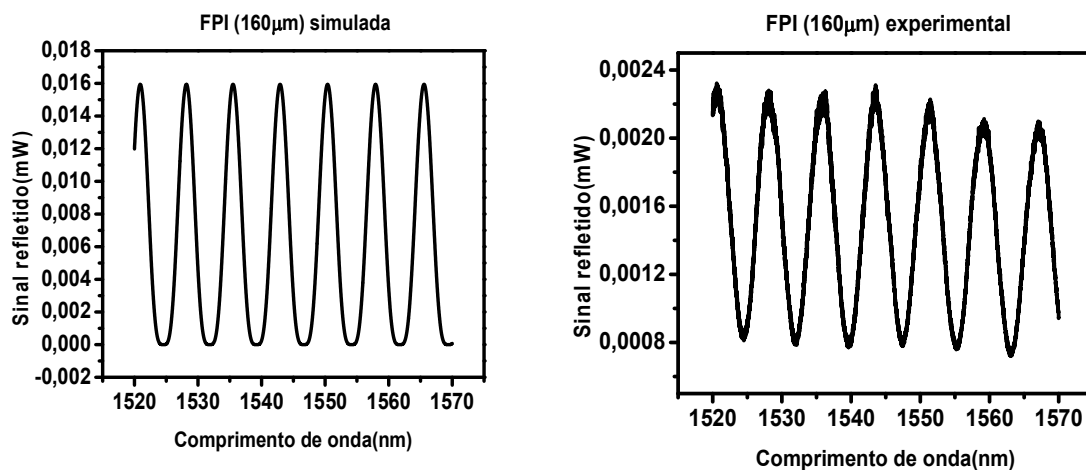


Figura 16– a) Espectro de reflexão simulado de uma cavidade de $160\ \mu\text{m}$. b) Espectro de reflexão experimental de uma cavidade de $160\ \mu\text{m}$.

Os dados da simulação foram exportados para um arquivo de texto. Então, através da equação (4), pode-se calcular o tamanho da cavidade com os dados da simulação e experimentais. Por exemplo, a partir do tamanho de uma cavidade de $160\mu\text{m}$, medido no microscópio óptico, foi estimado o tamanho desta cavidade de duas formas: pela análise direta do sinal refletido na cavidade e pela simulação numérica. Pela simulação obteve-se, para o tamanho desta cavidade, o valor de $159,2\mu\text{m}$, com comprimento de onda inicial em $1524,17\text{nm}$, e pelo sinal refletido o valor de $154,3\mu\text{m}$, com comprimento de onda inicial e $1528,19\text{nm}$, com um erro percentual de 3%.

Os dados experimentais e teóricos deste trabalho foram analisados com o Origin, um *software* para análise de dados.

Após o entendimento do sistema Fabry-Perot através da simulação iniciou-se o estudo da influência da temperatura e deformação longitudinal neste sensor.

4.2.

Caracterização do sistema FPI em relação à temperatura

Para investigar a influência da temperatura no sensor proposto neste trabalho, as fibras com as cavidades FPI foram submetidas a diversas temperaturas, entre 50°C e 410°C . Redes de Bragg também foram submetidas a este teste, para fins de comparação, pois são largamente utilizada em sensoriamento.

As figuras 17 e 18 mostram a variação do sinal de interferência produzido em uma cavidade Fabry-Perot e em duas redes de Bragg espacialmente próximas na mesma fibra, respectivamente, quando submetidas a diferentes temperaturas. O deslocamento do comprimento de onda central do pico em função da variação da temperatura é monitorado.

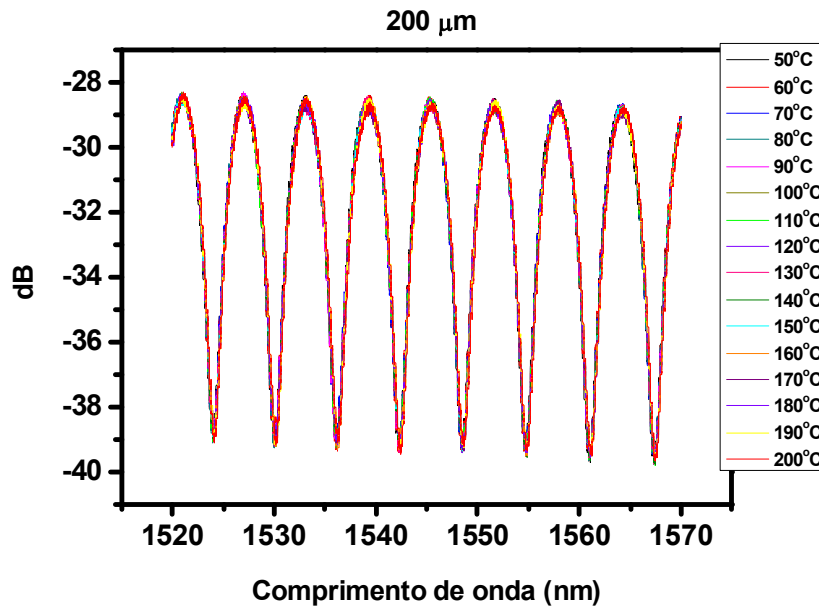


Figura 17– Gráfico típico da variação do sinal de uma cavidade FPI de 200 μm quando submetida às variações de temperatura, na faixa de 50°C a 200°C.

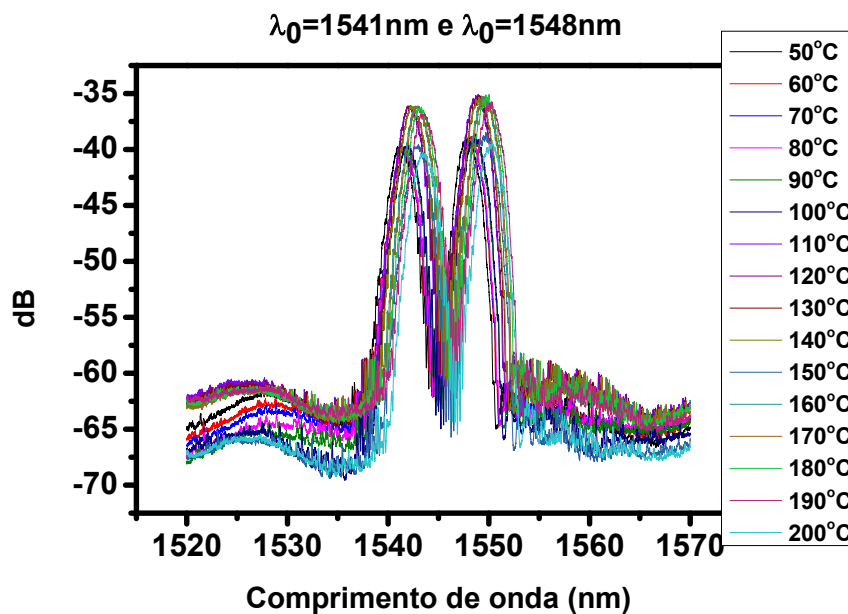


Figura 18– Gráfico típico da variação do sinal de duas redes de Bragg espacialmente próximas na mesma fibra, centradas em 1541nm e 1548nm, quando submetida às variações de temperatura, na faixa de 50°C a 200°C.

O gráfico da figura 19 apresenta o deslocamento típico do comprimento de onda central em função da temperatura para uma cavidade FPI de tamanho 25 μm, obtida com a primeira calibração (seção 3.3), com uma sensibilidade a temperatura de 0,80pm/°C. Já o deslocamento do comprimento de onda de Bragg,

com comprimento de onda inicial centrado em 1542nm, em função da temperatura, é apresentado no gráfico da figura 20, com a segunda calibração (seção 3.3), com uma sensibilidade a temperatura de 12pm/°C.

Para obter o valor da sensibilidade à temperatura, ajustes lineares foram feitos, e, com isto, o valor do coeficiente angular é o valor da sensibilidade.

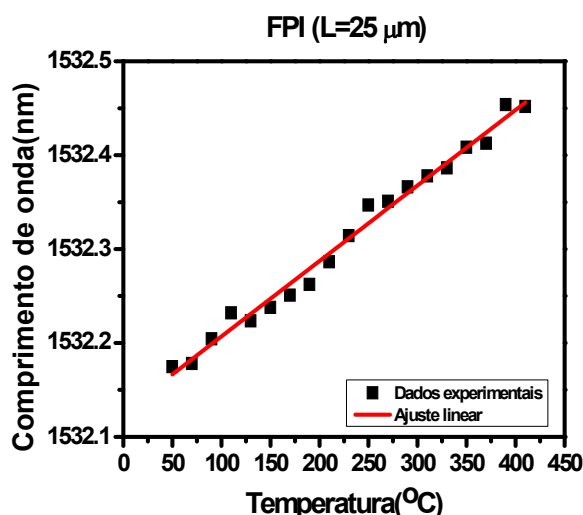


Figura 19– Dados experimentais obtidos conforme variação da temperatura para uma cavidade FPI de tamanho 25 μm. A sensibilidade à temperatura obtida para esta cavidade foi de 0,80pm/°C.

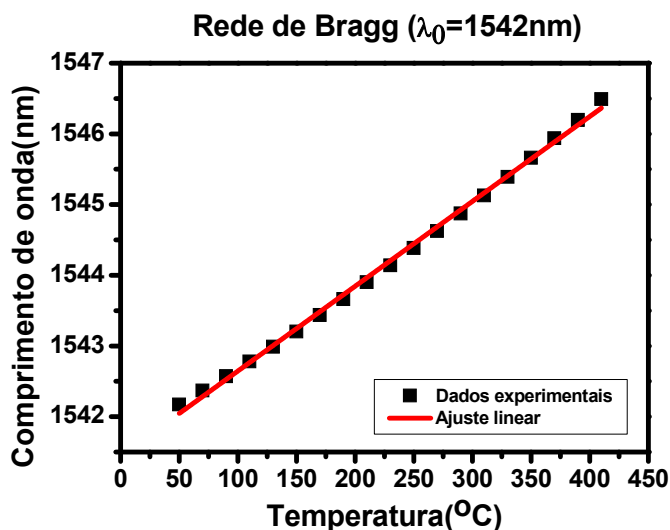


Figura 20– Resultado típico da variação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura para uma Rede de Bragg, com comprimento de onda inicial centrado em 1542nm. A sensibilidade à temperatura obtida para esta FBG foi de 12pm/°C.

A tabela 1 contém o resumo dos resultados obtidos para a resposta com a temperatura das cavidades FPI, além de resultados obtidos na literatura. A tabela 2 contém os resultados obtidos para a resposta com a temperatura de redes de Bragg.

Comprimento da cavidade (μm)	Sensibilidade à temperatura ($pm/^{\circ}C$)	Comprimento da cavidade (μm) Literatura	Sensibilidade à temperatura ($pm/^{\circ}C$) Literatura
25 (retangular)	0,80	25 (elíptica)	1,25 [18]
100 (retangular)	0,97	35 (elíptica)	1,27 [18]
150 (retangular)	1,07	50 (elíptica)	1,31 [18]
160 (retangular)	1,03	13 (<i>hollow-core ring</i> PCF)	0,81 [43]
200 (retangular)	1,08	60 (tubo de fibra capilar)	0,9 [46]

Tabela 1– Resumo dos resultados obtidos para diferentes cavidades FPI quanto à sensibilidade à temperatura.

Observando os dados da tabela 1, pode-se verificar que, estas cavidades de ar possuem baixa sensibilidade à temperatura, independentemente do seu tamanho, com o valor médio de $(0,99 \pm 0,11)pm/^{\circ}C$. O erro na medida realizada no forno é da ordem de $0,1^{\circ}C$. Analisando os resultados obtidos por Zhou et al. [18], Ferreira et al. [43] e Wang et al. [46], para medidas de temperatura, verifica-se que o resultados obtidos neste trabalho são da mesma ordem de grandeza dos apresentados na literatura.

Comprimento de onda de Bragg $\lambda_0 (nm)$	Sensibilidade à temperatura ($pm/^{\circ}C$)
1541	15,26
1542	12,00
1548	14,16
1554	11,58

Tabela 2– Resumo dos resultados obtidos para diferentes redes de Bragg, quanto à sensibilidade à temperatura.

Ao analisar os dados das tabelas 1 e 2, pode-se ver que os sensores com cavidades FPI deste trabalho, possuem uma baixa sensibilidade, sendo em torno de dez vezes menos sensíveis à temperatura do que as redes de Bragg. Esta baixa sensibilidade é bastante vantajosa para sensoriamento em ambientes com variações de temperatura.

Para uma melhor comparação entre os resultados obtidos para as redes de Bragg e cavidade FPI, foi plotado um gráfico (figura 21) da temperatura em função da variação do comprimento de onda de uma cavidade FPI de 25 μm (sensibilidade de 0,8pm/ $^{\circ}C$) e da variação do comprimento de onda de Bragg, centrado em 1542 nm (sensibilidade de 12pm/ $^{\circ}C$) como exemplo, na faixa de 50 $^{\circ}C$ a 450 $^{\circ}C$. Os dados da cavidade foram tomados com o interrogador óptico BraggMETER.

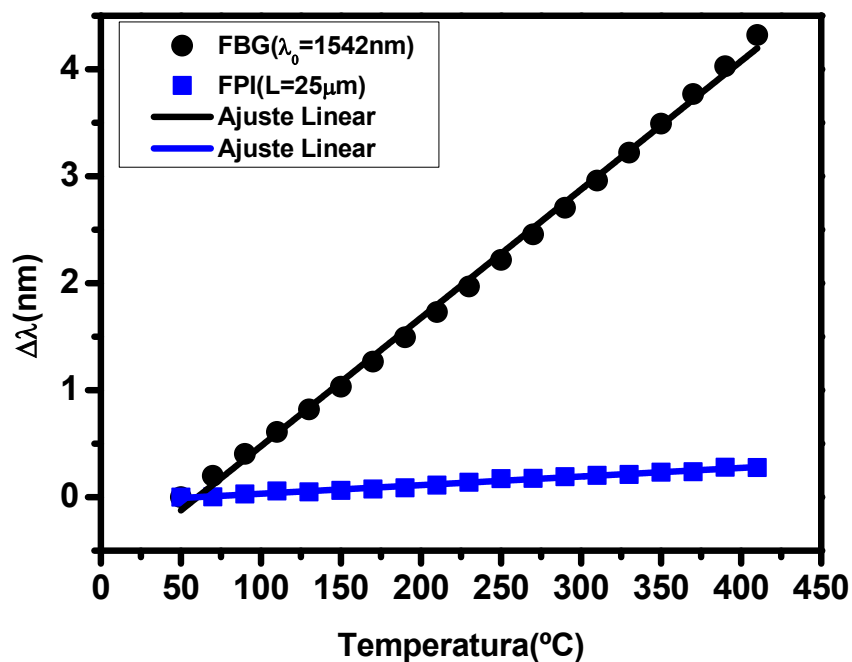


Figura 21– Comparação entre a variação do comprimento de onda de uma cavidade FPI de 25 μm , com uma sensibilidade à temperatura de $0,8\text{pm}/^\circ\text{C}$ (ajuste linear: reta azul) e a variação do comprimento de onda de Bragg centrado em 1542 nm, com uma sensibilidade à temperatura de $12\text{pm}/^\circ\text{C}$ (ajuste linear: reta preta). Os símbolos em preto são os dados experimentais tomados para a FBG e os símbolos em azul, se referem à cavidade de ar.

A fim de compreender o desempenho do sensor de campo magnético sob variação de temperatura, uma fibra contendo uma cavidade Fabry-Perot de tamanho $60\mu\text{m}$, foi colada sobre o TX e posicionada dentro do forno. O gráfico da figura 22 apresenta o deslocamento típico do comprimento de onda central da cavidade de $60\mu\text{m}$ colada no TX em função da temperatura.

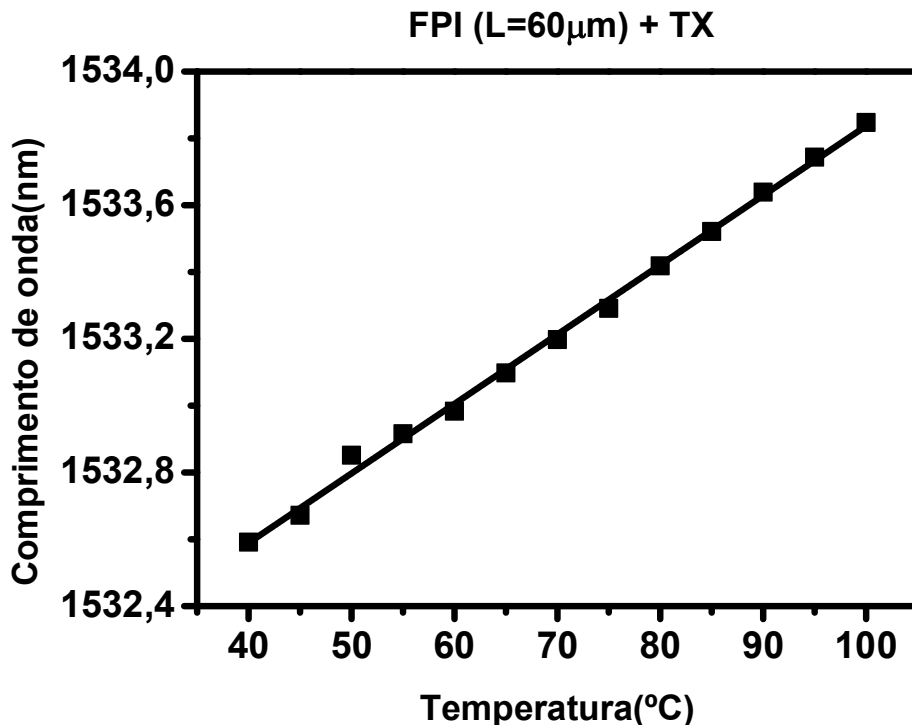


Figura 22 – Dados experimentais obtidos conforme variação da temperatura para uma cavidade FPI de tamanho 60 μm, colada no TX e posicionada dentro do forno.

O valor da sensibilidade à temperatura foi obtido através do valor do coeficiente angular de um ajuste linear dos dados experimentais, mostrados na Figura 22. A sensibilidade obtida foi 20,8 pm/°C. Esta alta sensibilidade à temperatura é devida ao alto valor do coeficiente de expansão térmica do TX, $14,4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Então, em aplicações de sensoriamento com variação de temperatura, deve-se levar em conta o efeito da expansão térmica do TX. Para as aplicações em que a temperatura é instável, um material com baixo coeficiente de expansão térmica deve ser utilizado.

4.3. Caracterização do sistema FPI em relação à resposta à deformação longitudinal (*strain*)

Para investigar a deformação longitudinal, as cavidades FPI foram submetidas a diversas tensões, variando entre 0N e 4,10N. A figura 23 apresenta a variação do sinal de interferência de uma cavidade Fabry-Perot de tamanho 25μm em função da deformação aplicada. O deslocamento do comprimento de onda central do pico em função da variação da tensão é monitorado.

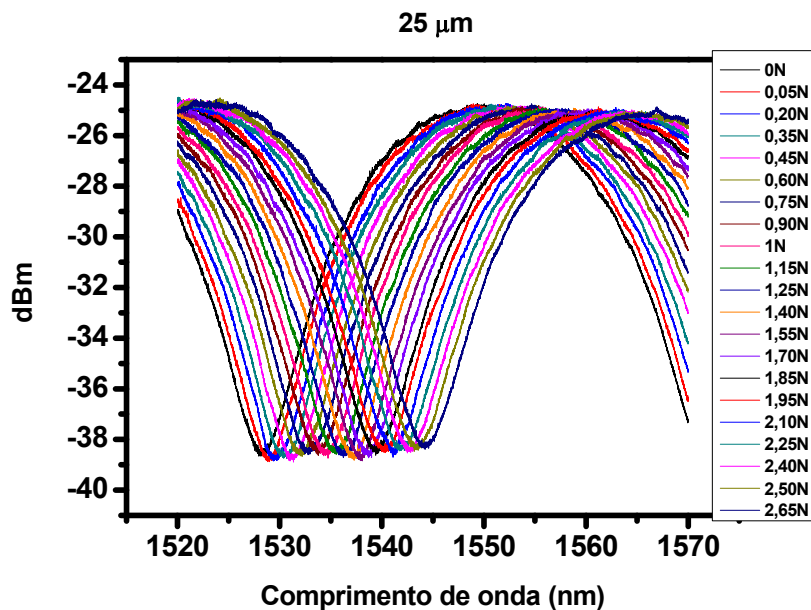


Figura 23– Gráfico típico do sinal refletido de uma cavidade FPI de 25 μm em função da deformação, variando de 0 μm a 1709 μm.

Mais uma vez, para obter o valor da sensibilidade ao *strain*, ajustes lineares foram feitos nos gráficos da variação do *strain* em função do deslocamento do comprimento de onda, sendo que o valor do coeficiente angular é que fornece o valor da sensibilidade. O gráfico da figura a seguir (figura 24) apresenta o deslocamento do comprimento de onda central em função da deformação para as cavidades FPI.

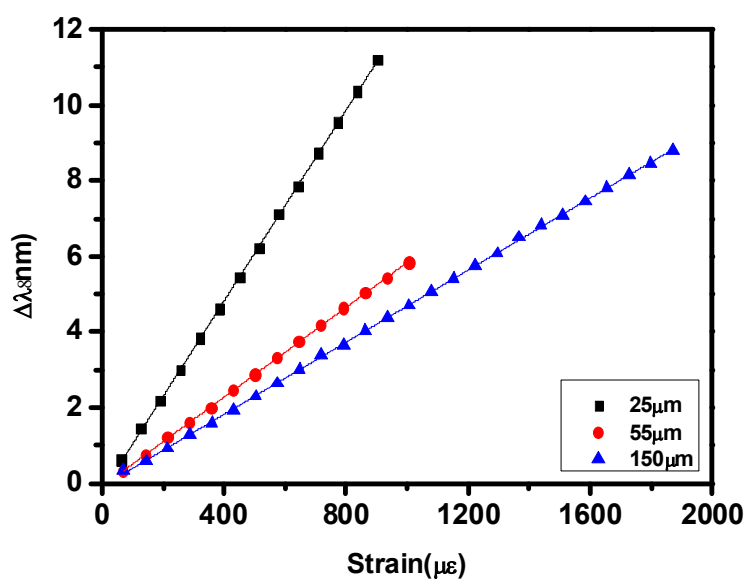


Figura 24– Deslocamento do comprimento de onda em função da deformação aplicada para cavidades de comprimentos 25 μm, 55 μm e 150 μm.

A tabela 3 resume os dados obtidos nesta medida de deformação longitudinal, e compara com os resultados obtidos na literatura. Nesta mesma tabela, também consta um resultado obtido na literatura para deformação de uma rede de Bragg.

Comprimento da cavidade (μm)	Sensibilidade ao <i>strain</i> ($\text{pm}/\mu\epsilon$)	Comprimento da cavidade (μm) - Literatura	Sensibilidade ao <i>strain</i> ($\text{pm}/\mu\epsilon$) - Literatura
25 (retangular)	9,50	(29x40) μm (elíptica)	10,3 [8]
55 (retangular)	6,62	46 (esférica)	6,00 [16]
150 (retangular)	4,80	54 (esférica)	5,10 [16]
-	-	79 (esférica)	2,90 [16]
-	-	25 (esférica)	5,18 [18]
-	-	35 (esférica)	4,05 [18]
-	-	50 (esférica)	2,96 [18]
-	-	13 (<i>hollow-core ring</i> PCF)	15,4 [43]
-	-	61 (retangular)	43 [47]
-	-	FBG - Literatura	1 [48,49]

Tabela 3– Sensibilidade à deformação das cavidades FP para diferentes comprimentos de cavidades e para uma FBG.

Confrontando os dados obtidos neste trabalho com os dados obtidos na literatura, verifica-se que há resultados que diferem dos apresentados nesta dissertação. Por exemplo, Liu et al. [47], obteve, para uma cavidade de 61 μm , uma resposta de 43 $\text{pm}/\mu\epsilon$. O sensor foi construído através da emenda de dois pedaços de fibra padrão de telecomunicação (SMF), passando por 6 etapas, e as extremidades da fibra foram pré-tratadas, formando cavidades de ar retangulares. As paredes da cavidade de ar tinham uma espessura de 1 μm . Um método semelhante foi utilizado para construir cavidades esféricas por Liu et al. [16], obtendo para as cavidades de tamanhos 46 μm , 54 μm e 79 μm , respostas de

6,0 $pm/\mu\epsilon$, 5,10 $pm/\mu\epsilon$ e 2,90 $pm/\mu\epsilon$, respectivamente. Neste método, o sensor também foi construído através da emenda de dois pedaços de SMF, passando por 4 etapas. As extremidades das fibras foram pré-tratadas e as cavidades esféricas foram formadas. Já o método proposto nesta dissertação para construir cavidades de ar, é mais rápido e simples, porém tem uma sensibilidade à deformação menor, já que as paredes da cavidade tinham uma espessura de 25 μm . Como visto na equação (46) da seção 2.4, a sensibilidade ao *strain* é inversamente proporcional à área da secção transversal da fibra. Logo, se as paredes da cavidade do sensor proposto forem mais estreitas, a sensibilidade será mais elevada.

Fávero et al. [8] demonstraram cavidades elípticas com sensibilidade de 10,3 $pm/\mu\epsilon$ em sistemas com baixa sensibilidade à temperatura. Já Zhou et al. [18], demonstraram cavidades esféricas de tamanhos 25 μm , 35 μm e 50 μm com respostas de 5,18 $pm/\mu\epsilon$, 4,05 $pm/\mu\epsilon$ e 2,96 $pm/\mu\epsilon$, respectivamente, com baixa sensibilidade à temperatura. Em comparação com estes resultados, o dispositivo desenvolvido neste trabalho apresenta uma sensibilidade maior para as cavidades de menor tamanho e similar à resposta obtida em [8], mas possui um processo de fabricação mais controlada e de mais fácil produção.

Outro exemplo, é a cavidade de 13 μm produzida por Ferreira et al.[43] usando um anel de cristal fotônico com núcleo oco. A resposta foi de 15,4 $pm/\mu\epsilon$. Isto se deve à área da secção transversal da sílica, estando de acordo com a seção 2.4.

Porém, se os dados obtidos das FPIs produzidas neste trabalho forem comparados ao resultado obtido para uma rede de Bragg [48,49], certifica-se que, o sensor com cavidade FPI desenvolvido neste trabalho, possui uma sensibilidade em torno de 5 vezes maior que uma rede de Bragg, sendo bastante vantajosas para sensoriamento de deformação longitudinal.

Para complementar as informações desta seção, foi plotado um gráfico (figura 25) da força em função do *strain* aplicado ao FPI.

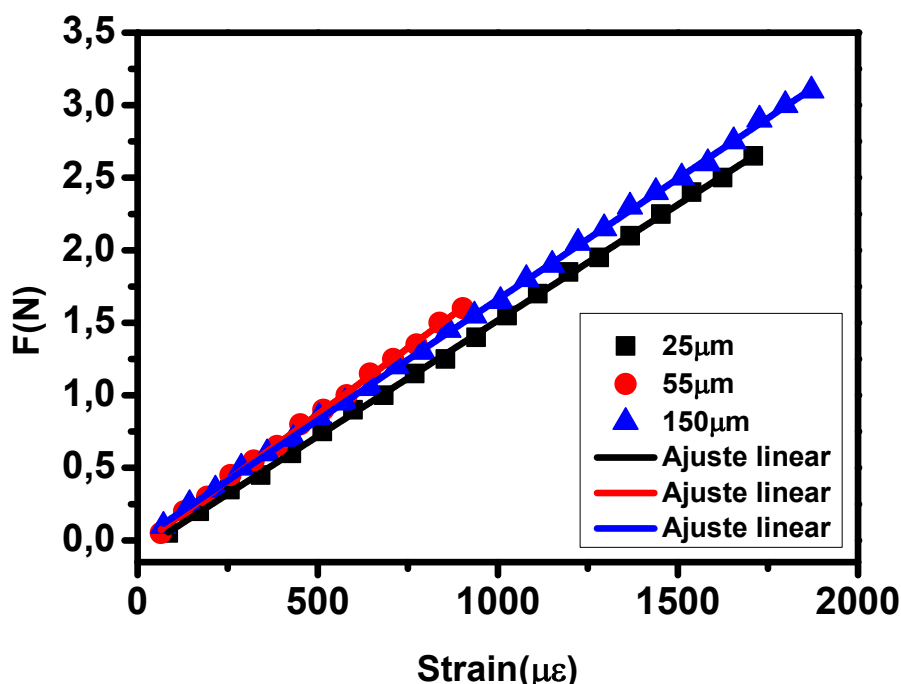


Figura 25– Deformação aplicada para cavidades de comprimentos 25 μm , 55 μm e 150 μm . A sensibilidade foi obtida através de um ajuste linear para as cavidades de 25 μm , 55 μm e 150 μm foi de 0,0016 N/ $\mu\epsilon$, 0,000183 N/ $\mu\epsilon$ e 0,00167 N/ $\mu\epsilon$, respectivamente.

Foi observada uma relação linear entre strain e a força a uma taxa de aproximadamente 600 $\mu\epsilon$ /N. A maior força aplicada antes da FPI se romper foi de 3,10 N.

4.4.

Caracterização do sistema (FPI) como sensor de campo magnético

Para testar o sensor proposto à aplicação de um campo magnético externo, diversas cavidades FPI foram submetidas a este teste. O campo magnético foi variado entre 0mT e 70mT. Para comparar os resultados das cavidades FPI, redes de Bragg também foram utilizadas.

A figura 26 mostra um resultado típico obtido para o sensor de campo magnético, onde a quantidade monitorada foi o $\Delta\lambda$ (deslocamento em comprimento de onda) para uma cavidade FPI de 40 μm e o $\Delta\lambda^B$ para uma FBG centrada em 1523 nm.

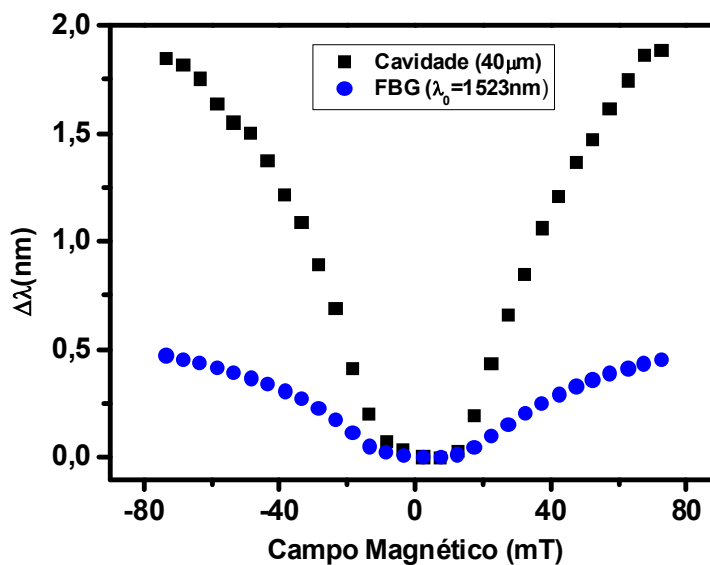


Figura 26– Gráfico típico da variação do comprimento de onda, $\Delta\lambda$ para uma cavidade FPI de 40 μm e $\Delta\lambda^B$, para uma FBG centrada em 1523nm, em função do campo magnético aplicado.

A figura 27 mostra a variação do comprimento de onda em função do campo magnético para cavidades FPI de tamanhos 40 μm , 60 μm , 160 μm e 648 μm , juntamente com redes de Bragg centradas em comprimentos de onda 1523nm, 1523nm e 1550nm. Estes resultados ilustram o comportamento do sensor de campo magnético. O deslocamento do comprimento de onda para o sinal refletido na FPI e na FBG foi medido para uma variação de campo magnético de -80mT a 80mT. Por simetria são apresentados na figura 4.12 somente os valores de campo de 0 a 80 mT.

Por fim, para obter o valor da sensibilidade ao campo magnético, ajustes lineares foram feitos, e, com isto, o valor do coeficiente angular é o valor da sensibilidade.

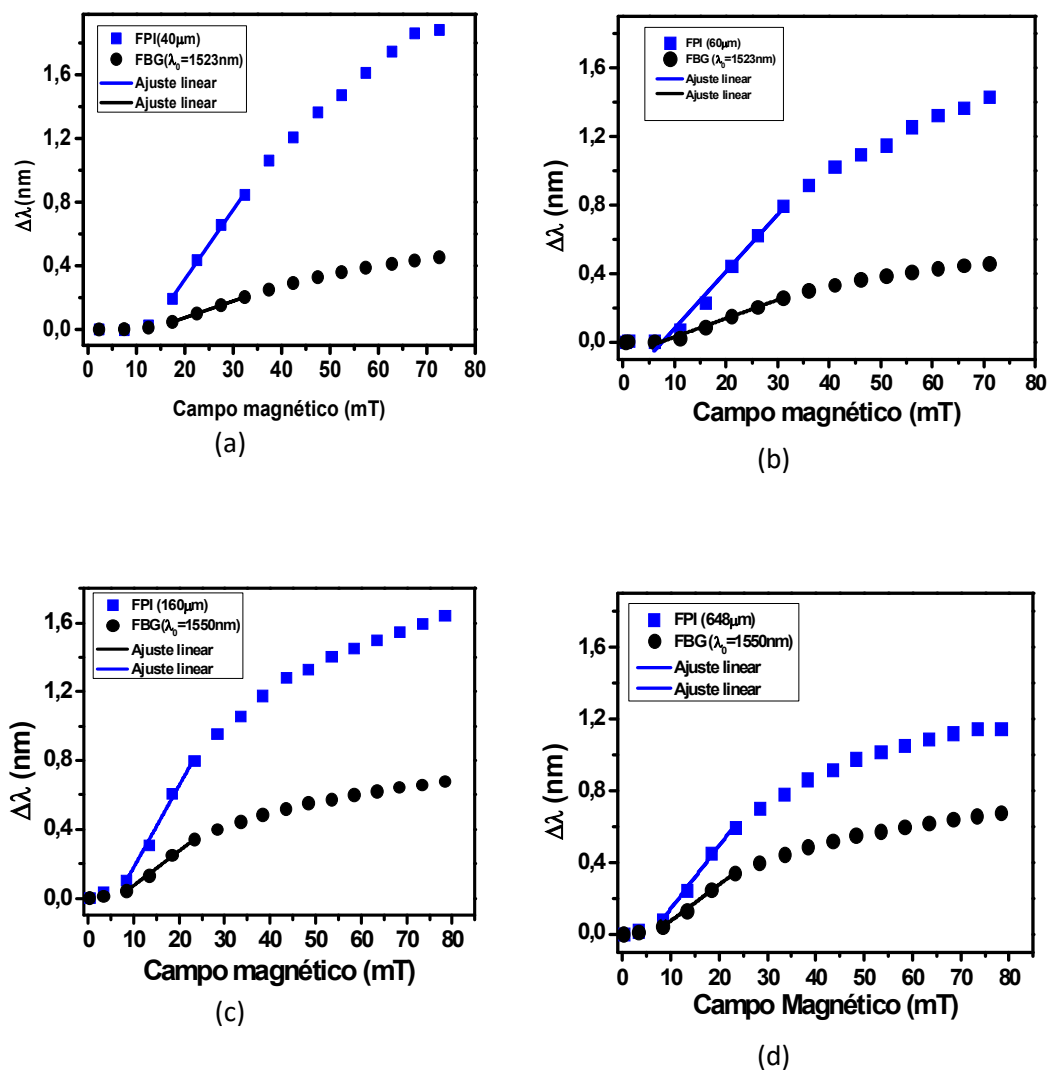


Figura 27–Variação do comprimento de onda em função do campo magnético aplicado para cavidades de tamanhos 40 μ m, 60 μ m, 160 μ m e 648 μ m, e FBGs com comprimento de onda de Bragg centrados em 1523nm e em 1550nm.

A tabela 4 contém o resumo das respostas às sensibilidades ao campo magnético do sensor, quando construído com as cavidades FPI e com as redes de Bragg, comparando os resultados obtidos para cada conjunto de medição (intervalo do campo magnético avaliado, os comprimentos das cavidades e comprimento de onda central das FBGs, e suas respectivas sensibilidades, além da relação entre a sensibilidade das cavidades e das FBGs).

Faixa de campo magnético (mT)	Comprimento da cavidade FPI [L(μm)]	Sensibilidade ao campo magnético [(pm/mT)]	FBG – Comprimento de onda [λ_0^B (nm)]	Sensibilidade ao campo magnético: FBG [$\Delta\lambda^B$ (pm/mT)]	Relação FPI/FBG [$\Delta\lambda^C / \Delta\lambda^B$]
17-32	40	44	1523	10	4,4
6-31	60	33,2	1523	10,8	3,1
8-23	160	47,6	1550	20,2	2,4
	648	35,1			1,7

Tabela 4 – Resumo das sensibilidades obtidas de cavidades FPI e FBGs à magnetostricção.

Ao analisar a tabela 4, pode-se ver que os sensores com cavidades FPI deste trabalho, são mais sensíveis à magnetostricção do que as redes de Bragg. Por exemplo, a cavidade com o menor tamanho (40 μm), obteve uma resposta de 44pm/mT, que é aproximadamente 4,4 vezes mais sensível que a rede de Bragg centrada em 1523nm (10,8pm/mT) utilizada na mesma medida. Já a cavidade de maior tamanho (648μm), com resposta de 35,1pm/mT, obteve uma resposta 1,7 vezes maior que a rede de Bragg centrada em 1550nm, utilizada para esta medida. Estes resultados confirmam os resultados obtidos para as medidas de deformação longitudinal, onde a cavidade de menor tamanho apresentou a maior sensibilidade. É importante notar que a sensibilidade das medidas realizadas com as cavidades 160μm e 648 μm e a rede de Bragg apresentaram um valor elevado quando comparada com as outras medidas apresentadas na Tabela 4. No entanto, a razão da sensibilidade entre as respostas das FPI e FBG seguiu a tendência observada em que cavidades menores são mais sensíveis. A alta sensibilidade observada neste caso pode ter sido ocasionada pelo processo de colagem da fibra no TX, enfatizando que as fibras deverão ser coladas ao mesmo tempo para que se obtenha resultados confiáveis. Com isto, o sensor com cavidade FPI desenvolvido neste trabalho, apresenta um bom potencial para ser utilizado em sensoriamento de campo magnético.

5 Conclusões

Neste trabalho, um sensor com interferômetro Fabry-Perot intrínseco a uma fibra óptica foi investigado como um sensor de temperatura, deformação longitudinal e campo magnético.

Inicialmente, foi investigado um modo de se produzir cavidades Fabry-Perot intrínsecas à fibra, de baixo custo e de fácil produção. Foram construídas cavidades, a partir da emenda de uma fibra capilar a duas fibras padrões de telecomunicações (SMF28), com tamanhos variados, entre $25\ \mu\text{m}$ e $650\ \mu\text{m}$. Após isto, acoplando-se o sinal de um interrogador óptico a fibra que continha a cavidade, mediu-se o sinal refletido característico de cada cavidade. A viabilidade do uso deste sistema (FPI) como sensor de campo magnético foi investigada analisando-se a resposta do sistema a temperatura, deformação longitudinal e campo magnético.

Em relação ao sinal refletido de cada cavidade quanto à influência da temperatura, obteve-se uma sensibilidade em torno de $1\text{pm}/^{\circ}\text{C}$. Este sistema é, portanto, dez vezes menos sensível, se comparado com redes de Bragg, que possuem uma sensibilidade em torno de $12\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ a $15\text{pm}/^{\circ}\text{C}$. De fato, sabe-se que o coeficiente termo-óptico contribui bastante para que a rede de Bragg seja mais sensível à temperatura. A baixa sensibilidade à temperatura das cavidades é bastante vantajosa, para aplicações como sensores onde existem mudanças na temperatura.

A sensibilidade à deformação longitudinal nas cavidades FPI foi avaliada, verificando-se que as cavidades apresentam respostas que são inversamente proporcionais ao tamanho da cavidade. Desta forma, uma cavidade de $150\ \mu\text{m}$ e uma de $25\ \mu\text{m}$ apresentam uma sensibilidade de $4,8\text{pm}/\mu\epsilon$ e $9,5\text{pm}/\mu\epsilon$ respectivamente. Portanto é possível ter cavidades FPI com sensibilidade à deformação longitudinal nove vezes maiores do que redes de Bragg, que possuem

resposta em torno de $1\text{pm}/\mu\epsilon$. Existe, ainda, um nicho para se investigar a possibilidade de se obter uma sensibilidade à deformação longitudinal maior se utilizarmos cavidades menores. Esta alta sensibilidade é bastante importante, visto que será utilizada em sensoriamento de campo magnético.

Para o sensoriamento de campo magnético, as cavidades foram coladas em uma amostra de material magnetostrictivo (TX) que, sob a ação de campo magnético, sofre uma deformação longitudinal. Então, quando o sensor desenvolvido neste trabalho atua como sensor de campo magnético, para campos magnéticos aplicados abaixo de 80mT, ele apresenta uma sensibilidade quatro vezes maior, 44pm/mT, quando comparado com redes de Bragg, que teve resposta de 10,8pm/mT. É importante enfatizar que as fibras contendo as cavidades Fabry-Perot e as redes de Bragg que serão utilizadas para medidas de campo magnético devem ser coladas no material magnetostrictivo ao mesmo tempo, para que se obtenha resultados reprodutíveis.

Conclui-se que o sensor de campo magnético baseado em uma cavidade Fabry-Perot intrínseca a fibra, desenvolvido neste trabalho, possui um grande potencial para aplicação em sensoriamento de campo magnético em sistemas sujeitos à variação de temperatura, diferentemente das redes de Bragg, que necessitam de compensação de temperatura, pois o sensor aqui desenvolvido possui uma baixa sensibilidade à temperatura ($1\text{pm}/^{\circ}\text{C}$).

Como continuação deste trabalho, o desempenho deste sensor será testado com outros tamanhos de cavidade, visando uma aplicação em medidas de corrente em redes de alta tensão, de modo a substituir os sensores FBG que necessitam de um sistema complicado para compensar a temperatura [50].

Um trabalho está sendo elaborado baseado no estudo aqui presente para ser submetido à publicação em uma revista científica.

Referências bibliográficas

- [1] KASHYAP, R. **Fiber Bragg Gratings**. San Diego: Academic Press, 1999.
- [2] RAJAN, G. et al. **Optical Fiber Sensors**. New York: Crc Press Taylor & Francis Group, 2015.
- [3] HILL, K.O.; MELTZ, G. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. **Journal Of Lighthwave Technology**, New Jersey, v. 15, n. 8, p.1263-1276, 08 ago. 1997.
- [4] STONE, J. Photorefractivity in GeO₂-doped silica fibers. **Journal Of Applied Physics**, New York, v. 62, n. 11, p.4371-4374, 01 dez. 1987.
- [5] MESCIA, L.; PRUDENZANO, F. **Advances on Optical Fiber Sensors. Fibers**. Basel, p. 1-23. 27 dez. 2013.
- [6] LEE, B. Review of the present status of optical fiber sensors. **Optical Fiber Technology**, v. 9, n. 2, p.57-79, abr. 2003.
- [7] ISLAM, Md. R. et al. Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review. **Sensors**. Suíça, p. 7451-7488. abr. 2014.
- [8] FAVERO, F. C. et al. Spheroidal Fabry-Perot microcavities in optical fibers for high-sensitivity sensing. **Optics Express**, Washington, v. 20, n. 7, p.7112-7118, 26 mar. 2012.
- [9] WU, C. et al. High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry–Perot interferometer based on photonic crystal fiber. **Optics Letters**, Washington, v. 36, n. 3, p.412-414, 1 fev. 2011.
- [10] FAVERO, F. C.; VILLATORO, J.; PRUNERI, V. Microstructured optical fiber interferometric breathing sensor. **Journal Of Biomedical Optics**, Bellingham, v. 17, n. 3, p.0370061-0370065, 23 dez. 2012.
- [11] RAO, Y. et al. In-line fiber Fabry-Perot refractive-index tip sensor based on endlessly photonic crystal fiber. **Sensors And Actuators A: Physical**, Filadélfia, v. 148, n. 1, p.33-38, nov. 2008.

- [12] ZHU, T. et al. Fabry–Perot optical fiber tip sensor for high temperature measurement. **Optics Communications**, Filadélfia, v. 283, n. 19, p.3683-3685, out. 2010.
- [13] SIRKIS, J. S. et al. In-line fiber etalon for strain measurement. **Optics Letters**, Washington, v. 18, n. 22, p.1973-1975, 15 nov. 1993.
- [14] TAFULO, P.A. R. 2010, Lisboa. Estrutura híbrida de cavidades Fabry-Perot em fibra óptica para detecção de índice de refração. **Lisboa: Ibersensor**, 2010. 4 p.
- [15] BARMENKOV, Y. O. et al. Effective length of short Fabry-Perot cavity formed by uniform fiber Bragg gratings. **Optics Express**, Filadélfia, v. 14, n. 14, p.6394-6399, 10 jul. 2006.
- [16] LIU, S. et al. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry–Perot interferometer. **Optics Letters**, Washington, v. 39, n. 7, p.2121-2124, 01 abr. 2014.
- [17] LIAO, C. R. et al. Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser micromachining and fusion splicing for refractive index sensing. **Optics Express**, Filadélfia, v. 20, n. 20, p.22813-22818, 20 set. 2012.
- [18] ZHOU, A. et al. Hybrid structured fiber-optic Fabry–Perot interferometer for simultaneous measurement of strain and temperature. **Optics Letters**, Washington, v. 39, n. 18, p.5267-5270, 15 set. 2014.
- [19] YARIV, A.; WINSOR, H. V.. Proposal for detection of magnetic fields through magnetostrictive perturbation of optical fibers. **Optics Letters**, Washington, v. 5, n. 3, p.87-89, mar. 1980.
- [20] WILLSON, J. P.; JONES, R. E.. Magnetostrictive fiber-optic sensor system for detecting dc magnetic fields. **Optics Letters**, Washington, v. 8, n. 6, p.333-335, jun. 1983.
- [21] ZHANG, P. et al. An Ultra-Sensitive Magnetic Field Sensor Based on Extrinsic Fiber-Optic Fabry–Perot Interferometer and Terfenol-D. **Journal Of Lightwave Technology**, New Jersey, v. 33, n. 15, p.3332-3337, ago. 2015.
- [22] OH, K. D. et al. Optical Fiber Fabry–Perot Interferometric Sensor for Magnetic Field Measurement. **IEEE Photonics Technology Letters**, New Jersey, v. 9, n. 6, p.797-799, jul. 1997.
- [23] ZHANG, P. et al. Cascaded fiber-optic Fabry-Perot interferometers with Vernier effect for highly sensitive measurement of axial strain and

magnetic field. **Optics Express**, Filadélfia, v. 22, n. 16, p.19581-19588, 06 ago. 2014.

[24] DAI, Y. et al. Magnetic field sensor based on fiber Bragg grating with a spiral microgroove ablated by femtosecond laser. **Optics Express**, Filadélfia, v. 21, n. 14, p.17386-17391, 12 jul. 2013.

[25] SMITH, G. et al. Characterisation and performance of a Terfenol- D coated femtosecond laser inscribed optical fibre Bragg sensor with a laser ablated microslot for the detection of static magnetic fields. **Optics Express**, Filadélfia, v. 19, n. 1, p.363-370, 03 jan. 2011.

[26] QUINTERO, S. M. M. et al. A Magnetostrictive Composite-Fiber Bragg Grating Sensor. **Sensors**, New York, v. 10, n. 9, p.8119-8128, 30 ago. 2010.

[27] YANG, M. et al. Optical fiber magnetic field sensors with TbDyFe magnetostrictive thin films as sensing materials. **Optics Express**, Filadélfia, v. 17, n. 23, p.20777-20782, 09 nov. 2009.

[28] SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. **Fundamentals of Photonics**. 2. ed. New Jersey: Wiley, 2007.

[29] INCORPORATED, Corning. **Corning SMF-28 Optical Fiber**, Product Information. 2002. Disponível em: <http://course.ee.ust.hk/elec342/readings/corning_smf-28.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2015.

[30] MULLIGAN, J. F.. Who were Fabry and Pérot? **American Association Of Physics Teachers**, Maryland, v. 9, n. 66, p.797-802, set. 1998.

[31] YIN, S.; RUFFIN, P. B.; YU, F.T.S. **Fiber Optics Sensors**. 2. ed. New York: Crc Press Taylor & Francis Group, 2008.

[32] GEROSA, R. M. et al. In-fiber modal Mach-Zehnder interferometer based on the locally post-processed core of a photonic crystal fiber. **Optics Express**, Filadélfia, v. 19, n. 4, p.3124-3129, 14 fev. 2011.

[33] ZHANG, Y. **Miniature fiber-optic multicavity Fabry-Perot interferometric biosensor**. 2005. 143 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Virginia Polytechnic Institute And State University, Virginia, 2005.

[34] ORFANIDIS, S. J.. **Electromagnetic Waves and Antennas**. New Jersey: Rutgers University, 2014.

[35] YIN, S.; RUFFIN, P.B.; YU, F. T. S. **Fiber Optics Sensors**. 2. ed. New York: Crc Press Taylor & Francis Group, 2008.

[36] OLIVEIRA, V. de. **Redes de Bragg para medições em altas temperaturas**. 2012. 137 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

[37] PACHECO, C. J. **Aplicação de Materiais com Magnetostricção Gigante em sensores de Deslocamento sem Contacto**. 2007. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

[38] NAZARÉ, F. V. B. de. **Sensor opto-magnético de corrente elétrica para linhas de transmissão**. 2014. 220 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

[39] GIBBS, M. R. J. et al. **Modern Trends in Magnetostriction Study and Application**. Sheffield: Kluwer Academic Publishers, 2001.

[40] SÁ, L. V. de. **Magnetostricção e Anisotropia Magnética de Filmes de Cobalto em Substratos de Vidro e Silício**. 2010. 76 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

[41] CALKINS, F.T.; FLATAU, A. B.. **Terfenol-D sensor design and optimization**. Disponível em: <http://www.aerosmart.umd.edu/TechPubs/calkins_1.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2015.

[42] PALFFY-MUHORAY, P. LCI-KSU, **Private Communication**(2015).

[43] FERREIRA, M. S. et al. Towards the control of highly sensitive Fabry-Pérot strain sensor based on hollow-core ring photonic crystal fiber. **Optics Express**, Filadélfia, v. 20, n. 20, p.21946-21952, 24 jul. 2012.

[44] ANTUNES, P.; DOMINGUES, M.G.; ANDRÉ P. (2012). Mechanical Properties of Optical Fibers, **Selected Topics on Optical Fiber Technology**, Dr Moh.Yasin (Ed.) ISBN:978-953-51-0091-1, InTech, Available from:<http://www.intechopen.com/books/selected-topics-on-optical-fiber-technology/mechanical-properties-of-optical-fibers>

[45] NETWORKS, C. **Crystran UV visible IR specialist optics** (© 2012 Crystran Ltd.), <http://www.crystran.co.uk/optical-materials/silica-glass-sio2>

[46] WANG, D. H.; WANG, S. J.; JIA, P. G.. In-line silica capillary tube all-silica fiber-optic Fabry-Pérot interferometric sensor for detecting high

intensity focused ultrasound fields. **Optics Letters**, Washington, v. 37, n. 11, p.2046-2048, 01 jun. 2012.

[47] LIU, S. et al. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber rectangular air bubble. **Scientific Reports**, v. 5, n. 7624, p.1-7, 05 jan. 2015. Nature Publishing Group. DOI: 10.1038/srep07624.

[48] TANAKA, N.; OKABE, Y.; TAKEDA, N. Temperature-compensated strain measurement using fiber Bragg grating sensors embedded in composite laminates. **Smart Materials And Structures**. Tóquio, v.12, n.6, p. 940-946. 20 nov. 2003.

[49] CHEN, Q.; LU, P. Fiber Bragg Gratings and their applications as temperature and humidity sensors. In: CHEN, L.t.. **Atomic, Molecular and Optical Physics: New Research**. New York: Nova Science Publishers, Cap. 6. p. 235-260, 2008.

[50] NAZARÉ, F.V.B.; WERNECK, M. M. Compact optomagnetic Bragg-Grating-based current sensor for transmission lines. **IEEE Sens. Journal**, v.5, n.1, p. 100-109, 2015.

[51]FÁVERO, F. C. **Sensores a Fibras Microestruturadas**. 2012. 134 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Apêndice A

Sensor de índice de refração a fibra óptica com cavidade Fabry-Perot

Sensores de índice de refração são importantes para as indústrias de alimentos, bebidas e químicas, pois é necessário ter o controle da qualidade durante o processo de fabricação. Neste trabalho investigamos o uso de cavidades FPI, formadas a partir da emenda de dois tipos de fibras ópticas, para sensoriamento de índice de refração.

As cavidades de ar foram fabricadas através da emenda por fusão de duas fibras ópticas, SMF28 e PCF (fabricada pelo grupo de fotônica da Université Lille, da França), formando, assim, duas cavidades: uma esférica (L1), de ar, e uma retangular (L2) [51]. No ato da emenda, ar é injetado na fibra PCF, através de uma bomba de pressão, para que as microestruturas da PCF não se fechem durante a fusão com a SMF. Este ar fica contido entre as duas fibras, gerando a cavidade de ar esférica [51].

Foi utilizada a máquina de emenda comercial Ericsson FSU 955, onde os parâmetros foram ajustados de modo a criar uma pequena cavidade de ar com faces curvadas. Esta cavidade FPI tem alta extinção nas franjas de interferência (superior a 30dB) e alta sensibilidade ao *strain*, tendo uma repetibilidade de 75% [51]. A segunda cavidade é formada entre o final da bolha de ar e a ponta da fibra (ver figura 28).

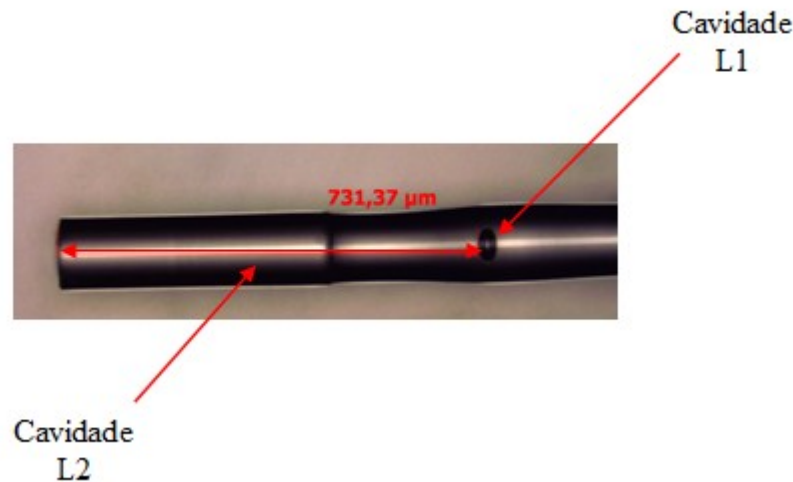


Figura 28- Imagem obtida por um microscópio óptico da cavidade de ar utilizada na medida de índice de refração. A cavidade L1 possui um formato esférico enquanto a cavidade L2, formada entre o final da bolha e a ponta da fibra, possui um formato retangular.

O sensor de índice de refração foi construído através da emenda de uma fibra SMF28 conectorizada em um das extremidades e a fibra óptica contendo a cavidade de ar. Para realizar a medida de índice de refração, a extremidade da fibra contendo a cavidade de ar foi inserida em líquidos, com diferentes índices de refração de 1,26; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6 e 1,7, da empresa Cargille. O sinal refletido da FPI foi monitorado com o auxílio de um interrogador óptico, o *Micronoptics SM125*, e processados no computador. A figura 29 mostra o esquema experimental desta medida.

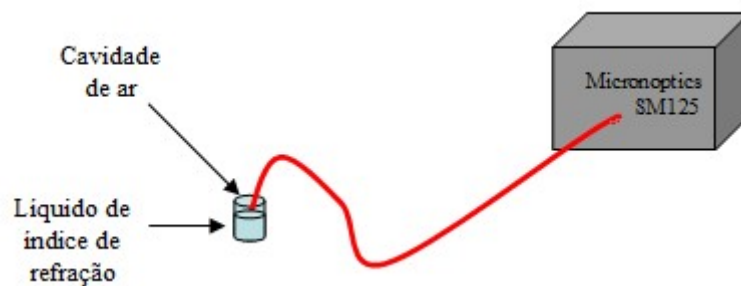


Figura 29- Desenho esquemático da montagem experimental para a medida de índice de refração.

Inicialmente, foi medida a resposta da FPI com a extremidade da fibra contendo a cavidade fora do líquido. Após isto, esta foi inserida no líquido com índice de refração 1,26. Para que pudesse ser inserida em um líquido com índice

de refração diferente, a região da fibra contendo a cavidade foi limpa com acetona e álcool. Quando estes produtos evaporavam e a região encontrava-se seca, media-se novamente a resposta da cavidade no ar e, depois, a cavidade era inserida no líquido com índice de refração 1,3 e assim sucessivamente para os outros índices de refração. Para todos os índices, o procedimento foi o mesmo. O gráfico da figura 30 mostra o sinal refletido do FPI imerso em diferentes líquidos de índice de refração, enquanto que o gráfico 31 mostra o sinal refletido do FPI após ter sido imerso nos líquidos e terem sido sujeitos ao procedimento de limpeza descrito acima.

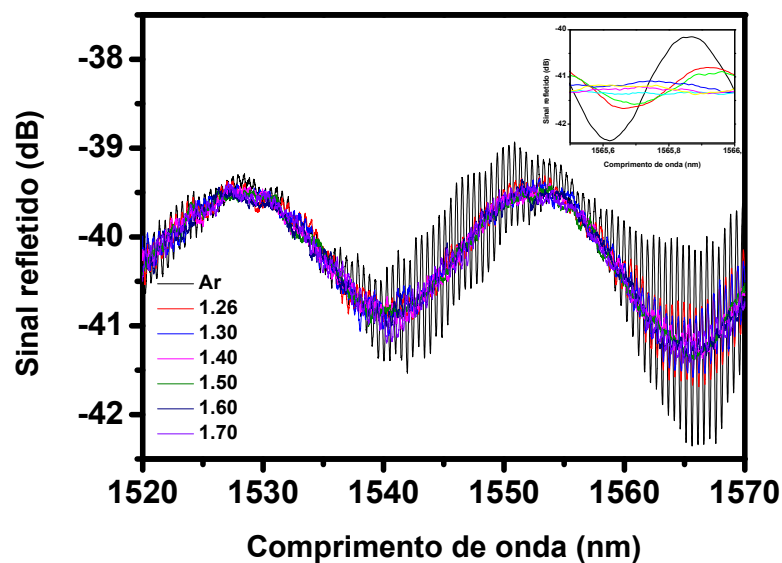


Figura 30– Espectro refletido de uma FPI quando imerso em diferentes líquidos de índice de refração. No detalhe, observa-se a mudança de fase do sinal refletido na FPI à medida que os valores dos índices de refração são maiores do que o da fibra (tipicamente 1.45).

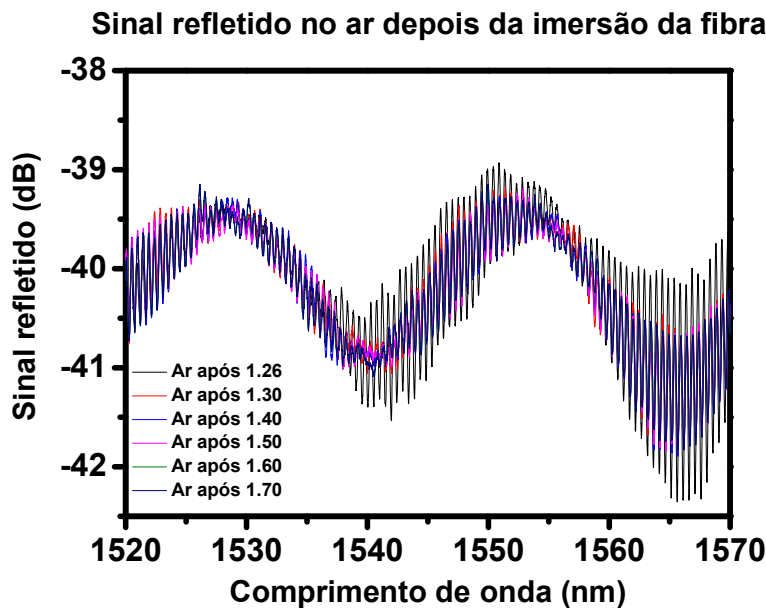


Figura 31– Espectro refletido de uma FPI após ter sido imerso em diferentes líquidos de índice de refração e terem sido sujeitos ao procedimento de limpeza.

Observando o gráfico da figura 30, percebe-se a mudança da fase do sinal refletido na FPI conforme os valores do índice de refração são maiores do que o da fibra, que é tipicamente 1,45. Ao observar o gráfico da figura 31, verifica-se que o sinal do FPI não muda após ter sido imerso nos líquidos de índice de refração e ter sido sujeito ao procedimento de limpeza.

Para verificar a eficácia deste sensor de índice de refração, foi estimada a visibilidade das franjas. Este parâmetro é dado por [2]:

$$V = \frac{V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}}}{V_{\text{máx}} + V_{\text{mín}}} \quad (\text{A.1})$$

Para cada índice de refração a visibilidade foi calculada e, assim, pode ser plotado um gráfico da visibilidade em função do índice de refração (ver figura 32).

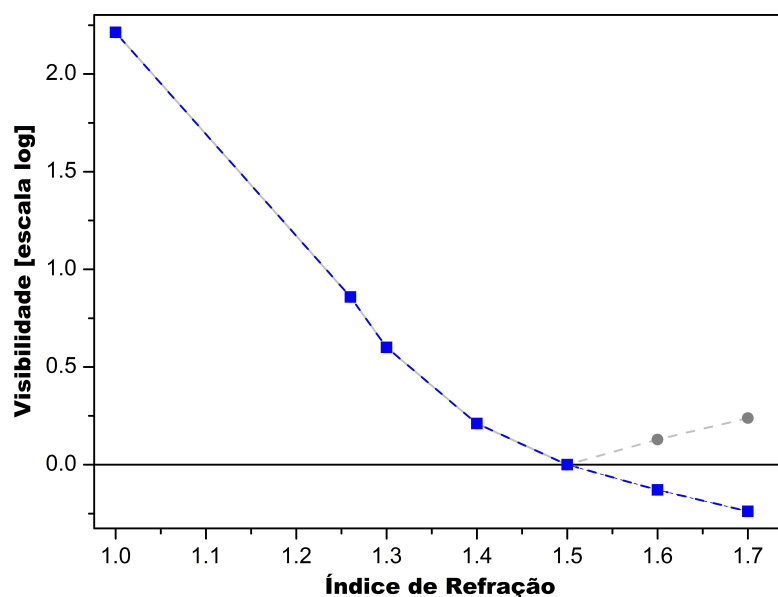


Figura 32- Visibilidade em função de cada índice de refração.

Ao analisar o gráfico da figura 32, verifica-se que a tendência da curva (em azul) é decrescente em função do índice de refração, e que conforme se varia o índice de refração, o sinal do sensor também muda. A visibilidade varia com o aumento do índice de refração quase linearmente ao longo do intervalo de índice de refração 1 a 1,4, onde a variação da visibilidade é da ordem de $V = 2$.

A partir do índice de refração igual a 1,5, observa-se uma mudança de fase no sinal refletido. Caso não houvesse uma variação da fase, a visibilidade poderia ser associada a mais de um valor de índice de refração (curva cinza figura 32). Com isto, conclui-se que o índice de refração pode ser unicamente determinado através da medida do sinal refletido pela cavidade FP.

Apêndice B

Script da simulação numérica desenvolvida para este trabalho

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
```

```
%João Manoel 2013
```

```
%Larissa Soares 2015
```

```
%
```

```
%Este programa faz uma simulação simples de uma cavidade de Fabry-perot em
```

```
%fibras ópticas
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
```

```
clear; %Limpa variáveis
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Definição das variáveis de entrada
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
n1=1.45; %índice de refração primeira camada
```

```
n2=1.0; %índice de refração cavidade
```

```
d2=25E-6; %tamanho da cavidade FP
```

```
phi0=pi/5.85;
```

```
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
```

```
%Definição das variáveis subordinadas
```

```
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
```

```
rho12=abs((n1/n2-1)/(n1/n2+1)); %Encontra o valor de rho com os valores de n
```

```
t12=1+rho12; %Encontra o valor de tau
```

```
rho21=abs((n2/n1-1)/(n2/n1+1));
```

```
t21=1+rho21;
```

```
lambda=(1520E-9:0.01E-9:1570E-9); %Cria um vetor de comprimentos de onda
para serem estudados
```

```
s=size(lambda); %armazena o comprimento do vetor
```

```
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
```

```
%Loop para a geração das matrizes ponto a ponto
```

```
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%
```

```
for ix=1:s(2)
```

```
beta2=2*pi*n2*d2/lambda(ix) + phi0; %cavidade ar
```

```
%beta3=2*pi*n3*d3/lambda(ix) + phi1; %cavidade fibra
```

```
H12=1/t12*[[1 rho12];[rho12 1]]; %cria a matriz de interface da primeira
interface
```

```

H21=1/t21*[[1 rho21];[rho21 1]];

L2=[[exp(-i*beta2) 0];[0 exp(i*beta2)]]; %Cria matriz de propagação para a
primeira cavidade

S=H12*L2*H21;

R(ix)=abs(S(1,2)/S(2,2)).^2; %Encontra o sinal refletido

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Apresentação

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(2)

plot(lambda,db(R));

%legend('Fabry-Perot')

set(gca,'FontSize', 13)

xlabel('Comprimento de onda(m)')

title('FPI(L=25E-6m)')

ylabel('Potência(dBm)')

Xmin=1.52E-6;Xmax=1.57E-6;Ymin=-170;Ymax=0;

AXIS([Xmin Xmax Ymin Ymax]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%exportação dos dados da simulação

%      -Rodrigo-

%Adaptado por Larissa Soares em 11/02/2015

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

cons='sim_';

arquivo='cavidade greice_58um.txt';

fileID = fopen(arquivo,'w');

```

```
z=1;
x=0;
while(x<1570E-9)
    x=lambda(z);
    y=x*1000000;
    fprintf(fileID,'%fE+3  %fE+0\r\n',y,db(R(z)));
    z=z+1;
end
fclose(fileID);
%%FIM
```


Apêndice C

Trabalhos

- Trabalho completo publicado para a *24th International Conference on Optical Fibre Sensors*:

Magnetic field sensing with an in-line Fabry-Perot interferometer based on capillary optical fiber and Terfenol-D

Paula M. P. Gouvêa^{a*}, Greice K. B. Costa^b, Larissa M. B. Soares^b, João M. B. Pereira^b,
Fernando C. Fávero^c, Arthur M. B. Braga^a, Antonio C. Bruno^b and Isabel C. S. Carvalho^b

^aOptical Fiber Sensors Lab (LSFO), Mechanical Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Gávea, Rio de Janeiro, RJ, Brazil 22451-900; ^bLOPEL, Physics Department, PUC-Rio, Gávea, Rio de Janeiro, RJ, Brazil 22451-900; ^cInstitute of Photonics and Technology, Albert Einstein str 9, Jena, D.C. 07745, Germany

ABSTRACT

In this paper we discuss results obtained with an in-line Fabry-Perot interferometer (FPI) built by splicing a small section of capillary fiber between two pieces of standard single mode fiber, resulting in a rectangular air cavity. The FPIs were characterized regarding sensitivity to temperature and longitudinal strain. The FPIs were bonded to pieces of Terfenol-D, a magnetostrictive alloy, to be used as magnetic field sensors. Fiber Bragg Gratings were also bonded to Terfenol-D for comparison. The FPI based on capillary optical fiber and Terfenol-D showed a higher sensitivity to an applied magnetic field when compared to an FBG.

Keywords: Optical fiber sensor, magnetic field sensor, Fabry-Perot interferometer (FPI), magnetostriction, capillary optical fiber, Terfenol-D

1. INTRODUCTION

Remote magnetic field sensors are desirable for monitoring of large structures, such as pipelines, bridges and electrical power transmission towers. Optical fiber magnetic field sensors may be used for remote sensing, in addition to having other advantages inherent of optical fibers, such as low weight; relative ease of handling; being non-explosive and non-flammable; tolerating relatively high temperatures, pressure and strain; fast response; good stability and repeatability; and ability for multiplexed configurations¹.

Optical fiber sensors based on Fiber Bragg Grating (FBG) used together with magnetostrictive materials have been demonstrated for sensing of magnetic fields²⁻⁴. The magnetostrictive material is necessary because FBGs are sensitive to strain, not magnetic fields, and so the material is used to transfer magnetic field variations into strain⁵. Also, since FBGs and the magnetostrictive material used are sensitive to temperature, some type of temperature compensation must be performed, so as to not incorrectly interpret temperature variations as temperature variations⁶⁻⁷.

In-line fiber optic Fabry-Perot Interferometers (FPIs), on the other hand, are less sensitive to temperature variations and may be more sensitive to strain variations, depending on the type⁸. Intrinsic FPIs can be formed by building an air-cavity contained in the fibers with hollow-core or photonic crystal fibers⁹⁻¹² or by creating a spherical air-bubble inside the fibers during the fusion splice¹³⁻¹⁵.

Perceiving the need for magnetic field sensors based on optical fibers with higher sensitivity to magnetic fields and lower cross-sensitivity to temperature, in this paper we demonstrate an in-line FPI sensor based on capillary optical fiber and Terfenol-D. The FPI is produced by splicing a short section of capillary fiber between two single mode fibers, thus creating an air cavity inside the fiber. Cavities of different lengths were made and tested, varying from 60 μm to 650 μm . The cavities were characterized in terms of the sensitivity to temperature and axial strain. The magnetic field sensor was built by bonding the fiber with the cavity on one side of the Terfenol-D cuboid sample.

2. METHODOLOGY

The in-line Fabry-Perot interferometers were built by splicing a small section of a capillary fiber between two pieces of standard single mode fiber (SMF28), resulting in rectangular air cavities. All optical fibers used had outer diameter equal

*pgouvea@puc-rio.br; phone +55-21-3527-1916; www.puc-rio.br

to 125 μm . The hole in the capillary fiber had diameter equal to 75 μm .

The fibers were fusion spliced with a Fujikura fusion splicer model FSM-30S. After the capillary fiber was spliced to the first piece of single mode fiber, it was cleaved to the desired length. The cleaved capillary fiber was then spliced to the second piece of single mode fiber. Fig. 1a shows a typical air cavity obtained with this procedure. As can be seen, the air cavity is homogeneous and shows a sharp interface with the single mode fiber.

The cavities were characterized in terms of temperature using an oven. The strain characterization was performed by measuring the output signal of the in-line FPI using an interrogation system while mechanically pulling the fiber containing the cavity.

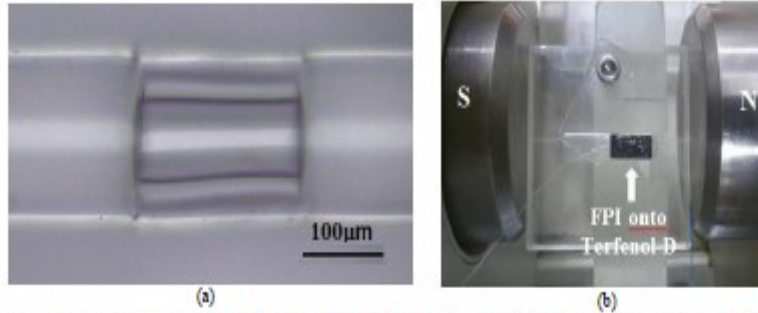


Figure 1. a) Optical microscope image of an air cavity of length equal to 150.54 μm . b) The cavity and the FBG were bonded to the top of a 4mm x 4mm x 20mm Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92} (Terfenol-D) cuboid sample, and placed in the center of the magnetic field.

The magnetic field sensor was built by bonding with Loctite 416 the section of the optical fiber containing the air cavity to a sample of Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92} cuboid (Terfenol-D), a magnetostrictive material¹⁶. The FPI was bonded at the center of the cuboid face containing the main magnetostrictive axis.

The setup for testing and characterizing the magnetic field sensor consisted of a magnet (GMW Magnet Systems 3470) and a Gauss/Teslameter (F.W Bell 5080) with the Terfenol-D cuboid placed in the center of the magnetic field (Fig. 1b). For comparison, an optical fiber containing a Fiber Bragg Grating (FBG) was attached to the Terfenol-D, next to the optical fiber with the cavity. A spatially uniform magnetic field was applied along the main magnetostrictive axis of the cuboid. The magnitude of the applied magnetic field varied from 0mT up to 70mT.

A Micron Optics-sm125-200 with wavelength accuracy of 10 pm over a spectral range of 1520-1580 nm was used to interrogate the cavity and the FBG. The reflected signal was monitored in both fibers.

3. RESULTS

The interferometric signals from the in-line FPIs (single mode fiber–capillary fiber–single mode fiber structures) were investigated. The measured signals presented the typical modulation of FPIs, as shown in Fig 2a for a cavity of length equal to 60 μm . The Free Spectral Range for the interference signal was related to the air cavity length through the relation,

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2nL} \quad (1),$$

where λ_0 is the central wavelength of the transmission peak, n is the refractive index of the reflective surfaces and L is the cavity length.

The characterization of the cavities regarding temperature and axial strain sensitivity showed that the cavities were more sensitive to strain than to temperature, as expected. A cavity with approximately 150 μm of length, showed sensitivity to axial strain equal to 4.8 pm/ μe (in a range from 0 μe to 1870 μe). The value of the sensitivity of the FBG to longitudinal strain reported in literature is about 1 pm/ μe for axial strain^{7,17}.

As for temperature, the cavity was found to have sensitivity equal to 1.07 pm/ $^{\circ}\text{C}$ (in the range from 45 $^{\circ}\text{C}$ to 200 $^{\circ}\text{C}$).

These results are consistent with typical values reported in literature: around $5\text{ pm}/\mu\epsilon$ for axial strain for cavities with length less than $60\text{ }\mu\text{m}$ ¹⁴⁻¹⁵, and $1\text{ pm}/^\circ\text{C}$ for temperature⁶.

For comparison purposes, temperature sensitivity of typical FBGs was measured in the same oven in which the cavities were characterized. The values found were similar to values reported in literature: about $15\text{ pm}/^\circ\text{C}$ at 1550 nm for temperature⁵ in the range from 45°C to 200°C . The typical strain sensitivity reported in literature for FBGs is about $1\text{ pm}/\mu\epsilon$ for axial strain^{7,17}.

As the results above showed, the in-line FPIs used in this paper are over 5 times more sensitive to axial strain and over 10 times less sensitive to temperature as typical FBGs. These results indicate that these cavities would be more efficient for magnetic field sensing.

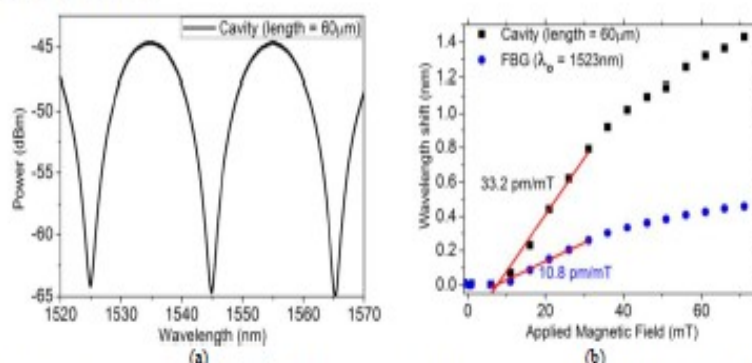


Figure 2. a) Output signal from the in-line FPI for an air cavity of length equal to $60\text{ }\mu\text{m}$. b) Wavelength shift for the same cavity (solid black squares) and for an FBG (solid blue circles) as a function of the applied magnetic field, with the optical fibers bonded to a $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ Terfenol-D cuboid. As the linear fittings (red lines) show, the cavity exhibited a sensitivity equal to 33.2 pm/mT , more than 3 times that of the FBG (10.8 pm/mT).

Fig. 2a shows the reflected signal for a cavity of length equal to $60\text{ }\mu\text{m}$. The signal shown in Fig 2a was obtained before the cavity was glued to the Terfenol-D sample, i.e. no magnetic field applied.

With the $60\text{ }\mu\text{m}$ long cavity and a typical FBG (central wavelength at 1523 nm) bonded to a $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ Terfenol-D cuboid, the Terfenol-D sample was placed in the setup for testing and characterizing the magnetic field sensor, as described previously. When the magnetic field was turned on, the magnetostriction property of the Terfenol-D caused it to shift, which in turn applied axial strain to the optical fibers glued to it. With this, the central wavelength of the peaks shown in Fig. 2a shifted in wavelength, as did the central wavelength of the FBG. Fig. 2b shows the signals obtained for the cavity (solid black squares) and the FBG (solid blue circles) for applied magnetic field varying from 0 mT to 70 mT .

A linear fitting (red lines) of the data in the range from 6 mT to 30 mT revealed that, for that range, the sensitivity of the proposed sensor with a $60\text{ }\mu\text{m}$ long cavity was equal to 33.2 pm/mT , more than 3 times that of the FBG (10.8 pm/mT).

4. CONCLUSIONS

An in-line FPI based on capillary optical fiber and Terfenol-D was investigated as a magnetic field sensor. The FPI consisted of a simple component made by a section of capillary optical fiber spliced between two pieces of single mode optical fiber. The response of a typical cavity of length approximately equal to $150\text{ }\mu\text{m}$ was about 5 times higher than the response of a typical FBG to axial strain variations, and about 10 times lower than the response of a typical FBG to temperature variations. The lower response to temperature of this type of FPI is advantageous in environments with changes in temperature. Regarding the performance of the proposed sensor for magnetic field monitoring, the sensitivity obtained was about 3 times higher than the sensitivity of a typical FBG.

Currently, testing is being carried out in order to access the dependence of the sensor performance with cavity length. Furthermore, the effectiveness of the sensor when the optical fiber is bonded to the surface of the Terfenol-D cuboid, as opposed to being embedded in it, will be investigated.

We believe that the in-line FPI based on capillary optical fiber and Terfenol-D presented here is a strong candidate for applications in magnetic field remote sensing in large structures, such as pipelines, bridges, electrical power transmission towers, as well as in measuring currents.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful to Prof Walter Margulis from ACREO Fiberlab group, Sweden, for useful discussions and for supplying us with ACREO's capillary optical fiber. Also we thank CNPq for financial support.

REFERENCES

- [1] Fang, Z., Chin, K. K., Qu, R., and Cai, H., [Fundamentals of Optical Fiber Sensors], John Wiley & Sons, Inc. publishers, Hoboken-New Jersey, Chapter 2 (2012).
- [2] Yi, B., Chu, B. C. B., and Chiang, K. S., "Temperature compensation for a fiber-bragg-grating-based magnetostrictive sensor," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 36 (2003).
- [3] Liu, H. L., Tam, H. Y., Lo, C. Y., Or, S.W., "A Novel High Frequency Magnetostrictive Composite-Fiber Bragg Grating Sensor," In *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (CD)*, Anaheim, CA, USA, March 25, 2007.
- [4] Quintero, S. M. M., Braga, A. M. B., Weber, H. I., Bruno, A. C., and Araújo, J. F. D. F., "A Magnetostrictive Composite-Fiber Bragg Grating Sensor," *Sensors*, 10, 8119-8128 (2010).
- [5] Chen, Q. and Lu, P., [Fiber Bragg Grating and their applications as temperature and humidity sensors], Nova Science Publishers, Inc., Canada, Chapter 6 (2008).
- [6] Tanaka, N., Okabe, Y. and Takeda, N., "Temperature -compensated strain measurement using fiber Bragg grating sensors embedded in composite laminates," *Smart. Mater. Struct. Papers* 12, 940-946 (2003).
- [7] Guan, B. O., Tam, H. Y., Tao, X. M. and Dong, X. Y., "Simultaneous Strain and Temperature Measurement Using a Superstructure Fiber Bragg Grating," *Proc. IEEE Photonics Technology Letters* 12(6), 675-677 (2000).
- [8] Zhu, T., Wu, D., Liu, M. and Duan, D. W., "In line-fiber optic interferometric sensors in single-mode fiber," *Sens. Papers* 12, 10430-10449 (2012).
- [9] Sirkis, J. S., Brennan, D. D., Putman, M. A., Berkoff, T. A., Kersey, A. D. and Friebele, E. J. "In line fiber étalon for strain measurement," *Opt. Lett. Papers* 18(22), 1973-1975 (1993).
- [10] Frazão, O., Aref, S. H., Baptista, J. M., Santos, J. L., Latifi, H., Farahi, F., Kobelke, J. and Schuster, K. "Fabry-Pérot cavity based on a suspended-core fiber for strain and temperature measurement," *Proc. IEEE Photon. Technol. Lett.* 21(17), 1229-1231 (2009).
- [11] Wu, C., Fu, H. Y., Qureshi, K. K., Guan, B. -O. and Tam, H. Y. "High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry-Pérot interferometer based on photonic crystal fiber," *Opt. Lett. Papers* 36(3), 412-414 (2011).
- [12] Wang, Y., Wang, D. N., Wang, C. and Hu, T. "Compressible fiber optic micro-Fabry-Pérot cavity with ultra-high pressure sensitivity," *Opt. Exp. Papers* 21(12), 14084-14089 (2013).
- [13] Favero, F. C., Bouwmans, G., Finazzi, V., Villatoro, J. and Pruneri, V. "Fabry-Pérot interferometers built by photonic crystal fiber pressurization during fusion splicing," *Opt. Lett. Papers* 36(21), 4191-4193 (2011).
- [14] Liu, S., Wang, Y., Liao, C., Wang, G., Li, Z., Wang, Q., Zhou, J., Yang, K., Zhong, X., Zhao, J. and Tang, J. "High-sensitivity strain sensor based on in-line improved Fabry-Pérot interferometer," *Opt. Lett. Papers* 39(7), 2121-2124 (2014).
- [15] Zhou, A., Qin, B., Zhu, Z., Zhang, Y., Liu, Z., Yang, V. and Yuan, L. "Hybrid structured fiber-optic Fabry-Pérot interferometer for simultaneous measurement of strain and temperature," *Opt. Lett. Papers* 39(18), 5267-5270 (2014).
- [16] Pacheco, C. J. and Bruno, A. C., "The effect of shape anisotropy in giant magnetostrictive fiber Bragg grating sensors," *Meas. Sci. Technol.* 21, 065205-065210 (2010).
- [17] Haase, K., "Strain sensors based on bragg gratings," *Proc. IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference Cultivating metrological knowledge*, 1-8 (2007).



Curitiba, 20 May 2015

to
Paula Gouvea
Rio de Janeiro-RJ, Brazil

We are glad to inform your work 9634-255, "Magnetic field sensing with an in-line Fabry-Perot interferometer based on capillary optical fiber and Terfenol-D" has been accepted for presentation at the 24th International Conference on Optical Fiber Sensors – OFS-24, to be held in Curitiba (Brazil) from 28 September to 2 October, 2015. Details on the presentation type will be provided in the Conference website opportunely.

Registration to OFS-24 is now open at the conference site (www.ofs24.org). We ask you to register as soon as possible, confirming your participation, so that we can design the final program of the conference. We also remind you to upload your SPIE copyright transfer form using the submission site (use the same submission link on the conference site).

If you receive a message with Reviewer's comments, please observe the suggestions when preparing your presentation.

We are looking forward to meeting you in Curitiba.

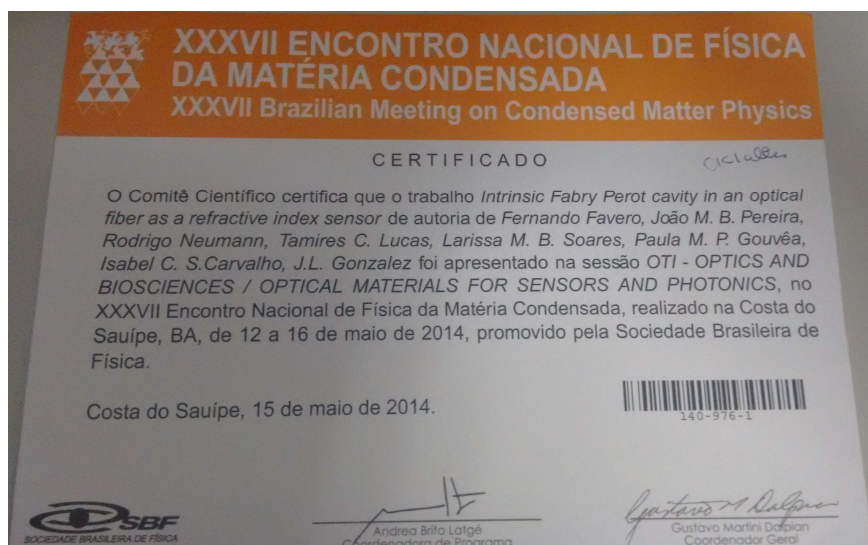
With our best wishes,

Hypolito José Kalinowski José Luis Fabris Wojtek J. Bock
(OFS-24 General Chair) (OFS-24 Technical Co-Chairs)

End: Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Av. Sete de Setembro, 3165 80230-901 Curitiba, PR
Tel (41) 3310-4608/4689 cel (41) 9975-1573 e-mail: hjkalin@utfpr.edu.br



- Apresentação de trabalho no XXXVII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2014, Bahia:



- Apresentação de trabalho no XXXVIII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, 2015, Foz do Iguaçu:

