



**Ana Rita da Silva
Rocha Frias**

**Sensores óticos baseados em micro cavidades em
fibra ótica**



**Ana Rita da Silva
Rocha Frias**

**Sensores óticos baseados em micro cavidades em
fibra ótica**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica de Doutora Maria Rute de Amorim e Sá Ferreira André, Investigadora Auxiliar com agregação do Laboratório Associado CICECO e do Centro de Investigação de Materiais Cerâmicos e Compósitos e do Doutor Paulo Sérgio de Brito André, Professor Associado com agregação do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.

o júri

presidente

Professora Doutora Teresa Maria Fernandes Rodrigues Cabral Monteiro

Professora Associada com Agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Doutor Pedro Alberto da Silva Jorge

Investigador Sénior do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores – INESC, Porto

Doutora Maria Rute de Amorim e Sá Ferreira André

Investigadora Auxiliar com Agregação do Laboratório Associado CICECO e do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e sem menosprezar as restantes contribuições gostaria de destacar: em primeiro lugar os meus orientadores, Professora Doutora Maria Rute de Amorim e Sá Ferreira André e Professor Doutor Paulo Sérgio de Brito André por toda a cooperação e conselhos dados durante todas as fases do trabalho. Aos colegas do Instituto de Telecomunicações Mestre Maria de Fátima Domingues e Doutor Paulo Antunes pelo apoio e ajuda na parte experimental. E a alguns colegas que, por diferentes motivos fizeram com que este projeto fosse concretizado. Gostaria de entre estes destacar o Edgar, o Mário, o Alexandre, o Bruno, o Roberto e todos os outros que foram estando presentes durante a realização deste trabalho. O apoio do Instituto de Telecomunicações é, também, agradecido. O agradecimento mais importante é dirigido à família, em especial aos meus pais e avós pela presença e apoio.

Palavras-chave

Sensores, Fibra ótica, Interferómetros, *Fabry – Perot*.

Resumo

Neste trabalho é proposto um sensor de deformação construído com base em micro cavidades óticas geradas pelo efeito de fusível. Este tipo de sensor beneficia das principais vantagens da tecnologia ótica, tais como a possibilidade de medições remotas e em diferentes tipos de ambientes até então não permitidas pelos sensores eletrônicos convencionais. O método de produção utilizado permite a obtenção de sensores óticos com sensibilidades comparáveis com as reportadas na literatura com a vantagem de ser muito mais barato.

Keywords

Sensors, Optical fiber, Interferometers, *Fabry – Perot*.

Abstract

In this work we proposed a strain sensor based on micro cavities produced by the catastrophic fuse effect. This type of sensor benefits from the main advantages of optical technology such as remote sensing in different and hostile environments, not allowed by traditional electronic sensors. The production method allows low-cost optical sensors with similar sensitivity to that already reported in the literature.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Acrónimos	vii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Organização do documento	4
1.3 Contribuições originais	5
2 Estado de arte	7
3 Fundamentação teórica e princípios de funcionamento	17
3.1 Interferómetros de duas ondas	17
3.2 Interferómetros de múltiplas ondas	19
3.2.1 Princípios de funcionamento de uma cavidade de Fabry-Perot	20
4 Produção dos sensores	25
4.1 Efeito de fusível	25
4.2 Desenvolvimento dos sensores	28
4.2.1 Construção das cavidades por efeito de fusível	28
4.2.2 Produção das cavidades interferométricas por fusão	29
4.3 Caracterização dos sensores de deformação	33
5 Monitorização de deformação mecânica	37
5.1 Preparação e implementação do sensor	38
6 Conclusões e perspetivas futuras	43
Bibliografia	45

Lista de Figuras

1.1	Previsão de mercado do consumo de sensores de fibra ótica. Adaptado de [22].	3
2.1	Representação esquemática de 3 tipos de sensores: (a) Sensor pontual, (b) Sensor distribuído e (c) Sensor quasi-distribuído. Adaptado de [11].	8
2.2	Esquema de um sensor FPI (a) extrínseco e (b) intrínseco, onde a designa a largura da cavidade e R_1 e R_2 as superfícies refletoras da fibra e da cavidade, respetivamente. Adaptado de [10].	10
2.3	Diagrama esquemático de um sistema para deteção de vibrações. Adaptado de [16].	11
2.4	Diagrama esquemático de um sistema utilizado como acelerómetro. Adaptado de [16].	11
2.5	Sistema modular do tipo transmissão e reflexão num FPI em fibra ótica. Adaptado de [16].	12
2.6	Sistema de monitorização utilizando um EFPI e uma fonte de luz branca sintetizada. Adaptado de [16].	12
2.7	Sistema de monitorização utilizando um EFPI com um sistema passivo de processamento de sinal. Adaptado de [16].	13
3.1	Esquema dos interferómetros de (a) Michelson e de (b) Mach-Zehnder em fibra ótica. A vermelho está representada a região de deteção. Adaptado de [64].	18
3.2	Esquema dos interferómetros de Sagnac em fibra ótica. A vermelho está representada a região de deteção. Adaptado de [64].	19
3.3	Esquema do interferómetro de <i>Fabry – Perot</i> em fibra ótica. Adaptado de [64].	20
3.4	<i>a)</i> Gráfico da simulação do comportamento da função transferência do sinal ótico refletido. <i>b)</i> Ampliação do gráfico <i>a)</i>	23
4.1	<i>a)</i> e <i>b)</i> Fotografias da passagem da zona de fusão numa fibra SMF, o retângulo assinala a região de propagação [71]. <i>c)</i> Imagem de uma instalação ótica. Retirada de http : //qualiteto.com.br/galeria/images/15.jpg acedido em 11/06/2012.	26

4.2	Imagens de microscopia ótica de fibra dopada com Er^{3+} após a propagação do efeito de fusível gerado com os seguintes valores de potências: a) 2,0 W, b) 3,0 W e c) 4,0 W. As figuras a'), b') e c') são ampliações das imagens a), b) e c), respetivamente. Adaptado de [73].	27
4.3	Variação do comprimento dos eixos maior e menor da bolha formada numa fibra SMF em função da potência do sinal ótico. A linha é um guia visual. . .	27
4.4	Esquema da montagem experimental utilizada para gerar o efeito de fusível. .	28
4.5	a) Imagem de microscopia ótica da bolha formada no ponto de finalização do fenómeno, gerado por uma potência de 3,0 W, numa fibra SMF. b) e c) mostram ampliação de $5\times$ da região i) e ii).	29
4.6	Imagem de microscopia ótica de uma fibra SMF clivada nas extremidades de uma bolha.	29
4.7	Imagem de microscopia ótica da cavidade originada na região de fusão entre a fibra SMF funcional e a fibra danificada.	30
4.8	Imagem de microscopia ótica de duas cavidades, a) e b), formadas após o processo de fusão da fibra danificada na região da bolha de finalização com a fibra funcional.	30
4.9	Espetros de reflexão (a) e (b) das respetivas cavidades apresentadas na figura 4.8. 1 e 2 referem-se aos espetros obtidos quando a radiação entra à direita e à esquerda da bolha, respetivamente.	31
4.10	Imagens de microscopia ótica das cavidades interferométricas produzidas através da utilização da sequencia periódica de bolhas originada pelo efeito de fusível. A linha da legenda corresponde a $125 \mu m$	31
4.11	Imagens de microscopia ótica das cavidades interferométricas produzidas através da utilização da sequencia periódica de bolhas originada pelo efeito de fusível. A linha da legenda corresponde a $125 \mu m$	32
4.12	Esquema do procedimento experimental utilizada para a obtenção dos espetros de reflexão.	34
4.13	Espetros de reflexão das cavidades interferométricas produzidas através da utilização da sequência periódica de bolhas originada pelo efeito de fusível. . . .	35
5.1	Fotografia da montagem experimental utilizada para os testes de deformação. (1) Plataforma fixa, (2) Parafuso micrométrico e (3) Plataforma variável. . .	38
5.2	Espetros de reflexão obtidos para diferentes valores de deformação aplicada ao sensor.	39
5.3	Variação do comprimento de onda em função da deformação aplicada. As linhas a vermelho representam o melhor ajuste linear com os respetivos coeficientes de correlação $R_1^2 = 0,98828$, $R_2^2 = 0,98817$ e $R_3^2 = 0,98288$	40

Lista de Tabelas

2.1	Valores típicos para a sensibilidade à deformação de diferentes tipos de sensores utilizando fibra SMF. (<i>a</i> designa o valor obtido em fibras de cristais fotónico (PCF)).	14
3.1	Expressões funcionais para a diferença de fase ótica para diferentes configurações.	19
4.1	Características morfológicas das cavidades produzidas apresentadas na figura 4.11	33
4.2	Valores do intervalo espectral onde o espectro é periódico e com maior amplitude, FSR e rejeição máxima no intervalo selecionado para as cavidades apresentadas na figura 4.11 e para outras duas cavidades <i>g</i> e <i>h</i>	36
5.1	Dados da distância entre máximos no intervalo de 1554 a 1566 <i>nm</i> retirados do espectro da figura 5.2 e valores das sensibilidades para o sensor estudado obtidas do gráfico 5.3.	41

Lista de Acrónimos

CCMI Core cladding mode interferometer

EFPI Extrinsic Fabry-Perot Interferometer

FBG Fiber Bragg Gratings

FOG Fiber Optics Gyroscope

FPI Fabry-Perot Interferometer

FSR Free Spectral Range

HCF Hollow Core Fiber

IFPI Intrinsic Fabry-Perot Interferometer

LPG Long Period Gratings

MZI Mach-Zehnder Interferometer

PCF Photonic Crystal Fiber

SMF Single Mode Fiber

SPR Surface Plasmon Resonance

Capítulo 1

Introdução

A primeira utilização de fibra ótica como elemento sensor remonta à década de 60 [1], e da década de 80 até à atualidade, o interesse por este tipo de tecnologia tem sido crescente [2]. A motivação por detrás deste interesse continua a ser a mesma: a tecnologia baseada em fibra ótica fornece a base para a produção de sensores óticos com características vantajosas quando comparadas com as dos sensores convencionais de cobre. Com a utilização de fibra ótica, passaram a ser possíveis ligações flexíveis eliminando praticamente todos os problemas de desalinhamento e permitindo, ao mesmo tempo, a monitorização remota [3].

Um sensor de fibra ótica pode ser definido como um aparelho de medida em que o parâmetro físico, químico ou biológico a ser medido interage com o sinal ótico guiado pela fibra [4]. Nos sensores de fibra ótica, se as propriedades físicas da fibra forem alteradas, as características do sinal ótico que nela se propaga serão modificadas, possibilitando a determinação do parâmetro físico que originou a alteração do sinal nela propagado. A versatilidade destes sensores é assinalável, uma vez que o sinal ótico é caracterizado por um conjunto de parâmetros independentes donde se destaca a intensidade, a frequência (ou comprimento de onda), e a fase, todos potencialmente sensíveis às diferentes grandezas físicas a medir [3]. Mais ainda, as técnicas de multiplexagem elétrica e ótica possibilitam a utilização de um elevado número de sensores ao longo da mesma fibra ótica [5].

As principais características dos sensores óticos advêm das características da própria fibra. A utilização de fibra ótica como elemento sensor permite o desenvolvimento de: sensores de pequeno porte (devido ao tamanho e peso reduzido da fibra), com elevada flexibilidade, com curto tempo de reação e boa estabilidade [6]; sensores com bom desempenho a elevadas temperaturas, com elevada largura de banda e com robustez física ao choque e às vibrações [7]; sensores com elevada reprodutibilidade uma vez que as propriedades físicas da sílica são conhecidas e pouco se degradam [8]; sensores elétrica e quimicamente passivos e imunes a interferências eletromagnéticas, permitindo a sua utilização em ambientes hostis e corrosivos [9]; sensores remotos, com baixas perdas de propagação, baixo fator de forma, elevada precisão e com a possibilidade de várias medições em simultâneo *in situ* [10]; sensores isoladores, o que os torna bem sucedidos em várias aplicações pois eliminam correntes de condução

em ambientes de alta tensão e apresentam compatibilidade com uma grande variedade de materiais [11]; e sensores com baixo custo de produção. Quando comparados com os sensores de cobre convencionais, estes apresentam, também, uma elevada gama dinâmica e resolução que permitem detetar pequenas variações do parâmetro a monitorizar [5].

Os sensores de fibra ótica tornaram-se, assim, numa das tecnologias mais promissoras de medição de parâmetros físicos e químicos, tais como: deformação [12], pressão hidrostática [13], temperatura [14], índice de refração [15], entre outros [10]. Contudo, a tecnologia de monitorização baseada em fibra ótica enfrentou sempre o problema da competição com a indústria dos sensores convencionais que, no geral, fornecem boas características de desempenho e fiabilidade.

Os sensores convencionais, baseados em princípios piezoelétricos e capacitivos, vêm as suas aplicações limitadas devido ao problema do isolamento elétrico. A utilização destes sensores é, também, restringida pela presença de tensões elevadas (superiores a 40 kV), campos magnéticos elevados (superiores a 5 T) e na presença de atmosferas agressivas (por exemplo, H_2 ou SF_6) que podem originar disrupções elétricas. A utilização de instrumentos baseados em fibra ótica torna-se, de forma inevitável, numa alternativa a este tipo de sensores [16].

Os sensores de fibra ótica podem ser divididos em duas categorias: intrínsecos e extrínsecos. Nos sensores intrínsecos, a variação do parâmetro de interesse ocorre diretamente na fibra alterando uma ou mais propriedades do sinal ótico guiado, ou seja, o elemento sensor é a própria fibra. Nos sensores extrínsecos, a variação do parâmetro de interesse ocorre numa região externa à fibra, isto é, a fibra ótica é utilizada apenas como guia de onda para o transporte do sinal ótico de e para a região de interação.

Tendo em conta a característica do sinal ótico utilizado para a medição dos parâmetros de interesse, os sensores de fibra ótica podem, também, ser subdivididos de uma forma geral em sensores de intensidade e sensores interferométricos. Os sensores de intensidade são, normalmente, construídos em fibra multimodo e baseiam-se na modulação da intensidade do sinal ótico que chega ao detetor. Devido aos efeitos de dispersão modal e cromática algumas das características do sinal ótico não se mantêm durante longas distâncias, onde a intensidade é o único parâmetro que pode ser modulado. Os sensores interferométricos são construídos em fibras monomodo (SMF) e fazem uso dos mecanismos de interação baseados na modulação do comprimento de onda e da fase. No entanto, um sinal ótico proveniente de um sensor interferométrico que opera, por exemplo, com base na modulação do comprimento de onda, continua a ser proporcional à intensidade do sinal que chega ao sistema detetor [17, 18].

Apesar do considerável esforço que tem vindo a ser realizado na investigação, continua a ser necessário o desenvolvimento de técnicas de monitorização mais eficientes, que podem ser disponibilizadas a custo reduzido [19].

Esta dissertação foca-se no estudo de interferómetros de *Fabry – Perot* convencionais em fibra ótica construídos em fibras SMF e na construção de cavidades interferométricas, de baixo custo de produção. Para além disto, é apresentada uma abordagem para uma nova tecnologia de produção de sensores baseados em interferómetros de *Fabry – Perot* em fibra ótica bem como as suas vantagens e potenciais aplicações [20].

1.1 Motivação

Nas últimas décadas a fibra ótica tem sido vastamente utilizada na indústria das telecomunicações como meio de transporte de informação. Até à data, têm vindo a ser realizados vários estudos com o objetivo de construir sensores capazes de monitorizar temperatura, deformação, pressão, rotação mecânica, deslocamento, índice de refração, entre outros [10]. Para além disto, a capacidade de monitorização utilizando fibra ótica tem melhorado devido à utilização de várias tecnologias tais como as redes de *Bragg*, interferómetros, espalhamento de *Raman/Brillouin*, ressonância de plasmões de superfície (SPR) [11]. Atualmente, os sensores de fibra ótica são utilizados para monitorização em tempo real da deformação de aviões, navios, pontes e infraestruturas de engenharia civil [21]. Têm também sido comercializados sensores em fibra ótica para aplicações na área da saúde e para a monitorização de materiais compósitos e processos químicos quantitativos [7]. Apesar do mercado dos sensores de fibra ótica representar uma pequena parte do mercado global de sensores, já não existem dúvidas quanto ao seu futuro potencial industrial [10].

A empresa de consultoria *ElectroniCast* realizou um estudo de mercado que prevê o consumo global de sensores de fibra ótica. O valor do consumo de sensores é apresentado na figura 1.1.

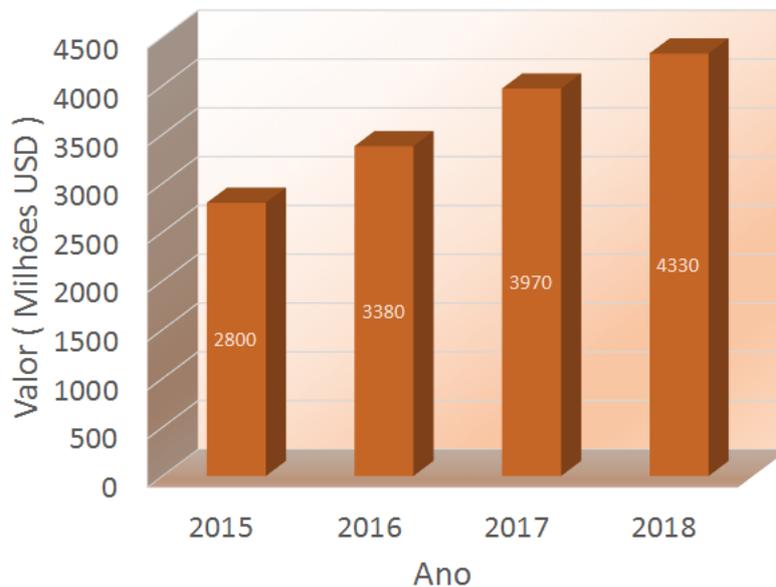


Figura 1.1: Previsão de mercado do consumo de sensores de fibra ótica. Adaptado de [22].

Entre 2015 e 2018, prevê-se que o valor do consumo (utilização) de sensores de fibra ótica vai crescer a uma taxa anual média de 18 %, de 2800 até 4330 milhões de dólares americanos. Os dados aqui apresentados foram obtidos para os mercados da América (América do Norte, Central e do Sul), Europa, Médio Oriente, África, Ásia Oriental e Oceânia. Para áreas de aplicações como processos de manufatura/indústria, construção civil, mili-

tar/aeroespacial/segurança, medições em telecomunicações, ciências biomédicas, indústria petroquímica/energética e indústria automóvel.

Recentemente, têm sido desenvolvidas técnicas baseadas em fibra ótica para a produção de uma vasta gama de sensores, fornecendo uma base para uma tecnologia de deteção eficiente que possa competir com os métodos tradicionais, especialmente em áreas nicho. É aqui que reside o sucesso dos sensores de fibra ótica, na intervenção em situações de difícil medição onde os sensores convencionais não são bem-sucedidos. Existe a expectativa de que devem ser produzidos com um custo relativamente reduzido ou competitivo e utilizando uma gama de tecnologias desenvolvidas pela investigação no ramo das telecomunicações óticas [11].

Desta forma, os interferómetros de *Fabry-Perot* (FPI) representam uma categoria de interferómetros versáteis, para a aplicação em sensores, uma vez que podem ser implementados em muitas configurações diferentes. Devido à sua configuração, este tipo de interferómetros quando comparados com outros tipos, pode ser facilmente implementado em fibra ótica. Contudo, a produção em massa de sensores à micro escala dentro de fibra ótica é bastante difícil. Com o intuito de reduzir o custo e a dificuldade de produção deste tipo de sensores foram produzidos sensores óticos baseados em cavidades de *Fabry-Perot* utilizando fibra ótica previamente danificada pelo efeito de fusível. Este fenómeno é caracterizado pela destruição da fibra e deixa uma cadeia periódica de bolhas na região do núcleo a partir das quais foram desenvolvidas as cavidades.

1.2 Organização do documento

O presente documento foi estruturado em seis capítulos principais. Ao longo destes será apresentada uma análise dos sensores de fibra ótica desenvolvidos, o seu enquadramento com os sensores atuais, o método de produção bem como a sua caracterização e utilização como sensores de deformação.

Deste modo, neste primeiro capítulo, para além do enquadramento do trabalho são também apresentadas as motivações que contribuíram para a realização deste documento, assim como os principais objetivos, a organização do documento e, para finalizar, as principais contribuições do trabalho realizado.

No segundo capítulo, estado de arte, descreve-se o enquadramento atual da tecnologia associada aos sensores de fibra ótica. Este capítulo faz referência aos principais desenvolvimentos ocorridos nos últimos anos relativos aos sensores de fibra ótica.

No terceiro capítulo é exposta uma abordagem teórica dos princípios de funcionamento dos principais interferómetros de duas ondas e de múltiplas ondas, respetivamente, com principal destaque para os FPI, uma vez que serão os utilizados para a modulação do comportamento dos sensores desenvolvidos.

No quarto capítulo é descrito o método de produção dos sensores bem como todo o processo de caracterização dos mesmos.

No quinto capítulo é apresentada uma aplicação do sensor desenvolvido no âmbito deste

trabalho bem como a análise dos dados obtidos.

Para finalizar, no sexto capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado e sugeridas algumas linhas orientadoras de investigação futura, consideradas relevantes para o enriquecimento do trabalho apresentado.

1.3 Contribuições originais

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação faz parte da seguinte lista de comunicações:

F. Domingues, A. R. Frias, P. Antunes, R. A. S. Ferreira, P. S. André. Observation of the fuse effect discharge zone nonlinear velocity regime in Erbium doped fibres. *Electron. Lett.* 48(20), 1295–1296 (2012). Work selected as feature article (H. Dyball, *ELECTRONICS LETTERS*, 27th September 2012 Vol.48 No.20, 1245.)

F. Domingues, A. Rocha, P. Antunes, A. R. Frias, R. A. S. Ferreira, P. S. André. Evaluation of the Fuse Effect Propagation Velocity in Bend Loss Insensitive Fibers. 2012, 17th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2012) Technical Digest, 978-1-4673-0978-3/12/\$31.00 ©2012 IEEE, 799-800.

F. Domingues, A. R. Frias, P. Antunes, A. O. P. Sousa, R. A. S. Ferreira, P. S. André. Lighting the fuse. Written by H. Dyball, *ELECTRONICS LETTERS*, 27th September 2012 Vol.48 No.20, 1245 (2012).

Artigos submetidos

F. Domingues, P. Antunes, N. Alberto, A. R. Frias, R. A. S. Ferreira. Sensors based on recycled optical fibers destroyed by the catastrophic fuse effect. Artigo submetidos à *Proceedings of SPIE* em 2014.

M. F. Domingues, P. Antunes, N. Alberto, A. R. Frias, A. R. Bastos, R. A. S. Ferreira and P. S. André. Enhanced sensitivity high temperature optical fiber FPI sensor created with the catastrophic fuse effect. Submetido à revista *Electronics Letters* em 2014.

F. Domingues, P. Antunes, N. Alberto, A. R. Frias, R. A. S. Ferreira, P. André. Cost effective refractive index sensor based on optical fiber micro cavities produced by the catastrophic fuse effect. Submetido à revista *Measurement* em 2014.

Conferências

P. S. André, F. Domingues, P. Antunes, N. Alberto, A. R. Frias, R. A. S. Ferreira. Sensors based on recycled optical fibers destroyed by the catastrophic fuse effect. II International Conference on Applications of Optics and Photonics (AOP), 26-30/04, 2014, Aveiro, Portugal. Oral convidada

F. Domingues, A. Rocha, P. Antunes, A. R. Frias, R. A. S. Ferreira, P. S. André. Evaluation of the Fuse Effect Propagation Velocity in Bend Loss Insensitive Fibers. 17th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2012), 2-6/07, 2012, Busan, Coreia. Oral

M. Domingues, A. M. Rocha, P. S. André, A. Frias, R. A. S. Ferreira. Temperature Monitoring of Bend Insensitive Fibers After the Fuse Effect Propagation. SENSORS Meeting, Imaging and Applied Optics Congress, 24-28/06, 2012, Montray- CA, Estados Unidos da América. Oral

Capítulo 2

Estado de arte

Nos últimos 50 anos, a monitorização ótica tem sido uma das aplicações mais poderosas e melhor sucedidas da fibra ótica, resultando da combinação da tecnologia da fibra ótica com a tecnologia dos sensores [23]. Os sensores de fibra ótica modernos devem o seu desenvolvimento a dois avanços científicos relevantes da década de 60, o aparecimento do *laser* (1960) [24] e as fibras óticas com reduzida atenuação (1966). Ambos tiveram origem em trabalhos desenvolvidos nas décadas precedentes como é o caso do antecessor do laser (o maser) [25] e as fibras de baixa transparência utilizadas em aplicações médicas e industriais. Assim, na década de 70, foram efetuadas as primeiras experiências em sensores de fibra ótica. Este trabalho pioneiro rapidamente levou ao aumento do número de grupos de investigação interessados, levando a um desenvolvimento continuado do tema [11].

Desde 1980, foram emergindo imensos sensores de fibra ótica capazes de medir parâmetros físicos, químicos e até mesmo biológicos. [26]. Muitos destes foram transformados em dispositivos comerciais durante a última década. Inicialmente, a introdução dos sensores óticos no mercado foi conduzida pelas vantagens que estes apresentavam. Os sensores óticos permitiram explorar a existência de componentes óticos e optoelectrónicos (fibras, fontes, detetores, conetores, etc.) desenvolvidos para a aplicação em comunicações óticas, o que permitiu, também, reduzir consideravelmente o custo de produção da tecnologia. Tendo em conta a baixa atenuação das fibras óticas, estas permitem transmitir informação o que possibilitou o aparecimento da deteção remota, onde a cabeça sensora pode estar a quilómetros de distância da unidade de análise e a informação pode viajar entre ambos. Também, passou a ser possível fazer medições distribuídas ao longo da fibra, para casos em que é necessário conhecer o valor do mensurado ao longo de uma extensão [11].

Nas últimas décadas, a tecnologia das redes em fibras óticas incluindo as redes de *Bragg* (FBG) e as redes de longo período (LPG), têm atraído a atenção da comunidade científica [27]. No entanto, os sensores de fibra ótica baseados em cavidades interferométricas, também, têm vindo a ser muito utilizados devido às suas características próprias, enumeradas no capítulo 1.

As cavidades interferométricas em fibra ótica têm vindo a ser estudadas devido às suas

potenciais aplicações em diversas áreas da ciência e tecnologia [28]. Até à data, interferómetros como os de *Fabry – Perot*, *Mach – Zehnder* [29], *Michelson* [30] e *Sagnac* [31], têm sido implementados em fibra ótica. Na literatura, podem ser encontradas diversas técnicas de produção deste tipo de interferómetros [6, 10, 32, 33]. De entre os diversos interferómetros, os mais populares são os FPI uma vez que estes apresentam características óticas que permitem a medição de parâmetros físicos como é o caso da pressão, deformação, vibração, temperatura e índice de refração [34]. Uma vez que as cavidades interferométricas são capazes de medir os parâmetros mencionados, estas passaram a ser utilizadas como elementos sensores em fibra ótica.

Existem diferentes esquemas de medição utilizando sensores de fibra ótica que permitem a medição num único ponto da fibra ótica ou ao longo de vastas distâncias em pontos distribuídos ao longo da fibra. Na figura 2.1 é apresentada uma representação esquemática das três configurações mais utilizadas [11].

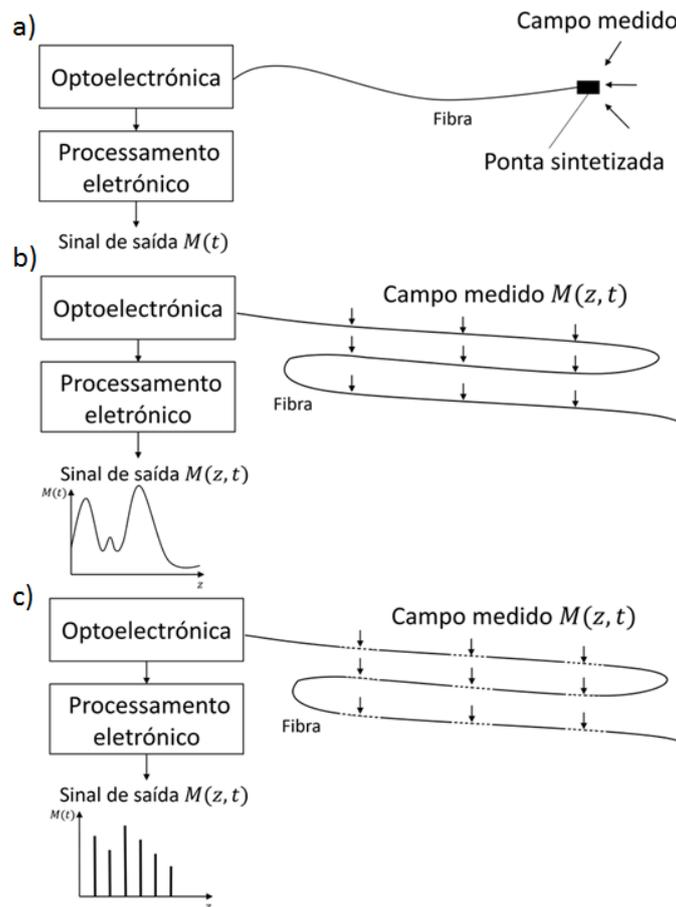


Figura 2.1: Representação esquemática de 3 tipos de sensores: (a) Sensor pontual, (b) Sensor distribuído e (c) Sensor quasi-distribuído. Adaptado de [11].

A figura 2.1 (a) mostra um exemplo de um sensor pontual. Neste tipo de sensores a medição ocorre num ponto definido da fibra ótica, geralmente, este ponto encontra-se perto

do ou no final da fibra [9]. Existem muitos tipos de sensores baseados nesta configuração, como é o caso da maior parte dos sensores baseados em FPI, com aplicações que podem variar desde sensores de nível, sensores com cabeças quimicamente sensíveis para a monitorização de diferentes espécies e até sensores com estruturas ressonantes na extremidade da fibra para a medição de pressão ou de aceleração [11]. De forma alternativa, os dispositivos sensores podem ser desenhados de forma a poderem discriminar o parâmetro ao longo do comprimento da fibra, num processo designado por monitorização distribuída, ilustrado na figura 2.1 (b). Neste tipo de sensores a fibra ótica atua como o meio sensor, que pode ser utilizado para discriminar diferentes posições do parâmetro mensurado ao longo da fibra, como é o caso dos sensores distribuídos de *Raman* e de *Brillouin* [9]. Este princípio tem vindo a ser utilizado na medição da temperatura através de efeitos não lineares em fibra ótica, como é o caso do espalhamento de *Raman* e de *Brillouin*, ou em alguns tipos de sensores de tensão/deformação. O terceiro tipo de sensores aqui mencionado está, de certa forma entre os dois tipos de sensores acima apresentados, uma vez que a informação medida é obtida em determinados pontos bem definidos ao longo do comprimento da fibra ótica, figura 2.1 (c). Este tipo de estruturas caracteriza-se por um número limitado de regiões sensoras que são fisicamente localizadas dentro da mesma fibra. Este tipo de sensores é, muitas vezes, utilizado para monitorização da temperatura e podem ser utilizados diferentes tipos de fibras [9].

As fibras óticas SMF são, normalmente, utilizadas na construção de sensores sempre que é necessário uma sensibilidade elevada, ou quando é preciso caracterizar, de forma eficaz, o comprimento de onda ou a fase do sinal ótico. A utilização de fibras SMF permite a construção de interferómetros totalmente em fibra ótica, permitindo a medição de pequenas variações da fase do sinal ótico que é transmitido ao longo da região de medição.

Das diferentes configurações de sensores de fibra ótica, a interferométrica é aquela que proporciona uma maior sensibilidade para uma vasta gama de parâmetros físicos. Uma vez que os interferómetros fornecem muita informação espectral e temporal do seu sinal, o mensurado pode ser quantitativamente determinado através da variação do comprimento de onda, fase, intensidade e frequência [17]. Os sensores interferométricos, para além de evidenciarem as vantagens inerentes a todos os sensores de fibra ótica apresentam, também, vantagens como versatilidade na geometria do elemento sensor, grande gama dinâmica, elevada sensibilidade e possibilidade de multiplexagem espectral. A sensibilidade da fibra ótica a diferentes parâmetros externos levanta o problema da seletividade do sensor, que por sua vez torna necessária a utilização de técnicas de referência de forma a calibrar e distinguir o parâmetro de interesse. E, apesar de existir uma relação linear entre a variação da fase e o parâmetro a ser medido, o sinal de saída do interferómetro requer um processamento específico o que pode limitar o alcance dinâmico, dificultar medições absolutas, degradar o desempenho e aumentar o nível de ruído do sistema. A sensibilidade dos sensores interferométricos também impõe restrições quanto à possibilidade de multiplexagem [35].

O funcionamento da maior parte dos sensores baseia-se na medição de um mensurado particular numa determinada localização. Esta é, por exemplo, a forma de operação dos sensores utilizados para a monitorização da temperatura, aceleração, pressão e vários parâ-

metros químicos. Estas configurações requerem componentes que dividem e combinam o feixe independentemente da configuração dos interferômetros na fibra ótica. Nas últimas décadas, têm sido reportadas várias configurações interferométricas incluindo cavidades convencionais, étalons sólidos e ressoadores de fibra ótica [16].

Os sensores interferométricos de fibra ótica são, frequentemente, subdivididos em duas categorias. Como já foi referido, se a interação do sinal ótico com o parâmetro de interesse ocorrer dentro da própria fibra ótica o sensor é designado como intrínseco, IFPI. No caso em que a fibra ótica é utilizada para acoplar o sinal ótico de e para a região onde o feixe é influenciado pelo mensurado, o sensor é classificado como extrínseco, EFPI.

A figura 2.2 (a) mostra um sensor EFPI no qual a cavidade de ar é constituída por uma estrutura de suporte. A utilização das duas superfícies refletoras na estrutura extrínseca permite a obtenção de um sinal de interferência de elevada finesse. Para além disto, o desenvolvimento e construção deste tipo de sensores é relativamente simples e não requer equipamentos de elevado custo. Contudo, os sensores EFPI apresentam algumas desvantagens como a baixa eficiência de acoplamento e necessidade de alinhamento rigoroso. Por outro lado, os sensores IFPI, figura 2.2(b), têm componentes refletoras dentro da própria fibra. De seguida, são apresentadas algumas das primeiras configurações utilizadas como sensores intrínsecos em fibra ótica [10].



Figura 2.2: Esquema de um sensor FPI (a) extrínseco e (b) intrínseco, onde a designa a largura da cavidade e R_1 e R_2 as superfícies refletoras da fibra e da cavidade, respetivamente. Adaptado de [10].

Em 1982, *Yoshino et al.* [36], demonstraram a possibilidade da deteção de vibrações mecânicas com uma fibra ótica utilizando um FPI com 10 m de comprimento e uma refletividade das faces de 70%. Um diagrama esquemático do sistema desenvolvido é apresentado na figura 2.3. O PZT (material caracterizado pelo efeito piezoelétrico mensurável) sofre uma deformação mecânica que vai variar com a frequência originando um sinal periódico. A aplicação de um impacto na mesa vai alterar este sinal. O sinal de saída obtido caracteriza-se por um padrão de franjas de intensidade que se forma quando um impacto mecânico é aplicado na mesa ótica. A força do impacto foi suficiente para induzir a modulação de fase de vários π na fibra.

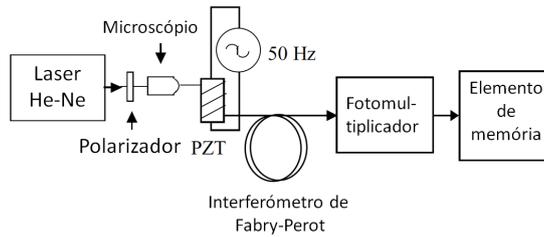


Figura 2.3: Diagrama esquemático de um sistema para detecção de vibrações. Adaptado de [16].

Em 1983, *Kersey et al.* [37], demonstraram um FPI numa fibra SMF com faces sem revestimento que funcionava como acelerómetro. Na figura 2.4 está apresentada a montagem experimental utilizada. Com 10 voltas de fibra descarnada num cilindro de borracha e uma massa de 0,2 kg, o sistema apresentava uma sensibilidade de fase superior a 200 rad/g para frequências superiores à frequência de ressonância de 150 Hz. A diferença de fase mais pequena detetável foi de 10^{-5} rad a 1 kHz e 4×10^{-5} a 100 Hz.

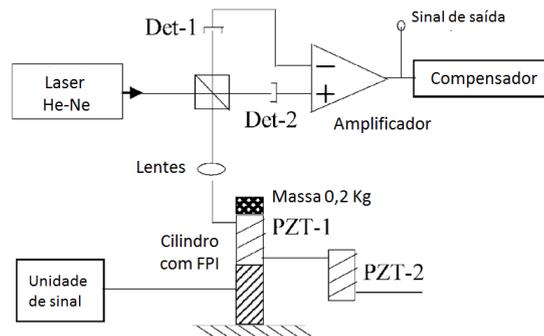


Figura 2.4: Diagrama esquemático de um sistema utilizado como acelerómetro. Adaptado de [16].

Kist et al. 2.5, estudaram um FPI utilizado como sensor de tensão produzido através de fibra ótica de índice gradual. Esta abordagem caracteriza-se pelo fácil acoplamento entre a fibra de entrada e de saída bem como por um sistema modular de construção de ambos os feixes refletido e transmitido [38]. Este sistema de medição está apresentado na figura.

Os sensores extrínsecos baseados em FPI têm sido, também, discutidos por uma grande variedade de autores. De seguida, são apresentados alguns dos primeiros sensores desenvolvidos com base neste tipo de tecnologia. Em 1993, *Belleville e Duplain* [39], utilizaram um sensor extrínseco de tensão construído utilizando fibras óticas multimodo com um diâmetro do núcleo de $50 \mu\text{m}$. O comprimento da cavidade do FPI foi medida utilizando um interferómetro de Fizeau. Os autores demonstraram que o sensor era linear e com uma resolução de $0,25 \mu\epsilon$.

Em 1995, *Rao e Jackson* [40], descreveram um esquema de monitorização utilizando um FPI de fibra ótica extrínseco com a região sensora colocada remotamente, onde o sinal

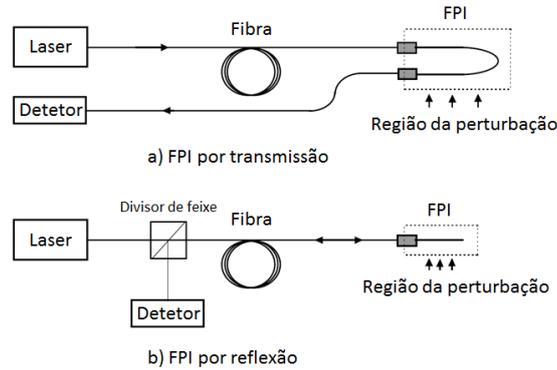


Figura 2.5: Sistema modular do tipo transmissão e reflexão num FPI em fibra ótica. Adaptado de [16].

do sensor era interrogado por um interferômetro de *Michelson* e uma fonte de luz branca sintetizada, como se pode observar na figura 2.6. A cavidade de *Fabry – Perot* era limitada pela fibra clivada e por um espelho. Utilizando uma cavidade com $500 \mu\text{m}$ de comprimento, o sistema atingiu uma resolução para a gama de funcionamento inferior a 10^{-4} . Este sistema também permitia medições de outros parâmetros como é o caso da tensão ou vibrações que podem ser traduzidas como deslocações.

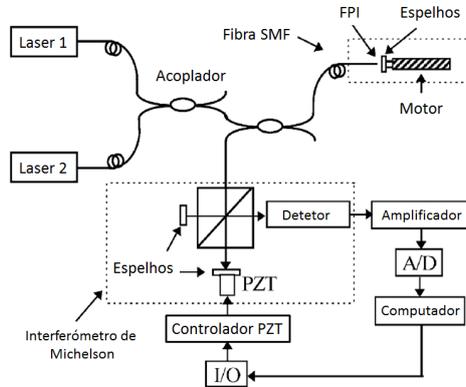


Figura 2.6: Sistema de monitorização utilizando um EFPI e uma fonte de luz branca sintetizada. Adaptado de [16].

Em 1996, *Bhatia et al.* [27], demonstraram um sistema utilizando um EFPI com cavidades cujo comprimento variou no intervalo de 40 a $300 \mu\text{m}$, ver figura 2.7. Com uma resolução espectral de $0,1 \text{ nm}$, o sistema foi utilizado, com sucesso, na monitorização da tensão induzida numa amostra de betão reforçado bem como na determinação da variação da temperatura da mesma amostra. Uma fina camada de um metal como ouro ou alumínio foi depositada nas paredes clivadas de duas fibras limitando a cavidade de forma a aumentar a refletividade e, conseqüentemente, melhorando a finesse da cavidade.

Em algumas aplicações, o elemento sensor externo pode ser baseado em tecnologia ele-

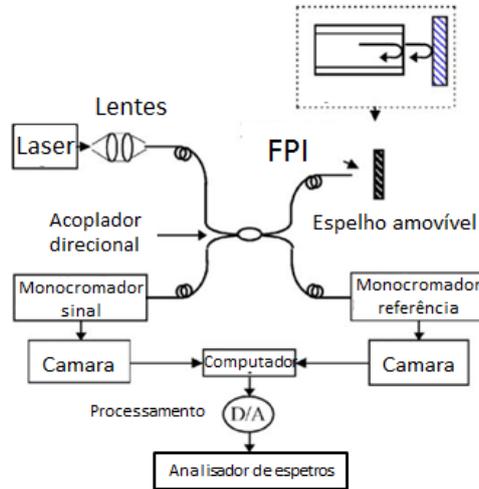


Figura 2.7: Sistema de monitorização utilizando um EFPI com um sistema passivo de processamento de sinal. Adaptado de [16].

trónica. Como este tipo de sensores não é totalmente ótico, embora seja extrínseco, este é normalmente designado por sensor híbrido. Contudo, na maior parte dos casos em que a tecnologia ótica e eletrónica são usadas, as designações extrínsecos ou híbridos são aplicadas indiferentemente.

Recentemente, *Lee et al.* categorizaram os interferómetros de fibra ótica de acordo com os seus princípios de funcionamento, métodos de produção e campos de aplicação. Para os FPI, são necessárias duas superfícies refletoras (por exemplo, dois espelhos) separadas por uma distância que impõe um atraso de fase no sinal ótico. Normalmente, a cavidade dos EFPI é formada por ar [41] ou por um polímero [42]. Devido ao reduzido coeficiente de expansão do ar, esses FPIs podem ser utilizados como sensores de pressão atmosférica, índice de refração e deformação, independentes da temperatura. Por outro lado, e uma vez que os polímeros podem apresentar algumas características especiais/peculiares, os FPIs baseados em cavidades poliméricas podem ser concebidos para algumas aplicações particulares, como é o caso da sensibilidade a temperaturas elevadas, deteção de moléculas, entre outras. No geral, apesar da produção de EFPIs ser relativamente simples e de baixo custo, os sensores baseados neste tipo de interferómetros apresentam baixa eficiência de acoplamento, requerem um alinhamento muito cuidadoso e apresentam problemas de acondicionamento.

Para a construção de sensores baseados em estruturas do tipo FPIs intrínsecas, as fibras óticas convencionais SMF precisam de ser incorporadas com espelhos ou estruturas refletoras [11, 28]. Para formar as cavidades interferométricas têm sido introduzidas diversas técnicas como é o caso da deposição interna de filmes [43], alteração do índice de refração entre duas fibras na região da junção [44], redes de *Bragg* na fibra ótica [16], regiões irradiadas por feixe laser [45], gravação química [46], entre outros. A maior parte destes métodos, apresenta elevadas taxas de repetibilidade, o que representa uma grande vantagem para a maior parte

das aplicações. Contudo, alguns destes métodos podem ser de difícil implementação uma vez que requerem processos complexos de fabrico ou então a utilização de fibras de cristais fotónicos. As sensibilidades à deformação atingidas com cavidades de baixa finesse reportadas até à data (da ordem dos $10 \text{ pm}/\mu\epsilon$) são comparáveis com aquelas que são obtidas com as populares FBGs (da ordem de $1 \text{ pm}/\mu\epsilon$) [32]. Contudo, estes métodos de construção são complexos e/ou demasiado dispendiosos.

Na tabela 2.1 estão listados alguns valores típicos para a sensibilidade à deformação de sensores baseados em cavidades interferométricas e em redes de *Bragg*.

Tabela 2.1: Valores típicos para a sensibilidade à deformação de diferentes tipos de sensores utilizando fibra SMF. (*a* designa o valor obtido em fibras de cristais fotónico (PCF)).

Sensor baseado em:	Construção das cavidades	Sensibilidade à deformação ($\text{pm}/\mu\epsilon$)
FPI	Desalinhamento de duas fibras SMF	6,0 [5]
FPI	Laser de fs	10,3 [32]
FPI	Efeito de fusível	2,56 [20]
MZI	PCF de dois núcleos	0,31 [47]
FPI	Micromaquinação laser	4,5 6,0 ^a [7]
Int. <i>Sagnac</i>	PCF com polarização constante	0,23 [48]
FPI	PCF entre SMF	2,8 [49]
<i>FBGs</i>		1,0 [50]
<i>FBGs</i>		1,2 [51]
<i>FBGs</i>		0,64 [52]
<i>FBGs</i>		1,15 [53]
<i>FBGs</i>		0,7 a 1,5 [54]

Nos últimos anos, os lasers a operarem com impulsos temporais na ordem dos femtosegundos (fs) têm sido muito utilizados para a produção de dispositivos fotónicos em materiais transparentes e em diferentes tipos de fibras óticas. A maior parte das micro-cavidades têm sido desenvolvidas em fibra ótica através da utilização de lasers de fs e utilizadas como interferómetros, como é o caso das FPIs e das MZIs. Contudo, este tipo de interferómetros,

diretamente produzidos por ablação laser exibem, normalmente, cavidades bastante rugosas, pouca resistência mecânica e implicam a existência de um laser de fs que tem como consequência o aumento do preço de produção das micro-cavidades [55].

Nos sensores intrínsecos, o sinal ótico propaga-se sempre dentro de fibra, o que permite obter sinais óticos de intensidade superior relativamente à maioria dos EFPIs, o que favorece a desmodulação do sinal. Contudo, estes IFPI requerem equipamento muito dispendioso para a produção das cavidades ou então fibras especiais ou ainda reagentes químicos perigosos. As LPGs, em particular, são conhecidas por serem sensíveis a variações ambientais, e permitem medições simultâneas de índice de refração e temperatura. Para além isto, a definição de intrínseco e extrínseco torna-se vaga devido ao advento das fibras com características especiais e dos dispositivos construídos em fibra ótica. Por exemplo, um FPI pode ser construído através da introdução de uma porção de fibra de núcleo oco (HCF) entre duas porções de fibra normal. Deste modo a cavidade é formada pelo ar que se encontra no núcleo da HCF [34]. Neste caso, devido ao núcleo oco característico da fibra, podem aparecer várias substâncias dentro da cavidade do FPI, como é o caso de líquidos ou gases com diferentes índices de refração que podem ser utilizados para a medição de índices de refração com elevada sensibilidade, ou pela colocação de um polímero dentro da cavidade para se conseguirem elevadas sensibilidades na medição da temperatura. Recentemente, são as fibras PCF que têm atraído mais interesse em todo o mundo, devido aos seus padrões complexos de buracos microscópicos de ar ao longo do eixo longitudinal da fibra. Uma vez que a estrutura perfurada das PCFs lhes confere mecanismos únicos de guiagem do sinal ótico e propriedades modais ausentes em fibras óticas convencionais, tem havido muita pesquisa em FPIs baseados em PCFs [5].

Para o caso dos interferómetros de *Mach – Zehnder*, de *Michelson* e de *Sagnac*, o sinal ótico incidente é dividido em dois braços por um divisor de fibra e posteriormente re combinado por um combinador de fibra. Os primeiros interferómetros de *Mach–Zehnder* e de *Michelson* apresentavam dois braços independentes, um que funcionava como o braço sensor e outro que funcionava como referência [56]. Estes interferómetros com dois braços apresentavam as suas próprias limitações, como estrutura complicada, grandes dimensões, elevada suscetibilidade às flutuações ambientais, entre outras. Contudo, mais recentemente, foram propostos os interferómetros modais como é o caso dos CCMI, cujo princípio de funcionamento se baseia na interferência entre os modos que se propagam no núcleo e os modos que se propagam na bainha contudo, também, necessitam de divisores e combinadores para a realização do acoplamento e o re-acoplamento entre os modos do núcleo e da bainha. Neste caso, o braço da referência e o braço sensor estão na mesma fibra mas têm diferentes percursos óticos devido à dispersão modal. Estes CCMI são mais compactos do que os interferómetros acima apresentados e são muito eficazes. Têm sido propostas várias técnicas de produção incluindo fibras com LPGs [57], tapers de fibra ótica [58], estruturas com forma de amendoim em fibra [59], junções desalinhas [60], alteração do diâmetro do núcleo [61], regiões irradiadas por laser [45] e bolhas de ar em cristais fotónicos parcialmente colapsados (PCF) [62].

Os primeiros trabalhos baseados em FPIs centravam-se na introdução interna de espelhos numa fibra do tipo SMF para formar sensores baseados em IFPI. Para a formação do sensor

fundiam-se duas fibras SMF com uma proteção metálica no final da fibra. Contudo, um dos sensores do tipo FPI mais reportados na literatura foi o EFPI desenvolvido pela *Virginia Polytechnic Institute and State University* [63]. Numa das suas formas mais vulgares, o sensor era desenvolvido pela introdução de duas fibras num tubo de alinhamento criando uma cavidade de *Fabry – Perot*, com uma das fibras responsável pela propagação do sinal ótico e outra fibra responsável pela medição. A extremidade da fibra ótica era clivada de modo a funcionar como superfície refletora da cavidade FP. Têm vindo a ser desenvolvidos vários tipos de sensores do tipo EFPI e implementados na medição de uma vasta gama de parâmetros nas mais diversas áreas como é o caso da temperatura, pressão, tensão, fluxo, ondas acústicas e parâmetros químicos e biológicos [63].

No geral, os sensores interferométricos conseguem elevada sensibilidade quando a técnica é utilizada de forma apropriada para medir um determinado parâmetro físico, contudo, podem existir problemas de sensibilidade cruzada quando os dispositivos não estão completamente isolados destes parâmetros.

O sucesso da tecnologia dos sensores baseados em fibra ótica tem vindo a crescer em diversas áreas como é o caso dos sensores de temperatura, pressão e sensores para monitorização da deformação, a área dos sensores químicos/biomédicos também tem sido alvo de recentes investigações. Por outro lado, os giroscópios e os hidrofones (sensores acústicos dentro de água) em fibra ótica (FOG) são um exemplo do grande sucesso e potencial da tecnologia da fibra ótica na área da monitorização representando a maior parte do mercado atual dos sensores em fibra ótica. As principais limitações deste tipo de investigação são os custos inerentes ao desenvolvimento e produção dos novos sensores. Avanços significativos na área dos sensores convencionais têm ocorrido em paralelo com os mais recentes desenvolvimentos na área dos sensores de fibra ótica [11].

Recentemente, o principal desafio na construção de interferómetros tem sido a sua miniaturização para aplicações à micro escala. Assim, os componentes óticos tradicionais como os divisores de feixe, combinadores e lentes objetivas têm sido rapidamente substituídas por dispositivos em fibra ótica de pequenas dimensões que permitem que os sensores operem à escala das fibras [10].

Capítulo 3

Fundamentação teórica e princípios de funcionamento

Os FPI são o tipo de interferômetros mais versáteis uma vez que podem ser implementados em várias configurações distintas. A sua simples configuração pode ser implementada com reflexões em duas interfaces ar-vidro ou gás-dielétrico separadas por uma distância micrométrica. Para eliminar elementos de alinhamento e para minimizar o processo de fabricação têm sido propostas diferentes formas de produção deste tipo de interferômetros [32].

Tendo em conta tudo o que foi acima descrito, os FPI são os mais indicados para o tipo de aplicações que se pretendem neste trabalho uma vez que são de fácil construção dentro de fibras óticas.

3.1 Interferômetros de duas ondas

O processo mais simples de implementar um interferómetro consiste em dividir o sinal proveniente de uma fonte ótica em dois sinais que percorrem percursos diferentes antes de serem recombinados. Existem, como já vimos, diferentes maneiras de construir o interferómetro, ou seja, diferentes configurações.

Uma configuração bastante comum é o interferómetro de *Michelson*, que pode ser esquematizada conforme de mostra na figura 3.1. O sinal ótico proveniente da fonte ótica é dividido por um acoplador direcional (AD), originando dois sinais que percorrem percursos óticos diferentes: um designado de referência e o outro de sinal (no qual atua o mensurado). No final de cada percurso de fibra ótica é incluído um espelho (M) que pode ser, por exemplo, um filme fino de prata previamente depositado na extremidade da fibra. O sinal ótico que se propaga no percurso de fibra fica sujeito à ação do mensurado, antes dos dois sinais óticos serem recombinados no acoplador direcional. Este sinal fica disponível para deteção enquanto vestígios deste podem chegar à fonte ótica. Este último aspeto pode ser indesejável uma vez que o sinal ótico refletido para a fonte ótica tende a perturbar o funcionamento da mesma.

Nesta figura 3.1, é também apresentada uma configuração alternativa à anterior, o in-

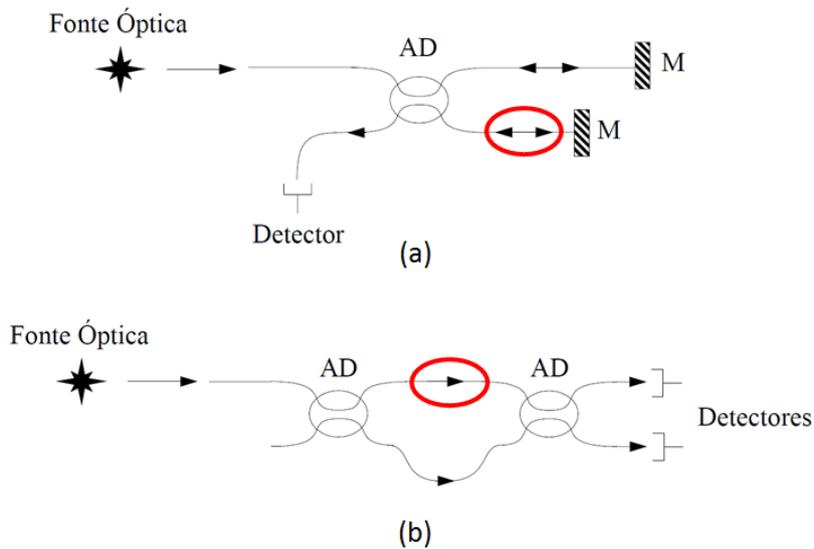


Figura 3.1: Esquema dos interferômetros de (a) Michelson e de (b) Mach-Zehnder em fibra ótica. A vermelho está representada a região de detecção. Adaptado de [64].

terferômetro de *Mach – Zehnder* em fibra ótica. Neste caso são usados dois acopladores direcionais (um para dividir e outro para recombinar os sinais). Um dos feixes provenientes do primeiro acoplador direcional fica sujeito à ação do mensurado e o outro funciona como sinal de referência. Estes sinais recombinam-se no segundo acoplador direcional originando o sinal que chega aos detetores. Neste tipo de interferômetros as reflexões do sinal ótico para a fonte ótica são praticamente inexistentes [65].

Outro tipo de configuração designa-se como Interferômetros Diferenciais, estes são analiticamente semelhantes aos interferômetros de *Michelson* e de *Mach – Zehnder*, mas com a diferença de que as duas ondas se propagam numa única fibra e são ambas sujeitas à ação do mensurado, embora com diferentes níveis. As ondas de sinal e de referência são proporcionadas pela propagação de dois modos distintos na fibra ótica [66].

O último tipo de interferômetros de duas ondas a considerar é o interferômetro de *Sagnac*, que pode ser observado na figura 3.2. Nesta configuração, as duas ondas percorrem percursos idênticos, mas em sentido oposto. Este tipo de interferômetros não pode ser utilizado do mesmo modo que os anteriores uma vez que ambas as ondas (de sinal e de referência) são sujeitas, da mesma forma, à ação do mensurado. No entanto, a rotação do interferômetro em torno de um eixo perpendicular ao seu plano viola claramente a reciprocidade do sistema, originando assim uma diferença de fase entre as duas ondas. Este efeito é conhecido como efeito de *Sagnac* [67].

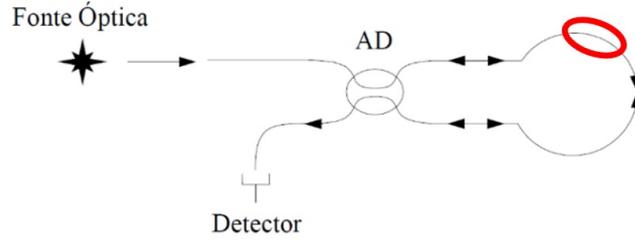


Figura 3.2: Esquema dos interferômetros de Sagnac em fibra ótica. A vermelho está representada a região de detecção. Adaptado de [64].

A diferença de fase ótica entre as duas ondas exprime-se de forma ligeiramente diferente dependendo da configuração do interferómetro. Na tabela 3.1 estão apresentadas as expressões funcionais para a diferença de fase ótica para as configurações acima referidas.

Tabela 3.1: Expressões funcionais para a diferença de fase ótica para diferentes configurações.

Tipo de configuração	Diferença de fase ótica
Michelson	$\phi = \frac{4n\pi L}{\lambda}$
Mach-Zehnder	$\phi = \frac{2n\pi L}{\lambda}$
Sagnac	$\phi = \frac{8\pi\omega AN}{c\lambda}$

Onde n é o índice de refração efetivo do modo guiado da fibra, L é a diferença dos percursos geométricos entre as duas ondas, λ é o comprimento de onda do sinal ótico no vácuo, c é a velocidade da luz no vácuo, ω é a velocidade angular da rotação do anel, A é a área do anel e N é o número de espiras da fibra.

3.2 Interferómetros de múltiplas ondas

Os interferómetros de múltiplas ondas caracterizam-se pela onda proveniente da fonte ser dividida por múltiplos percursos antes de ocorrer a recombinação. Uma forma de conseguir isto é construir uma cavidade ótica que possui um único percurso mas que é atravessado, diversas vezes, pelo sinal ótico incidente. Se a cavidade ótica funcionar como sensor, o mensurado atua no sinal ótico que se propaga em cada percurso, multiplicando assim o seu efeito sobre este. A interferência resultante de todas as ondas provenientes dos diversos percursos produz uma função de transferência característica, que difere da função dos interferómetros de duas ondas uma vez que exibe um comportamento ressonante. As cavidades óticas ressonantes que caracterizam este tipo de interferómetros podem ter diversas formas, dependendo

da aplicação a que se propõem [68]. A figura 3.3 representa um esquema de um tipo de cavidade ótica construída a partir de fibras SMF e de duas faces refletoras paralelas (R_1 e R_2) separadas de uma distância L , designada como interferómetro ou cavidade de *Fabry – Perot*.

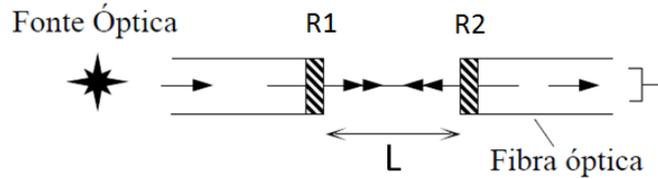


Figura 3.3: Esquema do interferómetro de *Fabry – Perot* em fibra ótica. Adaptado de [64].

3.2.1 Princípios de funcionamento de uma cavidade de Fabry-Perot

Nesta secção faz-se uma aproximação à interferência de duas ondas, uma vez que se assume que a finesse da cavidade analisada é baixa, ou seja, o coeficiente de reflexão é reduzido permitindo a aproximação de um interferómetro de *Fabry-Perot* a um interferómetro de duas ondas.

A interferência ótica consiste na interação de duas ou mais ondas de sinal ótico com geração de um padrão em que a irradiância total difere da soma das irradiâncias individuais. Define-se irradiância, I , como energia média por unidade de área e de tempo. No caso específico dos campos eletromagnéticos a irradiância é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico a menos de uma constante.

$$I \propto |E^2| \quad (3.1)$$

Como o campo elétrico oscila com uma frequência que varia entre $4,3 \times 10^{14}$ Hz e $7,5 \times 10^{14}$ Hz, torna-se impossível detetar e medir o valor instantâneo do campo. Por outro lado, a irradiância I , pode ser medida diretamente. Isto torna conveniente que o estudo dos fenómenos de interferência seja feito com base na intensidade ou na potência do sinal ótico. A análise que se segue não depende da forma particular das frentes de onda uma vez que se pretendem resultados muito gerais. Para simplificar, considera-se, unicamente, a sobreposição de duas ondas planas monocromáticas \mathbf{E}_1 e \mathbf{E}_2 com a mesma frequência, num meio homogéneo. Supõe-se que a distância a entre as faces refletoras da cavidade de *Fabry – Perot* considerada é muito maior que o comprimento de onda do sinal ótico propagado e consideram-se ondas planas polarizadas linearmente da forma:

$$\mathbf{E}_1 = E_{01} e^{i(\phi_1 - \omega t)} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{E}_2 = E_{02} e^{i(\phi_2 - \omega t)} \quad (3.3)$$

onde ϕ_1 e ϕ_2 é a fase da onda 1 e 2, respetivamente, ω a frequência angular e t o tempo. A partir do principio da sobreposição aplicado a estas duas ondas é possível construir o campo elétrico total E , a partir dos campos individuais E_1 e E_2 :

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 \quad (3.4)$$

desta forma,

$$|\mathbf{E}^2| = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)^* \quad (3.5)$$

logo

$$I = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} 2 \cos(\phi_1 + \phi_2) \quad (3.6)$$

onde $I_1 = E_1 \cdot E_1^*$ representa a irradiância do campo 1 e $I_2 = E_2 \cdot E_2^*$ a irradiância do campo 2. Assumindo que as amplitudes das duas ondas são iguais, $E_{01} = E_{02}$, uma vez que a fonte de sinal ótico é a mesma, $I_1 = I_2$, a equação 3.6 pode ser escrita da forma:

$$I = 4 I_1 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (3.7)$$

onde $\delta = (\phi_1 + \phi_2)$ representa a diferença de fase entre as duas ondas refletidas adjacentes e pode ser escrita da seguinte forma:

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nL \cos(\theta) \quad (3.8)$$

onde n é o índice de refração do interior da cavidade, L representa a distância entre as faces clivadas, θ é o ângulo entre o sinal incidente e o sinal refletido e λ é o comprimento de onda do sinal ótico incidente. Dentro de uma cavidade, e se esta estiver preenchida por ar ($n = 1$, λ pode ser aproximado pelo seu valor no vácuo) e o sinal ótico incidente é paralelo ao núcleo da fibra ($\theta = 0$), logo [10]:

$$\delta_{FPI} = \frac{4\pi}{\lambda} L \quad (3.9)$$

Os valores dos máximos de irradiância ocorrem quando

$$\delta_{FPI} = 2\pi m \quad (3.10)$$

De notar que a periodicidade da função \cos^2 é π . Na expressão 3.10, m pode assumir todos os valores inteiros naturais incluindo o zero.

Com isto, é possível escrever a função transferência do sinal ótico refletido como:

$$H = 10 \times \log[\cos(\phi + \phi_0)^2] \quad (3.11)$$

À medida que o comprimento de onda varia, os dois sistemas de franjas separam-se. Esta variação da fase δ corresponde a $FSR = \lambda/m$ e, para incidência normal,

$$FSR \approx \frac{\lambda^2}{2nL} \quad (3.12)$$

Quando uma perturbação é introduzida na cavidade interferométrica, a diferença de fase é influenciada pela variação do comprimento do caminho ótico do interferómetro. Aplicando uma deformação longitudinal ao sensor FPI altera-se o comprimento do caminho ótico na cavidade e/ou o índice de refração do material da cavidade, o que resulta numa variação da fase. Medindo a variação de comprimento de onda correspondente a um máximo ou um mínimo de intensidade no espectro de reflexão do FPI pode obter-se o valor da deformação aplicada no sensor. No estudo efetuado nesta dissertação escolheu-se a variação da posição dos máximos de interferência. A banda espectral livre (FSR), a distância entre máximos adjacentes no espectro, é influenciada pela variação do caminho ótico.

Tal como nos FPIs de faces refletoras espessas, pode ser utilizado um FPI de forma esférica ou elipsoidal para a medição de parâmetros físicos como é o caso da deformação ($\delta d/d$) e outros parâmetros que podem ser traduzidos em deformação como por exemplo, pressão, carga, vibração, inclinação, etc. Qualquer destes parâmetros vai induzir uma alteração nas dimensões da cavidade que se assume estando cheia de ar. As alterações registadas pelo interferómetro resultam numa variação da posição dos máximos de interferência de $\Delta\lambda$ dada por [68]:

$$\Delta\lambda = \frac{2n}{m} \Delta L \quad (3.13)$$

Sabendo que a deformação é dada por

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.14)$$

Pode reescrever-se a expressão como

$$\Delta\lambda = \frac{2n}{m} \varepsilon L \quad (3.15)$$

Relacionando as expressões 3.9 e 3.10 com a expressão 3.15, é possível reescrever a expressão para a variação da posição dos máximos de interferência da seguinte forma

$$\Delta\lambda = \lambda\varepsilon \quad (3.16)$$

Com a expressão 3.16 facilmente se conclui que a variação das posição dos máximos de interferência depende diretamente do comprimento de onda do sinal ótico injetado na fibra e da deformação imposta na cavidade.

Na figura 3.4 a) estão representados três espectros que diferem na diferença de percurso ótico na direção axial da fibra ($\delta a = 10$ e $20 \mu m$) dentro de uma cavidade com $90 \mu m$ de comprimento. Esta diferença de percurso faz com que os máximos de intensidade (que correspondem aos comprimentos de onda onde ocorre a interferência construtiva) se desloquem. Na prática isto pode acontecer se alterarmos as dimensões das cavidades, ou seja, podemos

dizer que estamos na presença de um sensor de deformação. A figura 3.4 b) mostra-nos uma ampliação da função de transferência onde é claro que alterando a diferença de percurso óptico os máximos de intensidade sofrem um deslocamento para maiores comprimentos de onda.

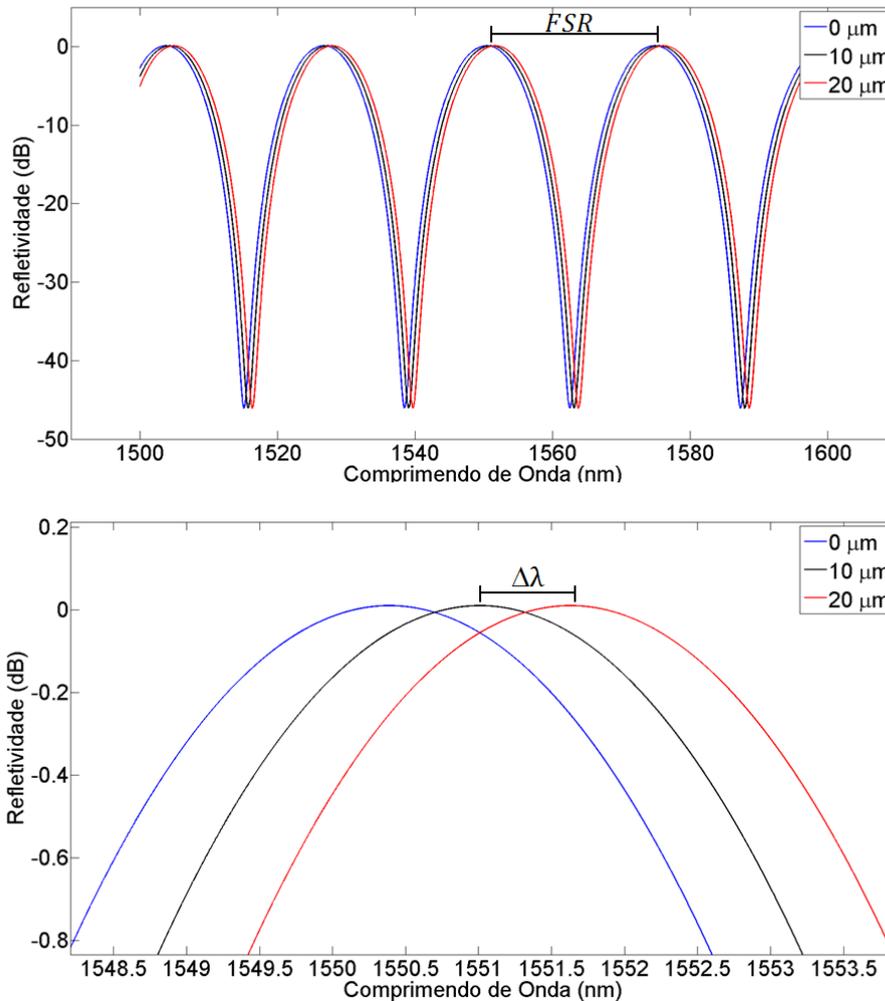


Figura 3.4: a) Gráfico da simulação do comportamento da função transferência do sinal óptico refletido. b) Ampliação do gráfico a).

Devido ao limitado diâmetro da fibra, quando comparado com a largura da cavidade, uma deformação aplicada ao longo do eixo longitudinal impõe uma alteração (redução) da largura da cavidade. Para além disto, a micro-cavidade exibe uma forma elipsoidal e, por isso, espera-se que a condição de interferência e a sensibilidade da deformação exibam dependência com o volume da cavidade.

Para relacionar a variação do comprimento de onda no padrão de interferência com a alteração das dimensões da cavidade de forma a estimar a sensibilidade do sensor, é necessário diferenciar λ . Isto leva à seguinte expressão $\delta\lambda = \lambda(\delta d/d)$. A maioria dos autores assume que a sensibilidade do FPI é independente das dimensões da cavidade. Contudo, existem

publicações recentes que sugerem que a forma da cavidade bem como as suas dimensões desempenham um papel de relevo no desempenho do interferómetro [32].

Se as cavidades dos FPIs forem sujeitas a uma força, pressão ou deformação axial (na direção de propagação do sinal ótico) esta vai sentir o efeito de *Poisson* que diz que na presença de uma força, o material vai alongar na direção da força e sofre, também, uma redução na secção transversal diminuindo o diâmetro, ou seja, se a sofre a variação δa então b sofre δb . Assim, uma deformação axial ($\varepsilon_a = \delta a/a$) aplicada na cavidade vai induzir uma deformação transversal ($\varepsilon_t = \delta c/c$). A deformação axial e transversal relacionam-se pela razão de *Poisson* ($\nu = -\varepsilon_t/\varepsilon_a$). Assim, a variação no padrão de interferência do FPI de uma cavidade elipsoidal depende de ν que por sua vez é proporcional a $(\delta b/\delta a)$. Para calcular a razão de *Poisson* é necessário analisar o volume (V) da fibra ótica que contém a cavidade e as suas variações microscópicas (δV). Se δV é causado, por exemplo, por variações da temperatura ou pressão, então a seguinte expressão é válida [32]:

$$\frac{\delta V}{V} = -\frac{1}{K}\delta P + \gamma\delta T \quad (3.17)$$

Na equação 3.17, K é o módulo de rigidez e γ é o coeficiente de expansão térmico. Assumindo que a variação da pressão é devida à deformação axial aplicada na fibra. Assim, a pressão e a deformação estão relacionadas pelo módulo de *Young* $E = \sigma/\varepsilon_a = \delta P/\varepsilon_a$ (onde σ é o tensor das tensões e ε_a é a deformação axial). As variações volumétricas causadas pela temperatura podem ser desprezadas desde que o γ de uma fibra ótica de sílica seja extremamente baixo ($5,5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$). Nestas circunstâncias a equação 3.17 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\delta V}{V} \approx \frac{E}{K}\varepsilon_a \quad (3.18)$$

O volume total do vidro da secção de fibra ótica que contém a cavidade é simplesmente o volume de um cilindro de vidro de raio R e comprimento d menos o volume da cavidade que depende do tamanho e da forma da cavidade. No caso de uma cavidade com forma elipsoidal, com o eixo maior a e os dois eixos menores c , o volume acima mencionado pode ser expresso como:

$$V = \pi d R^2 - \frac{4}{3}\pi a c^2 \quad (3.19)$$

As variações de volume δV podem ser obtidas pela diferenciação da equação 3.19. Através da substituição de V e δV , $\varepsilon_a = \delta a/a$ e negligenciado alterações do raio da fibra (isto é, $\delta R \approx 0$) obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{\delta a}{\delta c} = \frac{3}{4} \left(\frac{E}{K} + 1 \right) \left(\frac{R^2}{a^2} - \frac{4}{3} \right) \frac{a}{c} \quad (3.20)$$

Assim, $\delta\lambda$, a sensibilidade de um FPI elipsoidal, depende de a e c [32].

Capítulo 4

Produção dos sensores

Nesta secção será apresentada uma breve introdução ao efeito de fusível, utilizado para a produção das cavidades dentro da fibra ótica, bem como a descrição do processo de produção dos sensores e sua caracterização.

4.1 Efeito de fusível

O efeito de fusível é a designação do processo de formação e propagação de uma zona de fusão que viaja com velocidades subsónicas na região do núcleo de uma fibra ótica. É um processo dependente da absorção da fibra ótica e da potência do sinal ótico propagado e foi reportado pela primeira vez por *Kashyap* em 1988 [69].

Este fenómeno inicia-se num ponto de ignição que ocorre em zonas onde a atenuação é elevada, o que conjugado com sinais óticos de elevada potência gera um aquecimento local. O aumento localizado da temperatura leva ao aumento da absorção ótica que conduz ao aumento catastrófico da temperatura do núcleo. Este aumento da temperatura localizado é, normalmente, devido à existência de conetores contaminados e/ou danificados ou devido a curvaturas apertadas a que a fibra fica sujeita aquando da sua implementação [70], como se pode verificar pelas regiões assinaladas na figura 4.1 *c)*. Nas imagens *a)* e *b)* desta figura pode observar-se a propagação do efeito de fusível numa fibra enrolada e na imagem *c)* está representada uma instalação ótica onde se podem observar regiões de curvaturas apertadas das fibras. A contaminação dos conetores deve-se principalmente a pó e partículas orgânicas que estão presentes nos ambientes das instalações das redes e o dano físico dos conetores deve-se ao ato de ligar e desligar respetivamente os conetores [71].

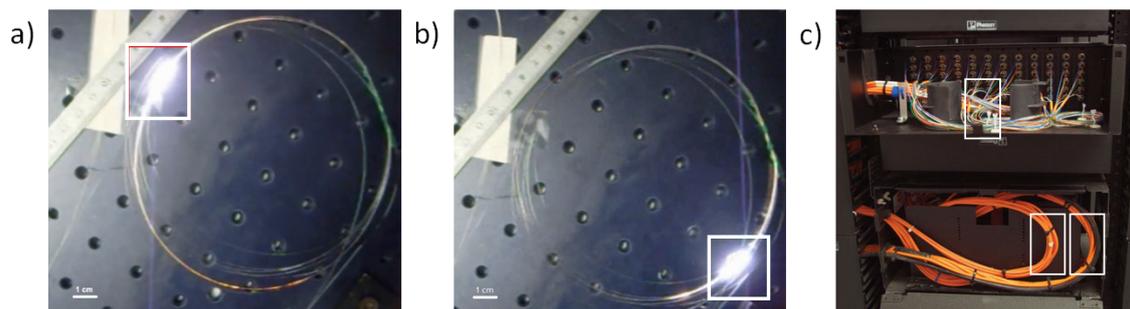


Figura 4.1: a) e b) Fotografias da passagem da zona de fusão numa fibra SMF, o retângulo assinala a região de propagação [71]. c) Imagem de uma instalação ótica. Retirada de <http://qualiteto.com.br/galeria/images/15.jpg> acedido em 11/06/2012.

A propagação do fenómeno só acontece quando a potência do sinal ultrapassa um determinado valor limiar, que depende da composição da fibra e do comprimento de onda do sinal ótico. A propagação da zona de fusão provoca a completa destruição da fibra de forma permanente e irreversível e propaga-se na direção da fonte ótica, com velocidades típicas de $0,5 \text{ m/s}$, deixando como rasto uma cadeia de bolhas que se formam de forma periódica, como se pode visualizar na figura 4.2 (a). A zona de fusão é responsável pelo aparecimento de plasma no núcleo que se alastra devido à condução térmica da sílica. Uma explicação para justificar o aparecimento de bolhas prende-se com a instabilidade hidrodinâmica, também conhecida como instabilidade de *Rayleigh* que resulta de efeitos capilares causados pela sílica fundida que envolve o núcleo [72]. O efeito de fusível pode, também, causar a destruição do equipamento ótico se não for interrompido a tempo. A propagação é interrompida quando a potência ótica do sinal injetado diminui para valores inferiores ao de limiar do fenómeno. A velocidade de propagação da zona de fusão depende da potência do sinal injetado, induzindo variações no tamanho das bolhas e na sua periodicidade [71].

Com o objetivo de caracterizar o dano induzido no núcleo das fibras, foi utilizada a microscopia ótica para visualizar e quantificar a morfologia da cadeia de bolhas formada após a propagação da região de descarga ótica, como se pode verificar pela figura 4.2.

Estas imagens foram obtidas fora da zona terminal do efeito de fusível e revelam a presença de uma cadeia de bolhas periódicas, no núcleo da fibra, cujas dimensões (a, c) e período espacial (ΔS) dependem da potência do sinal ótico. A forma das bolhas resulta da formação de uma ponte intrínseca dentro do núcleo de sílica oco que se forma atrás da região de plasma que se propaga pela fibra e pela contínua compressão das bolhas, devido ao arrefecimento brusco, sob a ação de um gradiente de temperatura acentuado ao longo da fibra [74]. O período ΔS observado nas fibras dopadas com Er^{3+} é semelhante ao reportado para as fibras do tipo SMF quando o efeito é gerado por uma potência de $3,0 \text{ W}$, com valor $15,12 \mu\text{m}$ [75], como é o caso das fibras utilizadas neste trabalho. Para as fibras apresentadas na figura 4.2, foi determinada a variação das dimensões dos eixos a na direção paralela à propagação do sinal ótico e c na direção perpendicular à direção de propagação do sinal ótico e o resultado obtido foi, respetivamente, $7,62$ e $8,65 \mu\text{m}$. Estudou-se também a variação das dimensões

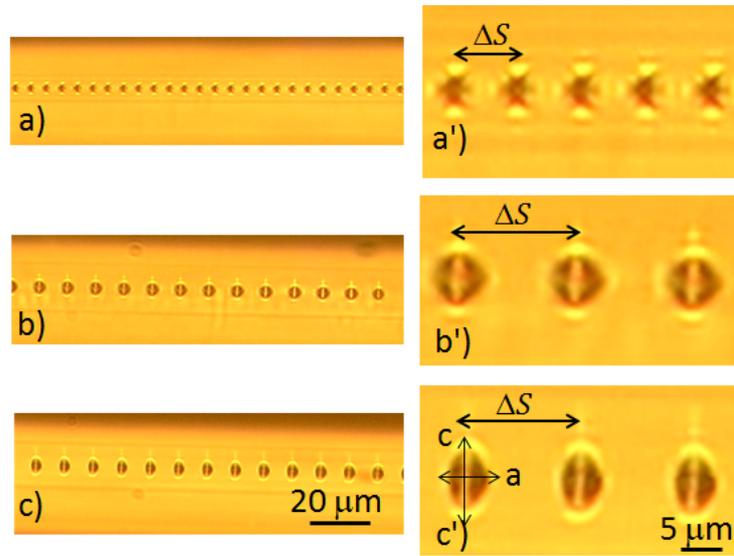


Figura 4.2: Imagens de microscopia ótica de fibra dopada com Er^{3+} após a propagação do efeito de fusível gerado com os seguintes valores de potências: a) 2,0 W, b) 3,0 W e c) 4,0 W. As figuras a'), b') e c') são ampliações das imagens a), b) e c), respetivamente. Adaptado de [73].

destes eixos com a potência ótica do sinal utilizado para gerar o efeito de fusível. Estes dados estão apresentados na figura 4.3 [76].

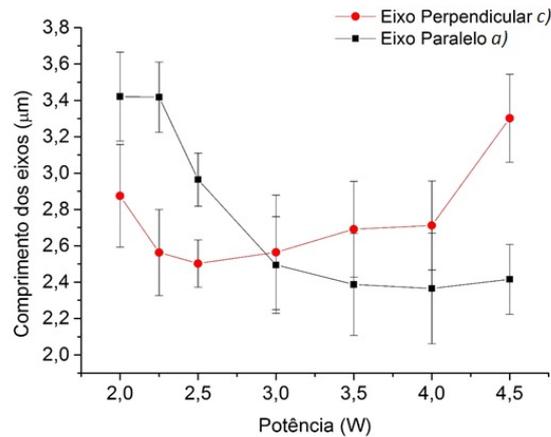


Figura 4.3: Variação do comprimento dos eixos maior e menor da bolha formada numa fibra SMF em função da potência do sinal ótico. A linha é um guia visual.

Para potências até 3,0 W observa-se que a forma da bolha é alongada na direção de propagação e achatada nas direções perpendiculares à direção de propagação, forma esta que inverte quando as potências são superiores a 3,0 W. Para 3,0 W, o comprimento do eixo paralelo é aproximadamente igual ao comprimento do eixo perpendicular o que permite

supor uma simetria esférica para as bolhas formadas com este valor de potência. Estes resultados mostram que a forma das bolhas depende da potência usada para gerar o efeito fusível. Tal como se irá verificar, em detalhe na secção 4.2.1, os sensores serão produzidos usando a cavidade produzida a partir das bolhas. Como tal, para garantir a reprodutibilidade dos sensores em estudo, todos têm de ser produzidos a partir de bolhas análogas. Para este trabalho, selecionámos a potência de 3,0 W e não vamos discutir o efeito da forma da cavidade resultante da formação das bolhas no desempenho dos sensores óticos.

4.2 Desenvolvimento dos sensores

4.2.1 Construção das cavidades por efeito de fusível

Para iniciar o efeito de fusível foi utilizada a montagem experimental apresentada na figura 4.4, que permite produzir o efeito de fusível (ignição e propagação) de forma controlada. Numa das extremidades na montagem, encontra-se um laser de alta potência (produzido pela *IPG photonics*, modelo *RLR – 10 – 1480*) com emissão contínua dominante no comprimento de onda de 1480 nm e com uma potência selecionada de 3,0 W. O laser encontra-se ligado a uma fibra de proteção que é colocada entre o laser e a fibra de teste como forma de prevenir que o fenómeno se propague e atinja o laser, destruindo-o. A seguir a esta fibra de proteção, encontra-se a fibra de teste (fibra do tipo *SMF28E* da *Corning*) que é onde o fenómeno vai ser analisado. Para iniciar o fenómeno é necessária uma densidade de potência superior a $1,8 \text{ MWcm}^{-2}$ para as fibras óticas do tipo SMF utilizadas. No laboratório, o efeito de fusível foi induzido envolvendo uma folha de alumínio na extremidade da fibra de teste para que o aumento de temperatura nessa região da fibra permitisse despoletar o fenómeno. A contínua destruição da fibra ótica na direção da fonte de potência vaporiza o núcleo criando bolhas de oxigénio resultantes da vaporização da sílica. A propagação do efeito de fusível termina quando a fonte de sinal ótico é desligada [71].



Figura 4.4: Esquema da montagem experimental utilizada para gerar o efeito de fusível.

A figura 4.5 mostra uma imagem de microscopia ótica de uma fibra danificada pelo efeito de fusível após o desligar do laser. A imagem revela dois pontos em análise: i) bolha de

finalização assinalada na figura 4.5 b), que corresponde ao ponto de interrupção do efeito causado pelo desligar do laser e, *ii*) cadeia de bolhas regular assinalada na figura 4.5 c).

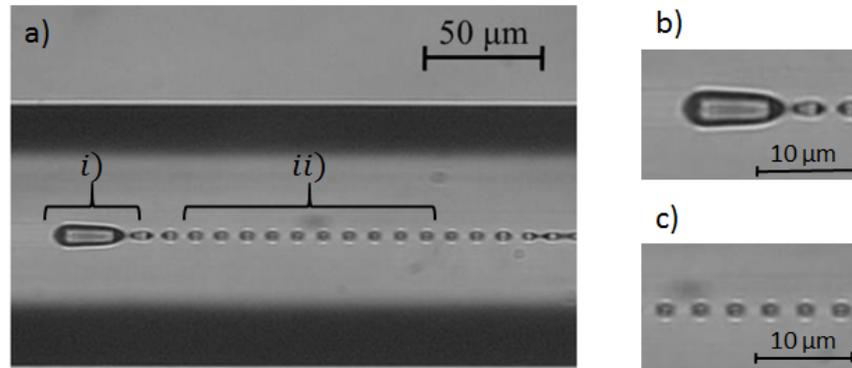


Figura 4.5: a) Imagem de microscopia ótica da bolha formada no ponto de finalização do fenómeno, gerado por uma potência de 3,0 W, numa fibra SMF. b) e c) mostram ampliação de 5× da região *i*) e *ii*).

Analisando a região *i*) observa-se a bolha de finalização, figura 4.5 b), que se caracteriza por maiores dimensões relativamente às bolhas da cadeia periódica com o eixo (*a*) de 9,1 μm e (*c*) de 30,5 μm . Analisando a região *ii*) observa-se uma cadeia de bolhas com um período espacial médio ΔS de 3,5 μm e com eixos paralelos (*a*) e perpendiculares (*c*) com dimensões médias de aproximadamente, 2,4 e 2,5 μm , respetivamente, os valores obtidos são comparáveis com os resultados apresentados na figura 4.3.

4.2.2 Produção das cavidades interferométricas por fusão

Para a produção das cavidades interferométricas que vão dar origem aos sensores vai ser utilizada fibra do tipo SMF funcional e fibra SMF danificada pela passagem do efeito de fusível. As cavidades dos sensores óticos serão produzidas usando uma única bolha (da região periódica *i*) ou finalização *ii*). Para tal, a fibra danificada pelo efeito de fusível é clivada de modo a que o corte intercete uma destas bolhas, conforme se ilustra na figura 4.6 para o caso das bolhas da região *ii*).



Figura 4.6: Imagem de microscopia ótica de uma fibra SMF clivada nas extremidades de uma bolha.

De seguida, funde-se esta fibra que apresenta uma bolha na extremidade com uma fibra SMF intacta, com uma máquina de fusão *Fujikura* modelo *FSM – 040S* utilizando um arco elétrico com uma corrente de 14 mA e uma duração de 2 s. Depois de fundidas, a bolha dá

origem a uma cavidade de maiores dimensões, como se pode observar na figura 4.7. Esta cavidade foi produzida através das bolhas da região *ii*) da figura 4.5.

Para a produção das cavidades, a fibra é novamente clivada do lado danificado e posteriormente fundida com outra fibra do tipo SMF intacta. O objetivo deste último passo é a obtenção de uma cavidade interferométrica entre duas fibras SMF funcionais de modo a possibilitar estudos por reflexão e transmissão ótica. Este método de produção apresentou uma taxa de sucesso de cerca de 10 4%.

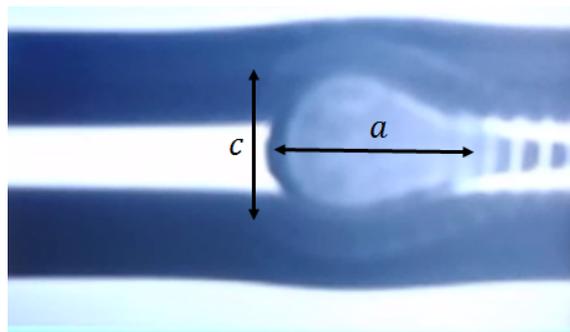


Figura 4.7: Imagem de microscopia ótica da cavidade originada na região de fusão entre a fibra SMF funcional e a fibra danificada.

Analisou-se, em seguida, as características das cavidades formadas usando a bolha de finalização, região *i*) da figura 4.5. Os resultados obtidos estão apresentados na figura 4.8.

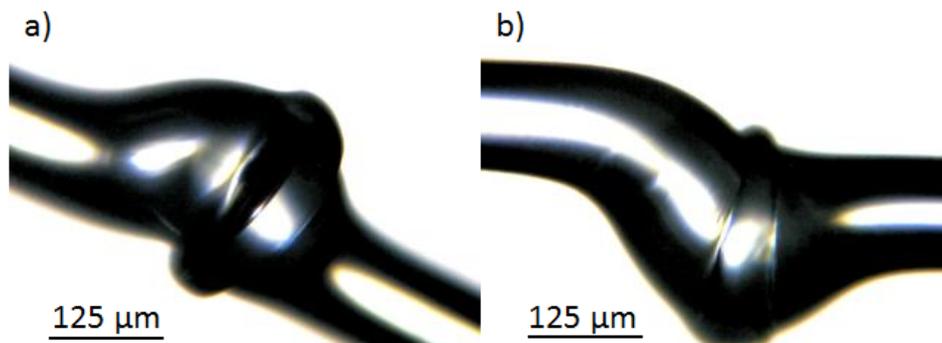


Figura 4.8: Imagem de microscopia ótica de duas cavidades, *a*) e *b*), formadas após o processo de fusão da fibra danificada na região da bolha de finalização com a fibra funcional.

Da análise da figura 4.8 mostra-se, facilmente, que a morfologia das cavidades obtidas recorrendo à bolha de finalização é disforme e irregular o que resultou em espetros de reflexão que não permitiam uma clara observação do padrão de interferência. Apesar da cavidade resultante apresentar, potencialmente, grandes dimensões, a construção dos sensores recorrendo à bolha de finalização foi abandonada devido às razões acima apresentadas. Na figura 4.9 podem ser observados os espetros de reflexão obtidos para as cavidades *a*) e *b*).

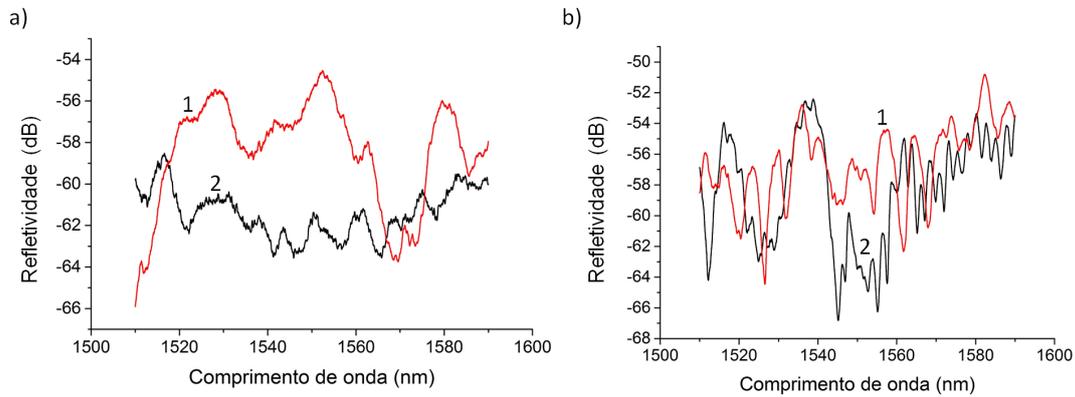


Figura 4.9: Espectros de reflexão (a) e (b) das respectivas cavidades apresentadas na figura 4.8. 1 e 2 referem-se aos espectros obtidos quando a radiação entra à direita e à esquerda da bolha, respetivamente.

Desta forma, a utilização da bolha de finalização foi abandonada.

Analisou-se, de seguida, a morfologia das cavidades produzidas usando uma bolha da cadeia periódica (região *ii*), figura 4.5). Nesta situação, o desafio experimental foi a eliminação de defeitos na região de fusão. Na figura 4.10 são apresentadas 3 imagens de cavidades que devido à sua morfologia e dimensão não permitiram a obtenção de padrões de interferência periódicos no espectro de reflexão.

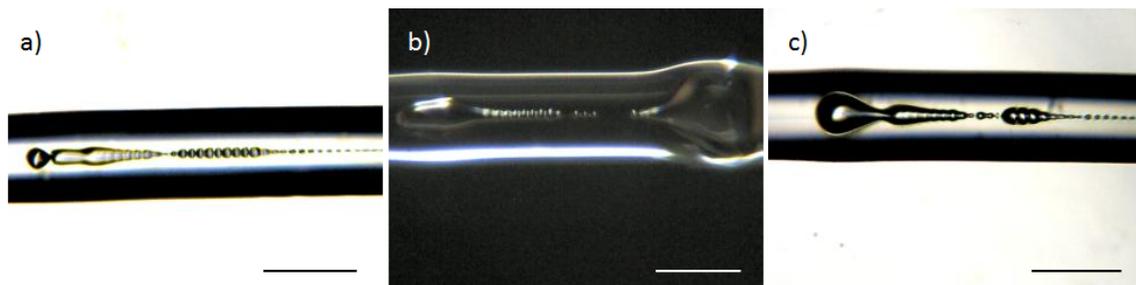


Figura 4.10: Imagens de microscopia ótica das cavidades interferométricas produzidas através da utilização da sequencia periódica de bolhas originada pelo efeito de fusível. A linha da legenda corresponde a $125 \mu m$.

Na figura 4.11 estão apresentadas 6 cavidades produzidas, 3 das quais evidenciam a formação de duas ou mais cavidades (imagens b), e) e f)) resultantes do processo de fusão.

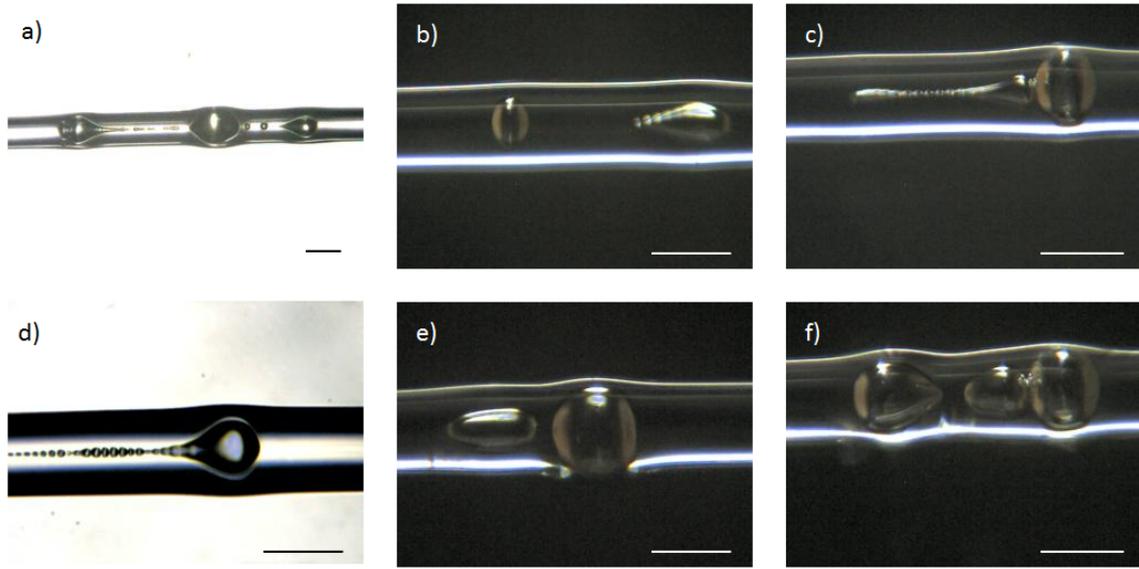


Figura 4.11: Imagens de microscopia ótica das cavidades interferométricas produzidas através da utilização da sequencia periódica de bolhas originada pelo efeito de fusível. A linha da legenda corresponde a $125 \mu m$.

Através do controlo da distância entre o ponto de fixação da fibra no clivador e a região da bolha consegue-se variar o ponto de fusão das fibras. O objetivo é garantir que as clivagens e as fusões ocorram sempre na região da fibra onde se encontra a bolha que se pretende utilizar para a produção das cavidades. Desta forma, reduz-se a probabilidade do aparecimento de uma segunda cavidade, tornando-a mais pequena. Com isto, foi possível obter as cavidades da figura 4.11. Estas cavidades apresentam uma forma elipsoidal com eixos a) e c) de dimensões listadas na tabela 4.1. Para a determinação experimental das dimensões das bolhas foram usadas imagens de microscópio ótico *Olympus* modelo *BH – 2* com ampliação de $400\times$ e um software (*ImageJ*).

Na tabela 4.1 estão apresentadas as dimensões de cada cavidade (obtidas para a primeira cavidade de cada imagem da figura 4.11), a largura e a altura da bolha bem como o respetivo volume. Para o cálculo do volume assumiu-se que a forma da bolha era sempre semelhante a uma elipsoide e por isso, para o cálculo do volume utilizou-se a seguinte expressão:

$$V = \frac{4}{3}\pi a^2 c \quad (4.1)$$

Onde a representa o comprimento da bolha na direção paralela ao eixo da fibra e c representa o comprimento da bolha na direção perpendicular ao eixo da fibra, como descrito na figura 4.7.

Tabela 4.1: Características morfológicas das cavidades produzidas apresentadas na figura 4.11

Sensor	Dimensões das cavidades (μm)		Volume (μm^3)
	a)	c)	
a)	93,8	91,8	$3,3 \times 10^6$
b)	90,5	58,1	$1,9 \times 10^6$
c)	92,2	107,2	$3,8 \times 10^6$
d)	83,3	79,2	$2,3 \times 10^6$
e)	120,3	139,2	$8,4 \times 10^6$
f)	129,9	98,7	$6,9 \times 10^6$

Devido à simplicidade do processo de produção, baseado na fusão de duas fibras distintas, este método é uma boa opção para o desenvolvimento de sensores sem alterar a robustez e a capacidade de guiagem da fibra até à região da cavidade. Neste caso, as superfícies refletoras que limitam a cavidade são as fronteiras entre a micro-cavidade de ar e a fibra ótica.

4.3 Caracterização dos sensores de deformação

Após a construção das cavidades, caracterizaram-se os espectros de reflexão obtidos com o objetivo da determinação dos padrões de interferência para, a partir destes, selecionar as cavidades com comportamento periódico num determinado intervalo espectral, descrito pela equação 3.11.

Para a medição dos espectros de reflexão utilizou-se a montagem experimental esquematizada na figura 4.12.

Um sinal ótico com elevada largura espectral proveniente da emissão espontânea numa fibra dopada com Er^{3+} ASE, do inglês *Amplified Spontaneous Emission*, percorre a fibra SMF até chegar à cavidade onde parte do sinal ótico é refletido pelas duas superfícies da cavidade, R_1 e R_2 respetivamente, e recombina no núcleo da fibra. O sinal refletido regressa pela fibra ao circulador onde é transmitida para um filtro ajustável que está ligado a um medidor de potência e ambos ligados a um osciloscópio (esta configuração funciona como analisador de espectros óticos). O resultado é um padrão de interferência resultante da recombinação do sinal ótico refletido. Esta configuração permite obter espectros de reflexão relativos a medidas de deformação (aplicação de deformação) em tempo real.

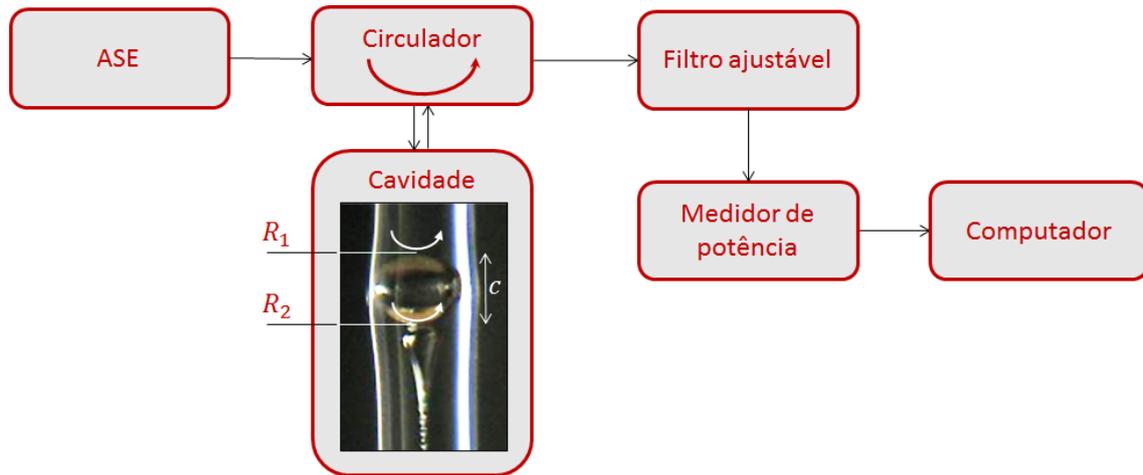


Figura 4.12: Esquema do procedimento experimental utilizada para a obtenção dos espectros de reflexão.

Os espectros de reflexão das cavidades produzidas vão ser, essencialmente, formados pela interferência dos sinais refletidos nas interfaces sílica-ar e ar-sílica (R_1 e R_2), respetivamente [77]. Recorrendo à figura 4.12 é possível verificar que a primeira reflexão (R_1) ocorre quando o sinal ótico que viaja no núcleo da fibra SMF, $n_1 \approx 1,4682$, atinge a micro-cavidade. Nesta interface uma parte do sinal ótico é refletido (R_1) e a outra parte é transmitida para dentro da micro-cavidade de ar, ($n_2 \approx 1$) percorre uma distância a até voltar a atingir a sílica, ou seja, a segunda superfície refletora (R_2), que é delimitada pela finalização da micro-cavidade. Nesta interface, uma parte do sinal ótico volta a ser refletido (R_2) e a outra parte volta a ser transmitida para o núcleo da fibra SMF com índice de refração n_1 . Apesar de não ter sido utilizada esta montagem experimental, o sinal ótico transmitido para o núcleo da fibra poderia ter sido utilizada para a caracterização das cavidades de *Fabry – Perot* através dos espectros de transmissão.

É de referir que na região das fusões podem estar presentes alguns efeitos de birrefringência uma vez que existem alterações na forma do caminho de propagação do sinal ótico [34]. Contudo, estes efeitos não são estudados nem caracterizados neste trabalho pois o principal objetivo é estudar o processo de produção das micro-cavidades bem como a sua respetiva caracterização.

Com a montagem acima esquematizada foi possível a obtenção dos espectros de reflexão para as cavidades apresentadas na figura 4.11. Estes são apresentados na figura 4.13.

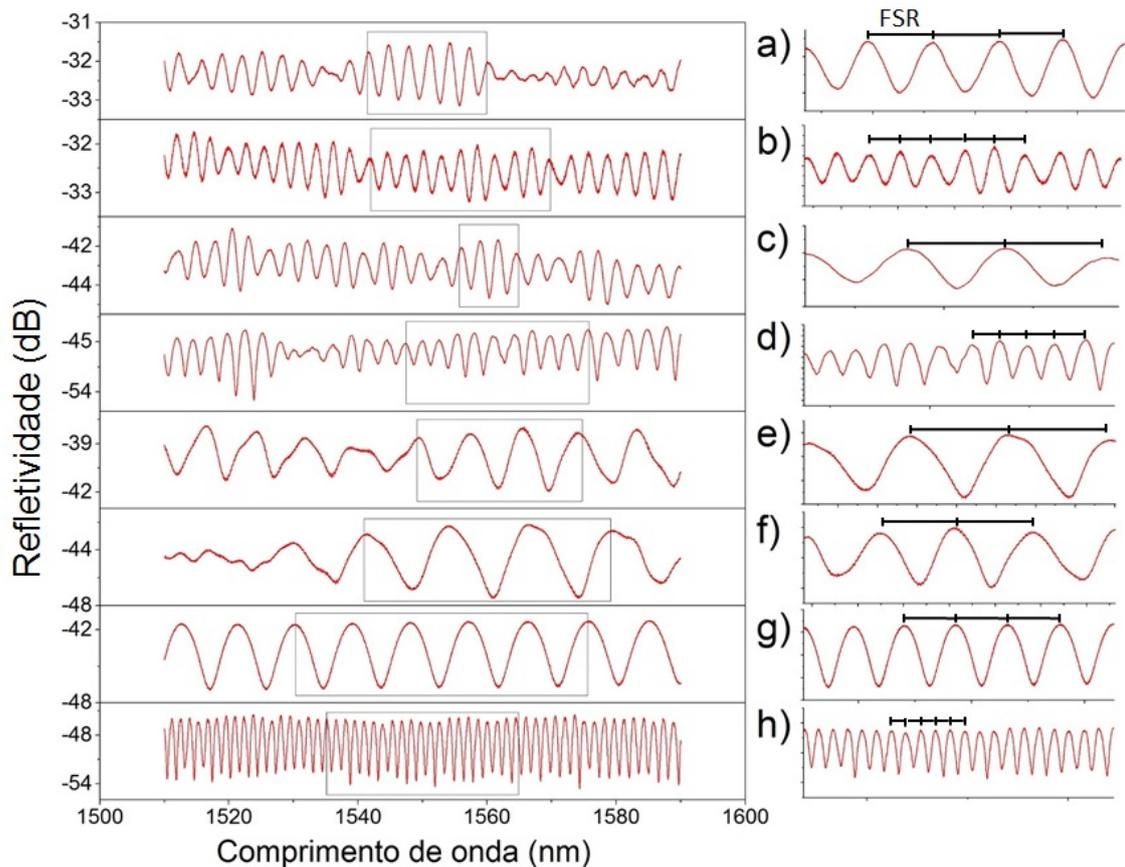


Figura 4.13: Espectros de reflexão das cavidades interferométricas produzidas através da utilização da sequência periódica de bolhas originada pelo efeito de fusível.

Os espectros de reflexão da figura 4.13 apresentam um padrão de interferência típico de um FPI, semelhante ao previsto pela equação 3.11, com periodicidade em determinados intervalos espectrais, como se pode verificar pelas imagens do lado direito da figura 4.13. O intervalo espectral com periodicidade, nos espectros de reflexão, é limitado devido à difícil reprodutibilidade e previsão do resultado da fusão.

Na tabela 4.2 estão representadas as características óticas dos espectros de reflexão apresentados na figura 4.13, de onde se destaca o número de máximos observados no intervalo espectral onde o espectro de reflexão apresentava um comportamento periódico e com amplitude constante, a FSR e o erro associado (a diferença entre a maior distância e a média), e a rejeição máxima entre máximos e mínimos consecutivos em cada intervalo.

Tabela 4.2: Valores do intervalo espectral onde o espectro é periódico e com maior amplitude, FSR e rejeição máxima no intervalo selecionado para as cavidades apresentadas na figura 4.11 e para outras duas cavidades g e h .

Sensor	Número de máximos	Intervalo (nm)	FSR (nm) \pm Erro	Rejeição máx. (dB)
$a.$	6	1541,7 – 1557,3	$3,1 \pm 0,1$	1,6
$b.$	11	1541,7 – 1569,7	$2,8 \pm 0,3$	1,4
$c.$	4	15356,1 – 1562,9	$2,9 \pm 0,4$	2,9
$d.$	12	1547,4 – 1578,5	$2,8 \pm 0,4$	8,4
$e.$	5	1549,7 – 1583,1	$8,9 \pm 1,9$	3,9
$f.$	4	1541,3 – 1579,3	$12,4 \pm 0,9$	5,3
$g.$	7	1530,3 – 1585,2	$9,1 \pm 0,3$	5,5
$h.$	22	1553,7 – 1564,5	$1,46 \pm 0,1$	8,6

Como podemos verificar, e apesar do método de produção ser aleatório, é possível obter sensores com uma resposta muito próxima do esperado. Contudo, a reprodutibilidade de sensores com este tipo de resposta depende inteiramente do método de produção que, por sua vez, depende da baixa sensibilidade do método de fusão. A taxa de sucesso na execução de cavidades, com uma modulação periódica do sinal refletido, foi de cerca de 10 %, as restantes cavidades não apresentavam dimensões ou espectros de reflexão com comportamento periódico.

A partir da análise dos espectros obtidos para cada sensor e da combinação de todos os fatores medidos e apresentados na tabela 4.1, o sensor c) foi o escolhido para a utilização numa aplicação como sensor de deformação, como se irá verificar no capítulo 5.1.

Capítulo 5

Monitorização de deformação mecânica

A utilização de cavidades interferométricas como sensores tem vindo a ser estudada e implementada em diversas áreas da instrumentação. O desenvolvimento deste tipo de sensores permitiu o aparecimento de sensores em miniatura capazes de monitorizarem vibração e deformação, entre outros.

Quando se atravessa uma ponte, um túnel ou quando se entra num edifício alto ou se viaja de avião, quando se utiliza a potência das barragens ou dos geradores, é necessário estar consciente da vitalidade destas estruturas. Estas podem ser controladas pela simples observação das forças e tensões internas que afetam as estruturas e são praticamente impossíveis de medir de forma prática eficiente. A deteção de ranhuras e fissuras concretas antes de se tornarem visíveis pode ajudar a evitar o colapso estrutural de edifícios e outras obras de construção civil. Portanto, o diagnóstico da integridade das estruturas tem motivado o desenvolvimento dos sensores de fibra ótica [78].

Os reservatórios de gás natural são óbvios candidatos para a aplicação de sensores de fibra ótica de pressão, deformação e temperatura. Muitas outras aplicações podem ser encontradas na indústria de processamento químico ou em aplicações militares como é o caso das que envolvem materiais explosivos e controlo de mísseis [9].

Os sensores de fibra ótica podem também ser utilizados em medições que necessitam de ser efetuadas em lugares remotos, como é o caso das grandes estruturas, como por exemplo, oleodutos [79].

A evolução das vibrações em máquinas industriais é, também, um indicador vital do seu próprio estado. Se um sistema de monitorização for capaz de registar o histórico destas vibrações, a alteração dos níveis de vibração ao longo do tempo pode alertar para a necessidade de prevenção de forma a impedir danos graves ou até mesmo a rotura do equipamento [80]. Os sensores de fibra ótica podem, também, ser utilizados para acelerar reparações através da deteção precoce uma vez que podem evitar grandes danos de equipamentos, minimizar interrupções nos sistemas de produção e/ou fornecimento e ainda aumentar a segurança deste tipo

de sistemas. Por isto, um sistema de medição (instrumentação) para a análise das vibrações é de extrema importância para a maior parte da indústria que opera com equipamento eletromecânico pesado. Os elementos sensores para este tipo de equipamentos incluem transdutores de deslocamento e velocidade e acelerômetros [16].

5.1 Preparação e implementação do sensor

Uma vez que o comportamento das cavidades já é conhecido e que existe uma necessidade crescente do desenvolvimento deste tipo de sensores a um preço reduzido, a aplicação de uma das cavidades produzidas como sensor de deformação é aqui demonstrada.

Para estudar a sensibilidade dos sensores de deformação anteriormente desenvolvidos foi utilizada a montagem experimental necessária para o estudo e caracterização das bolhas como sensores de deformação, apresentada na figura 5.1. Onde se pode observar que os sensores se encontram fixos em duas plataformas que se deslocam relativamente uma à outra. À plataforma móvel foi acrescentado um parafuso micrométrico. A distância entre os pontos de fixação nas fibras era de 18,6 cm.

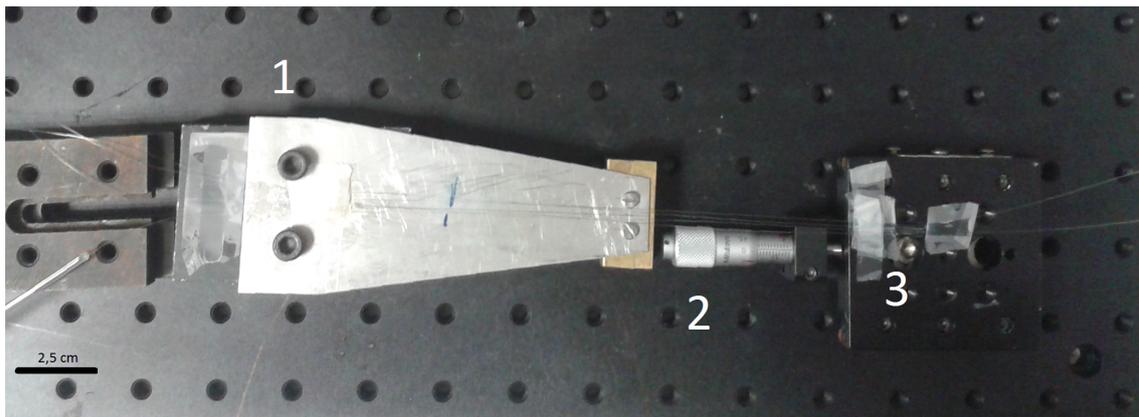


Figura 5.1: Fotografia da montagem experimental utilizada para os testes de deformação. (1) Plataforma fixa, (2) Parafuso micrométrico e (3) Plataforma variável.

Os espectros de reflexão são obtidos para cada sensor de forma independente. Apesar de terem sido produzidos, testados e medidos vários sensores apenas um foi utilizado para a caracterização da cavidade como sensor de deformação. Este sensor foi produzido através da cavidade apresentada na imagem c) da figura 4.11. Na figura 5.2 estão apresentados os espectros de reflexão obtidos aquando da aplicação de deformação no sensor. Nesta figura podemos ver diferentes espectros para diferentes valores de deformação aplicada. A elongação variou de 0 μm a 60 μm , o que corresponde a uma elongação relativa de 323 $\mu\epsilon$, estes testes foram realizados à temperatura ambiente. Os espectros foram obtidos por um interrogador com uma resolução de 1 μm da *MicronOptics*, modelo *SM125 – 500*.

Com os espectros de reflexão é possível estimar a deformação a que os sensores ficam sujeitos através da linearização da variação do comprimento de onda em função da deformação

aplicada. Estes valores são semelhantes, dentro da incerteza experimental, aos obtidos para o limite de rutura das fibras de sílica do tipo SMF [81].

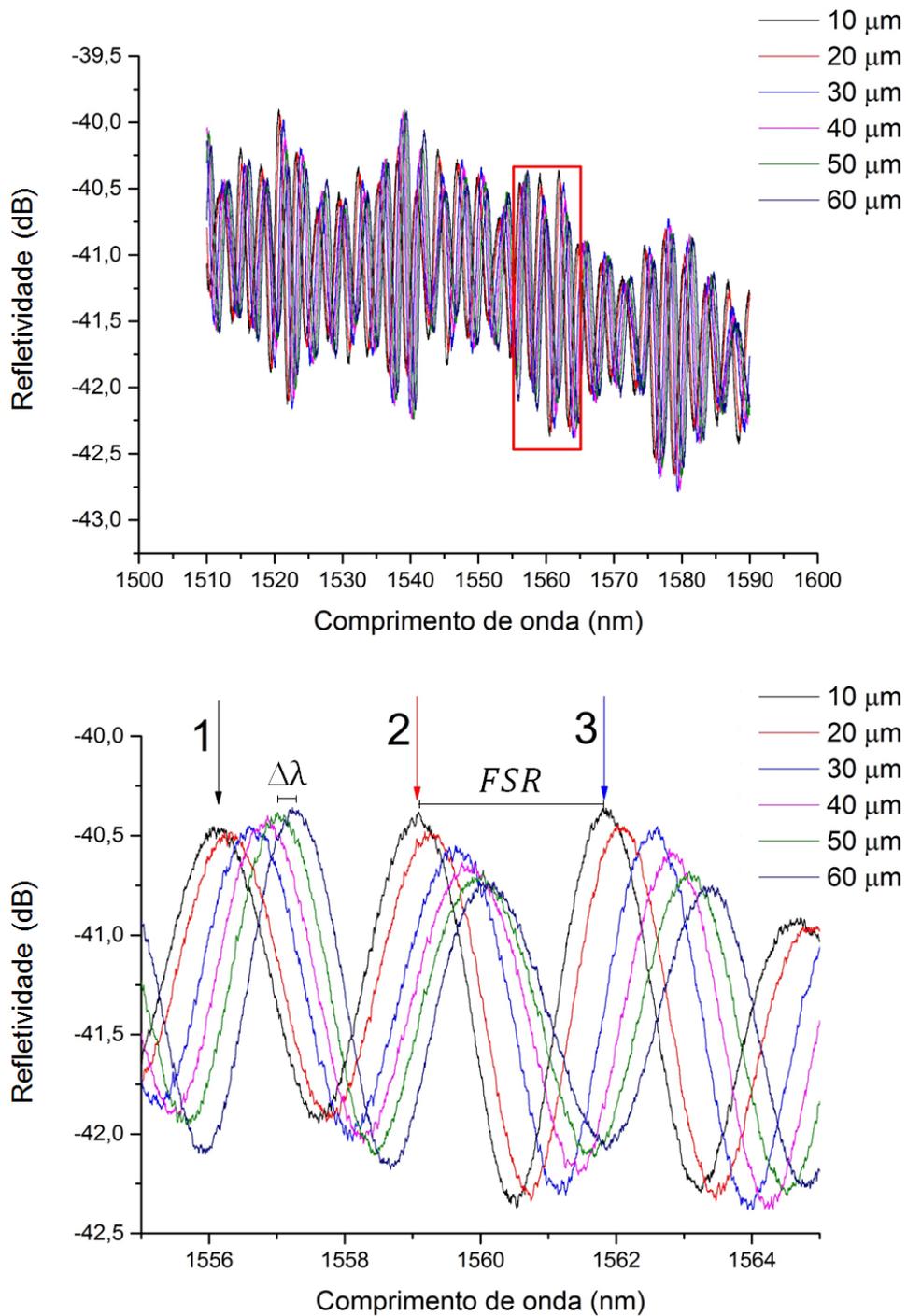


Figura 5.2: Espectros de reflexão obtidos para diferentes valores de deformação aplicada ao sensor.

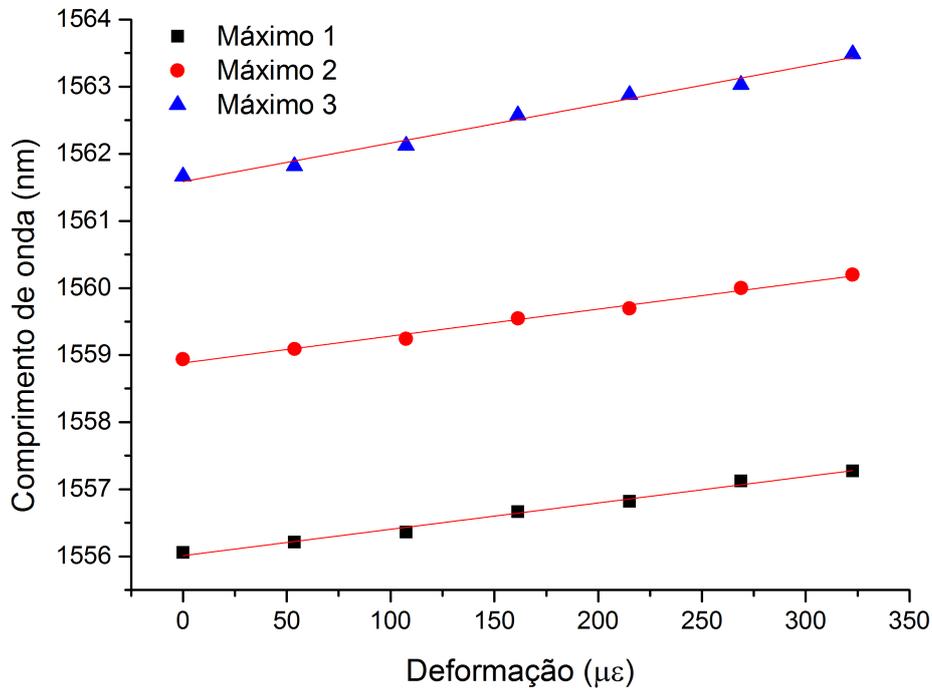


Figura 5.3: Variação do comprimento de onda em função da deformação aplicada. As linhas a vermelho representam o melhor ajuste linear com os respectivos coeficientes de correlação $R_1^2 = 0,98828$, $R_2^2 = 0,98817$ e $R_3^2 = 0,98288$.

No gráfico da figura 5.3 pode observar-se a deslocação da posição dos máximos de interferência construtiva com o aumento da deformação aplicada. Este resultado mostra claramente que a deformação do sensor é facilmente detetada devido ao desvio dos máximos de interferência registados pelo detetor. Este gráfico permite conhecer a sensibilidade do sensor. Estes dados são facilmente retirados da linearização dos dados de comprimento de onda em função da deformação. Na tabela 5.1 são apresentadas as posições dos máximos e a respetiva FSR e ainda os dados relativos à sensibilidade do sensor para três gamas distintas de comprimentos de onda.

A deformação necessária para causar a mesma variação da posição dos máximos é menor quanto maior for o declive das retas da posição dos máximos em função da deformação aplicada. Ou seja, quanto maior o declive maior a sensibilidade. Desta forma, é possível dizer que, para o sensor utilizado e tendo em conta o intervalo analisado, o sensor é mais sensível no intervalo de comprimentos de onda de 1561,6 a 1563,5 nm. Uma vez que a resposta do sensor em função da temperatura não fez parte do âmbito deste trabalho apenas se pode concluir que a análise da sensibilidade é válida à temperatura ambiente.

Tabela 5.1: Dados da distância entre máximos no intervalo de 1554 a 1566 nm retirados do espectro da figura 5.2 e valores das sensibilidades para o sensor estudado obtidas do gráfico 5.3.

	Posição dos máximos (nm)	FSR (nm)	Sensibilidade \pm Erro ($pm/\mu\varepsilon$)	Ordenada na origem \pm Erro (nm)
Máximo 1	1556,6		$3,9 \pm 0,2$	$1556,012 \pm 0,03$
		2,9		
Máximo 2	1559,6		$4,0 \pm 0,2$	$1558,88 \pm 0,03$
		2,97		
Máximo 3	1562,6		$5,7 \pm 0,3$	$1561,59 \pm 0,06$

Capítulo 6

Conclusões e perspectivas futuras

Esta dissertação de Mestrado abordou o desenvolvimento de sensores de deformação baseados em micro cavidades de *Fabry – Perot* geradas pelo efeito de fusível em fibra ótica. Estas micro cavidades geradas pelo efeito de fusível resultam da formação de um conjunto periódico de bolhas, no núcleo da fibra, com forma elipsoidal e dimensões típicas de $2,6 \mu\text{m}$ no eixo transversal da fibra e de $2,5 \mu\text{m}$ no eixo longitudinal da fibra ótica. Esta cadeia periódica de bolhas foi utilizada para a produção das micro cavidades interferométricas através de um processo de duas fusões com fibra SMF intacta. Por aplicação de deformação externa as dimensões das cavidades variam, induzindo um deslocamento no padrão de interferência, a partir do qual é possível a determinação da deformação aplicada na cavidade.

A principal vantagem deste método de produção dos sensores, quando comparado com outros métodos de produção de micro cavidades, usualmente lasers de femtosegundos, reside no baixo custo.

Nesta dissertação foram produzidas cerca de 80 cavidades interferométricas, das quais 8 foram estudadas como sensores de deformação. Estas cavidades caracterizam-se por volumes compreendidos entre $1,9 \times 10^6$ e $8,4 \times 10^6 \mu\text{m}^3$, com FSRs entre 1,5 e 12,4 nm e rejeições máximas entre 1,4 e 8,6 dB. Para estas cavidades foram obtidas sensibilidades compreendidas entre 3,9 e 5,7 pm/ μe no intervalo espectral de 1555,24 a 1565,06 nm.

As sensibilidades obtidas para estes sensores são da mesma ordem de grandeza das sensibilidades de outras de estruturas semelhantes, mas produzidos com base noutros métodos. No entanto, o método de produção aqui reportado é indubitavelmente menos dispendioso o que pode tornar este tipo de sensores comercialmente competitivos.

No futuro, sugere-se o desenvolvimento de um método de clivagem e fusão não aleatório mais automático, que permita uma produção menos aleatória das cavidades, com o conseqüente aumento da taxa de aproveitamento das cavidades produzidas. Outro aspeto a considerar em trabalhos futuros reside na modelização deste tipo de cavidades, pois o modelo tradicional de cavidades *Fabry – Perot* com superfícies refletoras paralelas não se adequa a estas cavidades.

Os objetivos do trabalho foram atingidos, tendo permitido a produção de um sensor ótico

para monitorização de deformação. O patamar seguinte de estudo será a incorporação deste tipo de sensores num sistema de monitorização da saúde estrutural em infraestruturas.

Bibliografia

- [1] E. Udd et al. *Fiber optic sensors*. Wiley Online Library, 1991.
- [2] A. D. Kersey. “A review of recent developments in fiber optic sensor technology”. Em: *Optical fiber technology* 2.3 (1996), pp. 291–317.
- [3] H. H. Hopkins e N. S. Kapany. “A flexible fibrescope, using static scanning”. Em: *Nature* 173 (1954), pp. 39–41.
- [4] B. Culshaw. “Optical fiber sensor technologies: opportunities and-perhaps-pitfalls”. Em: *Journal of lightwave technology* 22.1 (2004), p. 39.
- [5] T. Zhu et al. “In-line fiber optic interferometric sensors in single-mode fibers”. Em: *Sensors* 12.8 (2012), pp. 10430–10449.
- [6] H. Gong et al. “Temperature sensor based on modal interference in hollow-core photonic bandgap fiber with collapse splicing”. Em: *Sensors Journal, IEEE* 12.5 (2012), pp. 1421–1424.
- [7] Y. J. Rao e Z. L. Ran. “Optic fiber sensors fabricated by laser-micromachining”. Em: *Optical Fiber Technology* 19.6 (2013), pp. 808–821.
- [8] G. Cocorullo et al. “An integrated silicon interferometric temperature sensor”. Em: *Sensors and Actuators A: Physical* 61.1–3 (1997), pp. 267–272.
- [9] E. Pinet. “Fabry-Pérot fiber-optic sensors for physical parameters measurement in challenging conditions”. Em: *Journal of sensors* 2009 (2009).
- [10] B. H. Lee et al. “Interferometric fiber optic sensors”. Em: *Sensors* 12.3 (2012), pp. 2467–2486.
- [11] K. T. Grattan e T. Sun. “Fiber optic sensor technology: an overview”. Em: *Sensors and Actuators A: Physical* 82.1 (2000), pp. 40–61.
- [12] L. A. Ferreira et al. “Simultaneous measurement of displacement and temperature using a low finesse cavity and a fiber Bragg grating”. Em: *Photonics Technology Letters, IEEE* 8.11 (1996), pp. 1519–1521.
- [13] X. Wang et al. “All-fused-silica miniature optical fiber tip pressure sensor”. Em: *Optics letters* 31.7 (2006), pp. 885–887.

- [14] P. Prerana et al. “High Sensitive Fiber Optic Temperature Sensor Based on a Side-polished Single-mode Fiber Coupled to a Tapered Multimode Overlay Waveguide”. Em: *Journal of the Optical Society of Korea* 14.4 (2010), pp. 337–341.
- [15] D. W. Kim et al. “Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a reflection-mode long-period grating and an intrinsic Fabry-Perot interferometer sensor”. Em: *Optics letters* 30.22 (2005), pp. 3000–3002.
- [16] T. K. Gangopadhyay. “Prospects for fibre Bragg gratings and Fabry-Perot interferometers in fibre-optic vibration sensing”. Em: *Sensors and Actuators A: Physical* 113.1 (2004), pp. 20–38.
- [17] T. V. Grattan e B. T. Meggitt. *Optical fiber sensor technology*. Vol. 1. Springer, 1995.
- [18] E. Udd. “An overview of fiber-optic sensors”. Em: *Review of Scientific Instruments* 66.8 (1995), pp. 4015–4030.
- [19] T. Liu et al. “Simultaneous strain and temperature measurements in composites using extrinsic Fabry-Perot interferometric and intrinsic rare-earth doped fiber sensors”. Em: *Sensors and Actuators A: Physical* 80.3 (2000), pp. 208–215.
- [20] P. F. Antunes et al. “Optical fiber micro cavity strain sensors produced by the catastrophic fuse effect”. Em: *Photonics Technology Letters, IEEE* 26 (6 2013).
- [21] Y. J. Rao. “Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors”. Em: *Optical Fiber Technology* 12.3 (2006), pp. 227–237.
- [22] “ElectroniCast Fiber Optic Sensors Global Market Forecast and Analysis”. Em: *Fiber Optic Sensor Market Forecast* (2014).
- [23] J. Lou, Y. Wang e L. Tong. “Microfiber Optical Sensors: A Review”. Em: *Sensors* 14.4 (2014), pp. 5823–5844.
- [24] A. L. Schawlow e C. H. Townes. “Infrared and Optical Masers”. Em: *Physical Review* 112 (1958), pp. 1940–1949.
- [25] K. Shimoda, T. C. Wang e C. H. Townes. “Further aspects of the theory of the maser”. Em: *Physical Review* 102.5 (1956), p. 1308.
- [26] “OFS CD, Collected papers of the International Conferences on Optical Fiber Sensors”. Em: *SPIE, Washington, USA* (1999), pp. 1983–1997.
- [27] V. Bhatia e A. M. Vengsarkar. “Optical fiber long-period grating sensors”. Em: *Optics Letters* 21.9 (1996), pp. 692–694.
- [28] S. H. Aref et al. “Modal interferometer based on hollow-core photonic crystal fiber for strain and temperature measurement”. Em: *Optics express* 17.21 (2009), pp. 18669–18675.
- [29] Q. K. Karim et al. “A strain sensor based on in-line fiber Mach-Zehnder interferometer in twin-core photonic crystal fiber”. Em: *Optics Communications* 309 (2013), pp. 68–70.

- [30] H. Meng et al. “Michelson interferometer-based fiber-optic sensing of liquid refractive index”. Em: *Sensors and Actuators B: Chemical* 160.1 (2011), pp. 720–723.
- [31] H. Liang, M. Sun e Y. Jin. “Twist sensor based on Sagnac single-mode optic fiber interferometer”. Em: *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 124.24 (2013), pp. 6676–6678.
- [32] F. C. Favero et al. “Spheroidal Fabry-Perot microcavities in optical fibers for high-sensitivity sensing”. Em: *Optics express* 20.7 (2012), pp. 7112–7118.
- [33] J. Ma et al. “A compact fiber-tip micro-cavity sensor for high-pressure measurement”. Em: *Photonics Technology Letters, IEEE* 23.21 (2011), pp. 1561–1563.
- [34] D. Jáuregui-Vázquez et al. “An All Fiber Intrinsic Fabry-Perot Interferometer Based on an Air-Microcavity”. Em: *Sensors* 13.5 (2013), pp. 6355–6364.
- [35] A. B. Ribeiro. “Esquemas de multiplexagem de sensores de fibra óptica”. Tese de doutoramento. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 1996.
- [36] T. Yoshino et al. “Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications”. Em: *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* 30.10 (1982), pp. 1612–1621.
- [37] A. D. Kersey, D. A. Jackson e M. Corke. “A simple fibre Fabry-Perot sensor”. Em: *Optics Communications* 45.2 (1983), pp. 71–74.
- [38] R. Kist, S. Ramakrishnan e H. Wolfelschneider. “The Fiber Fabry-Perot And Its Applications As A Fiber-Optic Sensor Element.” Em: *1985 International Technical Symposium/Europe*. International Society for Optics e Photonics. 1986, pp. 126–135.
- [39] C. Belleville e G. Duplain. “White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor”. Em: *Optics Letters* 18.1 (jan. de 1993), pp. 78–80.
- [40] Y. J. Rao e D. A. Jackson. “Long-distance fibre-optic white light displacement sensing system using a source-synthesising technique”. Em: *Electronics Letters* 31.4 (1995), pp. 310–312.
- [41] W. Wang et al. “Temperature-Insensitive Pressure Sensor Based on All-Fused-Silica Extrinsic Fabry-Pérot Optical Fiber Interferometer”. Em: *Sensors Journal, IEEE* 12.7 (2012), pp. 2425–2429.
- [42] L. Cheng, A. J. Steckl e J. Scofield. “SiC thin-film Fabry-Perot interferometer for fiber-optic temperature sensor”. Em: *Electron Devices, IEEE Transactions on* 50.10 (2003), pp. 2159–2164.
- [43] C. E. Lee et al. “In-line fiber Fabry-Perot interferometer with high-reflectance internal mirrors”. Em: *SPIE 1584, Fiber Optic and Laser Sensors IX* (1991), pp. 396–399.
- [44] W. H. Tsai e C. J. Lin. “A novel structure for the intrinsic Fabry-Perot fiber-optic temperature sensor”. Em: *Journal of lightwave technology* 19.5 (2001), p. 682.

- [45] Y. Wang et al. “Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining for refractive index measurement with high sensitivity”. Em: *Journal of the Optical Society of America B* 27.3 (2010), pp. 370–374.
- [46] V. R. Machavaram, R. A. Badcock e G. F. Fernando. “Fabrication of intrinsic fibre Fabry–Perot sensors in silica fibres using hydrofluoric acid etching”. Em: *Sensors and Actuators A: Physical* 138.1 (2007), pp. 248–260.
- [47] Q. K. Karim et al. “A strain sensor based on in-line fiber Mach–Zehnder interferometer in twin-core photonic crystal fiber”. Em: *Optics Communications* 309 (2013), pp. 68–70.
- [48] X. Dong, H. Y. Tam e P. Shum. “Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer”. Em: *Applied Physics Letters* 90.15 (2007), p. 151113.
- [49] J. Villatoro et al. “Temperature-insensitive photonic crystal fiber interferometer for absolute strain sensing”. Em: *Applied Physics Letters* 91.9 (2007), p. 091109.
- [50] P. Ferraro e G. De Natale. “On the possible use of optical fiber Bragg gratings as strain sensors for geodynamical monitoring”. Em: *Optics and Lasers in Engineering* 37.2 (2002), pp. 115–130.
- [51] M. Majumder et al. “Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications”. Em: *Sensors and Actuators A: Physical* 147.1 (2008), pp. 150–164.
- [52] W. W. Morey, G. Meltz e W. H. Glenn. “Fiber optic Bragg grating sensors”. Em: *OE/FIBERS’89*. International Society for Optics e Photonics. 1990, pp. 98–107.
- [53] Y. J. Rao et al. “Combined spatial-and time-division-multiplexing scheme for fiber grating sensors with drift-compensated phase-sensitive detection”. Em: *Optics letters* 20.20 (1995), pp. 2149–2151.
- [54] A. M. Vengsarkar et al. “Long-period fiber gratings as band-rejection filters”. Em: *Journal of Lightwave Technology* 14.1 (1996), pp. 58–65.
- [55] C. R. Liao, T. Y. Hu e D. N. Wang. “Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser micromachining and fusion splicing for refractive index sensing”. Em: *Optics express* 20.20 (2012), pp. 22813–22818.
- [56] R. Kashyap e B. Nayar. “An all single-mode fiber Michelson interferometer sensor”. Em: *Journal of Lightwave Technology* 1.4 (1983), pp. 619–624.
- [57] T. Allsop et al. “A high sensitivity refractometer based upon a long period grating Mach–Zehnder interferometer”. Em: *Review of scientific instruments* 73.4 (2002), pp. 1702–1705.
- [58] B. Li et al. “Ultra-abrupt tapered fiber Mach-Zehnder interferometer sensors”. Em: *Sensors* 11.6 (2011), pp. 5729–5739.

- [59] D. Wu et al. “All single-mode fiber Mach–Zehnder interferometer based on two peanut-shape structures”. Em: *Journal of Lightwave Technology* 30.5 (2012), pp. 805–810.
- [60] X. Dong et al. “Wavelength-selective all-fiber filter based on a single long-period fiber grating and a misaligned splicing point”. Em: *Optics communications* 258.2 (2006), pp. 159–163.
- [61] L. V. Nguyen et al. “High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch”. Em: *Optics express* 16.15 (2008), pp. 11369–11375.
- [62] H. Y. Choi, M. J. Kim e B. H. Lee. “All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber”. Em: *Optics Express* 15.9 (2007), pp. 5711–5720.
- [63] M. Han. “Theoretical and experimental study of low-finesse extrinsic Fabry-Perót interferometric fiber optic sensors”. Tese de doutoramento. Virginia Polytechnic Institute e State University (Virginia Tech), 2006.
- [64] E. Udd e W. B. Spillman. *Fiber optic sensors: An introduction for engineers and scientists, Second Edition*. John Wiley e Sons, Inc. Hoboken, NJ, USA, 2011.
- [65] D. A. Jackson. “Monomode optical fibre interferometers for precision measurement”. Em: *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 18.12 (1985), p. 981.
- [66] B. Y. Kim et al. “All-fiber acousto-optic frequency shifter”. Em: *Optics Letters* 11.6 (1986), pp. 389–391.
- [67] H. J. Arditty e H. C. Lefevre. “Sagnac effect in fiber gyroscopes”. Em: *Optics letters* 6.8 (1981), pp. 401–403.
- [68] E. Hecht e A. Zajac. “Optics Addison-Wesley”. Em: *Reading, Mass* (1974), pp. 301–305.
- [69] R. Kashyap e K. J. Blow. “Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres”. Em: *Electronics Letters* 24.1 (1988), pp. 47–49.
- [70] A. M. Rocha et al. “Detection of fiber fuse effect using FBG sensors”. Em: *Sensors Journal, IEEE* 11.6 (2011), pp. 1390–1394.
- [71] A. Rocha. “Estudo da degradação da fibra ótica sob o efeito de potências elevadas”. Tese de doutoramento. Universidade de Aveiro, 2012.
- [72] R. M. Atkins, P. G. Simpkins e A. D. Yablon. “Track of a fiber fuse: A Rayleigh instability in optical waveguides”. Em: *Optics letters* 28.12 (2003), pp. 974–976.
- [73] F. Domingues et al. “Observation of fuse effect discharge zone nonlinear velocity regime in erbium-doped fibres”. Em: *Electronics letters* 48.20 (2012), pp. 1295–1296.
- [74] S. Todoroki. “Fiber fuse propagation behavior”. Em: *Selected Topics on Optical Fiber Technology, ed. Y. Moh, SW Harun, and H. Arof* (2012), pp. 551–570.
- [75] A. M. Rocha, P. Antunes, A. Martins et al. “Evaluation of the Fuse Effect Propagation in Networks Infrastructures with Different Types of Fibers”. Em: *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America. 2010, JWA10.

- [76] A. R. Frias. “Estudo da Degradação de Fibras Óticas Sob o Efeito da Propagação de Potências Elevadas, Projeto de Licenciatura, Universidade de Aveiro”. 2012.
- [77] Z. L. Ran et al. “Laser-micromachined Fabry-Perot optical fiber tip sensor for high-resolution temperature-independent measurement of refractive index”. Em: *Optics express* 16.3 (2008), pp. 2252–2263.
- [78] X. Bao e L. Chen. “Recent progress in distributed fiber optic sensors”. Em: *Sensors* 12.7 (2012), pp. 8601–8639.
- [79] D. Inaudi e B. Glisic. “Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing”. Em: *Journal of pressure vessel technology* 132.1 (2010), pp. 763–772.
- [80] M. Serridge. “What makes vibration condition monitoring reliable?” Em: *Noise Vibration Worldwide* 22.8 (1991), pp. 17–24.
- [81] P. Antunes et al. “Elastic constant measurement for standard and photosensitive single mode optical fibres”. Em: *Microwave and optical technology letters* 50.9 (2008), pp. 2467–2469.