



Universidade de Aveiro Departamento de Física
Ano 2017

**Luís Miguel
Antunes Pereira**

**Técnicas e dispositivos em fibras óticas de plástico
para sensoriamento**



**Luís Miguel
Antunes Pereira**

**Técnicas e dispositivos em fibras óticas de plástico
para sensoriamento**

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 do Doutor Carlos Alberto Ferreira Marques, Investigador de Pós-Doutoramento do Instituto de Telecomunicações e do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, e do Doutor Paulo Fernando da Costa Antunes, Investigador Auxiliar do I3N & Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Doutora Margarida Maria Resende Vieira Facão
Professora Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Doutor Paulo Sérgio de Brito André
Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores do Instituto Superior Técnico de Lisboa

Doutor Carlos Alberto Ferreira Marques
Investigador de Pós-Doutoramento do Instituto de Telecomunicações e do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Queria agradecer em primeiro lugar aos meus orientadores Doutor Carlos Alberto Ferreira Marques e Doutor Paulo Fernando da Costa Antunes, por toda a ajuda prestada para a realização deste trabalho, pela paciência, cooperação, disponibilidade, acompanhamento e conhecimento transmitido ao longo deste trajeto.

Também agradeço ao Instituto de Telecomunicações, ao I3N e ao Departamento de Física da Universidade de Aveiro pelas condições oferecidas que permitiram a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos e companheiros pelo apoio e conselhos dados nos momentos de maior indecisão.

E também queria agradecer à minha família, em especial aos meus pais e irmã, por estarem disponíveis a ajudar em todos os momentos e pelo apoio moral imprescindível.

palavras-chave

Redes de Bragg, Fibra ótica polimérica, PMMA, Sensibilidade, Comprimento de onda, Máscara de fase

resumo

As fibras óticas poliméricas têm vantagens significativas para muitas aplicações de sensoriamento, tais como elevada resistência mecânica, flexibilidade, biocompatibilidade e elevada sensibilidade a variações de temperatura e deformação. A implementação de redes de Bragg nestas fibras permite o desenvolvimento de dispositivos com a capacidade de filtrar sinais na área da fotônica e de aplicação em sistemas com sensores de alta precisão.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo a gravação de diferentes tipos de redes de Bragg em fibra ótica polimérica através do método da máscara de fase, e a caracterização da sua resposta face a diferentes perturbações externas. Estes dispositivos foram desenvolvidos através da implementação de novos conceitos experimentais, com o intuito de obter alta sensibilidade para aplicações em ambientes reais.

Foram gravadas com sucesso redes de Bragg uniformes e redes com deslocamento de fase em fibra ótica polimérica microestruturada de PMMA, dopada com *Benzildimethylketal*, usando apenas um pulso de energia 6.3 mJ de um laser KrF pulsado, com emissão a 248 nm. Também foram gravadas redes aperiódicas em fibra ótica polimérica de PMMA sem dopante, onde foi monitorizado o crescimento das redes com a incidência de alguns pulsos.

Para além da caracterização da resposta das redes de Bragg a diferentes perturbações externas, também foram testados diferentes procedimentos durante o tratamento térmico da rede de Bragg em fibra ótica polimérica, com o objetivo de variar permanentemente o comprimento de onda de Bragg para valores superiores.

keywords

Bragg grating, Polymer optical fiber, PMMA, Sensitivity, Wavelength, Phase mask

abstract

Polymer optical fibers have significant advantages for many sensing applications, such as high mechanical strength, flexibility, biocompatibility and high sensitivity to temperature and strain variations. The implementation of Bragg gratings in these fibers allows the development of devices with the ability to filter signals in the photonic fields and with applicability in high precision sensor systems.

In this context, the present work focuses on inscribing different types of polymer optical fiber Bragg gratings using the phase mask method, and the characterization of these structures response to different external perturbations. These devices were developed through the implementation of new experimental concepts, with the aim of obtaining high sensitivity for real environment applications.

Uniform and phase shifted Bragg gratings were successfully inscribed in PMMA microstructured optical fiber, doped with *Benzildimethylketal*, using only one pulse with energy 6.3 mJ from a KrF pulsed laser, emitting at 248 nm. Aperiodic gratings were also inscribed in undopant PMMA optical fiber, where the growth of the grating through the incidence of few pulses was monitored.

In addition to the characterization of the response from Bragg gratings to different external perturbations, different procedures were also tested during the annealing of the polymer optical fiber Bragg grating, in order to permanently tuning the Bragg wavelength to higher values.

Lista de símbolos e constantes

a	Raio do núcleo da fibra
A	Área da secção transversal da fibra
b	Distância da fibra ótica até à normal do limite da zona de sobreposição
c	Distância da máscara de fase à fibra ótica
d	Profundidade das depressões da máscara de fase
e	Distância máxima entre a máscara de fase e a fibra ótica (dentro da zona de sobreposição)
E	Módulo de Young
$E_{sílica}$	Módulo de Young da sílica
E_{PMMA}	Módulo de Young do PMMA
F	Força gravitacional
g	Aceleração gravitacional da Terra
H	Humidade relativa
k	Coefficiente <i>chirp</i>
L	Comprimento total da rede de Bragg
L_C	Largura da cavidade que separa 2 FBGs
L_{exp}	Comprimento experimental da rede de Bragg gravada.
L_R	Comprimento de uma FBG
m	Massa
M	Abertura da slit (sem a slit corresponde à largura da máscara de fase)
N	Número de modos propagantes
NA	Abertura numérica
n_{ar}	Índice de refração do ar
$n_{baíña}$	Índice de refração da baíña
n_{eff}	Índice de refração efetivo do núcleo da fibra
$n_{núcleo}$	Índice de refração do núcleo da fibra
n_{PC}	Índice de refração do policarbonato
n_{PF}	Índice de refração do composto perfluorado
$n_{sílica}$	Índice de refração da sílica
n_{ZEONEX}	Índice de refração do ZEONEX
p_{11}	Componente do tensor fotoelástico
p_{12}	Componente do tensor fotoelástico
p_e	Constante fotoelástica efetiva
r	Raio da fibra
R	Refletividade da rede de Bragg
s	Distância máxima até à normal do limite da zona de formação de 2 FBGs

s_2	Distância máxima até à normal do limite da zona de formação de 3 FBGs
S_H	Sensibilidade da rede de Bragg à humidade relativa
S_P	Sensibilidade da rede de Bragg à pressão hidrostática
S_T	Sensibilidade da rede de Bragg à temperatura
S_ε	Sensibilidade de rede de Bragg à deformação longitudinal
T	Temperatura
ν	Coefficiente de Poisson
V	Frequência normalizada
$\nu(z)$	Visibilidade das franjas de interferência
α	Coefficiente de expansão térmica
β	Coefficiente de expansão (variação de volume induzida pela humidade)
$\delta n_{eff}(z)$	Variação do índice de refração ao longo do eixo longitudinal da fibra
$\overline{\delta n_{eff}}$	Variação do valor médio do índice de refração
ΔH	Variação da humidade
Δn	Amplitude de modulação do índice de refração
ΔP	Variação da pressão
ΔT	Variação da temperatura
$\Delta \lambda_B$	Variação do comprimento de onda de Bragg
ε_z	Deformação longitudinal
η	Dependência normalizada do índice de refração efetivo do núcleo com humidade
θ_i	Ângulo do raio incidente
θ_m	Ângulo do raio difratado de ordem m
θ_{max}	Ângulo de aceitação máximo
θ_l	Ângulo de refração
κ	Coefficiente de acoplamento
λ_0	Comprimento de onda
λ_B	Comprimento de onda de Bragg
λ_{UV}	Comprimento de onda do laser UV
A	Período da perturbação induzida no índice de refração
A_0	Período à entrada da rede de Bragg (FBG aperiódica)
A_{MF}	Período das depressões da máscara de fase
ξ	Coefficiente termo-ótico
σ	Desvio padrão
$\sigma_{mecânica}$	Tensão mecânica longitudinal
$\phi(z)$	Variação do período
ϕ_{FP}	Diferença de fase entre os raios refletidos por duas superfícies refletoras (2 FBGs)
\emptyset	Diâmetro do núcleo da fibra
\emptyset_{fio}	Diâmetro do fio metálico

Lista de acrónimos

BDK	<i>Benzildimethylketal</i>	
CFBG	<i>Chirped Fiber Bragg Grating</i>	Rede de Bragg aperiódica
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>	Rede de Bragg em fibra ótica
FC/APC	<i>Ferrule Connector/ Angled Physical Contact</i>	
FC/PC	<i>Ferrule Connector/ Physical Contact</i>	
FP	<i>Fabry-Perot</i>	
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>	Largura a meia altura
GI	<i>Graded Index</i>	Índice gradual
GOF	<i>Glass Optical Fiber</i>	Fibra ótica de sílica
GOFBG	<i>Glass Optical Fiber Bragg Grating</i>	Rede de Bragg em fibra ótica de sílica
IR	<i>Infrared</i>	Infravermelho
mPOFs	<i>Microstructured Polymer Optical Fiber</i>	Fibra ótica polimérica microestruturada
MF	<i>Phase Mask</i>	Máscara de fase
MM	<i>Multimode</i>	Multimodo
MMA	<i>Methyl methacrylate</i>	
NA	<i>Numerical Aperture</i>	Abertura numérica
NIR	<i>Near-Infrared</i>	Infravermelho próximo
OSA	<i>Optical Spectrum Analyser</i>	Analisador ótico de espectros
PC	<i>Polycarbonate</i>	Policarbonato
PF	<i>Perfluorinate</i>	
PMMA	<i>(Poly)methyl methacrylate</i>	
POF	<i>Polymer Optical Fiber</i>	Fibra ótica polimérica
POFBG	<i>Polymer Optical Fiber Bragg Grating</i>	Rede de Bragg em fibra ótica polimérica
PS	<i>Polystyrene</i>	Poliestereno
PS-FBG	<i>Phase Shifted- Fiber Bragg Grating</i>	Rede de Bragg com deslocamento de fase
RH	<i>Relative Humidity</i>	Humidade relativa
SI	<i>Step Index</i>	Índice em degrau
SM	<i>Singlemode</i>	Monomodo
UV	<i>Ultraviolet</i>	Ultravioleta

Índice

Lista de símbolos e constantes

Lista de acrónimos

Índice

CAPÍTULO 1 – Introdução	1
1.1 – Estado de arte	1
1.2 – Enquadramento e motivação	3
1.3 – Estrutura da dissertação.....	4
CAPÍTULO 2 – Fibras óticas poliméricas	5
2.1 – Introdução	5
2.2 – POFs: Propriedades físicas.....	6
2.3 – Materiais usados na produção de POFs.....	6
2.3.1 – Poly Methyl MethAcrylate (PMMA)	6
2.3.2 – Polycarbonate (PC).....	8
2.3.3 – Polystyrene (PS)	8
2.3.4 – Perfluorinate (PF)	9
2.3.5 – Cyclic olefin copolymer: TOPAS.....	10
2.4 – Sensores baseados em modulação de intensidade.....	11
2.5 – Sensores baseados em FBG.....	11
2.5.1 – Redes de Bragg.....	12
2.5.2 – Tipos de redes de Bragg	13
2.6 – Desafios dos sensores baseados em POF	14
CAPÍTULO 3 – Produção das POFBGs	16
3.1 – Introdução	16
3.2 – Fotossensibilidade das POFs.....	16
3.3 – Preparação das POFs para a gravação de redes de Bragg	18
3.4 – Gravação de redes de Bragg.....	20
3.4.1 – Gravação de redes de Bragg usando laser femtosegundo.....	20
3.4.2 – Método por máscara de fase	21
3.4.2.1 – Montagem experimental	24
3.4.2.2 – Gravação de redes de Bragg uniformes com apenas 1 pulso do laser UV	27
3.4.2.3 – Gravação de redes de Bragg com deslocamento de fase com apenas 1 pulso do laser UV	28
3.4.2.4 – Gravação de redes de Bragg aperiódicas	30

CAPÍTULO 4 – Caracterização das POFBGs.....	32
4.1 – Introdução	32
4.2 – Estudo à sensibilidade da PS-POFBG.....	32
4.2.1 – Caracterização da sensibilidade à temperatura	33
4.2.2 – Caracterização da sensibilidade à pressão	34
4.2.3 – Caracterização da sensibilidade à deformação longitudinal	36
4.2.4 – Caracterização da sensibilidade à humidade	38
4.3 – Estudo à sensibilidade da CPOFBG.....	40
4.3.1 – Caracterização da sensibilidade à temperatura	40
4.3.2 – Caracterização da sensibilidade à deformação longitudinal	41
CAPÍTULO 5 – Deslocamento permanente do λ_B da POFBG uniforme para maiores comprimentos de onda.....	42
5.1 – Introdução	42
5.1 – Deslocamento do λ_B através da deformação longitudinal da fibra durante o recozimento.....	42
5.2 – Deslocamento do λ_B através da tensão aplicada por uma massa em suspensão durante o recozimento com 100 % de humidade relativa	44
CAPÍTULO 6 – Conclusões e trabalho futuro.....	46
6.1 – Conclusões	46
6.2 – Trabalho futuro.....	47
6.3 – Publicações resultantes.....	47
CAPÍTULO 7 – Referências.....	48

CAPÍTULO 1 – Introdução

1.1 – Estado de arte

Na década de 1950, alguns investigadores começaram a explorar o desenvolvimento e as potencialidades das fibras óticas. Contudo, foi na década de 1960 que as primeiras fibras óticas de sílica (GOF, *Glass Optical Fiber*) foram desenvolvidas [1]. Estas apresentavam elevadas limitações quanto à distância de transmissão, com atenuações acima dos 1000 dB/km. Face a este parâmetro, *Charles Kao* concluiu que a atenuação de aproximadamente 20 dB/km era necessária para o uso prático das GOFs na transmissão de dados [1][2]. Tal condição foi conseguida aumentando a pureza da sílica, o que permitiu à posteriori desenvolver fibras com atenuações cada vez mais reduzidas, que atualmente apresentam valores de aproximadamente 0.15 dB/km no comprimento de onda 1550 nm [2].

No entanto, tal sucesso não se verificou com as fibras óticas poliméricas (POF, *Polymer Optical Fiber*). As primeiras POFs, que foram desenvolvidas na década de 1960 por Du Pont,[3] eram fibras multimodo (MM) e o seu núcleo com variação de índice em degrau (SI, *Step Index*) [1]. Nesta época, a atenuação das mesmas apresentava valores próximo dos 1000 dB/km, e durante a década de 1970 foi possível reduzir para o limite teórico de aproximadamente 125 dB/km, nos 650 nm [3]. Contudo, as GOFs já apresentavam atenuações abaixo dos 1 dB/km para a região dos 1300/1500 nm, e já eram comercializadas em grandes quantidades e com baixos custos. Na área das telecomunicações, o uso das POFs restringiu-se para aplicações a curtas distâncias ou em redes locais, mas foram dominadas pelos cabos de cobre (cabos coaxiais ou *twisted-pair*), o que contribuiu para o seu fraco desenvolvimento até à década de 1990 [3].

Dada a sua estrutura amorfa e fácil fabrico, o polímero mais vulgarmente usado na POF é o (*poly*)*methyl methacrylate* (PMMA), que possui baixo custo de produção, elevada estabilidade térmica e resistência à corrosão. A atenuação intrínseca em todas as fibras depende do material que constitui o seu núcleo e para comprimentos de onda mais baixos é predominantemente originada pelo espalhamento de Rayleigh [2]. Mas no caso dos polímeros, este fator é mais problemático, onde a absorção ocorre devido às vibrações harmónicas das ligações C-H, especialmente para comprimentos de onda superiores a 650 nm [2]. De facto, as POFs de PMMA apresentam uma atenuação muito elevada, superior a 50 dB/m, na região espectral dos 1550 nm, tornando difícil trabalhar com POFs nesta região (C-Band) [4]. Para reduzir a atenuação por parte da fibra, pode-se trabalhar num comprimento de onda mais baixo, em particular na gama entre 520 e 850 nm, onde se consegue atingir atenuações de 0.06 e 0.2 dB/m, respetivamente [4]. Outra forma de mitigar este problema é substituir os átomos de hidrogénio por átomos mais pesados como o deutério ou o flúor, afim de variar as vibrações harmónicas para comprimentos de onda maiores [5]. Devido ao desenvolvimento destes novos polímeros com menores atenuações (à base de deutério e flúor) e às vantagens únicas das POFs em comparação com as GOFs, tais como a sua resistência mecânica, elevada flexibilidade, elevada sensibilidade a variações de temperatura e biocompatibilidade [6], existe atualmente um forte impulso na área dos sensores e das comunicações óticas para desenvolver dispositivos à base de POFs trabalhando na janela do visível e infravermelho próximo (NIR, *Near-Infrared*).

Por outro lado, o estudo e desenvolvimento das redes de difração em fibras óticas (FBG, *Fiber Bragg Grating*) iniciou-se na década de 1970 com o trabalho desenvolvido por Hill, sobre as propriedades não lineares em GOFs dopadas com germânio [7]. Neste estudo introduziu-se um padrão de interferência no interior do núcleo de uma fibra ótica, originado uma modulação

periódica do índice de refração do núcleo. Este resultado levou a uma intensificação do esforço pela comunidade científica para melhorar a fabricação das FBGs, obter perfis mais complexos, otimizar o seu desempenho e implementá-las em equipamentos como componentes óticos de elevado interesse. Posteriormente, veio a demonstrar-se que é possível fabricar FBGs de uma forma robusta e eficiente, gravando-as através da iluminação perpendicular do núcleo da fibra ótica com radiação UV. Meltz demonstrou uma forte variação no índice de refração quando a GOF dopada com germânio foi irradiada perpendicularmente ao eixo longitudinal da fibra por um padrão periódico originado pela interseção de dois feixes coerentes de comprimento de onda 244 nm [8]. Este estudo foi importante não só para o desenvolvimento e produção de redes periódicas, mas também para a criação de redes com diferentes comprimentos de onda de Bragg, pois ao alterar o ângulo entre os feixes de interseção, o espaçamento entre os máximos de interferência também é alterado.

Desde da sua primeira demonstração em 1999 [9], as FBG inscritas em POF têm atraído grande interesse devido à sua fácil integração em componentes óticos e aplicações na comunicação de dados e sensores. As FBGs em POF (POFBG, *Polymer Optical Fiber Bragg Grating*) foram relatadas em POFs de índice em degrau (SI-POF) e microestruturadas (mPOFs) incluindo FBGs em fibras monomodo (SM-FBGs) e em fibras multimodo (MM-FBGs) [10].

Nos sensores baseados em FBG, a modulação ocorre no comprimento de onda da luz refletida. A variação no sinal detetado, quando sujeito a uma perturbação, está diretamente associado à condição de ressonância de Bragg, e à sua resposta em função da temperatura, tensão, humidade, etc. O isolamento elétrico que confere uma segurança inerente à sua utilização e a imunidade a interferências eletromagnéticas são algumas das vantagens que justificam a utilização crescente desta tecnologia. Os sensores baseados em POFBG apresentam várias vantagens em relação às GOFs nomeadamente em relação à sensibilidade térmica e à sua diversidade nas aplicações em diferentes áreas como no uso de biossensores [11]. Nesta gama de sensores POFBGs estão inseridos os sensores baseados em micro/nano fibras poliméricas, que podem explorar ainda mais as vantagens das propriedades das POFs e podem proporcionar medidas de sensibilidade mais elevadas em comparação com as POFBGs de maior diâmetro [6]. Por outro lado, encontram-se as mPOFs que para além da elevada sensibilidade, podem apresentar menor atenuação dependendo do arranjo das microestruturas, e para a gama de comprimentos de onda da região NIR podem funcionar como SM-mPOF [10]. Apesar das vantagens no uso de POFBGs em relação às GOFs, estes também apresentam alguns aspetos negativos. Dentro destes, está a elevada atenuação na região IR e a questão de conectar com outras POFs ou com acopladores SM. Ao contrário das GOFs, onde é possível conectar permanentemente diferentes fibras através do processo de fusão (processo simples, rápido e com muito baixa atenuação), duas POFs só podem ser ligadas/coladas por cura UV ou por conetores, normalmente FC (*Ferrule Connector*) para aplicações de sensoriamento, contribuindo ainda mais para atenuação do sinal ótico [10][12].

Atualmente, a medição da deformação longitudinal e da temperatura são as principais aplicações das POFBGs, no entanto, a aplicação da POF no estudo da sensibilidade de outros parâmetros como pressão [13] e humidade [14] tem ganho destaque. Também, devido às características de diferentes materiais que podem constituir o núcleo da POF, sensores multiparâmetro têm sido desenvolvidos através da aplicação conjunta de fibras de GOFBGs (*Glass Optical Fiber Bragg Grating*) e POFBGs [10].

O crescente interesse e análise por parte da comunidade científica para a fabricação de diferentes tipos de redes de difração em fibras óticas tem contribuído ainda mais para o desenvolvimento deste tipo de sensores. Neste contexto, as FBGs com deslocamento de fase (PS-FBG, *Phase-Shifted-FBG*) têm sido usadas na medição de novos parâmetros, como ondas ultrassónicas [15] e na medição simultânea da temperatura e deformação [16]. Pode-se considerar que a PS-FBG resulta da interferência de duas redes uniformes que se encontram desfasadas, tal

como acontece com as redes de Bragg em cavidades de Fabry-Perot (FP) [17]. Por outro lado, sensores baseados em cavidades Fabry-Perot têm sido explorados pela comunidade científica devido à sua resposta linear, elevada sensibilidade e fácil detecção do modo de reflexão. A cavidade Fabry-Perot pode ser intrínseca ou extrínseca, dependendo da sua localização em relação à fibra ótica, o que expande o leque de aplicações para este tipo de sensor ótico [18], no entanto a impossibilidade de multiplexação de vários sensores FP na mesma fibra, ao contrario das FBGs, apresenta-se como uma desvantagem. A sua versatilidade permite a medição simultânea de diferentes parâmetros, como temperatura e deformação [19] ou temperatura e humidade [20]. A criação da cavidade Fabry-Perot em POF já foi demonstrada na literatura [18], tal como o estudo da sua sensibilidade à temperatura e à deformação. As redes aperiódicas (CFBG, *Chirped* FBG) fabricadas em GOF também têm sido aplicadas tanto na área das telecomunicações como em sensores. No campo dos sensores, estas redes de Bragg têm sido usadas na medição de diferentes perturbações como a deformação e índice de refração [21], e aplicadas em diferentes campos de detecção, como o caso da biomédica [22]. Ao mesmo tempo, devido ao atraso de grupo, têm demonstrado enorme potencial na medição simultânea de temperatura e deformação [23].

1.2 – Enquadramento e motivação

Ao longo da sua história, a humanidade tem implementado todo o tipo de sensores em sistemas isolados com a finalidade de monitorizar as condições físicas e ambientais, e controlar esses mesmos sistemas por forma a garantir segurança e otimização do desempenho. A introdução dos sensores elétricos ocorreu no século XIX, e no século XX, com a crescente evolução industrial, estes expandiram para todas as áreas científicas, tecnológicas e comerciais. O desenvolvimento de novos materiais e o controlo das suas propriedades ofereceu novas possibilidades para a criação de sensores mais avançados, com maior viabilidade e menores custos. Atualmente, a maioria dos sensores disponíveis no mercado são de natureza elétrica ou ótica, e permitem a monitorização constante e precisa de diversos parâmetros e fatores ambientais. Com a atual evolução tecnológica e computacional, a importância dos mesmos é bastante elevada e significativa no dia a dia do ser humano, quer para fins laborais, entretenimento, transporte, saúde, segurança, etc. Os recentes avanços na optoeletrónica têm aumentado e realçado a importância dos sensores óticos em relação aos elétricos, com destaque para os sensores baseados em fibra ótica, que apresentam vantagens tais como a imunidade a interferências eletromagnéticas, maior sensibilidade, fácil aplicação em equipamentos, dimensão e massa reduzidas. Na área dos sensores, a tecnologia POF tem sido alvo de investigação nos últimos anos, devido ao facto que muitas aplicações de sensoriamento possuem curtas distâncias entre os pontos de medição e sistema de análise [5]. Para além disso, apresentam baixo custo relativo, grande variedade de aplicações, elevada flexibilidade e simples processamento. Com o desenvolvimento de novos tipos de POFs, o potencial dos sensores baseados em POFBGs têm aumentado não só na construção civil, mas também em áreas como a marinha, indústria de aviação, engenharia aeroespacial e na medicina, onde estes sensores podem ser incorporados intrinsecamente ou então em filmes finos, pequenas estruturas flexíveis e deformáveis [10]. As características da POF e a sua diversidade de aplicações são parâmetros que vão possibilitar a investigação mais profunda destas fibras no futuro, e consequentemente o desenvolvimento de novos tipos de sensores e o aperfeiçoamento dos já existentes.

Neste contexto, o trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação de mestrado pretende explorar as potencialidades das FBGs inscritas em fibra ótica polimérica para sensoriamento. Realizou-se a implementação de diferentes tipos de redes de refração em várias POFs através do método da máscara de fase, para o estudo da sensibilidade de diferentes perturbações externas: temperatura, deformação longitudinal, humidade e pressão. Os tipos de rede de Bragg estudados ao longo do trabalho foram as redes uniformes, redes com deslocamento de fase e redes aperiódicas, em que a técnica de gravação destas estruturas foi simplificada em relação ao reportado pela

literatura. A otimização das condições de irradiação UV bem como a análise da composição química do material foram devidamente explorados, demonstrando um melhoramento que potencializa a exploração comercial da tecnologia.

O objectivo é realizar um estudo experimental em novos conceitos para o desenvolvimento de técnicas e dispositivos baseados em tecnologia POF para aplicação em diferentes áreas de interesse na engenharia.

1.3 – Estrutura da dissertação

Este documento está dividido em sete capítulos, onde são estudadas as características das fibras óticas poliméricas e as redes de Bragg em POF, bem como o estudo da sensibilidade a múltiplas perturbações para diferentes tipos de rede.

Neste primeiro capítulo é apresentado o estado de arte das fibras óticas, com principal destaque para as POFs, e FBGs e sua aplicação em sensores. Também é apresentado o enquadramento e a motivação em que insere este trabalho, bem como a sua estrutura.

No segundo capítulo é apresentada uma descrição teórica de algumas das características e propriedades das POFs e suas aplicações em sensores, bem como uma breve introdução teórica às redes de Bragg.

No terceiro capítulo é apresentada uma descrição teórica da gravação de FBGs em POF, e o procedimento inerente à gravação das redes de Bragg e a sua montagem experimental. Também é realizada a caracterização e análise das redes de Bragg fabricadas.

No quarto capítulo é apresentado o estudo e análise à sensibilidade das redes de Bragg face a diferentes perturbações: temperatura, deformação, pressão e humidade relativa.

No quinto capítulo é apresentada uma técnica para sintonização permanente do comprimento de onda das redes de Bragg em POF para maiores comprimentos de onda através do processo de recozimento térmico da fibra ótica.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões finais, sugestões de trabalho futuro a desenvolver e publicações resultantes deste estudo.

Por último, todas as referências utilizadas ao longo do trabalho são apresentadas.

CAPÍTULO 2 – Fibras óticas poliméricas

2.1 – Introdução

As fibras óticas são guias de onda flexíveis, que apresentam um núcleo de elevada transparência com índice de refração $n_{núcleo}$, envolto numa bainha de índice de refração n_{bainha} . A condução do sinal ótica efetua-se maioritariamente no núcleo da fibra através da ocorrência de fenómenos de reflexão interna total. Para ocorrer a reflexão interna total, a condição $n_{núcleo} > n_{bainha}$ tem de ser satisfeita. Os índices de refração do núcleo e da bainha permitem definir o valor da abertura numérica (NA , *Numerical Aperture*) da fibra através da seguinte equação:

$$NA = \sqrt{n_{núcleo}^2 - n_{bainha}^2} \quad (2.1)$$

A grandeza NA traduz a capacidade de captação de luz pela fibra, e está fortemente relacionada com o cone de aceitação, que se resume ao conjunto de ângulos de incidência com os quais os raios de luz, ao entrarem no núcleo da fibra, são capazes de se propagar ao longo desta. O ângulo de aceitação máximo (θ_{max}) para a luz que chega à extremidade da fibra é obtido pela equação:

$$\theta_{max} = \text{sen}^{-1}(NA) \quad (2.2)$$

As fibras óticas podem ser classificadas, do ponto de vista de propagação de luz, em dois grupos: monomodo (SM) e multimodo (MM). A fronteira entre estes dois tipos de fibra ótica é determinada através do parâmetro estrutural V , o qual se designa como frequência normalizada. Este depende do raio do núcleo a , do comprimento de onda λ_0 e da abertura numérica NA através da expressão

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} NA \quad (2.3)$$

Para valores de V inferiores a 2.4048 a fibra diz-se SM , uma vez que apenas é permitida a propagação de um modo e, para valores superiores, dir-se-á MM . O ponto de transição ocorre para um dado comprimento de onda, o designado comprimento de onda de corte, que varia consoante as características da fibra. O número de modos (N) propagantes numa fibra ótica $SI-MM$, de acordo com a teoria eletromagnética, pode ser aproximado a:

$$N \approx \frac{\left(\frac{2\pi a}{\lambda_0} NA\right)^2}{2} = \frac{V^2}{2} \quad (2.4)$$

Para além das características da fibra, o número de modos depende do comprimento de onda. Para fontes espectralmente largas, cada comprimento de onda terá os seus próprios modos, logo há que considerar não só os milhões de modos permitidos, mas, também, os comprimentos de onda emitidos. É perceptível na equação (2.4) que aumentando o comprimento de onda da luz propagada, reduz-se o número de modos. Contudo, esse aumento de λ_0 não é suficiente para reduzir o número de modos a apenas um. De forma análoga, uma diminuição de NA não é suficientemente

determinante na redução do valor de N . No entanto, com uma diminuição significativa do raio do núcleo e uma diminuição de NA , é possível reduzir o número de modos a apenas um.

2.2 – POFs: Propriedades físicas

As POFs são fibras óticas constituídas por materiais poliméricos, dielétricos, quase transparentes ao comprimento de onda de funcionamento. Nas últimas décadas, com o desenvolvimento dos materiais e das tecnologias de fabricação, os valores de atenuação das POFs têm diminuído significativamente, o que aumentou a aplicação deste tipo de fibras em redes de comunicação locais e no campo dos sensores [5]. Através da dopagem do material do núcleo, pode-se aumentar o índice de refração do mesmo [10], e consequentemente, como descreve a equação (2.1), aumentar a NA . Por outro lado, o aumento da diferença entre os índices de refração $n_{\text{núcleo}}$ e $n_{\text{baínha}}$ reduz a atenuação por curvatura da fibra, o que é importante em várias aplicações, como comunicação óticas e em sensores [10]. As POFs, comparativamente às GOFs, têm como vantagem não só os diferentes tipos de materiais constituintes do núcleo, mas também a diversidade de dimensões do mesmo, com diâmetros que vão desde de alguns micrómetros até valores próximos de 1 mm. O facto de possuírem maior NA e maior diâmetro do núcleo facilita a sua indexação a conectores e fontes espectrais de baixo custo. Aliado à sua fácil integração em equipamentos, torna-se atualmente económico trabalhar com POF, beneficiando do facto de que se pode alcançar um melhor desempenho deste tipo de tecnologia para sensoriamento.

Por outro lado, as POF possuem propriedades mecânicas únicas quando comparadas com as fibras de sílica. As POFs são constituídas por materiais poliméricos o que leva a que o Módulo de Young seja inferior em cerca de duas ordens de grandeza que o correspondente à GOF. Os valores do Módulo de Young para a PMMA-POF oscilam entre 1.6 – 5.0 GPa (≈ 73 GPa para a GOF [12]) e a tensão de fratura é da ordem dos 30% [10]. Estas variações são devido às diferenças nas condições de medição (ex: taxas de deformação) e também devido aos processos de produção. O raio de curvatura crítico é também menor para as POFs dado que os materiais poliméricos são mais dúcteis e menos rígidos que a sílica. A maioria das fibras óticas poliméricas são feitas à base de materiais de baixa densidade (≈ 1195 kg/m³ para o PMMA), o que as torna mais leves quando comparadas com as fibras de sílica (≈ 2200 kg/m³) [2].

2.3 – Materiais usados na produção de POFs

Nesta secção são abordados alguns dos materiais mais usados na produção de fibras óticas poliméricas, e apresentadas algumas das suas principais características físicas e óticas.

2.3.1 – Poly Methyl MethAcrylate (PMMA)

O material mais frequentemente utilizado na produção de POF é o polímero termoplástico PMMA. Do ponto de vista de transparência ótica, o material está no seu estado amorfo. O índice de refração típico do PMMA é 1.492 e a temperatura de transição vítrea situa-se entre os 95 e 125 °C. A Tabela 2.1 apresenta os valores típicos de algumas das propriedades do material PMMA.

Tabela 2.1 – Propriedades do PMMA [5][2].

Parâmetros	Valores	Unidades
Índice de refração	1.492	-
Temperatura de transição vítrea	115	°C
Densidade	1.195	g/cm ³
Módulo de Young	3.2	GPa
Condutividade térmica	0.17	W/m.K
Coefficiente de expansão térmica	9x10 ⁻⁵	K ⁻¹
Coefficiente termo-ótico	-1.10x10 ⁻⁴	K ⁻¹

As PMMA-POFs apresentam atenuações muito elevadas na região da banda central [4], como já foi referido anteriormente. A atenuação pode ser reduzida operando na gama do visível, tal como mostra a Figura 2.1, onde está ilustrada a relação da atenuação com o comprimento de onda em diferentes PMMA-SI-POF, com diferentes raios do núcleo. Neste espectro, as janelas de transmissão localizam-se nos comprimentos de onda 520, 570 e 650 nm. Para estes comprimentos de onda, a atenuação situam-se nos 73 dB/km, 64 dB/km e 130 dB/km respetivamente (Tabela 2.2) [3].

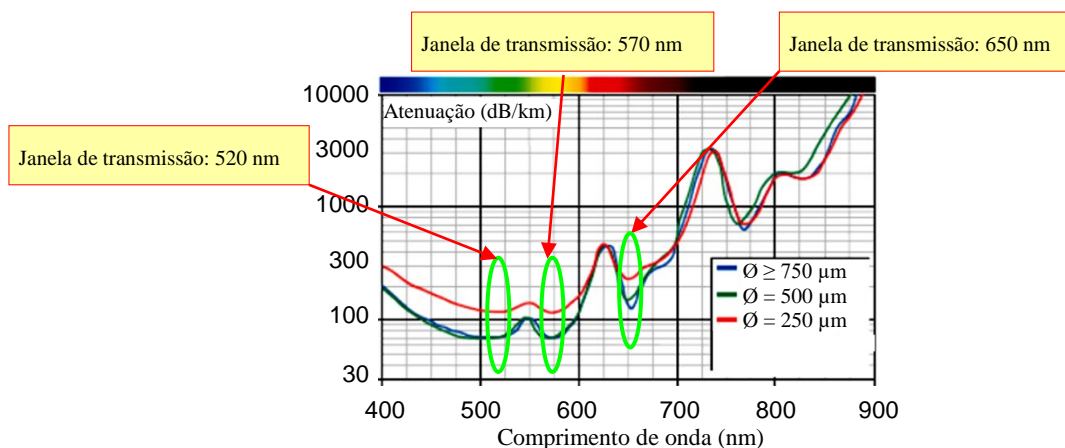


Figura 2.1 – Atenuação da PMMA-SI-POF com diferentes diâmetros de núcleo (Adaptado de [5]).

Tabela 2.2 – Contribuições para a atenuação nas PMMA-POFs [3].

Comprimento de onda (nm)		520	570	650
Valores típicos de atenuação (dB/km)		73	64	130
Atenuação (dB/km) Causada por processos intrínsecos:	Vibrações moléculares	11	17	96
	Espalhamento de Rayleigh	26	18	10
Atenuação (dB/km) Causada por processos extrínsecos		36	29	24
Mínimo teórico (dB/km)		37	35	106

Como se pode observar na Figura 2.1, a fibra com menor diâmetro do núcleo ($\varnothing=250 \mu\text{m}$) apresenta maior atenuação nas janelas de transmissão. Este comportamento pode dever-se ao maior número de imperfeições geométricas e estruturais na fibra para núcleos de menor diâmetro [24], uma vez que o seu processo de fabricação é mais complexo e difícil de controlar, levando a um maior número de imperfeições na fibra. Para além do processo de fabrico, este comportamento também pode ser devido à elevada atenuação da bainha [5] ou há existência de imperfeições na

interface núcleo-bainha, dado que conforme o diâmetro do núcleo diminui, aumenta a probabilidade dos raios incidirem na interface núcleo-bainha.

Uma das principais características do polímero PMMA é a sua elevada capacidade de absorção de água. O PMMA pode absorver até 1.5% de água, levando este material a expandir e consequentemente, altera a sua geometria e desempenho ótico [5]. Um dos parâmetros que esta característica pode diretamente afetar é a atenuação da POF, levando ao aumento deste parâmetro por parte da fibra.

2.3.2 – Polycarbonate (PC)

As primeiras PC-POF foram desenvolvidas em 1986 [5] e, dada a sua resistência a elevadas temperaturas, este tipo de fibra ganhou destaque em aplicações industriais onde a temperatura é um parâmetro importante. A temperatura de funcionamento limite para uma PMMA-POF varia entre os 80 °C e os 100 °C [10]. Acima destes valores, este tipo de POF começa a perder a sua rigidez e transparência. As PC-POF por sua vez, possuem maior temperatura de transição vítrea (≈ 145 °C) [25] quando comparadas com as PMMA-POF, e consequentemente podem operar a temperaturas mais elevadas, até aproximadamente 125 °C [25].

O polímero policarbonato possui um elevado índice de refração ($n_{PC} \leq 1.59$), e por sua vez, a maioria das PC-POFs possuem uma *NA* relativamente grande [5]. Dado o elevado n_{PC} , o material PMMA pode ser usado como bainha na PC-POF. Em termos de transmissão espectral, a região do visível e NIR é a que apresenta menor atenuação para a PC-POF. As janelas de transmissão situam-se nos comprimentos de onda 660 e 770 nm, conforme pode-se observar na Figura 2.2 (setas a vermelho), com atenuações de aproximadamente 400 e 450 dB/km, respetivamente [5] [26].

A grande desvantagem da PC-POF passa pela fraca estabilidade quando sujeita simultaneamente a alta temperatura e elevada humidade relativa. Quando sujeita a estas condições, os valores de atenuação desta fibra sobem rapidamente, e degrada-se mais rapidamente que a PMMA-POF sob as mesmas condições [5].

2.3.3 – Polystyrene (PS)

A PS-POF tem aplicações similares às PMMA-POF [27], apesar de ambas possuírem características diferentes. A temperatura de transição vítrea do poliestereno é de aproximadamente 100 °C e o seu índice de refração é 1.59, o que torna possível usar o polímero PMMA como bainha nas PS-POFs [5]. As PS-POFs apresentam maior *NA* (com valores típicos de 0.73 e 0.47 para PS-POF e PMMA-POF, respetivamente) e uma atenuação mais elevada que as PMMA-POFs, com o valor teórico de 69 dB/km para 672 nm [24].

A Figura 2.2 compara os espectros de atenuação para a PMMA-POF, PC-POF e PS-POF na região do visível e NIR. Estes 3 materiais apresentam uma janela de transmissão comum na zona dos 650 nm. As janelas de transmissão para o PS-POF situam-se nos 580, 624 e 672 nm (setas a azul) [5].

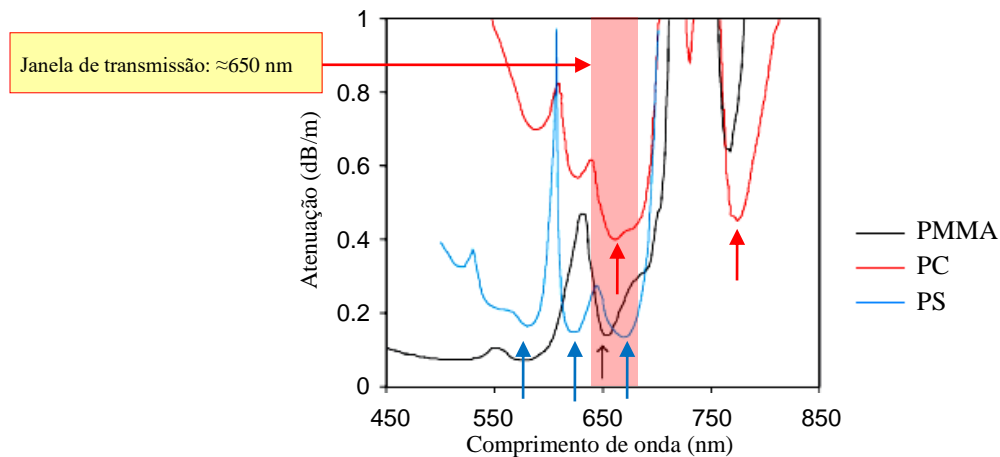


Figura 2.2 – Espectros de atenuação para a PMMA-POF, PC-POF e PS-POF (Adaptado de [26]).

2.3.4 – Perfluorinate (PF)

As POFs apresentam valores de atenuação causada por processos intrínsecos muito maiores que as GOFs. Na região do NIR, esta atenuação é predominantemente causada pelas vibrações harmónicas das ligações C–H. O método que pode ser utilizado para reduzir a atenuação do material é a substituição do hidrogénio por átomos com maior massa atómica, como por exemplo o deutério e o flúor, com o intuito de variar as vibrações harmónicas para comprimentos de onda maiores [2]. A substituição do hidrogénio por flúor, átomo que tem cerca de 19 vezes a massa atómica do hidrogénio, implica que as bandas de absorção sejam deslocadas para o IR, e a sua janela de transmissão passa a abranger esta região espectral do NIR. No entanto, os polímeros PF apresentam um dos índices de refração mais baixos de todos os plásticos transparentes ($n_{PF} \leq 1.340$), e por isso são os materiais preferidos para a bainha [5]. A própria fabricação das PF-SI-POFs torna-se difícil porque não se encontram materiais adequados para a bainha desta fibra, com um índice de refração menor que n_{PF} .

A Figura 2.3 (a) compara os valores teóricos de atenuação para o polímero PF e para SM-GOF. O espectro mostra a viabilidade das PF-POF para comprimentos de onda de 650 nm a 1300 nm com coeficientes de atenuação inferiores a 10 dB/km, e na janela dos 1500 nm a atenuação chega a ser inferior quando comparada com a sílica. Na realidade, estes valores de atenuação são difíceis de alcançar (Figura 2.3 (b)). Para além do facto do n_{PF} ser bastante baixo, este polímero tende a cristalizar-se [5]. Neste sentido, a investigação direcciona-se para a obtenção de um polímero PF que possa ser processado no seu estado amorfo, para reduzir ao máximo a sua atenuação e aumentar a transparência do material.

Do grupo de polímeros PF destaca-se o material CYTOP (*cyclic transparent optical polymer*), composto por átomos de carbono, oxigénio e flúor, que apresenta elevada transparência, durabilidade térmica e química, e baixa absorção de água [1]. O índice de refração é 1.34 e a temperatura de transição vítrea é aproximadamente 108 °C [28]. A janela de transmissão localiza-se na gama dos 650 – 1330 nm, com atenuação abaixo dos 50 dB/km [5]. Adicionalmente, a dispersão do material é baixa devido ao baixo índice de refração, o que torna estas fibras promissoras no campo das comunicações óticas. Na Figura 2.3 (b) pode-se observar as diferenças entre atenuação teórica e experimental para a CYTOP-POF com índice gradual (GI) e constatar a larga janela de transmissão para esta fibra.

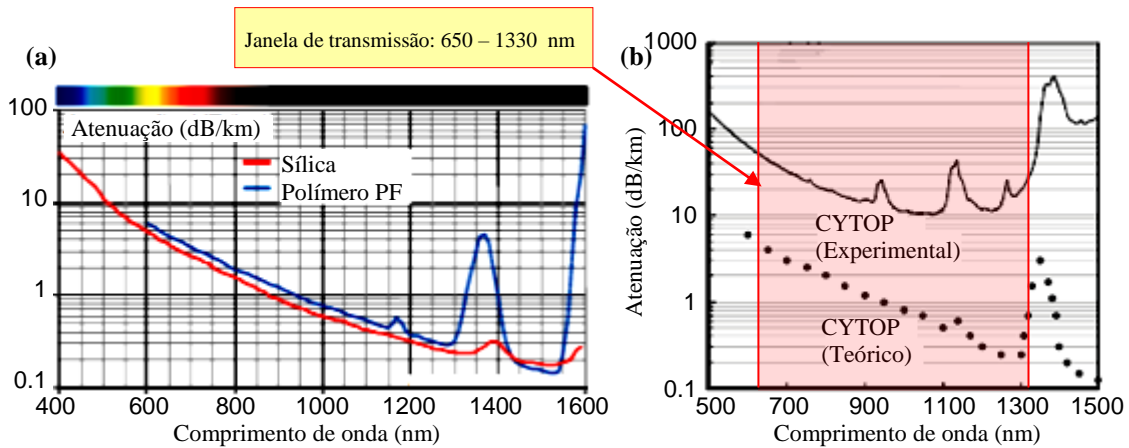


Figura 2.3 – (a) Comparação teórica da atenuação entre o polímero PF e a sílica (Adaptado de [5]); (b) Comparação entre a atenuação teórica e experimental para a GI-CYTOP-POF (Adaptado de [1]).

2.3.5 – Cyclic olefin copolymer: TOPAS

A fibra ótica TOPAS (*Thermoplastic Olefin Polymer of Amorphous Structure*) pertence ao grupo *cyclic olefin copolymer*, e seu índice de refração é de aproximadamente 1.53 [27]. Do ponto de vista teórico, são mais transparentes que a PMMA-POF e podem operar em temperaturas mais elevadas, uma vez que dependendo do polímero, a sua temperatura de transição vítrea pode variar entre 80 °C (*TOPAS:grade 8007*) e 180 °C (*TOPAS:grade 6017*) [29]. Além disso, apresenta elevada resistência química a ácidos e bases, e a solventes como é o caso da acetona, elevada biocompatibilidade e a sua absorção de água é extremamente reduzida (<0.01%) [29]. O ZEONEX, que pertence ao grupo do *cyclic olefin polymer*, possui propriedades muito semelhantes ao polímero TOPAS [26][30], nomeadamente a reduzida absorção de água e o índice de refração ($n_{ZEONEX}=1.51 - 1.54$) [27]. A Figura 2.4 compara as atenuações das fibras ZEONEX e TOPAS. A janela de transmissão mais adequada para a TOPAS-POF localiza-se nos 780 – 880 nm.

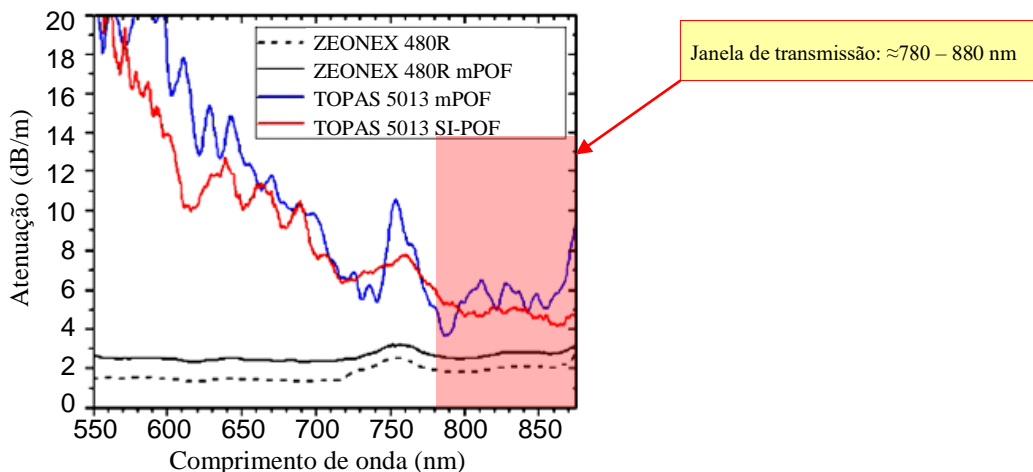


Figura 2.4 – Espectros de atenuação do polímero ZEONEX:grade 480R (tracejado), SM-ZEONEX:grade 480R-mPOF (preto), SM-TOPAS:grade 5013-mPOF (azul) e SM-TOPAS:grade 5013-SI-POF (vermelho) (Adaptado de [30]).

2.4 – Sensores baseados em modulação de intensidade

A investigação e desenvolvimento de sensores de fibra ótica têm evoluído bastante, face às suas vantagens em relação aos sensores elétricos convencionais. As suas dimensões reduzidas permitem a sua inclusão no próprio ambiente a ser analisado, e ao combinar as funcionalidades de sensor e meio de transmissão, proporciona medidas de sensibilidade imediatas e precisas. Um sensor de fibra ótica pode então ser definido como um dispositivo de medida em que o parâmetro físico, químico ou biológico a ser medido interage com o sinal ótico guiado pela fibra. Quando num sensor há alteração das propriedades físicas da fibra, as características do sinal ótico que nela se propaga são modificadas e é possível a quantificação do parâmetro físico que provocou a alteração do sinal.

Os sensores POF podem ser divididos em 2 categorias: intrínsecos e extrínsecos. Nos sensores extrínsecos, a alteração do sinal ótico ocorre numa região externa à fibra, isto é, a fibra ótica é utilizada apenas como guia de luz entre a fonte e o meio a ser monitorizado. Nos sensores intrínsecos, o sinal ótico não sai da fibra e o parâmetro de interesse atua diretamente na fibra alterando uma ou mais propriedades do sinal ótico guiado, ou seja, o elemento sensor é a própria POF. O sinal ótico pode ser caracterizado por um conjunto de parâmetros independentes, entre os quais estão a intensidade, a fase ou o comprimento de onda de Bragg, que são sensíveis às perturbações físicas a medir.

Os sensores baseados em modulação de intensidade representam um dos primeiros esquemas de deteção utilizados em sensores de fibra ótica e são, provavelmente, os mais simples em termos de princípio de funcionamento e instrumentação. O seu funcionamento baseia-se nas variações da potência ótica detetada, variações essas induzidas na fibra por fatores físicos externos. De um modo geral, as configurações experimentais possuem uma fonte de luz, por exemplo um LED, a própria fibra ótica e um fotodetector. As POFs têm enorme importância neste tipo de sensores dado que apresentam um diâmetro relativamente grande comparado com outras fibras e elevada NA , o que permite reduzir o custo de produção, a atenuação de inserção do sinal e o uso de componentes menos precisos e de baixo custo (conectores, LEDs, fotodetectores, entre outros). Desta forma, existe um vasto leque de aplicações baseadas na tecnologia POF que permitem explorar as propriedades deste tipo de fibra, nomeadamente na parte da monitorização e cuidados de saúde, na medição da pressão arterial [31] e concentração de glicose [32]. Algumas das aplicações de sensores POF baseados em modulação de intensidade são: sensor de nível [33], sensor de distância, sensor de concentração, sensor de deformação, sensor de movimento, entre outras [5].

As vantagens deste tipo de sensores passam pela simples montagem e funcionamento, baixo custo e grande variedade de configurações experimentais. Contudo, uma das grandes desvantagens dos sensores baseados em modulação de intensidade relaciona-se com a estabilidade das fontes emissoras que introduz erros nas medições e limita a resolução. Afim de ultrapassar esta desvantagem, pode ser usado um sinal de referência proveniente da fonte ótica através da separação do sinal ótico em duas fibras óticas.

2.5 – Sensores baseados em FBGs

As FBGs, a par das redes de período longo, constituem o método mais comum no desenvolvimento de sensores em fibra ótica baseados em modulação no comprimento de onda da luz refletida (λ_B). A variação no sinal detetado, quando sujeito a uma perturbação, está diretamente associado à condição de ressonância de Bragg, e à sua resposta em função do parâmetro em análise. Uma característica destes sensores é a sua independência em relação à intensidade da radiação utilizada, quer por oscilações na fonte ótica ou oscilações de atenuação na transmissão (por

exemplo vibração ou curvaturas na fibra). Também possuem elevada resolução e maior razão sinal-ruído que os sensores baseados em modulação de intensidade.

2.5.1 – Redes de Bragg

A rede de Bragg em fibra ótica (FBG) consiste numa modulação periódica (ou quase-periódica) do índice de refração ao longo do seu núcleo (Figura 2.5). Deste modo, a FBG funciona como uma estrutura multicamada composta por um material onde o índice de refração vai alternado em cada camada, permitindo que ocorra nas interfaces das camadas reflexões parciais da onda transmitida, denominadas por Reflexões de Fresnel. A espessura ótica das camadas define o comprimento de onda que sofrerá interferência construtiva das suas reflexões. Neste comprimento de onda particular, λ_B , a FBG atua como um espelho. Quando iluminada por uma fonte de banda larga, a FBG irá refletir seletivamente o comprimento de onda que satisfaz a condição de Bragg:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (2.5)$$

onde n_{eff} representa o índice de refração efetivo do núcleo e Λ o período da modulação do índice de refração no núcleo da fibra ótica. Toda a restante banda de comprimentos de onda que não satisfaça a condição de Bragg é transmitida ao longo da fibra. A FBG tem, normalmente, um período na ordem das centenas de nanómetros e a sua extensão é na maioria das situações de alguns milímetros ou centímetros.

A Figura 2.5 mostra o esquema de uma rede de Bragg em fibra ótica e a modulação do índice de refração ao longo da fibra, onde estão representados alguns dos parâmetros fundamentais da rede de Bragg: Δn é a amplitude de modulação do índice de refração e $\overline{\delta n_{eff}}$ representa o valor médio da variação do índice de refração efetivo da rede.

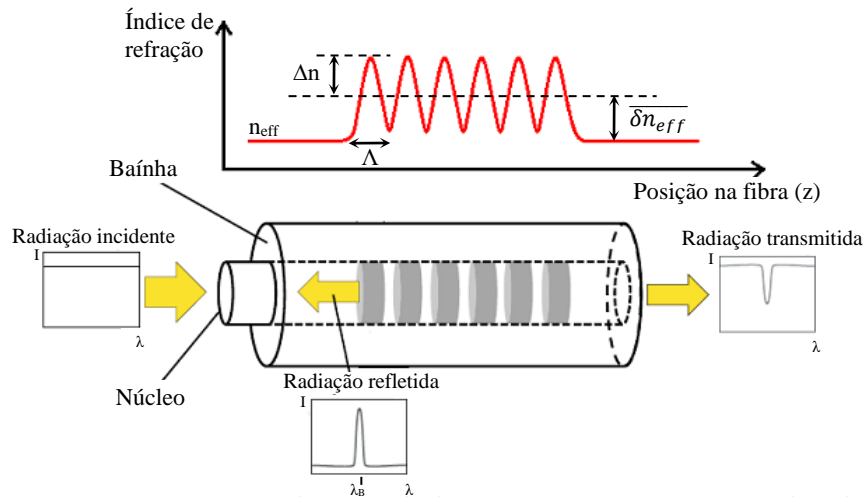


Figura 2.5 – Representação esquemática de uma rede de Bragg e a respectiva variação do índice de refração ao longo da fibra ótica.

O comprimento de onda de Bragg é sensível a variações do período da rede e a variações do índice de refração efetivo associado ao modo guiado pela fibra, como demonstra a equação (2.5). Para aplicações de sensoriamento, as FBGs são bastante interessantes porque qualquer tensão/deformação ou temperatura aplicada à fibra altera tanto o período como o índice da refração efetivo da rede [12], levando a uma mudança no parâmetro λ_B .

A rede de Bragg é normalmente produzida explorando a fotossensibilidade intrínseca do material do núcleo à radiação UV e expondo a fibra a um padrão de intensidade periódica. Na

maioria das FBGs, a variação do índice de refração efetivo do núcleo (δn_{eff}) apresenta um comportamento sinusoidal ao longo de um eixo longitudinal z e, pode ser descrita por [34]:

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \left\{ 1 + v(z) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\}, \quad (2.6)$$

onde $v(z)$ é a visibilidade das franjas de interferência gravadas e $\phi(z)$ descreve a variação do período ao longo da rede.

2.5.2 – Tipos de redes de Bragg

As FBGs podem ter diferentes tipos de estrutura de rede, entre as quais as redes uniformes, as redes com deslocamento de fase e as redes aperiódicas. As redes de Bragg uniformes são as mais simples de todas (ver Figura 2.7 (a)), quer em termos de gravação como de processamento. A variação do índice de refração efetivo do núcleo ao longo da fibra é uniforme, e consequentemente $\overline{\delta n_{eff}}(z)$, $v(z)$ e $\phi(z)$ são constantes e independentes de z . Devido à sua simplicidade, este tipo de rede é a mais utilizada em aplicações sensoriais. Vários autores caracterizaram as FBGs uniformes em POFs para a análise de sensibilidade dos parâmetros temperatura [35][36], deformação longitudinal [36], pressão [13] e humidade [12].

As redes de Bragg com deslocamento de fase ou redes *phase-shift* (PS-FBG) são caracterizadas pela introdução de um desvio de fase na modulação do índice de refração. Este desvio de fase no meio da estrutura de rede produz uma ressonância ótica em transmissão, caracterizada pelo aparecimento de um estreito *notch* no espectro de reflexão, tal como é apresentado na Figura 2.7 (b). O comprimento de onda desta ressonância está dependente da variação do deslocamento de fase, entre 0 e 2π , e da sua localização na rede [37]. Neste contexto, a introdução de um deslocamento de fase no meio da rede, resulta na formação de duas redes de Bragg idênticas, separadas por uma cavidade de tamanho L_C . Esta estrutura é análoga às redes de Bragg baseadas em cavidade de Fabry-Perot [17]. As reflexões provenientes da primeira FBG encontram-se desfasadas em relação às reflexões da segunda FBG e, consequentemente, dá-se o fenómeno de interferência devido à sobreposição dos raios refletidos pelas duas FBGs. A diferença de fase entre os raios refletidos pelas duas redes de Bragg pode ser estimada a partir da seguinte expressão [17]:

$$\phi_{FP} = \frac{2\pi}{\lambda_B} n_{eff} 2L_C \quad (2.7)$$

A origem do *notch* no espectro de reflexão da PS-FBG pode ser explicada pela ocorrência de interferência destrutiva entre os raios refletidos, e devido à conservação de energia e momento, a radiação é transmitida para este comprimento de onda, o que em termos espectrais origina um filtro transmissivo na banda de rejeição da rede. O perfil espectral destas redes apresenta grande potencial na área dos sensores dado que pode alcançar sensibilidades muito elevadas e ao mesmo tempo tem capacidade para funcionar como sensor multiparâmetro [16]. Atualmente, apesar de uma pobre demonstração de PS-FBG em POF [38], (fraca amplitude e definição do *notch*, bem como longo tempo de gravação) a sua caracterização para sensoriamento ainda não foi muito aprofundada. A sensibilidade da PS-POFBG para a temperatura, humidade, deformação e pressão é objeto de estudo neste trabalho.

As redes de Bragg aperiódicas ou *chirped* (CFBG) são caracterizadas pela variação da condição de Bragg ao longo do seu comprimento, como está ilustrado na Figura 2.6. Consequentemente, diferentes comprimentos de onda são refletidos em diferentes posições da rede.

As CFBGs mais comuns são as redes com o período de modulação variável ao longo de sua extensão longitudinal z , e o tipo de aperiodicidade é manipulado pelo parâmetro $\phi(z)$ da equação (2.6). O período da CFBG pode ser demonstrado através de um polinómio de grau N , dado por:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Lambda_1 + \dots + \Lambda_N z^N, \quad (2.8)$$

onde Λ_0 é o período na entrada da rede. Quando a variação do período segue um perfil linear, como mostra a Figura 2.6, este pode ser expresso por:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + kz, \quad (2.9)$$

para $0 < z < L$, onde L é o comprimento da rede e k é o coeficiente *chirp*, que define o aumento do período de modulação do índice de refração por unidade de comprimento.

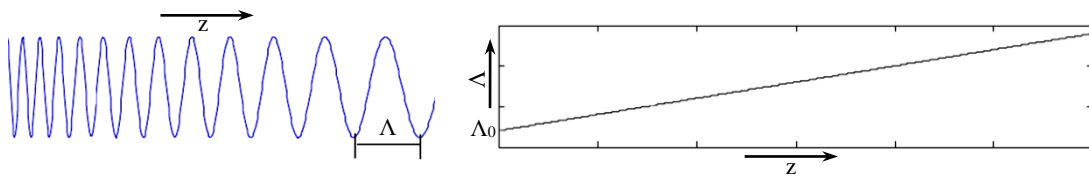


Figura 2.6 – Ilustração da modulação do índice de refração numa rede aperiódica linear e respetiva variação do período da rede.

As principais características deste tipo de rede são o seu atraso de grupo e a largura de banda. Na CFBG, a condição de ressonância ocorre para vários comprimentos de onda, o que resulta numa rede com uma largura de banda superior quando comparada com os outros tipos de rede de Bragg, sendo isto visível na Figura 2.7 (c). Ao mesmo tempo, o facto de diferentes comprimentos de onda serem refletidos em diferentes posições sobre a fibra, provoca um atraso de grupo dependente do comprimento de onda. Estas características permitem às CFBGs serem aplicadas na medição de diferentes parâmetros [21][22], e inclusive na medição simultânea de temperatura e deformação [23]. As chirped FBG em fibras poliméricas (CPOFBG) podem desenvolver mais este tipo de sensores, dadas as propriedades físicas da POF, elevada sensibilidade e biocompatibilidade.

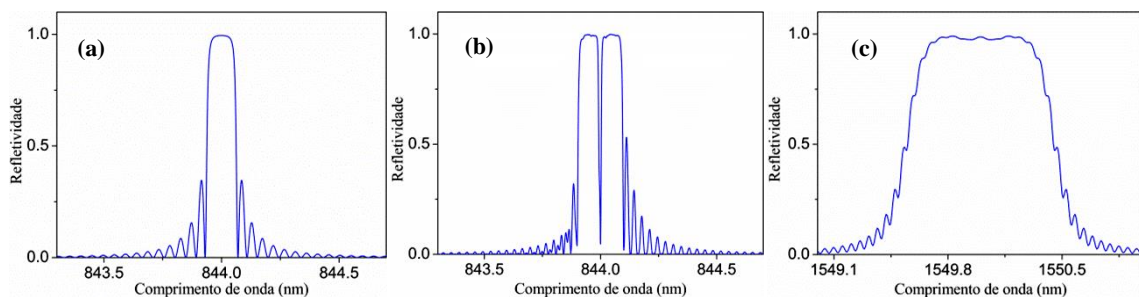


Figura 2.7 – Simulação do perfil espectral de diferentes tipos de rede: (a) FBG uniforme com $\lambda_B=844$ nm; (b) π -phase-shift FBG com $\lambda_B=844$ nm; (c) chirped FBG com $\lambda_B=1550$ nm (baseado em [39]).

2.6 – Desafios dos sensores baseados em POF

Sensores baseados em tecnologia POF apresentam uma série de desafios que devem ser abordados, pois fazem face às vantagens do uso das POFs nesta área. O primeiro faz referência à atenuação das fibras, que tipicamente podem ter valores próximos de 1 dB/cm nos 1550 nm, para a SM-PMMA-POF [12]. No entanto, a atenuação diminui à medida que o comprimento de onda

baixa, com valores inferiores a 0.1 dB/m nos 520 e 570 nm [3] para fibras com diâmetro do núcleo grande. Para operar na região dos 1550 nm, a fibra que obtém melhor desempenho é a PF-POF, com valores de atenuação intrínseca próximos dos 10 dB/km [28]. As SM-POFs por sua vez possuem atenuações bastante superiores quando comparadas com as SM-GOFs [24]. Além disso apresentam custos elevados e são mais difíceis de manusear quando comparadas com as POFs que apresentam um diâmetro de núcleo superior (por exemplo, as MM-POFs), e de conectar com outras fibras. A fabricação de mPOFs, que possuem buracos de ar na secção transversal da fibra, é uma solução para diminuir a atenuação nas SM-POFs [10].

Outro ponto que contribui para o aumento da atenuação na POF é o seu “envelhecimento”, ou perda de transparência. Uma razão para a ocorrência este fenómeno é a longa exposição da fibra a altas temperaturas. A POF, quando sujeita a elevadas temperaturas por longos períodos de tempo, sofre um incremento no seu coeficiente de atenuação. Na Figura 2.8 pode-se observar o aumento do incremento de atenuação com o aumento da temperatura, quando a PMMA-POF é sujeita a essas temperaturas durante 1000 horas. A cada aumento de temperatura de aproximadamente 10 °C, pode-se constatar um aumento no coeficiente de atenuação de uma ordem de grandeza [5].

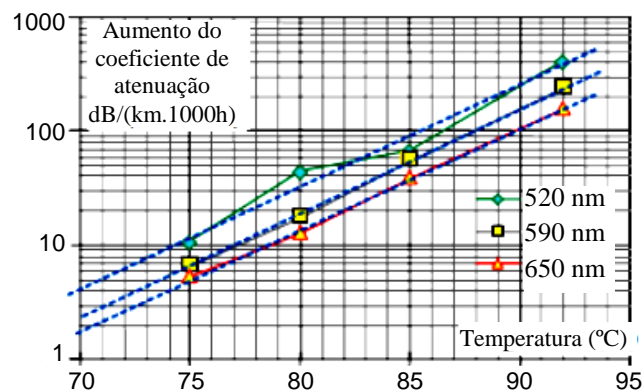


Figura 2.8 – Variação do aumento da atenuação com a temperatura nas janelas de transmissão do PMMA-POF (quando expostas durante 1000 horas) (Adaptado de [5]).

Um assunto que pode ser mencionado é o facto que as POFs têm uma gama de temperaturas de operação muito inferior às fibras de sílica. Embora a PC-POF possa operar até aproximadamente 125 °C, esta propriedade limita o número de aplicações sensoriais onde a tecnologia POF pode ser introduzida.

Os polímeros são materiais viscoelásticos e esta característica pode interferir com a sua utilização em sensores de deformação. Este material, quando sujeito a uma força constante por longos períodos de tempo, sofre um incremento no seu tamanho. No caso da POF, o incremento verifica-se no seu comprimento, e existe uma gradual redução na taxa de tensão para a mesma deformação da fibra. Quando as POFBGs são usadas como sensores de tensão, pode aumentar do nível de histerese entre o aumento e a diminuição da tensão na resposta do sensor. Estas divergências podem ser mais significativas para valores de tensão mais baixos, inclusive quando não há tensão sob a fibra, onde pode levar várias horas até a fibra regressar ao seu tamanho original [12]. Caso o limite elástico da fibra seja ultrapassado, o incremento no seu tamanho torna-se permanente, e conseqüentemente esse incremento traduz-se no λ_B . De forma a contornar este problema, a secção sensível da FBG pode ser colada diretamente no substrato a ser monitorizado, ou introduzida no próprio substrato, com a finalidade de forçar efetivamente o seu regresso à sua geometria original. O processo de recozimento, combinado com a aplicação de uma tensão na fibra, pode reduzir a quantidade de histerese exibida pelos sensores de deformação baseados em POF. Este processo também tende a reduzir o módulo de Young e o limite de elasticidade da POF, e por outro lado aumentar a tensão de rutura [12].

CAPÍTULO 3 – Produção das POFBGs

3.1 – Introdução

A gravação de uma rede de Bragg numa fibra baseia-se na exposição da mesma a um padrão de radiação ultravioleta, e para esse efeito, a fibra deve ser fotossensível a essa radiação. Pelo facto da maioria das GOF não possuir uma fotossensibilidade satisfatória, existem técnicas capazes de evidenciar essa característica, entre elas a dopagem do núcleo com germânio ou boro. Quanto às POF, esta situação varia, uma vez que a maioria dos polímeros são intrínsecamente fotossensíveis à radiação UV, o que torna possível a inscrição de redes de Bragg nestas fibras sem ser necessário recorrer à sua dopagem. Existem várias técnicas de gravação de redes de Bragg em fibras óticas, mas a que vai ser abordada neste trabalho é a gravação por máscara de fase, a técnica mais utilizada pela comunidade científica devido à sua simplicidade, repetibilidade e facilidade de execução.

Neste capítulo são apresentados os procedimentos para a gravação de diferentes redes de Bragg em POF, usando o método por máscara de fase, e a sua montagem experimental. Também é abordada a preparação das fibras para a gravação de redes de Bragg e, posteriormente para o estudo da sua caracterização.

3.2 – Fotossensibilidade das POFs

A fotossensibilidade é a característica do material que permite a ocorrência de processos de interação radiação-matéria, e é fortemente dependente do comprimento de onda incidente. No caso das fibras óticas, a fotossensibilidade permite a inscrição de redes de Bragg, e existem quatro principais parâmetros a ter em conta na fabricação das FBGs: o material do núcleo da fibra, o comprimento de onda do laser usado na gravação, a intensidade do laser e o tempo de exposição.

No caso das POF, a fotossensibilidade que permite a fabricação de POFBGs não é totalmente compreendida. Alguma pesquisa sobre este tópico foi ainda realizada na década de 70, quando descobriram o aumento no índice de refração do PMMA após a sua iluminação com um laser de hélio-cádmio (HeCd) de 325 nm [40]. Face às alterações do índice de refração, acompanhadas de um aumento de densidade, foi determinado que este processo era devido à fotopolimerização UV de monómeros MMA [41]. A polimerização é um conjunto de reações químicas que permitem a formação de macromoléculas designadas de polímeros, a partir da união de monómeros. Na fotopolimerização, este processo é iniciado por uma reação fotoquímica, onde o fotoiniciador sofre uma excitação eletrónica, proveniente diretamente da radiação ou através de transferência de energia do fotossensibilizador, formando uma espécie ativa. A escolha do comprimento de onda da linha de excitação deverá estar de acordo com o comprimento de onda de absorção das moléculas do fotoiniciador ou das moléculas do fotossensibilizador. Para o caso de materiais já polimerizados, os monómeros residuais na matriz polimérica podem ser fotopolimerizados [42], então, de modo a explorar a sua fotossensibilidade, a polimerização inicial deve ser controlada até ao ponto em que o polímero produzido ainda mantenha uma percentagem residual de monómeros. A adição de um dopante ao PMMA não totalmente polimerizado permite seleccionar o comprimento de onda necessário para induzir a fotopolimerização, como por exemplo, o comprimento de onda de aproximadamente 250 nm pode ser usado para o *benzildimethylketal* (BDK) como fotoiniciador [43], como mostra a Figura 3.1. Apesar da sua fotossensibilidade aumentar e tempo de exposição na gravação das redes diminuir muito consideravelmente, POFs

dopadas são mais difíceis de fabricar e podem apresentar maior atenuação na transmissão de sinais [44].

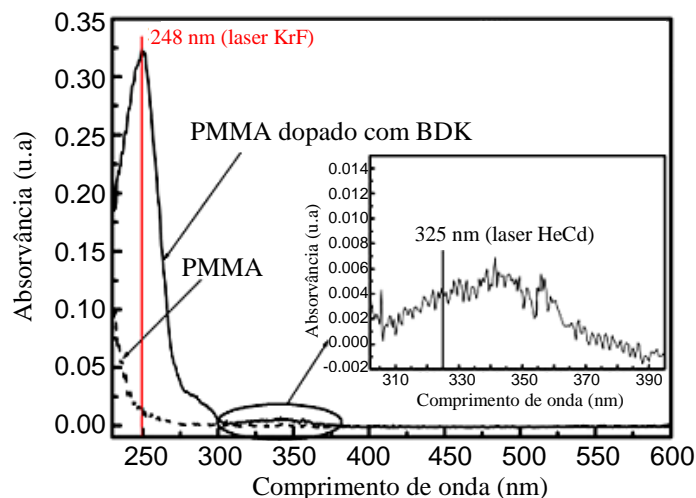


Figura 3.1 – Espectro de absorção para o PMMA e PMMA dopado com benzildimethylketal (Adaptado de [43]). Encontram-se assinalados os comprimentos de onda para 2 dos lasers mais usados atualmente na gravação de FBGs: o laser hélio-cádmio (HeCd) e o laser fluoreto de cripton (KrF).

Inicialmente a fotopolimerização foi reconhecida como o principal mecanismo de fotossensibilidade, no entanto, novos estudos vieram a demonstrar que o processo de fotodegradação tem um papel relevante quando o polímero é exposto a elevadas doses de radiação UV [45]. Também foi relatado recentemente que a fotopolimerização pode competir com um mecanismo de fotodegradação na produção das POFBGs [46]. A taxa de fotodegradação no PMMA não dopado está fortemente relacionada com o comprimento de onda e a intensidade do laser [45], dado que nos comprimentos de onda inferiores a 250 nm, o mecanismo de fotodegradação geralmente prevalece. Apesar de várias investigações acerca da fotodegradação terem sido relatadas, ainda não foi esclarecido qual o exato mecanismo que leva à quebra das cadeias poliméricas [45], dado que não se sabe qual o comprimento de onda nem a dose de radiação certa para a divisão completa ou parcial das cadeias. A caracterização do aumento de fotossensibilidade do PMMA não dopado durante a incidência da radiação 325 nm foi demonstrada ao submeter as amostras a uma forte tensão/deformação [46], o que evidencia a presença de fotodegradação. Por outro lado, houve um aumento do peso molecular, demonstrando que a fotopolimerização também esteve presente.

Normalmente, o tempo de exposição total necessário para a escrita da FBG (entre 2 e 10 mm) com um forte sinal de reflexão em SI-POFs não dopadas pode variar entre 45 – 100 minutos [44][4] e para as mPOFs varia entre 60 – 270 minutos, com recurso a um laser HeCd com 30 mW potência. No entanto, a exposição prolongada à radiação UV pode danificar material, o que degrada as propriedades físicas e mecânicas da POF e, conseqüentemente têm influência adversa nas suas aplicações. Além disso, uma exposição prolongada por um laser de pulso pode apresentar elevados custos. Estudos acerca da dependência entre os tempos de exposição e a potência do laser já foram relatados [44], mostrando que os tempos de gravação mais rápidos precisam de uma maior intensidade de radiação no núcleo. Embora não pareça existir uma relação entre a intensidade do pico de reflexão da rede e a potência do laser, há uma forte dependência da potência para o tempo de gravação e para a taxa de crescimento da FBG.

A exposição de polímeros como o PMMA à luz UV acarreta o problema de penetração dessa radiação no polímero, uma vez que a banda de absorção do material restringe a sua propagação até uma profundidade de aproximadamente 100 μm [47]. Um método para contornar este problema passa pelo uso de lasers femtosegundo na gravação de redes [47]. Atualmente

admite-se que alteração do índice de refração através de lasers femtosegundo envolve processos não lineares por multi-fotão [47][48].

3.3 – Preparação das POFs para a gravação de redes de Bragg

A fibra ótica SM-PMMA-mPOF de diâmetro 130 μm e com um núcleo de diâmetro 8 μm , dopada com BDK, foi a escolhida para a gravação de redes de Bragg. As microestruturas, com diâmetro de 1.74 μm e um espaçamento médio entre elas de 3.7 μm , encontram-se dispostas em três anéis de forma hexagonal. As mPOFs foram pré-recozidas com o mesmo procedimento utilizado em [49], onde a fibra é colocada durante 15 minutos num recipiente cheio de água à temperatura de 60 ± 1 °C. O objetivo do processo de recozimento é remover quaisquer tensões residuais criadas durante o processo de fabricação e também melhorar o desempenho e estabilidade da fibra para o estudo da sensibilidade de diferentes perturbações [50], [51]. Além disso, pode-se gravar FBGs com bom e estável sinal de reflexão/transmissão em POF pré-recozida com apenas um único pulso de laser UV [49].

Também foi realizado outro estudo para analisar a influência do processo de recozimento em relação à transmissão de luz pela POF. As fibras analisadas são idênticas à fibra SM-PMMA-mPOF descrita anteriormente, mas não possui o dopante BDK, e foram sujeitas durante 19 horas a uma temperatura de 70 ± 2 °C e humidade relativa de 50%. A Figura 3.2 mostra os espectros em transmissão, antes e depois do recozimento. Os espectros são de quatro mPOFs, cada uma com conectores FC/PC nas suas extremidades para conectar à fonte de luz (*Superlum SLD-371-HP1* com comprimento de onda central de 843.6 nm e largura a meia altura (FWHM, *Full Width at Half Maximum*) de 47.6 nm) e ao OSA (*YOKOGAWA AQ6373B*, opera na gama dos 350 – 1200 nm). A atenuação por parte das mPOFs diminuiu após o processo de recozimento, com reduções entre os 8 e os 15 dB na gama dos 845 nm.

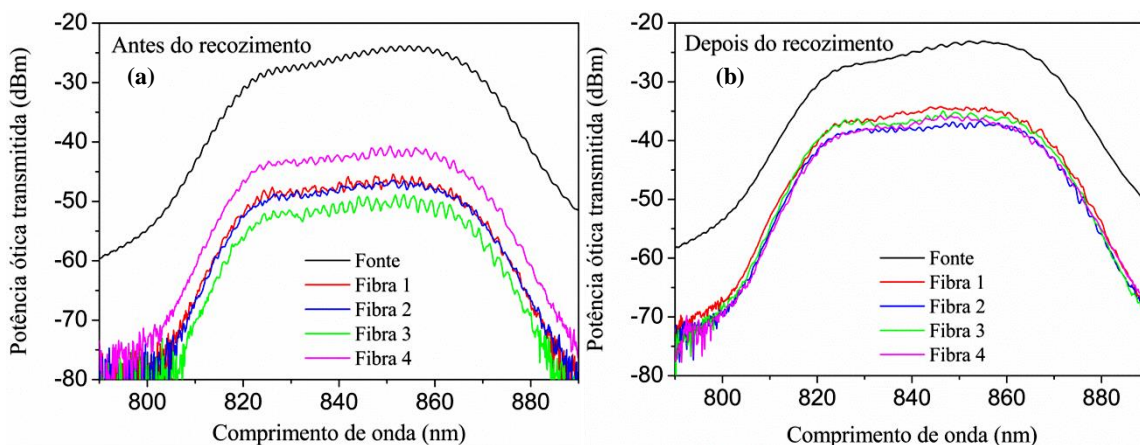


Figura 3.2 – Espectros de transmissão da fonte e de quatro SM-PMMA-mPOFs antes do processo de recozimento da fibra (a); e depois do recozimento (b).

Atualmente, um dos desafios práticos na aplicação das POFs como sensores está na preparação das suas extremidades para conexão a outras fibras óticas ou instrumentação. As MM-POFs, com o diâmetro do núcleo relativamente grande, são relativamente fáceis de clivar e de manusear durante a sua preparação, e além disso, o alinhamento do núcleo é simples devido ao seu elevado diâmetro. Para este tipo de POFs existe uma vasta gama de conectores comercialmente disponíveis [5][52]. Por outro lado, o tamanho reduzido do núcleo das SM-POFs torna difícil a conexão para este tipo de fibras. Devido à elevada atenuação das SM-POFs, torna-se necessário conectar estas fibras às GOF, que por sua vez são ligadas à instrumentação. A conexão pode dar-se

por *butt coupling* ou com recurso a conectores (como o FC/PC), que podem ser desmontáveis ou não [53]. Para reduzir a atenuação na conectorização e minimizar o ruído de fundo por reflexões de Fresnel entre as superfícies clivadas de fibras óticas diferentes, é aplicado um gel ótico adaptador de índice de refração 1.4917 ± 0.0005 .

A conexão por *butt coupling* baseia-se no alinhamento da posição relativa dos núcleos de duas fibras óticas distintas, tal como se pode observar na Figura 3.3. Para estabelecer uma boa conexão, as fibras óticas devem primeiro ser clivadas para produzir nas suas extremidades uma superfície transversal que seja lisa e perpendicular ao eixo da fibra ótica. Para a GOF, a clivagem é executada através do clivador que produz uma micro-fratura na sua secção transversal. Na POF o processo é diferente, devido à natureza viscoelástica dos polímeros. A clivagem na POF é executada através de uma lâmina à temperatura ambiente ou, por vezes, a uma temperatura próxima dos 70 °C, que permite o corte rápido e perpendicular ao eixo da fibra. Depois de clivada, a POF é fixa em dois estágios, um de translação que se movimenta ao longo dos 3 eixos (XYZ), e outro que se encontra imóvel. A POF (15 – 20 cm) é conectada por *butt coupling* (Figura 3.3) através de alinhamento ótico a um *pigtail* de SM-GOF com um núcleo de diâmetro 8 μm , usando um outro estágio de translação XYZ. Para realizar o alinhamento, o *pigtail* é ligado ao laser vermelho de comprimento de onda 632.8 nm e, com o auxílio de uma objetiva (40X), o perfil do sinal proveniente da POF é ampliado. O alinhamento é otimizado pela monitorização e maximização do sinal ampliado pela objetiva, que traduz a potência ótica da radiação transmitida pela extremidade da POF. A conexão por *butt coupling* pode ser usada na monitorização e caracterização de redes de Bragg, no entanto apresenta restrições em aplicações reais de sensoriamento [53].

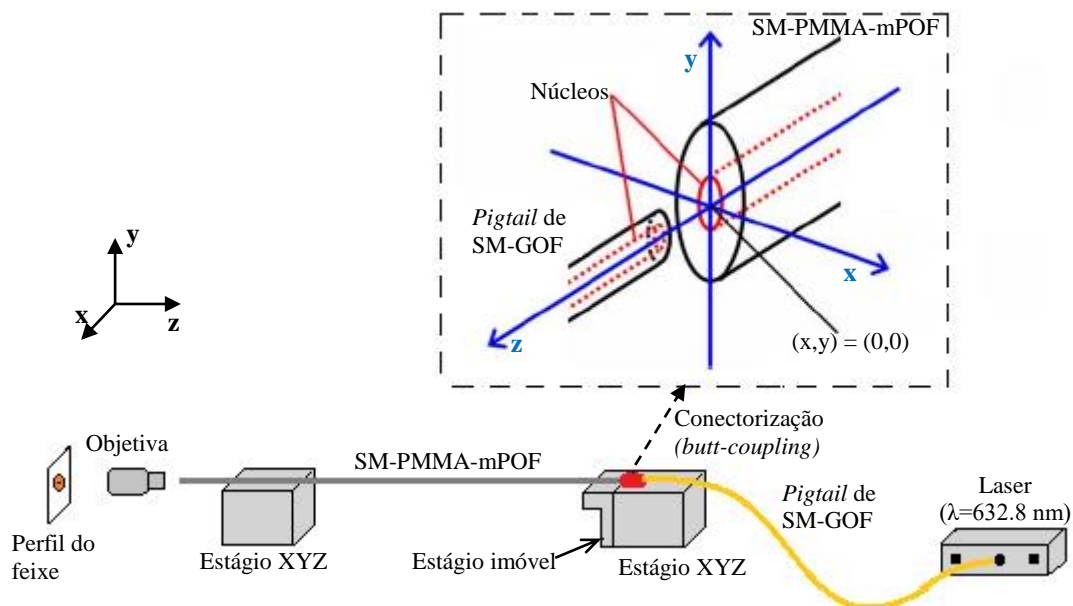


Figura 3.3 – Esquema da montagem usada para a conexão por *butt coupling*. O plano xy é perpendicular ao eixo z , que é definido como a direção dos eixos das fibras. Tanto x como y tomam valor zero quando o alinhamento dos núcleos é ótimo.

O uso de conectores FC/PC (Figura 3.4) permite realizar uma conexão mais eficiente e com menor atenuação quando comparada com a conexão por *butt coupling* [53]. Neste caso, os conectores utilizados têm um diâmetro interno de 125 μm , o que torna necessária a realização do *etching* na mPOF que é usada neste trabalho. Neste processo são utilizados solventes químicos, tal como acetona, para dissolver o polímero PMMA, num processo que pode ser considerado *quasi-linear* em função do tempo. Esta técnica é simples e permite reduzir eficazmente o diâmetro de POF até ao valor desejado. A extremidade da POF que será colada ao conector é mergulhada em

acetona durante aproximadamente 1 – 2 minutos, para reduzir o seu tamanho para valores iguais ou ligeiramente inferiores a 125 μm . Depois de reduzir o tamanho do diâmetro na extremidade da fibra, esta é inserida na parte metálica do conector e puxada suavemente pelo outro lado até fixar no conector. A extremidade da fibra é clivada junto ao conector com recurso a uma lâmina, e a cola de cura UV é depois aplicada para fixar a fibra ao conector. Por fim, depois de colada a fibra ao conector, é realizado o polimento da extremidade clivada usando várias folhas de óxido de alumínio [54], granuladas na gama dos micrómetros, primeiro com a de maior granulação e seguindo consecutivamente até à de menor. O polimento é executado de forma suave e lenta com movimentos em forma de “oito”, afim de reduzir o calor por fricção que pode danificar a superfície transversal da fibra. A atenuação média por conector é aproximadamente 1 dB, no entanto este valor pode variar bastante de conector para conector. A principal desvantagem neste tipo de conectorização passa pelo *etching* da POF, uma vez que pode não dissolver de forma uniforme o polímero e consequentemente descentralizar o núcleo da fibra. Isto leva a desalinhamentos na conexão e ao aumento da atenuação.

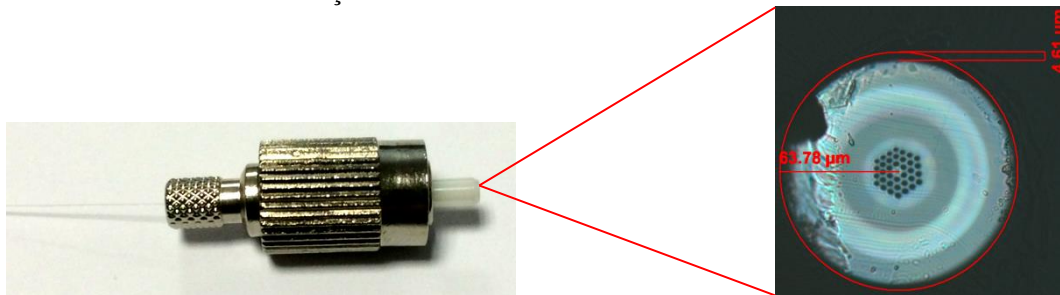


Figura 3.4 – SI-PMMA-mPOF fixada ao conector FC/PC, após a sua clivagem (esquerda); e secção transversal da SI-PMMA-mPOF clivada dentro do conector FC/PC (direita.)

3.4 – Gravação de redes de Bragg

As principais técnicas usadas atualmente na gravação de redes de Bragg são: gravação por máscara de fase, gravação por interferómetro e gravação por ponto-a-ponto. A gravação por máscara de fase foi usada na fabricação das POFBGs em estudo, e é caracterizada neste trabalho. A gravação de FBGs com recurso ao laser femtosegundo também é abordada, dadas as suas potencialidades na fabricação de redes tanto em GOF como em POF.

3.4.1 – Gravação de redes de Bragg usando laser femtosegundo

O tratamento por laser femtosegundo focalizado em polímeros tem sido investigado para várias aplicações, entre as quais a fabricação de guias de onda e FBGs por modificação do índice de refração [48][55][56]. O mecanismo que permite a variação do índice de refração em PMMA foi atribuído a uma contração do volume [56], por analogia causada pela radiação laser UV. Neste estudo atribuíram a contração do volume à quebra das cadeias poliméricas (fotodegradação), o que resulta no aumento do índice de refração. A exposição do material a pulsos de elevadas energias, origina a formação de plasma de alta densidade e a produção de dano por espalhamento. Por outro lado, a concentração de pulsos do laser femtosegundo com energias mais baixas induz a variação do índice de refração devido à quebra parcial das cadeias em PMMA. A modulação no índice de refração do PMMA induzida pelo laser femtosegundo pode ser superior à gerada por laser de radiação UV convencional em PMMA dopado [47]. Na gravação de redes de Bragg em fibra ótica com laser femtosegundo, podem-se adotar dois métodos: por máscara de fase ou por ponto-a-ponto.

Na gravação de redes de Bragg por ponto-a-ponto, cada plano da rede é produzido separadamente, pela incidência na fibra ótica do pulso de luz. Após a gravação de um ponto, a fibra é deslocada, correspondendo essa distância ao período da rede. A principal vantagem deste método em relação aos outros é a flexibilidade que oferece em alterar os parâmetros da rede de Bragg, como é o caso do período e o comprimento físico da rede. Contudo, este método requer uma boa focalização do laser e sistemas sofisticados de translação, estáveis e precisos. Quando bem controlado, demonstra ser uma abordagem versátil para a produção de FBG, permitindo complexos perfis de redes tais como estruturas CFBG e PS-FBG [48]. A máscara de fase por sua vez, produz um campo de interferências que permite a modulação do índice de refração em modo repetitivo. A combinação do laser femtosegundo e o método por máscara de fase, permite uma gravação eficiente de FBGs com elevada refletividade do λ_B . Além disso, gravação de FBGs por este método pode ser realizada sem a remoção do revestimento das fibras óticas [57], e em relação ao método ponto-a-ponto é menos dispendiosa e mais rápida, o que a torna adequada para a produção em série.

Contudo, apesar das vantagens e potencialidades permitidas pelo uso do laser femtosegundo, tanto na modulação do índice de refração para a gravação de FBGs como na criação de estruturas com outras morfologias, atualmente estes equipamentos ainda não estão acessíveis para a maior parte das instituições, pois exigem sistemas de elevada precisão e estabilidade, e para além disso possuem elevados custos.

3.4.2 – Método por máscara de fase

O método por máscara de fase é uma das técnicas mais eficientes de gravação de redes de Bragg em fibras óticas, e a mais usada atualmente. O sistema é composto apenas pelo laser UV, responsável pela alteração do índice de refração do núcleo da fibra, e pela máscara de fase, que funciona como elemento de difração ótica sobre o feixe de transmissão, dividindo-o em várias ordens, $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$. A máscara de fase pode ser produzida através de processos holográficos ou litográficos por feixe de elétrons, e consiste numa sequência periódica de depressões longitudinais na superfície de um substrato de sílica com elevada transparência à radiação UV. O feixe do laser UV que passa pela máscara de fase é difratado, formando um padrão de interferência que leva à fotoimpressão de uma modulação periódica no índice de refração do núcleo da fibra ótica fotossensível. O princípio de funcionamento da gravação por máscara de fase baseia-se na sobreposição de duas ordens de difração no núcleo da fibra e está esquematizado na Figura 3.5.

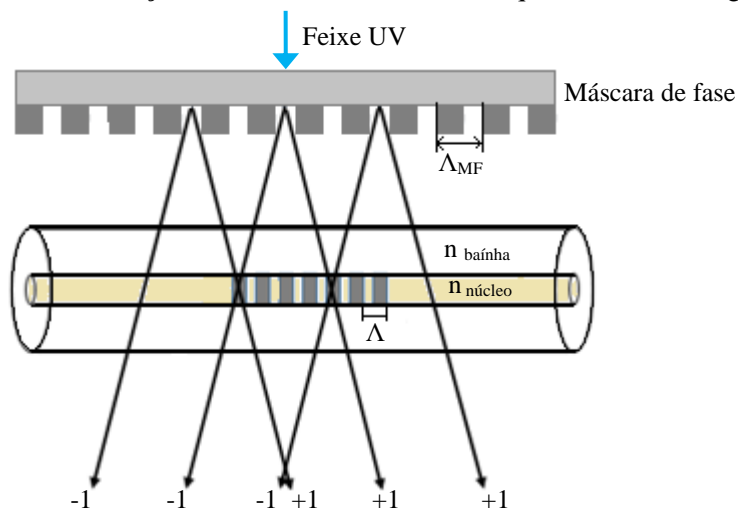


Figura 3.5 – Esquema do processo de gravação de FBGs pelo método da máscara de fase (incidência normal).

O padrão de interferência pode ser formado a partir da incidência não-normal (Figura 3.6) ou normal (Figura 3.7) do feixe UV em relação à máscara de fase. O feixe incidente e o feixe difratado de ordem m , satisfazem a seguinte equação de difração [58]:

$$\Lambda_{MF} = \frac{m\lambda_{UV}}{\sin \theta_m - \sin \theta_i}, \quad (3.1)$$

onde Λ_{MF} é o período da máscara de fase, λ_{UV} é o comprimento de onda do laser, θ_i é o ângulo de incidência e θ_m o ângulo de difração. Numa situação de incidência não normal, o padrão de interferência é originado através da maximização dos feixes transmitidos referentes às ordens $m=0$ e $m=-1$, como mostra na Figura 3.6, e as suas intensidades devem ser iguais para que ocorra uma gravação eficiente [58].

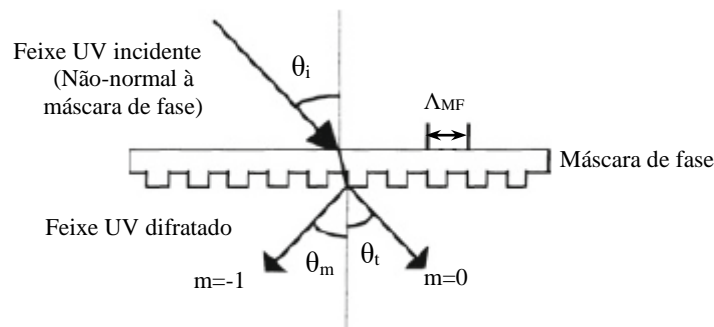


Figura 3.6 – Esquema da difração do feixe incidente não-normal pela máscara de fase (Adaptado de [58]).

Na situação de incidência normal ($\theta_i=0^\circ$), a potência da radiação difratada centra-se nos ordens $m=0$ e $m=\pm 1$ como mostra a Figura 3.7.

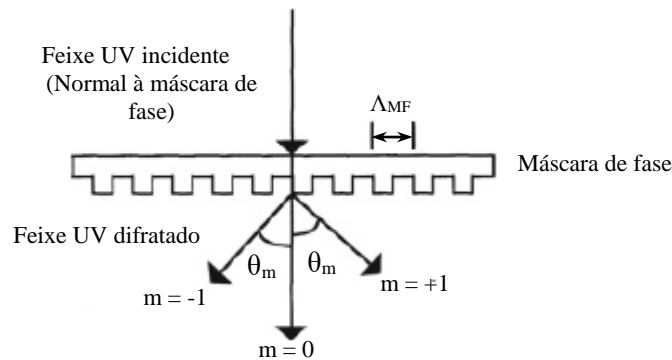


Figura 3.7 – Esquema da difração do feixe incidente normal pela máscara de fase (Adaptado de [58]).

Usando o método por incidência normal, padrão de interferência para a gravação de redes de Bragg é formado a partir da minimização da ordem de difração $m=0$, enquanto que as ordens $m=\pm 1$ são maximizadas [58]. Neste contexto, para as ordens de difração $m=\pm 1$, a equação (3.1) transforma-se na seguinte relação:

$$\Lambda_{MF} = \frac{\lambda_{UV}}{\sin \theta_m} \quad (3.2)$$

O período da modulação do índice de refração no núcleo da fibra ótica (Λ) relaciona-se com o ângulo θ_m através da seguinte expressão:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2 \sin \theta_m} = \frac{\Lambda_{MF}}{2} \quad (3.3)$$

Assim, a relação entre o período Λ_{MF} e a condição de Bragg (equação (2.5)) é dada por:

$$\lambda_B = n_{eff} \Lambda_{MF} \quad (3.4)$$

Se a ordem $m=0$ for completamente suprimida, a sobreposição dos feixes refratados correspondentes às ordens $m=\pm 1$ originará um período (Λ) com metade do valor do período relativo à máscara de fase (Λ_{MF}), independentemente do comprimento de onda da fonte UV. Se a intensidade da radiação do laser for muito elevada, poderá ocorrer interferência da ordem $m=0$, e o período das franjas de interferência será igual a Λ_{MF} .

A fibra ótica deve ser colocada próxima da máscara de fase, para que a região do núcleo da fibra onde se pretende gravar a rede de Bragg esteja incluída na zona de sobreposição dos feixes difratados. Para que ocorra uma gravação eficiente, a máscara é desenhada para que as ordens $m=\pm 1$ sejam maximizadas e a ordem $m=0$ seja suprimida. Para esse efeito, a profundidade das depressões (d) deve ser ajustada de forma que uma onda, quando percorre essa distância no espaço livre, tenha uma diferença de fase de π , devida à depressão, relativamente a outra onda ao percorrer a sílica. Desta forma garante-se interferência destrutiva para a ordem $m=0$. Seguindo este raciocínio, a profundidade mínima das depressões é dada por [58]:

$$d = \frac{\lambda_{UV}}{2(n_{sílica} - n_{ar})}, \quad (3.5)$$

onde $n_{sílica}$ é o índice de refração da sílica sob a radiação λ_{UV} e n_{ar} é o índice de refração do ar ($n_{ar} \approx 1$). A equação (3.5) mostra-nos que a ordem $m=0$ só pode ser suprimida para fontes laser monocromáticas. Ao mudar o λ_{UV} do laser de gravação, a máscara de fase também precisa de ser mudada, uma vez que esta é configurada segundo o λ_{UV} de gravação para que a ordem $m=0$ seja minimizada.

A utilização do método da máscara de fase acarreta vantagens que estão associadas à baixa coerência necessária por parte do laser UV para a formação do padrão de interferências e à simplicidade do processo. Como a fibra é colocada próxima da máscara de fase, o alinhamento torna-se simples e é minimizada a sensibilidade a vibrações mecânicas, o que proporciona robustez e estabilidade na gravação de redes.

A desvantagem centra-se na necessidade de diferentes máscaras de fase para diferentes λ_B . Esta desvantagem pode ser contornada combinando os métodos de gravação por máscara de fase e interferómetro. Neste caso, como se pode observar na Figura 3.8, o feixe UV é difratado pela máscara de fase e a ordem $m=0$ é bloqueada fisicamente. Os feixes difratados de ordens $m=\pm 1$ são refletidos por um par de espelhos, de modo a produzirem um padrão de interferência sobre o núcleo da fibra. Através da rotação e/ou translação dos espelhos, é possível ajustar o λ_B , sem mudar de máscara de fase.

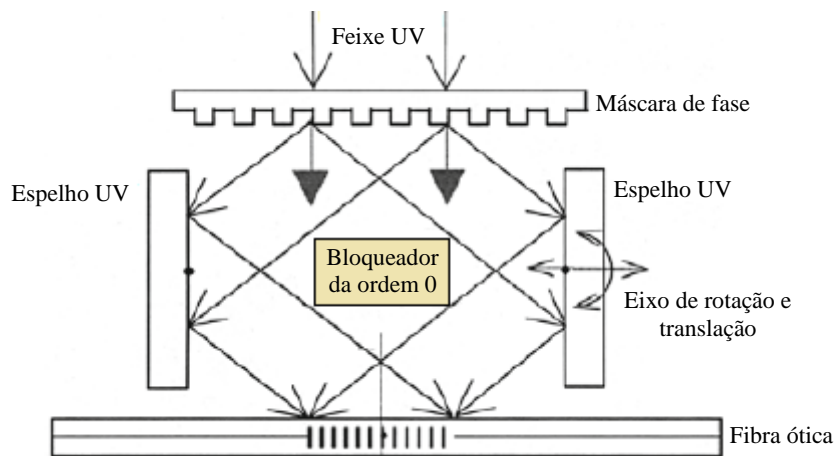


Figura 3.8 – Esquema do processo de gravação de redes de Bragg em fibra ótica pelo método do interferômetro baseado em máscara de fase (Adaptado de [58]).

3.4.2.1 – Montagem experimental

A montagem experimental da gravação de redes de Bragg por máscara de fase é demonstrada na Figura 3.9, e é constituída por um laser UV, sistema ótico, sistema de alinhamento e máscara de fase.

O laser KrF de excímeros pulsado com comprimento de onda 248 nm (*Coherent BraggStar Industrial-LN*) foi usado na produção das POFBGs. O tamanho efetivo do feixe é de 6 mm de largura e 1.5 mm de altura. O sistema ótico é constituído por um conjunto de espelhos, lente de focagem e *slit* com largura ajustável de 0 a 4.8 mm e resolução de 10 μm . O feixe laser é direcionado através do conjunto de espelhos, e focado no núcleo da fibra através de uma lente cilíndrica plano-convexa (*Newport CSX200AR.10*) com distância focal de 200 mm. O tamanho do feixe que incide no núcleo da fibra pode ser modulado com o auxílio da lente cilíndrica (eixo vertical, y) e a largura do feixe que incide na máscara de fase pode ser controlada através da *slit* (eixo horizontal, z). O sistema de alinhamento é composto por dois estágios, um de translação que se movimenta nos 3 eixos com resolução de 5 μm e outro que se encontra imóvel, por suportes e duas garras magnéticas. A máscara de fase é posicionada num suporte que permite ajustar a sua altura com resolução 1mm, e que encontra-se ligado ao sistema de vácuo afim de manter a máscara de fase segura e estável.

Esta montagem está sobre uma mesa suspensa através de ar comprimido para minimizar ao máximo as vibrações mecânicas externas. Também está isolada por placas de acrílico, não só para proteger os utilizadores da radiação UV, mas também para reduzir as vibrações do ar. A fibra ótica utilizada na gravação de redes de Bragg é presa pelas garras magnéticas, que por sua vez encontram-se fixas, uma ao estágio de translação e outra ao estágio imóvel. Dado que o estágio de translação pode-se movimentar nos 3 eixos, é possível controlar a tensão mecânica dada à fibra (eixo zz), e também a sua altura (eixo yy) e distância em relação à máscara de fase (eixo xx). O suporte da máscara de fase permite a sua translação segundo yy, para ajustar o seu alinhamento com o feixe laser e a sua altura em relação à fibra. A máscara de fase deve-se encontrar totalmente paralela à fibra ótica e com a menor distância possível.

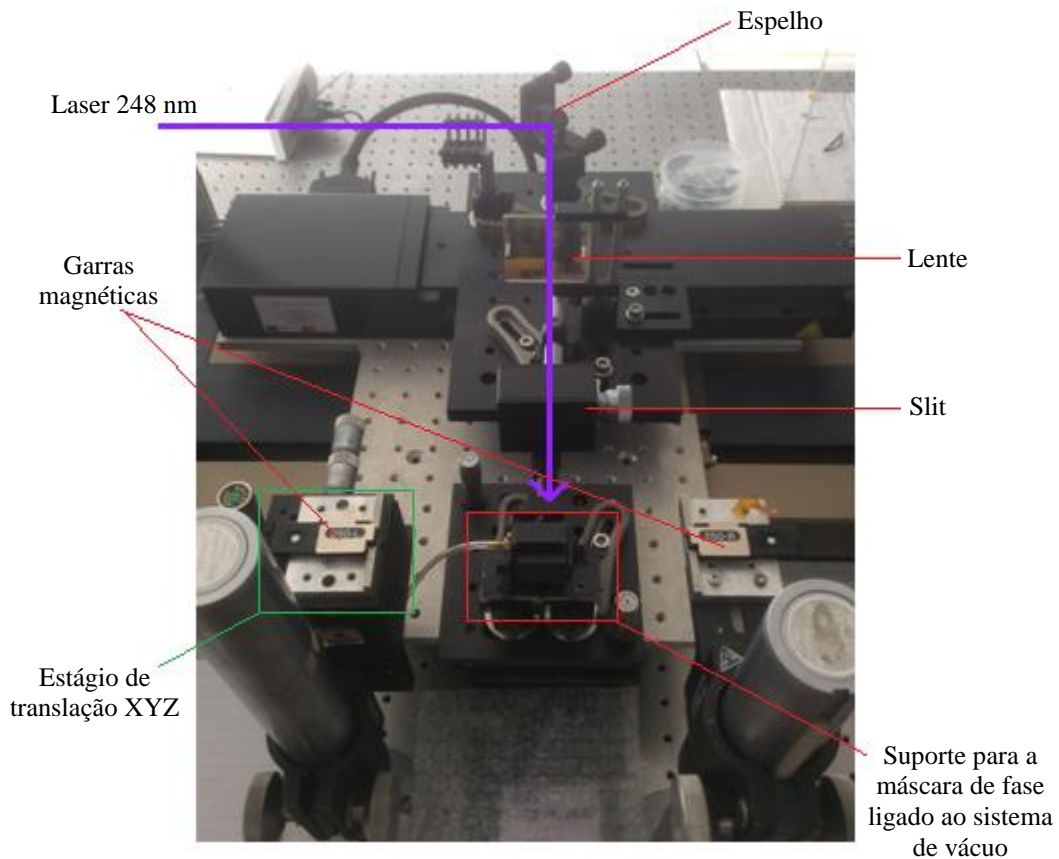


Figura 3.9 – Montagem experimental usada na gravação de redes de Bragg.

Através de uma análise geométrica, é possível calcular o comprimento da gravação tendo em conta a distância da máscara de fase à fibra ótica e a largura da *slit*, que define a largura do feixe laser (Figura 3.10). M corresponde à abertura da *slit*, e caso esta seja removida, M toma o valor da largura da máscara de fase; c é a distância da máscara de fase à fibra ótica, e é o valor máximo que pode variar a distância entre a máscara de fase e a fibra, b é a distância da fibra ótica até à normal do limite da zona de sobreposição, L_{exp} é o comprimento exato da rede de Bragg que será gravada.

A máscara de fase tem de estar a uma distância da fibra ótica de $0 < x \leq e$, uma vez que a máscara de fase não pode estar em contato com a fibra nem fora da zona de sobreposição. Assim pode-se obter através de relações trigonométricas o seguinte:

$$\tan \theta_m = \frac{L_{exp}/2}{b} \quad (3.6)$$

Através de relações e substituições, obtém-se a seguinte equação simplificada para o comprimento exato da rede de Bragg:

$$L_{exp} = M - 2c \tan \theta_m, \quad (3.7)$$

onde θ_m é obtido através da equação (3.1), com $\theta_i=0^\circ$ (incidência normal).

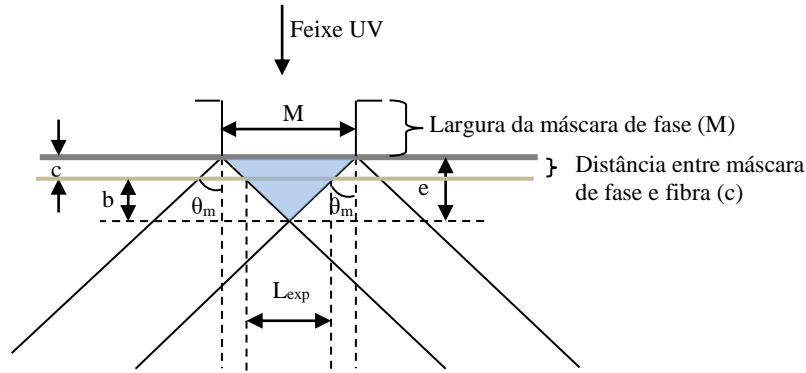


Figura 3.10 – Esquema geométrico da relação entre a largura da máscara de fase e a região de sobreposição da ordens $m=\pm 1$ [59].

Assim, comprimento da rede gravada na fibra depende da abertura da *slit* ou largura da máscara de fase, da distância entre máscara de fase e a fibra ótica e do ângulo θ_m . De notar que o ângulo θ_m depende do período da máscara de fase que se usa e do comprimento de onda do laser UV. O comprimento da rede de Bragg gravada será sempre menor que a largura da máscara de fase. Outro parâmetro a ter em conta é o facto de o raio da fibra ótica (r) poder ser muito maior quando comparado ao raio do núcleo (a). Neste caso, para além da distância entre a fibra e a máscara de fase, também é necessário ter em conta a distância que a radiação difratada percorre dentro da baínha até chegar ao núcleo. Na Figura 3.11 está esquematizada a trajetória dos raios difratados das ordens $m=\pm 1$, dentro e fora da fibra ótica, antes de chegar ao núcleo da fibra.

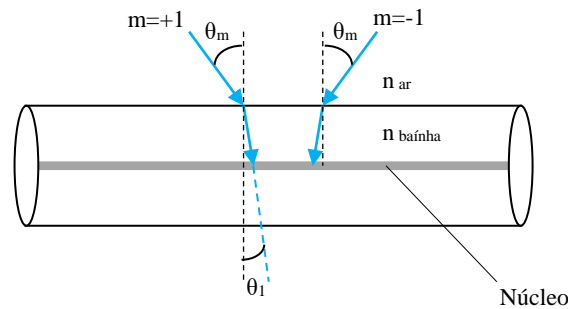


Figura 3.11 – Esquema geométrico da trajetória dos raios de ordens $m=\pm 1$ até ao núcleo da fibra.

Deste modo, tendo em conta a distância equivalente à diferença dos raios da fibra e do núcleo, e implementando a lei de Snell-Descartes, a equação (3.7) resulta em:

$$L_{exp} = M - (2c \tan \theta_m + 2(r - a) \tan \theta_1), \quad (3.8)$$

onde θ_1 é o ângulo de refração e é obtido através de $n_{baínha} \sin \theta_1 = n_{ar} \sin \theta_m$. Esta análise é de extrema importância para avaliar o comprimento real das FBGs gravadas e estudadas neste trabalho.

Na gravação de redes com $\lambda_B \approx 1550$ nm (Figura 3.12), a POF é conectada por *butt coupling* ao *pigtail* de SM-GOF, que por sua vez está ligado ao interrogador (*Micron Optics SM-125-500*). O interrogador encontra-se ligado ao computador para acompanhar em tempo real a refletividade da rede de Bragg. Na gravação de redes de Bragg com $\lambda_B \approx 844$ nm, o *pigtail* é conectado a um acoplador ótico (50/50) de SM-GOF que se encontra ligado à fonte (*Superlum SLD-371-HP1*) e ao OSA (*YOKOGAWA AQ6373B*). Este esquema, representado na Figura 3.12, permite a monitorização do crescimento das POFBG em tempo real.

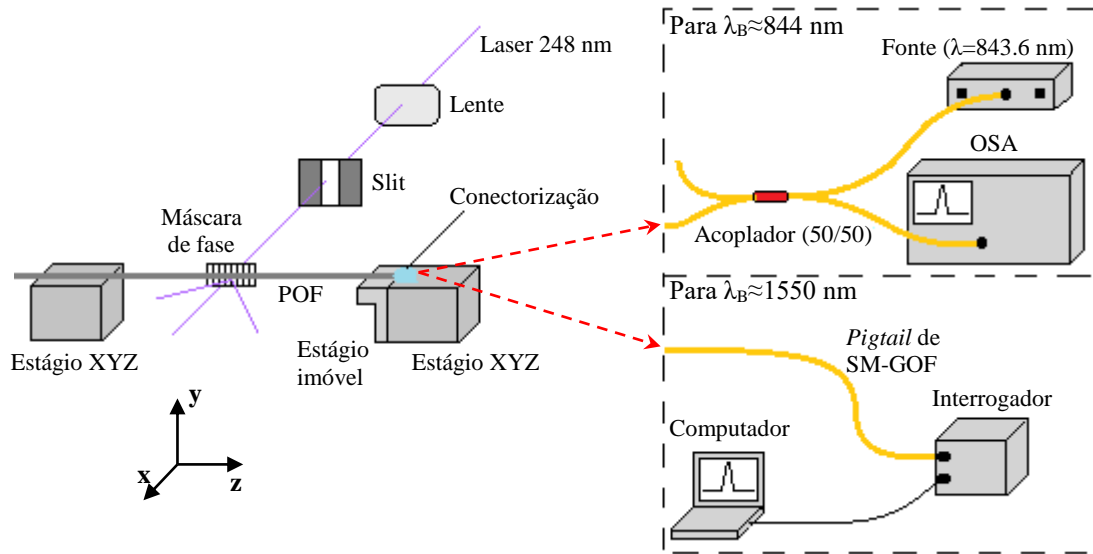


Figura 3.12 – Esquema da montagem usada na gravação de redes de Bragg para $\lambda_B \approx 844$ e 1550 nm.

3.4.2.2 – Gravação de redes de Bragg uniformes com apenas 1 pulso do laser UV

A fibra ótica usada na gravação de redes de Bragg uniformes é descrita na secção 3.3; SM-PMMA-mPOF de diâmetro $130 \mu\text{m}$ e com um núcleo de diâmetro $8 \mu\text{m}$, dopada com BDK para melhorar a sua fotossensibilidade. O dopante BDK, que apresenta um elevado coeficiente de absorção na região dos 250 nm , atua como fotoiniciador no processo de fotopolimerização quando é incidida radiação UV, como explicado na secção 3.2. A mPOF (tamanho $15 - 20 \text{ cm}$) foi colada ao conector FC/PC desmontável, e a configuração experimental para a gravação de redes uniformes é descrita em 3.4.2.1, na Figura 3.12, para $\lambda_B = 844 \text{ nm}$. O sistema de gravação das POFBGs uniformes usado é o sistema descrito em 3.4.2.1, com recurso ao laser pulsado KrF de 248 nm . A duração do pulso laser é 15 ns e a sua energia pré-ajustada é 6.3 mJ . O tamanho efetivo do feixe na superfície da fibra é de 20 mm de largura e $32.4 \mu\text{m}$ de altura, e a densidade de energia do pulso na superfície da fibra é 974 mJ/cm^2 . No entanto, a densidade de energia que chega ao núcleo da fibra poderá ser consideravelmente menor, devido ao coeficiente de absorção do polímero da bainha e à presença das microestruturas que contribuem para a dispersão. A máscara de fase é adequada para operar sob o laser 248 nm e tem uma largura de 10 mm com $\Lambda_{MF} = 567.8 \text{ nm}$. A fibra foi colocada o mais próximo possível da máscara de fase por forma minimizar o parâmetro c da equação (3.8) até valores próximos de 0. Desta forma, como a gravação ocorreu sem o uso da *slit* e considerando $c \approx 0$, o valor de L_{exp} é 9.96 mm , para $n_{bainha} = 1.460$. O λ_B da POFBG uniforme produzida situa-se nos 844 nm , e através da equação (3.4), o valor de n_{eff} do núcleo é aproximadamente 1.486 .

O espectro da reflexão da POFBG é mostrado na Figura 3.13 (a) onde se pode constatar uma amplitude do pico de reflexão de aproximadamente 20 dB . Esta amplitude é medida a partir do nível de ruído de fundo e fornece uma comparação qualitativa entre diferentes redes de Bragg. Os espectros não indicam necessariamente o valor exato da amplitude de reflexão da rede, porque a conectorização das fibras (FC/PC) pode apresentar uma atenuação elevada e diferente para cada caso. Durante a gravação, a fibra encontrava-se sob uma tensão mecânica e posteriormente, quando essa tensão deixou de ser aplicada, λ_B desviou para o valor 843.753 nm . A Figura 3.13 (b) compara o espectro de reflexão obtido experimentalmente com a simulação em MATLAB, mostrando uma boa aproximação, contudo é mais largo possivelmente devido a pequenas imperfeições na fabricação da mPOF, não homogeneidade do feixe laser, ou alguma apodização introduzida.

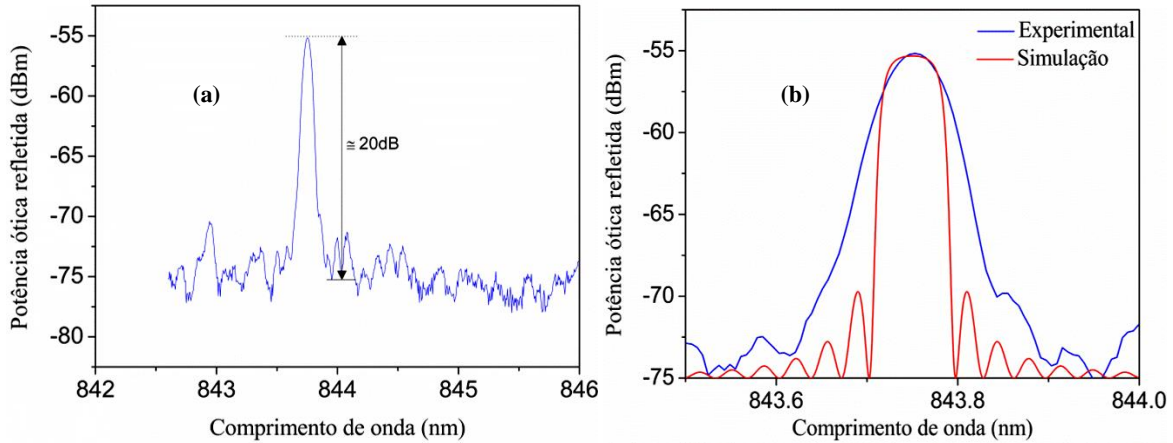


Figura 3.13 – (a) Espectro de reflexão da POFBG uniforme produzida através de 1 pulso do laser de 248 nm, com $\lambda_B=843.753$ nm; (b) Espectro de reflexão e simulação da POFBG uniforme em MATLAB com $L=9.96$ mm e $\Delta n=0.74 \times 10^{-4}$.

3.4.2.3 – Gravação de redes de Bragg com deslocamento de fase com apenas 1 pulso do laser UV

As *Phase Shifted* FBG (PS-FBG) foram gravadas em SM-PMMA-mPOF, mesmo tipo de fibra usada na gravação das FBGs uniformes, com as mesmas características e dimensões, dopada com BDK e colada ao conector FC/PC. O procedimento usado foi o mesmo da gravação das FBGs uniformes, com o sistema de gravação descrito em 3.4.2.1 e 3.4.2.2. A máscara de fase é a mesma, com largura de 10 mm com $\lambda_{MF}=567.8$ nm, o que permite a gravação de redes com $L_{exp} \approx 9.96$ mm, com λ_B situado nos 844 nm. O deslocamento de fase é produzido diretamente durante o processo de gravação da rede, ao colocar na máscara de fase um bloqueio muito estreito (fio metálico com $\varnothing_{fio}=40$ μ m) no centro do feixe UV, tal como está ilustrado esquematicamente na Figura 3.14. Este processo permite a gravação de duas FBGs aproximadamente idênticas de comprimento L_R , separadas por uma cavidade muito pequena de tamanho L_C , onde $L_C \ll L_R$. Através da análise geométrica, pode-se estimar o tamanho da cavidade inserida no meio da rede, tal como foi analisado anteriormente para obter o tamanho real da FBG. Na Figura 3.14, está esquematizado a trajetória das ordens $m=\pm 1$, quando é colocado o fio no meio da máscara de fase.

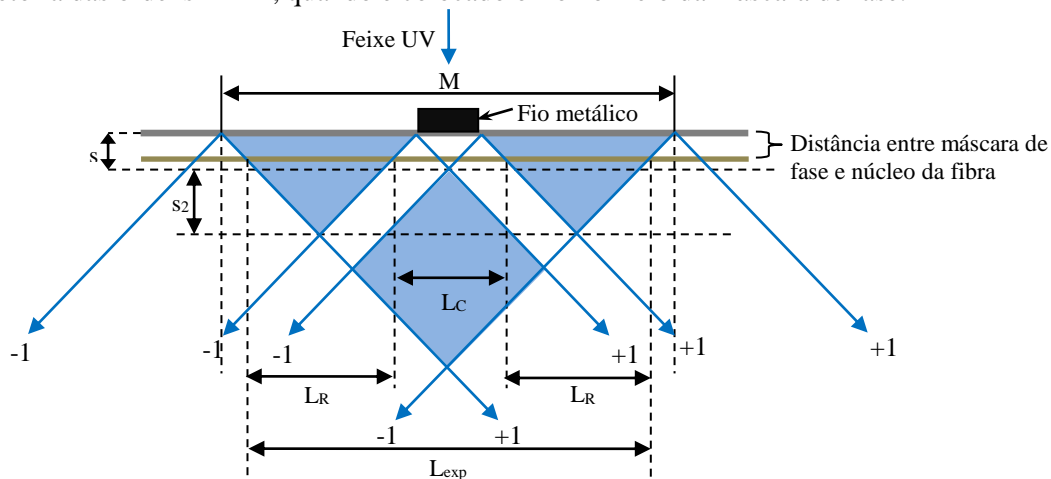


Figura 3.14 – Esquema geométrico das zonas de sobreposição com a introdução de um fio metálico: as regiões a azul correspondem às zonas de sobreposição da ordens $m=\pm 1$.

Ao analisar a Figura 3.14, pode-se verificar três cenários possíveis, que estão dependentes da distância c e da diferença entre os raios da fibra (r) e do núcleo (a):

1. se $0 < c + (r - a) \leq s$, ocorre a formação de duas FBGs separadas por uma cavidade;
2. se $s < c + (r - a) \leq s_2$, ocorre a formação de três FBGs separadas por duas cavidades;
3. se $s_2 < c + (r - a) \leq e$, ocorre a formação de uma única FBG.

Estes cenários ocorrem devido à ausência de certas zonas de sobreposição, originada pela introdução de um obstáculo no meio da máscara de fase (fio metálico), que bloqueia as ordens $m=\pm 1$. Tendo em conta que a fibra se encontra o mais próximo possível da máscara de fase ($c \approx 0$), s pode ser estimado através de:

$$\tan(\pi/2 - \theta_1) = \frac{s}{\emptyset_{fio}/2} \quad (3.9)$$

Considerando que $n_{bainha}=1.46$ e $\emptyset_{fio}=40 \mu\text{m}$, o valor de s é aproximadamente $63.79 \mu\text{m}$. Como o valor da diferença entre os raios da fibra e do núcleo ($61 \mu\text{m}$) é menor que s , nesta experiência ocorre o cenário 1. O valor de L_C , com $c \approx 0$, é obtido através da seguinte equação:

$$L_C = \emptyset_{fio} + 2(r - a) \tan \theta_1 \quad (3.10)$$

Usando as equações (3.8) e (3.10), obtém-se $L_R \approx 4.94 \text{ mm}$ e $L_C \approx 78.25 \mu\text{m}$. Na Figura 3.15 (a) pode-se observar os espectros de reflexão e transmissão da PS-POFBG, onde se pode constatar a presença de dois picos no espectro de reflexão e duas depressões no de transmissão, facto de que a PS-POFBG foi gravada com sucesso. Para observar o espectro de transmissão da rede, a POF é colada nas 2 extremidades a conectores FC/PC, e é conectada entre a fonte (*Superlum SLD-371-HP1*) e o OSA (*YOKOGAWA AQ6373B*). O espectro de reflexão possui uma amplitude de aproximadamente 25 dB; o pico 1 está localizado nos 844.118 nm e o pico 2 nos 844.181 nm ($\Delta\lambda \approx 63 \text{ pm}$), e a sua diferença de potência ótica é de 0.3 dB ($P_{\text{pico } 1} > P_{\text{pico } 2}$). O *notch* tem uma profundidade em relação ao pico 1 igual a 7.73 dB. O espectro de transmissão apresenta as depressões 1 e 2 com aproximadamente -16.25 e -13.17 dB, e encontram-se localizadas nos comprimentos de onda 844.126 e 844.187 nm, respetivamente. Nesta situação, o espaçamento entre as duas depressões é aproximadamente 61 pm, e a profundidade do *notch* em transmissão em relação à depressão 1 é de 10 dB. O *notch* em transmissão de 3 dB da PS-POFBG produzida é bastante acentuado com uma largura espectral de aproximadamente 14 pm. A Figura 3.15 (b) compara o espectro de reflexão da PS-POFBG com a simulação em MATLAB do espectro de uma rede baseada em cavidade de Fabry-Perot, com $L_C=78.3 \mu\text{m}$, mostrando uma razoável aproximação entre os espectros. Através da equação (2.7), $\phi_{FP} \approx 4/3\pi$ para $L_C=78.3 \mu\text{m}$.

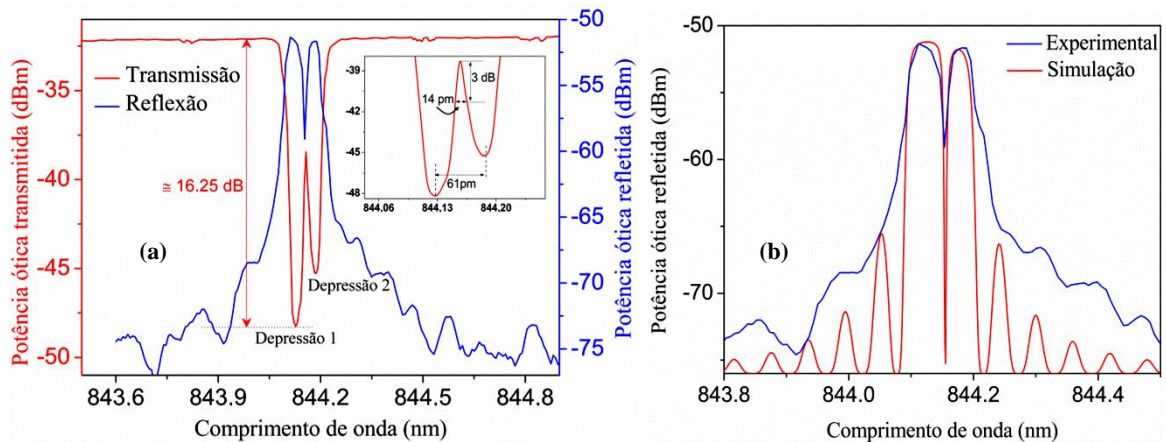


Figura 3.15 – (a) Espectros de reflexão e transmissão da PS-POFBG produzida através de 1 pulso do laser de 248 nm, usando um fio metálico de diâmetro $40 \mu\text{m}$; (b) Espectro de reflexão da PS-POFBG e simulação de uma rede baseada em cavidade de Fabry-Perot em MATLAB com $L_R=4.94 \text{ mm}$ e $L_C=78.3 \mu\text{m}$.

Com o valor da amplitude da depressão, pode-se estimar a refletividade máxima para uma determinada rede de Bragg. A refletividade (R) de uma rede de Bragg está diretamente relacionada com o coeficiente de acoplamento κ e com o comprimento da rede através da expressão [60]:

$$R = \tanh^2(\kappa L) \quad (3.11)$$

Para uma rede de Bragg de primeira ordem em fibra ótica SM, a amplitude máxima de modulação do índice de refração (Δn) relaciona-se com o coeficiente κ da seguinte forma:

$$\kappa = \frac{\pi \Delta n}{\lambda_B} \quad (3.12)$$

Com uma amplitude em transmissão de -16.25 dB (depressão 1), o valor da refletividade é 97.63%, e considerando que o tamanho da rede é $L \approx 9.96$ mm, o valor de Δn é aproximadamente 0.69×10^{-4} .

A gravação com um pulso do laser 248 nm da POFBG com dois deslocamentos de fase inseridos na sua estrutura foi bem sucedida, ao introduzir na máscara de fase dois fios metálicos, com $\varnothing_{fio} = 40$ μm , que permitiram a formação de 3 redes de Bragg ($L_R \approx 3.27$ mm), separadas por duas cavidades ($L_C \approx 78.25$ μm). A Figura 3.16 (a) mostra os espectros de reflexão e transmissão da PS-POFBG produzida. No espectro de transmissão, as depressões encontram-se localizadas nos comprimentos de onda 844.499, 844.554 e 844.609 nm, o que dá um espaçamento médio entre as mesmas de 55 pm. A amplitude máxima das depressões é aproximadamente -14.7 dB. Esta PS-POFBG apresenta boa qualidade, com *notchs* em transmissão bastante acentuados, separados por um espaçamento de 55 pm. A profundidade máxima entre os *notchs* e depressões é igual a 9.9 dB. A Figura 3.16 (b) mostra o espectro de reflexão e a simulação em MATLAB.

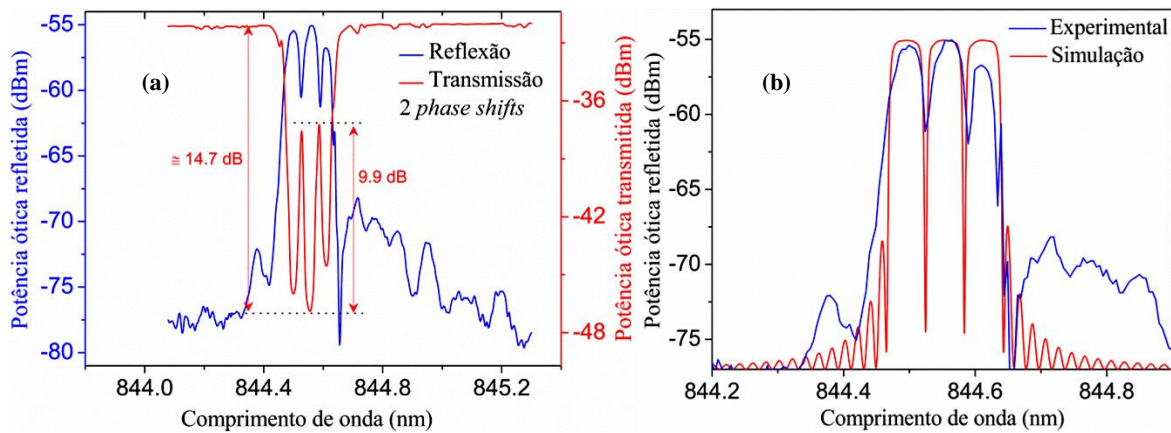


Figura 3.16 – (a) Espectros de reflexão e transmissão da PS-POFBG, com dois deslocamentos de fase, produzida através de 1 pulso do laser de 248 nm; (b) Comparação entre o espectro de reflexão da PS-POFBG e a simulação em MATLAB de uma FBG com dois π -phase shift, $L = 9.96$ mm e $\Delta n = 0.7 \times 10^{-4}$.

3.4.2.4 – Gravação de redes de Bragg aperiódicas

A fibra ótica usada na gravação da *Chirped* FBG (CFBG) é a SM-PMMA-POF, com os diâmetros do núcleo e da bainha de 4 μm e 210 μm respetivamente. O núcleo é formado por PMMA puro, sem introdução de dopantes. A fibra foi sujeita a um processo de pré-recozimento, onde esteve durante 6 horas a 80 $^{\circ}\text{C}$, para remover as tensões residuais originadas durante o seu processo de fabricação. A POF, depois de clivada, é conectada por *butt coupling* a uma *pigtail* SM-sílica com conector FC/APC. Depois da gravação, as duas fibras são coladas na conexão por cola de cura UV (*LOCTITE AA 3936*) e usando a fonte de cura (*Norland Opticure LED 200*) de 365 nm.

A atenuação típica induzida pelo processo de colagem são aproximadamente 2.5 dB. O sistema de gravação usado na produção das CPOFBGs é descrito em 3.4.2.1, com o laser pulsado KrF de 248 nm. A energia por pulso usada foi de 5 mJ. O feixe é moldado antes de chegar à máscara de fase por um sistema de lentes (para controlar quer a focagem do feixe no núcleo da fibra, quer para expandir o feixe UV até ao comprimento total da máscara de fase), e atinge a superfície da fibra com uma largura de aproximadamente 25 mm. A máscara de fase (*Ibsen Photonics*) é aperiódica e adequada para operar sob o laser 248 nm, com uma largura de 25 mm e $\Lambda_0=1068$ nm. Usando a equação (3.8) e considerando $c \approx 0$, o valor estimado de L_{exp} é 24.97 mm. A variação do período segue um perfil linear (equação (2.9)), com $k=1.2$ nm/cm. A configuração experimental é descrita em 3.4.2.1, na Figura 3.12, para a gravação de redes com $\lambda_B \approx 1550$ nm, usando o interrogador *Micron Optics SM-125-500* para monitorizar o crescimento das CPOFBGs. O espectros de reflexão das CPOFBGs são mostrados nas Figuras 3.17 (a) e 3.17 (b), cujas as redes foram gravadas através da incidência de 14 e 26 pulsos respetivamente, com uma frequência de 1 Hz. O espectro da rede gravada com 14 pulsos tem uma amplitude de reflexão máxima de aproximadamente 17.5 dB e um *ripple* máximo de 3.33 dB. A FWHM da banda refletida é aproximadamente 3.95 nm. Por sua vez, a amplitude de reflexão máxima para a rede gravada com 26 pulsos é aproximadamente 12 dB, enquanto que a FWHM é aproximadamente 4.49 nm. O valor máximo de *ripple* aumentou para 4.09 dB. Através de uma simples análise a estes dados, podemos afirmar que o nível de saturação foi atingido num número de pulsos inferior 26, e a partir desse ponto, a amplitude de reflexão da banda começa a diminuir e o *ripple* aumenta, diminuindo a qualidade da CPOFBG. A Figura 3.17 (c) mostra os espectros de reflexão das CPOFBGs e as simulações em MATLAB para $L=17$ e 25 mm. O espectro simulado para $L=25$ mm é mais largo possivelmente devido a pequenas imperfeições na fabricação da mPOF e/ou alguma não homogeneidade do feixe laser devido ao uso da lente divergente para se obter um feixe UV a irradiar toda a máscara de fase de 25 mm.

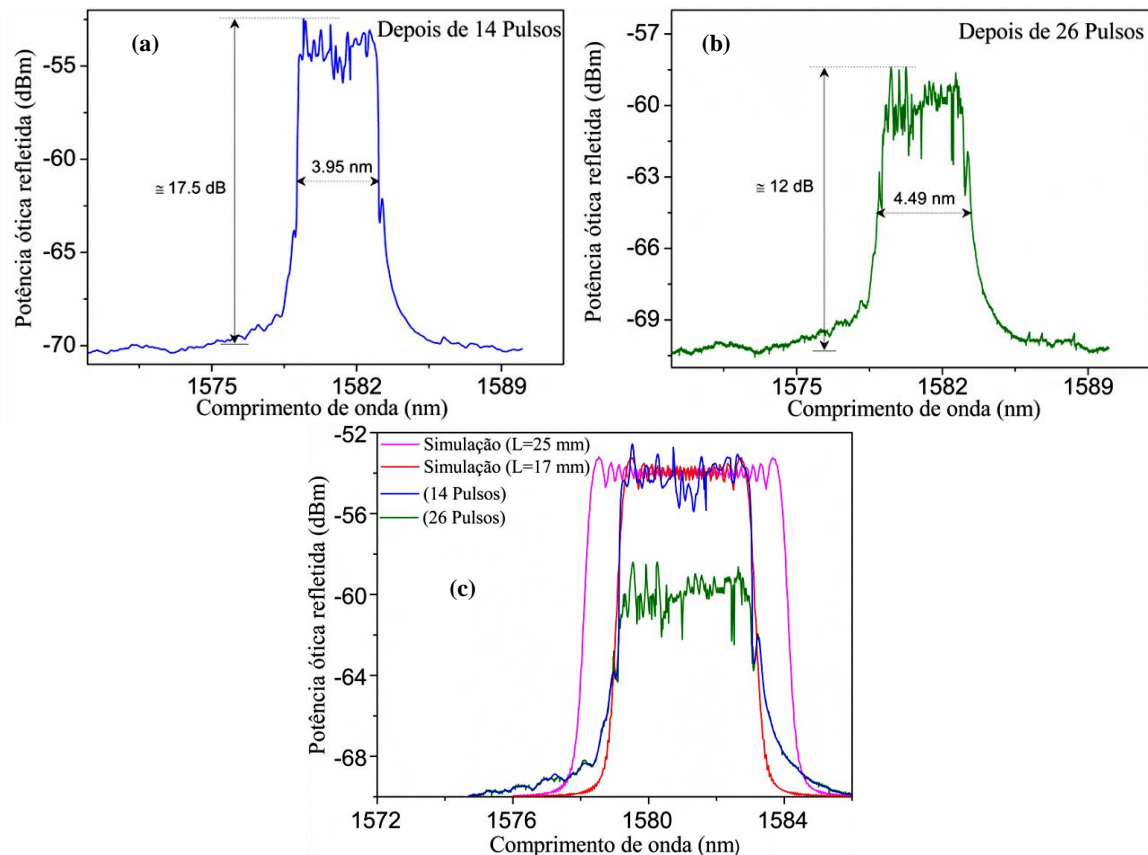


Figura 3.15 – Espectros de reflexão das CPOFBGs produzidas através de 14 pulsos (a) e 26 pulsos (b) do laser de 248 nm; (c) Espectros de reflexão das CPOFBG e simulação em MATLAB com $k=1.2$ nm/cm, $\Delta n=1 \times 10^{-4}$, para $L=25$ (magenta) e 17 mm (vermelho).

CAPÍTULO 4 – Caracterização das POFBGs

4.1 – Introdução

Os sensores em fibra ótica têm vindo a ter grande destaque em relação aos demais, não só devido às suas vantagens, mas também devido à sua fiabilidade e segurança que confere em certas aplicações. Nesse sentido, sensores baseados em redes de Bragg apresentam características que são importantes na sua implementação em aplicações reais, tais como: elevada resolução, região de sensoriamento bem localizada, medições geralmente caracterizadas por um comportamento linear e imunidade a flutuações de intensidade quando o sensor é codificado para “ler” apenas o comprimento de onda. A POFBG possui elevada sensibilidade em relação à temperatura e tensão longitudinal, e atualmente, a caracterização do seu comportamento face a estes parâmetros tem sido a sua principal aplicação como sensores. Neste capítulo, é caracterizado o comportamento da PS-POFBG e da CPOFBG face a diferentes perturbações externas, onde para além da análise da variação do comprimento de onda, outros parâmetros são caracterizados através de uma caracterização mais profunda dos dados obtidos.

4.2 – Estudo à sensibilidade da PS-POFBG

O conhecimento da sensibilidade da rede de Bragg a perturbações externas, tais como variações de temperatura, perturbações mecânicas ou percentagem da humidade relativa é importante para a sua futura implementação em sensor. Em primeira instância, a sensibilidade pode ser traduzida pelo deslocamento do λ_B . Logo, pela equação (2.5), os parâmetros de rede que serão afetados pelas perturbações externas são o índice de refração efetivo do núcleo (n_{eff}) e o período da rede de Bragg (Λ). Nesta secção é caracterizada a sensibilidade da PS-POFBG para diferentes perturbações externas em transmissão. A PS-POFBG encontra-se conectada (por conectores FC/PC) entre a fonte (*Superlum SLD-371-HP1*) de comprimento de onda central 843.6 nm e FWHM=47.6 nm (Figura 4.1), e o OSA (*YOKOGAWA AQ6373B*).

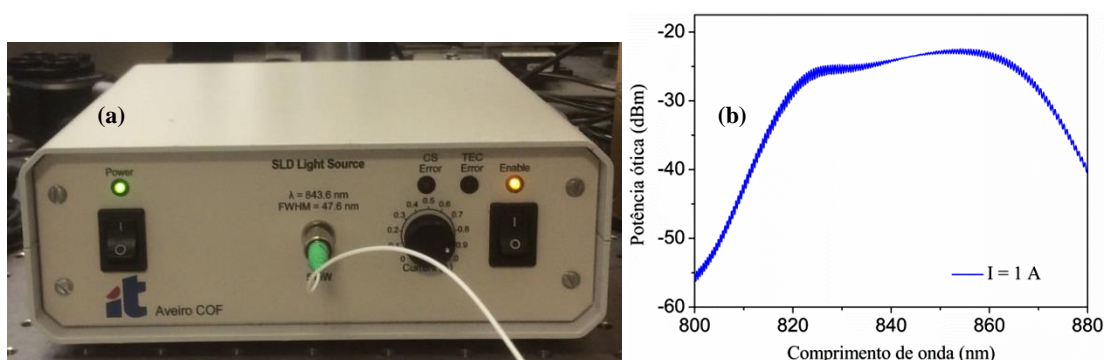


Figura 4.1 – (a) Fotografia da fonte Superlum SLD-371-HP1; (b) respetivo espectro de transmissão para uma corrente de 1 A.

4.2.1 – Caracterização da sensibilidade à temperatura

Ao considerar que a FBG se encontra sujeita exclusivamente a variações de temperatura, sem sofrer qualquer outro tipo de perturbação externa, a variação do seu λ_B pode ser expressa por:

$$\Delta\lambda_B = S_T \Delta T, \quad (4.1)$$

onde S_T é a sensibilidade da rede à temperatura e é dada por:

$$S_T = \lambda_B(\alpha + \xi) \quad (4.2)$$

Assim, a variação de temperatura na rede Bragg afeta o índice de refração efetivo do núcleo e o período da rede de Bragg, uma vez que estes parâmetros estão respetivamente relacionados com o coeficiente termo-ótico (ξ) e coeficiente de expansão térmica (α) da fibra. A relação entre o índice de refração efetivo do núcleo e o coeficiente termo-ótico é dada por:

$$\xi = \frac{1}{n_{eff}} \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right), \quad (4.3)$$

e a relação entre o período da rede de Bragg e o coeficiente de expansão térmica por:

$$\alpha = \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \quad (4.4)$$

A Tabela 4.1 compara os valores típicos de ξ e α para o polímero PMMA e para a sílica. No caso da sílica, ambos os coeficientes são positivos, o que permite obter uma variação positiva do λ_B em função da temperatura. No caso dos polímeros, o valor de ξ é negativo, enquanto que α é positivo. Uma vez que o coeficiente termo-ótico domina sobre o coeficiente de expansão térmica, a variação do λ_B em função da temperatura é negativa. Deste modo, verifica-se que a maior contribuição para a sensibilidade térmica da rede de Bragg é devido à variação do índice de refração por efeito da temperatura. Também pode-se constatar, através da equação (4.2) e dos valores apresentados na Tabela 4.1, que a sensibilidade térmica é maior para o material PMMA.

Tabela 4.1 – Comparação das propriedades térmicas entre o polímero PMMA e a sílica [2].

	PMMA	Sílica
Coefficiente de expansão térmica (α)	$9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	$5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$
Coefficiente termo-ótico (ξ)	$-1.10 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$	$9.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

O teste à temperatura foi realizado na câmara térmica (*Angelantoni CHALLENGE 340*), com uma resolução de 0.1 °C, e o valor da humidade relativa (*RH*) pré-ajustado para 50%. A temperatura foi aumentada desde de 22 °C até 52 °C, com intervalos em cada variação de 5 °C. Em cada intervalo, a temperatura manteve-se constante durante 30 minutos para assegurar que o equilíbrio térmico é alcançado. A Figura 4.2 (a) mostra os resultados experimentais do comportamento da PS-POFBG face à variação de temperatura. Na Figura 4.2 (b) encontra-se a variação do comprimento de onda das duas depressões em função da variação da temperatura. Para um aumento de temperatura de 30 °C, a variação total no comprimento de onda de Bragg foi -1.71 nm. Deve-se salientar que esta variação no comprimento de onda em função da temperatura não é completamente linear, uma vez que existe um incremento no $\Delta\lambda_B$ com o aumento da temperatura. A sensibilidade térmica obtida após a linearização (para efeitos de comparação com a literatura) é $-57.0 \pm 4.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. Este valor é mais de 3 vezes superior ao valor teórico obtido para o polímero

PMMA ($S_T \approx -16.9$ pm/°C), calculado através da equação (4.2) e dos dados da Tabela 4.1 para $\lambda_B = 844$ nm. Também, é aproximadamente três vezes superior ao valor relatado para a TOPAS/ZEONEX-POFBG uniforme (-17.57 pm/°C) com $\lambda_B \approx 852$ nm [35].

Como pode ser observado na Figura 4.2 (a), as amplitudes das depressões 1 e 2 diminuem com o aumento da temperatura, mas essas variações não demonstram um comportamento linear. A variação da diferença de potência ótica transmitida entre o *notch* e as depressões 1 e 2 em função da temperatura é demonstrada na Figura 4.2 (c). Existe diminuição não linear da diferença de potência ótica entre a depressão 1 e *notch*, no entanto, entre a depressão 2 e *notch* e entre as duas depressões os dados mostram pouca sensibilidade com a variação da temperatura. A Figura 4.2 (d) mostra a variação da separação espectral entre as duas depressões e o *notch*, e verifica-se que esta variação demonstra muito pouca sensibilidade térmica dentro desta gama de temperaturas. Embora a separação espectral das duas depressões seja insensível à temperatura, as suas posições espectrais absolutas são altamente sensíveis à temperatura, tal como é demonstrado nas Figuras 4.2 (a) e (b).

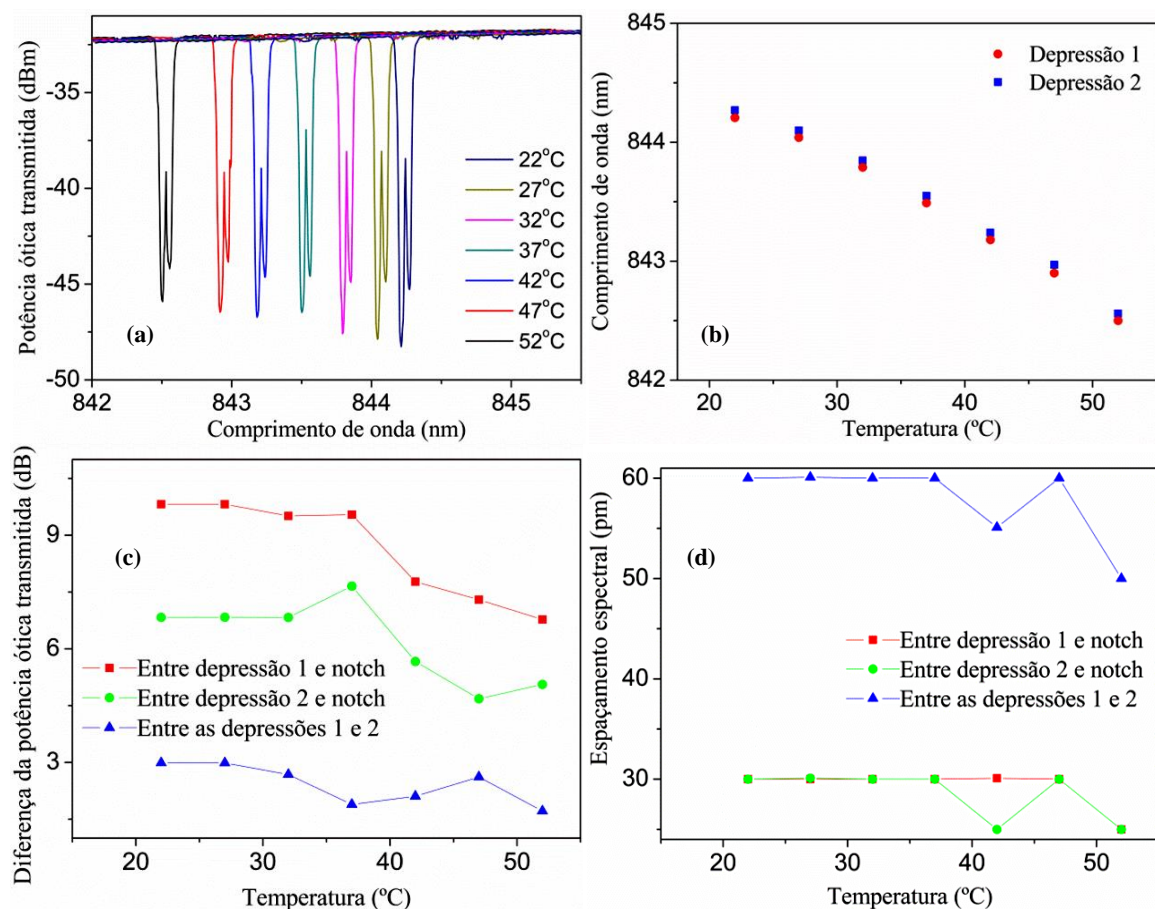


Figura 4.2 – (a) Evolução do espectro de transmissão da PS-POFBG em função da temperatura; (b) Variação do comprimento de onda das depressões 1 e 2 em função da temperatura; (c) Variação da diferença de potência ótica e (d) variação do espaçamento espectral entre a depressão 1 e notch, entre a depressão 2 e notch e entre as duas depressões em função do aumento da temperatura.

4.2.2 – Caracterização da sensibilidade à pressão

A variação do λ_B de uma FBG em função das variações de pressão, sem sofrer qualquer outro tipo de perturbação externa, pode ser expressa por:

$$\Delta\lambda_B = S_P \Delta P, \quad (4.5)$$

onde S_P é a sensibilidade da rede à pressão e é dada por [61]:

$$S_P = \frac{1}{E} \left(\frac{n_{eff}^2}{2} (1 - 2\nu)(p_{11} + 2p_{12}) - (1 - 2\nu) \right) \lambda_B, \quad (4.6)$$

onde E é o módulo de Young, ν é o coeficiente de Poisson e p_{11} e p_{12} são componentes do tensor fotoelástico. A primeira parte da equação traduz a variação do índice de refração como resultado do efeito fotoelástico e a segunda parte refere-se à variação do período da rede de Bragg. A partir da equação (4.6), verifica-se que a sensibilidade à pressão aumenta com a diminuição do módulo de Young, o que favorece as POFs ($E_{PMMA}=3.2$ GPa) para aplicações de pressão, em relação ao seu homólogo de sílica ($E_{sílica}=73$ GPa) [12]. Esta equação é aceitável para sólidos isotrópicos como é o caso das GOFs, no entanto as POFs são anisotrópicas, o que compromete a validade desta equação para este tipo de fibras. Outro pormenor a ter em conta é que no caso das POFBGs, a alteração do índice de refração efetivo induzida por pressão hidrostática é dominante em comparação à variação do período da rede de Bragg, e consequentemente o valor de S_P é positivo. Por outro lado, numa GOFBG, a variação do período da rede de Bragg domina sobre a variação do índice de refração efetivo, e como resultado o valor de S_P é negativo [13].

O teste da sensibilidade à pressão hidrostática da PS-POFBG foi realizado na câmara de pressão selada que se encontra ilustrada na Figura 4.3. Durante a experiência, a POFBG encontra-se dentro da câmara, colada e tensionada em dois pontos laterais do tubo para evitar deformações na fibra e assegurar que esta é mantida em linha reta enquanto a pressão dentro da câmara aumenta. A injeção de ar comprimido permite aumentar a pressão hidrostática dentro da câmara, que é monitorizada por dois barómetros (um junto à válvula de entrada do ar comprimido e outro junto à fibra). Para verificar a ocorrência de variações térmicas, foi colocado um sensor de temperatura (*ST-8820 Environment Meter*) de resolução 0.1 °C. A variação máxima da temperatura dentro do tubo foi de 0.5 °C, não tendo influência muito grande nas medidas de pressão.

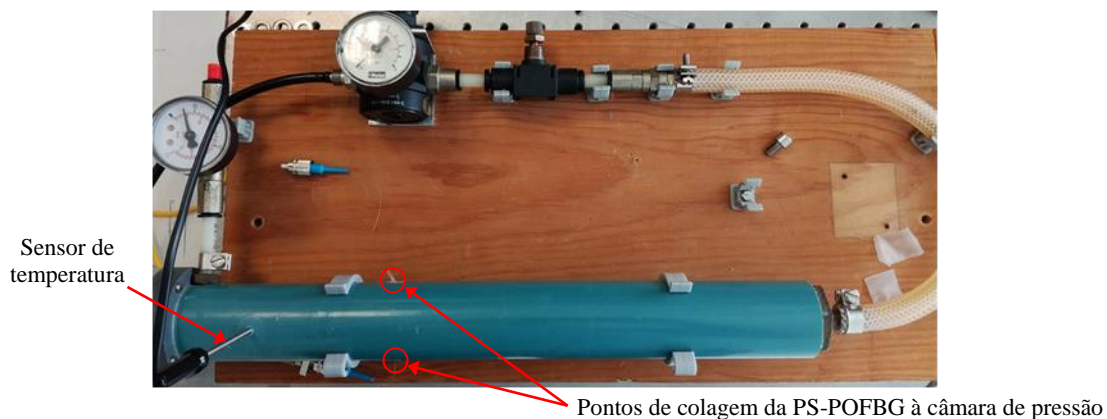


Figura 4.3 – Montagem experimental usada nos testes à pressão hidrostática.

A Figura 4.4 (a) mostra as alterações no espectro de transmissão da PS-POFBG para diferentes pressões na gama dos 0 – 400 kPa, com intervalos em cada 100 kPa. Em cada intervalo, a pressão manteve-se constante durante 20 minutos para assegurar a estabilidade das medições. Na Figura 4.4 (b) pode-se verificar que o comprimento de onda das depressões 1 e 2 variou linearmente com o aumento da pressão. A sensibilidade à pressão obtida após a linearização é 0.45 ± 0.03 pm/kPa.

As amplitudes das depressões 1 e 2 e do *notch* diminuem com o aumento da pressão, tal como se pode observar na Figura 4.4 (a) e Figura 4.4 (c). Essas variações não demonstram um comportamento linear no caso da depressão 2, mas na depressão 1 e no *notch*, a diminuição é linear com variação de 0.005 ± 0.001 dB/kPa. A Figura 4.4 (c) também mostra a variação da diferença de potência ótica transmitida entre o *notch* e as depressões 1 e 2 em função da pressão. Existe diminuição não linear da diferença de potência ótica entre as depressões 1 e 2. Entre a depressão 2 e *notch* e entre a depressão 1 e *notch*, os dados mostram pouca sensibilidade com a variação da pressão, inclusive a diferença da potência ótica transmitida entre a depressão 1 e *notch* é aproximadamente constante (variação máxima de 0.4 dB) em função da pressão. Por outro lado, a Figura 4.4 (d) mostra a variação da separação espectral entre as duas depressões e o *notch*, existindo uma observável diminuição (quase linear) entre a depressão 1 e *notch*. Para o caso da depressão 2 e *notch* observa-se um comportamento estável, exceto para a pressão 300 kPa, o que poderá ter sido provocado por alguma condição externa.

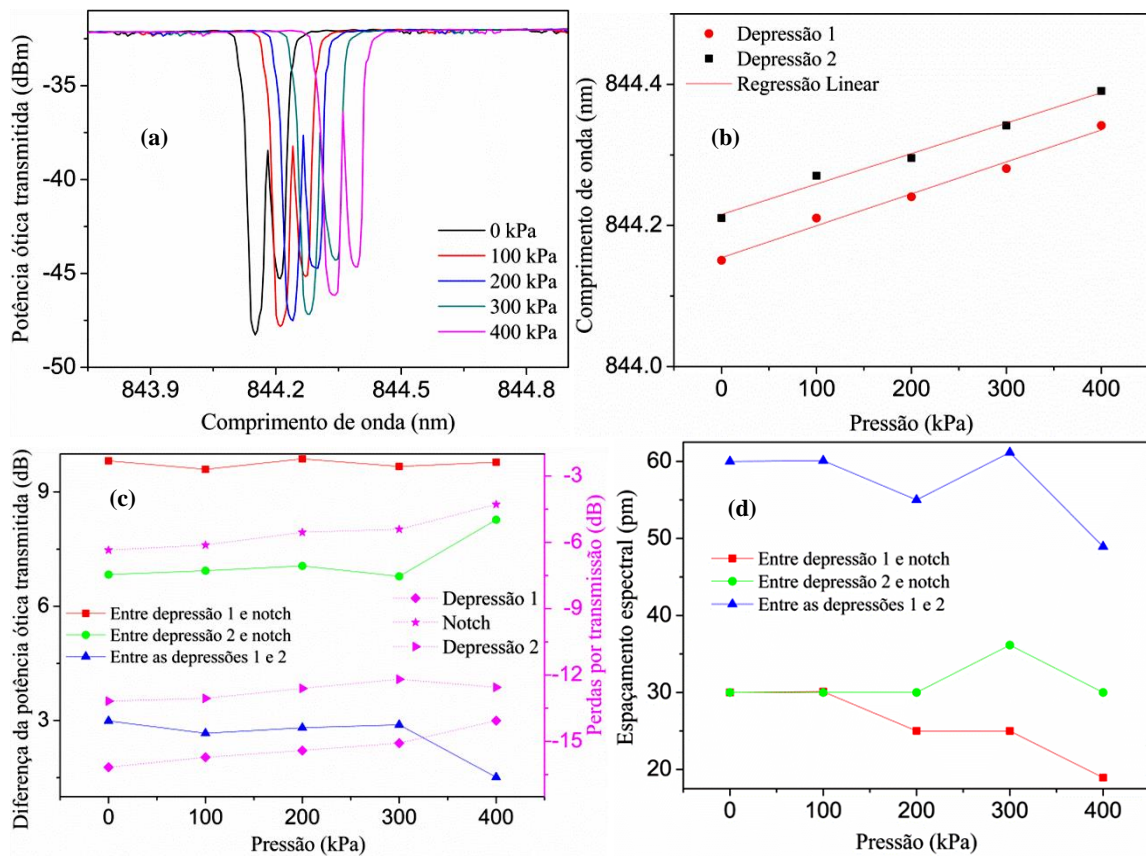


Figura 4.4 – (a) Evolução do espectro de transmissão da PS-POFBG em função da pressão hidrostática; (b) Variação do comprimento de onda das depressões 1 e 2 em função da pressão; (c) Variação da diferença de potência ótica e (d) variação do espaçamento espectral entre e notch e as depressões 1 e 2.

4.2.3 – Caracterização da sensibilidade à deformação longitudinal

A sensibilidade da rede de Bragg ($S_{\mathcal{E}}$) quando sujeita a uma tensão que provoca uma deformação longitudinal na fibra, relaciona-se com a variação do λ_B através de:

$$\Delta\lambda_B = S_{\mathcal{E}} \varepsilon_z, \quad (4.7)$$

quando a fibra encontra-se isolada face às outras perturbações externas. $S_{\mathcal{E}}$ é dada por:

$$S_\varepsilon = \lambda_B (1 - p_e), \quad (4.8)$$

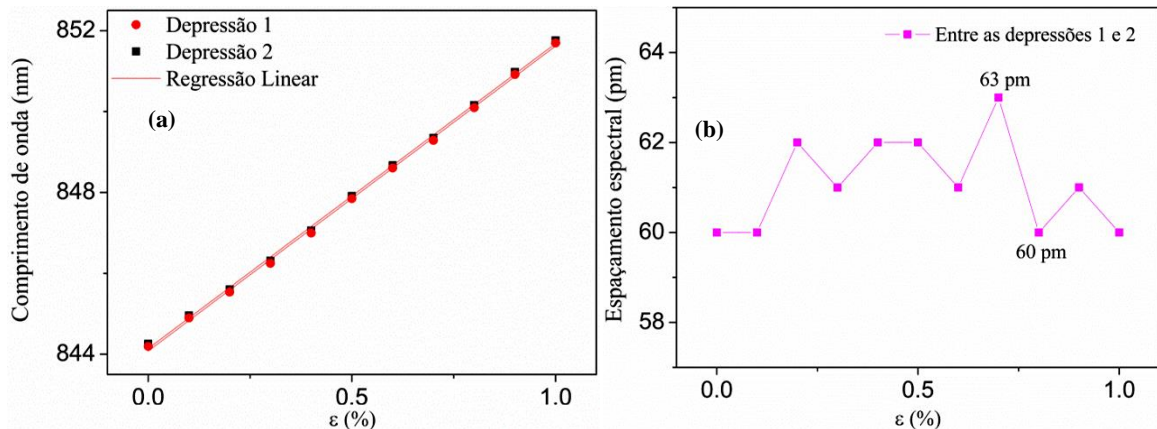
onde p_e é a constante fotoelástica efetiva expressa por [62]:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})), \quad (4.9)$$

e está relacionada com a variação do índice de refração efetivo do núcleo. O valor da constante fotoelástica efetiva para a POF já foi reportado em estudos da caracterização da SM-PMMA-POFBG à tensão longitudinal [63], onde foi obtida uma resposta linear entre a variação do λ_B em função da deformação da fibra, com $p_e \approx 0.05$. Por sua vez, nas fibras óticas de SM-sílica, a constante fotoelástica efetiva toma valores entre 0.22 e 0.24 [10], o que torna teoricamente a POFBG mais sensível em comparação à GOFBG, em aproximadamente 20% para o mesmo λ_B .

Na caracterização da PS-POFBG à deformação longitudinal, a fibra foi fixada em dois estádios de translação com uma resolução de 10 μm , e com o espaçamento entre os dois pontos fixos da fibra de 64.20 ± 0.05 mm. A tensão foi aplicada ao deslocar um dos estádios de translação segundo o eixo da fibra até aproximadamente 0.64 mm (cerca de 1 % ε), com intervalos a cada aumento de 0.065 mm. A dependência espectral das depressões da PS-POFBG em função do aumento da tensão encontra-se na Figura 4.5 (a), onde pode-se verificar um comportamento linear com uma sensibilidade à deformação longitudinal de 0.76 ± 0.01 pm/ $\mu\varepsilon$. Este valor é ligeiramente inferior ao valor teórico, $S_\varepsilon \approx 0.84$ pm/ $\mu\varepsilon$, com $p_e = 0.05$ e $\lambda_B = 844$ nm. Por outro lado, o valor é igual ao relatado para a TOPAS/ZEONEX-POFBG uniforme (0.76 pm/ $\mu\varepsilon$) com $\lambda_B \approx 852$ nm [35], e semelhante ao obtido para o PMMA-POFBG uniforme (0.71 pm/ $\mu\varepsilon$) com $\lambda_B \approx 850$ nm [64].

A Figura 4.5 (b) mostra a variação da separação espectral entre as duas depressões em função do aumento da tensão. Esta separação espectral é pouco sensível à deformação longitudinal, apresentando uma variação máxima de 3 pm ao longo da experiência. Na Figura 4.5 (c) está apresentada a dispersão dos pontos medidos experimentalmente para as duas depressões em torno da linha de tendência que traduz a sensibilidade da PS-POFBG ao aumento da deformação longitudinal. A partir destes valores, o desvio padrão (σ) obtido para as depressões 1 e 2 é aproximadamente 65.7 e 53.9 pm, respetivamente. Para comparar estes resultados com uma rede Bragg uniforme, repetiu-se duas vezes o mesmo procedimento utilizando uma POFBG uniforme, como mostrado na Figura 4.5 (d). O desvio padrão calculado é aproximadamente 84.8 e 110.6 pm para cada um dos ciclos. Estes resultados confirmam a vantagem da PS-POFBG sobre a POFBG uniforme em questão de fiabilidade em relação às medidas de sensibilidade obtidas para cada rede.



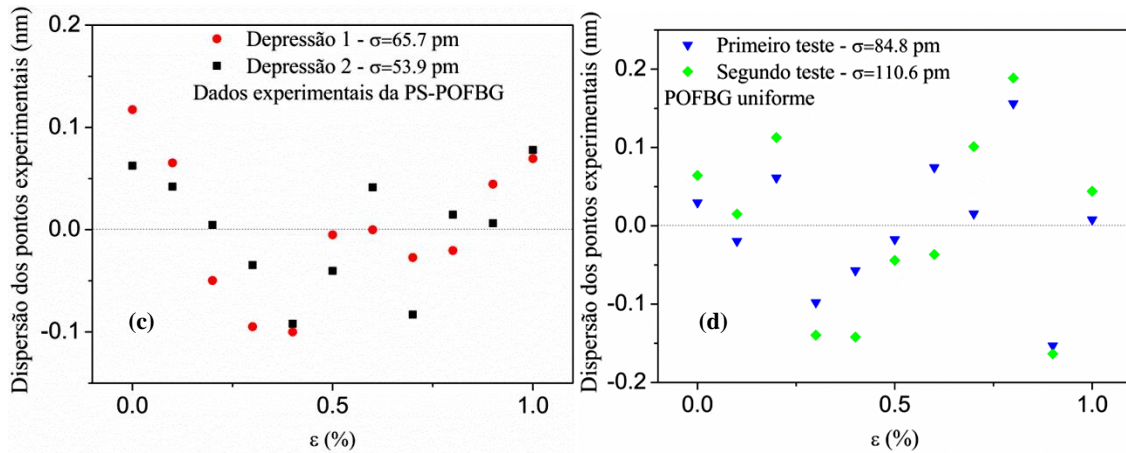


Figura 4.5 – (a) Variação do comprimento de onda das depressões 1 e 2 em função da deformação longitudinal; (b) Variação do espaçamento espectral entre as depressões 1 e 2; (c) Dispersão dos pontos experimentais em torno da linha de tendência para a PS-POFBG e (d) para a POFBG uniforme.

4.2.4 – Caracterização da sensibilidade à humidade

Uma das principais características da PMMA-POFBG é a sua elevada capacidade de absorção de água comparativamente a outras fibras. Neste contexto, a FBG reage à atividade da água do meio circundante, mostrando, como por exemplo, dependência com a humidade do ar. Esta propriedade torna a FBG sensível à concentração de qualquer solução aquosa que rodeia a fibra, o que é bastante útil no estudo da sensibilidade de diferentes parâmetros [12] como a medição do teor de água no combustível, da concentração de sal ou açúcar nas soluções aquosas, etc. A variação do λ_B em função da variação da humidade relativa (RH, *Relative Humidity*) pode ser expressa por:

$$\Delta\lambda_B = S_H \Delta H, \quad (4.10)$$

onde S_H é a sensibilidade da rede à humidade relativa e é dada por:

$$S_H = \lambda_B(\eta + \beta), \quad (4.11)$$

onde

$$\eta = \frac{1}{n_{eff}} \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial H} \right) \quad (4.12)$$

é a dependência normalizada do índice de refração efetivo do núcleo com humidade e

$$\beta = \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial H} \right) \quad (4.13)$$

é o coeficiente de expansão relacionado com a variação de volume induzida pela humidade. No entanto, os parâmetros η e β não são constantes [12][65], uma vez que o primeiro diminui quase linearmente com o aumento da temperatura e o último é apenas constante na região 40 – 100 %RH, diminuindo de valor abaixo desse intervalo. Estes fatores comprometem a linearidade da sensibilidade por parte da POFBG, e consequentemente a precisão das medições por parte do sensor. Para o PMMA, η e β tomam valores próximos de 1.13×10^{-5} e $3 \times 10^{-5} (\%RH)^{-1}$,

respetivamente para uma temperatura de 25 °C e humidade relativa de 50% [65], mostrando que maior contribuição para a variação do λ_B da POFBG tem origem na expansão do PMMA.

O teste da sensibilidade da PS-POFBG à humidade relativa foi realizado na câmara térmica (*Angelantoni CHALLENGE 340*), com uma resolução de 0.1 %RH, e o valor da temperatura pré-ajustado para 25 °C. Em primeira instância, a humidade relativa foi aumentada desde 30 até 90%, e posteriormente diminuiu desde 90 até 30%, com intervalos a cada 10 %RH com duração de 60 minutos para assegurar a estabilidade das condições ambientais. Também foi analisada a resposta da PS-POFBG à humidade relativa com uma temperatura pré-ajustada de 50 °C, recorrendo o mesmo procedimento. De notar que após a gravação da PS-POFBG utilizada, ela foi recozida durante 15 minutos a uma temperatura de 60 ± 1 °C num recipiente com água (100 %RH), tal como foi descrito anteriormente na secção 3.3. As Figuras 4.6 (a) e (b) mostram a variação do comprimento de onda da depressão 1 em função do aumento e decréscimo da humidade relativa para as temperaturas 25 e 50 °C, respetivamente. A variação no comprimento de onda em função da humidade relativa não é completamente linear, uma vez que $\Delta\lambda_B$ diminui para valores de humidade mais baixos. As sensibilidades obtidas após a linearização (tabela 4.2) para 25 e 50 °C são de 19.85 ± 2.51 e 19.61 ± 2.35 pm/%RH quando se aumenta a humidade; 19.60 ± 2.11 e 18.90 ± 2.44 pm/%RH quando ocorre a diminuição da humidade, respetivamente.

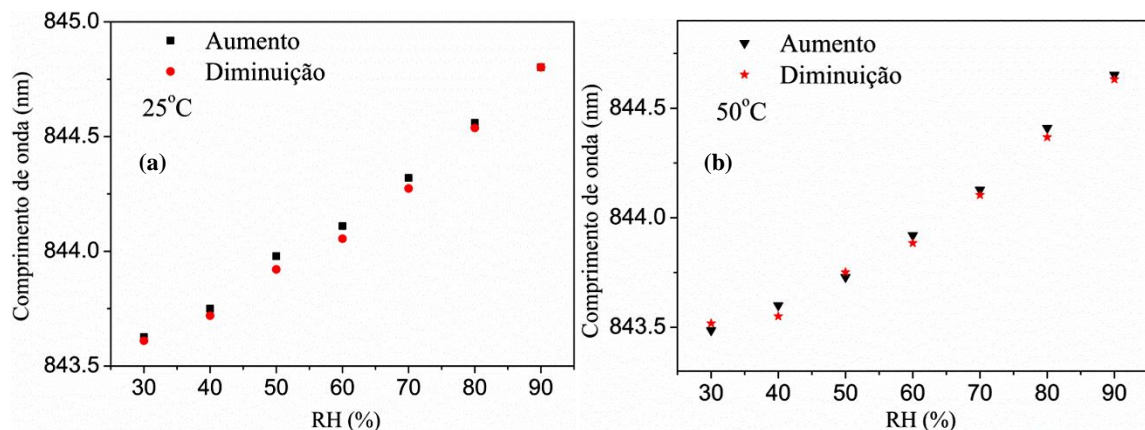


Figura 4.6 – (a) Variação do comprimento de onda da depressão 1 em função do aumento e diminuição da humidade relativa, à temperatura de 25 °C e (b) à temperatura de 50 °C.

A dependência da sensibilidade com o processo de pré-recozimento já foi relatada em [66], onde se obtiveram maiores sensibilidades e menor nível de histerese para as POFs pré-recozidas com elevada percentagem de humidade relativa. Para testar estes resultados, uma outra SM-PMMA-mPOF foi pré-recozida na câmara térmica a 60 °C e 50 %RH durante 6 horas, antes da gravação da PS-FBG na POF. Para caracterizar a sensibilidade à humidade por parte desta PS-POFBG, repetiu-se o mesmo procedimento que foi descrito anteriormente, para as temperaturas de 25 e 50 °C. Os resultados que caracterizam a sensibilidade desta fibra encontram-se na tabela 4.2, onde os valores obtidos após a linearização são 15.17 ± 2.89 e 14.58 ± 3.01 pm/%RH quando se aumenta a humidade; 16.15 ± 2.33 e 15.05 ± 2.77 pm/%RH quando ocorre a diminuição da humidade, para 25 e 50 °C respetivamente. A sensibilidade e sua linearidade face à humidade diminuem conforme a temperatura de operação aumenta. O nível de histerese é consideravelmente superior para a PS-POFBG pré-recozida a 50 %RH, apresentando um valor 3 vezes maior que a PS-POFBG pré-recozida a 100 %RH, quando o teste à sensibilidade é realizado a 50 °C, como mostra a tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Sensibilidade à humidade e histerese para PS-POFBGs sujeitas a diferentes processos de recozimento (com 50 e 100 %RH).

Recozimento (%RH)	Temperatura de operação (°C)	Sensibilidade à humidade (pm/%RH)	Histerese (pm)
		Aumento/Diminuição	
50	25	15.70/16.15	115
	50	14.58/15.05	195
100	25	19.85/19.60	47
	50	19.61/18.90	64

4.3 – Estudo à sensibilidade da CPOFBG

Nesta secção é caracterizada a sensibilidade da CPOFBG para diferentes perturbações externas através da análise do seu espectro de reflexão. A CPOFBG encontra-se conectada (por conector FC/PC) ao interrogador *Micron Optics SM 125-500*, que ligado ao computador permite a monitorização da rede de Bragg.

4.3.1 – Caracterização da sensibilidade à temperatura

O teste da sensibilidade da CPOFBG à temperatura foi realizado na câmara térmica *Angelantoni CHALLENGE 340*, com a humidade relativa pré-ajustada para 50%. A temperatura foi aumentada desde de 22 °C até 52 °C, com intervalos de 30 minutos em cada variação de 5 °C para assegurar que o equilíbrio térmico é alcançado. Para obter o valor do comprimento de onda de Bragg a partir dos espectros obtidos, considerou-se o comprimento de onda central da banda de reflexão da CPOFBG, medido na FWHM. A Figura 4.7 (a) mostra os resultados experimentais do comportamento da CPOFBG face às temperaturas 22, 32 e 42 °C. A FWHM apresenta pouca sensibilidade em função da temperatura, com variações não lineares. A variação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura e o seu ajuste linear (para efeitos de comparação com a literatura) podem ser observados na Figura 4.7 (b). Para um aumento de temperatura de 30 °C, a variação no comprimento de onda de Bragg foi -3.9 nm. Em concordância com os resultados anteriores para a PS-POFBG, a variação do comprimento de onda em função da temperatura não é completamente linear, uma vez que existe um incremento no $\Delta\lambda_B$ com o aumento da temperatura. A sensibilidade térmica obtida após a linearização é -131.1 ± 4.9 pm/°C. Este valor de sensibilidade é mais de duas vezes superior ao relatado para POFBGs uniformes (-55 ± 3 pm/°C) com $\lambda_B=1542$ nm [67]. Ao mesmo tempo, é uma ordem de grandeza superior à sensibilidade térmica das GOFBGs uniformes (13.9 pm/°C)[67] e PS-GOFBGs (10.3 pm/°C)[16].

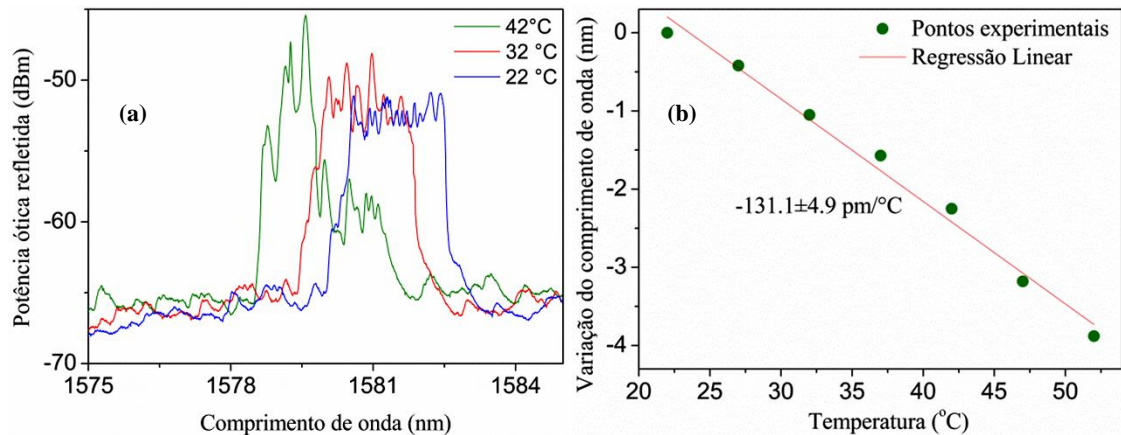


Figura 4.7 – (a) Espectro de reflexão da CPOFBG para diferentes temperaturas; (b) Variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura.

4.3.2 – Caracterização da sensibilidade à deformação longitudinal

Na caracterização da CPOFBG à deformação longitudinal foi usado o mesmo procedimento pelo qual decorreu a caracterização da PS-POFBG, descrito na secção 4.2.3. A tensão foi aplicada ao deslocar um dos estágios de translação segundo o eixo da fibra até aproximadamente 0.39 mm, com intervalos a cada aumento de 0.065 mm. Para um aumento da deformação longitudinal de 0.6 %, a variação no comprimento de onda de Bragg foi 10.6 nm. A variação do comprimento de onda de Bragg da CPOFBG em função do aumento da deformação encontra-se na Figura 4.8 (a), onde pode-se verificar um comportamento linear com uma sensibilidade de $1.77 \pm 0.02 \text{ pm}/\mu\epsilon$. Esta sensibilidade é superior à obtida para a PS-GOFBG com $\lambda_B \approx 1548.5 \text{ nm}$ [16], que apresenta um valor de aproximadamente $1.23 \text{ pm}/\mu\epsilon$. Também é superior em comparação a outros resultados relatados em POFs, que mostram sensibilidades de $1.44 \text{ pm}/\mu\epsilon$ [63] e $1.48 \text{ pm}/\mu\epsilon$ [36] para as SM-PMMA-POFBGs uniformes, com λ_B igual a 1536.4 e 1523.1 nm respetivamente. Os resultados experimentais obtidos mostram que a FWHM aumenta não linearmente em função da deformação, apresentando valores de 4.1, 4.4 e 4.6 nm para 0.1, 0.3 e 0.6 % ϵ , respetivamente. Na Figura 4.8:b) está apresentada a dispersão dos pontos medidos experimentalmente em torno da linha de tendência que traduz a sensibilidade da CPOFBG. A partir destes valores, o desvio padrão obtido é 131.6 pm. Este valor é mais de duas vezes superior ao registado para a PS-POFBG, resultando numa menor precisão nas medições da deformação por parte da CPOFBG, contribuindo para isso uma menor estabilidade espectral da CPOFBG.

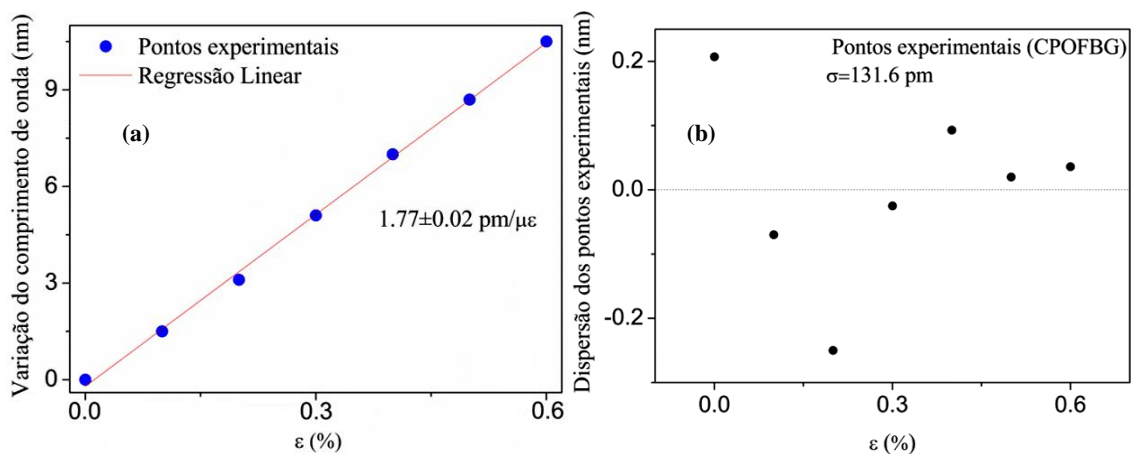


Figura 4.8 – (a) Variação do comprimento de onda de Bragg em função da deformação longitudinal; (b) Dispersão dos pontos experimentais em torno da linha de tendência para a CPOFBG.

CAPÍTULO 5 – Deslocamento permanente do λ_B da POFBG uniforme para maiores comprimentos de onda

5.1 – Introdução

O tratamento pós-recozimento (depois da gravação da FBG na POF) tem sido aplicado em POFBGs devido ao facto do comprimento destas fibras diminuir quando aquecidas acima da temperatura de transição- β . Isto acontece devido ao relaxamento da tensão molecular que foi introduzida por estiramento durante o processo de produção da fibra. Este tratamento pode induzir uma variação permanente no λ_B da POFBG para menores comprimentos de onda, o que permite a multiplexagem de vários λ_B pelo dispositivo, usando apenas uma máscara de fase para gravar múltiplas redes de Bragg, com diferentes tempos de recozimento [50][68]. A taxa de redução do comprimento da fibra está fortemente dependente do material que constitui a fibra, das condições usadas na sua produção e dos parâmetros do processo de recozimento, tais como temperatura, humidade e duração do tratamento. Como já foi referenciado anteriormente neste documento, o processo de recozimento também pode reduzir a atenuação por parte da POF, melhorar a sensibilidade da POFBG e minimizar o nível de histerese por parte do sensor.

Neste capítulo é demonstrada a variação permanente do λ_B de POFBGs uniformes para maiores comprimentos de onda usando diferentes procedimentos durante o tratamento pós-recozimento. Para que esta variação ocorra para comprimentos de onda superiores, a fibra é esticada durante a exposição térmica. Nesta situação, a taxa de variação do comprimento da fibra também está dependente da força externa aplicada durante o tratamento, para além dos parâmetros evidenciados anteriormente.

5.1 – Deslocamento do λ_B através da deformação longitudinal da fibra durante o recozimento

A variação permanente do λ_B da POFBG para valores superiores é conseguida exercendo uma força externa longitudinal na fibra enquanto esta é aquecida acima da temperatura de transição- β do PMMA [68], e logo a seguir é rapidamente arrefecida enquanto a fibra continua sob tensão. Inicialmente a FBG uniforme foi gravada em SM-PMMA-mPOF com λ_B igual a 841.2 nm, usando apenas um pulso do laser pulsado KrF de 248 nm. A POF encontra-se ligada por conector FC/PC ao acoplador ótico (50/50) de SM-GOF, que por sua vez é ligado à fonte (*Superlum SLD-371-HP1*) e ao OSA (*YOKOGAWA AQ6373B*) para permitir a monitorização do espectro em reflexão. Inicialmente foi realizado um pequeno teste onde a POFBG foi colocada numa placa de aquecimento (MS-H280-PRO) à temperatura de 65 °C durante 4 segundos, sem aplicar força externa, e o seu λ_B variou para aproximadamente 837 nm. Em seguida repetiu-se o processo, mas neste caso a fibra foi estirada à mão durante o tratamento térmico e subitamente foi removida da placa de aquecimento. Para esta situação, o valor de λ_B é ajustado permanentemente para um comprimento de onda maior. Este processo foi repetido 5 vezes e o valor de λ_B variou de 837 nm até aproximadamente 859 nm (22 nm de variação). Nesta experiência preliminar, a tensão exercida na fibra é desconhecida e portanto, foi caracterizada a resposta da POFBG em função da deformação longitudinal, para analisar se a fibra excedeu o seu limite elástico. O λ_B variou

linearmente em função da deformação da fibra, com uma sensibilidade de 0.77 ± 0.01 pm/ $\mu\epsilon$ (similar ao já reportado por esta fibra em [50]), logo pode-se confirmar que não ocorreu deformação plástica na POF durante o recozimento.

Para analisar concretamente a variação permanente do λ_B em função da tensão aplicada na fibra durante o recozimento, foi realizada uma experiência adicional, mas desta vez a tensão exercida na fibra foi controlada, através da análise da sua deformação longitudinal. A montagem experimental deste teste encontra-se esquematizada na Figura 5.1 (a), e com exceção da placa de aquecimento, é a mesma montagem usada para caracterização da sensibilidade da POFBG em função da deformação longitudinal. Em primeira instância, a POFBG foi deformada até 1 %, de modo a ter uma tensão constante aplicada sobre a mesma, e de seguida iniciou-se o processo de recozimento da POFBG à temperatura de 65 °C, com recurso à placa de aquecimento que encontra-se em contacto com a fibra. Após 3-5 minutos, a placa de aquecimento foi removida e a POF, ainda sob a tensão externa aplicada, foi arrefecida até à temperatura ambiente durante aproximadamente uma hora, para que o valor do λ_B estabilizasse. O mesmo procedimento foi repetido para a deformação longitudinal de 2 %. A Figura 5.1 (b) mostra o valor do λ_B permanente após o recozimento para os diferentes valores de deformações. O λ_B variou 4.7 nm depois do processo de recozimento com 1 % de deformação (de 841.2 nm até 845.9 nm), e variou 14.5 nm com 2 % de deformação (de 841.2 nm até 855.7 nm). Estes resultados mostram que o grau de variação do λ_B está diretamente relacionado com o valor de tensão longitudinal aplicada na fibra.

Para obter uma série de FBGs na mesma POF repetiu-se 5 vezes o procedimento anterior, aplicando diferentes deformações na fibra durante o recozimento após a gravação de cada FBG. Em cada repetição, a duração e a temperatura aplicada à fibra pela placa de aquecimento foram controladas para obter uma série de 5 FBGs. No primeiro caso, não foi aplicada nenhuma força externa na fibra durante o recozimento e o λ_B variou para 837.0 nm. O processo foi repetido para os restantes casos, aumentando gradualmente a tensão aplicada na fibra. A Figura 5.1 (c) mostra a série de 5 POFBGs uniformes obtidas através deste procedimento, gravadas com a mesma máscara de fase ($\Lambda_{MF}=567.8$ nm), e aplicando diferentes deformações na fibra durante o recozimento.

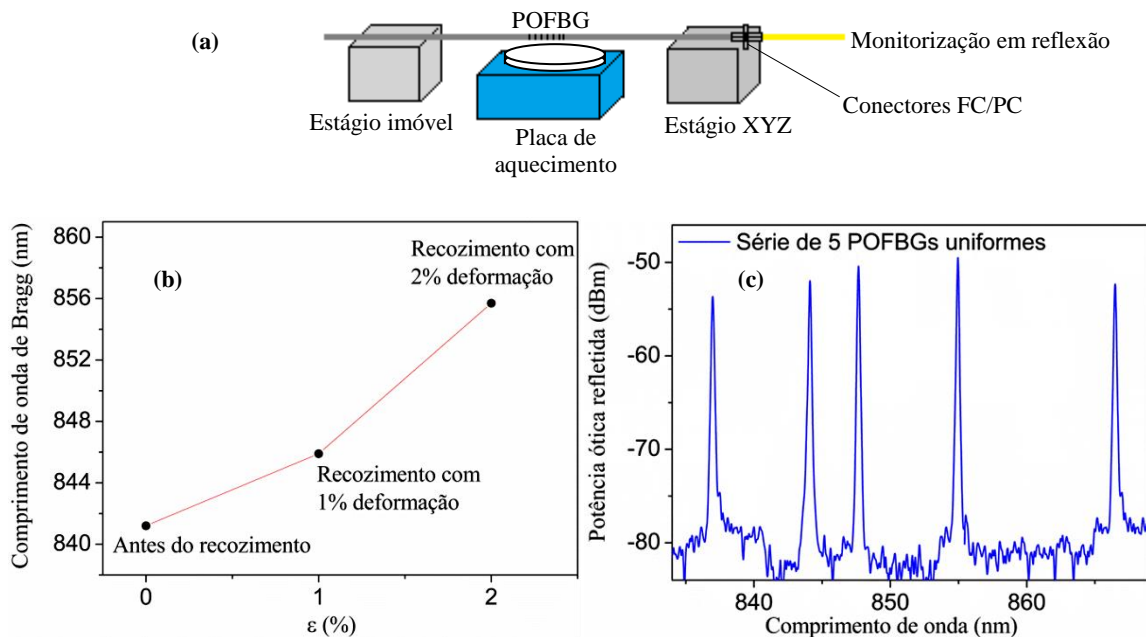


Figura 5.1 – (a) Esquema da montagem experimental do processo de recozimento com a aplicação de tensão externa; (b) Variação permanente do λ_B após o processo de recozimento com deformação longitudinal de 1 e 2 %; (c) Série de 5 POFBGs obtidas após o recozimento, para diferentes deformações na fibra.

Os comprimentos de onda de Bragg variaram permanentemente para os valores 837.0 (sem aplicar força externa), 844.1, 847.6, 854.9 e 866.5 nm, abrangendo uma gama de variação de aproximadamente 30 nm. A variação máxima do λ_B obtida para maiores comprimentos de onda é aproximadamente 25.3 nm, desde 841.2 nm até 866.5 nm.

5.2 – Deslocamento do λ_B através da tensão aplicada na fibra durante o recozimento com 100 % de humidade relativa

Com a finalidade de analisar a variação permanente do λ_B sob outras condições de recozimento e comparar resultados foi realizado um outro teste, onde para além da temperatura e tensão aplicada, também foi controlada a humidade relativa da experiência. A montagem experimental usada neste teste posiciona-se na vertical em relação ao chão, e está esquematizada na Figura 5.2. O espectro em reflexão da POFBG é monitorizado através da utilização do acoplador ótico (50/50) de SM-GOF, da fonte (*Superlum SLD-371-HP1*) e do OSA (*YOKOGAWA AQ6373B*). A POF encontra-se suspensa na vertical, fixa ao estágio de translação, e a POFBG está inserida dentro de um pequeno depósito com água, que está fixo à placa de aquecimento. A água garante que a humidade relativa durante o recozimento é constante (100 %RH neste caso). A tensão é aplicada na POFBG através da introdução de uma massa na sua extremidade, tal como mostra a Figura 5.2.

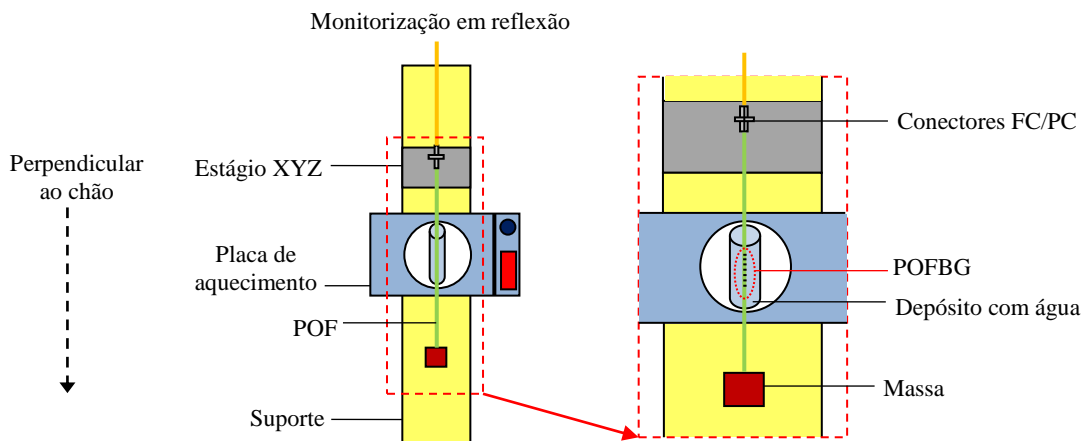


Figura 5.2 – Esquema da montagem experimental do processo de recozimento com 100 %RH, onde a tensão é aplicada por uma massa suspensa na extremidade de POF.

A tensão mecânica longitudinal (em Pa) exercida na fibra pela massa (m) em suspensão é igual à força gravitacional (F) aplicada à área da secção transversal da fibra (A), e é dado pela seguinte equação:

$$\sigma_{mecânica} = \frac{F}{A} = \frac{mg}{\pi r^2}, \quad (5.1)$$

onde g é a aceleração gravitacional da Terra ($g=9.8 \text{ m/s}^2$) e r é o raio da SM-PMMA-mPOF ($r=65 \text{ }\mu\text{m}$). Para efeitos de comparação com o procedimento anterior, é calculada a deformação na POF através da aplicação da tensão mecânica longitudinal. A deformação é obtida através da relação entre a tensão mecânica e o módulo de Young do material, usando a seguinte expressão (lei de Hooke):

$$E = \frac{\sigma_{mecânica}}{\varepsilon} \quad (5.2)$$

No início da experiência a POF encontra-se suspensa na vertical, fixa ao estágio e sem massa na sua extremidade. A parte da POF onde se encontra a FBG, com $\lambda_B=840.3$ nm, está inserida dentro do depósito que inicialmente está vazio. De seguida, o depósito foi devidamente selado e encheu-se com água, onde a POFBG permaneceu durante 30 minutos à temperatura ambiente para absorver completamente a água antes de começar o processo de recozimento. Após a absorção da água, onde o λ_B deixou de variar e fixou-se em 841.5 nm, colocou-se uma massa de 7.80 ± 0.05 g na extremidade da POF, e o λ_B variou para 843.3 nm. A placa de aquecimento foi ajustada para a temperatura de 65 °C, e a temperatura foi subindo gradualmente até a água estar à temperatura desejada (65 °C). Após isso, o sistema permaneceu a essa temperatura e com a mesma massa a induzir $\sigma_{mecânica}$. Quando o λ_B estabilizou, procedeu-se ao aumento da massa, primeiro para 11.20 g, e depois para 14.60 g, com intervalos de alguns minutos para a estabilização das condições. O λ_B foi monitorizado durante todo o processo, e encontra-se exposto na Tabela 5.1. A deformação longitudinal é obtida usando a equação (5.2), e considerando que o valor de E para o PMMA é igual a 3.2 GPa. A sensibilidade da POFBG uniforme em função da tensão mecânica é 0.72 ± 0.07 pm/kPa, quando sujeita simultaneamente à temperatura de 65 °C e humidade relativa de 100%.

Tabela 5.1 – Variação do λ_B da POFBG uniforme durante o processo de recozimento.

Humidade (%RH)	Temperatura (°C)	Massa (g)	Tensão mecânica (MPa)	ϵ (%)	λ_B (nm)
Ambiente (≈ 50)	Ambiente (≈ 22)	-	-	-	840.3
100	Ambiente (≈ 22)	-	-	-	841.5
100	Ambiente (≈ 22)	7.80	5.76	0.18	843.3
100	65	7.80	5.76	0.18	844.6
100	65	11.20	8.27	0.26	846.2
100	65	14.60	10.78	0.34	848.2

Posteriormente, a massa foi retirada e água removida instantaneamente do depósito para arrefecer rapidamente a fibra. A POFBG ficou sujeita às condições ambientais durante 1 hora e 30 minutos, para baixar a sua temperatura e libertar a água absorvida, até o λ_B estabilizar. A Figura 5.3 mostra como o λ_B variou permanente e positivamente de 840.3 nm para 841.5 nm (variação de 1.2 nm) após o recozimento. Esta variação é menor que a registada anteriormente, quando a fibra foi sujeita a diferentes percentagens de deformação, o que pode dever-se ao facto de a massa ter sido retirada antes da fibra arrefecer até à temperatura ambiente. Assim, tecnicamente, a fibra ainda esteve sujeita ao recozimento durante esse período, sem tensão externa, permitindo a variação do λ_B para valores inferiores.

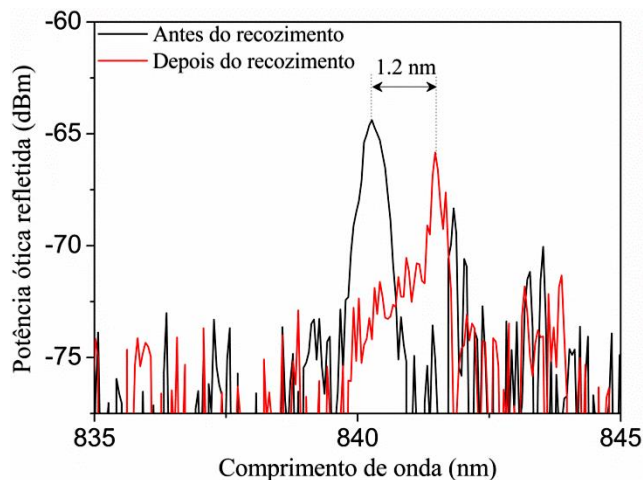


Figura 5.3 – Posicionamento do comprimento de onda de Bragg, antes e depois do processo de recozimento.

CAPÍTULO 6 – Conclusões e trabalho futuro

6.1 – Conclusões

Neste trabalho foram reportados com sucesso novos dispositivos e técnicas em POF para diferentes aplicações na área de sensoriamento. Foram gravadas com sucesso diferentes tipos de redes de Bragg em fibras óticas poliméricas, através do método da máscara de fase, com recurso ao laser KrF de excímeros pulsado de 248 nm. A rede uniforme e a rede com deslocamento de fase, com $\lambda_B \approx 844$ nm, foram gravadas com apenas um pulso de energia 6.3 mJ do laser KrF na SM-PMMA-mPOF, dopada com BDK. A rede aperiódica com $\lambda_B \approx 1581$ nm, foi gravada na SM-PMMA-POF, sem dopante, primeiro através da incidência de 14 pulsos e depois com 26 pulsos, onde pode-se constatar que para 26 pulsos ultrapassou-se o nível de saturação, resultando na diminuição da amplitude do sinal refletido.

No estudo à sensibilidade das POFBGs, realizou-se a caracterização do comportamento das mesmas quando sujeitas a diferentes perturbações externas. Para o caso da PS-POFBG, a caracterização ocorreu através da análise do seu espectro em transmissão para a temperatura, deformação longitudinal, pressão hidrostática e humidade relativa. Para além da caracterização da variação do comprimento de onda, também foram analisados outros parâmetros, entre os quais a variação do espaçamento entre as depressões, e a diferença da potência ótica transmitida entre as depressões e o *notch*, para as diferentes perturbações externas. No caso da deformação longitudinal da fibra, também foi analisada a dispersão dos pontos experimentais em relação à linha de tendência e os resultados foram comparados com os da POFBG uniforme e da CPOFBG, mostrando uma melhor resposta. No caso da humidade relativa, a caracterização ocorreu para as temperaturas 25 e 50 °C. Para esta perturbação, analisou-se a influência de diferentes tratamentos recozimento (com diferentes percentagens de humidade) na sensibilidade e no nível de histerese. A PS-POFBG recozida a 100 %RH apresenta maior sensibilidade à humidade e menor histerese quando comparada com a PS-POFBG recozida a 50 %RH. As sensibilidades da PS-POFBG são -57.0 ± 4.1 pm/°C (temperatura), 0.45 ± 0.03 pm/kPa (pressão hidrostática), 0.76 ± 0.01 pm/ $\mu\epsilon$ (deformação longitudinal), 19.85 ± 2.51 pm/%RH (aumento da humidade a 25 °C) e 19.60 ± 2.11 pm/%RH (diminuição da humidade a 25 °C).

Para o caso da CPOFBG, a caracterização ocorreu através da análise do seu espectro em reflexão para a temperatura e deformação longitudinal. Também foi analisada a variação da FWHM junto com variação do comprimento de onda de Bragg, e no caso da deformação longitudinal da fibra, também foi analisada a dispersão dos pontos experimentais em relação à linha de tendência. As sensibilidades da CPOFBG são -131.1 ± 4.9 pm/°C (temperatura) e 1.77 ± 0.02 pm/ $\mu\epsilon$ (deformação longitudinal).

Por fim, foi analisada a variação permanente do λ_B de POFBGs uniformes para maiores comprimentos de onda através da aplicação de uma força externa durante o processo de recozimento. Controlando os diferentes parâmetros do recozimento e a força aplicada na POFBG, pode-se variar o λ_B para valores desejados, permitindo obter várias redes com diferentes λ_B na mesma POF, gravadas com uma só máscara de fase. O primeiro procedimento baseou-se na caracterização dessa variação em função da deformação longitudinal durante o recozimento. Para uma deformação da POFBG de 1 %, a variação do λ_B foi de 4.7 nm para comprimentos de onda superiores, e para a deformação de 2 % a variação foi de 14.5 nm. No procedimento seguinte, a

fibra encontra-se em suspensão e a tensão é provocada através de uma massa fixa na sua extremidade. Neste caso o recozimento foi realizado com 100 %RH e a variação final do λ_B foi de 1.2 nm.

6.2 – Trabalho futuro

No futuro, certos desenvolvimentos podem ser implementados para melhorar alguns aspetos, nomeadamente na questão da potencialidade da PS-POFBG em termos de sensibilidade. Uma sugestão é o tratamento *etching* da POF, o que pode melhorar os valores de sensibilidade e ao mesmo tempo permite a caracterização da mesma face a outras perturbações externas como a variação do índice de refração. Outra possibilidade é a caracterização da PS-POFBG, sujeita a este tratamento, em questão de sensibilidade simultânea de diferentes perturbações externas.

Também em relação às PS-POFBGs, no futuro pode-se avaliar mais intensivamente a magnitude do *notch* e o seu tamanho espectral em relação ao tamanho da cavidade que é inserida na estrutura.

Em relação às CPOFBG, pode-se testar novas técnicas de gravação, nomeadamente a utilização de uma máscara de fase uniforme (sem coeficiente *chirp*), onde a aperiocidade seria implementada através da aplicação de deformação longitudinal não linear na fibra, e sob diferentes temperaturas de operação. A realização de *tapering* devidamente controlado na POF através do tratamento químico e posterior gravação nessa zona sob as condições retratadas anteriormente pode melhorar este processo.

Em relação à técnica de deslocamento permanente do λ_B da POFBG uniforme para maiores comprimentos de onda, um dos melhoramentos será na fixação de diferentes massas na extremidade da POFBG por longos períodos de tempo (secção 5.2) e o estudo da variação positiva e permanente do λ_B em função da tensão aplicada durante o recozimento com 100 %RH, mantendo a massa fixa na POF durante todo o processo.

6.3 – Publicações resultantes

- I. L. Pereira, A. Pospori, et al, “Phase-shifted Bragg grating inscription in PMMA microstructured POF”, submitted to Optics Express, (26 June 2017).
- II. C. A. F. Marques, L. Pereira, et al, “High-quality phase-shifted Bragg grating sensor inscribed with only one laser pulse in a polymer optical fiber”, Accepted to IMOC 2017, August, Brazil.
- III. L. Pereira, A. Pospori, et al, “Advances in POF Bragg grating sensors for photonic applications”, submitted to IEEE Photonics Conference - 30th Annual Conference of the IEEE Photonics Society, October, Orlando, USA.
- IV. C. A. F. Marques, L. Pereira, et al, “Advances in POF Bragg grating sensors inscription using only one laser pulse for photonic applications”, Accepted to POF Conference 2017, September, Aveiro, Portugal.

CAPÍTULO 7 – Referências

- [1] Y. Koike and K. Koike, *Encyclopedia Of Polymer Science and Technology*. 2011.
- [2] M. Large, G. W. Barton, L. Poladian, and M. A. van Eijkelenborg, *Microstructured polymer optical fibre*. 2008.
- [3] D. Werner, J. Krauser, P. E. Zamzow, and O. Ziemann, *POF - Polymer Optical Fibers for Data Communication*. 2002.
- [4] C. A. F. Marques, L. B. Bilro, N. J. Alberto, D. J. Webb, and R. N. Nogueira, “Narrow bandwidth Bragg gratings imprinted in polymer optical fibers for different spectral windows,” *Opt. Commun.*, vol. 307, pp. 57–61, 2013.
- [5] W. Ziemann, O.; Krauser, J.; Zamzow, P.E. and Daum, *POF Handbook*, 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [6] G. Rajan and G. Peng, “Fabrication and Characterization of a Polymer Micro-Fiber Bragg Grating,” in *SPIE 8924, Fourth Asia Pacific Optical Sensors Conference*, 2013.
- [7] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, “Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, no. 10, pp. 647–649, 1978.
- [8] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, “Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method,” *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 15, pp. 823–825, 1989.
- [9] G. D. Peng, Z. Xiong, and P. L. Chu, “Photosensitivity and Gratings in Dye-Doped Polymer Optical Fibers,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 242–251, 1999.
- [10] K. Peters, “Polymer optical fiber sensors—a review,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 1, pp. 1–17, 2011.
- [11] G. Emiliyanov, P. E. Høiby, L. H. Pedersen, and O. Bang, “Selective Serial Multi-Antibody Biosensing with TOPAS Microstructured Polymer Optical Fibers,” *Sensors*, vol. 13, pp. 3242–3251, 2013.
- [12] D. J. Webb, “Fibre Bragg grating sensors in polymer optical fibres,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 9, pp. 1–11, 2015.
- [13] I. P. Johnson, D. J. Webb, and K. Kalli, “Hydrostatic pressure sensing using a polymer optical fibre Bragg gratings,” in *SPIE 8351, Third Asia Pacific Optical Sensors Conference*, 2012.
- [14] M. Rosenberger, N. Hartlaub, G. Koller, S. Belle, B. Schmauss, and R. Hellmann, “Polymer planar Bragg grating for sensing applications,” in *SPIE 8774, Optical Sensors*, 2013.
- [15] Q. Wu and Y. Okabe, “High-sensitivity ultrasonic phase-shifted fiber Bragg grating balanced sensing system,” *Opt. Express*, vol. 20, no. 27, pp. 28353–28362, 2012.
- [16] J. Yajun, Y. Yuan, J. Xu, D. Li, and D. Yang, “Simultaneous measurement of temperature and strain using phase-shifted fiber Bragg grating,” *Photonics Technol. Lett.*, 2015.
- [17] Y. Liu, S. B. Lee, and S. S. Choi, “Phase-Shifted Fiber Bragg Grating Transmission Filters Based on the Fabry-Perot Effect,” *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 2, no. 1, pp. 30–33, 1998.
- [18] G. Statkiewicz-Barabach, P. Mergo, and W. Urbanczyk, “Bragg grating-based Fabry – Perot interferometer fabricated in a polymer fiber for sensing with improved resolution,” *J. Opt.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–9, 2017.
- [19] W.-C. Du, X.-M. Tao, and H.-Y. Tam, “Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 11, no. 1, pp. 105–107, 1999.
- [20] I. Yulianti, A. S. M. Supa’At, S. M. Idrus, and M. R. S. Anwar, “Design of fiber Bragg grating-based Fabry-Perot sensor for simultaneous measurement of humidity and temperature,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 124, no. 19, pp. 3919–3923, 2013.
- [21] A. Sun and Z. Wu, “A hybrid LPG/CFBG for highly sensitive refractive index measurements,” *Sensors*, vol. 12, no. 6, pp. 7318–7325, 2012.
- [22] D. Tosi, E. G. Macchi, M. Gallati, G. Braschi, A. Cigada, S. Rossi, G. Leen, and E. Lewis, “Fiber-optic chirped FBG for distributed thermal monitoring of ex-vivo radiofrequency ablation of liver,” *Biomed. Opt. Express*, vol. 5, no. 6, pp. 1799–1811, 2014.
- [23] W. Liu, S. Member, W. Li, S. Member, J. Yao, and S. Member, “Real-Time Interrogation of a

- Linearly Chirped Fiber Bragg Grating Sensor for Simultaneous Measurement of Strain and Temperature,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 23, no. 18, pp. 1340–1342, 2011.
- [24] J. Zubia and J. Arrue, “Plastic Optical Fibers: An Introduction to Their Technological Processes and Applications,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 101–140, 2001.
- [25] A. Fasano, G. Woyessa, P. Stajanca, C. Markos, K. Nielsen, H. K. Rasmussen, K. Krebber, and O. Bang, “Fabrication and characterization of polycarbonate microstructured polymer optical fibers for high-temperature-resistant fiber Bragg grating strain sensors,” *Opt. Mater. Express*, vol. 6, no. 2, pp. 649–656, 2016.
- [26] A. Argyros, “Microstructures in Polymer Fibres for Optical Fibres , THz Waveguides , and Fibre-Based Metamaterials,” *ISRN Opt.*, vol. 2013, no. 785162, pp. 1–22, 2013.
- [27] C.-A. Bunge, T. Gries, and M. Beckers, *Polymer Optical Fibres: Fibre Types, Materials, Fabrication, Characterisation and Applications*. 2016.
- [28] J. Ballato, S. H. Foulger, and D. W. Smith, “Optical properties of perfluorocyclobutyl polymers. II. Theoretical and experimental attenuation,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 21, no. 5, pp. 2–4, 2004.
- [29] TOPAS Advanced Polymers, “TOPAS® Cyclic Olefin Copolymer (COC) Brochure,” 2011. [Online]. Available: <http://www.topas.com/products/topas-coc-polymers>. [Accessed: 06-Apr-2017].
- [30] G. Woyessa, A. Fasano, C. Markos, A. Stefani, H. K. Rasmussen, and O. Bang, “Zeonex microstructured polymer optical fiber : fabrication friendly fibers for high temperature and humidity insensitive Bragg grating sensing,” *Opt. Mater. Express*, vol. 7, no. 1, pp. 286–295, 2017.
- [31] C. Leitão, P. Antunes, J. L. Pinto, J. M. Bastos, and P. André, “Carotid distension waves acquired with a fiber sensor as an alternative to tonometry for central arterial systolic pressure assessment in young subjects,” *Measurement*, vol. 95, pp. 45–49, 2017.
- [32] H. U. Hassan, J. Janting, S. Aasmul, and O. Bang, “Polymer Optical Fiber Compound Parabolic Concentrator Fiber Tip-Based Glucose Sensor : In Vitro Testing,” *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 23, pp. 8483–8488, 2016.
- [33] E. Mesquita, T. Paixão, P. Antunes, F. Coelho, P. Ferreira, P. André, and H. Varum, “Groundwater level monitoring using a plastic optical fiber,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 240, pp. 138–144, 2016.
- [34] T. Erdogan, “Fiber Grating Spectra,” *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1277–1294, 1997.
- [35] G. Woyessa, A. Fasano, A. Stefani, C. Markos, H. K. Rasmussen, and O. Bang, “Single mode step-index polymer optical fiber for humidity insensitive high temperature fiber Bragg grating sensors,” *Opt. Express*, vol. 24, no. 2, pp. 3296–3298, 2016.
- [36] H. B. Liu, H. Y. Liu, G. D. Peng, and P. L. Chu, “Strain and temperature sensor using a combination of polymer and silica fibre Bragg gratings,” *Opt. Commun.*, vol. 219, no. 1–6, pp. 139–142, 2003.
- [37] G. P. Agrawal and S. Radic, “Phase-Shifted Fiber Bragg Gratings and their Application for Wavelength Demultiplexing,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 6, no. 8, pp. 995–997, 1994.
- [38] H. Dobb, K. Carroll, D. J. Webb, K. Kalli, M. Komodromos, C. Themistos, and G. D. Peng, “Grating based devices in polymer optical fibre,” in *SPIE 6189, The International Society for Optical Engineering*, 2006.
- [39] S. Zackrisson and J. Hanna, “Light-controlling Tunable FBG Filters,” 2014.
- [40] W. J. Tomlinson, I. P. Kaminow, E. A. Chandross, R. L. Fork, and W. T. Silfvast, “Photoinduced refractive index increase in poly(methylmethacrylate) and its applications,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 16, no. 12, pp. 486–489, 1970.
- [41] M. J. Bowden, “Mechanism of the Photoinduced Refractive Index Increase in Polymethyl Methacrylate,” *Appl. Opt.*, vol. 13, no. 1, pp. 112–117, 1974.
- [42] P. Chemie, U. Osnabriick, and U. Osnabriick, “Light-induced Refractive Index Changes in Polymethylmethacrylate (PMMA) blocks,” *Polym. Photochem.*, vol. 5, no. 1–6, pp. 109–119, 1984.
- [43] Y. Luo, Q. Zhang, H. Liu, and G. Peng, “Gratings fabrication in benzildimethylketal doped photosensitive polymer optical fibers using 355 nm nanosecond pulsed laser,” *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 5, pp. 751–753, 2010.
- [44] I.-L. Bundalo, K. Nielsen, C. Markos, and O. Bang, “Bragg grating writing in PMMA microstructured polymer optical fibers in less than 7 minutes,” *Opt. Express*, vol. 22, no. 5, pp. 5270–5276, 2014.
- [45] C. Wochnowski, M. A. S. Eldin, and S. Metev, “UV-laser-assisted degradation of poly (methyl methacrylate),” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 89, no. 2, pp. 252–264, 2005.
- [46] K. Nielsen, O. Bang, and D. J. Webb, “Photosensitivity mechanism of undoped poly (methyl methacrylate) under UV radiation at 325 nm and its spatial resolution limit,” *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 12, pp. 3421–3424, 2014.

- [47] P. J. Scully, D. Jones, and D. A. Jaroszynski, "Femtosecond laser irradiation of polymethylmethacrylate for refractive index gratings," *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 5, pp. S92–S96, 2003.
- [48] S. J. Mihailov, D. Grobncic, C. W. Smelser, P. Lu, B. Robert, and H. Ding, "Bragg grating inscription in various optical fibers with femtosecond infrared lasers and a phase mask," *Opt. Mater. Express*, vol. 1, no. 4, pp. 754–765, 2011.
- [49] A. Pospori, C. A. F. Marques, O. Bang, and D. J. Webb, "Polymer optical fiber Bragg grating inscription with a single UV laser pulse," *Opt. Express*, vol. 25, no. 8, pp. 9028–9038, 2017.
- [50] A. Pospori, C. A. F. Marques, D. Sáez-rodríguez, K. Nielsen, O. Bang, and D. J. Webb, "Thermal and chemical treatment of polymer optical fiber Bragg grating sensors for enhanced mechanical sensitivity," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 36, pp. 68–74, 2017.
- [51] A. Pospori, C. A. F. Marques, M. G. Zubel, D. Sáez-Rodríguez, K. Nielsen, O. Bang, and D. J. Webb, "Annealing effects on strain and stress sensitivity of polymer optical fibre based sensors," in *SPIE 9886, Micro-Structured and Specialty Optical Fibres IV*, 2016.
- [52] IndustrialFiberOpticsInc., "Fiber Optic Connectors - Plastic Optical Fiber." [Online]. Available: fiberoptics.com/connectors.php?cat=pof. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [53] A. Abang and D. J. Webb, "Demountable connection for polymer optical fiber grating sensors," *Opt. Eng.*, vol. 51, no. 8, pp. 1–3, 2012.
- [54] THORLABS, "Thorlabs.com - Fiber Polishing Supplies." [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1350. [Accessed: 11-May-2017].
- [55] K. Zhou, M. Dubov, C. Mou, L. Zhang, V. Mezentsev, and I. Bennion, "Line-by-line fiber Bragg grating made by femtosecond laser," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 22, no. 16, pp. 1190–1192, 2010.
- [56] S. Sowa, W. Watanabe, and T. Tamaki, "Symmetric waveguides in poly (methyl methacrylate) fabricated by femtosecond laser pulses," *Opt. Express*, vol. 14, no. 1, pp. 1000–1002, 2006.
- [57] S. J. Mihailov, D. Grobncic, and C. W. Smelser, "Efficient grating writing through fibre coating with femtosecond IR radiation and phase mask," *Electron. Lett.*, vol. 43, no. 8, pp. 442–443, 2007.
- [58] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, Second Edi. San Diego: USA: Academic Press, 1999.
- [59] C. Marques, "Componentes em Fibra Ótica para Comunicações Óticas e Sensores," Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro, 2013.
- [60] S. Legoubin, M. Douay, P. Bernage, and P. Niay, "Free spectral range variations of grating-based Fabry – Perot filters photowritten in optical fibers," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 12, no. 8, pp. 1687–1694, 1995.
- [61] K. Bhowmik, G. Peng, Y. Luo, E. Ambikairajah, V. Lovric, W. R. Walsh, and G. Rajan, "Experimental Study and Analysis of Hydrostatic Pressure Sensitivity of Polymer Fibre Bragg Gratings," *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 12, pp. 2456–2462, 2015.
- [62] F. Bosia, P. Giaccari, J. Botsis, M. Facchini, H. G. Limberger, and R. P. Salathé, "Characterization of the response of fibre Bragg grating sensors subjected to a two-dimensional strain field," *Smart Mater. Struct.*, vol. 12, no. 6, pp. 925–934, 2003.
- [63] H. Y. Liu, H. B. Liu, and G. D. Peng, "Tensile strain characterization of polymer optical fibre Bragg gratings," *Opt. Commun.*, vol. 251, no. 1–3, pp. 37–43, 2005.
- [64] A. Stefani, W. Yuan, C. Markos, and O. Bang, "Narrow Bandwidth 850-nm Fiber Bragg Gratings in Few-Mode Polymer Optical Fibers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 23, no. 10, pp. 660–662, 2011.
- [65] W. Zhang and D. J. Webb, "Humidity responsivity of poly (methyl methacrylate) - based optical fiber Bragg grating sensors," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 10, pp. 3026–3029, 2014.
- [66] G. Woyessa, K. Nielsen, A. Stefani, and C. Markos, "Temperature insensitive hysteresis free highly sensitive polymer optical fiber Bragg grating humidity sensor," *Opt. Express*, vol. 24, no. 2, pp. 1206–1213, 2016.
- [67] C. Zhang, W. Zhang, D. J. Webb, and G. Peng, "Optical fibre temperature and humidity sensor," *Electron. Lett.* 29th, vol. 46, no. 9, pp. 35–36, 2010.
- [68] G. Sagias, A. Pospori, D. J. Webb, and H. Lamela Rivera, "Wavelength tuning of polymer optical fibre Bragg grating at longer wavelengths permanently," in *III International Conference on Applications of Optics and Photonics*, 2017.