



Tiago de Brito
Paixão

Estabilidade térmica de redes de Bragg fabricadas
por laser femtosegundo



Tiago de Brito
Paixão

Estabilidade térmica de redes de Bragg fabricadas por laser femtosegundo

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 Paulo Fernando da Costa Antunes, Investigador de Pós-Doutoramento do Instituto de Telecomunicações e do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, e do Doutor Francisco Manuel Moita Araújo, Head of R&D Optical Solutions da HBM FiberSensing, S.A.

Trabalho com o apoio logístico da
empresa HBM FiberSensing S.A.



I hear and I forget. I see and I remember. I do and I understand.

- Confucius -

Dedico este trabalho à minha mãe.

o júri

presidente

Doutora Teresa Maria Fernandes Rodrigues Cabral Monteiro
Professora Associada com Agregação do Departamento de Física, Universidade de Aveiro

Doutor Manuel Joaquim Bastos Marques
Professor Auxiliar do Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da
Universidade do Porto

Doutor Francisco Manuel Moita Araújo
Head of R&D Optical Solutions da HBM FiberSensing, S.A.

agradecimentos

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação contou com a ajuda de diversas pessoas e entidades, aos quais pretendo expressar o meu sincero agradecimento.

Começo por agradecer aos meus orientadores Doutor Paulo Antunes e Doutor Francisco Araújo por todo o acompanhamento, orientação científica, confiança e conhecimentos transmitidos.

Ao Departamento de Física da Universidade de Aveiro e à HBM FiberSensing S.A. pelas condições prestadas e materiais cedidos que possibilitaram a realização deste trabalho.

Ao Nuno Costa e Luís Costa pela produção das sondas de temperatura, bem como ao Filipe Magalhães e Rúben Neto pelo precioso auxílio no desenvolvimento da aplicação de aquisição de dados.

A todo o grupo de Ótica e Optoelectrónica do Departamento de Física da Universidade de Aveiro pela paciência e ajuda nas diferentes etapas do meu percurso académico.

Agradeço ainda ao Doutor Nuno Ferreira pelo auxílio na programação e agilização dos fornos utilizados no Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

A todos os meus colegas de curso e Departamento, pelo companheirismo e horas de sono perdidas em conjunto.

À minha Tia Mimi, por ter investido e confiado em mim ao longo do meu percurso académico.

Direciono um agradecimento muito especial à Rita, por me acompanhar nesta caminhada pessoal e profissional sempre com um sorriso.

Ao meu pai, por me ter mostrado como vale a pena ser lutador e resiliente.

À minha irmã Catarina, por me ter tornado responsável, orgulhoso e por toda a alegria transmitida.

E, por último, gostaria de agradecer à minha mãe. Obrigado por tudo o que me transmitiste: força, amor, proteção e segurança. Continuas a ser o pilar da minha vida.

palavras-chave

Redes de Bragg, fibra ótica, estabilidade térmica, refletividade, comprimento de onda.

resumo

No presente trabalho é descrito e apresentado o estudo da estabilidade térmica de redes de Bragg em fibra ótica de sílica, fabricadas por um laser de femtosegundo.

O plano de trabalhos começou por uma pesquisa bibliográfica relacionada com as diferentes técnicas de gravação de redes de Bragg em fibras óticas e o estado de arte em estudos de estabilidade térmica das mesmas redes.

Foram desenvolvidos e produzidos (em ambiente empresarial) um total de 8 sondas de temperatura cujo princípio de funcionamento baseia-se no comportamento típico de redes de Bragg em fibra ótica, quando submetidas a variações de temperatura. Estas sondas foram posteriormente calibradas termicamente.

Implementaram-se dois regimes de testes a dois conjuntos de 4 sondas: um regime isotérmico e outro isócrono. Ambos foram desenvolvidos tanto no Departamento de Física da Universidade de Aveiro como nas instalações da HBM FiberSensing, S.A., no Porto.

Os resultados obtidos relativos à variação do comprimento de onda de Bragg e refletividade do pico máximo de cada sonda em função do tempo e da temperatura permitiram aplicar um modelo teórico e concluir quanto à estabilidade térmica das redes de Bragg.

keywords

Bragg gratings, optical fibers, thermal stability, reflectivity, wavelength.

abstract

In this thesis is presented a study of the thermal stability of Bragg gratings in optical silica fiber fabricated by a femtosecond laser.

The work plan began with a literature review related to the different Bragg gratings recording techniques in optical fiber and the state of the art of thermal stability studies.

A total of eight temperature sensors were developed and produced, whose operating principle is based on typical behaviour of Bragg gratings when submitted to temperature variations. These probes were thereafter thermally calibrated.

Two types of tests were implemented for two different sets of four probes each: an isothermal and an isochronous regime. Both tests were developed in the Department of Physics at the University of Aveiro and at HBM FiberSensing, SA in Porto.

A theoretical model was applied to the results relating to the variation of Bragg wavelength and to the reflectivity peak of each probe (as a function of time and temperature). With the application of this method it was possible to conclude about the thermal stability of the Bragg gratings.

LISTA DE SÍMBOLOS E CONSTANTES

α	Ângulo de incidência do feixe na fibra
α_{Λ}	Coefficiente de expansão térmica
α_n	Coefficiente termo-ótico
ΔE	Largura da distribuição de energia
$\Delta\lambda_{\text{Bragg}}$	Varição do comprimento de onda de Bragg
Δn	Amplitude de modulação do índice de refração
δn	Varição do índice de refração
$\overline{\delta n_{\text{eff}}}$	Varição do valor médio do índice de refração
ΔP	Perturbação mecânica
ΔT	Varição da temperatura
ε_z	Elongação relativa segundo o eixo z
η	Fator de confinamento
λ	Comprimento de onda
λ_{Bragg}	Comprimento de onda de Bragg
λ_{UV}	Comprimento de onda de um feixe laser UV
Λ	Período da perturbação induzida no índice de refração
θ_i	Ângulo da onda incidente
θ_m	Ângulo da onda difratada
E_d	Energia de demarcação
E_c	Energia central
n	Índice de refração
n_{ar}	Índice de refração do ar
n_{eff}	Índice de refração efetivo
n_i	Índice de refração do meio da onda incidente
n_m	Índice de refração do meio da onda refratada
n_{silica}	Índice de refração da sílica
p_e	Constante fotoelástica efetiva
P_{MF}	Profundidade das depressões de uma máscara de fase
p_{11}, p_{12}	Componentes do tensor fotoelástico
R_F	Coefficiente de reflexão (Fresnel)
S_{DL}	Sensibilidade à deformação longitudinal

S_T	Sensibilidade à temperatura
t_p	Tempo de pré-aquecimento
T_p	Temperatura de pré-aquecimento
t_{uso}	Tempo de funcionamento
T_{uso}	Temperatura de funcionamento

GLOSSÁRIO DE ACRÓNIMOS

CW	Continuous wave	Onda contínua
FBG	Fiber Bragg Grating	Rede de Bragg em fibra ótica
ICC	Integrated coupling constant	Constante de acoplamento integrada
OSA	Optical spectrum analyser	Analisador de espectros óticos
SMSR	Side Mode Suppression Ratio	Razão de amplitude dos lóbulos laterais em relação ao pico principal
UV	Ultraviolet	Ultravioleta
IV	Infrared	Infravermelho

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Refletividade de uma FBG em função do tempo de exposição, a diferentes temperaturas (adaptado de [7]).....	3
Figura 1.2 - Comprimento de onda de Bragg (nm) em função da temperatura submetida (°C). A linha sólida representa o primeiro ciclo de retorno à temperatura ambiente, enquanto os pontos representam o segundo ciclo. (Adaptado de [6]).....	4
Figura 1.3 – Constante integrada de acoplamento normalizada (NICC) em função da energia de demarcação (E_d) [8].....	5
Figura 1.4 - Refletividade (dB) em função do comprimento de onda ressonante (nm), para uma FBG submetida a 25 °C (dados a azul) e a 1000 °C (dados a vermelho). (Adaptado de [9]).	5
Figura 2.5 – Representação esquemática de uma rede de Bragg em fibra ótica e respetiva variação do índice de refração, onde: δn_{eff} representa a variação do valor médio do índice de refração efetivo e Λ o período da perturbação induzida no índice de refração.	9
Figura 2.6 - Representação esquemática das reflexões de Fresnel presentes em cada transição de índice numa rede de Bragg. As setas a tracejado simbolizam a radiação transmitida e as setas a cheio a radiação refletida.....	10
Figura 2.7 - Esquema da difração de uma onda eletromagnética por uma rede de difração. As constantes θ_i e θ_m são os ângulos das ondas incidente e difratada, respetivamente, e m a ordem de difração.....	11
Figura 2.8 - Esquema do processo de gravação com máscara de fase de uma rede de Bragg em fibra ótica.	13
Figura 2.9 - Esquema da gravação de redes de Bragg em fibra ótica com um interferómetro por divisão de amplitude	14
Figura 2.10 - Representação esquemática da gravação de redes de Bragg em fibra ótica com um interferómetro baseado numa máscara de fase.....	14
Figura 2.11 - Representação esquemática da gravação de redes de Bragg em fibra ótica pelo método de ponto a ponto, onde Δx representa o deslocamento longitudinal aplicado à fibra ótica.	15
Figura 2.12 - Representação esquemática dos processos não lineares de absorção de múltiplos fótons (esquema superior) e de ionização por avalanche (esquema inferior). Os pontos azuis representam eletrões e os pontos vermelhos os núcleos dos respetivos átomos.	16
Figura 2.13 - Representação esquemática da remoção de material por um laser CW (à esquerda), um laser de nanosegundo (ao centro) e um laser de femtosegundo (à direita). As setas a azul representam o material removido e as zonas a preto o material afetado por condução térmica.....	17
Figura 2.14 – Fotografias de orifícios e guias de ondas produzidas usando um laser de nanosegundo UV (à esquerda) e um laser de femtosegundo (à direita). Adaptado de [34].	17
Figura 3.15 – Representação esquemática do processo físico onde os eletrões excitados pelo feixe laser são localizados numa distribuição contínua de estados de energia (a). Após o tratamento térmico, os eletrões são excitados para um determinado nível, através de uma energia de demarcação denominada E_d (b).	21
Figura 4.16 – Máquinas de clivagem (à esquerda) e fusão (à direita) de fibras óticas (SUMIMOTO ELECTRIC, modelos FC-6RS e TYPE-71C, respetivamente).	26
Figura 4.17 – Fotografia legendada da posição da rede de Bragg no interior do tubo metálico.	26
Figura 4.18 - Secção de $30,00 \pm 0,05$ cm de revestimento introduzida no tubo metálico.....	27
Figura 4.19 - Unidade FS42 Portable da HBM FiberSensing, S.A. usada na produção das sondas de temperatura.	27

Figura 4.20 - Unidade de aquisição utilizada, modelo FS22 SI da HBM FiberSensing, S.A..	28
Figura 4.21 - Ambiente gráfico da aplicação desenvolvida no programa Labview® (versão 2012) para aquisição de espectros, refletividade e comprimento de onda ressonante das redes de Bragg.	29
Figura 5.22 - Imagens do calibrador térmico e dos fornos utilizados: (a) o calibrador térmico SIKA, modelo TP 17 200; (b) o forno Barracha, modelo cerâmico e elétrico; (c) o forno Termolab, modelo MLR 1800 °C	30
Figura 5.23 - Esquemas das montagens utilizadas no teste de ciclos isotérmicos. "A" representa a montagem utilizada para efetuar os registos à temperatura de referência (50 °C) e "B" a montagem utilizada para submeter as sondas a temperaturas elevadas. As linhas a azul que ligam a unidade FS22 SI aos fornos representam as fibras óticas das sondas. Os valores de temperatura e tempo indicados na figura são meramente representativos do tipo de procedimento adotado em cada máquina.	31
Figura 5.24 – Regime de subida e descida de temperatura adotado para o ensaio isócrono. As letras “a”, “b” e “c” representam os 3 estágios do processo térmico descrito anteriormente: III-a), III-b) e III-c).	33
Figura 5.25 – Os dados dos gráficos (a) e (b) representam a variação dos comprimentos de onda de Bragg das sondas “A” e “B”, respetivamente, em função da temperatura submetida, em graus Celsius. Os diferentes pontos possuem cores diferentes que correspondem à sonda utilizada, como indicado nas legendas dos gráficos. As linhas a tracejado representam as curvas de melhor ajuste aos dados.	33
Figura 5.26 – Potência ótica em função do comprimento de onda. A linha azul representa os dados adquiridos a 50 °C sem tratamento térmico, enquanto a linha a verde representa os dados adquiridos a 50 °C após um recozimento a 800 °C.	34
Figura 5.27 - Variação do comprimento de onda de Bragg, de cada sonda, a uma temperatura de 50 °C, após submetidas a um tratamento térmico às temperaturas descritas no eixo das abcissas.	35
Figura 5.28 – No gráfico (a) estão representados os dados referentes à variação do comprimento de onda de Bragg das sondas B3 e B4, enquanto no gráfico (b) encontram-se representados os dados relativos à potência máxima de pico refletida, das mesmas sondas, para um tratamento a 800 °C por 19 horas.	36
Figura 5.29 – Comprimento de onda de Bragg das 4 redes utilizadas (linhas contínuas) no regime isócrono (linha pontuada), em função do tempo decorrido.	37
Figura 5.30 – Refletividade das sondas B1, B2 e B4. As linhas verticais a tracejado indicam os diferentes regimes impostos: subida de temperatura em 48 horas (à esquerda), 800 °C por 24 horas (ao centro) e descida da temperatura em patamares de 100 °C (à direita), 2,5 horas em cada um...	37
Figura 6.31 – Representação esquemática de δn e Δn , com a escala horizontal dependente da temperatura (T) e tempo (t). A constante n_{ref} simboliza o valor de índice de refração do núcleo antes de sofrer as variações δn e Δn .	39
Figura 6.32 – Dados da variação normalizada do índice de refração em função do tempo decorrido. Em (a) estão apresentados os dados referentes ao ensaio por ciclos isotérmicos e em (b) os dados referentes ao ensaio isócrono.	40
Figura 6.33 – Dados relativos à variação do índice de refração normalizada em função da energia de demarcação. Em (a) apresentam-se os dados referentes ao ensaio por ciclos térmicos e em (b) os dados referentes ao ensaio isócrono.	41
Figura 6.34 – Variação normalizada do índice de refração em função da energia de demarcação E_d . Em (a) estão representados os dados do ensaio por ciclos isotérmicos e em (b) os dados do ensaio isócrono.	42
Figura 6.35 – Distribuição de energia de defeitos das FBGs em função da energia de demarcação. Em (a) estão representados os dados referentes ao ensaio por ciclos isotérmicos e em (b) os dados referentes aos ensaio isócrono.	43

Figura 6.36 – Tempo de pré-aquecimento em função da temperatura de pré-aquecimento, para um decaimento equivalente a 25 °C em 1, 10, 100 e 1000 anos. Para esta simulação consideraram-se FBGs com as mesmas características das FBGs do tipo A utilizadas neste trabalho.....	44
Figura 6.37 – Tempo de pré-aquecimento em função da temperatura de pré-aquecimento, para um decaimento equivalente a 500 °C em 1, 10, 100 e 1000 anos. Para esta simulação consideraram-se FBGs com as mesmas características das FBGs do tipo A utilizadas neste trabalho.....	45
Figura 6.38 – Simulação do decaimento da variação de índice de refração normalisada ao primeiro valor para diferentes temperaturas. O eixo das abcissas encontra-se em escala logaritmica.	46

Índice de Conteúdos

LISTA DE SÍMBOLOS E CONSTANTES	i
GLOSSÁRIO DE ACRÓNIMOS	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ESTADO DE ARTE	1
1.2. ENQUADRAMENTO, MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	6
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	7
2. REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA	9
2.1. INTRODUÇÃO	9
2.2. REFLEXÃO DE FRESNEL	10
2.3. REDES DE DIFRAÇÃO	11
2.4. GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA	12
2.4.1. GRAVAÇÃO POR MÁSCARA DE FASE	12
2.4.2. GRAVAÇÃO COM INTERFERÓMETRO	13
2.4.3. GRAVAÇÃO PONTO A PONTO	15
2.4.1. LASER DE FEMTOSEGUNDO	15
2.5. SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG A PERTURBAÇÕES EXTERNAS	18
3. ESTABILIDADE TÉRMICA	20
3.1. INTRODUÇÃO	20
3.2. MODELO TEÓRICO	20
4. PRODUÇÃO DAS SONDAS E APLICAÇÃO DE AQUISIÇÃO	24
4.1. INTRODUÇÃO	24
4.2. PRODUÇÃO DAS SONDAS DE TEMPERATURA	24
4.2.1. REDES DE BRAGG	24
4.2.2. SONDAS	25
4.3. APLICAÇÃO DE AQUISIÇÃO	28
5. ENSAIOS TÉRMICOS	30
5.1. INTRODUÇÃO	30
5.1.1. CICLOS ISOTÉRMICOS	30
5.1.2. REGIME ISÓCRONO	32

5.2.	CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA	33
5.3.	RESPOSTA A CICLOS ISOTÉRMICOS	34
5.4.	RESPOSTA A REGIME ISÓCRONO	36
6.	ESTABILIDADE TÉRMICA: APLICAÇÃO DO MODELO AOS DADOS	39
6.1.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	39
6.2.	PREVISÃO DO DECAIMENTO A LONGO PRAZO	43
7.	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	47
7.1.	CONCLUSÕES	47
7.2.	TRABALHO FUTURO	48
7.3.	PREVISÃO DE PUBLICAÇÕES RESULTANTES	48
8.	REFERÊNCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório, é feita uma breve apresentação de diversos estudos efetuados na área da estabilidade térmica de redes de Bragg em fibra ótica (FBG^a, do inglês *Fiber Bragg Grating*). Posteriormente, são apresentados o enquadramento, a motivação, os objetivos deste trabalho e, por fim, a estrutura deste documento.

1.1. ESTADO DE ARTE

O estudo sobre redes de difração em fibras óticas iniciou-se no final da década de 70 com o trabalho desenvolvido por Hill e o seu grupo de trabalho, sobre as propriedades não lineares em fibras óticas de sílica dopadas com germânio [1]. Neste estudo introduziu-se um padrão de interferência dentro do núcleo de uma fibra ótica, resultando numa modulação periódica do índice de refração do núcleo e no registo de uma reflexão parcial da radiação propagante introduzida na fibra ótica. Mais tarde, veio a demonstrar-se que é possível fabricar redes de difração em fibra ótica de uma forma robusta, usando o fenómeno de absorção de fótons e gravando-as através da iluminação do núcleo da fibra ótica com uma máscara de fase [2].

Quando se deu a grande “explosão” da implementação das redes de telecomunicações, em meados dos anos 90, as redes de Bragg inscritas por laser UV (ultravioleta) foram usadas como um mecanismo ótico de seleção de comprimentos de onda (λ), possibilitando assim a multiplexagem e a demultiplexagem de sinais. Contudo, devido ao elevado custo de produção das redes, esta opção tornou-se economicamente inviável e optou-se pela instalação de filtros baseados em filmes finos, nos sistemas de telecomunicações [3]. Assim, nesta época a aplicabilidade das FBGs centrou-se, principalmente, em sensores de parâmetros físicos e como parte integrante de sistemas laser.

Nos últimos anos, a tecnologia de suporte às FBGs evoluiu bastante e hoje em dia estas redes são massivamente usadas nas mais diversas aplicações. Como tal, passou a ser uma opção economicamente viável para o seu uso nas redes de telecomunicações e como sensores. Como tal, é do maior interesse da indústria efetuar testes de tempo de vida, estabilidades térmica e mecânica [4]. Em 1994, Erdogan e o seu grupo de investigação reportaram pela primeira vez um estudo da estabilidade térmica de FBGs, tendo vindo a desenvolver um modelo teórico capaz de descrever o comportamento dos resultados obtidos [5]. As redes inscritas por um laser UV em fibra ótica de sílica dopada com germânio, possuíam um decaimento do índice de refração do núcleo induzido

^a Sendo FBG o acrónimo inglês para *Fiber Bragg Grating*, decidiu-se usá-lo por ser reconhecido e frequentemente referido nesta área científica.

termicamente, bem caracterizado por uma função de potência no tempo, com uma exponencial. Tal resultado era consistente com um decaimento inicial rápido, seguido por um decréscimo substancial da taxa de decaimento. Erdogan propôs um mecanismo que vai de encontro a uma função de potência, onde as cargas excitadas na gravação das redes são “presas” em estados de energia bem definidos, e a taxa de despovoamento térmico é uma função de ativação. A mais importante consequência desta teoria é que o decaimento da variação do índice de refração induzido nas FBGs pode ser acelerado pelo aumento da temperatura. De modo a verificar tal previsão, realizaram-se experiências cujos resultados demonstraram que, submetendo as FBGs a um tratamento térmico prévio, é possível eliminar a porção da variação do índice de refração que iria decair ao longo do tempo de vida da rede. Assim, a variação do índice da rede que resta será apenas a parte estável, que não decai com o tempo. Com estas experiências, foi possível desenvolver um modelo teórico e uma consequente equação, que relaciona dois tempos de tratamento térmico com as respectivas temperaturas associadas. Tal permitiu estimar quanto tempo t_2 será necessário colocar uma FBG, a uma temperatura T_2 , para obter o equivalente decaimento da variação do índice de refração que se registaria se colocada a uma temperatura T_1 , por um período t_1 [5].

Nos anos seguintes, foram efetuados inúmeros estudos sobre a estabilidade térmica de FBGs gravadas por lasers UV e constatou-se que, apesar da sua fácil gravação, versatilidade e vantagens relativamente a aplicações eletrónicas, possuíam uma fraca estabilidade térmica para temperaturas elevadas (>800 °C) [6]. Assim sendo, começou-se então a abordar outros tipos de gravação de redes, tendo-se verificado que usando um laser femtosegundo com radiação infravermelha (IV) obtêm-se melhores resultados de estabilidade térmica. Em 2005, Martínéz e a sua equipa de investigadores realizaram um estudo sobre as propriedades térmicas de FBGs inscritas em fibras óticas de sílica convencionais, pelo método de ponto a ponto e fazendo uso de um laser de femtosegundo com radiação infravermelha [7]. A resposta das FBGs a um tratamento térmico, efetuado na gama de temperaturas entre 500 °C e 1050 °C, foi pela primeira vez reportado, baseando-se apenas na resposta da refletividade (percentagem da potência refletida) em função do tempo e temperatura. Concluiu-se que as FBGs produzidas eram termicamente estáveis até 900 °C, representando um avanço e uma melhoria em comparação com os resultados obtidos para redes inscritas por laser UV (Figura 1.1). Constatou-se ainda que, no tratamento térmico até aos 700 °C, existe uma ligeira subida na refletividade das FBGs, tendo-se registado o pico máximo dessa subida após, aproximadamente, 10 horas do início do tratamento (Figura 1.1).

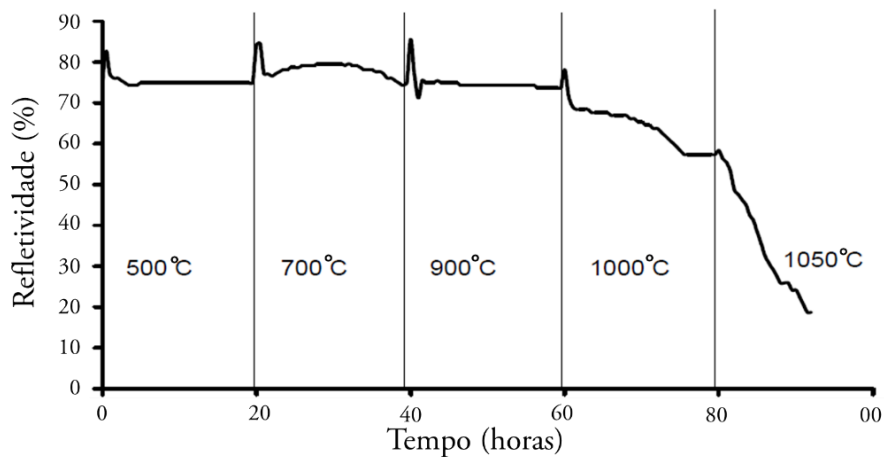


Figura 1.1 - Refletividade de uma FBG (produzida pelo método ponto a ponto, usando um laser de femtosegundo com radiação infravermelha) em função do tempo de exposição, a diferentes temperaturas (adaptado de [7])

Ainda no ano de 2005, Grobncic usou um laser femtosegundo com emissão a 800 nm e uma máscara de fase para produzir FBGs em fibra SMF-28 dopada com germânio [6]. Tais FBGs, cujo objetivo final era serem aplicadas como sensores, foram submetidas a um tratamento térmico a 1000 °C, constatando-se que as FBGs mantiveram cerca de 99,95% da sua refletividade mesmo depois de centenas de horas expostas à temperatura anteriormente mencionada. Foi ainda reportado que os comprimentos de onda de Bragg (λ_{Bragg}) das FBGs, mesmo após ciclos térmicos de até 1000 °C, não apresentaram um comportamento de histerese, contrariamente ao que seria esperado com FBGs inscritas por laser UV (Figura 1.2). Quando submetidas a um tratamento térmico de 1050 °C, verificou-se uma variação permanente do comprimento de onda central. Tal efeito foi explicado pela redução da força das redes inscritas nas fibras óticas. Concluiu-se que, à semelhança do trabalho de Martínéz, as FBGs gravadas pelo laser femtosegundo apresentam melhor estabilidade térmica e propriedades óticas que as inscritas por lasers UV. Contudo, quando submetidas ao tratamento térmico mencionado tornam-se extremamente frágeis, comprometendo a fiabilidade a longo prazo da fibra ótica.

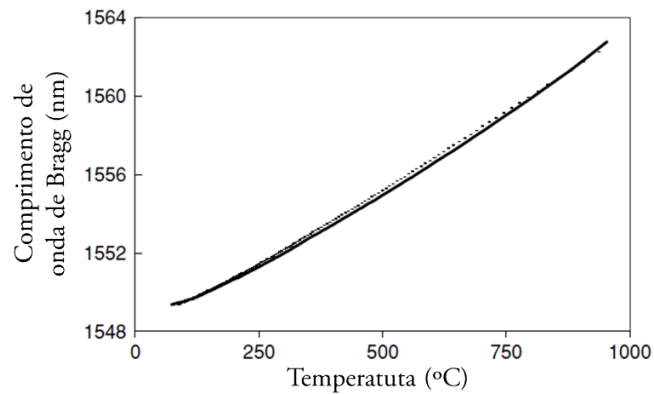


Figura 1.2 - Comprimento de onda de Bragg (nm) de uma FBG (inscrita pelo método de máscara de fase, por um laser ultrarrápido com uma radiação infravermelha) em função da temperatura submetida (°C). A linha sólida representa o primeiro ciclo de retorno à temperatura ambiente, enquanto os pontos representam o segundo ciclo. (Adaptado de [6])

Em 2014, Lancry, Poumellec e a sua equipa desenvolveram um estudo sobre redes de Bragg em fibra ótica (tipo I), cujo objetivo centrou-se em criar um método fiável de previsão do seu tempo de vida [8]. O seu trabalho baseou-se na aplicação de dados experimentais de decaimento da refletividade de FBGs (fabricadas por um laser UV) em função da temperatura e tempo decorridos. Usou-se o modelo de energia de demarcação (E_d) e admitiu-se a existência de uma curva característica de decaimento (Figura 1.3), por forma a caracterizar a estabilidade térmica de cada FBG. De acordo com os resultados obtidos, a curva característica pode ser construída se se considerarem as seguintes situações: unicidade da reação de alteração do índice de refração, reação ativada termicamente (podendo-se considerar a lei de Arrhenius), distribuição na energia de ativação e reação de primeira ordem. Todas estas condições são necessárias e suficientes para a construção da curva característica. Concluiu-se também que, apesar de o tempo de vida das redes não ser suficientemente longo, a natureza de distribuição das energias de ativação permite aumentar a estabilidade térmica das redes através de um processo de passivação, ou seja, através de um recozimento das fibras óticas. Caso este processo apresente as mesmas condições que o processo de envelhecimento, é possível calcular a duração do processo de recozimento, a uma temperatura específica, de modo a conseguir determinar o tempo de vida da FBG.

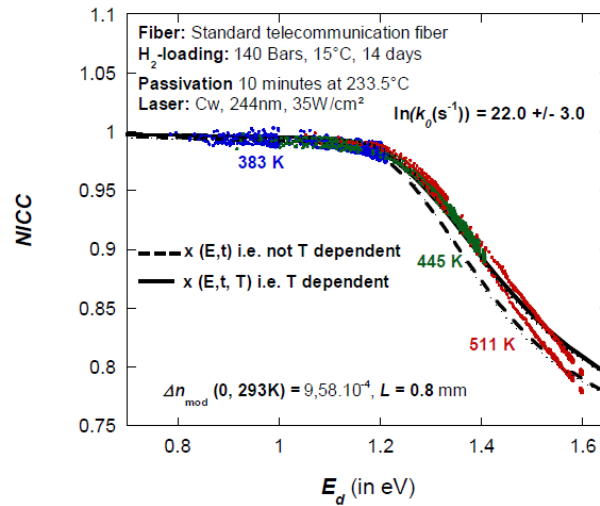


Figura 1.3 – Constante integrada de acoplamento normalizada (NICC) em função da energia de demarcação (E_d) [8].

Mais recentemente, Zhang *et al.* (2016) publicaram um artigo onde reportam o fabrico de várias FBGs através de um laser de femtosegundo, com o método ponto a ponto, e respetivo estudo sobre a sua estabilidade térmica [9]. Para tal, usaram um tratamento térmico isócrono no qual registaram o comprimento de onda de Bragg e a refletividade em função da temperatura submetida, por um determinado tempo. Os resultados experimentais obtidos sugerem que as redes fabricadas são capazes de manter a sua elevada refletividade (quer do pico central como dos seus picos adjacentes provenientes da largura do espetro de reflexão) por 8 horas, a uma temperatura de 1000 °C (Figura 1.4). Estes investigadores demonstraram, mais uma vez, a elevada capacidade térmica das FBGs produzidas por um laser de femtosegundo, e o seu potencial para serem utilizadas em aplicações a elevadas temperaturas, por períodos longos.

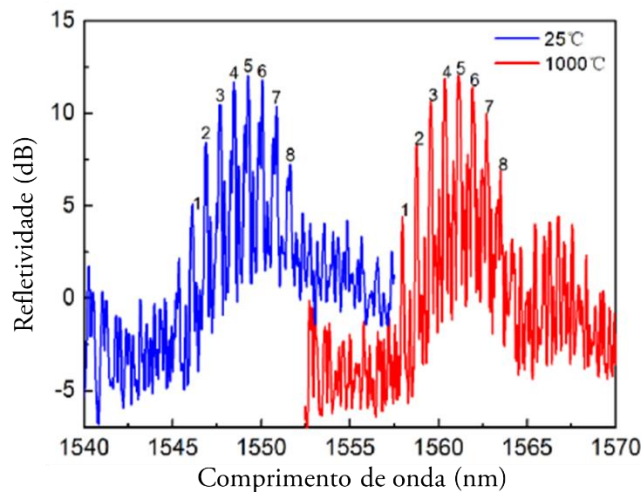


Figura 1.4 - Refletividade (dB) em função do comprimento de onda ressonante (nm), para uma FBG submetida a 25 °C (dados a azul) e a 1000 °C (dados a vermelho). (Adaptado de [9]).

.....

1.2. ENQUADRAMENTO, MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Todas as aplicações desenvolvidas tanto na indústria como em unidades de investigação, requerem monitorizações constantes e precisas de diversos parâmetros, tais como: a pressão, a densidade de materiais, condutividade elétrica, índice de refração, rigidez e difusão. Estes parâmetros têm, na sua maioria, uma elevada dependência com a temperatura dos materiais e do próprio ambiente em que estão inseridos [10,11]. Como tal, a correta leitura desta grandeza condiciona diretamente a qualidade dos produtos finais (no caso da indústria), a medição e confiabilidade de resultados experimentais (no caso das unidades de investigação) e, em alguns casos, põe em risco a própria segurança dos equipamentos e seus operadores, como por exemplo, em plataformas petrolíferas e centrais nucleares onde o mínimo erro na leitura dos valores de temperatura pode resultar em explosões ou libertação de vapores tóxicos. Por forma a minimizar os efeitos da alteração da temperatura, são utilizados sensores específicos para cada tipo de aplicação, com diferentes gamas de operação e precisão, cujo objetivo é o de identificar o valor da temperatura de um determinado material, ou ambiente, e alertar o sistema eletrónico (ou operador) caso se verifique alguma irregularidade.

Atualmente, existe um vasto leque de sensores disponíveis no mercado, tanto eletrónicos como óticos, que permitem monitorizar a temperatura em diversas aplicações. A evolução da tecnologia e os melhoramentos efetuados nos últimos anos relativamente à optoelectrónica, apontam para que os sensores óticos, principalmente os sensores baseados em fibra ótica, venham a substituir num número substancial de aplicações os atuais sensores eletrónicos, nomeadamente, na monitorização de temperatura, pressão e vibração [12]. Esta transição deve-se, principalmente, às vantagens que a própria fibra ótica proporciona, tais como: maior sensibilidade, imunidade a interferências eletromagnéticas, massa reduzida, isolamento elétrico, não necessita de eletricidade no ponto de medida e baixa perda de transmissão, o que possibilita a monitorização a longas distâncias [12]–[14].

Dentro dos sensores baseados em fibra ótica a tipologia de redes de Bragg consiste numa das opções de sensores mais utilizada e versátil, devido à elevada relação sinal-ruído e possibilidade de multiplexagem de vários sensores na mesma fibra ótica. Para além dos tipos de redes de Bragg (Tipo I e II), também a composição das fibras óticas e a forma como as redes são gravadas, ou seja, o método de fabricação e lasers utilizados na sua inscrição, influenciam a estabilidade térmica das mesmas [15–17]. Como tal, é de extrema importância realizarem-se estudos de estabilidade dos diferentes tipos de redes de Bragg, pois para determinadas aplicações, as mais pequenas variações no comprimento de onda de Bragg ou na refletividade da rede induzem resultados díspares que podem dar origem a erros de medição [18]. Estes efeitos são prejudiciais para determinadas indústrias

e unidades de investigação onde a mínima variação mensurável da temperatura pode reprovar a aceitação de novos produtos no mercado, nomeadamente sensores, ou pôr em risco a viabilidade de determinadas experiências. Para além disso, o tempo de vida de um sensor de temperatura, ou seja, o tempo pelo qual a degradação da resposta do sensor é negligenciável, é um dos fatores de maior importância e influência (para além do custo de aquisição) para um potencial cliente.

No presente trabalho pretendeu-se desenvolver, implementar e testar sensores de temperatura baseados em redes de Bragg gravadas em fibra ótica, por um laser de femtosegundo com radiação infravermelha. Realizou-se um estudo inovador da estabilidade térmica de FBGs após as mesmas terem sido submetidas a diferentes regimes de temperaturas, regressando sempre a uma temperatura referência. Os parâmetros de análise foram o comprimento de onda de Bragg e a refletividade de cada rede. Após a recolha dos dados experimentais foi efetuada uma análise dos mesmos aplicando um modelo teórico desenvolvido por Erdogan que, desde a sua publicação, foi aceite como um método fiável na previsão da estabilidade térmica das FBGs e do seu tempo de vida [5]. É também realizada e apresentada uma nova abordagem a este modelo pois, em vez da variável em análise ser somente a refletividade das redes de Bragg, optou-se por também usar a variação do comprimento de onda de Bragg, visto ser o parâmetro com maior relevância no modo de operação de um sensor FBG.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este documento está dividido em oito capítulos onde são estudados e apresentados aspetos relacionados com redes de Bragg em fibra ótica e a sua estabilidade térmica.

Neste primeiro capítulo é apresentado o estado de arte da investigação desenvolvida no âmbito da estabilidade térmica de FBGs, seguido do enquadramento, motivação e objetivos que levaram ao estudo deste tema.

No segundo capítulo é feita uma descrição teórica das redes de Bragg em fibra ótica, passando pelos princípios físicos de funcionamento, métodos de gravação das redes em fibra ótica e sua sensibilidade a perturbações externas.

No terceiro capítulo é introduzido o modelo teórico que serve como base ao estudo da estabilidade térmica das FBGs, onde também é estabelecido o formalismo necessário para a sua compreensão.

No quarto capítulo apresenta-se todo o procedimento de produção das sondas de temperatura, bem como a aplicação de aquisição desenvolvido especificamente para este trabalho.

No quinto capítulo são descritos os regimes de temperatura impostos às sondas: isotérmico e isócrono. É também apresentada a caracterização térmica dos sensores de temperatura e as suas respostas aos regimes impostos.

No sexto capítulo é aplicado o modelo teórico aos resultados experimentais obtidos e realizada a correspondente análise.

No sétimo capítulo são apresentadas as conclusões finais deste trabalho, sugestões para o trabalho futuro que poderá ser desenvolvido e publicações resultantes deste estudo.

No oitavo e último capítulo, encontram-se todas as referências utilizadas ao longo deste documento.

2. REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

Neste capítulo é introduzida a teoria das redes de Bragg em fibra ótica. Começa-se por abordar a reflexão de Fresnel, onde se explica o fenómeno e como este é aplicado nas redes de Bragg, seguida por uma descrição sobre redes de difração. São apresentados diversos métodos de gravação de redes de Bragg em fibra ótica, nomeadamente, por máscara de fase, por interferómetro e pelo método de ponto a ponto. Por último, é descrita a influência de perturbações externas na resposta espectral das FBGs.

2.1. INTRODUÇÃO

Uma rede de Bragg inscrita em fibra ótica, ou FBG, é um dispositivo ótico com diferentes aplicações, tais como compensação de dispersão ou filtragem espectral em sistemas de comunicações óticas e como elemento sensor de parâmetros físicos e químicos [19–21]. A sua estrutura é formada por uma modulação periódica do índice de refração (Δn) efetuada no núcleo de uma fibra ótica, ao longo do eixo longitudinal (Figura 2.5). O seu comprimento físico varia entre alguns milímetros até poucos centímetros.

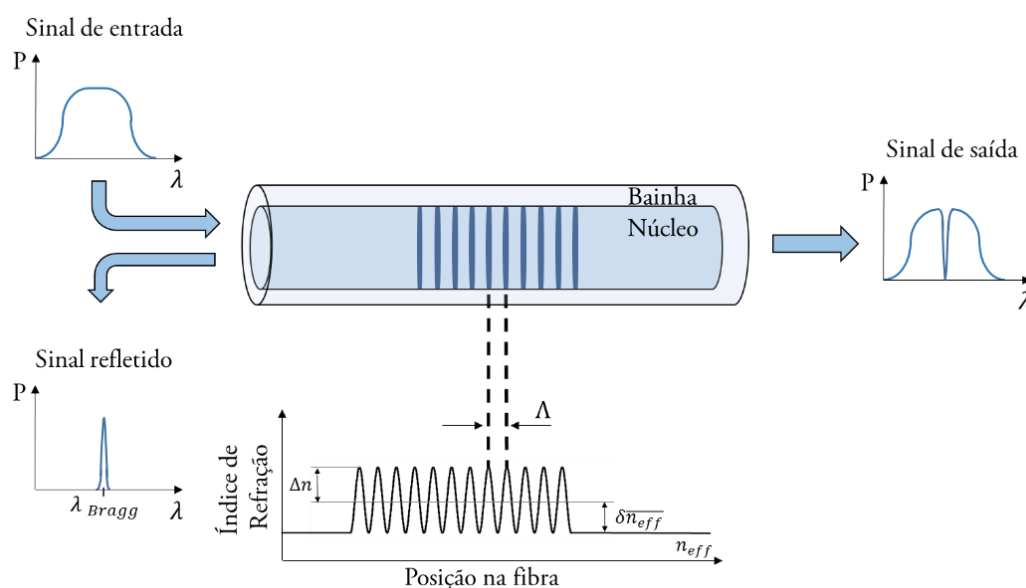


Figura 2.5 – Representação esquemática de uma rede de Bragg em fibra ótica e respetiva variação do índice de refração, onde: δn_{eff} representa a variação do valor médio do índice de refração efetivo e Λ o período da perturbação induzida no índice de refração.

O valor da amplitude de modulação do índice, geralmente, apresenta valores inferiores a 10^{-2} , sendo que os valores típicos são da ordem de 10^{-4} . No caso de uma rede de Bragg a operar na janela dos 1500 nm (comprimento de onda usual nas comunicações óticas), a periodicidade da modulação tem o valor de $\Lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$.

2.2. REFLEXÃO DE FRESNEL

A perturbação periódica do índice de refração origina um efeito que pode ser descrito recorrendo à reflexão de Fresnel. Numa abordagem simplista, o fenómeno associado a este tipo de reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética atravessa uma interface entre dois materiais dielétricos, com índices de refração diferentes. O resultado desta interação da onda com a interface é uma reflexão parcial da mesma. Quando a incidência da onda se dá perpendicularmente à interface, o coeficiente de reflexão (R_F) é calculado através de [22,23]:

$$R_F = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (2.1)$$

onde n_1 e n_2 são os índices de refração dos dois meios envolvidos. Se considerarmos que, para cada variação do índice de refração (δn), existe uma pequena reflexão de Fresnel, temos o coeficiente de reflexão dado por:

$$R_F = \left[\frac{n - (n + \delta n)}{n + (n + \delta n)} \right]^2 = \left[\frac{\delta n}{2n + \delta n} \right]^2 \quad (2.2)$$

No caso de uma rede de Bragg em fibra ótica, existem múltiplas interfaces de diferentes índices de refração que possibilitam a ocorrência de reflexão total de um determinado comprimento de onda. Esta reflexão registará uma maior intensidade quando cada contribuição de todas as reflexões de Fresnel se adicionar em fase (Figura 2.6).

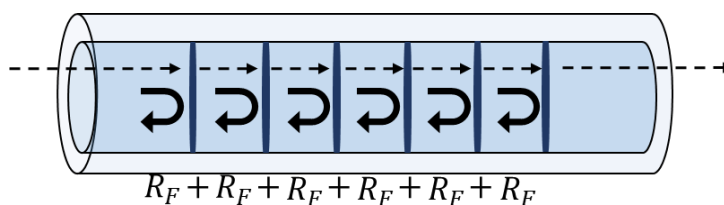


Figura 2.6 - Representação esquemática das reflexões de Fresnel presentes em cada transição de índice numa rede de Bragg. As setas a tracejado simbolizam a radiação transmitida e as setas a cheio a radiação refletida.

Através da teoria de redes de difração em fibras óticas é possível entender o fenómeno que permite acoplar as reflexões de Fresnel numa rede de Bragg.

2.3. REDES DE DIFRAÇÃO

O fenómeno de difração ocorre sempre que a fase ou a amplitude de parte da frente de uma onda eletromagnética se altera, após a interação com um obstáculo transparente ou opaco [24]. As redes de difração são estruturas de fase ou amplitude com dimensões extensas quando comparadas com o período de modulação (Figura 2.7).

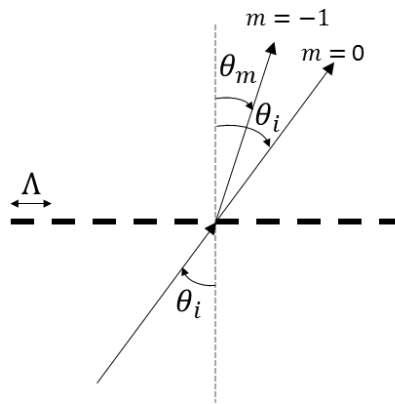


Figura 2.7 - Esquema da difração de uma onda eletromagnética por uma rede de difração. As constantes θ_i e θ_m são os ângulos das ondas incidente e difratada, respetivamente, e m a ordem de difração.

Quando uma onda eletromagnética é difratada (Figura 2.7), o efeito sobre esta pode ser descrito pela equação característica das redes de difração [25,26]:

$$\Lambda(n_m \sin(\theta_m) - n_i \sin(\theta_i)) = m\lambda \quad (2.3)$$

onde n_i e n_m são os índices de refração dos meios das ondas incidentes e refratadas, respetivamente, λ o comprimento de onda da radiação incidente e os ângulos θ_m correspondem aos máximos de interferência construtiva. Como as redes de difração em fibra ótica obedecem às mesmas leis que as redes de difração no espaço livre, com a equação (2.3) é possível calcular o comprimento de onda que permite acoplar radiação entre dois modos numa fibra ótica. Considerando que a difração ocorrida numa rede de Bragg em fibra ótica monomodo dá-se no sentido contrapropagante, perpendicularmente aos planos de índice constante da rede, a relação $\theta_i = -\theta_m = \pi/2$ verifica-se no acoplamento dos modos guiados propagantes para os contrapropagantes e, para $m = -1$, pode-se reescrever a equação (2.3) de modo a obter a equação designada por condição de Bragg, equação (2.4):

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (2.4)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo da fibra ótica e λ_{Bragg} o comprimento de onda de Bragg.

Na maioria das redes de Bragg, a variação do índice de refração efetivo do modo guiado de uma fibra ótica (δn_{eff}), ao longo de um eixo longitudinal z , pode ser expressa por [27]:

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) \left\{ 1 + v_f \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (2.5)$$

onde $\overline{\delta n_{\text{eff}}}(z)$ representa o valor médio da variação da modulação, v_f a visibilidade das franjas gravadas e $\phi(z)$ descreve o “chirp” da rede, ou seja, a variação do período ao longo da rede, caso se trate de uma rede aperiódica.

2.4. GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

Os processos de gravação de redes de Bragg em fibra ótica utilizam, geralmente, um laser UV e necessitam, de uma técnica de aumento da fotossensibilidade da fibra ótica, tal como a co-dopagem do núcleo. Este processo pode realizar-se com o aumento da concentração de germânio ou boro, ou por um processo de hidrogenização. Contudo, estas técnicas tendem a diminuir a estabilidade térmica das redes de Bragg inscritas, sendo necessário aplicar outros processos, nomeadamente térmicos, para contrariar este efeito. Com um feixe laser de femtosegundo é possível gravar redes de Bragg com elevadas refletividades em fibra ótica, não sendo necessária a utilização de fibras óticas fotossensíveis. Neste documento, são apresentados apenas três processos de gravação de redes de Bragg, por serem os processos mais utilizados atualmente.

2.4.1. GRAVAÇÃO POR MÁSCARA DE FASE

O processo de gravação de redes de Bragg em fibras óticas com máscara de fase distingue-se como o método de gravação mais comum por ser simples, prático e eficaz, quando aplicado em fibras óticas fotossensíveis [25,28].

Uma máscara de fase, tipicamente produzida em sílica com elevado grau de pureza, consiste numa rede com relevo superficial que divide um feixe laser monocromático em vários feixes de diferentes ordens de difração. O padrão de interferência entre duas das ordens de saída define a rede que será gravada no núcleo da fibra ótica. As máscaras de fase mais avançadas, fabricadas

especificamente para a gravação de FBGs, são desenhadas por forma a minimizar a ordem de difração zero e maximizar as ordens +1 e -1 (configuração adequada para incidência normal do feixe) ou minimizar a ordem +1 e maximizar as ordens -1 e 0 (configuração adequada para incidência do feixe segundo um ângulo específico). Para efeitos de simplicidade, neste subcapítulo aborda-se apenas a configuração com incidência normal do feixe na máscara de fase (Figura 2.8).

O procedimento de gravação com máscara de fase resume-se a colocar a fibra ótica, mais concretamente o seu núcleo, próxima da zona de sobreposição de feixes de diferentes ordens de difração. É importante que a profundidade de modulação da máscara de fase seja ajustada de tal forma que uma onda a percorrer essa distância no espaço livre tenha uma diferença de fase de π em relação a outra onda a percorrer a sílica. Assim, origina-se interferência destrutiva para a ordem 0 e a profundidade das depressões da máscara de fase (P_{MF}) é dada por [25]:

$$P_{MF} = \frac{\lambda_{UV}}{2(n_{sílica} - n_{ar})} \quad (2.6)$$

onde λ_{UV} é o comprimento de onda do laser UV e $n_{sílica}$ e n_{ar} os índices de refração da sílica e do ar, respetivamente.

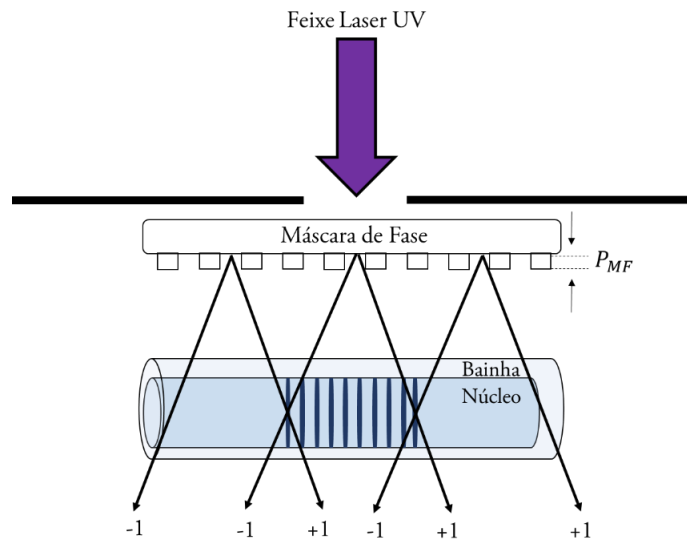


Figura 2.8- Esquema do processo de gravação com máscara de fase de uma rede de Bragg em fibra ótica.

2.4.2. GRAVAÇÃO COM INTERFERÓMETRO

Podemos dividir a gravação de redes de Bragg em fibra ótica com recurso a interferómetro em duas vertentes, relacionadas com o tipo de interferómetro usado: interferómetro por divisão de amplitude ou interferómetro com máscara de fase.

Interferómetro por divisão de amplitude

Baseado unicamente em técnicas holográficas, este método de gravação baseia-se na divisão do feixe laser ultravioleta em dois, com amplitudes idênticas (Figura 2.9). Estes dois novos feixes passam por uma lâmina de compensação de caminho óptico antes de serem refletidos por dois espelhos específicos para a radiação ultravioleta. Posteriormente, vão recombinar-se no núcleo da fibra, formando um padrão de interferência com um período de perturbação (Λ) dado por [25,29]:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2\sin(\alpha)} \quad (2.7)$$

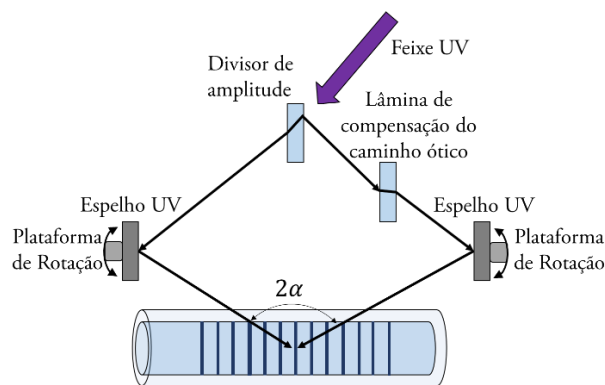


Figura 2.9- Esquema da gravação de redes de Bragg em fibra ótica com um interferómetro por divisão de amplitude

Este método, apesar de permitir gravar uma vasta gama de comprimentos de onda de Bragg através da alteração angular dos espelhos por uma plataforma de rotação, é bastante sensível a vibrações da mesa ótica de suporte e até a turbulências do ar.

Interferómetro com máscara de fase

Recorrendo a uma máscara de fase, é possível usar um interferómetro para gravar redes de Bragg sem a introdução de um divisor de amplitude (Figura 2.10).

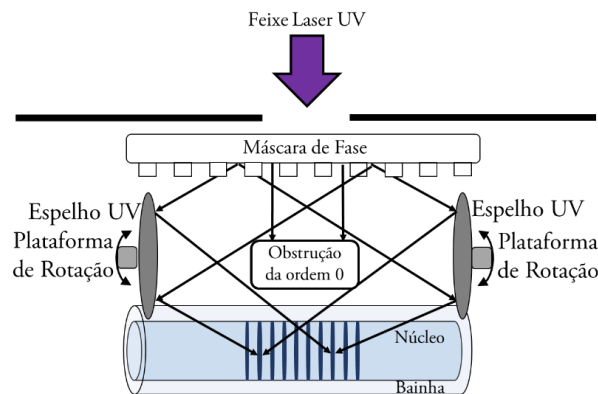


Figura 2.10 - Representação esquemática da gravação de redes de Bragg em fibra ótica com um interferómetro baseado numa máscara de fase.

Nesta configuração, o feixe de ordem 0 é obstruído e só são usadas na gravação as ordens +1 e -1. Os feixes refletidos nos espelhos são direcionados para a fibra onde será realizada a gravação. À semelhança do método anterior, através do uso de uma plataforma de rotação é possível alterar o período da rede de Bragg a gravar. Este método, apesar de ser mais dispendioso, apresenta algumas vantagens relativamente ao método que usa divisor de amplitude, sendo a principal o facto de a incidência na máscara de fase ser normal a esta, simplificando o alinhamento. Para além disso, a utilização da máscara de fase permite ter uma referência para o comprimento de onda a gravar.

2.4.3. GRAVAÇÃO PONTO A PONTO

Este método utiliza uma abordagem simples, mas dispendiosa, na gravação de redes de Bragg em fibra ótica. Tal como o nome indica, a gravação é efetuada ponto a ponto, ou seja, a modulação do índice de refração é realizada através da escrita individual de cada período constituinte da rede (Figura 2.11).

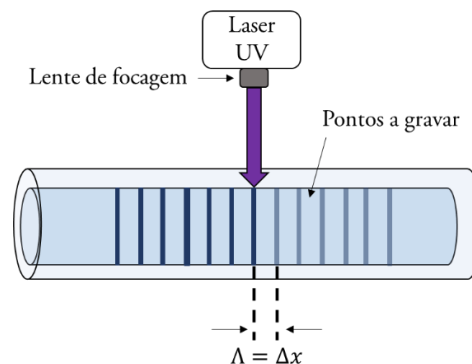


Figura 2.11- Representação esquemática da gravação de redes de Bragg em fibra ótica pelo método de ponto a ponto, onde Δx representa o deslocamento longitudinal aplicado à fibra ótica.

Para tal, utiliza-se um feixe laser que atravessa uma máscara de amplitude e, posteriormente, o feixe resultante é direcionado para a fibra através de uma lente. Para reproduzir esta técnica ao longo da fibra, esta é deslocada longitudinalmente por uma distância Δx , igual ao período, Λ , pretendido para a rede. Os lasers de femtosegundo são especialmente adequados para este tipo de gravação, pois é possível concentrar elevadas energias de excitação e obter maiores eficiências [30].

2.4.1. LASER DE FEMTOSEGUNDO

A utilização de um laser de femtosegundo na gravação de redes de Bragg oferece vantagens em relação à gravação com um laser UV convencional, sendo a mais relevante o facto de não ser necessária uma fibra fotossensível para a gravação da rede. Para além disso, os lasers de femtosegundo conseguem induzir variações do índice de refração na ordem de 6×10^{-3} , três vezes superior às variações de índice resultantes da gravação por laser UV convencional e, caso se use

radiação infravermelha, não será necessário remover o revestimento das fibras óticas para se proceder à gravação das redes de Bragg [3,31].

Quando o feixe laser de femtosegundo incide sobre o meio de transmissão da fibra, a deposição de energia é iniciada por absorção de múltiplos fótons (Figura 2.12, esquema superior), em vez de depender de impurezas ou defeitos para começar o efeito de ionização por avalanche (Figura 2.12, esquema inferior). Assim, a variação do índice de refração originada pela inscrição da rede, por um laser de femtosegundo, deve-se a uma reação não-linear que induz a formação de plasma localizado no material [16].

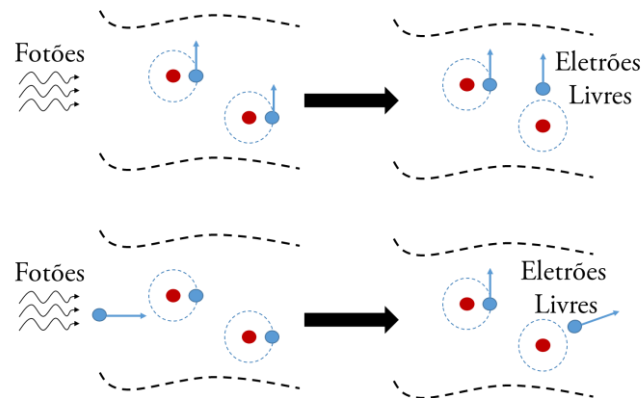


Figura 2.12 - Representação esquemática dos processos não lineares de absorção de múltiplos fótons (esquema superior) e de ionização por avalanche (esquema inferior). Os pontos azuis representam elétrons e os pontos vermelhos os núcleos dos respectivos átomos.

Os diferentes resultados de tratamento superficial com lasers com diferentes impulsos podem ser observados na Figura 2.13, onde estão esquematizados os efeitos de remoção de material através de um laser de onda contínua (CW, do inglês *continuous wave*), um laser com um impulso de nanosegundo e um outro com um impulso de femtosegundo. O método que usa o laser CW remove material através da alteração do estado do mesmo, passando pelo ponto de fusão. O uso do laser de nanosegundo remove material pela alteração do estado do mesmo de líquido para gasoso existindo, contudo, uma porção do material que fica no estado líquido. Por último, o laser de femtosegundo, devido à curta duração do impulso e elevada potência, consegue alterar o estado do material diretamente de sólido para gasoso e produzir caminhos ou cavidades muito bem definidos. Nas fibras óticas, mais propriamente na gravação de redes de Bragg, a interação do feixe laser de femtosegundo com a sílica resulta na alteração da estrutura do núcleo da fibra, modificando permanentemente o seu índice de refração [32,33].

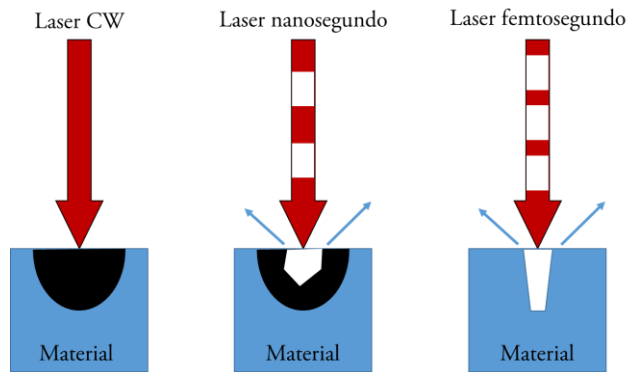


Figura 2.13 - Representação esquemática da remoção de material por um laser CW (à esquerda), um laser de nanosegundo (ao centro) e um laser de femtosegundo (à direita). As setas a azul representam o material removido e as zonas a preto o material afetado por condução térmica.

Um resultado prático pode ser observado na Figura 2.14, onde são apresentados orifícios em vidro originados por exposição de um feixe laser de femtosegundo e um feixe laser UV de nanosegundo [34]. Como é possível verificar, o orifício e o guia de onda produzidos pelo laser de femtosegundo apresentam menos irregularidades e, conseqüentemente, melhor finesse do que as estruturas produzidas pelo laser UV de nanosegundo.

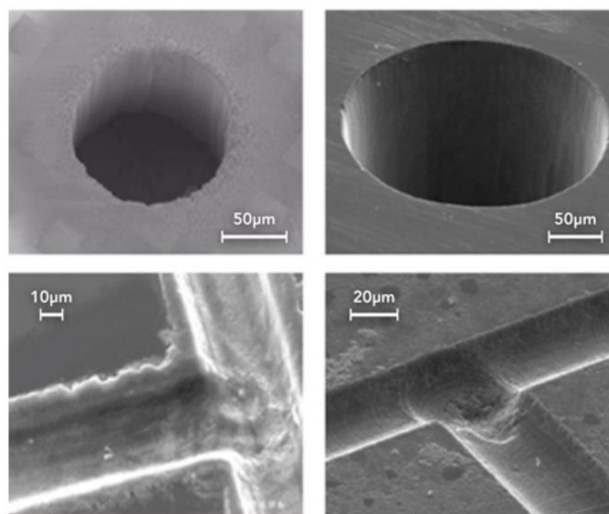


Figura 2.14 – Fotografias de orifícios e guias de ondas produzidas por um laser de nanosegundo UV (à esquerda) e um laser de femtosegundo (à direita). Adaptado de [34].

Para gravar redes de Bragg em fibra ótica com um laser de femtosegundo, podem-se adotar dois métodos distintos: por máscara de fase ou ponto a ponto (descritos em 2.4.1 e 2.4.3, respectivamente). O método mais usado e com melhores resultados, mas também o mais dispendioso, é o método de exposição ponto a ponto. O método de máscara de fase, apesar de se assemelhar ao método comum usado por lasers com impulsos da ordem dos nanosegundos, possui algumas diferenças: devido à baixa coerência longitudinal do laser de femtosegundo, é necessário colocar a fibra ótica muito perto do divisor de feixe e minimizar possíveis incompatibilidades de caminhos óticos [3].

2.5. SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG A PERTURBAÇÕES EXTERNAS

Devido ao vasto leque de aplicações possíveis para as FBGs, é necessário quantificar as alterações que possam advir de perturbações internas e externas a uma fibra ótica, principalmente perturbações impostas por variações de temperatura e perturbações mecânicas. Qualquer um destes tipos de perturbações poderá afetar tanto o índice de refração da fibra, como o período da rede de Bragg.

Através da equação de Bragg (2.4) é possível chegar a uma expressão que quantifique a variação do comprimento de onda de Bragg ($\Delta\lambda_{\text{Bragg}}$) com a variação da temperatura (ΔT) e perturbação mecânica (ΔP) [35–37]:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{\text{Bragg}} = & 2 \left[\Lambda \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial P} \right)_{T=\text{cte}} + n_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial P} \right)_{T=\text{cte}} \right] \Delta P + \\ & + 2 \left[\Lambda \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \right)_{P=\text{cte}} + n_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right)_{P=\text{cte}} \right] \Delta T \end{aligned} \quad (2.8)$$

Se mantivermos a temperatura constante ($\Delta T = 0$) e aplicarmos uma deformação longitudinal, podemos escrever:

$$\Delta\lambda_{\text{Bragg}} = S_{\text{DL}} \varepsilon_z \quad (2.9)$$

onde S_{DL} é a sensibilidade à deformação longitudinal e ε_z a elongação relativa segundo o eixo z . S_{DL} é dada pela equação (2.10):

$$S_{\text{DL}} = \lambda_{\text{Bragg}}(1 - p_e) \quad (2.10)$$

sendo p_e a constante fotoelástica efetiva, dada por:

$$p_e = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (2.11)$$

onde p_{11} e p_{12} são componentes do tensor fotoelástico e ν é o coeficiente de Poisson da fibra ótica.

Caso o objetivo seja caracterizar uma FBG quanto à variação da temperatura, considera-se uma rede não sujeita a perturbações mecânicas ($\Delta P = 0$) [35–37]:

$$\Delta\lambda_{\text{Bragg}} = S_T \Delta T \quad (2.12)$$

onde

$$S_T = \lambda_{\text{Bragg}}(\alpha_\Lambda + \alpha_n) \quad (2.13)$$

é a sensibilidade à temperatura da rede de Bragg. O coeficiente de expansão térmica (α_Λ) e o coeficiente termo-ótico (α_n) são dados por:

$$\alpha_\Lambda = \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \quad (2.14)$$

$$\alpha_n = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \right) \quad (2.15)$$

A variação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura descrita pela equação (2.12) segue um comportamento linear. Contudo, inúmeros estudos indicam que este comportamento deixa de ser linear para temperaturas elevadas (superiores a, aproximadamente, 500 °C) [38,39].

3. ESTABILIDADE TÉRMICA

3.1. INTRODUÇÃO

Como referido anteriormente, o estudo da estabilidade térmica das redes de Bragg em fibra ótica é de extrema importância para a indústria dos sensores óticos. Como tal, inúmeros estudos têm sido realizados ao longo dos últimos anos, baseando-se a sua maioria na análise da degradação do sinal refletido (em termos de potência ótica) para quantificar e qualificar a estabilidade térmica das FBGs. Estes métodos seguem o modelo teórico criado por Erdogan, o qual também foi alvo de estudo no presente documento e suporta os resultados experimentais obtidos. Neste capítulo é apresentado o formalismo teórico e alguns conceitos necessários para a correta análise da estabilidade térmica de FBGs, admitindo em todo o formalismo que os defeitos existentes são eletrões. Contudo, desconhece-se quais são os defeitos envolvidos no processo de decaimento do índice de refração das FBGs produzidas neste trabalho.

3.2. MODELO TEÓRICO

O modelo teórico proposto por Erdogan, em 1994, permitiu prever o decaimento do índice de refração de FBGs induzido por radiação UV [5]. Neste modelo é usado um formalismo teórico baseado na definição de uma distribuição contínua de estados de energia para os centros responsáveis pela alteração do índice [5,18].

Na maior parte dos estudos de estabilidade térmica de FBGs admite-se que, apesar de existirem processos físicos complexos relativos ao seu processo de envelhecimento, pode-se definir a estabilidade através da reação de primeira ordem da interação do feixe laser com a matéria da fibra, que origina a espécie química mais instável. Por forma a facilitar a leitura, considere-se que esta espécie química, resultante de diversos processos físicos, é denominada B.

Neste modelo, considera-se que o objeto de análise é o comportamento do índice de refração com a energia de demarcação. De seguida são apresentados os pressupostos teóricos necessários a este modelo [5,8].

Quando se efetua uma caracterização duma distribuição contínua de estados, a função densidade de estados $g(E)$ tem especial relevância. Após o bombardeamento do núcleo da fibra ótica pelo feixe laser, os eletrões distribuem-se nos estados localizados definidos por $g(E)$. Na Figura 3.15 é

apresentado este mecanismo físico onde a energia E é considerada nula no ponto de valor mínimo da banda de condução. Após a excitação efetuada pelo feixe laser, os eletrões vão repovoar os níveis de energia profundos.

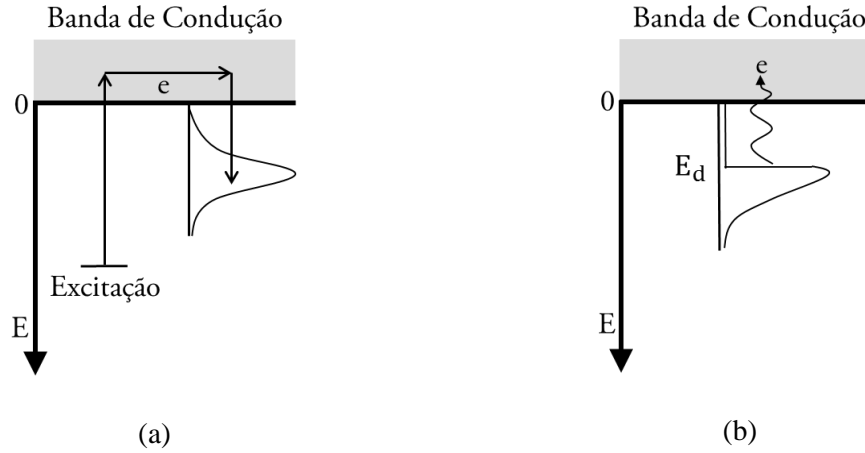


Figura 3.15 – Representação esquemática do processo físico onde os eletrões excitados pelo feixe laser são localizados numa distribuição contínua de estados de energia (a). Após o tratamento térmico, os eletrões são excitados para um determinado nível, através de uma energia de demarcação denominada E_d (b).

Considere-se que apenas uma reação elementar está envolvida no processo de decaimento: $A \leftarrow B$, sendo que A não estará incluída nesta análise. Assume-se, portanto, que a espécie B é termicamente ativada por uma energia de ativação E . De acordo com a lei de Arrhenius, o número médio de ocupação do nível com energia E no instante t é representado por $f(E, t)$ que, no caso de se assumir que os níveis de energia são despovoados termicamente de uma forma exponencial, pode-se escrever:

$$f(E, t) = f_0(E) \exp(-v(E)t) \quad (3.16)$$

onde $v(E)$ é a taxa de excitação térmica definida por

$$v(E) = v_0 \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) \quad (3.17)$$

e k_B é a constante de Boltzmann.

A energia de ativação é distribuída e a função densidade de estados correspondente, $g(E)$, é normalizada, ou seja:

$$\int_0^{\infty} g(E) dE = 1 \quad (3.18)$$

Por outras palavras, pode-se dizer que $g(E)$ representa o número de estados eletrónicos possíveis num determinado intervalo de energia.

O conceito de energia de demarcação, E_d , surge na definição do limite energético que separa a distribuição dos estados de energia (num instante t após a captura) em dois grupos: quando $E_d > E$ e quando $E_d < E$. Assume-se que o primeiro grupo da distribuição de estados de energia encontra-se em equilíbrio térmico com os estados na banda de condução, ao contrário do segundo grupo que é demasiado profundo para ter sido excitado termicamente. Assim, E_d é obtida através da equação (3.17) para $v(E_d) = 1$:

$$E_d(T, t) = k_B T \ln(v_0 t) \quad (3.19)$$

Portanto, é possível verificar o que acontece à distribuição dos eletrões capturados num determinado instante após os estados terem sido preenchidos (Figura 3.15 (b)). O número total de eletrões que se mantêm capturados no instante t , é dado pela equação (3.20):

$$N(t) = \int_0^{\infty} g(E) f(E, t) dE \quad (3.20)$$

Assumindo que $G(E) = g(E) f_0(E)$ define a distribuição inicial de eletrões e partindo das equações (3.16) e (3.17), a equação (3.20) pode ser reescrita como:

$$N(t) = \int_0^{\infty} G(E) \exp \left[-v_0 t \exp \left(-\frac{E}{k_B T} \right) \right] dE \quad (3.21)$$

O fator exponencial na equação (3.21) tem um comportamento bastante distinto relativamente ao valor de E , podendo-se utilizar a seguinte aproximação:

$$\exp \left[-v_0 t \exp \left(-\frac{E}{k_B T} \right) \right] \approx \begin{cases} 0, & \text{se } E < E_d \\ 1, & \text{se } E > E_d \end{cases} \quad (3.22)$$

Pode então aproximar-se $N(t)$ a:

$$N(t) \approx \int_{E_d}^{\infty} G(E) dE \quad (3.23)$$

Ao diferenciar a equação (3.23), obtém-se:

$$\frac{\partial N}{\partial E_d} \approx -G(E_d) \quad (3.24)$$

Esta taxa mostra que a distribuição inicial de elétrons pode ser determinada a partir da derivada da dependência de N em função da energia de demarcação.

O formalismo aqui exposto será aplicado na análise dos dados experimentais obtidos neste trabalho, apresentados no capítulo 6.

4. PRODUÇÃO DAS SONDAS E APLICAÇÃO DE AQUISIÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são descritos o procedimento de produção das sondas de temperatura e a aplicação de aquisição de dados desenvolvida. É importante mencionar que o termo “sondas” refere-se ao produto final utilizado nos ensaios térmicos, ou seja, ao conjunto de redes de Bragg, encapsulamento em aço, fibra ótica de interligação e respetivos conectores.

4.2. PRODUÇÃO DAS SONDAS DE TEMPERATURA

4.2.1. REDES DE BRAGG

Todas as redes de Bragg utilizadas neste trabalho foram produzidas pela empresa FEMTO FIBER TEC. As FBG foram gravadas através do método de “ponto a ponto” (descrito no subcapítulo 2.4.3) por um laser de femtosegundo^b. Foram produzidas e testadas 8 FBGs, uma rede gravada por cada fibra ótica. É importante referir que as redes vieram de fábrica posicionadas exatamente no centro de um troço de fibra ótica com 2 metros de comprimento. As características gerais são descritas na Tabela 1 e as individuais, de cada FBG, na Tabela 2. De modo a simplificar a correspondência entre cada FBG, sonda e dados para análise, foi criado um código de uma letra e um algarismo. A letra corresponde ao tipo de ensaio realizado (A – ciclos isotérmicos, B – regime isócrono) e o algarismo à correspondente rede (números entre 1 a 4).

Tabela 1 - Características gerais das redes de Bragg utilizadas.

Tipo de Fibra	Diâmetro do Núcleo (µm)	Diâmetro da Bainha (µm)	Revestimento	Comprimento da rede (mm)
Corning, SMF-28 Apodizada	9	125	Acrilato	3,5

^b Toda a produção das redes de Bragg não foi acompanhada pessoalmente por impossibilidade de deslocação à sede de produção da FEMTO FIBER TEC (Goslar, Alemanha).

Tabela 2 - Especificações individuais de cada rede de Bragg utilizada.

Ensaio submetido	# FBG	λ_{Bragg} (nm)	Refletividade (%)	Largura a meia altura (nm)	SMSR (dB) ^c
A	1	1549,98	39,3	0,394	21,3
	2	1549,87	38,6	0,360	18,7
	3	1549,83	41,8	0,426	24,9
	4	1550,06	37,3	0,344	21,0
B	1	1550,14	89,8	0,501	22,0
	2	1549,93	87,0	0,543	19,0
	3	1549,97	83,6	0,486	22,6
	4	1550,11	82,8	0,521	24,5

4.2.2. SONDAS

As sondas utilizadas neste trabalho foram produzidas na empresa HBM FiberSensing, S.A. (Maia, Portugal). O processo de produção foi dividido em duas fases: a primeira referente às 4 sondas para o teste em ciclos isotérmicos e a segunda fase relativa ao regime isócrono. Ambas as fases foram realizadas pela mesma equipa técnica, de modo a minimizar erros de produção e aperfeiçoar o método de fabrico da primeira para a segunda fase.

De seguida, apresentam-se as diferentes etapas constituintes do processo de produção das sondas de temperatura:

- I. A fibra que continha a rede de Bragg foi clivada (SUMIMOTO ELECTRIC, modelo *FC-6RS*, à esquerda na Figura 4.16) a $3,00 \pm 0,05$ cm do centro da rede, resultando num troço de fibra com um comprimento de $103,00 \pm 0,05$ cm. A ponta resultante foi esmagada com um x-ato para minimizar a reflexão de Fresnel.
- II. Do troço resultante do ponto anterior, foi retirado o revestimento por um comprimento de $83,00 \pm 0,05$ cm a partir da extremidade clivada. Para tal, foi usado um alicate de remoção comum. Este método mecânico de remoção tem a desvantagem de poder danificar a fibra ótica, tornando-a frágil [40].
- III. Seguidamente, com o auxílio de uma máquina de fusão (SUMIMOTO ELECTRIC, modelo *TYPE-71C*, à direita na Figura 4.16), fundiu-se a fibra ótica da rede de Bragg

^c SMSR é definido como sendo a razão de amplitude dos lóbulos laterais em relação ao pico principal, traduzindo do inglês *Side Mode Suppression Ratio*.

com cerca de $200,00 \pm 0,05$ cm de fibra ótica convencional. A zona da junção ficou com um comprimento de $2,00 \pm 0,05$ cm e foi protegida por uma manga termoplástica. Posteriormente, introduziu-se um revestimento adicional de $900 \mu\text{m}$ para além do revestimento já existente na fibra ótica.



Figura 4.16 – Máquinas de clivagem (à esquerda) e fusão (à direita) de fibras óticas (SUMIMOTO ELECTRIC, modelos FC-6RS e TYPE-71C, respetivamente).

- IV. A fibra ótica foi então introduzida no tubo de aço com $100,00 \pm 0,05$ cm de comprimento, $0,20 \pm 0,05$ cm de diâmetro interior e fechado numa extremidade. Teve-se o cuidado de usar uma manga plástica de proteção no processo de inserção da fibra ótica, para evitar riscar ou partir a mesma. A fibra ótica foi inserida até a rede ficar a $10,00 \pm 0,05$ cm da extremidade fechada do tubo de aço (Figura 4.17). De modo a confirmar que a rede de Bragg seria colocada na posição correta, fez-se uma marca de referência no revestimento da fibra por forma a assegurar que apenas $30,00 \pm 0,05$ cm do revestimento seriam introduzidos no tubo metálico (Figura 4.18).

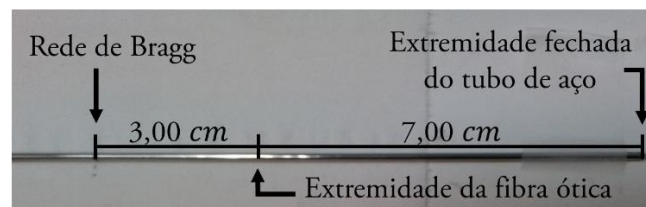


Figura 4.17 – Fotografia legendada da posição da rede de Bragg no interior do tubo metálico.

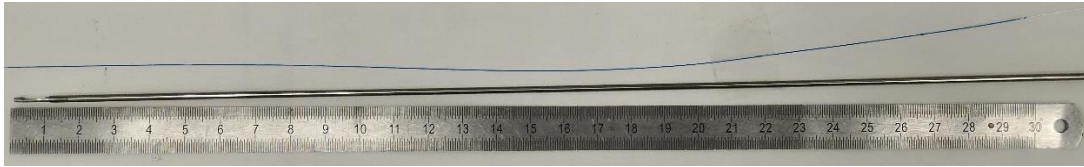


Figura 4.18 - Secção de $30,00 \pm 0,05$ cm de revestimento introduzida no tubo metálico.

- V. Quando colocada na posição correta, a fibra foi colada ao tubo de aço com cola resistente a altas temperaturas. Assim, garantiu-se que a rede de Bragg fica solta e livre de qualquer perturbação mecânica dentro do tubo, mas ao mesmo tempo fixa numa extremidade, eliminando assim possíveis erros de leitura da sensibilidade térmica provocados por alterações da posição da FBG no interior do tubo.
- VI. Por forma a verificar se a FBG estava em perfeitas condições e se o SMSR era adequado, procedeu-se a uma fusão provisória entre a fibra ótica da sonda e uma fibra com o conector FC/APC necessário para a ligação a uma unidade FS42 Portable da HBM FiberSensing, S.A. (Figura 4.19).

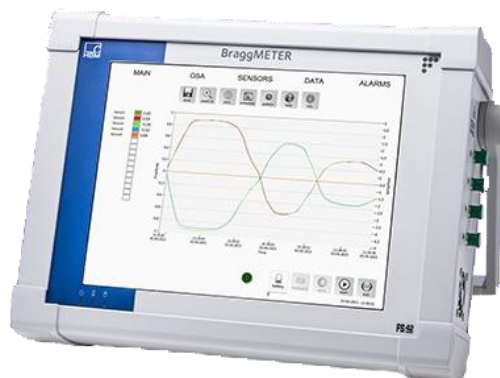


Figura 4.19 - Unidade FS42 Portable da HBM FiberSensing, S.A. usada na produção das sondas de temperatura.

- VII. Após concluído o ponto anterior, procedeu-se à introdução de um revestimento plástico de 3 mm (apropriado para utilizações em ambientes hostis) e à aplicação de um conector necessário para efetuar a ligação com o módulo de aquisição FS22 SI da HBM FiberSensing, S.A..

4.3. APLICAÇÃO DE AQUISIÇÃO

A aquisição de dados foi realizada através da unidade FS22 SI da HBM FiberSensing, S.A. As características técnicas desta unidade são apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 - Principais características técnicas da unidade de aquisição FS22 SI da HBM FiberSensing, S.A., utilizada em todas as medições efetuadas neste trabalho.

Resolução	Canais óticos	Taxa de amostragem	Largura espectral de deteção	Sensores por canal
1.0 pm	8	1 amostra / segundo	100 nm (1500 a 1600 nm)	25 (valor típico)



Figura 4.20 - Unidade de aquisição utilizada, modelo FS22 SI da HBM FiberSensing, S.A..

Para adquirir os dados num formato adequado para processamento, foi necessário desenvolver uma aplicação no programa LabVIEW® (versão 2012) que adquirisse dados de refletividade e comprimento de onda de Bragg, em cada segundo, e os guardasse num ficheiro de texto (Figura 4.21). Para além disso, introduziu-se também a opção de registar um espectro instantâneo (potência ótica em função dos comprimentos de onda do sinal, em cada segundo) do sinal refletido pela rede de Bragg, por forma a poder-se acompanhar visualmente o comportamento do pico em termos de refletividade. A periodicidade deste último registo foi efetuada de 10 em 10 minutos, com a possibilidade de ser alterada para qualquer intervalo de tempo, em qualquer momento da experiência. Na Figura 4.21 é apresentado o ambiente gráfico da aplicação criada, onde estão assinaladas as principais opções disponíveis.

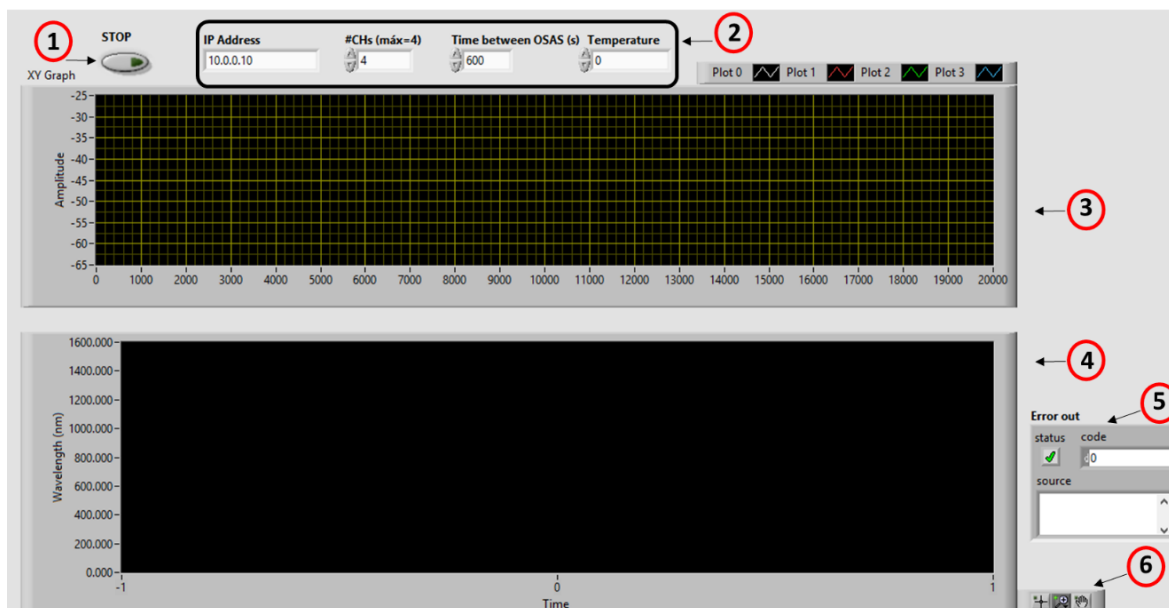


Figura 4.21 - Ambiente gráfico da aplicação desenvolvida no programa Labview® (versão 2012) para aquisição de espectros, refletividade e comprimento de onda ressonante das redes de Bragg.

O botão STOP (marca 1 assinalada na Figura 4.21) tem a função de, quando pressionado, interromper a aquisição de dados pela unidade FS 22 SI. Sempre que o LED verde do botão estiver ligado é sinal de que o botão está selecionado. A zona 2 engloba 4 parâmetros de extrema importância para o correto funcionamento da unidade: “IP Adress”, “#CHs”, “Time between OSAS” e “Temperature”. O primeiro parâmetro refere-se ao endereço de IP da unidade que, neste caso, é 10.0.0.10. O segundo parâmetro define o número de canais que serão usados na aquisição de dados. Como a experiência é feita apenas com 4 sondas, introduziu-se a nota que o número máximo de canais que podem ser utilizados é de 4. Seguidamente, o parâmetro “Time between OSAS” define o tempo (em segundos) entre a aquisição de cada espectro ótico instantâneo adquirido. O parâmetro “Temperature” tem a finalidade de se introduzir o valor da temperatura à qual as sondas estão submetidas para que o ficheiro gravado tenha essa indicação no seu nome. Este valor é meramente indicativo e introduzido pelo utilizador. Na área gráfica assinalada por 3, são apresentados os espectros da refletividade das FBGs em função dos comprimentos de onda refletidos, de cada canal e em cada intervalo temporal definido em 2. A área assinalada por 4 apresenta o comprimento de onda de Bragg adquirido em cada canal, a cada segundo. Caso exista algum erro durante o processo de aquisição, em 5 aparecerá uma mensagem com o tipo de erro e uma breve descrição da fonte do mesmo. Por fim, 6 assinala algumas ferramentas que se podem utilizar no ambiente gráfico 4, nomeadamente, manipulação dos eixos de coordenadas.

5. ENSAIOS TÉRMICOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais adotados neste trabalho: ciclos isotérmicos e regime isócrono. Paralelamente, é realizada a caracterização térmica das 8 sondas, são apresentados os dados obtidos nos procedimentos térmicos e, por fim, é feita uma análise preliminar aos mesmos.

5.1.1. CICLOS ISOTÉRMICOS

Por forma a monitorizar a variação de comprimentos de onda de Bragg de uma FBG, após ser submetida a diferentes temperaturas, recorreu-se a um teste por patamares de temperatura. Nestes ensaios, os comprimentos de onda de Bragg das redes A1, A2, A3 e A4 (especificações na Tabela 2) foram analisados para dois fins distintos: para monitorizar a sua evolução com o aumento da temperatura e para acompanhar a sua variação quando retomada a temperatura de calibração, após serem submetidas a uma determinada temperatura num intervalo temporal bem definido.

A necessidade de realizar medições a uma temperatura de calibração com o máximo de rigor impôs a utilização de dois tipos de máquinas de aquecimento diferentes: um calibrador certificado ($<200\text{ }^{\circ}\text{C}$, Figura 5.22 (a)) e um forno para as medições a elevadas temperaturas ($>200\text{ }^{\circ}\text{C}$, Figura 5.22 (b) e (c)). A elevada exatidão ($0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) do calibrador de temperatura utilizado (SIKA, modelo TP 17 200) e a sua capacidade de estabilizar a temperatura permitem efetuar medições a uma temperatura constante e com elevada taxa de repetibilidade. O forno inicialmente utilizado (marca Barracha, modelo cerâmico e elétrico) não conseguiu atingir temperaturas superiores a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, tendo existido a necessidade de se utilizar outro forno (marca Termolab, modelo de câmara MLR $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$) para as restantes temperaturas.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.22 - Imagens do calibrador térmico e dos fornos utilizados: (a) o calibrador térmico SIKA, modelo TP 17 200; (b) o forno Barracha, modelo cerâmico e elétrico; (c) o forno Termolab, modelo MLR $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$

O procedimento adotado para os testes em ciclos isotérmicos foi o seguinte:

- I. Com a montagem “A” da Figura 5.23, foram registados, para as 4 FBGs, os comprimentos de onda de Bragg e suas refletividades, durante 30 minutos a 50 °C. A cada intervalo de 10 minutos decorridos, era extraído para um ficheiro o espectro dos comprimentos de onda ressonantes das FBGs. Estas medições iniciais constituíram a referência para toda a experiência.
- II. De seguida, aumentou-se a temperatura do calibrador até aos 100 °C e efetuaram-se novos registos dos comprimentos de onda de Bragg e respetivas refletividades, durante 24 horas, em intervalos temporais de 1 segundo. Continuou-se com a extração de um espectro de cada FBG por cada intervalo de 10 minutos.
- III. No fim das 24 horas, colocou-se novamente o calibrador a 50 °C e repetiu-se o ponto I e II, com a diferença de a temperatura para o intervalo de 24 horas passar para 200 °C.
- IV. Passou-se para a montagem “B” da Figura 5.23, onde as sondas foram colocadas num forno a uma temperatura de 300 °C, por 24 horas. O tipo de dados recolhidos foi o mesmo do ponto II, mantendo o intervalo de 10 minutos entre espetros.
- V. Após o ponto IV, retomou-se o ponto I com o esquema “A”.
- VI. A partir deste ponto, o procedimento foi uma repetição dos pontos IV e V, com a diferença que a cada montagem do tipo “B”, a temperatura imposta no forno era superior em 100 °C relativamente à anterior, até se atingir os 1000 °C.

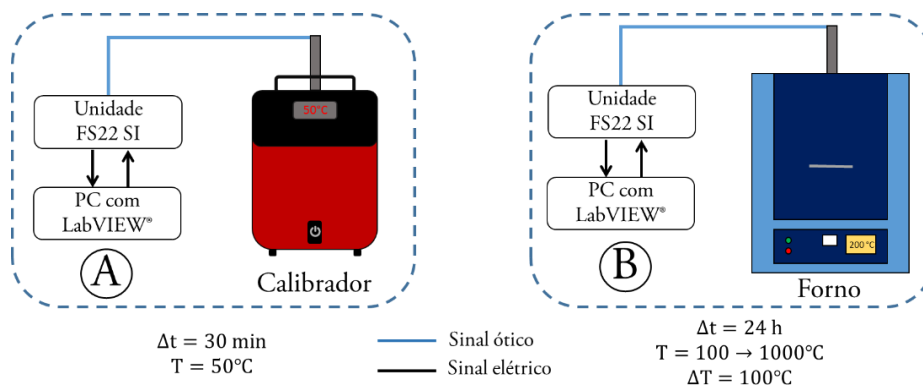


Figura 5.23- Esquemas das montagens utilizadas no teste de ciclos isotérmicos. "A" representa a montagem utilizada para efetuar os registos à temperatura de referência (50 °C) e "B" a montagem utilizada para submeter as sondas a temperaturas elevadas. As linhas a azul que ligam a unidade FS22 SI aos fornos representam as fibras óticas das sondas. Os valores de temperatura e tempo indicados na figura são meramente representativos do tipo de procedimento adotado em cada máquina.

De notar que as sondas só foram introduzidas no calibrador e no forno após a temperatura pretendida, em cada patamar, ter sido atingida de forma estável.

5.1.2. REGIME ISÓCRONO

À semelhança do teste anterior, as sondas B1, B2, B3 e B4 (especificações na Tabela 2 do capítulo 4.2.1) foram submetidas a um processo térmico que permitiu caracterizar as FBGs relativamente à variação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura. Para além da caracterização térmica, o objetivo deste teste é obter dados relativos à variação da refletividade das FBGs em função da temperatura submetida, por um intervalo de tempo bem definido.

Duas das sondas usadas, nomeadamente as sondas B3 e B4, foram previamente submetidas a um tratamento isotérmico de 24 horas a 800 °C, por forma a se poder comparar os resultados com os provenientes de redes de Bragg não sujeitas a um tratamento térmico. De seguida, são enumerados e descritos todos os passos deste regime. Ao longo de todo o processo, os dados recolhidos foram o comprimento de onda de Bragg (e respetivas refletividades), a cada segundo, e os espetros de refletividade em função do comprimento de onda ressonante, a cada 10 minutos decorridos:

- I. Todas as sondas B1, B2, B3 e B4 foram calibradas a 50 °C (antes do tratamento térmico de B3 e B4 a 800 °C), por 30 minutos no calibrador térmico SIKA. A montagem adotada foi idêntica à montagem “A” da Figura 5.23.
- II. Após o tratamento térmico das sondas B3 e B4 a 800 °C por 24 horas (montagem “B” da Figura 5.23), voltou-se a usar o calibrador térmico para monitorizar a resposta das FBGs a 50 °C, com a montagem “A”.
- III. Concluído o passo anterior, voltou-se à montagem “B” e iniciou-se o regime térmico descrito pela Figura 5.24:
 - a. Num período de 48 horas elevou-se a temperatura desde a temperatura ambiente até aos 800 °C, numa rampa contínua de aumento da temperatura;
 - b. Mantiveram-se as sondas a 800 °C, durante 24 horas;
 - c. Por fim, realizaram-se patamares de descida de temperatura, dos 800 °C até à temperatura ambiente. Cada patamar foi mantido por 2,5 horas, sendo que a rampa de descida entre patamares deu-se em intervalos temporais de 15 minutos, aproximadamente.
- IV. Finalizado o ponto anterior, submeteram-se novamente as sondas a 50 °C, usando a montagem “A”.

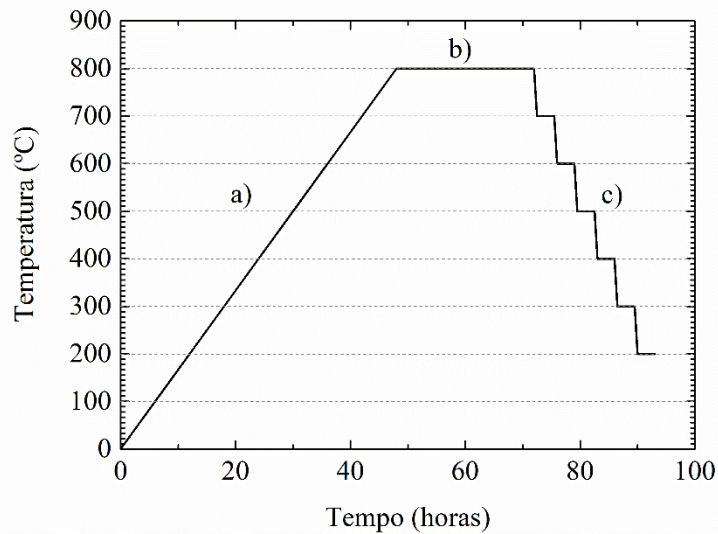


Figura 5.24 – Regime de subida e descida de temperatura adotado para o ensaio isócrono. As letras “a”, “b” e “c” representam os 3 estágios do processo térmico descrito anteriormente: III-a), III-b) e III-c).

5.2. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

Em ambos os conjuntos de sondas utilizadas (sondas “A” e “B”) extraíram-se dados relativos ao comportamento do comprimento de onda de Bragg com o aumento da temperatura. Assim, foi possível obter os gráficos da Figura 5.25 e caracterizar termicamente as FBGs.

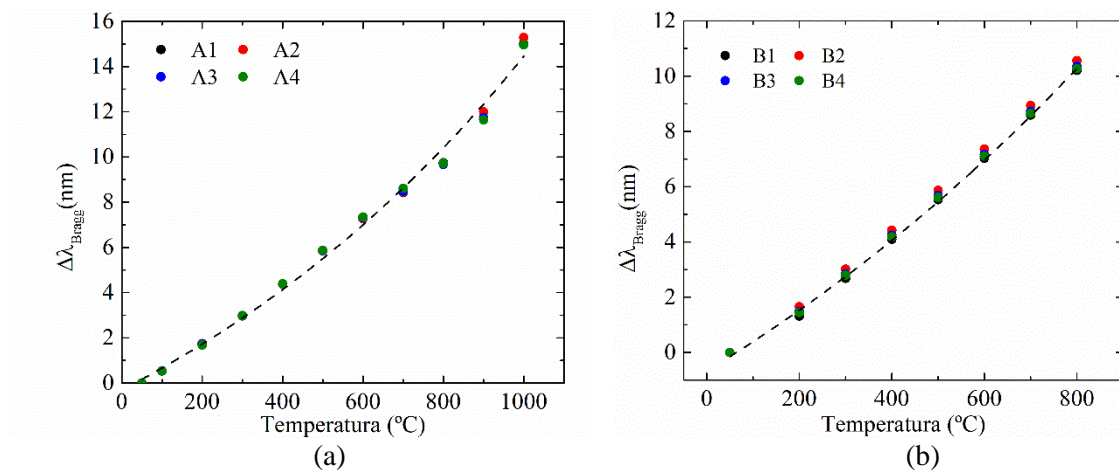


Figura 5.25 – Os dados dos gráficos (a) e (b) representam a variação dos comprimentos de onda de Bragg das sondas “A” e “B”, respectivamente, em função da temperatura submetida, em graus Celsius. Os diferentes pontos possuem cores diferentes que correspondem à sonda utilizada, como indicado nas legendas dos gráficos. As linhas a tracejado representam as curvas de melhor ajuste aos dados.

O ajuste que mais se adequa aos dados do gráfico (a) da Figura 5.25 corresponde a um comportamento exponencial, equação (5.25):

$$\Delta\lambda_{\text{Bragg}} = \Delta\lambda_{\text{Bragg}}(0) + C_{1a}\exp(R_{1a} \cdot T) \quad (5.25)$$

onde $\Delta\lambda_{\text{Bragg}}(0) = -11,1 \pm 3,9$ (nm), $C_{1a} = 10,8 \pm 3,7$ (nm) e $R_{1a} = (8,6 \pm 2,0) \times 10^{-4}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). O coeficiente de ajuste obtido tem um valor de $R^2 > 0,99$.

Relativamente aos dados do gráfico (b) da Figura 5.25, o melhor ajuste também apresenta um comportamento exponencial, equação (5.26):

$$\Delta\lambda_{\text{Bragg}} = \Delta\lambda_{\text{Bragg}}(0) + C_{1b}\exp(R_{1b} \cdot T) \quad (5.26)$$

onde $\Delta\lambda_{\text{Bragg}}(0) = -15,7 \pm 4,0$ (nm), $C_{2a} = 15,0 \pm 3,9$ (nm) e $R_{2a} = (6,8 \pm 1,3) \times 10^{-4}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). O coeficiente de ajuste obtido tem um valor de $R^2 > 0,99$.

5.3. RESPOSTA A CICLOS ISOTÉRMICOS

O parâmetro monitorizado nesta experiência foi a variação do comprimento de onda de Bragg a 50°C $\Delta\lambda_{\text{Bragg},50^{\circ}\text{C}}$. Após submeter as sondas “A” a ciclos isotérmicos por 24 horas, com temperaturas compreendidas entre os 100 e 1000°C (intervalo de 100°C entre cada medição).

A Figura 5.26 é apresentada por forma a facilitar a compreensão do processo que ocorreu nesta bateria de ciclos isotérmicos. Nesta figura representam-se apenas as curvas de potência ótica refletida de uma única sonda, em dois momentos: antes da sonda ser submetida a qualquer recozimento térmico (linha a azul) e após ser submetida a 800°C , durante 24 horas (linha a verde).

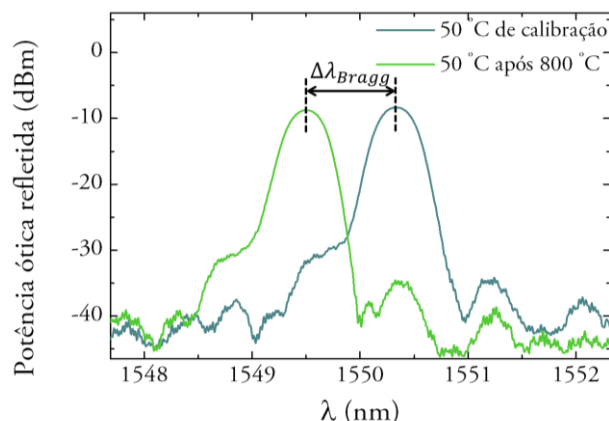


Figura 5.26 – Potência ótica em função do comprimento de onda. A linha azul representa os dados adquiridos a 50°C sem tratamento térmico, enquanto a linha a verde representa os dados adquiridos a 50°C após um recozimento a 800°C .

O processo utilizado Figura 5.26 para estimar $\Delta\lambda_{\text{Bragg},50^{\circ}\text{C}}$ foi replicado pelas quatro sondas e pelos 9 patamares de temperatura, usando numa rotina em Matlab, obtendo-se os dados apresentados

na Figura 5.27, correspondentes à variação do comprimento de onda de Bragg (relativamente ao primeiro valor registado) das sondas a 50 °C, após cada ciclo isotérmico.

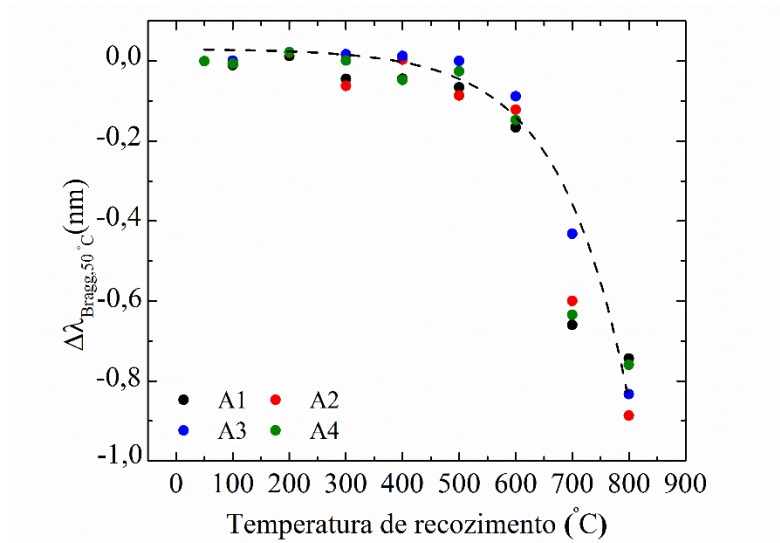


Figura 5.27 - Variação do comprimento de onda de Bragg, de cada sonda, a uma temperatura de 50 °C, após submetidas a um tratamento térmico às temperaturas descritas no eixo das abcissas.

Como é possível verificar nos dados do gráfico da Figura 5.27, o melhor ajuste segue um comportamento exponencial, cuja equação característica é dada por:

$$\Delta\lambda_{\text{Bragg},50^{\circ}\text{C}} = \Delta\lambda_{\text{Bragg},50^{\circ}\text{C}}(0) + C_2 \exp(R_2 \cdot x) \quad (5.27)$$

onde $\Delta\lambda_{\text{Bragg},50^{\circ}\text{C}}(0) = 0,030 \pm 0,023$ (nm), $C_2 = -0,001 \pm 0,001$ (nm) e $R_2 = 0,008 \pm 0,001$ (°C⁻¹). O coeficiente de ajuste obtido tem um valor de $R^2 > 0,97$.

Os resultados da Figura 5.27 demonstram que as FBGs apresentam um comportamento reversível (em termos de comprimento de onda de Bragg) quando são expostas até temperaturas de, aproximadamente, 500 °C. Após este valor de temperatura, o comportamento das FBGs torna-se particularmente interessante, pois começa a verificar-se que o comprimento de onda de Bragg passa a apresentar um decaimento exponencial irreversível.

Como entre cada ciclo isotérmico foi necessário desacoplar as sondas da unidade FS 22 SI, não foi possível desenvolver um estudo da resposta em refletividade das FBGs, devido às possíveis perdas inseridas no sistema aquando do manuseamento das fibras óticas. Por forma a colmatar esta falha, realizou-se um teste em regime isócrono cujos resultados são apresentados na secção seguinte.

5.4. RESPOSTA A REGIME ISÓCRONO

Os dados monitorizados nesta experiência foram, à semelhança do regime anterior, o comprimento de onda de Bragg das 4 sondas (B1 a B4) e a correspondente potência máxima de pico refletida pelas redes de Bragg. Ao longo do tratamento térmico de 800 °C previamente realizado às sondas B3 e B4, foram também monitorizados os comprimentos de onda de Bragg (Figura 5.28 (a)) e potência máxima de pico (Figura 5.28 (b)), de ambas as sondas. Os dados representados na Figura 5.28 (a) não são os valores absolutos dos comprimentos de onda de Bragg das sondas, mas sim a sua variação relativa ao primeiro valor registado a 50 °C. No decorrer da experiência, verificou-se um decréscimo acentuado da potência máxima de pico refletida da sonda B3, o que se traduziu na ausência de dados tanto de comprimento de onda de Bragg, como de potência refletida, no período indicado nos gráficos. É importante referir que, apesar de as sondas terem sido submetidas a um tratamento térmico de 24 horas, na Figura 5.28 apenas se apresentam os dados referentes ao período em que, efetivamente, as sondas estiveram à temperatura de 800 °C.

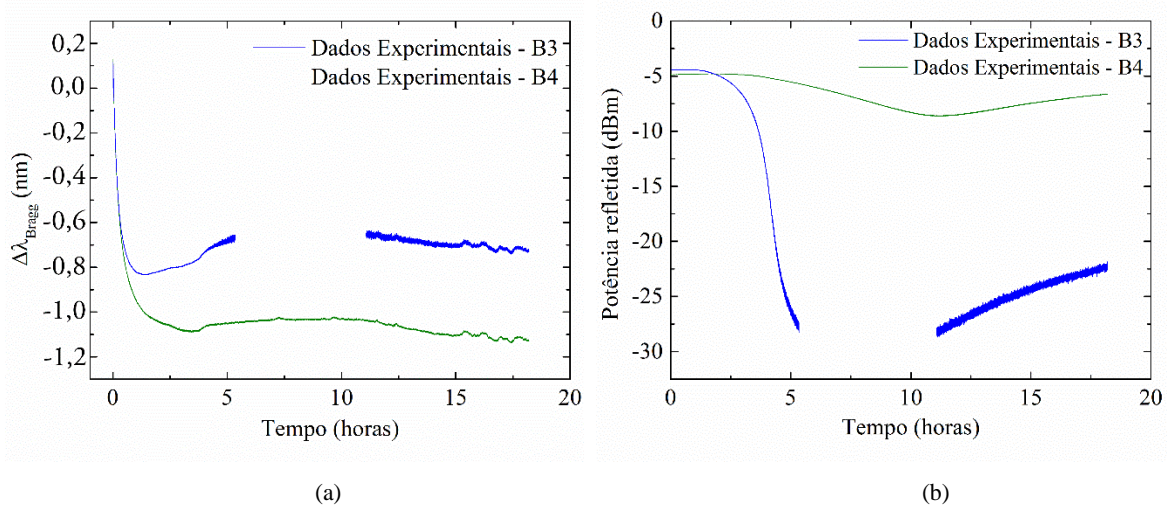


Figura 5.28 – No gráfico (a) estão representados os dados referentes à variação do comprimento de onda de Bragg das sondas B3 e B4, enquanto no gráfico (b) encontram-se representados os dados relativos à potência máxima de pico refletida, das mesmas sondas, para um tratamento a 800 °C por 19 horas.

Os dados da Figura 5.29 permitem analisar o comportamento do comprimento de onda de Bragg das referidas sondas em função do tempo decorrido. De modo a ser possível comparar (em termos qualitativos) este comportamento com a variação da temperatura, inseriu-se uma segunda escala vertical de temperatura em graus Celsius e traçou-se a curva correspondente ao regime programado no forno.

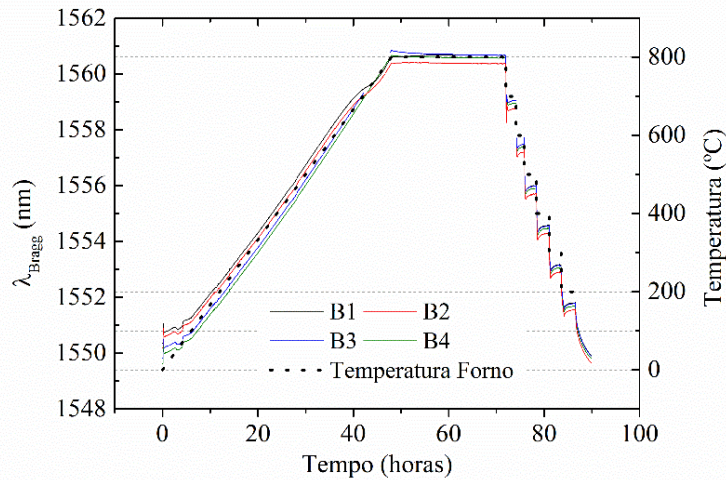


Figura 5.29 – Comprimento de onda de Bragg das 4 redes utilizadas (linhas contínuas) no regime isócrono (linha pontuada), em função do tempo decorrido.

A linha azul, correspondente aos dados da sonda B3, é interrompida entre as 40 e 47 horas do regime, aproximadamente. Tal deveu-se a uma quebra de registo da potência máxima de pico refletida por essa sonda, sendo que a causa mais plausível para que a unidade de aquisição não tenha registado estas potências, reside no facto de o intervalo de limites de deteção imposto na aplicação não abranger potências tão baixas. Assim sendo, no gráfico da Figura 5.30 apenas estão representados os dados de potência de pico máxima refletida, expressa em termos de refletividade (%), para as sondas B1, B2 e B4. As refletividades máximas de pico foram extrapoladas, ao longo do tempo, tendo por base a comparação do valor percentual dado pelo fabricante, no momento posterior à gravação da rede de Bragg nas fibras, com os valores medidos em escala linear, ou seja, em mW.

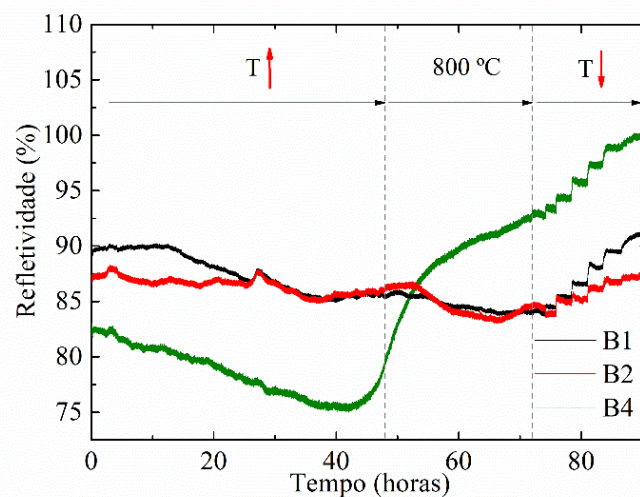


Figura 5.30 – Refletividade das sondas B1, B2 e B4. As linhas verticais a tracejado indicam os diferentes regimes impostos: subida de temperatura em 48 horas (à esquerda), 800 °C por 24 horas (ao centro) e descida da temperatura em patamares de 100 °C (à direita), 2,5 horas em cada um.

Durante o primeiro estágio de temperatura, existe um decréscimo geral da refletividade das três sondas. Contudo, ao aproximar-se dos 800 °C, verifica-se que o comportamento em termos de refletividade das redes de Bragg não submetidas a um tratamento térmico (B1 e B2) difere da sonda B4, registrando-se um aumento acentuado da refletividade desta, que se propaga pelo resto do regime isócrono. Pressupõe-se que este aumento de refletividade deve-se à porção de decaimento da variação do índice de refração que foi eliminada no aquecimento a 800 °C, por 24 horas.

6. ESTABILIDADE TÉRMICA: APLICAÇÃO DO MODELO AOS DADOS

Por forma a poder-se utilizar o modelo teórico descrito no capítulo 3, foi necessário obter dados referentes aos valores para a alteração do índice de refração nos vários estágios dos ensaios térmicos. Para tal, admitiu-se que as variações do comprimento de onda de Bragg e da refletividade estão relacionadas com a alteração do índice de refração, pelas equações (6.28) e (6.29), respetivamente:

$$\Delta n = \frac{\Delta \lambda_{\text{Bragg}}}{2\Lambda} \quad (6.28)$$

$$\delta n = \frac{\lambda_{\text{Bragg}}}{\pi \eta L} \tanh^{-1} \left(\sqrt{R(T, t)} \right) \quad (6.29)$$

onde Λ (nm) representa o período da rede de Bragg gravada, η o fator de confinamento da fibra ótica (com um valor estimado para a SMF-28 de $\eta \approx 0.8$, [41]), L o comprimento físico da rede de Bragg e $R(T, t)$ a refletividade relativa da FBG em função da temperatura e tempo decorrido. Referimo-nos à variável δn como a alteração da modulação do índice e a Δn como a variação do índice de refração, ambas adimensionais (Figura 6.31).

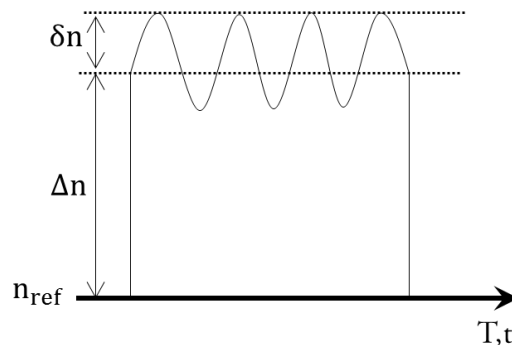


Figura 6.31 – Representação esquemática de δn e Δn , com a escala horizontal dependente da temperatura (T) e tempo (t). A constante n_{ref} simboliza o valor de índice de refração do núcleo antes de sofrer as variações δn e Δn .

6.1. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Recorrendo aos dados de variação do comprimento de onda de Bragg, dos dois regimes utilizados neste trabalho (isotérmico e isócrono), e utilizando a equação (6.28), foi possível construir os gráficos da Figura 6.32, onde estão representados os dados das variações normalizadas ao primeiro valor do índice de refração das FBGs, deslocadas por uma unidade positiva no eixo das ordenadas.

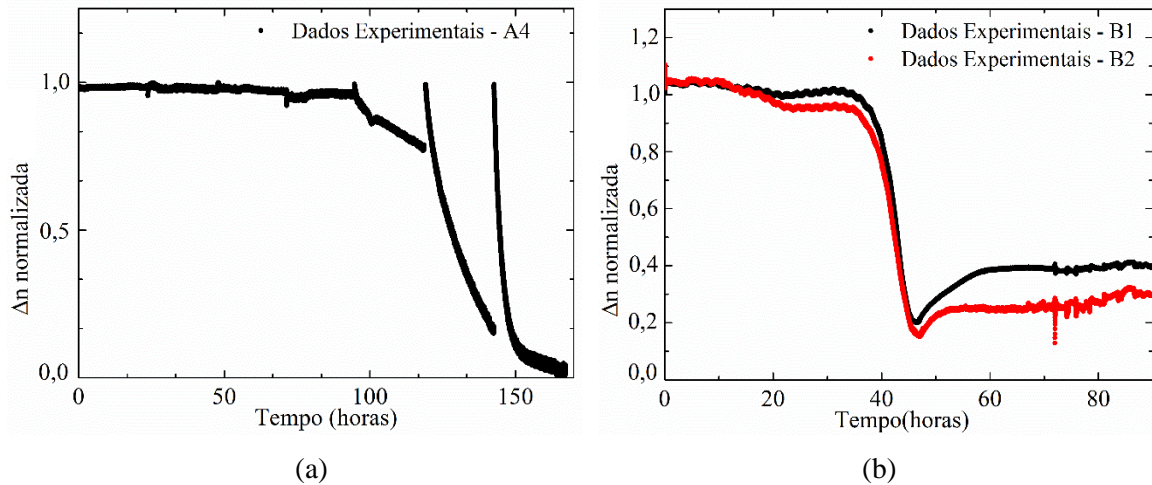


Figura 6.32– Dados da variação normalizada do índice de refração em função do tempo decorrido. Em (a) estão apresentados os dados referentes ao ensaio por ciclos isotérmicos e em (b) os dados referentes ao ensaio isócrono.

Na Figura 6.32 (a) apenas são apresentados os dados referentes à sonda A4, pois é a sonda de onde se conseguiram extrair resultados mais coerentes. Já na Figura 6.32 (b), estão apresentados apenas os dados referentes às sondas B1 e B2, não sujeitas a um tratamento de pré-aquecimento. No ensaio por ciclos isotérmicos, as variações do índice foram normalizadas ao primeiro valor registado a 50 °C, enquanto os dados do ensaio isócrono foram normalizados não só ao primeiro valor como também se subtraiu uma “linha base” proveniente dos dados das sondas que sofreram um tratamento térmico a 800 °C.

Por forma a estudar a variação do índice de refração, com ambos os parâmetros temperatura e tempo, recorreu-se ao modelo teórico descrito no capítulo 3, mais concretamente à definição da energia de demarcação E_d (equação (3.19)). No caso do ensaio por ciclos isotérmicos, construíram-se sete vetores de E_d (correspondentes a cada patamar de temperatura) impondo que a temperatura se mantivesse constante em cada um, ao contrário dos valores de tempo (Figura 6.33 (a)). Relativamente ao ensaio isócrono, construiu-se apenas um vetor de E_d onde a temperatura varia com o tempo de acordo com o regime térmico imposto pelo forno (Figura 6.33 (b)). Em todos os vetores de E_d , assumiu-se o valor de 500 Hz para o parâmetro ν_0 , pois este valor permite colocar todos os pontos numa única curva.

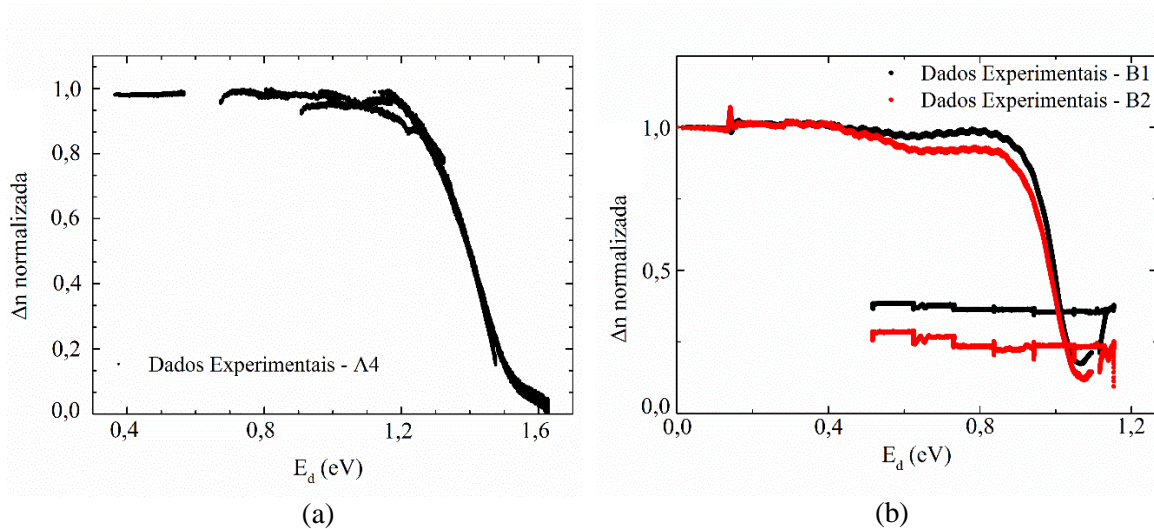


Figura 6.33 – Dados relativos à variação do índice de refração normalizada em função da energia de demarcação. Em (a) apresentam-se os dados referentes ao ensaio por ciclos térmicos e em (b) os dados referentes ao ensaio isócrono.

Como se pode verificar nos dados apresentados na Figura 6.33, existe uma tendência clara dos dados que indica um comportamento descrito por uma função potência. É ainda possível verificar que, na Figura 6.33 (b), existe uma porção dos dados que tende para regressar ao valor inicial de E_d . Este comportamento justifica-se por esses dados corresponderem à fase de descida de temperatura do regime isócrono, onde a diminuição da temperatura supera a influência do aumento do tempo, refletindo-se num decréscimo do valor de E_d . Nas análises seguintes, a porção de dados referentes a este comportamento regressivo são ignorados.

Aos dados da Figura 6.33 foram efetuados ajustes por uma função potência, descrita por:

$$\Delta n_{\text{normalizada}} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_d - E_c}{\Delta E}\right)} \quad (6.30)$$

onde E_d é a energia de demarcação (eV), E_c a energia central (eV) e ΔE a largura da distribuição de energia (eV). Poder-se-ia ter optado por considerar o valor do numerador como uma variável arbitrária, obtida através do ajuste. Contudo, como o objetivo é trabalhar com valores normalizados, estipulou-se o valor de 1.

Na Figura 6.34 estão representados os dados da variação normalizada ao primeiro valor do índice de refração em função da energia de demarcação para os dois ensaios efetuados, tendo em conta a equação (6.30) e ignorando os dados correspondentes à descida de temperatura no regime isócrono.

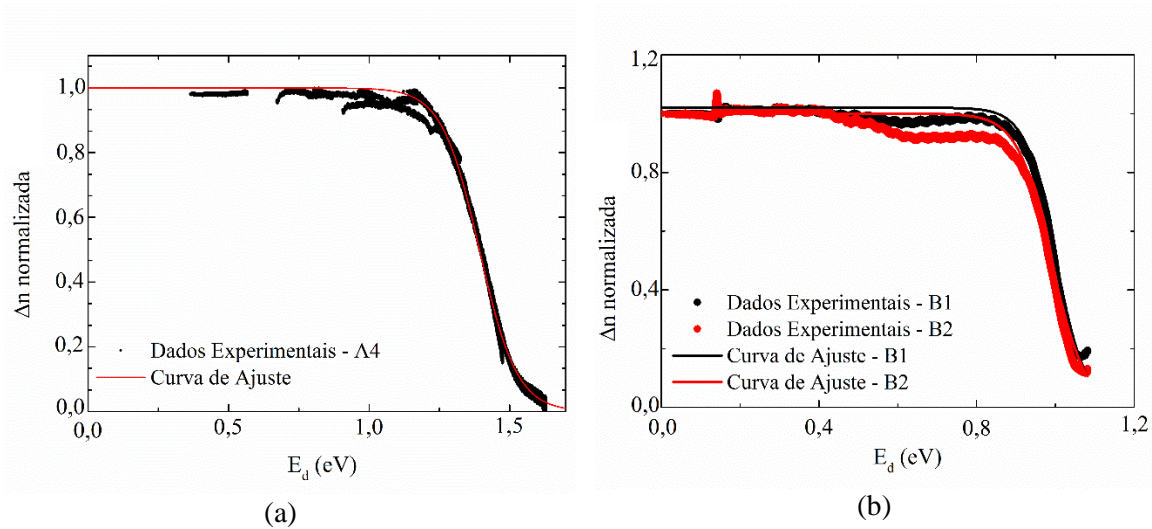


Figura 6.34 – Variação normalizada do índice de refração em função da energia de demarcação E_d . Em (a) estão representados os dados do ensaio por ciclos isotérmicos e em (b) os dados do ensaio isócrono.

Os coeficientes dos ajustes efetuados aos dados da Figura 6.34 encontram-se na Tabela 4:

Tabela 4 – Coeficientes de ajuste aos dados da Figura 6.34.

Sonda	ΔE (eV)	E_c (eV)	R^2
A4	$0,06693 \pm 2 \times 10^{-5}$	$1,39257 \pm 2 \times 10^{-5}$	$>0,99$
B1	$0,03778 \pm 2 \times 10^{-5}$	$1,00045 \pm 2 \times 10^{-5}$	$>0,99$
B2	$0,04304 \pm 4 \times 10^{-5}$	$0,98995 \pm 4 \times 10^{-5}$	$>0,97$

De acordo com os valores dos coeficientes de determinação apresentados na Tabela 4, verifica-se que os ajustes representam uma aproximação adequada aos dados experimentais.

Diferenciando as curvas de ajuste dos dados da Figura 6.34 em função da energia de demarcação (equação (6.31)), é possível obter a distribuição de energia dos defeitos normalizada, $D(E_{def})_{normalizada}$, de cada FBG (Figura 6.35).

$$D(E_{def})_{normalizada} = \frac{\exp\left(\frac{E_c + E_d}{\Delta E}\right)}{\Delta E \left[\exp\left(\frac{E_c}{\Delta E}\right) + \exp\left(\frac{E_d}{\Delta E}\right) \right]} \quad (6.31)$$

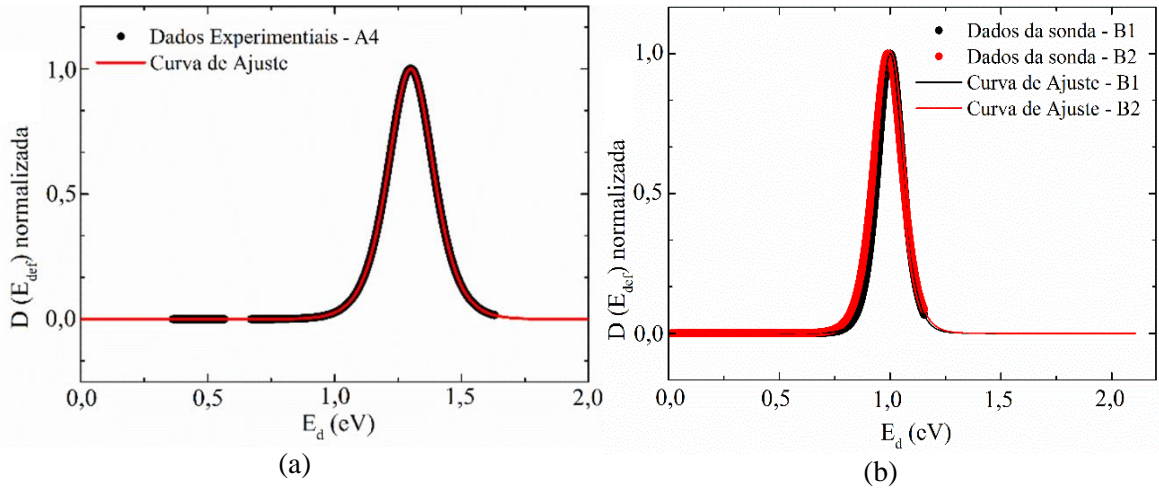


Figura 6.35– Distribuição de energia de defeitos das FBGs em função da energia de demarcação. Em (a) estão representados os dados referentes ao ensaio por ciclos isotérmicos e em (b) os dados referentes aos ensaio isócrono.

Verifica-se que os resultados experimentais dispostos na Figura 6.35 estão em concordância com os resultados previstos pelo modelo teórico considerado neste trabalho, relativamente ao decaimento da alteração do índice de refração. É possível afirmar também que a cada valor para o decaimento do índice de refração existe apenas uma única energia de demarcação associada. Assim, conclui-se que também o decaimento do índice de refração imposto pelo decaimento do comprimento de onda de Bragg é definido pelo tempo e pela temperatura submetida. Como o tempo é um parâmetro em constante progressão que não pode ser controlado, caso o objetivo seja analisar a taxa de progressão da distribuição de energias, basta manipular os valores de temperatura imposta às FBGs. As curvas das distribuições de energia estão centradas nos valores de E_c apresentados na Tabela 4.

6.2. PREVISÃO DO DECAIMENTO A LONGO PRAZO

Os resultados apresentados no capítulo 6.1 têm especial importância, pois permitem prever quais os valores de temperatura e tempo de pré-aquecimento necessários para que se elimine a porção da variação do índice de refração que iria decair ao longo do tempo. Assim, rearranjando a equação (3.19) e considerando uma temperatura, T_p , para a qual a variação do índice de refração decai, é possível determinar o intervalo de tempo de pré-aquecimento, t_p :

$$t_p = \frac{1}{v_0} e^{\frac{E_d}{k_B T_p}} \quad (6.32)$$

Como exemplo de aplicação da equação (6.32), considere-se que se pretende eliminar a porção de variação do índice de refração que poderá decair numa FBG com uma curva de distribuição de energia semelhante à dos dados da Figura 6.35 (a), com $v_0=500$ Hz. Neste caso, o valor da energia de demarcação a partir da qual a variação do índice de refração já não se encontra num regime

descendente é, aproximadamente, 1,55 eV. Se o forno onde é feito o pré-aquecimento da FBG estiver a uma temperatura $T_p=1000\text{ }^\circ\text{C}$, conclui-se que será necessário efetuar um regime isotérmico por um período $t_p=45$ minutos, aproximadamente.

Utilizando os resultados da Figura 6.34, nomeadamente a equação de ajuste (6.30), e fazendo uso da definição da energia de demarcação (E_d), é possível demonstrar que uma FBG submetida a uma temperatura de pré-aquecimento T_p , por um período t_p , sofre um envelhecimento acelerado equivalente ao que seria obtido a uma temperatura T_{uso} ($T_{uso} < T_p$), por um período t_{uso} ($t_{uso} > t_p$):

$$t_p = \frac{\frac{T_{uso}}{T_p}}{v_0} \cdot t_{uso} \quad (6.33)$$

De acordo com a equação (6.33), para determinar corretamente o valor de t_p será necessário encontrar o valor mais apropriado de v_0 para a FBG em análise. Na Figura 6.36 e na Figura 6.37 estão representadas as simulações do tempo de pré-aquecimento em função da temperatura de pré-aquecimento, para diferentes intervalos de decaimento (1, 10, 100 e 1000 anos, a temperaturas de funcionamento de $25\text{ }^\circ\text{C}$ e $500\text{ }^\circ\text{C}$) de FBGs semelhantes às do tipo A descritas neste trabalho.

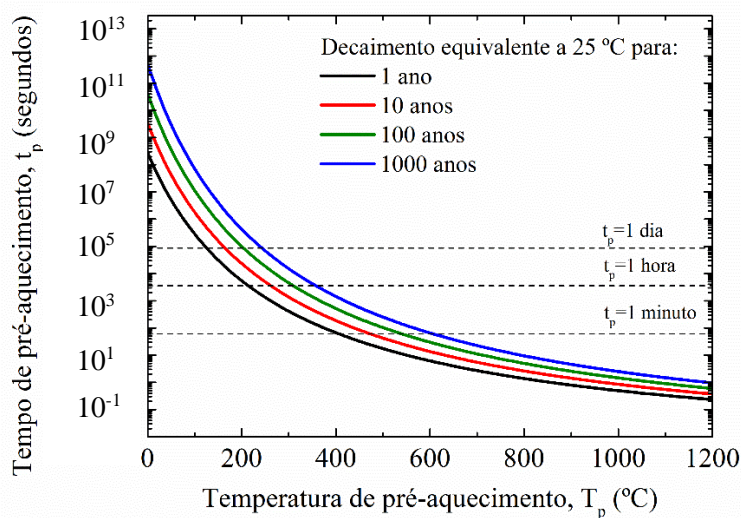


Figura 6.36– Tempo de pré-aquecimento em função da temperatura de pré-aquecimento, para um decaimento equivalente a $25\text{ }^\circ\text{C}$ em 1, 10, 100 e 1000 anos. Para esta simulação consideraram-se FBGs com as mesmas características das FBGs do tipo A utilizadas neste trabalho.

É possível verificar que, para a mesma temperatura de funcionamento, quanto maior é o intervalo de tempo a que se pretende operar a FBG, maior terá de ser a temperatura de pré-aquecimento, para o mesmo tempo de pré-aquecimento, de forma a eliminar a porção de decaimento equivalente. Por exemplo, para um decaimento durante um ano a $25\text{ }^\circ\text{C}$, é necessária uma temperatura de pré-aquecimento de, aproximadamente, $126\text{ }^\circ\text{C}$ durante um intervalo de tempo de pré-aquecimento de 1 dia. Já para um decaimento durante 10 anos a $25\text{ }^\circ\text{C}$, é necessária uma temperatura de, aproximadamente, $166\text{ }^\circ\text{C}$ durante um intervalo de tempo de 1 dia.

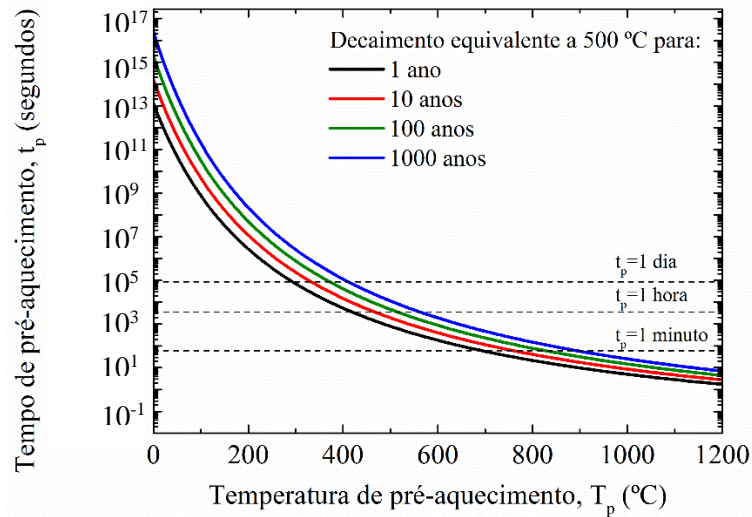


Figura 6.37– Tempo de pré-aquecimento em função da temperatura de pré-aquecimento, para um decaimento equivalente a 500 °C em 1, 10, 100 e 1000 anos. Para esta simulação consideraram-se FBGs com as mesmas características das FBGs do tipo A utilizadas neste trabalho.

Também se pode concluir que o aumento da temperatura de funcionamento reflete-se num aumento da temperatura de pré-aquecimento, para o mesmo tempo de pré-aquecimento e para o mesmo intervalo de tempo de operação da FBG. Como exemplo, considere-se um decaimento durante 10 anos a 25 °C e a 500 °C. Para a primeira temperatura de funcionamento da FBG, e para um tempo de pré-aquecimento de 1 dia, será necessária uma temperatura de pré-aquecimento de 166 °C, enquanto para a segunda temperatura de funcionamento da FBG será necessário atingir os 334 °C. Contudo, admitindo que a temperatura de pré-aquecimento de uma FBG terá de ser sempre superior à temperatura de uso da mesma, verifica-se que a temperatura de pré-aquecimento de 334 °C não preenche este requisito. Assim, será necessário efetuar testes térmicos mais extensos para poder determinar com maior precisão o valor da constante v_0 .

Do ponto de vista de um potencial cliente, é importante demonstrar a estabilidade térmica de um sensor de temperatura, ou seja, apresentar a variação do índice de refração para uma determinada temperatura de funcionamento, ao longo do tempo. Tal é possível recorrendo novamente à equação (6.30) e admitindo regimes unicamente isotérmicos. Como exemplo, considere-se uma FBG (sem um tratamento de pré-aquecimento) com as características das FBGs do tipo A deste trabalho, (valor de $v_0=500$ Hz e as energias ΔE e E_c de A4, definidas na Tabela 4 do capítulo 6). Na Figura 6.38 estão representadas as variações do índice de refração normalizadas ao primeiro valor, simuladas de acordo com as considerações acima referidas e para temperaturas compreendidas entre 100 °C e 800 °C.

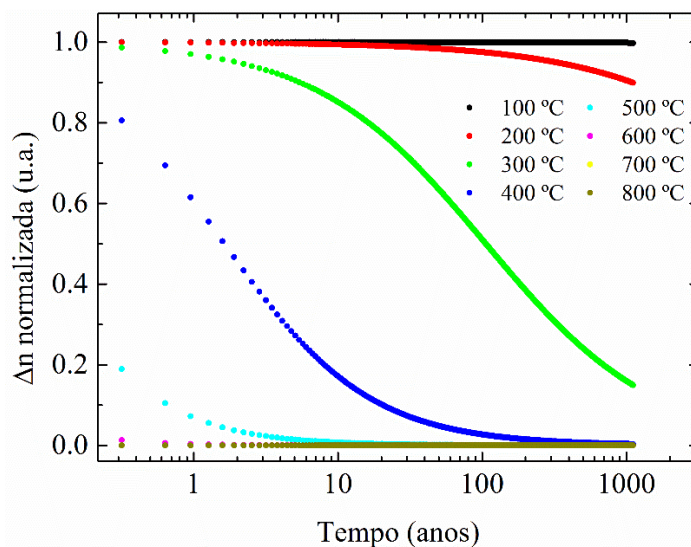


Figura 6.38 – Simulação do decaimento da variação de índice de refração normalizada ao primeiro valor para diferentes temperaturas. O eixo das abcissas encontra-se em escala logarítmica.

Com os dados da Figura 6.38 é possível verificar que a variação normalizada do índice de refração mantém-se constante para temperaturas próximas de 100 °C e 800 °C, por um intervalo de tempo de 1000 anos. Para as restantes temperaturas compreendidas nesse intervalo, as simulações sugerem um comportamento de decaimento para a variação do índice de refração, verificando-se que quanto mais próximo do valor médio de temperatura (400 °C, aproximadamente), mais prolongado no tempo será o decaimento. Assim, para FBGs não submetidas a um pré-tratamento térmico, conclui-se que as temperaturas de funcionamento mais apropriadas, ou seja, onde existe maior estabilidade térmica ao longo do tempo, serão as temperaturas de 100 °C e 800 °C. Apesar de a 800 °C existir um decréscimo acentuado da variação do índice de refração, como o intervalo de tempo deste decaimento é muito curto, conclui-se que a estabilidade térmica se atinge inerentemente.

7. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

7.1. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido nesta dissertação permitiu o desenvolvimento e teste de 8 sondas de temperatura, tendo por base redes de Bragg inscritas em fibra ótica padrão, por um laser de femtosegundo com radiação infravermelha. As 8 FBGs foram calibradas relativamente à temperatura, tendo-se verificado que, ao contrário do que era esperado, os comprimentos de onda de Bragg em função da variação da temperatura, seguem um comportamento exponencial.

Realizou-se um estudo relativo à estabilidade térmica das 8 FBGs, tendo por base um modelo teórico cujo formalismo implica a análise da variação do índice de refração normalizada em função de uma energia de demarcação. Para tal, foram planeados e executados com sucesso dois tipos de ensaios térmicos, ciclos isotérmicos e regime isócrono, cujos objetos de análise foram os comprimentos de onda de Bragg e respetiva refletividade, em função do tempo e temperatura.

Relativamente ao ensaio por ciclos isotérmicos, a análise aos dados dos comprimentos de onda de Bragg à temperatura calibrada de 50 °C (após os diferentes patamares de temperatura submetidos), sugere que existe um processo despoletado por temperaturas superiores a 500 °C que altera permanentemente a matriz de sílica das fibras óticas. Esta reação induz uma variação irreversível do índice de refração das FBGs, que conclui-se ter uma dependência de decaimento exponencial.

Para o regime isócrono, verificou-se que a refletividade das FBGs tratadas termicamente apresentaram uma subida (em termos percentuais) no patamar de 800 °C, ao contrário das FBGs não tratadas onde se verificou um decréscimo. No caso do comprimento de onda de Bragg, verificou-se que, nas FBGs não tratadas, este sofre uma alteração não linear, também perto dos 800 °C. Estes resultados permitem concluir que quando as redes de Bragg são submetidas a um processo prévio de aquecimento, existe uma porção de decaimento da variação do índice de refração que é eliminada permanentemente, sugerindo que o processo de recozimento de FBGs potencializa o seu uso como sensores de temperatura com elevada exatidão.

Para o caso da aplicação do modelo teórico aos dados obtidos, verificou-se que o comportamento da variação do índice de refração com a energia de demarcação segue uma função exponencial. Assim, foi possível traduzir este comportamento numa curva de distribuição de energia

e obter os valores de $E_c = 1,39257 \pm 2 \times 10^{-5}$ (eV) e $\Delta E = 0,06693 \pm 2 \times 10^{-5}$ (eV) para a energia central e para a largura da distribuição de energia, respetivamente, para o ensaio em ciclos isotérmicos. Para o ensaio em regime isócrono foram obtidos os valores de $E_c = 1,00045 \pm 2 \times 10^{-5}$ (eV) e $\Delta E = 0,03778 \pm 2 \times 10^{-5}$ (eV) para a energia central e para a largura da distribuição de energia, respetivamente.

Através dos ajustes aos dados, foi possível desenvolver uma equação que prevê qual a temperatura e tempo de pré-aquecimento necessários para eliminar a porção de variação do índice refrativo que decai com o tempo e temperatura de funcionamento de uma FBG.

Do ponto de vista comercial, foi demonstrado que as FBGs com características idênticas às das FBGs estudadas neste trabalho, apresentam uma elevada estabilidade térmica quando colocadas a temperaturas próximas de 100 °C ou 800 °C, demonstrando o potencial das FBGs fabricadas por um laser de femtosegundo, com radiação infravermelha.

7.2. TRABALHO FUTURO

Por forma melhorar o estudo da estabilidade térmica das FBGs, deverão ser realizados mais ensaios térmicos semelhantes aos efetuados neste trabalho mas para diferentes tipos de FBGs, inscritas por diferentes métodos, tanto por lasers de femtosegundo IV como por lasers de nanosegundo UV.

Sugere-se também que os futuros estudos sejam acompanhados desde a inscrição das redes nas fibras óticas, por forma a poder-se realizar uma análise quantitativa da alteração do índice de refração em todo o processo. Assim, será possível minimizar a perda de informação e eventuais variações de índice de refração impostas entre a inscrição das FBGs e o início do estudo.

Por forma a otimizar os parâmetros de ajuste ao modelo teórico, será necessário realizar ensaios térmicos onde as rampas de temperatura terão taxas de subida diferentes. Assim, será possível determinar valores de v_0 mais precisos.

7.3. PREVISÃO DE PUBLICAÇÕES RESULTANTES

Durante a realização desta dissertação, deu-se início à elaboração de um artigo científico (a ser submetido para uma revista internacional com revisão) e de uma publicação em conferência (OFS 25: *The International Conference on Optical Fiber Sensors*), ambos intitulados por “Resonant wavelength thermal stability of femtosecond FBGs”.

8. REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] R. Osellame, G. Cerullo, and R. Ramponi, *Femtosecond Laser Micromachining - Photonic and Microfluidic Devices in Transparent Materials*. 2012.
- [4] J. Rathje, M. Kristensen, and J. E. Pedersen, "Continuous anneal method for characterizing the thermal stability of ultraviolet Bragg gratings," *J. Appl. Phys.*, vol. 88, no. 2, p. 1050, 2000.
- [5] T. Erdogan, V. Mizrahi, P. J. Lemaire, D. Monroe, "Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings" *J. Appl. Phys.*, vol. 76, 1994.
- [6] D. Grobnic, C. W. Smelser, S. J. Mihailov, and R. B. Walker, "Long-term thermal stability tests at 1000 °C of silica fibre Bragg gratings made with ultrafast laser radiation," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 5, pp. 1009–1013, 2006.
- [7] A. Martinez, I. Y. Khrushchev, and I. Bennion, "Thermal properties of fibre Bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser," *Electron. Lett.*, vol. 41, no. 4, pp. 176–178, 2005.
- [8] M. Lancry, B. Pommellec, S. Costes, and J. Magné, "Reliable Lifetime Prediction for Passivated Fiber Bragg Gratings for Telecommunication Applications," *Fibers*, no. 6, pp. 92–107, 2014.
- [9] C. Zhang, Y. Yang, C. Wang, C. Liao, and Y. Wang, "Femtosecond-laser-inscribed sampled fiber Bragg grating with ultrahigh thermal stability," *Opt. Express*, vol. 24, no. 4, p. 3981, 2016.
- [10] L. Hoffmann, M. S. Müller, S. Krämer, and M. Giebel, "Applications of fibre optic temperature measurement," *Proc. Est. Acad. Sci. engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 363–378, 2007.
- [11] F. K. Coradin, V. De Oliveira, M. Muller, H. J. Kalinowski, and J. L. Fabris, "Long-term stability decay of standard and regenerated Bragg gratings tailored for high temperature operation," *J. Microwaves, Optoelectron. Electromagn. Appl.*, vol. 12, no. 2, pp. 719–729, 2013.
- [12] S. Yin, P. B. Ruffin, and F. T. S. Yu, *Fiber optic sensors*, 2nd Revise. 2008.
- [13] B. Lee, "Review of the present status of optical fiber sensors," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 57–79, 2003.
- [14] M. De Fátima F. Domingues, T. De Brito Paixão, E. F. T. Mesquita, N. Alberto, A. R. Frias, R. A. S. Ferreira, H. Varum, P. F. Da Costa Antunes, and P. S. De Brito André, "Liquid hydrostatic pressure optical sensor based on micro-cavity produced by the catastrophic fuse effect," *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 10, pp. 5654–5658, 2015.
- [15] Y. Shen, J. He, Y. Qiu, W. Zhao, S. Chen, T. Sun, and K. T. Grattan, "Thermal decay characteristics of strong fiber Bragg gratings showing high-temperature sustainability," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 24, no. 3, p. 430, 2007.
- [16] L. Lucas, "Femtosecond laser micromachining: A back-to-basics primer," 2012. [Online]. Disponível em: <http://www.industrial-lasers.com/articles/2012/06/femtosecond-laser-micromachining-a-back-to-basics-primer.html>. [Acedido: 04-Maio-2016].
- [17] J. Canning, S. Bandyopadhyay, P. Biswas, M. Aslund, M. Stevenson, and K. Cook, *Regenerated Fibre Bragg Gratings*, no. February. 2010.
- [18] B. Pommellec, I. Riant, and C. Tessier-Lescouret, "Precise life-time prediction using demarcation energy approximation for distributed activation energy reaction," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 18, no. 7, pp. 2199–2216, 2006.

-
- [19] S. Pawar, S. Kumbhaj, P. Sen, and P. K. Sen, "Fiber Bragg Grating Filter for Optical Communication : Applications and Overview," *Int. J. Adv. Electr. Electron. Eng.*, pp. 51–58, 2013.
- [20] M. Sumetsky and B. J. Eggleton, "Fiber Bragg gratings for dispersion compensation in optical communication systems," *J. Opt. Fiber Commun. Reports*, vol. 2, no. 3, pp. 256–278, Jul. 2005.
- [21] S. J. Mihailov, "Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments," pp. 1898–1918, 2012.
- [22] U. Sampath, H. Kim, D. Kim, Y. Kim, and M. Song, "In-Situ Cure Monitoring of Wind Turbine Blades by Using Fiber Bragg Grating Sensors and Fresnel Reflection Measurement," *Sensors*, vol. 15, pp. 18229–18238, 2015.
- [23] J. Yang, X. Dong, Y. Zheng, K. Ni, C. C. Chan, and P. P. Shum, "Magnetic field sensing with reflectivity ratio measurement of fiber Bragg grating," *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 3, pp. 1372–1376, 2015.
- [24] M. Ferreira, *Óptica e Fotónica*. Lidel, 2003.
- [25] R. Nogueira, "Redes de Bragg em fibra óptica," Universidade de Aveiro, 2005.
- [26] B. P. Pal, *Guided wave optical components and devices: basics, technology, and applications*. Academic Press, 2010.
- [27] T. Erdogan, "Fiber Grating Spectra," *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1277–1294, 1997.
- [28] C. J. Stanford, "Highly Sensitive Fiber Bragg Grating Biosensors," ProQuest, 2008.
- [29] N. Alberto, "Sensores de Bragg para bioaplicações Nélia Jordão Alberto Sensores de Bragg para bioaplicações," Universidade de Aveiro, 2011.
- [30] S. A. Slattery and D. N. Nikogosyan, "Fiber Bragg grating inscription by high-intensity femtosecond UV laser light : comparison with other existing methods of fabrication," *Opt. Soc. Am.*, vol. 22, no. 2, pp. 354–361, 2005.
- [31] A. Martinez, I. Khrushchev, and I. Bennion, "Direct inscription of Bragg gratings in coated fibers by an infrared femtosecond laser," *Opt. Lett.*, vol. 31, p. 1603-1605, 2006.
- [32] N.-L. Liu, S.-H. Liu, and P.-X. Lu, "A Femtosecond-Laser-Induced Fiber Bragg Grating with Supermode Resonances for Sensing Applications," *Chinese Phys. Lett.*, vol. 31, no. 9, p. 094-204, 2014.
- [33] S. C. Warren-Smith, L. V. Nguyen, C. Lang, H. Ebendorff-Heidepriem, and T. M. Monro, "Temperature sensing up to 1300°C using suspended-core microstructured optical fibers," *Opt. Express*, vol. 24, no. 4, p. 3714, 2016.
- [34] "Femtosecond laser glass processing," 2015. [Online]. Disponível em: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-30/issue-1/features/femtosecond-laser-glass-processing.html>. [Acedido: 04-Maio-2016].
- [35] D. Kinet, P. Mégret, K. W. Goossen, L. Qiu, D. Heider, and C. Caucheteur, "Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions," *Sensors*, vol. 14, no. 4, pp. 7394–7419, 2014.
- [36] S. Daud, M. Aziz, K. Chaudhary, M. Bahadoran, and J. Ali, "Sensitivity Measurement of Fibre Bragg Grating Sensor," *J. Teknol.*, vol. 9, pp. 277–280, 2015.
- [37] P. Antunes, "Sensores ópticos para monitorização dinâmica de estruturas," Universidade de Aveiro, 2011.
- [38] T. Elsmann, A. Lorenz, N. S. Yazd, T. Habisreuther, J. Dellith, A. Schwuchow, J. Bierlich, K. Schuster, M. Rothhardt, L. Kido, and H. Bartelt, "High temperature sensing with fiber Bragg gratings in sapphire-derived all-glass optical fibers," *Opt. Express*, vol. 22, no. 22, pp. 26825–26833, 2014.
- [39] B. Zhang and M. Kahrizi, "High-Temperature Resistance Fiber Bragg Grating Temperature Sensor Fabrication," *IEEE Sens. J.*, vol. 7, no. 4, pp. 586–591, 2007.
- [40] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*. Academic Press, 1999.
- [41] P. E. Dyer, A. M. Johnson, and C. D. Walton, "Inscription of fibre Bragg gratings in non-sensitised fibres using VUV F₂ laser radiation," *Opt. Express*, vol. 16, no. 23, pp. 19297–19303, 2008.