



**Maria Gonçalves
Almeida**

**Efeito De Radiação Ionizante Em Sensores Em Fibra
Ótica**



Universidade de Aveiro
2023

**Maria Gonçalves
Almeida**

**Efeito De Radiação Ionizante Em Sensores Em Fibra
Ótica**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Fernando da Costa Antunes, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, e do Doutor Marco António Baptista Peres, Investigador Auxiliar do Departamento de Engenharia e Ciências Nucleares do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.

o júri

Presidente

Professora Doutora Isabel Maria Coelho de Oliveira Malaquias
Professora Associada da Universidade de Aveiro

Arguente

Doutor Sérgio Nuno Canteiro de Magalhães
Investigador do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear do Instituto Superior Técnico da
Universidade Técnica de Lisboa

Orientador

Professor Doutor Paulo Fernando da Costa Antunes
Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Quero agradecer a todos os que estiveram envolvidos na realização desta dissertação.

Em primeiro lugar aos meus orientadores Doutor Paulo Fernando da Costa Antunes e Doutor Marco António Baptista Peres, e ao Mestre Luís Miguel Antunes Pereira por toda a ajuda na realização deste trabalho, pela constante disponibilidade para reuniões e esclarecimento de dúvidas, pelo acompanhamento na escrita da dissertação e na parte experimental, pelo conhecimento partilhado e pela dedicação.

Ao Doutor Carlos Davide da Rocha Azevedo pela disponibilidade para a realização de uma simulação no programa Geant 4, assim como para as reuniões e esclarecimento de dúvidas e pelo conhecimento transmitido.

Ao i3N - Instituto de Nanoestruturas, Nanomodelação e Nanofabricação, ao Departamento de Física da Universidade de Aveiro, ao Laboratório de Aceleradores e Tecnologias de Radiação (LATR), ao Laboratório de Protecção e Segurança Radiológica (IST-LPSR) do Instituto do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa e ao Instituto de Telecomunicações (IT) pelas condições oferecidas e que me permitiram a realização deste trabalho. Em especial, agradecer a disponibilidade e apoio na execução experimental no IT queria agradecer à Doutora Nélia Alberto, e no Campus Tecnológico e Nuclear queria agradecer aos professores Doutora Ana Fernandes do IST-LPSR, Doutor Pedro Santos e Doutor Luís Cerqueira Alves investigadores do Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares (C2TN) do Instituto Superior Técnico e ao técnico do LATR Jorge Rocha.

À minha amiga Sara por me ter acolhido na sua casa em Lisboa durante os dias em que realizei a parte experimental deste trabalho no Campus Tecnológico e Nuclear do Instituto Superior Técnico e pela companhia e apoio. E à minha amiga e colega de curso Marta pela mútua companhia na escrita das nossas dissertações de mestrado.

Por fim, um agradecimento especial aos meus pais, ao meu irmão e ao meu namorado que me apoiam diariamente e incondicionalmente em todos os momentos da minha vida. Quero agradecer também a minha restante família e amigos.

Muito obrigada a todos!

palavras-chave

Sensores, Fibra ótica de sílica, Fibra ótica polimérica, Rede de Bragg, Radiação gama, Protões

resumo

As fibras óticas e as redes de Bragg em fibras óticas têm vantagens significativas para muitas aplicações em ambientes com radiação, seja como sensores de temperatura ou dosímetros. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo contribuir para o conhecimento do impacto da radiação em diferentes tipos de fibras óticas e de sensores baseados em Redes de Bragg.

Posto isto, investigamos o impacto da radiação sem carga (gama) e radiação de partículas carregadas (protões) na transmissão de três fibras óticas diferentes: fibra de sílica monomodo dopada com Boro e Germânio (PS1250/1500 da FiberCore), fibra de sílica multimodo dopada com Germânio (GIF625-100 da Thorlabs) e fibra polimérica CYTOP (GigaPOF-50SR da Chromis Fiberoptics). A dependência espectral da atenuação induzida pela radiação nas fibras foi investigada na gama espectral do UV, visível e infravermelho próximo (200 nm a 1100 nm). Todas as fibras demonstraram ser sensíveis aos dois tipos de radiação em alguma parte da gama espectral estudada.

Também foram estudados os efeitos dos mesmos tipos de radiação em redes de Bragg inscritas nas fibras de sílica mencionadas (monomodo e multimodo). Para a radiação gama foi adicionalmente estudado os efeitos em duas redes de Bragg, operacionais em regiões espectrais diferentes (800 nm e 1550 nm), inscritas numa fibra ótica polimérica microestruturada de PMMA dopada com Benzildimethylketal.

No caso da radiação gama, observou-se que todas as redes de Bragg são sensíveis à radiação, sendo as redes de Bragg em fibra polimérica apresentam uma sensibilidade superior. Pelo que no futuro pode ser explorado o potencial destas redes de Bragg para aplicações de dosimetria.

No caso da radiação de partículas carregadas, observou-se os efeitos de duas energias diferentes do feixe de protões. Para ambas as redes de Bragg investigadas (em sílica monomodo e multimodo), no caso do feixe de menor energia observou-se um desvio negativo dos comprimentos de onda de Bragg e para a maior energia um desvio positivo. Sugere-se que no primeiro caso os efeitos da radiação são maioritariamente na bainha da fibra e no segundo no núcleo da fibra. Relativamente ao estudo com o feixe de maior energia, destaca-se o potencial destas FBGs para o desenvolvimento de um sensor multiparâmetros de temperatura e radiação.

keywords

Sensors, Silica Optical Fiber, Polymeric Optical Fiber, Fiber Bragg Grating, Gamma Radiation, Protons

abstract

Optical fibers and Fiber Bragg Gratings have significant advantages for many applications in environments with radiation, whether as temperature sensors or dosimeters. In this context, the present work aims to contribute to the knowledge of the impact of radiation on different types of optical fibers and Fiber Bragg Gratings based sensors.

It was investigated the impact of uncharged radiation (gamma) and charged particle radiation (protons) on the transmission of three different optical fibers: single-mode silica fiber doped with Boron and Germanium (PS1250/1500 from FiberCore), multimode silica fiber doped with Germanium (GIF625-100 from Thorlabs) and CYTOP polymer fiber (GigaPOF-50SR from Chromis Fiberoptics). The spectral dependence of radiation-induced attenuation on the fibers was investigated in the spectral range of UV, visible and near infrared (200 nm to 1100 nm). The fibers showed sensitivity to both types of radiation in some part of the spectral range studied.

The effects of the same types of radiation on Fiber Bragg Gratings inscribed on the aforementioned silica fibers (single-mode and multimode) were also studied. For gamma radiation, the effects on two Fiber Bragg Gratings, operational in different spectral regions (800 nm and 1550 nm), in a microstructured polymeric optical fiber of PMMA doped with Benzildimethylketal, were studied.

In gamma irradiation, it was observed that all Fiber Bragg Gratings are sensitive to radiation, and those inscribed in polymeric fiber have higher sensitivity. Therefore, the potential of these Bragg gratings for dosimetry applications can be explored in the future.

In charged particle irradiation, the effects of two different energies of the proton beam were observed. For both Fiber Bragg Gratings investigated (single-mode and multimode silica), in the case of the lower energy beam there was a negative shift of the Bragg wavelengths and for the higher energy a positive shift. It was suggested that in the first case the effects of radiation are mostly on the fiber cladding and in the second on the fiber core. Regarding the study with the highest energy beam, the potential of these Fiber Bragg Gratings for the development of a multiparameter temperature and radiation sensor is highlighted.

Índice

Glossário de acrónimos	i
Lista de figuras.....	ii
Lista de tabelas	v
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Estrutura da dissertação	3
Capítulo 2 - Sensores baseados em FBG	4
2.1 Princípio físico	5
2.2 Fotossensibilidade.....	6
2.3 Gravação de redes de Bragg em fibra ótica	6
2.4 FBGs em POF	8
Capítulo 3 - Efeito da radiação na matéria	9
3.1 Tipos de radiação	9
3.1.1 Partículas carregadas: protões	9
3.1.2 Partículas sem carga: raios gama.....	10
3.2 Efeitos da radiação em fibras óticas	12
3.3 Efeitos da radiação nas FBGs	14
Capítulo 4 - Fabricação e caracterização dos sensores FBG	16
4.1 Processo de fabricação	16
4.2 Caracterização da sensibilidade à temperatura	18
4.3 Caracterização da sensibilidade à humidade	19
Capítulo 5 - Irradiação com radiação γ	20
5.1 Irradiação de diferentes fibras óticas.....	21
5.2 Irradiação de diferentes FBGs	23
5.2.1 Exposição das FBGs a radiação gama.....	24
5.2.2 Com material de acumulação “build up”	27
5.2.3 Recuperação	30
5.2.4 Sensibilidade térmica e à humidade relativa das FBGs após irradiação	30
Capítulo 6 - Irradiação com protões	31
6.1 Exposição de diferentes fibras óticas a um feixe de protões	31
6.1.1 Resultados de Irradiação da fibra SOF-SM.....	33
6.1.2 Resultados de Irradiação da fibra SOF-MM	35
6.1.3 Resultados de Irradiação da fibra CYTOP-MM-POF	37
6.2 Exposição FBGs em fibras de sílica a um feixe de protões	38
6.2.1 Efeitos da radiação no desempenho das FBGs	42

6.2.2 Recuperação dos efeitos causados pela irradiação.....	43
6.2.3 Sensibilidade térmica das FBGs após a irradiação.....	44
Capítulo 7 - Conclusões e trabalho futuro	44
7.1 Conclusões	44
7.2 Trabalho futuro.....	46
Capítulo 8 - Referência.....	47

Glossário de acrónimos

BDK	<i>Benzil Dimethyl Ketal</i>	
CYTOP	<i>Cyclic Transparent Optical Polymer</i>	
F	<i>Fiber</i>	Fibra
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>	Rede de Bragg em Fibra Ótica
FS	<i>Femtosecond</i>	Femtosegundo
FWHM	<i>Full Width At Half Maximum</i>	Largura a Meia Altura
GI	<i>Graded Index</i>	Índice Gradual
mPOF	<i>Microstructured Polymer Optical Fiber</i>	Fibra Ótica Polimérica Microestruturada
MF	<i>Phase Mask</i>	Máscara de Fase
MM	<i>Multimode</i>	Multimodo
PMMA	<i>Polymethyl methacrylate</i>	
POF	<i>Polymer Optical Fiber</i>	Fibra Ótica Polimérica
POFBG	<i>Polymer Optical Fiber Bragg Grating</i>	Rede de Bragg em Fibra Ótica Polimérica
RI-BWS	<i>Radiation-Induced Bragg Wavelength Shift</i>	Desvio do comprimento de onda de Bragg induzido por radiação
RIA	<i>Radiation-Induced Attenuation</i>	Atenuação Induzida por Radiação
RIC	<i>Radiation-Induced Compaction</i>	Compactação Induzida por Radiação
RIRIC	<i>Radiation-Induced Refractive-Index Change</i>	Alteração do índice de refração induzida por radiação
RIE	<i>Radiation-Induced Emission</i>	Emissão induzida por radiação
S	<i>Sensor</i>	Sensor
SI	<i>Step Index</i>	Índice em Degrau
SM	<i>Singlemode</i>	Monomodo
SOF	<i>Silica Optical Fiber</i>	Fibra ótica de sílica
UV	<i>Ultraviolet</i>	Ultravioleta

Lista de figuras

Figura 2.1 - Esquema representativo da estrutura e princípio de funcionamento de uma fibra ótica com uma rede de Bragg. Adaptado de [7]	5
Figura 2.2 – Esquema do método da máscara de fase. Imagem adaptada de [24].	7
Figura 3.1 – Interação da radiação gama com a matéria: a) dispersão de Compton, b) efeito fotoelétrico e c) produção de pares. As letras K, L e M correspondem as camadas eletrônicas. Figuras adaptadas de [53]. ...	11
Figura 3.2 - Importância relativa dos três principais tipos de interação de raios gama com a matéria. Adaptado de [3].	12
Figura 3.3 – Efeitos da radiação nas FBGs: desvio do comprimento de onda de Bragg e variação da refletividade da rede.	14
Figura 4.1 - Esquema da montagem experimental do sistema de gravação baseado na técnica da máscara de fase, implementado no Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Adaptado de [65].	17
Figura 4.2- Variação do comprimento de onda em função da temperatura dos sensores: FBG-SM-1550, FBG-MM-1550, FBG-PMMA-1550 e FBG-PMMA-800. Os pontos representam os dados experimentais e as linhas retas os respetivos ajustes lineares.	18
Figura 4.3 – Variação do comprimento de onda com a variação da humidade relativa, à temperatura de aproximadamente 25°C, e reta de ajuste linear da FBG-PMMA-800 (esquerda) e da FBG-PMMA-1550 (direita).	19
Figura 5.1 – Câmara de irradiação da PRECISA22: a) fotografia do interior da câmara e b) esquema da secção transversal com as 4 fontes de ⁶⁰ Co.	20
Figura 5.2 – Esquema da montagem experimental da exposição de diferentes fibras óticas à radiação gama.	21
Figura 5.3 – Espectros de transmissão ótica antes (preto) e após aproximadamente 3 horas de exposição à radiação gama (vermelho) da fibra: SOF-SM, SOF-MM e CYTOP-MM-POF.	22
Figura 5.4 – Razão de intensidade ótica transmitida entre dois comprimentos de onda ao longo do tempo de irradiação (em horas) para a fibra SOF-SM: a) 400/865 nm, b) 580/865 nm e c) 750/865 nm.	22
Figura 5.5 – Razão de intensidade ótica transmitida entre dois comprimentos de onda ao longo do tempo de irradiação (em horas) para a fibra SOF-MM: a) 400/865 nm, b) 580/865 nm e c) 750/865 nm.	22
Figura 5.6 – Razão de intensidade ótica transmitida entre dois comprimentos de onda ao longo do tempo de irradiação (em horas) para a fibra CYTOP-MM-POF: a) 400/865 nm, b) 580/865 nm e c) 750/865 nm.	22
Figura 5.7 – Esquema do cilindro, com 12 mm de diâmetro externo com um furo no meio de 3 mm de diâmetro “build up” com uma FBG no seu interior.	24
Figura 5.8 – Esquema da montagem experimental usada para a exposição de diferentes FBGs à radiação gama.	24
Figura 5.9 – Desempenho da FBG-MM-1550 sob radiação gama: a) variação do comprimento de onda de Bragg em função do tempo de irradiação e b) a variação da amplitude do pico principal da rede de Bragg ao longo do tempo de irradiação.	24
Figura 5.10 - Desempenho da FBG-SM-1550 sob radiação gama: a) variação do comprimento de onda de Bragg em função do tempo de irradiação e b) variação da amplitude do pico da rede de Bragg ao longo do tempo de irradiação.	25
Figura 5.11 - Desempenho da FBG-PMMA-1550 sob radiação gama: a) variação do comprimento de onda de Bragg em função do tempo de irradiação e b) variação da refletividade da rede de Bragg ao longo do tempo de irradiação. E desempenho da FBG-PMMA-800 sob radiação gama: c) variação do comprimento de onda de Bragg em função do tempo de irradiação.	26
Figura 5.12 - Depósito de energia (escala de cores em Gy [SiO ₂]) e profundidade de penetração (escala à esquerda e em baixo em μm) da radiação gama na: a) fibra SOF-SM e b) fibra SOF-SM no interior do build up.	27

<i>Figura 5.13 – Variação do comprimento de onda em função do tempo de irradiação (à esquerda da linha vermelha) e após a irradiação parar (à direita da linha vermelha) desta para a: FBG-MM-1550 (preto), FBG-SM-1550 (azul), FBG-PMMA-1550 (roxo) e FBG-PMMA-800 (verde).</i>	28
Figura 5.14 - Sensibilidade térmica antes (cor clara) e depois (cor escura) da exposição à radiação gama dos sensores: a) FBG-SM-1550 (azul) e FBG-MM-1550 (vermelho) e b) FBG-PMMA-1550 (roxo) e FBG-PMM-800 (verde). Sensibilidade à humidade relativa (cor clara) e depois (cor escura) da exposição à radiação gama dos sensores FBG-PMMA-1550 (roxo) e FBG-PMMA-800 (verde).....	30
Figura 6.1 – Esquema da montagem experimental da irradiação de diferentes fibras óticas com um feixe de prótons, no interior de uma câmara de vácuo.	32
Figura 6.2 – Fotografias da montagem experimental no interior da câmara de vácuo onde foi realizada a irradiação.....	32
Figura 6.3 – Profundidade de penetração (escala à direita e em baixo em μm) e depósito de energia (escala de cores corresponde em Gy [SiO ₂] para a) e b) e em Gy [policarbonato] para c)) por um feixe de prótons com 3 MeV de energia na fibra ótica: a) SOF-SM, b) SOF-MM e c) CYTOP-MM-POF.	33
Figura 6.4 – Irradiação da fibra SOF-SM: a) espectro de transmissão da fibra SOF-SM, antes (preto) e no final de 29 minutos de irradiação (vermelho) com um feixe de prótons, b) RIA em função do comprimento de onda para diferentes tempos de irradiação (doses) e c) variação da RIA ao longo do tempo de irradiação para dois comprimentos de onda na região afetada pela radiação (486,5 nm e 581,9 nm).	34
Figura 6.5 – Recuperação da transmissão ótica da fibra SOF-SM. Em a) estão representados os espectros de transmissão ótica da fibra antes (preto), no final de 29 minutos de irradiação (vermelho) e algum tempo após a irradiação parar (azul). Em b) é apresentada a razão entre a intensidade de um determinado comprimento de onda (afetado pela radiação) com a intensidade de outro de referência (não afetado pela irradiação de 925,162 nm) para a pré-irradiação (1º ponto), final da irradiação (2º ponto) e algum tempo após a irradiação parar (3º ponto-recuperação).	35
Figura 6.6 - Irradiação da fibra SOF-MM: a) espectro de transmissão da fibra SOF-SM, antes (preto) e no final de aproximadamente 4 minutos de irradiação (vermelho) com um feixe de prótons, b) RIA em função do comprimento de onda para diferentes tempos de irradiação (doses) e c) variação da RIA ao longo do tempo de irradiação para dois comprimentos de onda na região afetada pela radiação (486,5 nm e 581,9 nm). ...	36
Figura 6.7 – Recuperação da transmissão ótica da fibra SOF-MM. Em a) estão representados os espectros de transmissão ótica da fibra antes (preto), no final de aproximadamente 4 minutos de irradiação (vermelho) e algum tempo após a irradiação parar (azul). Em b) é apresentada a razão entre a intensidade de um determinado comprimento de onda (afetado pela radiação) com a intensidade de outro de referência (não afetado pela irradiação de 925,162 nm) para a pré-irradiação (1º ponto), final da irradiação (2º ponto) e algum tempo após a irradiação parar (3º ponto - recuperação).	36
Figura 6.8 - Irradiação da fibra CYTOP-MM-POF: a) espectro de transmissão da fibra SOF-SM, antes (preto) e no final de aproximadamente 15 minutos de irradiação (vermelho) com um feixe de prótons, b) RIA em função do comprimento de onda para diferentes tempos de irradiação (doses) e c) variação da RIA ao longo do tempo de irradiação para dois comprimentos de onda na região afetada pela radiação (830,3 nm e 970,2 nm). ...	37
Figura 6.9 - Recuperação da transmissão ótica da fibra CYTOP-MM-POF. Em a) estão representados os espectros de transmissão ótica da fibra antes (preto), no final de aproximadamente 15 minutos de irradiação (vermelho) e algum tempo após a irradiação parar (azul). Em b) é apresentada a razão entre a intensidade de um determinado comprimento de onda (afetado pela radiação) com a intensidade de outro de referência (não afetado pela irradiação de 355,755 nm) para a pré-irradiação (1º ponto), final da irradiação (2º ponto) e algum tempo após a irradiação parar (3º ponto - recuperação).....	38
Figura 6.10 – Fotografia da montagem experimental usada na exposição das FBGs ao feixe de prótons (figura da esquerda e do meio) e parte de trás do colimador de chumbo onde estão colocadas as FBGs (figura da direita).	38
Figura 6.11 - Simulação de um feixe de prótons de energia 1,7 MeV a incidir nas fibras de sílica: a) SOF-SM e b) SOF-MM.	39

Figura 6.12 – Desvio do comprimento de onda de Bragg das FBG-SM-1550 e FBG-MM-1550 quando expostas a um feixe externo de prótons de 1,7 MeV de energia. O gráfico à direita ilustra os desvios do comprimento de onda de Bragg da FBG-MM-1550 quando o feixe de prótons foi interrompido duas vezes consecutivas.	39
Figura 6.13 – Esquema da montagem experimental usada para irradiar simultaneamente as duas FBGs de sílica.....	42
Figura 6.14 - Exposição da FBG-SM-1550 (azul) e FBG-MM-1550 (vermelho) a um feixe de prótons de 3 MeV de energia durante 4 irradiações com fluxos e fluências diferentes. Os gráficos representam: a) a variação do comprimento de onda de Bragg induzido por radiação e b) a variação da potência ótica induzida por radiação.	42
Figura 6.15 – Sensibilidade térmica antes (cor clara) e depois (cor escura) da exposição a um feixe de prótons dos sensores: a) FBG-SM-1550 (azul) e FBG-MM-1550 (vermelho).....	44

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Características das diferentes FBGs estudadas.....	16
Tabela 4.2 – Fibras óticas estudadas.....	16
Tabela 4.3 – Sensibilidades térmica para cada FBG em estudo.....	18
Tabela 4.4 – Sensibilidades à humidade relativa, à temperatura de aproximadamente 25°C, das FBGs em fibra de PMMA na região espectral dos 800nm e 1550 nm.....	19
Tabela 5.1 – Desvio do comprimento de onda de Bragg para as FBGs em fibra de sílica: total observado durante a experiência (1ªcoluna); devido à variação de temperatura total (2ªcoluna) e induzido pela radiação (3ªcoluna) usando a expressão 5.1.....	25
Tabela 5.2 - Desvio do comprimento de onda de Bragg para as FBGs em fibra PMMA-mPOF: total observado com a irradiação (1ªcoluna); devido à variação de temperatura total (2ªcoluna) e induzido pela radiação (3ªcoluna).....	26
Tabela 5.3 - Desvio do comprimento de onda de Bragg para as FBGs irradiadas com build up: total observado durante a irradiação (1ªcoluna); devido à variação de temperatura (2ªcoluna) e induzido pela radiação (3ªcoluna).....	29

Capítulo 1 - Introdução

A radiação ionizante consiste em radiação com energia suficiente para remover um elétron, direta ou indiretamente, de um átomo ou molécula. Alguns exemplos deste tipo de radiação são: raios X, raios gama, neutrões, elétrons, prótons e partículas pesadas [1]. Esta radiação é usada em diversas áreas, como: nuclear, indústria, medicina, aeroespacial, militar, entre outras. Devido aos efeitos da radiação ionizante no ambiente e no corpo humano, são essenciais dispositivos precisos de monitoramento e dosimetria da radiação [2].

Têm sido estudados vários sensores para dosimetria de radiação ionizante, baseados em materiais semicondutores e cintiladores [3]. No entanto, como estes sensores usam sinais elétricos sofrem facilmente interferência com campos eletromagnéticos ou outras fontes de radiação, o que pode afetar a sua performance em algumas condições. Já os sensores de fibra ótica são menos suscetíveis a interferências de campos eletromagnéticos externos, uma vez que os materiais geralmente utilizados na fibra não são condutores, podem ser utilizados em ambiente húmidos ou aquáticos sem encapsulamentos especiais e não necessitam de energia elétrica no ponto de medição. Deste modo os sensores de fibra ótica têm sido alvo de interesse e investigação por parte da comunidade científica para detecção de radiação. Além disso, devido às suas características materiais e estruturais, estes sensores apresentam outras vantagens para a detecção de radiação. Por exemplo são pequenos, leves e flexíveis e conseqüentemente, podem ser inseridos em ambientes estreitos, curvos e complexos, como no interior do corpo humano [2].

Uma outra vantagem associada aos sensores de fibra ótica é que são facilmente multiplexados, e por exemplo, para monitorar a temperatura numa grande área com elevados níveis de radiação, uma única fibra pode substituir vários termopares, não só economizando desta forma o material utilizado, mas também otimizando o sistema, simplificando-o [4]. No entanto, neste caso é essencial garantir que as medições realizadas pelos sensores de fibra não são afetadas pela exposição à radiação, nem a transmissão de informação através da fibra ótica [4,5,6]. Por exemplo, têm sido investigadas as possibilidades de aplicar comunicações óticas nas centrais nucleares, não apenas fora das áreas de contenção, mas também dentro de zonas com radiação [6].

Tendo em conta a elevada potencialidade deste tipo de sensores para ambientes de elevada radiação ambiente, estes tem espoletado um interesse cada vez maior na comunidade científica, tendo sido publicado nos últimos anos vários trabalhos sobre os efeitos da radiação ionizante em sensores baseados em fibras óticas [2,7,8,9,10,11].

Recentemente, S. Girard et al. [11], publicaram um artigo de revisão dos defeitos pontuais induzidos por radiação em fibras óticas de sílica. Neste descrevem os principais efeitos da radiação nas fibras óticas:

- atenuação induzida pela radiação – diminuição da capacidade de transmissão da fibra associada as bandas de absorção de defeitos pontuais gerados pela radiação, no núcleo ou na bainha da fibra, através de processos de ionização e/ou danos por deslocamento [4,11];
- emissão induzida pela radiação – pode ocorrer produção de luz no interior do núcleo da fibra ótica com origem na radiação de Cerenkov emitida por partículas energéticas ou no fenómeno de fotoluminescência de alguns defeitos, pré-existentes ou induzidos pela radiação [11].
- e alterações no índice de refração induzidas pela radiação.

Estas mudanças dependem de vários parâmetros, relacionados com a própria fibra (composição e processo de fabrico) ou fatores extrínsecos (como as características da irradiação). O artigo em questão discute principalmente a respostas de 4 tipos de fibras óticas diferentes baseadas em sílica a irradiações com raios-X e radiação gama. São analisados os defeitos pontuais relacionados com a sílica, Ge, P e Al e como os defeitos conhecidos podem explicar a atenuação induzida pela radiação. Uma vez que a compreensão dos mecanismos de geração e de aniquilação dos defeitos pontuais, assim como, a identificação das propriedades óticas e estabilidades térmicas desses defeitos permite desenvolver formas de controlar a resposta das fibras à radiação, para otimizar a resistência ou a sensibilidade destas. Apesar do elevado número de estudos sobre os efeitos da radiação ionizante em fibras óticas como é exemplo o trabalho de revisão de [11], o seu efeito na formação de defeitos de diferente natureza continua a ser controverso.

Para além das fibras baseadas em sílica, os efeitos da radiação em fibras óticas de plástico também têm sido alvo de investigação [6,12,13,14]. As principais vantagens destas fibras em ambientes com radiação são a sua alta sensibilidade e baixo custo operacional em termos de equipamentos. Além disso, são mais flexíveis e menos quebradiças que as fibras de sílica e são biocompatíveis [15].

Um estudo recente, apresentado por A. Fernandez et al., [16], demonstra que fibras baseadas em polimetilmetacrilato (PMMA) apresentam um limite em termos de dose total, situado entre 100 Gy e 1000 Gy, acima do qual passa a evidenciar efeitos devido à exposição à radiação. Tendo sido observado um claro aumento na atenuação da fibra, conforme a dose de radiação gama total aumentava, nos comprimentos de onda mais baixos (de 400 nm a 700 nm). No entanto, comprimentos de onda maiores não foram significativamente afetados (até 800 nm). O aumento da atenuação em comprimentos de onda menores sugere que uma alta dose total de radiação não induz apenas a separação das cadeias laterais da molécula de PMMA, mas também afeta a estrutura principal do polímero. Para este tipo de fibras observou-se uma considerável diminuição na atenuação induzida pela radiação após uma semana depois da irradiação. A recuperação da intensidade pode ter origem no rearranjo espontâneo das cadeias poliméricas que foram danificadas durante a irradiação. Por fim, foi proposto que esta fibra possa ser usada como dosímetro de radiação gama em tempo real. Foi apresentado um esquema para obter a informação da dose, através da razão da atenuação medida em dois comprimentos de onda cuidadosamente escolhidos, sem considerar a intensidade absoluta de potência ótica [16].

Têm também sido reportados estudos da influência da radiação na transmissão ótica da fibra polimérica CYTOP (*cyclic transparent optical polymer*) [13,15,17]. Recentemente foi apresentado um estudo complexo sobre os efeitos da radiação gama nesta fibra realizado por P. Stajanca et al. [17]. Foi observado que a atenuação induzida pela radiação varia com comprimento de onda. A região de comprimento de onda onde os efeitos da radiação no desempenho desta fibra foram mínimos foi em torno de 1,1 μm . Por outro lado, a fibra apresentou potencial como dosímetro baseado na atenuação induzida por radiação na região visível, nomeadamente com sensibilidade de $259 \pm 8 \text{ dBm}^{-1}/\text{kGy}$ para 450 nm. Foi ainda observada uma diminuição da estabilidade térmica e um aumento suscetibilidade da fibra à água [17].

Como já referido, a resposta das fibras óticas à radiação depende de vários parâmetros, sendo, portanto, muito importante testar previamente a resposta de uma fibra específica destinada a ser usada num ambiente com radiação, a essa radiação [7]. Neste trabalho, são estudados os efeitos da radiação gama e de partículas carregadas (prótons) em três fibras diferentes: fibra monomodo de sílica com o núcleo dopada com boro e germânio, fibra multimodo de sílica dopada com germânio e fibra polimérica CYTOP. Com o objetivo de analisar o desempenho destas fibras como dosímetros óticos em tempo real nestes ambientes.

O desempenho dos sensores de fibra ótica baseado em redes de Bragg sob radiação também têm sido alvo de interesse por parte da comunidade científica, como já foi referido anteriormente [7,8,18,19,20]. Resumidamente uma FBG consiste numa estrutura de modulação do índice de refração ao longo do núcleo da fibra ótica (tipicamente com alguns milímetros a alguns centímetros de comprimento) fabricada através da exposição da fibra a um padrão periódico de radiação UV, com recurso a um feixe laser. O que resulta num pico no espectro de reflexão ótica (e num vale no espectro de transmissão), cuja posição é conhecida como comprimento de onda de Bragg. Quando certos parâmetros ambientais mudam (temperatura, deformação, pressão e humidade), se fibra for sensível a esse parâmetro, observa-se um deslocamento espectral do comprimento de onda de Bragg [7]. Atualmente, sabe-se que a radiação influencia o desempenho da FBG, principalmente através de dois efeitos: desvio do comprimento de onda de Bragg e variação da amplitude do pico correspondente. Há vários parâmetros que influenciam a resposta à radiação, tais como: as condições de inscrição do sensor, a própria fibra, os tratamentos realizados antes ou após a inscrição da FBG e as condições de irradiação (natureza, dose, taxa de dose e temperatura) [7].

Inicialmente os estudos dos efeitos da radiação nas FBGs, focaram-se principalmente no desenvolvimento de FBGs resistentes à radiação, destinadas a serem usadas em aplicações de medição de temperatura e deformação em ambientes nucleares sujeitos a radiação [9,21,22]. Mais tarde foi sugerido que as próprias FBGs poderiam ser utilizadas como sensores de alta dose de radiação [23].

Em 2013, Gusarov e Hoeffgen publicaram um artigo de revisão dos efeitos da radiação em diferentes tipos de FBGs [8]. Destacam que o desenvolvimento das técnicas de fabrico de redes de Bragg resultaram num progresso significativo tanto na produção de FBGs com alta sensibilidade, bem como resistentes à radiação. Este avanço, por sua vez, expandiu as possibilidades para a aplicação das FBGs em ambientes sujeitos a radiação. No entanto neste trabalho de revisão [8] foi referida a necessidade do desenvolvimento de modelos, que possam prever o comportamento de diferentes tipos de redes em condições específicas de radiação, para a dosimetria baseada em FBGs.

Estudos recentes dos efeitos da radiação em FBGs foram publicados por Morana et al ([7]), onde são apresentados os avanços, realizados nos últimos anos, relacionados com a vulnerabilidade e resistência das FBGs quando expostas à radiação. Nesse artigo são revistos os principais parâmetros que influenciam a

resposta das FBGs à radiação e os mecanismos básicos associados. Neste trabalho de revisão é referido que a gravação de uma rede numa fibra resistente à radiação não garante que uma FBG seja resistente à radiação, e que a resistência da FBG à radiação depende fortemente da aplicação. Os investigadores sugerem que devido aos vários estudos de endurecimento realizados pela comunidade científica, os sensores baseados em FBGs resistentes à radiação parecem uma solução muito promissora para monitorizar parâmetros ambientais nos ambientes de radiação mais desafiantes [7].

Neste contexto o objetivo principal desta dissertação de mestrado é contribuir para clarificar quais os efeitos de vários tipos de radiação ionizante em diferentes tipos de sensores, do tipo FBGs, gravados em diferentes tipos de fibras óticas, poliméricas e à base de sílica. Em particular, ao longo desta tese será analisada a resposta de cada FBG à radiação e quando possível será feita uma comparação tendo em conta diferentes parâmetros, como: dimensão da fibra, composição da fibra, região espectral de operação e tipo de radiação. Pretendemos que os resultados obtidos contribuam para o conhecimento científico da influência da radiação ionizantes no desempenho das FBGs. E que, no futuro, sistemas baseados nas FBGs analisadas neste estudo possam ser desenvolvidos para implantação em ambientes sujeitos a radiação ionizante, seja como sensores ou dosímetros. De uma forma resumida, neste presente trabalho são apresentadas e discutidas as respostas de diferentes FBGs à radiação gama e a protões. Com este objetivo foram estudados os seguintes tipos de FBGs: 1 FBG em fibra monomodo de sílica com núcleo dopado com boro e germânio na região espectral dos 1550 nm; 1 FBG em fibra multimodo de sílica dopada com germânio com pico de Bragg na região espectral dos 1550 nm; 2 FBGs em fibra monomodo de PMMA com o núcleo dopado com BDK, uma na região espectral dos 1550 nm e outra em 800 nm;

1.1 Estrutura da dissertação

Esta tese está organizada em 7 capítulos.

Neste primeiro capítulo é apresentada uma breve introdução do estado de arte dos efeitos da radiação ionizante em sensores de fibra ótica, em particular nas próprias fibras óticas e em FBGs, assim como os objetivos deste trabalho.

No segundo capítulo são descritos alguns conceitos teóricos das FBGs, como, o princípio de funcionamento e diferentes técnicas para a gravação das redes de Bragg.

O terceiro capítulo é dedicado a interação da radiação com a matéria. Particularmente aos efeitos da radiação em fibras óticas (sílica e poliméricas) e nos sensores de fibra ótica baseados em redes de Bragg.

No quarto capítulo é descrito o processo de gravação de cada FBG usada neste trabalho. Foram usados 3 tipos de fibra: sílica monomodo dopada com Boro e Germânio, sílica multimodo dopada com Germânio e PMMA dopado com *benzildimethylketal* (BDK). Neste capítulo também são analisados os resultados obtidos experimentalmente da caracterização à temperatura e humidade relativa.

No quinto capítulo são apresentados os resultados da exposição das fibras óticas e das FBGs à radiação gama. Relativamente às fibras óticas é analisada a influência da radiação na transmissão ótica do sinal ao longo das fibras. Quanto às FBGs é analisada a resposta destes sensores sob irradiação, particularmente, a variação de potência ótica e o desvio do comprimento de onda de Bragg.

No sexto capítulo, é feita uma análise semelhante, mas sob exposição a um feixe de protões. É apresentada uma discussão detalhada dos resultados e avaliada a sensibilidade das fibras óticas e das FBGs, em estudo, a este tipo de radiação.

Por fim, no sétimo capítulo, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho e algumas perspetivas de trabalho futuro.

Capítulo 2 - Sensores baseados em FBG

Um guia de onda ótico é formado por uma região central com um certo índice de refração (núcleo) cercada geralmente por um meio ótico com índice de refração menor que o do núcleo (bainha). Devido às diferenças do índice de refração, a luz pode ser confinada dentro do núcleo através de reflexão interna total. A fibra ótica corresponde a um guia de onda ótico com geometria cilíndrica [24].

Quando a transmissão da luz ao longo de uma fibra ótica é limitada a um único modo de propagação, este tipo de fibra é chamado de fibra monomodo (tipicamente o núcleo apresenta um diâmetro entre 8 μm e 10 μm). Por outro lado, quando vários modos são propagados ao longo do núcleo, designa-se de fibra multimodo. O número de modos de propagação suportados por uma fibra é determinado por um parâmetro chamado frequência normalizada, que depende do diâmetro do núcleo, do comprimento de onda do feixe e da abertura numérica. Uma fibra ótica é considerada monomodo quando a frequência normalizada é inferior a 2,405, para valores superiores, dir-se-á multimodo [25]. Existem dois tipos de fibras multimodo, com índice degrau (variação descontínua do índice de refração na interface núcleo-bainha) e com índice gradual (índice de refração no núcleo decresce desde o centro do núcleo até à interface com a bainha). Estas fibras possuem núcleo de maiores dimensões, tipicamente entre 50 μm e 62,5 μm . Um dos parâmetros que limita a utilização de fibra multimodo, em especial para longas distâncias, é a dispersão intermodal que resulta do facto de cada modo de propagação ter um valor diferente da sua velocidade de grupo para o mesmo comprimento de onda, que depende do caminho percorrido no interior da fibra. Desta forma, para uma fibra multimodo, os diferentes modos que constituem o impulso, percorrem o comprimento total da fibra ótica em diferentes tempos, provocando um alargamento temporal do impulso e limitando a largura de banda. No entanto, o preço associado à utilização de uma fibra multimodo é mais baixo, sendo a fibra monomodo adequada para aplicações de longa distância, enquanto a multimodo é projetada para aplicações de curta distância [26].

A tecnologia da fibra ótica passou por um grande desenvolvimento e avanço nas últimas décadas [27]. Foram desenvolvidas fibras para transmissão de dados a longa distância sendo que a comunicação por fibra ótica revolucionou a indústria das telecomunicações, proporcionando um maior desempenho, mais canais de telecomunicações confiáveis com custo de largura de banda cada vez menor [27,28]. Em 1977, começou o desenvolvimento de sensores de fibra ótica, embora algumas demonstrações isoladas precederam esta data [28]. Atualmente, as fibras óticas são usadas tanto no domínio das comunicações óticas como no domínio da instrumentação, interferómetros e sensores [29,30].

Existem vários tipos diferentes de sensores de fibra ótica, com diferentes princípios de funcionamento: modulação de intensidade, interferometria, efeitos de polarização, refração, mudanças do índice de refração, reflectometria, etc [31]. Podem ser usados para medição de diversos parâmetros físicos, como: pressão, temperatura, campo elétrico e magnético, corrente, deslocamento, entre outros [29]. Os sensores de fibra ótica apresentam uma vasta gama de vantagens em relação a outros sensores tradicionais, como tamanho reduzido e longa durabilidade. Além disso apresentam facilidade de multiplexação, alta sensibilidade e resolução, isolamento elétrico e capacidade de monitoramento remoto [24,27,32]. Como nestes sensores a informação é transmitida por sinais óticos apresentam imunidade a interferências elétricas e eletromagnéticas, o que geralmente constitui um problema para os sensores eletrónicos [9]. Desempenham, portanto, um papel importante em várias áreas, tais como, industrial, médica, aeroespaciais, civil, entre outras [24,27,32]. Nos últimos anos, tem havido um interesse crescente em estender a aplicação dos sensores baseados em fibra ótica a ambientes com radiação ionizante [2,9]. Particularmente vários investigadores têm se dedicado a estudar os efeitos da radiação no desempenho das FBGs [7].

Os sensores de fibra ótica baseados em redes de Bragg são, atualmente, sensores relativamente comuns e versáteis usados em várias de aplicações nas indústrias para medir pressão, tensão ou temperatura [33]. Apresentam importantes características, tais como, a capacidade de multiplexagem, sendo possível gravar várias redes de Bragg na mesma fibra ótica [31]. Isto sob a condição de que cada uma delas possa ser distinguida através da utilização de multiplexagem por divisão de comprimento de onda ou por divisão de tempo [7]. Estas duas técnicas, podem ainda ser combinadas, abrindo caminho para medições quase distribuídas com milhares de FBGs ao longo de uma única fibra [7]. Consequentemente é possível ter um elevado número de sensores em poucas fibras, reduzindo o cabeamento e facilitando a instalação dos sensores [31]. Outra vantagem é o facto de a informação desejada estar codificada em comprimento de onda e, portanto, é possível obter medições altamente precisas e reproduzíveis, mesmo com perdas de intensidade ótica [31,32].

2.1 Princípio físico

Uma FBG tem por base uma perturbação periódica do índice de refração do núcleo, induzida por radiação laser, ao longo de um curto comprimento da fibra ótica [34]. Quando a luz de uma fonte de espectro ótico largo incide nesse padrão, nomeado de rede de Bragg, a luz presente numa banda espectral estreita centrada no comprimento de onda, que satisfaz a condição de Bragg (equação 2.1), é refletida, enquanto o restante sinal é transmitido ao longo da fibra, como ilustrado na Figura 2.1 [24].

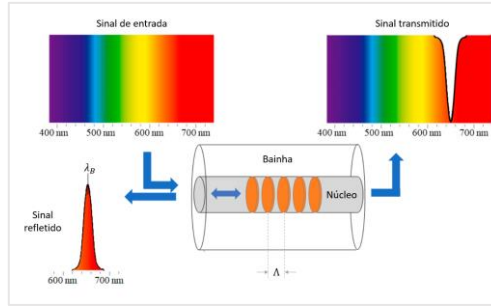


Figura 2.1 - Esquema representativo da estrutura e princípio de funcionamento de uma fibra ótica com uma rede de Bragg. Adaptado de [7].

A condição de Bragg é dada por:

$$\lambda_B = \frac{2 \times \Lambda \times n_{eff}}{m} \quad 2.1$$

onde λ_B representa o comprimento de onda de Bragg, Λ é o período espacial da rede de Bragg, n_{eff} o índice de refração efetivo do núcleo da fibra ótica e m um número inteiro que indica a ordem de difração [7,24,34]. Tipicamente uma FBG apresenta um período inferior a $1 \mu\text{m}$ e um comprimento na ordem de alguns milímetros ou centímetros [8,25].

As FBGs apresentam sensibilidade a perturbações externas, como variações de temperatura ou perturbações mecânicas [35]. Quando um sensor FBG é sujeito a uma deformação mecânica ou a uma variação de temperatura, há alteração dos parâmetros n_{eff} e Λ , e conseqüentemente ocorre um desvio do comprimento de onda de Bragg da FBG (BWS, do inglês, *Bragg Wavelength Shift*) [8,36]. Assim, pela monitorização desse desvio é possível quantificar as perturbações externas as quais o sensor é sensível [31,34]. A equação 2.2 ilustra o desvio comprimento de onda da rede de Bragg devido a perturbações mecânicas, Δl , e/ou a variações de temperatura, ΔT :

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right] \Delta l + 2 \left[\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right] \Delta T \quad 2.2$$

O primeiro termo da equação 2.2 representa o efeito de perturbações mecânicas no comprimento de onda refletido e o segundo termo representa o efeito de variações térmicas [37]. A equação 2.2 pode ser reescrita como [24]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = S_l \Delta l + S_T \Delta T \quad 2.3$$

onde S_l e S_T representam a sensibilidade da rede de Bragg a variações de deformação e de temperatura, respetivamente [24].

A sensibilidade à deformação longitudinal, quando a fibra está isolada das outras perturbações externas, é dada por:

$$S_l = \lambda_B (1 - p_e) \quad 2.4$$

onde p_e é a constante fotoelástica efetiva [25,35].

A sensibilidade térmica da rede de Bragg é dada por:

$$S_T = \lambda_B (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \quad 2.5$$

onde α_Λ é o coeficiente de expansão térmica e α_n é o coeficiente termo-ótico [30]. No caso de uma fibra de vidro, para um aumento de temperatura observa-se um desvio positivo da posição do pico de Bragg porque

ambos os coeficientes são positivos. No caso das fibras poliméricas, o coeficiente termo-ótico é negativo e como este domina sobre o coeficiente de expansão térmica, a sensibilidade térmica também é negativa [25].

Relativamente às fibras poliméricas, as FBGs em fibra de PMMA, que serão abordadas neste trabalho, apresentam também sensibilidade à humidade. A variação do comprimento de onda de Bragg com a humidade relativa descrita por:

$$\Delta\lambda_B = S_H\Delta H \quad 2.6$$

Onde a sensibilidade da rede à humidade relativa (S_H) é:

$$S_H = \lambda_B (\eta + \beta) = \lambda_B \left[\frac{1}{n_{eff}} \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial H} \right) + \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial H} \right) \right] \quad 2.7$$

onde η representa a dependência normalizada do índice de refração efetivo do núcleo com a humidade e β o coeficiente de expansão relacionado com a variação de volume induzida pela humidade [25].

Para monitorizar os desvios do comprimento de onda refletido pela rede de Bragg devido às variações, dos parâmetros externos (deformação, temperatura e humidade), existem vários sistemas de interrogação que permitem obter o espetro de reflexão de uma FBG [28,31]. Estes sistemas são geralmente compostos por três blocos principais, o bloco emissor (composto por uma fonte de luz de espetro ótico largo ou estreito mas sintonizável e um circulador), o bloco de deteção do pico (que pode ser um espectrómetro ou, dependendo da fonte e luz, um fotodetector) e o bloco de aquisição de dados [38]. Por exemplo o sistema *Edge Filtering* consiste numa técnica de interrogação rápida e de baixo custo onde as variações espectrais do FBG são diretamente convertidas em variações de potência ótica [32]. Para mais informações sobre os sistemas de interrogação recomenda-se a leitura do capítulo 17.7 da referência bibliográfica [24]. Ao longo deste trabalho foram usados dois interrogadores diferentes, um operacional na região espectral dos 1550 nm e outro na dos 800 nm.

2.2 Fotossensibilidade

A fotossensibilidade que permite a inscrição da rede de Bragg na fibra ótica é um fenómeno complexo, que depende do material da fibra ótica e do laser usado (comprimento de onda, intensidade e duração do pulso) [24].

Nas fibras de sílica, sabe-se que mais do que um processo contribui para a alteração do índice de refração foto induzida, existindo diferentes modelos que descrevem os mecanismos responsáveis pela fotossensibilidade das fibras óticas, entre os quais: o modelo dos centros absorptivos, modelo do dipolo, modelo da relaxação da tensão e o modelo da densificação/compactação [35]. Informações detalhadas destes modelos podem ser lidas em [35]. Segundo [8] a fotossensibilidade é universalmente atribuída à geração de defeitos pontuais.

Existem algumas técnicas para melhorar a fotossensibilidade das fibras óticas, e assim facilitar o fabrico da FBG. As mais comuns são a co-dopagem e a hidrogenização [35]. Na técnica de co-dopagem, são adicionados dopantes à fibra durante a sua produção, geralmente é usado o GeO₂ em conjunto com outro dopante como o boro e o estanho. Sendo que o boro é um dos co-dopantes mais usados nas fibras fotossensíveis disponíveis comercialmente [35] A hidrogenização da fibra também é muito utilizada pois permite um aumento da fotossensibilidade sob radiação UV cerca de duas ordens de grandeza comparativamente às fibras tradicionais [30].

Relativamente às fibras óticas poliméricas, a fotossensibilidade que permite a fabricação de também não é totalmente compreendida. São consideradas duas contribuições: fotopolimerização e fotodegradação [25]. Um dos métodos conhecidos para aumentar a fotossensibilidade destas fibras, tal como no caso das fibras de sílica, é a dopagem do núcleo [39].

2.3 Gravação de redes de Bragg em fibra ótica

A gravação das redes de Bragg é, portanto, feita através da modulação do índice de refração do núcleo de uma fibra ótica pela sua exposição a um padrão de interferência ótica de luz laser [31]. A perturbação induzida no índice de refração efetivo ao longo do eixo de propagação (x), é dada pela seguinte expressão:

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(x) \left\{ 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} x + \phi(x) \right] \right\} \quad 2.8$$

onde $\overline{\delta n_{eff}}$ é a variação do valor médio da modulação, v corresponde a visibilidade das franjas gravadas e $\phi(x)$ representa a variação do período ao longo da rede [30,40].

No caso da FBG ser gravada numa fibra multimodo, a rede gravada dá origem à vários picos de Bragg, em vez de um só como no caso das fibras monomodo [7]. As FBGs em fibras multimodo apresentam a vantagem de acoplar facilmente com diversas fontes de luz, especialmente, a fibra multimodo com índice gradual apresenta uma dispersão relativamente baixa [41].

Existem várias técnicas para a gravação de redes de Bragg, tais como, máscara de fase, método interferométrico, o método interferométrico com máscara de fase, método ponto-a-ponto, entre outros [36,42]. Para a gravação das FBGs estudadas neste trabalho, foi utilizado o método da máscara de fase por ser o método usado na Universidade de Aveiro, mas também devido à sua simplicidade, reprodutibilidade e pelo facto de não necessitar de instrumentos de alta precisão [25,36]. Neste método é produzido um padrão de interferência no núcleo da fibra ótica pela sobreposição de duas ordens de difração, produzidas pela máscara, do feixe laser. A máscara de fase corresponde a uma rede de difração de transmissão formada por uma sequência de perturbações num plano ótico de sílica. Estas são produzidas geralmente pela gravação holográfica ou litografia por feixe de electrões. A máscara de fase é posicionada próxima ou em contacto com a fibra, de modo que a região do núcleo onde se pretende gravar a rede de Bragg coincida com a sobreposição dos sinais difratados, que ocorre geralmente entre a ordem de difração +1 e -1. O período da rede de Bragg resultante é $\Lambda = \Lambda_{MF}/2$, onde Λ_{MF} é o período da máscara de fase [24,30,43].

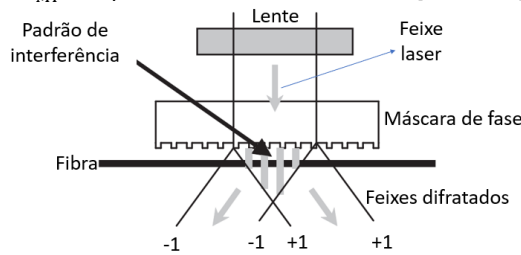


Figura 2.2 – Esquema do método da máscara de fase. Imagem adaptada de [24].

Outra técnica de inscrição é o método ponto-a-ponto, que consiste num feixe laser altamente focado, com recurso a uma objetiva, num ponto do núcleo da fibra, para alterar o índice de refração nesse ponto. Para modificar o índice de refração noutro ponto da fibra, o feixe laser, ou a fibra, são deslocados. A distância entre 2 pontos consecutivos é igual ao período da rede. Este processo é várias vezes repetido até formar uma rede de Bragg com o comprimento desejado. Há outros processos de inscrição semelhantes como o método linha-a-linha e o método plano-a-plano [7,44]. No caso da técnica de inscrição linha-a-linha, é realizado um varrimento com o feixe laser no núcleo da fibra, ao longo de uma direção perpendicular ao eixo da fibra, resultando na modificação no índice de refração ao longo de uma linha. O processo é repetido de forma a gravar na fibra linhas paralelas espaçadas pelo período que se pretende para a FBG. Durante o movimento do feixe ou da fibra para a inscrição da linha seguinte, o feixe laser é interrompido [42].

O laser escolhido para a inscrição das redes de Bragg pode ser um laser de onda contínua ou um laser pulsado no domínio de nanossegundos ou femtossegundos. A região espectral do laser, para gravar uma FBG numa fibra de sílica, deve estar centrado em comprimentos de onda para os quais a fibra é fotossensível, tipicamente é no ultravioleta (UV). No caso do laser femtossegundo, que para além de usar comprimentos de onda no ultravioleta também pode usar no infravermelho [7]. No caso de fibras de sílica, é geralmente usado um laser UV, com comprimento de onda curto (< 300 nm) e com energia suficiente para quebrar as ligações da sílica, provocando uma variação ligeira do seu índice de refração, tipicamente na ordem de 10^{-4} [31,35]. Para garantir que o processo é eficaz a fibra deve ter, como já referido, fotossensibilidade adequada a esta radiação e para isso a fibra pode ser sujeita a técnicas como: a co-dopagem do núcleo, aumento da concentração de germânio ou processos hidrogenação da fibra [30].

Dependendo das escolhas no processo de fabrico das FBGs, estas são geralmente classificadas em diferentes tipos. Cada tipo é caracterizado por ter uma origem diferente para a modulação do índice de refração, o que resulta em diferentes resistências a altas temperaturas e também a diferentes respostas de radiação [7]. Neste trabalho foram usadas FBGs do tipo I.

As redes do tipo I apresentam um crescimento monótono da amplitude de modulação do índice de refração da fibra ótica, com exposição a lasers pulsados ou contínuos. A origem desta modulação pode ser devido a centros de cor ou no caso de um laser de femtosegundo pulsado IR (*fs-pulsed IR laser*) a defeitos induzidos por processos de absorção de vários fótons [7,35].

2.4 FBGs em POF

As fibras óticas poliméricas (POFs) apresentam algumas vantagens relativamente às fibras de sílica, tais como: menor custo, maior flexibilidade, ou seja, não quebram facilmente e por isso são mais robustas [6,7]. Há vários materiais poliméricos que são usados no fabrico das POFs, como: polimetilmetacrilato (PMMA), copolímero de olefina cíclica (TOPAS e ZEONEX), policarbonato (PC) e fluoropolímeros amorfos transparentes cíclicos (CYTOP) [45].

As fibras poliméricas mais comuns são as fibras de PMMA (polimetilmetacrilato), que possuem baixo custo de produção, resistência à corrosão e uma elevada estabilidade térmica e sensibilidade à humidade [25,46]. No entanto apresentam uma atenuação muito elevada, por exemplo na região espectral dos 1550 nm é superior a 50 dB/m [25]. O que as torna inadequadas para serem utilizadas na região do infravermelho próximo, em particular, para a janela de telecomunicações de 1260-1650 nm, e conseqüentemente incompatíveis com a maioria dos interrogadores comerciais de FBGs que operam nessa gama [47]. Uma forma de reduzir a atenuação da luz é utilizar comprimentos de onda menores, particularmente na gama entre os 520 e 850 nm [25]. As fibras poliméricas microestruturadas (mPOFs) podem apresentar menor atenuação, dependendo das microestruturas, e inclusivamente funcionar como fibras monomodo para a gama de comprimentos de onda da região infravermelho próximo [25].

Investigações mais recentes em materiais óticos perfluorados mostram que estas limitações das elevadas perdas de transmissão no PMMA podem ser superadas [48]. Em particular, a fibra CYTOP (fluoropolímeros transparentes cíclicos) apresenta baixa perda na região espectral de comprimento de onda de 1550 nm, sendo atualmente considerada a única fibra de plástico prática para sensoriamento distribuído nessa região [46].

As redes de Bragg gravadas nas fibras de plástico (POFBGs, do inglês, *Polymer Optical Fiber Bragg Grating*) têm atraído um grande interesse por parte dos investigadores devido não só às suas aplicações na transmissão de informação, mas também em sensores [25]. A gravação de POFBGs oferece um meio para o desenvolvimento de sensores biocompatíveis e devido ao baixo módulo de Young dos materiais poliméricos é possível medir grandes valores de deformação [47]. Apresentam, portanto, diferentes características das FBGs tradicionais gravadas em fibra de sílica, tais como, maior sensibilidade à temperatura, deformação e humidade [7].

Porém, as POFBGs também apresentam algumas limitações. Por exemplo, não é possível realizar o processo de fusão de uma fibra polimérica com uma fibra de vidro (nem de duas fibras poliméricas) de uma forma automatizada. Para isso é necessário alinhá-las manualmente e colar a sua junção, tipicamente com colas especiais de índice de refração próximo ao das fibras e curável com luz UV. Alternativamente para monitorizar uma FBG em fibra polimérica, em vez de ser conectada a um *pigtail* de sílica, também podem colocados conectores FC no final da fibra polimérica. Além disso estas fibras apresentam uma gama de temperaturas de operação muito inferior às fibras de sílica. E quando sujeitas a elevadas temperaturas por um certo período pode levar ao aumento da atenuação e conseqüente perda de transparência. No caso das fibras monomodo de plástico apresentam atenuações superiores às de sílica [25].

Durante o processo de fabricação deste tipo de fibras, as cadeias moleculares do polímero orientadas aleatoriamente reorganizam-se ao longo da direção de estiramento, originando tensões residuais. Através de um processo de recozimento da fibra a uma determinada temperatura, as cadeias moleculares do polímero podem relaxar e regressar à forma amorfa original. Pelo que o desempenho de uma FBG em fibra polimérica está interligado ao processo de pré-recozimento, que pode influenciar o processo de inscrição, melhorar a estabilidade ao longo do tempo e o desempenho para medir parâmetros externos (nomeadamente reduzir a histerese) e aplicação destes sensores [25,45]. Outro fator que pode facilitar o processo de inscrição da rede em fibras de PMMA é a dopagem do núcleo com materiais fotossensíveis como BDK (benzyl dimethyl ketal) e DPDS (diphenyl disulphide) [45].

Capítulo 3 - Efeito da radiação na matéria

Como já foi referido, efeitos da radiação no desempenho das FBGs têm sido alvo de estudo por parte da comunidade científica. Este tema é importante porque, no caso das FBG serem insensíveis à radiação, podem ser usadas como sensores para monitorização de outros parâmetros, tais como temperatura ou deformação, em ambientes com elevada taxa de dose de radiação ionizante como na indústria nuclear, sem afetar a sua performance. No caso de serem sensíveis à radiação, podem ser utilizadas como sensores de monitorização online de radiação ionizante. Assim, qualquer que seja a situação, podemos ter vantagens na utilização deste tipo de dispositivos, sendo, no entanto, importante conhecer o tipo de interferência e os efeitos da radiação com a fibra utilizada.

O funcionamento de um detetor de radiação depende da interação da radiação que se pretende detetar com o material do detetor. Para compreender a resposta do detetor é, portanto, importante compreender os mecanismos fundamentais pelos quais a radiação interage com a matéria e perde a sua energia [3].

Neste capítulo serão abordadas as interações da radiação com a matéria, mais propriamente, da radiação gama e de protões, que corresponde à radiação a que os sensores de fibra desenvolvidos no contexto desta tese foram expostos. Ao longo deste capítulo são também abordadas em mais detalhe as aplicações das FBGs em ambientes com radiação.

3.1 Tipos de radiação

A radiação, transporte de energia por ondas eletromagnéticas ou partículas atómicas, pode ser classificada em duas principais categorias, ionizante e não ionizante. A radiação ionizante é caracterizada por ter energia suficiente para remover um eletrão de um átomo ou molécula [1]. A radiação ionizante é geralmente dividida em duas categorias: partículas carregadas e partículas sem carga [1].

As partículas carregadas consistem em partículas com carga elétrica, como por exemplo, eletrões e iões. Os eletrões rápidos correspondem tipicamente a partículas beta emitidas no decaimento nuclear, mas também a eletrões energéticos produzidos por qualquer outro processo (por exemplo através da ionização) [3]. As partículas carregadas pesadas incluem os protões, as partículas alfa e outros produtos resultantes de reações nucleares. A interação de partículas carregadas com os eletrões dos átomos da matéria dá-se por forças elétricas, forças de Coulomb.

As partículas sem carga também se dividem em duas subcategorias: radiação eletromagnética (raios-X e raios- γ) e neutrões. Considerando a radiação eletromagnética, os fótons interagem “por completo” com o meio, seja por dispersão de Rayleigh, dispersão de Compton, efeito fotoelétrico ou produção de pares [3].

3.1.1 Partículas carregadas: protões

Uma partícula carregada interage através de forças de coulomb com os eletrões e o núcleo de todos os átomos que encontra à medida que penetra num meio. As interações das partículas carregadas com os eletrões orbitais dos átomos do meio resultam em perdas de energia por colisão, enquanto as interações com os núcleos dos átomos do meio resultam em perdas radiativas. No caso dos protões, estes interagem com vários eletrões simultaneamente. Dependendo da proximidade da interação, a força atrativa pode ser suficiente para provocar excitação ou seja, levar o eletrão para uma camada superior dentro do átomo ou ionização remover o eletrão do átomo, resultando respetivamente em átomos excitados ou pares ião-eletrão.

A transferência de energia da partícula carregada para a matéria em cada interação atómica individual é tipicamente pequena, conseqüentemente a partícula sofre um grande número de interações antes de perder toda a sua energia cinética. À medida que a partícula interage com os eletrões como transfere uma pequena fração da sua energia total para estes, a sua velocidade diminui continuamente até atingir o repouso, sendo a distância percorrida pela partícula denominada de alcance (*range*). No caso de uma interação ser particularmente próxima, o eletrão pode sofrer um impulso grande o suficiente de forma que após ser ejetado do átomo tenha energia cinética suficiente para criar mais iões. No entanto o alcance desses eletrões energéticos é sempre pequeno em comparação com o alcance da partícula carregada incidente.

A perda de energia de uma partícula carregada que se propaga através de um meio absorvente depende tanto das características da partícula (massa, carga, velocidade e energia), como do meio (densidade

e número atômico). A perda de energia por unidade de comprimento da distância percorrida pela partícula carregada no meio absorvente é chamada de poder de paragem linear, tipicamente expresso em MeV/cm [49]:

$$-\frac{dE}{dx} = \sum_i N_i \sum_n \Delta E_{ni} \sigma_{ni} \quad 3.1$$

onde N_i é a densidade de átomos i (neste caso expressa em número de átomos por unidade de volume), ΔE_{ni} é a perda de energia e σ_{ni} é a secção transversal para uma dada perda de energia.

Para partículas com um determinado estado de carga, o poder de paragem torna-se maior à medida que a velocidade da partícula diminui, pois, aumenta o tempo de interação da força de Coulomb na vizinhança de um dado eletrão e a transferência de energia para este é maior. Comparando partículas com a mesma velocidade, mas diferentes cargas, vemos que as partículas com maior carga resultam em maior poder de paragem. Ao comparar diferentes materiais, o poder de paragem depende principalmente da densidade eletrónica do material absorvedor. Logo materiais com maior densidade e maior número atômico resultam num maior poder de paragem [3].

São conhecidos dois tipos de poder de paragem: o poder de paragem por colisão (que resulta da interação de Coulomb da partícula carregada com eletrões orbitais do meio absorvente por excitação ou ionização) e o poder de paragem por radiação (que resulta da interação de Coulomb da partícula carregada com os núcleos do meio absorvente). O poder de paragem total (S_{total}) para uma partícula carregada de energia cinética que atravessa um meio com um dado número atômico é, em geral, a soma do poder de paragem por radiação (S_{rad}) e o poder de paragem por colisão (S_{col}) [49].

Para partículas carregadas pesadas, como no caso dos protões, a perda de energia por radiação é desprezável em comparação com a perda por colisão. Portanto, a trajetória dos protões num meio absorvente é essencialmente retilínea [49].

A curva de Bragg representa a perda de energia em função da trajetória das partículas carregadas. À medida que a velocidade das partículas diminui, a energia perdida por unidade de comprimento aumenta até um máximo, nomeado de pico de Bragg. No final da trajetória (com baixa energia) a partícula carregada recombina com os eletrões do meio dando origem a um átomo neutro, perdendo a capacidade de produzir mais ionizações e a curva de Bragg termina [3,50].

A profundidade de penetração máxima (R_{max}) de uma partícula carregada pesada, é definida como a profundidade no meio absorvente além da qual não são observadas partículas a penetrar.

Os protões ao interagir com a matéria podem criar defeitos não só por ionização, mas também através de danos por deslocamento [51]. Além disso, a deposição de protões em materiais pode afetar a densidade desses [52].

3.1.2 Partículas sem carga: raios gama

A radiação γ , caracterizada por energia superior a 100 keV ou comprimentos de onda menores que 0.1 Å, tem origem em transições nucleares ou na aniquilação de um positrão e um eletrão. Quando ocorre uma reação nuclear ou decaimento nuclear espontâneo, o processo pode deixar o núcleo produto (filho) em estado excitado. Num decaimento beta, durante a transição do núcleo para um estado estável é emitido um fóton γ com uma energia específica dessa transição nuclear. Quando um positrão atinge o repouso e interage com um eletrão, estas duas partículas aniquilam-se completamente convertendo as suas massas em energia, são originados dois fótons γ , cada um com energia específica de 0,511 MeV [1].

Existem três tipos principais de interações de raios γ com a matéria: dispersão de Compton, efeito fotoelétrico e produção de pares.

A dispersão de Compton (Figura 3.1 a)) é mais provável ocorrer entre a radiação incidente e os eletrões da camada de valência, e resulta na ionização do átomo e na divisão da energia do fóton incidente entre o fóton disperso e o eletrão ejetado. Logo a energia do fóton incidente é igual à soma da energia do fóton disperso e da energia cinética do eletrão ejetado, desprezando a energia de ligação do eletrão ejetado uma vez que é relativamente pequena. A energia do fóton disperso pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$E_{FD} = \frac{E_{FI}}{1 + \frac{E_{FI}}{511 \text{ keV}}(1 - \cos \theta)} \quad 3.2$$

onde E_{FD} é a energia do fóton disperso, E_{FI} é a energia do fóton incidente e θ o ângulo do fóton disperso em relação à trajetória do fóton incidente. De referir que para um determinado ângulo de dispersão, a fração de energia transferida para o fóton disperso diminui com o aumento da energia da radiação incidente sendo a maior parte da energia é transferida para o elétron de recuo. As leis de conservação de energia e momento limitam tanto o ângulo de dispersão como a transferência de energia. Por exemplo, a transferência máxima de energia para o elétron de recuo (redução máxima na energia do fóton incidente) ocorre para um ângulo de dispersão do fóton de 180 graus (retrodisperso). Sendo a energia máxima do fóton disperso limitada a 255 keV para um ângulo de 180 graus e a 511 keV para 90 graus. O ângulo de dispersão do elétron ejetado é limitado a 90 graus e a sua energia é geralmente absorvida próximo ao local de espalhamento. A probabilidade relativa de ocorrer dispersão de Compton aumenta, em comparação com a dispersão de Rayleigh ou efeito fotoelétrico, à medida que a energia da radiação incidente aumenta, uma vez que a energia do fóton incidente deve ser substancialmente maior do que a energia de ligação do elétron. A probabilidade desta interação também depende da densidade dos elétrons (número de elétrons/g x densidade) [53]. A probabilidade de dispersão de Compton depende da densidade eletrônica e da densidade física do material [54].

No efeito fotoelétrico, há transferência total da energia do fóton incidente para um elétron, que é ejetado do átomo, como podemos ver na Figura 3.1 b). O elétron mais provável de ser ejetado é aquele cuja energia de ligação é mais próxima da energia do fóton incidente. A energia cinética do fotoelétrico ejetado é igual à energia do fóton incidente menos a energia de ligação da orbital do elétron. O buraco deixado nessa camada pelo elétron ejetado é preenchido por um elétron de uma camada exterior, com energia de ligação mais baixa, resultando numa cascata de elétrons do exterior para o interior. A diferença na energia entre camadas é libertada como raios X característicos ou elétrons Auger (quando a energia libertada é transferida para um elétron tipicamente na mesma camada que o elétron em cascata). A probabilidade de emissão de raios X característicos diminui à medida que o número atômico do átomo diminui, pois no caso de elementos com baixo Z predomina a emissão de elétrons Auger. O efeito fotoelétrico também pode ocorrer com elétrons de camada de valência, quando os fótons atingem os materiais com elevados Z, mas neste caso não há produção de raios X uma vez que não existe uma cascata de elétrons. O processo fotoelétrico predomina quando os fótons de baixa energia interagem com materiais com elevados números atômicos.

A probabilidade de absorção fotoelétrica por massa unitária é aproximadamente proporcional a $\frac{Z^3}{E^3}$, onde Z é o número atômico e E é a energia do fóton incidente. De acordo com a expressão a probabilidade do efeito fotoelétrico diminui com o aumento da energia do fóton. Mas há algumas exceções, a probabilidade do efeito fotoelétrico, em função da energia dos fótons para um determinado elemento, apresenta descontinuidades acentuadas chamadas de *absorption edges* que correspondem a energia de ligação dos elétrons numa camada ou subcamada específica. Nesse caso a probabilidade de interação para fótons de energia logo acima de um *absorption edge* é muito maior, uma vez que aumenta o número de elétrons disponíveis para interação, do que a dos fótons de energia ligeiramente abaixo. A energia do fóton correspondente a um determinado *absorption edge* aumenta com o número atômico [53].

A produção de pares (Figura 3.1 c)) ocorre quando um raio X ou um raio γ interagem com o campo elétrico de um núcleo atômico, e a energia da radiação é convertida num par elétron positrão. Este processo só ocorre quando a energia da radiação incidente é superior a 1.02 MeV, uma vez que a energia de repouso das duas partículas é 0.511 MeV [53].

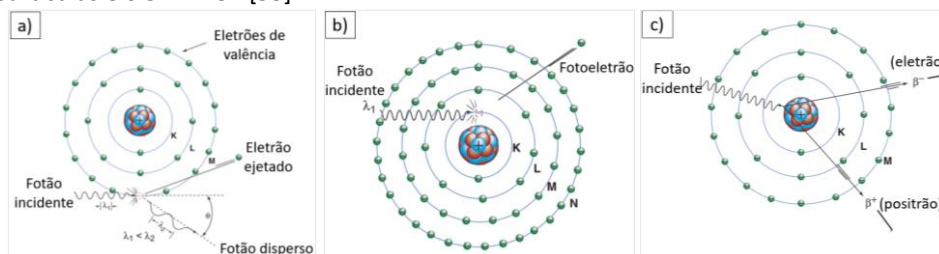


Figura 3.1 – Interação da radiação gama com a matéria: a) dispersão de Compton, b) efeito fotoelétrico e c) produção de pares. As letras K, L e M correspondem as camadas eletrônicas. Figuras adaptadas de [53].

A importância relativa dos três principais tipos de interação da radiação gama com a matéria (dispersão de Compton, efeito fotoelétrico e produção de pares) para diferentes materiais absorventes

(diferentes números atômicos Z) e energias dos raios gama ($h\nu$) é apresentada na Figura 3.2. São visíveis 3 áreas distintas, sendo que em cada uma predomina um dos 3 efeitos. A linha à esquerda representa a energia na qual o efeito fotoelétrico e o efeito de Compton têm a mesma probabilidade. A outra linha representa a energia na qual o efeito Compton e a produção de pares têm a mesma probabilidade [3].

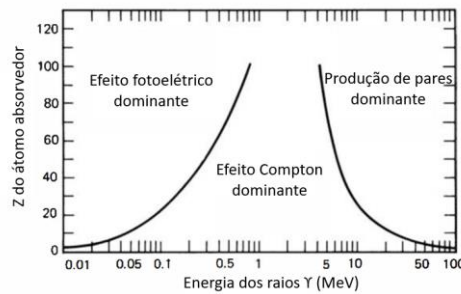


Figura 3.2 - Importância relativa dos três principais tipos de interação de raios gama com a matéria. Adaptado de [3].

3.2 Efeitos da radiação em fibras óticas

A radiação provoca quebra de ligações nos materiais através da ionização ou por danos por deslocamentos [7]. Considerando uma fibra ótica de sílica (pura ou dopada) como exemplo, o principal efeito da radiação é a geração de defeitos pontuais (às vezes chamados de centros de cor) [7,14]. Estes defeitos induzem novos níveis de energia dentro do *hiato energético* da sílica e conseqüentemente um aumento da absorção do sinal transmitido ao longo da fibra [18,55]. Alguns desses defeitos excitados pela radiação, ao regressarem ao estado fundamental emitem um sinal de luminescência que se sobrepõe ao sinal transmitido ao longo da fibra [7]. No caso de doses ionizantes totais ou fluência de neutrões muito elevadas, outro efeito da radiação já observado é a densificação [7].

Mais detalhadamente, quando as fibras óticas são expostas a radiação, as suas propriedades óticas são alteradas principalmente através de três efeitos macroscópicos [7]: Atenuação induzida por radiação (RIA, do inglês, *Radiation-Induced Attenuation*); Emissão induzida por radiação (RIE, do inglês, *Radiation-Induced Emission*) e Compactação induzida por radiação (RIC, do inglês, *Radiation-Induced Compaction*)

Entre estes, a RIA é considerada o efeito com maior impacto na maioria dos casos práticos e aplicações [38]. A atenuação induzida por radiação corresponde a um aumento da atenuação na transmissão da fibra devido ao aparecimento de bandas de absorção, na janela de transmissão da fibra, associadas aos defeitos pontuais causados pela radiação [7]. O crescimento da RIA pode ser dado pela expressão:

$$RIA \left(\frac{db}{km} \right) = -\frac{10}{L} \log \left\{ \frac{P_T(\lambda, t)}{P_T^0(\lambda)} \right\} \quad 3.3$$

onde L é o comprimento irradiado da fibra, $P_T(\lambda, t)$ é a potência ótica da fibra irradiada, $P_T^0(\lambda)$ é a potência ótica da fibra não irradiada e t é o tempo de irradiação [2,12,16]. Certos fatores ambientais, como a temperatura, podem afetar a atenuação induzida por radiação. Por exemplo, a elevadas temperaturas, os átomos movem-se intensamente o que resulta na redução dos defeitos pontuais e conseqüente diminuição do valor da RIA [2].

A emissão induzida por radiação corresponde à geração de luz dentro da fibra ótica devido a dois fenômenos, radiação Cerenkov e radioluminescência, que podem ser observados durante a irradiação [7,11]. Geralmente ambos os fenômenos afetam a região do visível (400 a 700 nm) [7]. A radiação Cerenkov (radiação gerada por partículas carregadas energéticas que passam por um meio com uma velocidade maior que a velocidade da luz local) é observada quando há um fluxo elevado de partículas suficientemente energéticas [11,14,56]. A radioluminescência é um processo no qual os elétrons são excitados para um estado de mais alta energia por absorção da energia da radiação incidente (quer transmitida ao longo da fibra [55] ou à qual a fibra é exposta [7]) resultando na emissão de fótons quando estes retornam para o seu estado fundamental.

A compactação induzida por radiação (RIC) consiste no aumento da densidade com a dose de irradiação. Este fenómeno foi observado para materiais baseados em sílica [57]. Particularmente, no caso de fibras óticas de sílica ainda há poucos dados na literatura [7].

Em alguns artigos presentes na literatura referem outro efeito, chamado de alteração do índice de refração induzida por radiação (RIRIC do inglês *Radiation-Induced Refractive Index Change*). Estes efeitos (RIRIC ou compactação) são principalmente observados sob exposição a neutrões [11].

No RIRIC, geralmente, são consideradas duas contribuições: a densificação e as bandas de absorção associadas aos defeitos pontuais (relação Kramers-Kronig) [11]. A densificação pode ser estimada pela equação Lorentz-Lorenz [2,11] :

$$\Delta n = \frac{(n^2 + 2)(n^2 - 1)}{6n} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta R}{R} \right) \quad 3.4$$

onde Δn corresponde a mudança do índice de refração induzida por radiação, ρ e $\Delta \rho$ são a densidade e as mudanças de densidade induzidas, R e ΔR corresponde à a refratividade molar e a sua alteração [2]. Considerando esta equação, foi demonstrado que: o índice de refração aumenta linearmente com a densidade a uma taxa de aproximadamente $0,18 \text{ g}^{-1} \text{ cm}^3$; a densificação ($\Delta \rho/\rho$) pode ser descrita pela lei $A \times D^k$ (onde A é uma constante, D é a dose e k é igual a 1 para neutrões rápidos e k é em média $2/3$ para raios gama, eletrões ou raios ultravioleta) e ainda que a densificação induzida pela radiação é limitada a 3–4% para sílica pura [11].

A equação Kramers-Kronig relaciona o índice de refração com a absorção [2]:

$$\Delta n(\lambda) = \frac{\lambda^2}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{\Delta a(\zeta)}{\lambda^2 - \zeta^2} d\zeta \quad 3.5$$

onde Δn corresponde a mudança do índice de refração induzida por radiação, $\Delta a(\zeta)$ corresponde ao foto branqueamento (*photobleaching*), λ é o comprimento de onda no qual a alteração do índice de refração induzida por radiação deve ser avaliada e ζ é o comprimento de onda de absorção [2,11]. De acordo com a relação Kramers-Kronig, a alteração do índice de refração induzida por radiação aumenta com a amplitude da absorção induzida e é inversamente proporcional a $(\lambda^2 - \zeta^2)$ [11].

A sensibilidade de uma fibra ótica à radiação, depende de diversos parâmetros, como: características do ambiente de radiação (dose, taxa de dose, temperatura, natureza da radiação, a presença de gases que possam difundir-se no interior da fibra ótica); características da fibra (composição da fibra, processo de fabrico da preforma e condições de fabrico da fibra) e condições de teste (comprimento de onda e potência do sinal injetado na fibra) [7].

As fibras óticas sílica podem ser classificadas quanto a sua sensibilidade à radiação, considerando a sua composição, como: fibras resistentes à radiação, fibras tolerantes à radiação e fibras sensíveis à radiação. Por exemplo, as fibras com núcleo de sílica pura e bainha dopada com flúor, ou ambas as partes dopadas com flúor, são consideradas fibras resistentes à radiação. As fibras dopadas com germânio são classificadas como fibras tolerantes à radiação, uma vez que as suas perdas são suficientemente baixas para serem usadas em algumas aplicações em ambientes com doses totais baixas ($< 10 \text{ kGy}$), como no espaço. As fibras dopadas com fósforo e/ou alumínio são consideradas fibras sensíveis à radiação, podem ser usadas para dosimetria. Apesar desta classificação, é crucial testar a resposta de uma fibra à radiação antes de usá-la num ambiente real pois as propriedades podem variar, uma vez que a resistência de uma fibra à radiação, como já vimos, depende de vários outros parâmetros [7]. De notar que enquanto as fibras óticas resistentes à radiação foram amplamente desenvolvidas e comercializadas para uso em ambientes hostis, pelo nosso conhecimento, ainda nenhum fabricante oferece fibras óticas baseadas em sílica certificadas para deteção e dosimetria de radiação [58].

Há também alguns estudos dedicados aos efeitos da radiação em fibras óticas poliméricas [6,12,14,15,16,17]. Em geral, os efeitos das radiações ionizantes nas fibras óticas poliméricas podem ser divididos em dois fenómenos: degradação da cadeia principal do polímero e *cross linking*. Em vários polímeros, ambos os processos ocorrem em simultâneo. Noutros polímeros, como por exemplo PMMA, a degradação da cadeia principal é o efeito dominante. Para determinar a RIA nas fibras óticas poliméricas é também utilizada a equação 3.3. Alguns modelos de crescimento e recuperação de RIA têm sido propostos na literatura [12,59].

A fibra CYTOP é outro exemplo de fibras poliméricas. Em comparação com as fibras óticas PMMA *standard*, apresenta baixas perdas numa ampla faixa espectral e maior sensibilidade à radiação gama. Recentemente, a atenuação induzida por radiação gama nas fibras CYTOP tem sido investigada: a RIA já foi medida nas regiões espectrais do visível e do infravermelho próximo; foi investigada a influência da temperatura e da humidade relativa sobre as fibras irradiadas e também já foi proposto um detetor de radiação gama. No entanto, a evolução das propriedades RIA com tempo ainda não foi detalhadamente analisada. Num estudo publicado em 2022 ([15]) foram investigadas as variações da RIA após a irradiação. Os espectros da RIA medidos em momentos diferentes após a irradiação apresentaram formas semelhantes. Foi ainda observado que a evolução da RIA depende significativamente da faixa espectral: na parte de comprimento de onda curta (< 1000 nm) a transmissão recupera parcialmente e em comprimentos de onda maiores (> 1300 nm) a RIA aumenta até saturar permanentemente. Verificou-se que a temperatura elevada acelera a dinâmica da RIA após a irradiação, no entanto não afeta a RIA residual medida vários meses após a irradiação. Por outro lado, manter a fibra sob humidade relativa alta resulta numa diminuição da RIA residual em comprimentos de onda baixos [15].

3.3 Efeitos da radiação nas FBGs

Os efeitos da radiação nas fibras óticas mencionados (RIA, RIE e RIC) degradam as propriedades da fibra ótica e conseqüentemente afetam o desempenho dos sensores de redes de Bragg baseados em fibras óticas. Na maioria dos casos, o fenómeno RIE não interfere com o desempenho das FBGs que operam na região espectral do infravermelho [7].

Quando uma FBG é exposta a radiação, podem ser observados dois efeitos: desvio do comprimento de onda de Bragg induzido pela radiação (RI-BWS, do inglês, *Radiation-Induced Bragg Wavelength Shift*) e variação da refletividade da rede (amplitude de pico) [7]. Um esquema dos efeitos da radiação na performance das FBGs é apresentado na Figura 3.3.

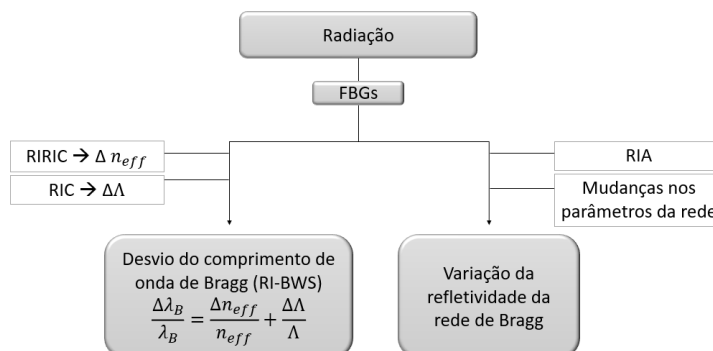


Figura 3.3 – Efeitos da radiação nas FBGs: desvio do comprimento de onda de Bragg e variação da refletividade da rede.

Relativamente ao RI-BWS, como o comprimento de onda de Bragg depende do índice de refração efetivo (no comprimento de onda de Bragg) e do período da rede então alterações destes parâmetros induzidas por radiação vão contribuir para este efeito. O índice de refração efetivo pode sofrer alterações através do fenómeno RIRIC (causado pelo RIA e pelo RIC). O período da rede pode ser alterado pelo fenómeno RIC. Na maioria dos casos este último efeito é insignificante [7].

Quando uma FBG colocada num ambiente com radiação é utilizada para controlar parâmetros externos como a temperatura, o RI-BWS corresponde a um erro de medição. Por exemplo numa FBG usada como sensor de temperatura, com sensibilidade térmica de 10 pm/°C, um RI-BWS de 10 pm corresponde a um erro de 1 °C no valor medido da temperatura. Já foi demonstrado várias vezes que os coeficientes de sensibilidade térmica não são significativamente influenciados pela radiação [7]. No entanto, recentemente, em 2022, foi publicado um artigo onde foram estudadas as características de sensoriamento de FBGs em diferentes fibras de sílica irradiadas com uma dose de 2 MGy de radiação gama [60]. Numa das FBGs estudadas, nomeadamente gravada em fibra com o núcleo de sílica pura e a bainha de sílica dopada com fluor, foi verificado que houve um desvio da sensibilidade térmica de 0,0789% entre a FBG irradiada e a não irradiada. Posto isto, realizaram vários testes de caracterização da sensibilidade à temperatura, sempre com as mesmas condições, onde observaram que a sensibilidade térmica da FBG irradiada não era estável, pois as

curvas de sensibilidade não coincidiam. O que sugere que a radiação causou uma variação irreversível na modulação do índice de refração do FBG, influenciando a estabilidade da FBG como sensor de temperatura. Baseados neste estudo os autores deste trabalho sugerem que são necessárias mais pesquisas para que estes sensores possam ser adequados para aplicação nos ambientes de radiação nuclear [60].

Quanto ao segundo efeito da radiação em FBGs, a variação da refletividade da rede pode ser devida a alterações nos parâmetros da rede (tais como n_{eff} , Δn_{mod} e Λ) e/ou degradação da transmissão ótica da fibra devido à RIA [7]. A expressão 3.6 demonstra a dependência do coeficiente de reflexão de Fresnel, R_F , com a transição do índice de refração (Δn_{mod}) e com o índice de refração efetivo n_{eff} [35]:

$$R_F = \left(\frac{\Delta n_{mod}}{2n_{eff} + \Delta n_{mod}} \right)^2 \quad 3.6$$

Consequentemente, com a variação da refletividade da rede, pode ser observada uma redução da razão sinal-ruído e, nos piores casos, um aumento na incerteza associada à medição. O pico da FBG pode até desaparecer devido a elevadas doses de ionização totais ou fluências de neutrões. No caso de a rede de Bragg ainda existir, no espectro de transmissão o pico de Bragg pode ser completamente imperceptível no ruído, no entanto no espectro de reflexão o pico deve ser detetável (apesar de sua refletividade muito pequena). Também pode ser observado um aumento na refletividade da rede, devido à diferente cinética dos defeitos induzidos pela radiação em diferentes áreas da rede (picos e vales do índice de refração). Ou pelo contrário, pode-se verificar uma diminuição da amplitude do pico devido à RIA, se a fibra na qual a rede foi inscrita é caracterizada por um nível de RIA muito elevado. Neste caso a parte da fibra que contém a rede pode ser cortada da fibra em que foi gravada e depois fundida a novos *pigtails* de fibras consideradas mais resistentes à radiação, de forma a reduzir o impacto da RIA no sinal transmitido [7].

A sensibilidade de uma FBG à radiação pode não ser a mesma da fibra que a constitui, por exemplo, gravar uma rede numa fibra resistente à radiação não garante a resistência da FBG à radiação. Uma vez que os efeitos induzidos pela radiação podem ser diferentes na rede de Bragg e no resto da fibra ótica que não foi exposta ao laser durante o processo de gravação [7].

A resposta de uma FBG à radiação depende de diversos parâmetros [7,8]: composição da fibra ótica; hidrogenização; condições de inscrição; comprimento de onda de Bragg; tratamento térmico pós-inscrição; pré-irradiação da rede; dose ionizante total; taxa de dose; temperatura da irradiação; natureza da radiação; revestimento e encapsulamento.

A resposta à radiação das FBGs em fibras óticas poliméricas também tem sido investigada por parte da comunidade científica [7].

Também já foi observado um desvio positivo do comprimento de onda de Bragg em POFBGs. Num estudo sobre a resposta de um FBG (inscrita com um laser CW UV a 325 nm) numa fibra polimérica de PMMA sob fluência de neutrões com energia de 2 MeV a 10 MeV, observou-se um desvio pico de Bragg para maiores valores até 7 pm para maior dose total de ionização estudada (aproximadamente 720 Gy) [7,19].

Cada ambiente de radiação é caracterizado por diferentes tipos de partículas, doses, taxas de dose e temperaturas. Estes parâmetros, como já referido, influenciam as diferentes FBGs de forma diferente. Consequentemente, a resistência ou sensibilidade à radiação de uma FBG depende da sua aplicação. Por exemplo, uma FBG cuja resposta de radiação pode ser aceitável para uma aplicação no espaço, pode não resistir ao ambiente em instalações nucleares [7].

As redes do tipo I, especialmente as escritas com laser UV, são consideradas as mais fáceis de fabricar e apresentam os maiores desvios de comprimento de onda de Bragg induzidos por radiação. Os desvios podem ser reduzidos pela diminuição da dose e da taxa de dose, aparecendo a possibilidade de usar estas FBGs como sensores resistentes a doses baixas, por exemplo, para aplicações no espaço. No entanto, devido as baixas temperaturas que podem ser atingidas nesses ambientes esta opção torna-se inválida uma vez que o desempenho do sensor é afetado negativamente. Uma solução para melhorar o desempenho poderia ser a pré-irradiação, mas, neste caso, a sua resposta dependeria das condições desse tratamento e do armazenamento entre a pré-irradiação e a utilização da FBGs, ou seja, demasiados parâmetros a controlar [7].

Capítulo 4 - Fabricação e caracterização dos sensores FBG

Com objetivo de avaliar os efeitos da radiação em sensores do tipo FBGs, foram estudadas diferentes FBGs, que diferem, no tipo de fibra usada e na região espectral de operação. Esta informação está resumida na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características das diferentes FBGs estudadas.

Sensor	Fibra	Região espectral do λ_B (nm)	H ₂	Gravação da rede
FBG-SM-1550	SOF-SM	1550		MF-UV
FBG-MM-1550	SOF-MM	1550	sim	MF-UV
FBG-PMMA-1550	PMMA-mPOF	1550		MF-UV-1pulso
FBG-PMMA-800	PMMA-mPOF	800		MF-UV-1pulso

As redes de Bragg foram gravadas em três fibras óticas diferentes: fibra de sílica monomodo (SOF-SM), fibra de sílica multimodo (SOF-MM) e fibra polimérica microestruturada de PMMA (PMMA-mPOF). Na Tabela 4.2 encontram-se informações das características específicas de cada fibra estudada: composição e diâmetro de cada parte da fibra ótica e modo de propagação da luz. Adicionalmente encontram-se informações de uma outra fibra polimérica, CYTOP, uma vez que também foram estudados os efeitos da radiação nessa fibra.

Tabela 4.2 – Fibras óticas estudadas.

Fibra	Composição			Diâmetro (μm)			Modo	Ref.
	Núcleo	Bainha	Revestimento	Núcleo	Bainha	Revestimento		
SOF-SM	sílica dopada com B e Ge	sílica fundida	acrilato duplo	8,9	124,7	249,3	SM SI	[61]
SOF-MM	sílica dopada com Ge	sílica	acrilato	62,5	125	245	MM GI	[62]
CYTOP-MM-POF	CYTOP	CYTOP/ poliéster e policarbonato	não tem	50	90/490	não tem	MM GI	[63]
PMMA-mPOF	PMMA dopado com BDK	PMMA	não tem	8	130*	não tem	SM	[64]

* diâmetro total da fibra

Neste capítulo descreve-se o processo de gravação (máscara de fase) de cada FBG presente na Tabela 4.1 e são caracterizadas as sensibilidades térmicas das mesmas e as sensibilidades à humidade relativa das redes de Bragg na fibra PMMA-mPOF.

4.1 Processo de fabricação

As FBG-SM-1550 e FBG-MM-1550 foram gravadas nas fibras SOF-SM e SOF-MM, respetivamente. A fibra SOF-SM utilizada apresenta uma fotossensibilidade extremamente alta que garante a inscrição rápida de FBGs de alta refletividade e ainda permite a inscrição sem a necessidade de submeter a fibra a um processo

de hidrogenização [61]. Já para as FBGs gravadas na fibra SOF-MM, foi necessário que a fibra fosse previamente hidrogenada a uma pressão superior a 130 bar durante 2 semanas.

Para fabricar estas FBGs usou-se o sistema implementado no laboratório do grupo de Nanofótonica e Optoelectrónica do i3N, no Departamento de Física da Universidade de Aveiro, baseado no método de máscara de fase. A montagem experimental deste sistema, ilustrada na Figura 4.1, é constituída por um laser UV, sistema ótico constituído por 4 espelhos e uma lente plano-convexa, sistema de alinhamento com estágios móveis e pela máscara de fase.

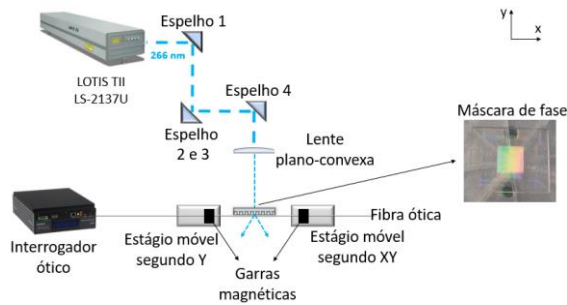


Figura 4.1 - Esquema da montagem experimental do sistema de gravação baseado na técnica da máscara de fase, implementado no Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Adaptado de [65].

O feixe laser UV usado apresenta um comprimento de onda de 266 nm, correspondente ao quarto harmónico do laser pulsado Q-switched Nd:YAG (LOTIS TII LS-2137U Laser, Minsk, Bielorrússia). O perfil do feixe é circular com aproximadamente 8 mm de diâmetro e uma divergência máxima de 1 mrad. O sistema do laser apresenta uma taxa de repetição de pulso máxima de 10 Hz, com duração de pulso de 8 ns, e uma energia de bombeamento máxima de 60 J. Através do conjunto de 4 espelhos, o feixe é direcionado para a lente plano-convexa (com distância focal efetiva de 320 nm), que origina uma linha ao longo do eixo longitudinal da fibra com cerca de 8 mm de largura e cerca de 30 μm de altura [65]. A máscara de fase encontra-se, entre a lente e a fibra, num estágio móvel na direção do feixe laser (eixo y) e, portanto, é possível aproximá-la ou afastá-la da fibra. A fibra ótica é fixa por garras magnéticas em dois estágios ambos móveis na direção do feixe laser e um deles também permite o movimento ao longo do eixo x para esticar a fibra, se necessário. O alinhamento é feito de modo que a fibra fique na zona de sobreposição das ordens de difração do feixe, que são originadas pela máscara. Durante a gravação das redes de Bragg, os espetros óticos de reflexão foram monitorizados em tempo real com um interrogador ótico (Micron Optics HYPERION si155 Optical Sensing Instrument, LUNA, Atlanta, Georgia) com taxa de aquisição a 100 Hz, de modo a acompanhar o aumento da amplitude do pico de Bragg.

As FBGs gravadas apresentam um comprimento físico de 8 mm e um comprimento de onda de Bragg próximo dos 1550 nm. A máscara de fase (da Ibsen Photonics) usada apresenta um comprimento de 1 cm e um período de 1074 nm, sendo o período da rede inscrita metade deste valor. A energia de bombeamento do laser usada foi de aproximadamente 26,5 J. As fibras monomodo foram expostas à radiação UV entre aproximadamente 2 a 3 minutos. Já o tempo de exposição das fibras multimodo à radiação foi mais longo, aproximadamente entre 4 a 5 minutos. O maior tempo de exposição para a gravação da rede de Bragg na fibra SOF-MM deve-se ao facto do núcleo desta ser maior que o núcleo da fibra SOF-SM, e como a energia do laser é a mesma, conseqüentemente é necessário mais tempo de exposição para provocar a modulação do índice de refração numa área maior.

Para gravar as redes FBG-PMMA-1550 e FBG-PMMA-800, previamente ao processo de gravação, a fibra PMMA-mPOF foi sujeita a um processo de recozimento a 70°C (sem controlo de humidade) durante 24 horas, com a finalidade de remover as tensões residuais presentes devido ao seu processo de fabrico. Foi usado o mesmo sistema de gravação, das FBGs descritas anteriormente. Para a FBG-PMMA-800 foi usada uma máscara de fase (da Ibsen Photonics), com um período diferente, de 567,80 nm, de forma que o comprimento de onda de Bragg fosse menor. E para a FBG-PMMA-1550 máscara de fase (da) usada apresenta um período de 1053,90 nm. Além disso, foi usado um único pulso laser de 8 ns. Em [66] encontram-se mais detalhes do processo de fabricação de FBGs idênticas. No caso da FBG-PMMA-1550, como já foi mencionado anteriormente, as fibras de PMMA apresentam atenuações muito elevadas na região espectral dos 1550 nm, e, portanto, nestas FBGs é necessário que o conetor fique muito próximo (aproximadamente 1 cm) da zona da fibra onde a rede é inscrita [67].

4.2 Caracterização da sensibilidade à temperatura

A caracterização à temperatura e à humidade dos sensores descritos na tabela 4.1 foi realizada monitorizando os espectros óticos de reflexão, para cada variação do parâmetro em causa. Para obter os espectros das FBGs na região espectral dos 1550 nm foi utilizado um interrogador ótico operacional nessa gama (Micron Optics HYPERION si155 Optical Sensing Instrument, LUNA, Atlanta, Georgia), com resolução 1 pm. Para a FBG na região espectral dos 800 nm usou-se um interrogador ótico composto por um espectrómetro (I-MON 835 OEM da Ibsen Photonics) que opera na janela espectral 810 nm a 860 nm, com resolução de 10 pm.

Começou-se por caracterizar à temperatura os sensores descritos na Tabela 4.1, numa câmara climática (*Weiss Technik LabEvent, model LC/64/70/3*), com resolução de 0,1 °C e 1 % HR, para a temperatura e humidade, respetivamente.

Os sensores foram sujeitos a um aumento da temperatura desde 15 °C até 45 °C, em passos de 5 °C. No teste de temperatura realizado com as FBGs em sílica (FBG-SM-1550 e FBG-MM-1550), com o objetivo de assegurar a estabilização térmica, na câmara e nos sensores, cada temperatura foi mantida constante durante 30 minutos entre cada passo. No caso das FBGs em fibra polimérica (FBG-PMMA-1550 e FBG-PMMA-800) como estas são sensíveis à humidade, a humidade relativa foi pré-ajustada para o valor fixo de 50% e entre cada medida esperou-se 1 h 30 min. O aumento do tempo entre medidas deve-se ao facto de que para valores de humidade relativa constantes com a temperatura a variar, a câmara demora mais tempo a estabilizar. Para conectar estas FBGs ao interrogador foi necessário usar fibras de sílica para compensar a distância, e de forma a diminuir o ruído e melhorar a passagem de sinal entre as diferentes fibras (para evitar reflexões de sinal e/ou a formação de cavidades de Fabry-Perot [65]) colocou-se um gel, com índice de refração de 1.4917 ± 0.0005 semelhante ao da fibra de PMMA, na terminação da fibra de sílica.

Na Figura 4.2 mostra-se a variação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura para cada FBG e as respetivas retas de ajuste linear.

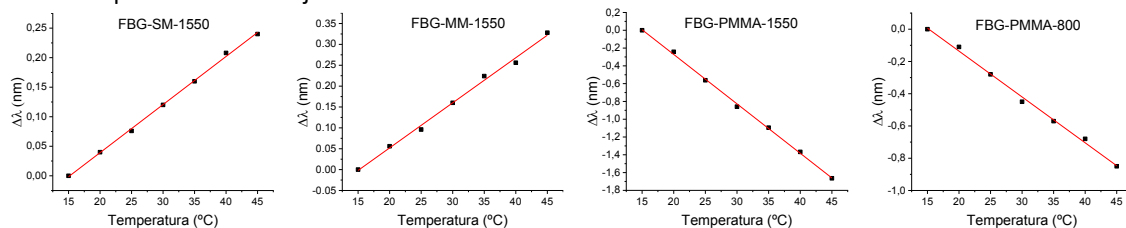


Figura 4.2- Variação do comprimento de onda em função da temperatura dos sensores: FBG-SM-1550, FBG-MM-1550, FBG-PMMA-1550 e FBG-PMMA-800. Os pontos representam os dados experimentais e as linhas retas os respetivos ajustes lineares.

Através das retas de ajuste linear, obteve-se os valores das sensibilidades à temperatura, que são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Sensibilidades térmica para cada FBG em estudo.

	FBG-SM-1550	FBG-MM-1550	FBG-PMMA-1550	FBG-PMMA-800
S_T (pm/°C)	8,14±0,13	10,80±0,34	-55,55±0,83	-28,43±0,81
R^2	0,999	0,995	0,999	0,996

Para redes de Bragg em fibras de sílica a funcionarem na região espectral de 1550 nm, é de esperar uma sensibilidade térmica de aproximadamente 10 pm/°C [68]. Portanto a sensibilidade térmica obtida para a FBG-MM-1550 está de acordo com a literatura. Já a sensibilidade obtida para a FBG-SM-1550 é um pouco inferior. No entanto um valor semelhante ao obtido já foi reportado na literatura ([30]) para uma FBG inscrita exatamente na mesma fibra SOF-SM, mais especificamente de 8.93 ± 0.08 pm/°C.

A sensibilidade térmica da FBG-PMMA-1550 é um pouco inferior a maioria dos valores reportados na literatura para FBGs em PMMA na região espectral dos 1550 nm. Sendo que neste caso de FBGs poliméricas está reportado que as sensibilidades variam entre si para redes inscritas na mesma fibra. Certas condições podem contribuir para essas variações, tais como, diferentes equipamentos, diferentes tempos de estabilização da temperatura e humidade. Por exemplo em [65] obteve-se uma sensibilidade de

-72 ± 1 pm/°C para uma FBG também inscrita numa fibra de PMMA microestruturada com dimensões idênticas a usada neste trabalho, mas sem ser dopada com BDK. Em [69] apresentaram uma sensibilidade semelhante à obtida neste trabalho, nomeadamente de - 55 ± 3 pm/°C para uma FBG em PMMA.

No caso da FBG-PMMA-800, o valor da sensibilidade térmica obtido também é inferior a maioria dos valores reportados na literatura para FBGs em PMMA na região espectral dos 800 nm. Por exemplo em [39] obteve-se uma sensibilidade de -44.9 ± 2.0 pm/°C para uma FBG também inscrita numa fibra de PMMA microestruturada com dimensões idênticas a usada neste trabalho, mas sem ser dopada com BDK, e em que o teste de temperatura foi efetuado com recurso a uma placa de Peltier. Em [70] obtiveram uma sensibilidade térmica de -57 ± 4 pm/°C para uma rede de Bragg gravada também exatamente na mesma fibra PMMA-mPOF, no entanto o teste de temperatura foi realizado sem controlo de humidade. As diferenças entre o valor de sensibilidade térmica obtido e os reportados na literatura pode ter origem na forma como os testes de temperatura foram realizados e os equipamentos utilizados. No entanto, a sensibilidade obtida aproxima-se do valor estimado para esta FBG de -30,13 pm/°C. Este valor foi calculado tendo em conta a equação da sensibilidade térmica (2.5), a sensibilidade térmica obtida experimentalmente para a FBG-PMMA-1550 e o facto das FBG-PMMA-1550 e FBG-PMMA-800 serem inscritas na mesma fibra e, portanto, os coeficientes η e β são iguais, pela expressão:

$$\frac{S_T(FBG-PMMA-1550)}{S_T(FBG-PMMA-800)} = \frac{\lambda_{B(1550)}(\eta + \beta)}{\lambda_{B(800)}(\eta + \beta)} \Leftrightarrow \frac{-55,55}{S_T(FBG-PMMA-800)} = \frac{1550,684}{841,14} \Leftrightarrow S_T(FBG-PMMA-800) = -30,13$$

Para $\lambda_{B(1550)}$ e $\lambda_{B(800)}$ foram considerados os valores do comprimento de onda centrais à temperatura de 25°C e humidade relativa a 50%.

As sensibilidades térmicas obtidas neste capítulo serão usadas mais à frente para corrigir as possíveis variações de temperatura ao longo do processo de irradiação das FBGs.

4.3 Caracterização da sensibilidade à humidade

Para caracterizar as FBGs em fibra de PMMA, a variações de humidade relativa, os testes foram realizados de forma semelhante ao descrito anteriormente para os testes à temperatura. Os sensores foram sujeitos a um aumento da humidade relativa desde 30% até 90%, com intervalo de 15% entre cada medida, com a temperatura constante em 25°C. Em cada valor de humidade relativa esperou-se 1 hora para assegurar a estabilização da mesma na câmara e nos sensores. No caso do teste de temperatura o intervalo de tempo entre medidas foi superior 30 minutos, uma vez que a câmara climática usada demora mais a estabilizar mudanças de temperatura com a humidade relativa constante do que mudanças de humidade relativa com a temperatura fixa. De referir que a câmara ficou a estabilizar nos valores da primeira medição durante a noite anterior ao teste. Na Figura 4.3 mostra-se a variação do comprimento de onda de Bragg com a humidade relativa e o seu ajuste linear, para cada sensor.

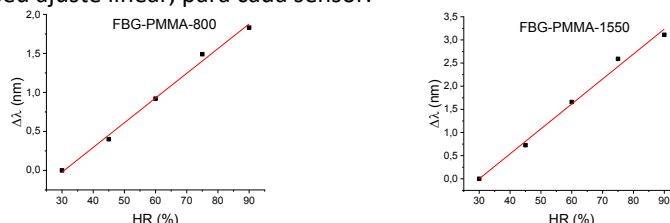


Figura 4.3 – Variação do comprimento de onda de Bragg com a variação da humidade relativa, à temperatura de aproximadamente 25°C, e reta de ajuste linear da FBG-PMMA-800 (esquerda) e da FBG-PMMA-1550 (direita).

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores das sensibilidades à humidade relativa obtidos após a linearização.

Tabela 4.4 – Sensibilidades à humidade relativa, à temperatura de aproximadamente 25 °C, das FBGs em fibra de PMMA na região espectral dos 800nm e 1550 nm.

	FBG-PMMA-800	FBG-PMMA-1550
S_H (pm/%HR)	31,7 ± 1,4	53,9 ± 2,7
R^2	0,9942	0,9923

A sensibilidade da FBG-PMMA-800 é similar aos valores obtidos em [71] para uma FBG inscrita numa fibra de PMMA microestruturada e com um procedimento de análise da sensibilidade também semelhante.

Quanto à FBG-PMMA-1550, não encontramos na literatura testes de humidade relativa realizados em FBGs em PMMA com comprimento de onda de Bragg nos 1550 nm. Pelo que o valor obtido, foi comparado com a sensibilidade obtida experimentalmente para a FBG-PMMA-800 através da equação 2.6. Tendo em conta que as duas redes foram inscritas na mesma fibra, ou seja, apresentam os mesmos parâmetros η e β , estimou-se um valor de 57,83 pm / HR%, que se aproxima do valor obtido experimentalmente. Este valor foi calculado pela seguinte expressão:

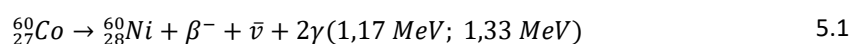
$$\frac{S_{H(FBG-PMMA-1550)}}{S_{H(FBG-PMMA-800)}} = \frac{\lambda_{B(1550)}(\eta + \beta)}{\lambda_{B(800)}(\eta + \beta)} \Leftrightarrow \frac{S_{H(FBG-PMMA-1550)}}{31,37} = \frac{1549,2653}{840,34} \Leftrightarrow S_{H(FBG-PMMA-1550)} = 57,83$$

Para $\lambda_{B(1550)}$ e $\lambda_{B(800)}$ foram considerados os valores do comprimento de onda centrais à temperatura de 25°C e humidade relativa a 30%.

Capítulo 5 - Irradiação com radiação γ

Neste capítulo será apresentado o estudo dos efeitos da radiação gama no desempenho de diferentes tipos de fibras óticas (SOF-SM, SOF-MM e CYTOP-MM-POF) com o objetivo de entender como a radiação afeta a transmissão ótica da fibra. Além disso, foram também estudadas as FBGs apresentadas na Tabela 4.1, inscritas nas mesmas fibras de sílica e na fibra polimérica PMMA-mPOF, para analisar como a radiação influencia o seu desempenho (nomeadamente o desvio do comprimento de onda de Bragg e variação da amplitude do mesmo).

Para realizar a irradiação das amostras, usou-se um irradiador gama auto-blindado de categoria I (PRECISA 22, Pantatron Ltd/Graviner Ltd, UK, 1971), instalado no Campus Tecnológico e Nuclear do Instituto Superior Técnico (Bobadela). Este equipamento consiste numa câmara com 4 fontes de ^{60}Co , seladas e distribuídas em quatro barras de aço inoxidável (Fig.5.1). O ^{60}Co corresponde a um radioisótopo que decai para um estado estável do isótopo ^{60}Ni com emissão de uma partícula beta, um antineutrino e 2 raios gama com energias 1,17 MeV e 1,33 MeV [72]:



As amostras que se desejam irradiar são colocadas no interior da câmara de irradiação (altura de 65 cm, profundidade de 50 cm, largura de 20 cm) e o processo de irradiação é controlado por um sistema pneumático que move as barras horizontalmente dentro de cada parede entre uma posição de repouso (permitindo o acesso à câmara) e uma posição de irradiação fixa. O débito de dose médio pretendido na amostra é obtido escolhendo o número de fontes a utilizar e/ou pela alteração da distância fonte-amostra, sendo que na posição fixa de irradiação usada, foi de 11,2 Gy/min (considerando a água como material padrão). Na Figura 5.1 a) encontra-se uma fotografia da câmara de irradiação na posição de repouso (aberta) e um esquema da secção transversal da câmara com as fontes de ^{60}Co (Fig 5.1b).

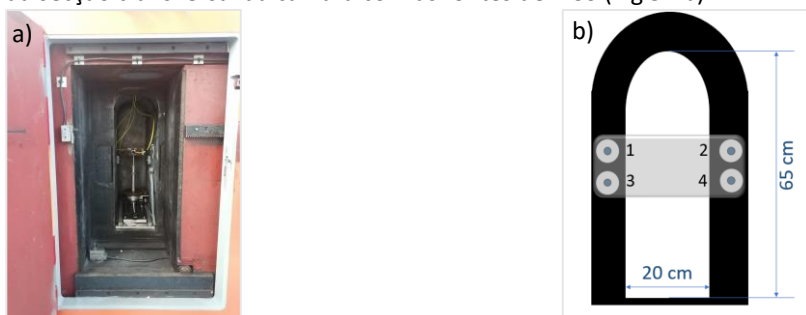


Figura 5.1 – Câmara de irradiação da PRECISA22: a) fotografia do interior da câmara e b) esquema da secção transversal com as 4 fontes de ^{60}Co .

5.1 Irradiação de diferentes fibras óticas

De forma a ser possível monitorizar em tempo real os efeitos da radiação, foram preparadas amostras de cada fibra com aproximadamente 1 m de comprimento. Para ser possível monitorizar as fibras foi necessário colocar conectores compatíveis com os instrumentos de medição (ou com adaptadores) em cada extremidade da fibra. No caso das fibras de sílica foi feita a fusão de cada extremidade com um *pigtail* SM-sílica com conector FC/APC ou FC/PC. No entanto, no caso da fibra polimérica, não é possível realizar fusões entre fibras de forma automatizada, pelo que nas extremidades da fibra foram colados conectores. Neste caso um conector metálico SMA foi colado em cada ponta da fibra usando uma gota de cola (Araldite Rápido da *ceys*).

De forma a realizar o estudo do efeito da irradiação sobre as 3 fibras descritas anteriormente, estas foram colocadas dentro da câmara de irradiação gama (PRECISA 22), num suporte de acrílico posicionado estrategicamente, de modo a controlar as condições de irradiação (com uma taxa de dose de 11,2 Gy/min). De forma a ser possível o estudo da transmissão ótica durante a experiência, os conectores de cada fibra ficaram da parte de fora da câmara de irradiação, como é ilustrado no esquema da montagem experimental apresentado na Figura 5.2.

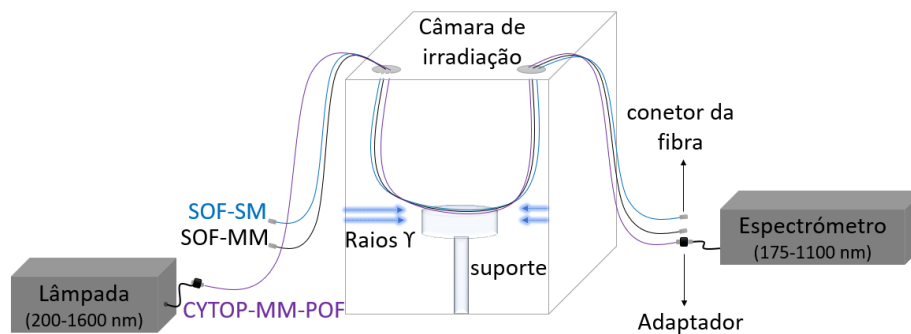


Figura 5.2 – Esquema da montagem experimental da exposição de diferentes fibras óticas à radiação gama.

Como podemos ver no esquema acima, uma extremidade da fibra era conectada à fonte de luz, lâmpada de deutério e halogéneo (L10290, HAMAMATSU), e a outra ao espectrómetro (AvaSpec-ULS2048CL-EVO-UA-50, Avantes) com 2,5 μm de resolução. A interseção das regiões espectrais dos dois equipamentos corresponde à gama espectral estudada, nomeadamente, entre 200 nm e 1100 nm. Como cada um destes instrumentos só tinha uma entrada, não foi possível monitorizar em tempo real, as 3 fibras simultaneamente. Ou seja, para cada uma das fibras, a transmissão ótica foi medida de 10 em 10 minutos durante a irradiação. Este procedimento experimental revelou-se bastante limitante visto que impossibilitou uma análise quantitativa das variações de intensidade ótica transmitida, uma vez que se observou que a transmissão ótica medida era afetada pelo acoplamento ótico das fibras à fonte de luz e ao espectrómetro.

As fibras foram expostas à radiação gama durante aproximadamente 3 horas, ou seja, a uma dose total de 2,016 kGy.

Na Figura 5.3 estão presentes os espectros de transmissão ótica de cada fibra antes de ser irradiada e no final da irradiação. As intensidades de transmissão do espectro no final da irradiação (representado a vermelho) foram normalizadas às do espectro obtido antes da exposição à radiação, de modo a eliminar as variações de potência ótica devido ao acoplamento ótico da fibra irradiada com os equipamentos de medição. Para a normalização, as intensidades óticas de cada λ do espectro no final da irradiação ($I_{final}(\lambda)$) foram multiplicadas pela razão das intensidades óticas no λ_n entre espectro de referência ($I_{ref}(\lambda_n)$) e no espectro final ($I_{final}(\lambda_n)$):

$$\frac{I_{ref}(\lambda_n)}{I_{final}(\lambda_n)} \times I_{final}(\lambda) \quad 5.2$$

O comprimento de onda de normalização, λ_n , escolhido foi de 937,441 nm uma vez que não foram observadas variações tão significativas de intensidade ótica com a irradiação nesse ponto.

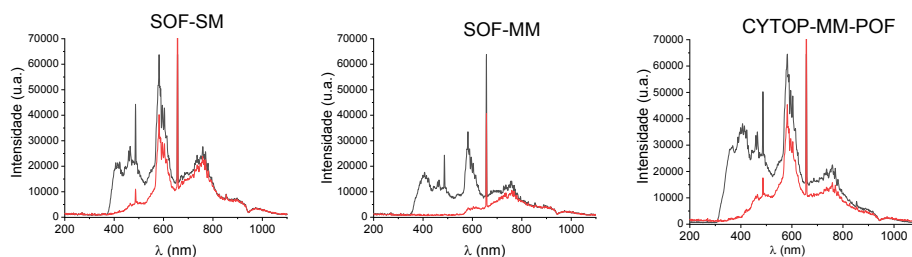


Figura 5.3 – Espectros de transmissão ótica antes (preto) e após aproximadamente 3 horas de exposição à radiação gama (vermelho) da fibra: SOF-SM, SOF-MM e CYTOP-MM-POF.

Tal como descrito em cima, as intensidades de transmissão ótica foram afetadas por outros parâmetros para além da radiação, nomeadamente, acoplamento ótico. Para considerar apenas as variações de potência ótica induzidas pela radiação, fez-se uma análise qualitativa, pelo cálculo da razão entre a intensidade ótica de dois comprimentos de onda ao longo do tempo de irradiação. Esses comprimentos de onda devem ser cuidadosamente escolhidos, um deles deve pertencer à região do espectro onde é observada uma maior alteração do espectro de transmissão e o outro deve pertencer a uma região que onde o espectro de transmissão não é praticamente alterado. Desta forma podemos realizar uma análise mais fiável da sensibilidade das fibras à radiação.

Para as várias fibras, os cálculos foram realizados para 3 comprimentos de onda diferentes aparentemente afetados pela radiação (400 nm, 580 nm e 750 nm) divididos pelo mesmo comprimento de onda de 865 nm, visto que a radiação gama parece não alterar significativamente a forma espectral neste valor de comprimento de onda. Os gráficos da razão das intensidades óticas desses comprimentos de onda em função do tempo de irradiação para as fibras SOF-SM, SOF-MM e CYTOP-MM-POF são apresentados na Figura 5.4, na Figura 5.5 e na Figura 5.6, respetivamente.

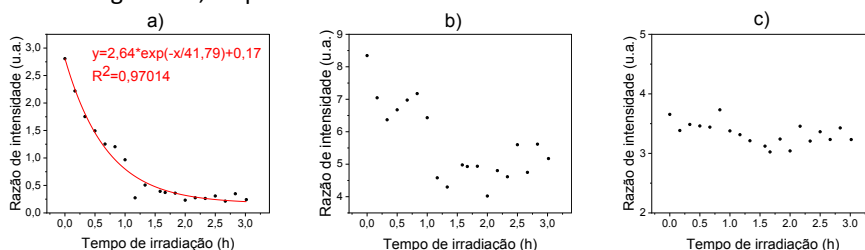


Figura 5.4 – Razão de intensidade ótica transmitida entre dois comprimentos de onda ao longo do tempo de irradiação (em horas) para a fibra SOF-SM: a) 400/865 nm, b) 580/865 nm e c) 750/865 nm.

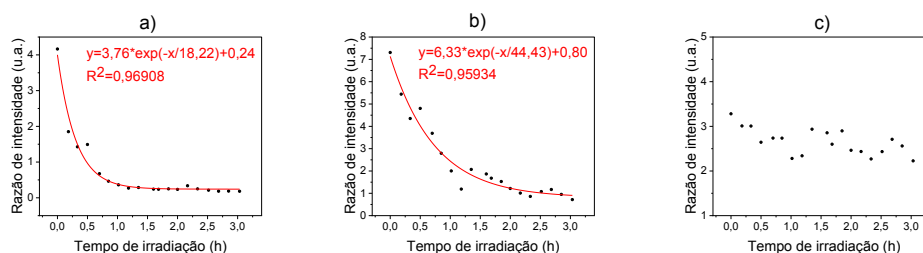


Figura 5.5 – Razão de intensidade ótica transmitida entre dois comprimentos de onda ao longo do tempo de irradiação (em horas) para a fibra SOF-MM: a) 400/865 nm, b) 580/865 nm e c) 750/865 nm.

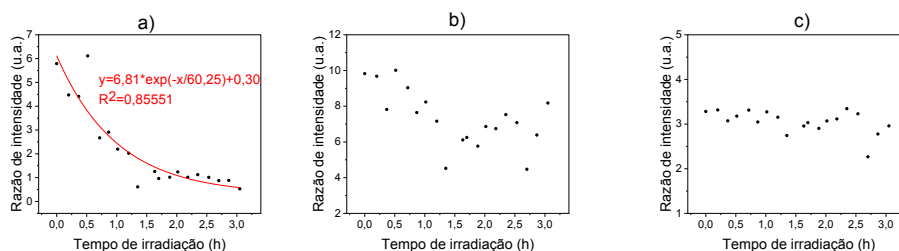


Figura 5.6 – Razão de intensidade ótica transmitida entre dois comprimentos de onda ao longo do tempo de irradiação (em horas) para a fibra CYTOP-MM-POF: a) 400/865 nm, b) 580/865 nm e c) 750/865 nm.

Pela análise das figuras 5.4, 5.5 e 5.6, observamos que a resposta de cada fibra à radiação é dependente do comprimento de onda, sendo os comprimentos de onda menores mais afetados pela presença de radiação gama. Em todas as fibras é observada uma resposta à radiação nos 400 nm, sendo a fibra CYTOP a que apresenta a maior sensibilidade.

Relativamente à fibra de sílica monomodo (Figura 5.4), para $\lambda = 580$ nm ainda é observada alguma atenuação, enquanto nos 750 nm a fibra parece ser resistente à radiação.

No caso da fibra de sílica multimodo (Figura 5.5), observa-se que a fibra é claramente sensível nos 400 nm e nos 580 nm. Comparando os gráficos a) e b) da Figura 5.5, observamos o limite de detecção de dose é maior nos 580 nm. Nos 750 nm (Figura 5.5 c)), vemos que esta região, tal como na fibra monomodo, também parece ser imune à presença de radiação.

Os resultados obtidos para as fibras de sílica estão de acordo, nas regiões analisadas UV e VIS, com outros estudos presentes na literatura como por exemplo o de A. Correia *et al.* [14]. Onde também foi feita um estudo de comparação de fibras monomodo e multimodo a uma taxa de radiação semelhante à usada no nosso estudo. No caso da fibra monomodo observaram forte absorção da luz transmitida na região UV, visível e no infravermelho próximo ($\lambda < 800$ nm). No caso da fibra multimodo, semelhantemente observaram que a atenuação na transmissão da fibra era evidente para comprimentos de onda baixos (em torno de 500 nm), e menos notória, mas observável, para comprimentos de onda mais altos (exceto da janela espectral do infravermelho próximo onde se verificou pouca atenuação) [14].

A atenuação induzida pela radiação nas fibras de sílica, é geralmente associada às bandas de absorção de defeitos pontuais existentes ou causados pela radiação no material da fibra [17]. Como referido no capítulo 3, este fenómeno (RIA) depende de vários parâmetros como a composição do núcleo, dopantes, taxas de dose, comprimento de onda, entre outros [14].

Por fim a fibra CYTOP (Figura 5.6) demonstra ser sensível à radiação nos comprimentos de onda analisados 400 nm e 580 nm. No entanto apenas nos 400 nm é observada uma tendência clara da alteração da forma espectral com a dose. Para o comprimento de onda de 750 nm a fibra também demonstra ser resistente. Os resultados obtidos para esta fibra estão de acordo com um trabalho de P. Stajanca *et al.* [73], onde também foi observado que a RIA é altamente dependente do comprimento de onda e mais pronunciada na região espectral do UV.

Segundo o descrito por P. Stajanca *et al.* [17], a forma espectral da RIA na fibra ótica CYTOP é qualitativamente semelhante à da maioria das fibras de sílica. Nesse estudo observaram que a radiação para além de ter impacto na transmissão ótica também afeta a resposta da fibra à temperatura e humidade. De acordo com este trabalho a RIA na região espectral UV e VIS tem origem na absorção por radicais livres (por quebras da cadeia polimérica) e novos compostos (com maior grau de conjugação). Como a maioria dos radicais livres não são termicamente estáveis, a RIA associada a esse mecanismo está sujeita a uma recuperação gradual. Contrariamente aos radicais livres, os compostos conjugados devem ser bastante estáveis e resultando num aumento mais permanente da RIA [17].

A identificação dos mecanismos específicos responsáveis pela RIA, tanto nas fibras de sílica (quais os defeitos criados) como na CYTOP (quais os radicais livres e compostos conjugados criados), exigiria uma investigação mais aprofundada nomeadamente estudos complementares de espectroscopia como por exemplo espectroscopia Raman ou de Ressonância Paramagnética Eletrónica como sugerido em [4,17].

Resumidamente, os resultados sugerem que estas três fibras podem ser usadas como dosímetros em tempo real para radiação gama baseado na alteração da forma espectral induzida pela radiação.

5.2 Irradiação de diferentes FBGs

Após o estudo do efeito da irradiação na transmissão ótica das fibras óticas, o objetivo passou por analisar os efeitos da radiação nas FBGs gravadas nas mesmas fibras de sílica e noutra fibra polimérica (PMMA), ou seja, observar e quantificar a variação do comprimento de onda de Bragg induzida pela radiação e a variação da refletividade da rede de Bragg induzida pela radiação.

De modo a permitir uma análise comparativa do desempenho das diferentes FBGs descritas na Tabela 4.1, estas foram irradiadas simultaneamente. Primeiro foram irradiadas durante 20 horas 27 minutos (ou seja, uma dose total de aproximadamente 13,74 kGy considerando a água como material padrão). De seguida foram expostas a mais 3 horas de irradiação (ou seja, a uma dose adicional de 2,016 kGy). Mas desta vez com um cilindro de PMMA ao seu redor, como representado na Figura 5.7, com o objetivo de funcionar como um material *build up*. O papel deste cilindro de PMMA, explicado mais detalhadamente na secção 5.2.2,

consiste em aumentar a interação da radiação com o sensor. No final da irradiação, os espectros de reflexão das FBGs continuaram a ser gravados durante 1 hora, para determinar a recuperação dos efeitos induzidos pela radiação.

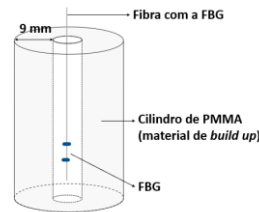


Figura 5.7 – Esquema do cilindro, com 12 mm de diâmetro externo com um furo no meio de 3 mm de diâmetro “build up” com uma FBG no seu interior.

Um esquema da montagem experimental utilizada é apresentado na Figura 5.8. As quatro FBGs foram colocadas no interior da câmara de irradiação, em cima do mesmo suporte fixo de acrílico usado no estudo da irradiação das fibras óticas. Os conectores de cada FBG ficaram na parte exterior do irradiador e foram ligados ao respetivo interrogador de sinal ótico, para permitir a monitorização dos espectros de reflexão em tempo real. Como a fonte de luz do interrogador usado para adquirir os espectros da FBG-PMMA-800 é muito instável, a variação da amplitude do pico de reflexão dessa FBG não foi analisada.

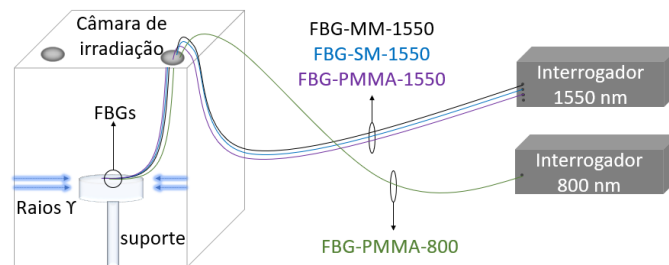


Figura 5.8 – Esquema da montagem experimental usada para a exposição de diferentes FBGs à radiação gama.

Apesar de não se esperar que ocorram variações significativas de temperatura e de humidade foi colocado um termopar no interior da câmara de irradiação para monitorizar a temperatura. Este facto é importante considerando que todas as FBGs irradiadas são sensíveis à temperatura. Para além da temperatura, e em particular, para as FBGs em fibra de PMMA (FBG-PMMA-1550 e FBG-PMMA-800) não poderemos descartar a influência da humidade (sensibilidades apresentadas na Tabela 4.4) que no caso destas medidas não foi possível monitorizar.

5.2.1 Exposição das FBGs a radiação gama

Na Figura 5.9 e na Figura 5.10 são apresentados os gráficos que mostram a variação do comprimento de onda de Bragg ($\Delta\lambda$) e da amplitude (ΔA) ao longo do tempo de irradiação de aproximadamente 20 horas, para as duas FBGs em fibra de sílica multimodo e monomodo, FBG-MM-1550 e FBG-SM-1550 respetivamente.

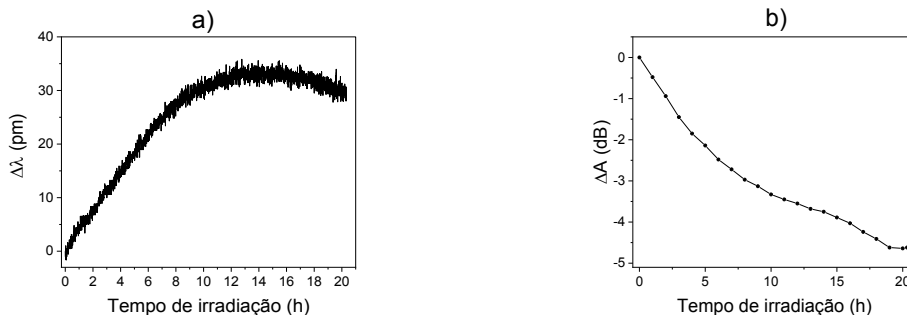


Figura 5.9 – Desempenho da FBG-MM-1550 sob radiação gama: a) variação do comprimento de onda de Bragg em função do tempo de irradiação e b) a variação da amplitude do pico principal da rede de Bragg ao longo do tempo de irradiação.

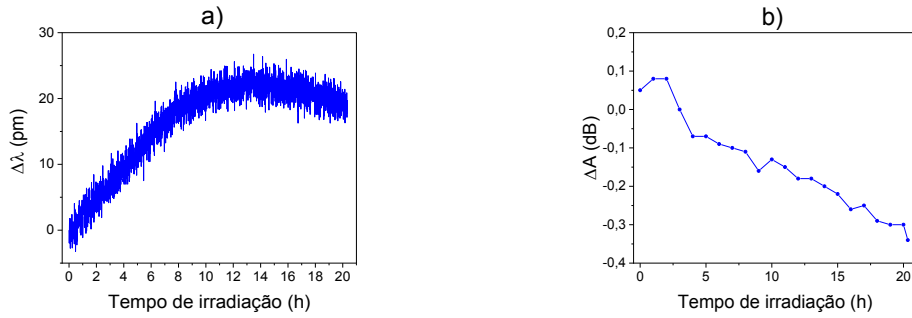


Figura 5.10 - Desempenho da FBG-SM-1550 sob radiação gama: a) variação do comprimento de onda de Bragg em função do tempo de irradiação e b) variação da amplitude do pico da rede de Bragg ao longo do tempo de irradiação.

Pela análise mais detalhada da Figura 5.9 a) e Figura 5.10 a) ou seja, do desvio do comprimento de onda de Bragg (λ_B) ao longo do tempo de irradiação da FBG-MM-1550 e FBG-SM-1550, respetivamente, observa-se que ambas apresentam um comportamento idêntico. O desvio λ_B é positivo durante aproximadamente as primeiras 15 h de irradiação. A partir desse tempo observa-se um desvio ligeiro para menores comprimentos de onda. De uma primeira análise o efeito da temperatura não pode ser descartado. Contudo e apesar da temperatura não ter sido medida em tempo real ao longo da irradiação, sabe-se que entre o início e o final da irradiação variou $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ΔT) no interior da câmara de irradiação. O desvio do comprimento de onda de Bragg associado a esta variação de temperatura ($\Delta\lambda_T$) pode ser calculado, tendo em conta a sensibilidade térmica de cada FBG (S_T), apresentadas na Tabela 4.3, pela expressão:

$$\Delta\lambda_T = \Delta T \times S_T \quad 5.3$$

Sabendo o desvio induzido pela temperatura e o desvio total do comprimento de onda de Bragg observado no final da irradiação ($\Delta\lambda_{total}$), podemos calcular o desvio total induzido pela radiação ($\Delta\lambda_{rad}$), através da equação:

$$\Delta\lambda_{rad} = \Delta\lambda_{total} - \Delta\lambda_T \quad 5.4$$

Os valores dos desvios, para cada FBG, são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Desvio do comprimento de onda de Bragg para as FBGs em fibra de sílica: total observado durante a experiência (1ªcoluna); devido à variação de temperatura total (2ªcoluna) e induzido pela radiação (3ªcoluna) usando a expressão 5.1.

	$\Delta\lambda_{total}$ (pm)	$\Delta\lambda_T$ (pm)	$\Delta\lambda_{rad}$ (pm)
FBG-MM-1550	28,23	11,88	16,35
FBG-SM-1550	18,91	8,95	9,96

Pela análise dos valores na tabela acima é claro que grande parte do desvio observado nas FBG-MM-1550 e FBG-SM-1550 é atribuída aos efeitos da radiação. Esse desvio pode ter origem em alterações do índice de refração efetivo ou do período da rede de Bragg induzidas pela radiação (tal como descrito na secção 3.3). Os resultados obtidos estão de acordo com os resultados obtidos por H. Ye *et al.* [74], onde FBGs inscritas numa fibra de sílica monomodo com dimensões semelhantes à aqui usada foram também expostas a radiação gama. Após corrigirem o efeito da temperatura no desvio observado durante a irradiação, verificaram um aumento linear do comprimento de onda induzido pela radiação. Por comparação com esse estudo, concluímos que a inversão do sentido do desvio do comprimento de onda observado sugere a combinação de efeitos, tanto devido à radiação com a flutuações de temperatura ao longo do teste.

Relativamente à variação da refletividade da rede de Bragg com a radiação, pela análise da Figura 5.9 b) e Figura 5.10 b) observa-se uma variação total de potência ótica $-4,62\text{ dB}$ e $-0,39\text{ dB}$ para a FBG-MM-1550 e FBG-SM-1550 respetivamente. Estes resultados estão de acordo com o observado na secção 5.1, onde as fibras óticas destas FBGs, também foram expostas à radiação gama, tendo-se observado uma maior atenuação do sinal ótico transmitido na fibra da SOF-MM, ou seja, na fibra da FBG-MM-1550. No entanto as

regiões espectrais analisadas são diferentes. Desta forma observamos que a FBG-MM-1550 apresenta uma maior sensibilidade à radiação. A variação da refletividade da rede de Bragg, como vimos na secção 3.3 pode ser devido a defeitos pontuais na estrutura da sílica ou alteração dos parâmetros da rede de Bragg induzida pela radiação. Já a diferente resposta à radiação entre as duas FBGs pode ser devido à dimensão do núcleo, que é bastante superior no caso da fibra SOF-MM. Pelo que há maior probabilidade de a radiação interferir com a transmissão de luz no núcleo da fibra SOF-MM.

Na Figura 5.11, são apresentados os mesmos gráficos, isto é, $\Delta\lambda$ e ΔA em função do tempo de irradiação para a FBG-PMMA-1550 e FBG-PMMA-800.

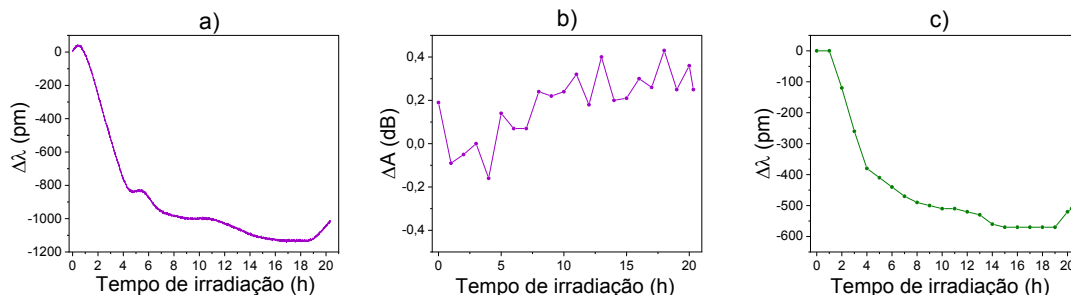


Figura 5.11 - Desempenho da FBG-PMMA-1550 sob radiação gama: a) variação do comprimento de onda de Bragg em função do tempo de irradiação e b) variação da refletividade da rede de Bragg ao longo do tempo de irradiação. E desempenho da FBG-PMMA-800 sob radiação gama: c) variação do comprimento de onda de Bragg em função do tempo de irradiação.

Pela análise dos gráficos da Figura 5.11 a) e c), correspondentes ao desvio do comprimento de onda de Bragg ao longo do tempo de exposição à radiação da FBG-PMMA-1550 e FBG-PMMA-800, observamos que o desvio total foi para comprimentos de onda menores. A variação do comprimento de onda de Bragg total ($\Delta\lambda_{total}$), associado à temperatura ($\Delta\lambda_T$) e à radiação ($\Delta\lambda_{rad}$) para cada FBG polimérica, são apresentados na Tabela 5.2. Esses desvios foram calculados da mesma forma descrita anteriormente para as FBGs em sílica.

Tabela 5.2 - Desvio do comprimento de onda de Bragg para as FBGs em fibra PMMA-mPOF: total observado com a irradiação (1ª coluna); devido à variação de temperatura total (2ª coluna) e induzido pela radiação (3ª coluna).

	$\Delta\lambda_{total}$ (pm)	$\Delta\lambda_T$ (pm)	$\Delta\lambda_{rad}$ (pm)
FBG-PMMA-1550	-1019,18	-61,105	-958,08
FBG-PMMA-800	-510	-31,273	-478,73

Pela análise dos valores na tabela acima verificamos que parte do desvio observado nas FBG-PMMA-1550 e FBG-PMMA-800 é atribuída ao impacto da radiação. Mais uma vez, o desvio pode ter origem em alterações do índice de refração efetivo ou do período da rede de Bragg induzidas pela radiação. Comparando as duas FBGs, observamos que a FBG com o comprimento de onda de Bragg na região espectral dos 1550 nm é mais sensível à radiação.

Apesar de não serem esperadas variações significativas nem de temperatura nem humidade no interior da câmara de irradiação, como já referido anteriormente, é importante lembrar que no caso das FBGs em PMMA por serem significativamente mais sensíveis à humidade comparativamente com as FBGs gravadas em sílica, não podemos descartar alguma contribuição do efeito da variação da humidade no desvio do comprimento de onda de Bragg observado durante a radiação.

Ainda pela análise dos gráficos presentes na Figura 5.11 a) e c) apesar de uma forma geral o desvio ser negativo observam-se algumas flutuações para desvios positivos no decorrer do tempo de irradiação em ambas as FBGs. Mais especificamente após 10 horas e 19 horas de irradiação. Este comportamento corrobora a hipótese de que o desvio observado resulta de uma combinação dos efeitos da radiação, da temperatura e adicionalmente da humidade ao longo da experiência. O facto de essas flutuações terem ocorrido ao mesmo tempo nas duas FBGs apoia essa hipótese. Adicionalmente na FBG-PMMA-1550 são observadas mais duas flutuações positivas no início da irradiação e após 5 horas, que acreditamos não serem observadas na FBG-PMMA-800 uma vez que o sistema de interrogação desta FBG apresenta uma resolução inferior.

Em [19], também foi investigado o efeito da irradiação com neutrões rápidos no desempenho de FBGs gravadas em fibras poliméricas de PMMA. Neste estudo os autores sugerem que o desvio do

comprimento de onda observado podia ser devido a uma degradação estrutural da cadeia principal do polímero. Mas contrariamente ao que foi observado neste trabalho, verificaram um desvio positivo do comprimento de onda de Bragg com a irradiação (índice de refração efetivo do PMMA diminui) o que sugere que o tipo de defeitos induzidos por radiação gama são de origem distinta à formada pela interação com neutrões. Além disso, sugere que a irradiação gama das FBGs em PMMA, resulta num aumento do índice de refração efetivo.

Relativamente à variação da amplitude do pico de reflexão da FBG-PMMA-1550 ao longo do tempo de irradiação, apresentada no gráfico da Figura 5.11 b), não se observam variações significativas ($\Delta A = -0,06$ dB). Não é apresentado a variação da refletividade da rede de Bragg ao longo do tempo de irradiação para a FBG-PMMA-800 devido a instabilidade da fonte do interrogador usado para a sua monitorização.

Os resultados obtidos sugerem que as FBGs aqui estudadas sob radiação gama, tanto nas fibras de sílica como na fibra polimérica, têm potencial para serem usadas em aplicações de dosimetria da radiação gama. Sendo que as FBGs poliméricas apresentam maior sensibilidade à radiação.

5.2.2 Com material de acumulação “build up”

De seguida e de forma a aumentar absorção da radiação gama e assim promover uma maior interação da radiação com as FBGs estas foram inseridas dentro de um cilindro de PMMA (ilustrado anteriormente na Figura 5.7), funcionando como um material de acumulação *build up*. As mesmas FBGs, agora inseridas num cilindro de PMMA com 9 mm de espessura foram irradiadas durante mais 3 horas.

O conceito de fator build up (B) é definido como a razão entre a dose total e a dose não dispersa. O fator de build up de cada material depende da energia dos fotões (E) e da espessura como descrito pela expressão seguinte [75]:

$$I = B(E, x)I_0e^{-\mu x} \quad 5.5$$

onde I é a intensidade do feixe incidente, I_0 a intensidade da radiação transmitida, μ coeficiente de atenuação linear do material e x espessura do material.

Considerando a expressão 5.5, o uso do cilindro de PMMA tem particular relevância para o aumento da absorção da radiação gama considerando a natureza da interação desta radiação com a matéria e o facto das fibras e dos detetores FBGs terem uma dimensão reduzida o que implica uma baixa probabilidade de interação dos raios gama com os sensores FBG. Para avaliar o efeito do *build up* na irradiação das FBGs, recorreu-se a uma simulação realizada no programa Geant 4 de forma observarmos, apenas de forma qualitativa, a energia depositada pela radiação gama na fibra SOF-SM, onde a FBG-SM-1550 foi gravada, sem e com o build up à volta da fibra. Na simulação foram considerados 100 milhões raios gama distribuídos em 4 mm de uma fibra, com o núcleo e a bainha de sílica e com as dimensões reais da fibra SOF-SM. Não foi considerado o revestimento da fibra, uma vez que a FBG é gravada na fibra sem essa camada. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.12.

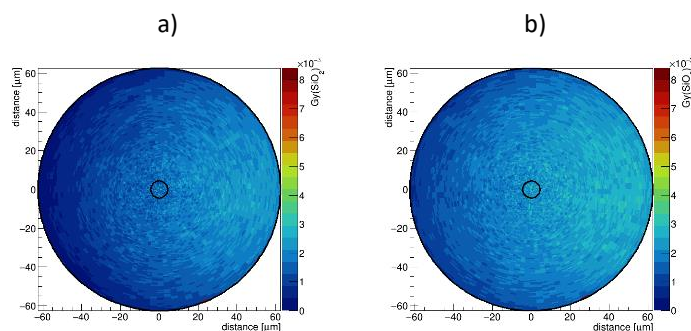


Figura 5.12 - Depósito de energia (escala de cores em Gy [SiO₂]) e profundidade de penetração (escala à esquerda e em baixo em μm) da radiação gama na: a) fibra SOF-SM e b) fibra SOF-SM no interior do build up.

É importante mencionar que a simulação não corresponde exatamente às condições utilizadas durante a irradiação. Primeiro na simulação considera-se que a radiação gama apenas incidia de um lado da fibra, e na experiência realizada a radiação incidia dos dois lados como podemos ver pelo esquema da montagem experimental (Figura 5.8). Nesse caso seria esperado uma melhor homogeneidade da distribuição

da energia depositada. Além disso foi considerado que a composição da fibra era sílica tanto na bainha como no núcleo, desprezando o facto do núcleo ser dopado com germânio e boro por não sabermos as concentrações.

Pela análise da Figura 5.12 a), observa-se uma acumulação da dose de radiação do lado direito (pois foi considerado que a radiação incide do lado oposto). A acumulação do lado oposto à incidência da radiação deve-se à profundidade de penetração de raios gama. Comparando os resultados obtidos com build up e sem build up (Figura 5.12 a) e b)), nota-se um ligeiro aumento de dose absorvida com o uso do build up. Baseado nestes resultados é espectável observar um ligeiro aumento do depósito de energia da radiação gama no interior da fibra quando é usado um build up de PMMA.

Os gráficos do desvio do comprimento de onda de Bragg ao longo do tempo de irradiação para cada FBG são apresentados na Figura 5.13.

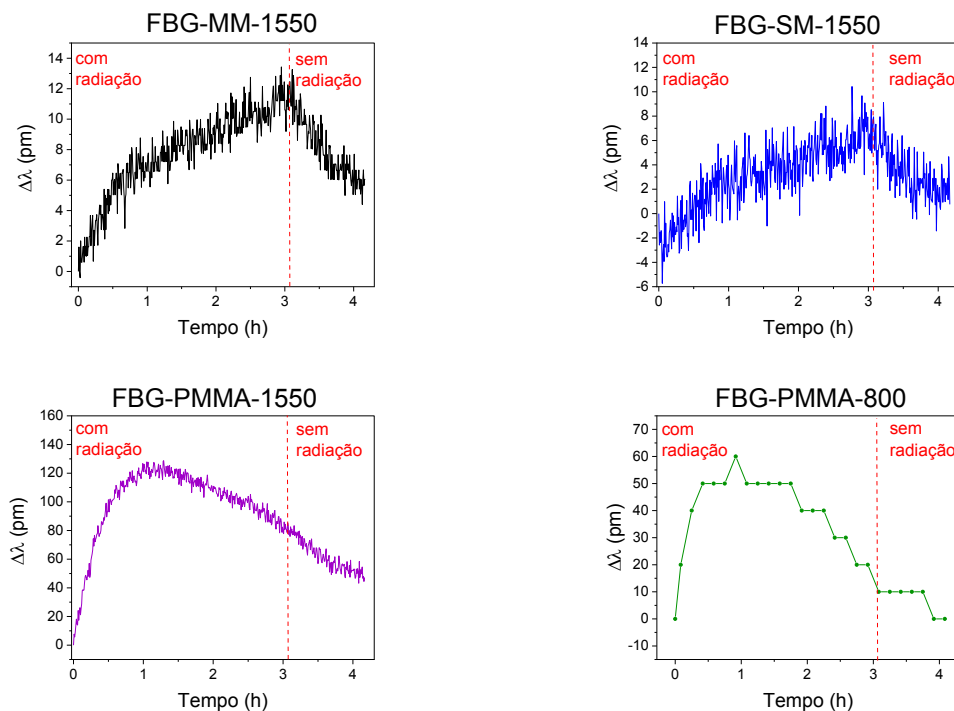


Figura 5.13 – Variação do comprimento de onda em função do tempo de irradiação (à esquerda da linha vermelha) e após a irradiação parar (à direita da linha vermelha) desta para a: FBG-MM-1550 (preto), FBG-SM-1550 (azul), FBG-PMMA-1550 (roxo) e FBG-PMMA-800 (verde).

Relativamente à parte com radiação (à esquerda da linha vermelha), pela análise dos gráficos da FBG-MM-1550 e FBG-SM-1550, apresentados na Figura 5.13, observa-se um desvio para maiores comprimentos de onda ao longo do tempo de irradiação. Já nas FBGs em fibra polimérica (FBG-PMMA-1550 e FBG-PMMA-800) observa-se inicialmente um desvio positivo, durante aproximadamente a primeira hora de irradiação, e de seguida um desvio para menores comprimentos de onda. De salientar que o gráfico do desempenho da FBG-PMMA-800 apresenta menos dados experimentais que os restantes gráficos presentes na Figura 5.13 devido a limitações do interrogador usado para monitorizar desta FBG específica (com comprimento de onda de Bragg numa gama espectral distinta das outras).

Mais uma vez, para o desvio total observado deve ser considerada a contribuição da variação da temperatura e dos efeitos induzidos pela radiação. A variação do comprimento de onda de Bragg total ($\Delta\lambda_{total}$), associado à temperatura ($\Delta\lambda_T$) e à radiação ($\Delta\lambda_{rad}$) para cada FBG, após aproximadamente 3 horas de irradiação, são apresentados na Tabela 5.3. Esses desvios foram calculados da mesma forma descrita na secção 5.2.1. O $\Delta\lambda_T$ foi calculado tendo em conta a variação total de temperatura nesse intervalo de tempo de 0,5°C.

Tabela 5.3 - Desvio do comprimento de onda de Bragg para as FBGs irradiadas com *build up*: total observado durante a irradiação (1ªcoluna); devido à variação de temperatura (2ªcoluna) e induzido pela radiação (3ªcoluna).

	$\Delta\lambda_{total}$ (pm)	$\Delta\lambda_T$ (pm)	$\Delta\lambda_{rad}$ (pm)
FBG-MM-1550	12,22	5,4	6,82
FBG-SM-1550	7,31	4,07	3,24
FBG-PMMA-1550	86,10	-27,78	113,88
FBG-PMMA-800	20,00	-14,22	34,22

Novamente verifica-se que para cada FBG estudada, parte do desvio do comprimento de onda de Bragg total observado, é atribuída a efeitos da radiação nos sensores. No caso das FBGs em sílica, o baixo valor de $\Delta\lambda_{rad}$ sugere que pode estar associado a erros dos equipamentos, quer do termopar usado para medir a temperatura, quer do interrogador usado para medir o espectro de reflexão das FBGs.

O desvio induzido pela radiação pode ser devido a uma variação do índice de refração e/ou do período da rede induzida pela radiação. Relembro que para as FBGs poliméricas não podemos descartar uma pequena contribuição da variação de humidade para o valor estimado do desvio total induzido pela radiação, que não conseguimos quantificar uma vez que a humidade não foi controlada.

Para cada FBG, o comportamento do desvio do comprimento de onda de Bragg observado durante o tempo de irradiação, deve estar relacionado com a combinação dos efeitos da radiação e da temperatura ao longo do teste, e no caso das FBGs poliméricas adicionalmente com o efeito da humidade. Para analisar o comportamento do desvio do comprimento de onda de Bragg induzido apenas pela radiação, a temperatura e a humidade teriam de ser controladas em cada ponto experimental. Mas como vimos pelos dados presentes na Tabela 5.3, a radiação parece ser o fator determinante para o desvio observado nas FBGs poliméricas.

Além disso, nas FBGs poliméricas, observa-se uma inversão do sentido do desvio do comprimento de onda de Bragg, aproximadamente após 1 hora de irradiação. Caso futuramente, por um controlo preciso da temperatura e da humidade, se prove que esse comportamento, da inversão do sentido do desvio, não tem origem em efeitos da temperatura e da humidade, tal como se espera, deve considerar-se a possibilidade de diferentes danos provocados pela radiação na fibra polimérica que provoquem uma variação positiva e negativa do índice de refração ou do período da rede de Bragg.

Uma inversão do desvio do comprimento de onda de Bragg já foi reportada na literatura para uma FBG inscrita numa fibra de sílica, tendo os autores sugerido que a inversão do sentido do desvio observada podia ser devido à presença de dois tipos diferentes de defeitos: um responsável pelo aumento do índice de refração e outro pelo seu decréscimo [7]. No nosso caso, como referido, o mesmo pode estar a acontecer, ou seja, a inversão do sentido do desvio também pode ter origem em dois tipos de danos diferentes causados pela radiação. Nas fibras poliméricas, como a molécula do polímero é composta por milhões de unidades monoméricas, uma pequena alteração química induzida pela irradiação pode causar mudanças no desempenho físico da FBG. Sendo que a RIA neste material deve-se principalmente a quebra da cadeia principal (*main chain scission*) ou a ligações cruzadas (*cross linking*) no núcleo da fibra. Por exemplo a ligação cruzada por irradiação corresponde ao fenómeno da molécula do polímero unir ligações entre si, que resulta num aumento na massa molecular do polímero com a dose de irradiação absorvida [12]. A RIA pode ser relacionada com alterações do índice de refração e consequentemente com o desvio do comprimento de onda de Bragg.

Tal como observado, na primeira irradiação destas FBGs, ou seja, sem o material *build up* (Tabela 5.1 para as FBGs em sílica e Tabela 5.2 para as FBGs em PMMA), verifica-se que a FBG-PMMA-1550 é a mais sensível à radiação e a FBG-SM-1550 a menos. No entanto não é possível comparar diretamente os desvios obtidos com e sem *build up*, para avaliar se realmente houve mais interação da radiação com as FBGs com o uso do material de *build up*, uma vez que estas FBGs já tinha sido previamente irradiadas durante 20 horas. Para avaliar verdadeiramente o efeito do *build up* este estudo devia ter sido feito com FBGs virgens, que não tivessem expostas anteriormente a radiação.

Observa-se ainda que o desvio do comprimento de onda de Bragg ao longo do tempo de irradiação, para as FBGs em sílica, é positivo em ambas as experiências de irradiação. No caso das FBGs poliméricas, o mesmo não acontece. No caso da irradiação sem *build up* o desvio ao longo do tempo de irradiação foi para menores comprimentos de onda. Contrariamente, à irradiação sem *build up* o desvio observado foi para

maiores comprimentos de onda. Isto sugere que os danos promovidos pela irradiação gama com build up acumulados aos danos causados previamente durante a irradiação sem build up induzem um distinto comportamento do desvio do comprimento de onda com a dose de radiação. Além disso, os resultados sugerem ainda que o papel do build up é fundamental na acumulação de danos.

Relativamente à variação da amplitude do pico da rede de Bragg ao longo do tempo de irradiação, não foram detetados efeitos significativos induzidos pela radiação. A variação de amplitude observada foi de -0,47 dB, -0,08 dB e 0 dB para a FBG-MM-1550, FBG-SM-1550 e FBG-PMMA-1550, respetivamente. Como referido anteriormente não é possível fazer a mesma análise para a FBG-PMMA-800, devido a limitações do interrogador utilizado.

5.2.3 Recuperação

Após os dois estudos de irradiação sem build up e com build up, espetros das FBGs continuaram a ser gravados com o objetivo de verificar se o desvio observado do comprimento de onda de Bragg durante a irradiação seria reversível.

Na Figura 5.13, em cada gráfico apresentado relativo a cada uma das FBGs irradiadas, a parte à esquerda da linha tracejada a vermelho representa o desvio do comprimento de onda de Bragg durante a irradiação com *build up*, e a parte à direita corresponde ao desvio do comprimento de onda de Bragg após o final da irradiação. Pela análise da parte “sem radiação” dos gráficos, verifica-se que após o final da irradiação, dá-se uma inversão no sentido do desvio do comprimento de onda de Bragg no caso das FBGs em sílica. No entanto, no caso das FBGs em fibra polimérica, observa-se que desvio do comprimento de onda de Bragg continua a ser negativo, ou seja, a variação é no mesmo sentido observado durante a irradiação.

Calculou-se o desvio do comprimento de onda de Bragg devido a danos causados pela radiação ou recuperação destes, $\Delta\lambda_{rad}$, pela diferença entre o $\Delta\lambda_{total}$ observado após o final da irradiação e o $\Delta\lambda_T$ nesse tempo, devido a uma variação de temperatura de 0,2°C. Tendo-se verificado que o desvio do comprimento de onda total observado após a irradiação parar não é apenas devido a variação de temperatura. Como a variação de temperatura foi pequena, o mesmo se espera relativamente à variação da humidade relativa, no entanto não é possível descartar estes efeitos. O que indica que na ausência da radiação gama, para o desvio do comprimento de onda de Bragg total observado deve ser considerada uma contribuição significativa dos efeitos associados aos danos provocados pela radiação nas FBGs. Ou seja, os resultados sugerem que as FBGs, tanto em sílica como em PMMA, podem ser usadas como dosímetros em tempo real, mas não como dosímetros passivos.

As variações da refletividade de cada FBG ao longo do tempo de irradiação, não foram analisadas uma vez que não se observaram alterações durante o teste de irradiação com *build up*.

5.2.4 Sensibilidade térmica e à humidade relativa das FBGs após irradiação

De forma a avaliar com o efeito da irradiação na sensibilidade térmica e à humidade foram realizados novos testes na câmara climática para obter as sensibilidades das FBGs após terem sido expostas a radiação gama (primeiro com e depois sem material de *build up*). Na Figura 5.14 são apresentadas as sensibilidades térmicas das FBGs antes (cor clara) e pós irradiação (cor escura).

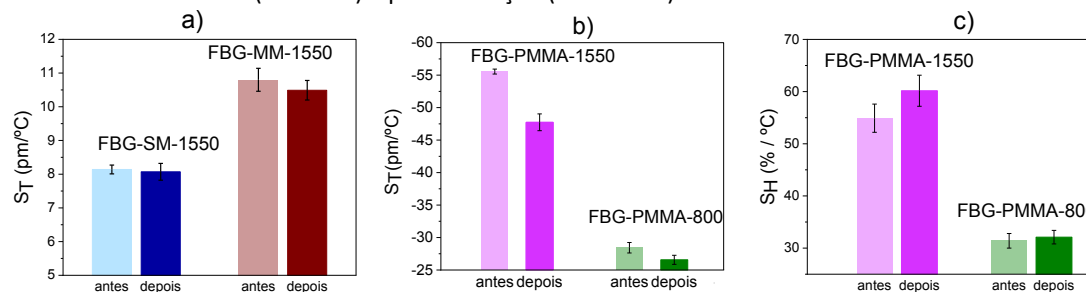


Figura 5.14 - Sensibilidade térmica antes (cor clara) e depois (cor escura) da exposição à radiação gama dos sensores: a) FBG-SM-1550 (azul) e FBG-MM-1550 (vermelho) e b) FBG-PMMA-1550 (roxo) e FBG-PMMA-800 (verde). Sensibilidade à humidade relativa (cor clara) e depois (cor escura) da exposição à radiação gama dos sensores FBG-PMMA-1550 (roxo) e FBG-PMMA-800 (verde).

Observa-se que os valores das sensibilidades à temperatura se mantêm idênticos para as FBGs em sílica (Figura 5.14 a)) corroborando o que está reportado em outros estudos sobre os efeitos da radiação em FBGS [7]. Já no caso das FBGs na fibra de PMMA (Figura 5.14 b)) verifica-se que a sensibilidade térmica diminuiu após a irradiação em ambas e que esta diminuição é mais evidente na FBG-PMMA-1550.

Como já referido na secção 2.1, a sensibilidade térmica de uma FBG depende do comprimento de onda de Bragg, do coeficiente de expansão térmica (relacionado com o período da rede de Bragg) e do coeficiente termo-ótico (relacionado com o índice de refração efetivo da rede de Bragg). Como vimos estes parâmetros podem ter sido afetados durante a irradiação. No entanto, a alteração da sensibilidade térmica pode ser influenciada por outros fatores, para além da exposição à radiação gama, tais como, erros experimentais e erros dos equipamentos.

Na Figura 5.14 c) são apresentadas as sensibilidades à humidade relativa das FBGs em PMMA antes e após a exposição à radiação. Ao contrário do observado para a sensibilidade à temperatura, verifica-se que os valores de sensibilidade à humidade se mantêm idênticos após a irradiação em ambas as FBGs. Este resultado sugere que a FBG-PMMA-1550 e a FBG-PMMA-800 apresentam potencial para serem usadas em conjunto no desenvolvimento de um sensor multiparâmetros, nomeadamente de humidade relativa e radiação, uma vez que apresentam diferentes sensibilidades à radiação e diferentes sensibilidade à humidade (não afetadas pela irradiação), se a temperatura desse ambiente for constante. Para ambientes de temperatura não constantes, seriam necessários mais estudos da sensibilidade térmica para diferentes FBGs e tempos de irradiação, para confirmarmos se a diminuição da sensibilidade térmica se mantinha após exposição à radiação gama.

Capítulo 6 - Irradiação com protões

Nesta parte, novas amostras de fibras óticas de sílica e CYTOP foram expostas a um feixe de protões. Também foram expostos novos sensores FBGs gravados em sílica: FBG-SM-1550 e FBG-MM-1550. Para isso foram utilizadas duas montagens experimentais, cada uma com recurso a um acelerador de partículas diferente, Van de Graaff e Tandem, instalados no Laboratório de Aceleradores e Tecnologias de Radiação do Campus Tecnológico e Nuclear do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (Bobadela).

Os protões utilizados (H^+) têm origem na ionização de um gás de hidrogénio que posteriormente são acelerados e guiados por uma linha em vazio até uma câmara onde é realizada a irradiação. No acelerador Van de Graaff é possível obter uma tensão máxima do terminal de 2,5 MeV. A energia da partícula acelerada vai depender do seu estado de carga, e neste caso como foram usados protões (H^+), é possível obter um feixe com 2,5 MeV de energia máxima. Com este acelerador, as irradiações podem ser feitas com recurso a um feixe externo de partículas, e, portanto, é fácil variar a energia do feixe que atinge a amostra, pela variação da distância fonte-amostra. Já no acelerador Tandem, é possível obter um feixe de protões energias mais elevadas, até a um máximo de aproximadamente 6 MeV, uma vez que a tensão máxima do terminal é 3 MeV e o acelerador possui 2 estágios de aceleração. No entanto, os estudos de irradiação realizados com este acelerador têm de ser realizados em vácuo, visto que na câmara de irradiação à qual está acoplado o acelerador não permite realizar irradiações com feixe externo [76].

6.1 Exposição de diferentes fibras óticas a um feixe de protões

Para avaliar a atenuação induzida pela radiação nas fibras (SOF-SM e SOF-MM, ambas sem revestimento), estas foram expostas a um feixe de protões com 3 MeV de energia. Para isso recorreu-se ao acelerador Tandem, onde apesar se ser possível realizar irradiações de maior energia, por razões de segurança e estabilidade o máximo de energia de irradiação foi de 3 MeV.

Para além das fibras de sílica o efeito da irradiação em fibras poliméricas foi também avaliado, em particular para o caso fibras poliméricas, CYTOP-MM-POF. Relativamente às fibras PMMA-mPOF não foi possível devido a alguns desafios encontrados durante a montagem experimental (associados ao tamanho das fibras, conetores, possíveis danos ao longo da fibra).

De forma a avaliar o efeito da irradiação foi feito um estudo da variação da sua transmissão em função da dose de irradiação. Para a realização das medidas de transmissão usou-se a mesma lâmpada e espectrómetro já referidos anteriormente e descritos no capítulo 5. Estes equipamentos foram conectados a fibra ótica que se pretendia irradiar no interior da câmara com recurso a dois passadores óticos que faziam a ligação entre o interior e o exterior da câmara de vácuo. Isto permitiu realizar as medições da transmissão óticas das fibras em tempo real. Foi analisada a gama de comprimentos de onda entre os 200 e os 1100 nm. Um esquema da montagem experimental é apresentado na Figura 6.1.

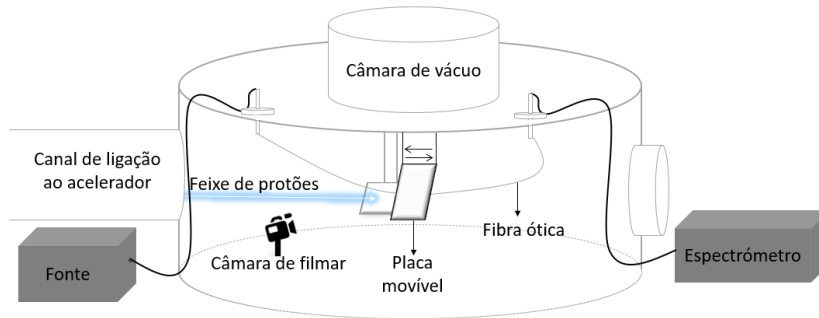


Figura 6.1 – Esquema da montagem experimental da irradiação de diferentes fibras óticas com um feixe de prótons, no interior de uma câmara de vácuo.

Antes de se iniciar a exposição das fibras à radiação, foi realizado um processo de alinhamento do feixe com o porta-amostras, com a finalidade de definir a área onde ocorreria a irradiação. A área do feixe também foi posteriormente utilizada, juntamente com a corrente de prótons, para estimar o fluxo de prótons, através da equação:

$$\text{fluxo} (n^{\circ}\text{prótons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) = \frac{\text{corrente (C/s)}}{\text{área do feixe (cm}^2) \times \text{carga do próton (C)}} \quad 6.1$$

Sendo a fluência calculada pela multiplicação do fluxo com o tempo de irradiação, dada em $n^{\circ}\text{prótons} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Na Figura 6.2 encontra-se uma fotografia da montagem experimental no interior da câmara de vácuo onde é possível ver o porta-amostras, a placa móvel e a câmara de filmar.



Figura 6.2 – Fotografias da montagem experimental no interior da câmara de vácuo onde foi realizada a irradiação.

Em cada fibra ótica, a profundidade de penetração do feixe de prótons, de 3 MeV de energia e o depósito de energia em cada região da fibra (núcleo, bainha e revestimento quando presente), foram estimados com recurso a uma simulação realizada no programa Geant 4 ([77]). Os gráficos obtidos da deposição de energia e da profundidade de penetração dos prótons nas fibras são apresentados na Figura 6.3. Também poderia ter sido usado o programa SRIM ([78]), no entanto o Geant 4 oferece algumas vantagens. Tanto o SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) como o Geant4 são programas que oferecem a possibilidade de simular a passagem de partículas pela matéria e estimar algumas grandezas relacionadas com a interação da radiação com a matéria, tais como, profundidade de penetração das partículas, energia depositada, concentração de defeitos, entre muitas outras. No entanto, no SRIM as partículas são limitadas a iões, enquanto o Geant4 oferece a vantagem do uso de fótons. Outra vantagem do Geant 4, é a possibilidade de escolher a geométrica da fonte de radiação assim como do detetor, ou seja personalizar a

simulação de forma a aproximar-se mais do caso real. Desta forma com o programa Geant 4 conseguimos definir a geometria cilíndrica das fibras óticas enquanto no SRIM apenas podemos usar uma geometria planar. Além disso, o Geant4 permite o registo de interações tanto das partículas da fonte de radiação, como das partículas secundárias, que resultam das interações das partículas primárias com a matéria.

Na simulação realizada no Geant 4, foram considerados 1 milhão de prótons a incidir na fibra. No caso das fibras SOF-SM e SOF-MM foi considerado que tanto o núcleo como a bainha são de sílica e desprezou-se os dopantes por se desconhecer as suas concentrações. O revestimento não foi considerado porque as fibras nesta experiência foram irradiadas sem revestimento. No caso da fibra CYTOP-MM-POF considerou-se o núcleo de 50 μm de CYTOP e a bainha externa de 490 μm apenas de policarbonato (em vez de poliéster e policarbonato). Ou seja, desprezou-se a presença de uma bainha interna de 20 μm de espessura cuja composição não sabemos.

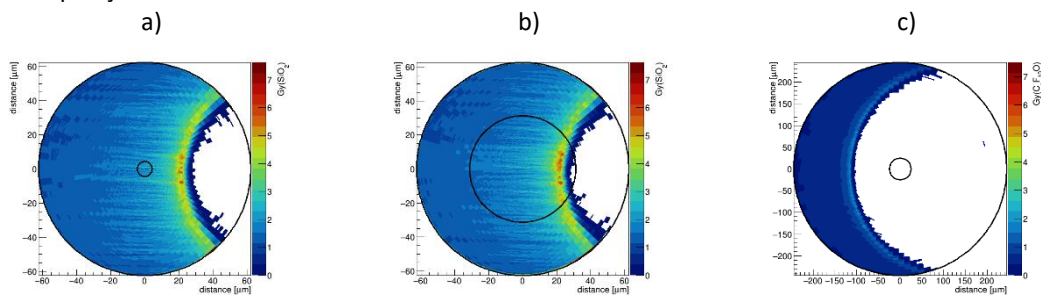


Figura 6.3 – Profundidade de penetração (escala à direita e em baixo em μm) e depósito de energia (escala de cores corresponde em Gy [SiO₂] para a) e b) e em Gy [policarbonato] para c)) por um feixe de prótons com 3 MeV de energia na fibra ótica: a) SOF-SM, b) SOF-MM e c) CYTOP-MM-POF.

Relativamente às fibras de sílica, como é considerada a mesma composição, a profundidade de penetração e a deposição de energia dos prótons na fibra também são praticamente iguais. No entanto o maior depósito de energia (representado a vermelho) em cada fibra localiza-se em regiões diferentes. No caso da fibra SOF-SM, o feixe ultrapassa o núcleo e pára na bainha do lado oposto à incidência do feixe, sendo que os prótons depositam aí a maior parte da sua energia. No entanto, apesar da maior concentração de danos ser esperada na bainha, tendo em conta que é nessa região que ocorre a interação nuclear, também deverão ocorrer defeitos na região do núcleo devido à interação eletrónica. Já no caso da fibra SOF-MM, os prótons depositam a maior parte da sua energia na região do núcleo da fibra. Contrariamente, na fibra SOF-MM, a maior concentração de danos esperada é no núcleo, tendo em conta que é aí que ocorre a interação nuclear, mas também deveram ocorrer defeitos na região da bainha devido à interação eletrónica. Comparando o depósito de energia nas duas fibras de sílica, espera-se que sejam criados mais danos no núcleo da fibra SOF-MM do que no núcleo da fibra SOF-SM e conseqüentemente se observe maior atenuação induzida por radiação na fibra SOF-MM.

É importante referir ainda que se considerássemos a dopagem do núcleo destas fibras, SOF-SM e SOF-MM, seria expectável um maior depósito de energia em ambas. Uma vez que a perda de energia específica dos prótons ao longo da sua trajetória, aumenta com o número atómico dos materiais. E ambas são dopadas com germânio no núcleo, e este elemento apresenta um número atómico mais elevado ($Z(\text{Ge})=32$) que os elementos da sílica ($Z(\text{Si})=14$ e $Z(\text{O})=8$).

Relativamente à fibra polimérica CYTOP-MM-POF, o diâmetro da fibra (diâmetro total da fibra 490 μm) é muito maior do que as fibras de sílica (ambas com aproximadamente 125 μm de diâmetro total sem o revestimento). Conseqüentemente o mesmo número de prótons usados na simulação são distribuídos por uma área maior e assim observa-se um menor depósito de energia por unidade de área nesta fibra. Além disso podemos ver que nenhum próton atinge o núcleo da fibra. Logo não se espera observar mudanças significativas na transmissão ótica desta fibra considerando a energia de feixe de 3 MeV, uma vez que não deverão ser criados danos por radiação no núcleo desta fibra.

6.1.1 Resultados de Irradiação da fibra SOF-SM

A fibra SOF-SM foi irradiada com um fluxo de $(0,416 \pm 0,014) \times 10^{10}$ *prótons/cm²s* durante 29 minutos resultando numa fluência total de $(7,24 \pm 0,28) \times 10^{12}$ *prótons/cm²*.

Na Figura 6.4 a) estão presentes os espectros de transmissão ótica da fibra antes de ser irradiada e no final da irradiação. A Figura 6.4 b) mostra a atenuação induzida por radiação para diferentes tempos de irradiação em função do comprimento de onda. Assim podemos observar claramente que a região espectral mais afetada pela radiação está compreendida entre os 350 nm e os 750 nm. Os valores da RIA foram calculados através da seguinte expressão (semelhante à equação 3.3):

$$RIA(u. a) = \frac{I(\lambda, t = 0)}{I(\lambda, t)} \quad 6.2$$

onde $I(\lambda, t = 0)$ e $I(\lambda, t)$ correspondem a intensidade do espectro de transmissão da fibra antes de exposta à radiação e ao espectro de transmissão da fibra após a exposição à radiação durante um determinado tempo (t), respetivamente.

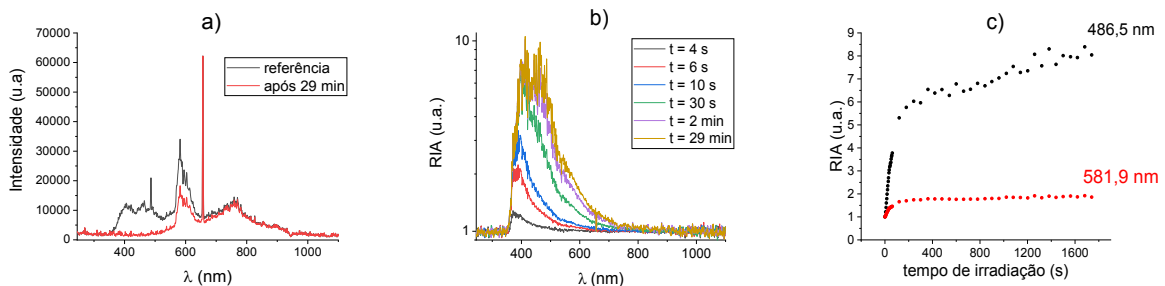


Figura 6.4 – Irradiação da fibra SOF-SM: a) espectro de transmissão da fibra SOF-SM, antes (preto) e no final de 29 minutos de irradiação (vermelho) com um feixe de prótons, b) RIA em função do comprimento de onda para diferentes tempos de irradiação (doses) e c) variação da RIA ao longo do tempo de irradiação para dois comprimentos de onda na região afetada pela radiação (486,5 nm e 581,9 nm).

A atenuação da transmissão do sinal ao longo da fibra é clara para os comprimentos de onda menores, até aproximadamente 625 nm. Para maiores comprimentos de onda, a RIA é muito menos acentuada mais ainda é mensurável, até aproximadamente aos 750 nm. A partir deste valor não se observa degradação da transmissão ótica (Figura 6.4 a)).

Pela análise do gráfico Figura 6.4 b), nota-se que a RIA aumenta sucessivamente ao longo do tempo de irradiação (ou seja, com o aumento da dose) entre os 350 nm e os 750 nm. Particularmente, para a região espectral até aos 500 nm a RIA parece ter atingido a saturação passado um determinado tempo de irradiação, acima do qual o espectro fica inalterado, sendo que a fibra parece ter perdido totalmente a transparência nessa gama (350nm - 500nm). Para comprimentos de onda inferiores a 350 nm e superiores a 950 nm, o sinal medido corresponde ao sinal de fundo do detetor, que não apresenta significado físico, uma vez que a fibra é opaca para estas regiões previamente ao processo de irradiação.

Na Figura 6.4 c) podemos observar mais claramente a dependência da RIA com o aumento da fluência acumulada, ou seja, ao longo do tempo de irradiação, para dois comprimentos de onda. Pela análise do gráfico, podemos ver que a RIA aumenta rapidamente para doses baixas (menor tempo de exposição à radiação), enquanto para doses mais altas parece tender para a saturação. Ou seja, a sensibilidade da fibra à radiação diminui com o aumento da dose. Para o comprimento de onda de 581,9 nm, observamos que a RIA se manteve constante, e segundo o defendido em [14] a saturação da RIA é atingida quando as taxas de destruição e de recuperação da estrutura do material sob irradiação atingem o equilíbrio, de modo que a RIA atinge um valor constante para o aumento de dose.

Após aproximadamente mais de 1 dia e meio do final da irradiação, foi adquirido um espectro de transmissão da fibra (presente na Figura 6.5 a)), com o objetivo de analisar se houve recuperação da atenuação induzida na fibra. As intensidades de transmissão desse espectro foram normalizadas as do espectro obtido antes da exposição à radiação, de modo a eliminar as variações de potência ótica devido ao acoplamento ótico (dos conetores da fibra irradiada com os conetores do equipamento de medição utilizado). Para a normalização, as intensidades óticas de cada comprimento de onda (λ) do espectro de recuperação ($I_{recuperação}(\lambda)$) foram multiplicadas pela razão das intensidades óticas no $\lambda = 872,6$ nm entre espectro de referência ($I_{ref}(\lambda = 872,6 \text{ nm})$) e no espectro de recuperação ($I_{recuperação}(\lambda = 872,6 \text{ nm})$):

$$\frac{I_{ref}(\lambda = 872,6)}{I_{recupera\c{c}o}(\lambda = 872,6)} \times I_{recupera\c{c}o}(\lambda)$$

6.3

O comprimento de onda de normalização foi escolhido por não serem observadas variações significativas de intensidade ótica com a irradiação nesse ponto.



Figura 6.5 – Recuperação da transmissão ótica da fibra SOF-MM. Em a) estão representados os espectros de transmissão ótica da fibra antes (preto), no final de 29 minutos de irradiação (vermelho) e algum tempo após a irradiação parar (azul). Em b) é apresentada a razão entre a intensidade de um determinado comprimento de onda (afetado pela radiação) com a intensidade de outro de referência (não afetado pela irradiação de 925,162 nm) para a pré-irradiação (1º ponto), final da irradiação (2º ponto) e algum tempo após a irradiação parar (3º ponto-recuperação).

A partir dos 500 nm observa-se que houve recuperação de pelo menos parte da transmissão ótica original da fibra e, particularmente em redor dos 600 nm parece ser quase total. O mesmo não se verifica para a região espectral menor, onde o sinal se manteve idêntico ao obtido no final da irradiação. Já para maiores comprimentos, entre 650 nm e 750 nm, a transmissão parece ser ligeiramente maior do que a da fibra antes da irradiação.

A Figura 6.5 b) mostra a recuperação da transmissão da fibra para diferentes comprimentos de onda afetados pela exposição à radiação: 464,7 nm; 486,5 nm; 581,9 nm; 686,1 nm. Para obter este gráfico, a intensidade de um determinado comprimento de onda foi dividida pela intensidade de um comprimento de onda que não sofreu alterações ao longo da experiência (para esta fibra usou-se 925,1 nm). Isto foi feito para 3 momentos da experiência: antes da irradiação (1º ponto), no final da irradiação (2º ponto) e após algum tempo de a irradiação ter parado (3º ponto - recuperação). A informação presente neste gráfico mostra de forma mais clara o descrito sobre a recuperação da transmissão ótica. No caso de λ de 464,7 nm e λ de 486,5 nm não são observadas grandes alterações da forma do espectro. Para λ de 581,9 nm vemos que os espectros de recuperação têm praticamente a mesma forma que tinha antes da irradiação (1º e 3º ponto quase coincidem). E em λ de 686,1 nm apesar das alterações serem insignificantes entre o espectro de referência e no final da irradiação, observa-se que houve um ligeiro aumento no espectro de recuperação. Tal como foi observado na Figura 6.5 a) para a região espectral entre os 650 nm e os 750 nm, o que sugere uma ligeira melhoria da transmissão ótica nessa região. No entanto mais uma vez não podemos descartar a contribuição de erros associados ao facto do espectro de recuperação ter sido obtido com a fibra fora da câmara de irradiação e num dia diferente dos outros espectros e ter sido necessário acoplar novamente a fibra ao equipamento de medição.

6.1.2 Resultados de Irradiação da fibra SOF-MM

Na Figura 6.6 são apresentados os dados obtidos da exposição da fibra ótica de sílica multimodo à radiação. Esta fibra foi exposta a uma fluência total de $(5,84 \pm 0,33) \times 10^{12}$ *protões/cm²* com um fluxo de $(2,50 \pm 0,25) \times 10^{10}$ *protões/cm²s*.

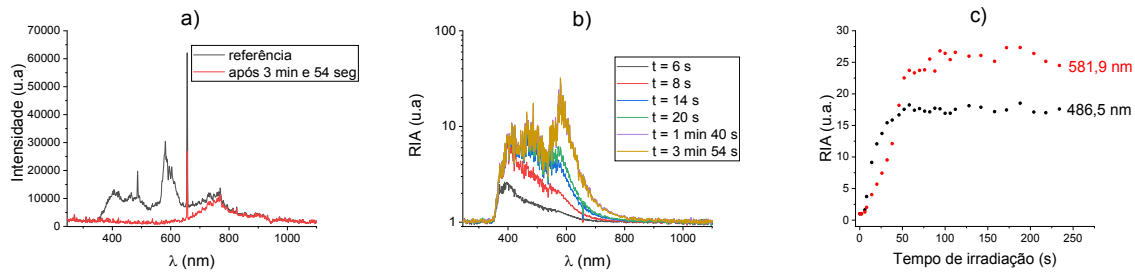


Figura 6.6 - Irradiação da fibra SOF-MM: a) espectro de transmissão da fibra SOF-MM, antes (preto) e no final de aproximadamente 4 minutos de irradiação (vermelho) com um feixe de prótons, b) RIA em função do comprimento de onda para diferentes tempos de irradiação (doses) e c) variação da RIA ao longo do tempo de irradiação para dois comprimentos de onda na região afetada pela radiação (486,5 nm e 581,9 nm).

Pela análise dos gráficos da figura acima, observa-se, de forma semelhante ao que aconteceu na fibra SOF-SM, que claramente houve degradação da transmissão ótica para comprimentos de onda menores que 800 nm. Acima deste valor o espectro não sofre alterações induzidas pela radiação.

Na Figura 6.6 c) podemos observar mais claramente a dependência da RIA com o aumento da fluência acumulada, ou seja, ao longo do tempo de irradiação, para dois comprimentos de onda. É evidente que a gama espectral entre os 500 nm e os 800 nm é mais afetada nesta fibra do que na fibra SOF-SM. Apesar de ambas as fibras terem espectros de transmissão ótica pré-irradiação praticamente iguais, composições idênticas (ambas de sílica), e terem sido expostas a fluências semelhantes ($7,24 \times 10^{12}$ para SOF-SM e $5,84 \times 10^{12}$ para a SOF-MM), as diferenças observadas podem ser devido a vários fatores:

- Diferentes fluxos: o fluxo de radiação foi cerca de uma ordem de grandeza maior para a fibra multimodo ($4,16 \times 10^9$ *prótons/cm²s* para a SOF-SM e $2,50 \times 10^{10}$ *prótons/cm²s* para a SOF-MM);
- Diferentes dimensões do núcleo e consequentemente diferente depósito de energia dos prótons incidentes nessa região da fibra. Devido ao núcleo da fibra ser maior na fibra SOF-MM, os prótons depositam uma quantidade superior de energia neste, em comparação com a fibra SOF-SM, consequentemente mais defeitos podem ter sido criados no núcleo da fibra SOF-MM, resultando numa maior atenuação do sinal (como podemos ver para λ de 581,9 nm pela comparação dos gráficos da evolução da RIA ao longo do tempo da fibra SOF-SM (Figura 6.4 c)) e da fibra SOF-MM (Figura 6.6 c)). Tal como esperado pelos resultados da simulação em Geant4 apresentados na Figura 6.3, que mostram claramente que na fibra SOF-MM espera-se uma maior concentração de defeitos no núcleo.
- Comprimento da fibra irradiado: como as fibras não foram irradiadas ao mesmo tempo, a área do feixe podia não ser exatamente igual e desta forma o feixe não incidir exatamente no mesmo comprimento de fibra influenciando a quantidade de defeitos criados ao longo da fibra.
- Diferente composição: apesar ambas as fibras serem de sílica, os núcleos são dopados com germânio. Adicionalmente a fibra monomodo também tem boro como elemento dopante, logo os defeitos criados também podem ser ligeiramente diferentes.

Relativamente ao processo de recuperação da transmissão ótica pós irradiação, foi obtido o espectro da fibra passado aproximadamente 18 horas do final da irradiação. As intensidades de transmissão do espectro de recuperação foram normalizadas as do espectro obtido antes da exposição à radiação, no comprimento de onda de 872,6 nm.

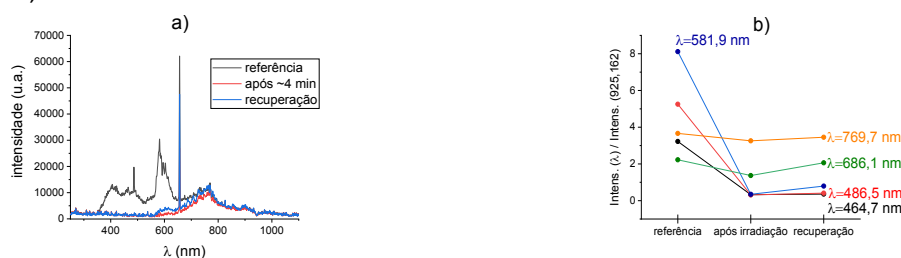


Figura 6.7 – Recuperação da transmissão ótica da fibra SOF-MM. Em a) estão representados os espectros de transmissão ótica da fibra antes (preto), no final de aproximadamente 4 minutos de irradiação (vermelho) e algum tempo após a irradiação parar (azul). Em b) é apresentada a razão entre a intensidade de um determinado comprimento de onda

(afetado pela radiação) com a intensidade de outro de referência (não afetado pela irradiação de 925,162 nm) para a pré-irradiação (1º ponto), final da irradiação (2º ponto) e algum tempo após a irradiação parar (3º ponto - recuperação).

Observa-se na Figura 6.7, que para comprimentos de onda menores que 550 nm o espectro de recuperação (azul) parece inalterado relativamente ao espectro obtido no final da irradiação (vermelho), indicando que os defeitos criados nesta região espectral de transmissão da fibra poderão ser irreversíveis ou não houve tempo suficiente para se observar recuperação dos mesmos.

Para comprimentos de onda compreendidos entre 550 nm e 680 nm observa-se uma ligeira recuperação. Mais especificamente no comprimento de onda de 581,9 nm, comparando com a recuperação observada na fibra SOF-SM (Figura 6.5), observa-se que enquanto na fibra SOF-SM há uma recuperação significativa da forma espectral no comprimento de onda de 581,9 nm, na fibra SOF-MM isso não acontece, a recuperação da forma espectral observada é mínima.

Para os comprimentos de onda superiores, a forma espectral parece ter recuperado totalmente, que coincidem com a região espectral da fibra menos afetada pela irradiação.

Tal como sugerido por D. Griscom [79] o aumento da RIA observada nas fibras de sílica deverá estar relacionado com a criação de defeitos pontuais (às vezes designados de centros de cor). Uma lista de alguns defeitos pontuais nas fibras de sílica induzidos por radiação e os respetivos comprimentos de onda de absorção encontra-se em [11,80]. Para confirmar a presença desses defeitos nas fibras irradiadas seriam necessários estudos adicionais, por exemplo espectroscopia de Raman [4].

6.1.3 Resultados de Irradiação da fibra CYTOP-MM-POF

A fibra CYTOP-MM-POF foi irradiada com um fluxo de $(1,75 \pm 0,21) \times 10^{10}$ *protões/cm²s*, e nos últimos 10 segundos o fluxo foi aumentado para $(6,24 \pm 0,96) \times 10^{10}$ *protões/cm²s*, resultando numa fluência total de $(1,59 \pm 0,16) \times 10^{13}$ *protões/cm²*. Este aumento de fluxo no final da irradiação deve-se ao facto de ter sido possível acompanhar os espectros de transmissão da fibra em tempo real durante a experiência e como visivelmente não estavam a ser observadas alterações, decidiu-se aumentar o fluxo.

Os espectros da transmissão ótica da fibra polimérica antes e no final da irradiação e variação da RIA ao longo da região espectral para diferentes tempos de irradiação, são apresentados na Figura 6.8.

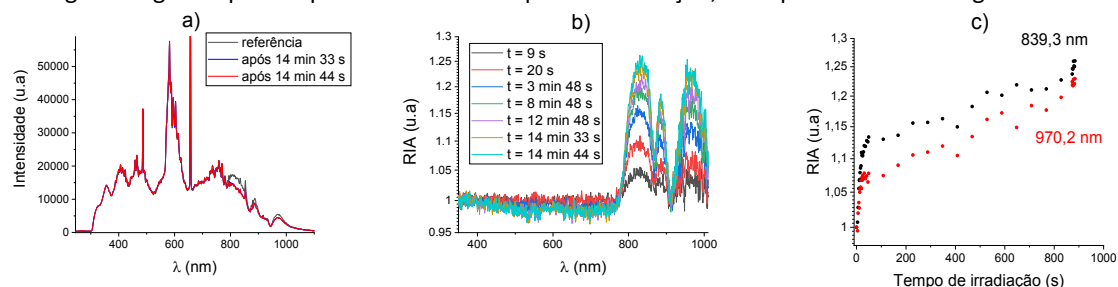


Figura 6.8 - Irradiação da fibra CYTOP-MM-POF: a) espectro de transmissão da fibra SOF-SM, antes (preto) e no final de aproximadamente 15 minutos de irradiação (vermelho) com um feixe de protões, b) RIA em função do comprimento de onda para diferentes tempos de irradiação (doses) e c) variação da RIA ao longo do tempo de irradiação para dois comprimentos de onda na região afetada pela radiação (830,3 nm e 970,2 nm).

Tal como nas outras fibras, a sensibilidade à radiação releva ser dependente do comprimento de onda. No entanto nesta fibra, contrariamente ao ocorrido nas fibras de sílica, a RIA observada é apenas na região do infravermelho próximo, aproximadamente entre os 760 nm e os 1000 nm. Para comprimentos de onda menores não se observam variações significativas da transmissão ótica ao longo da fibra. Além disso, é evidente pela análise do gráfico presente na Figura 6.8 b) que a RIA observada nesta fibra é muito inferior a observada nas fibras de sílica SOF-SM (Figura 6.4 b)) e SOF-MM (Figura 6.6 b)). Verificámos ainda que na região espectral sensível à radiação (760 nm a 1000 nm) a RIA aumenta ao longo do tempo, e que esse aumento é mais acentuado no início e vai se tornando mais suave com o aumento da dose (ver na Figura 6.8 b) e c)). Pela simulação apresentada na Figura 6.3, os protões não atingem o núcleo da fibra CYTOP (contrariamente ao observado nas fibras de sílica), pelo que não seria de esperar atenuação ótica. O que sugere que a atenuação observada resulta de um processo indireto induzido na bainha externa, como por exemplo, o aumento da temperatura que pode levar a alterações do índice de refração ou expansões térmicas com consequentes alterações na geometria da fibra.

Para analisar a possível recuperação da transmissão ótica desta fibra, obteve-se o espectro após aproximadamente 1 dia do final da irradiação.

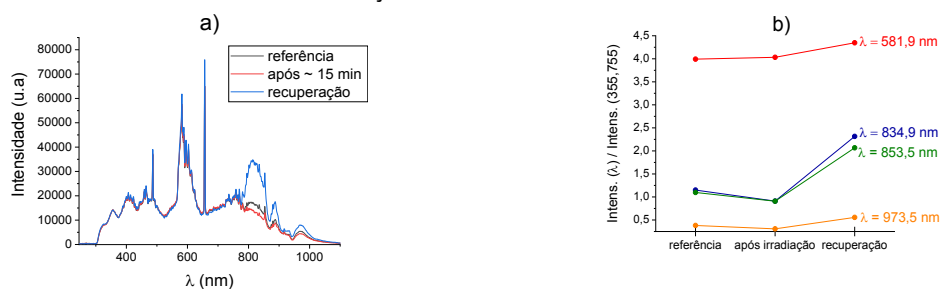


Figura 6.9 - Recuperação da transmissão ótica da fibra CYTOP-MM-POF. Em a) estão representados os espectros de transmissão ótica da fibra antes (preto), no final de aproximadamente 15 minutos de irradiação (vermelho) e algum tempo após a irradiação parar (azul). Em b) é apresentada a razão entre a intensidade de um determinado comprimento de onda (afetado pela radiação) com a intensidade de outro de referência (não afetado pela irradiação de 355,755 nm) para a pré-irradiação (1º ponto), final da irradiação (2º ponto) e algum tempo após a irradiação parar (3º ponto - recuperação).

De referir que o espectro de recuperação foi normalizado tendo em consideração as intensidades óticas do comprimento de onda de 355,6 nm.

Pela análise dos gráficos presentes na Figura 6.9, observamos que na região espectral afetada durante a exposição à radiação para além da recuperação da transmissão da fibra parece haver uma melhoria do sinal transmitido. No gráfico à direita, vemos que inclusive em λ de 581,9 nm, uma região que visivelmente não teve grande impacto da radiação pela análise dos espectros, também se observa uma ligeira alteração da forma do espectro de recuperação comparativamente com os espectros de referência e obtido pós-irradiação. Esta recuperação é um pouco surpreendente tendo em conta que pelo nosso conhecimento não existem artigos na literatura em que tenha sido reportado melhoria da transmissão ótica da fibra após a irradiação. No entanto, mais uma vez não podemos desconsiderar a contribuição de erros experimentais, associados ao facto do espectro de recuperação ter sido obtido com a fibra fora da câmara de irradiação e num dia diferente dos outros espectros.

6.2 Exposição FBGs em fibras de sílica a um feixe de prótons

Numa primeira abordagem para avaliar de uma forma geral a resposta das FBGs quando expostas a um feixe de prótons, foram irradiadas as duas FBGs em sílica monomodo e multimodo em simultâneo. Para obter o feixe de prótons recorreu-se ao Acelerador Van de Graaff. Usou-se uma tensão do terminal de 1,9 MeV. Neste caso a irradiação foi feita com feixe externo focado por um sistema da Oxford Microbeams constituído por um triplo de quadrupolos, o uso de um feixe externo permitiu a monitorização dos espectros de reflexão dos sensores durante a irradiação.



Figura 6.10 – Fotografia da montagem experimental usada na exposição das FBGs ao feixe de prótons (figura da esquerda e do meio) e parte de trás do colimador de chumbo onde estão colocadas as FBGs (figura da direita).

Como podemos ver nas imagens presentes na Figura 6.10 foi usado um colimador de chumbo à frente da fibra, para limitar ao máximo a zona irradiada da fibra à região onde se localizava a rede de Bragg, sendo a largura da *slit* ligeiramente superior ao comprimento da FBG (8 mm).

Considerou-se que a energia do feixe de prótons ao atingir as FBGs era de 1,7 MeV. Este valor foi calculado considerando a energia do feixe junto à janela de extração (janela de Si₃N₄ com 1x1 mm² de área e 100 nm de espessura ([81]), a distância entre a janela e as FBGs e a perda de energia do feixe ao atravessar essa distância no ar (através do poder de paragem estimado no programa SRIM). Para o valor obtido, não podemos descartar erros associados à estimativa da distância das fibras à janela de extração.

A profundidade de penetração para um feixe de prótons com energia de 1,7 MeV, numa fibra com uma bainha e um núcleo de sílica, foi simulada também no programa SRIM, tendo se obtido o valor de 34,1 μm. As fibras SOF-SM e SOF-MM têm um diâmetro total da bainha semelhante (~125 μm) mas diâmetros do núcleo muito distintos, 8,9 μm e 62,5 μm, respetivamente. Sabe-se que para atingir o núcleo de cada fibra seria necessário uma a profundidade de penetração superior a 57,9 μm (SOF-SM) e 31,25 μm (SOF-MM), pelo que quando o feixe incide na fibra SOF-SM apenas atinge a bainha do lado em que incide (Figura 6.11 a)). No caso da fibra SOF-MM, o feixe atinge o núcleo da fibra (Figura 6.11 b)). De referir que os núcleos destas fibras são dopados e isso não foi considerado na simulação, sendo que apenas iria interferir na energia depositada pelos prótons no núcleo da SOF-MM.

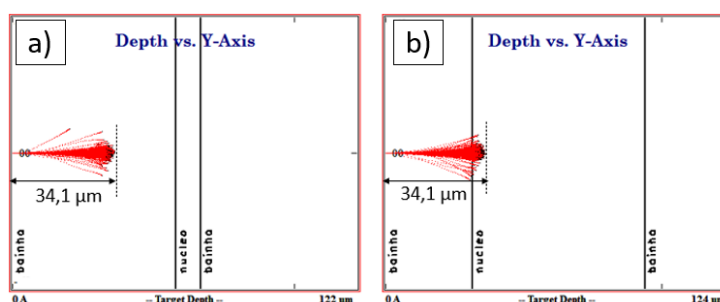


Figura 6.11 - Simulação de um feixe de prótons de energia 1,7 MeV a incidir nas fibras de sílica: a) SOF-SM e b) SOF-MM.

A variação do comprimento de onda de Bragg ao longo da irradiação dos sensores é apresentada na Figura 6.12.

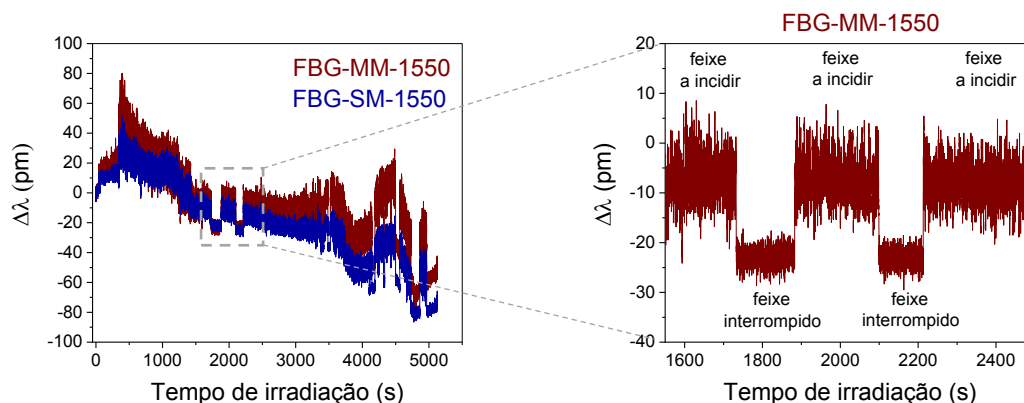


Figura 6.12 – Desvio do comprimento de onda de Bragg das FBG-SM-1550 e FBG-MM-1550 quando expostas a um feixe externo de prótons de 1,7 MeV de energia. O gráfico à direita ilustra os desvios do comprimento de onda de Bragg da FBG-MM-1550 quando o feixe de prótons foi interrompido duas vezes consecutivas.

Podemos observar que o comportamento das duas FBGs é idêntico ao longo do tempo de exposição ao feixe de prótons.

No decorrer da experiência, foi observado várias vezes que ao bloquear o feixe de prótons de incidir na fibra, ocorria uma variação instantânea do comprimento de onda de Bragg. Na Figura 6.12 (gráfico à direita) podemos ver que ao interromper o feixe, o comprimento de onda diminui instantaneamente. O contrário acontece quando se faz incidir o feixe nos sensores, neste caso, o comprimento de onda aumenta

de forma imediata. Este processo de interrupção do feixe de prótons foi repetido algumas vezes ao longo da experiência, e a resposta do sensor foi sempre idêntica sugerindo que o efeito observado é reproduzível.

De referir que na parte da experiência analisada na Figura 6.12 (gráfico à direita), sabe-se que o feixe tinha uma corrente na ordem dos 1,522 nA com uma dimensão de 1x1 mm² (sendo que a área do feixe foi aproximada à área da janela pela qual o feixe passa para o ambiente exterior, desprezando a dispersão do feixe no ar), resultando num fluxo dos prótons de $(9,49 \pm 1,90) \times 10^{11}$ *prótons/cm²s*.

A variação instantânea do comprimento de onda de Bragg observada quando se faz incidir o feixe nas FBGs pode ter origem em diferentes fatores:

1. variação da temperatura ambiente da sala – uma vez que estas FBGs são sensíveis à deformação e à temperatura, e como não está a ser aplicada qualquer deformação sobre a fibra podemos desprezar esse efeito;
2. variação da temperatura na fibra – por aquecimento da fibra induzido pelo processo de irradiação [82];
3. desvio do comprimento de onda de Bragg induzido por radiação.

Relativamente ao primeiro fator, apesar da temperatura na sala não ter sido controlada, é muito pouco provável que ocorram variações de temperatura de 2 graus (variação em temperatura equivalente ao desvio de ~ 20 pm observado na FBG em sílica) tenham ocorrido na sala no exato momento que se ligava e desligava o feixe.

Quanto ao aquecimento induzido por radiação na fibra, geralmente as variações de temperatura observadas em FBGs devido à temperatura não são instantâneas como as aqui observadas. Além disso, numa experiência semelhante ([5]), foi desconsiderado o aumento da temperatura da fibra durante a irradiação como fator determinante para o desvio que observado da FBG exposta à radiação. Mais detalhadamente nessa pesquisa, uma FBG inscrita exatamente na mesma fibra de sílica monomodo (FiberCore PS1250/1500) também foi exposta a um feixe externo de prótons de 2 MeV de energia. Monitorizaram a temperatura da fibra durante a irradiação com recurso a uma câmara de infravermelhos. Foi observado um aumento máximo de temperatura de 1,6 °C durante a irradiação. No entanto, o desvio do comprimento de onda de Bragg era cerca de 4 vezes superior ao expectável para essa variação de temperatura, pelo que concluíram que a variação de temperatura não era o único fator, nem o mais determinante para o desvio observado [5].

Por fim, relativamente ao último tópico, o RI-BWS é um dos efeitos da radiação conhecidos nas FBGs, no entanto este efeito está geralmente associado a variações ocorridas no núcleo da fibra, ou do índice de refração efetivo ou do período da rede de Bragg. No entanto pela simulação da profundidade de penetração do feixe na fibra (Figura 6.11), observamos que este não atinge o núcleo da FBG em fibra monomodo e atinge o núcleo da FBG em fibra multimodo. No entanto, como já foi referido, devido a erros associados ao cálculo da energia do feixe quando incide na fibra, o feixe poderá também ficar na bainha no caso da FBG-MM-1550. Logo o efeito observado pode ter maioritariamente origem no impacto da radiação na bainha da fibra, sendo este considerado um efeito instantâneo, uma vez que quando o feixe é desligado desaparece. Uma possível explicação para o observado pode ser a variação da densidade do material da bainha na parte onde o feixe incide (segundo [51] os prótons podem provocar compactação em fibras), o que pode levar à criação de tensões que se propagam para o núcleo. Como estas FBGs são sensíveis a deformações, quando é exercida uma tensão, é observado um desvio do comprimento de onda de Bragg.

Também já foi observado desvios do comprimento de onda de Bragg em FBGs com revestimento, em que o desvio foi considerado ser devido ao efeito da radiação no revestimento. Por exemplo em [83] estudaram o $\Delta\lambda_B$ induzido pela radiação em FBGs revestidas e indicaram que o desvio observado deveria estar relacionado com o facto de a radiação provocar um encolhimento ou expansão do revestimento, induzindo uma alteração na tensão na fibra e, conseqüentemente, um deslocamento no pico de Bragg.

Para além da resposta instantânea das FBGs ao feixe de prótons a incidir na fibra, observa-se que ocorre uma variação maior do valor comprimento de onda em torno do valor médio do que quando o feixe está interrompido. Considerando que a variação instantânea do λ_B tem origem na radiação incidente na FBG, a maior variação observada quando o feixe incide sobre a amostra pode ser devido à variação da corrente de feixe, que varia cerca de 20 % em redor do valor da corrente instantânea, o que sugere que estes sensores apresentam uma resposta rápida à radiação.

Quando o feixe é interrompido, observa-se uma variação muito menor do comprimento de onda, nomeadamente cerca de 10 pm. Esta variação pode estar associada a erros do equipamento e vibrações na montagem experimental.

Apesar de não ser possível analisar com rigor o desvio do comprimento de onda de Bragg ao longo do tempo de irradiação, uma vez que não foram controlados vários parâmetros experimentais tais como temperatura (por se tratar de uma experiência primária), é evidente que há uma diminuição do λ_B ao longo da irradiação. Mais especificamente, observa-se um desvio total de cerca de -75 pm e de -55 pm para a FBG-SM-1550 e FBG-MM-1550, respetivamente. Este desvio corresponderia a uma diminuição de temperatura de cerca de 9°C e de 5°C, o que indica que a temperatura não é o único parâmetro que contribuiu para o desvio observado, uma vez que as fibras não medem a mesma variação de temperatura. Consequentemente sugere-se que a radiação também influencia o desvio observado. No entanto, para um $\Delta\lambda_B$ negativo induzido pela radiação seria expectável uma variação negativa do índice de refração efetivo ou do período da rede, ou seja, no núcleo da fibra. Relembramos novamente que pelos resultados da simulação (Figura 6.11), à partida os protões não atingem o núcleo da fibra SOF-SM, portanto a contribuição da radiação para o desvio observado pode ter origem em alterações provocadas na bainha das fibras.

Em [84] também foi reportado, por A. Morana et al., uma variação negativa do comprimento de onda de Bragg em FBGs do tipo II (caracterizadas por ocorrer uma fusão local do núcleo nas zonas irradiadas durante o processo de fabricação) sob raios X. Os autores consideraram que a origem deste desvio, tal como nos nossos resultados, é difícil de explicar. Mas propuseram que devia ser considerada uma libertação de stress induzida pela radiação. No caso da FBG do tipo II que estudaram sugeriram que isso poderia estar relacionado com o facto de a rede não ter sido tratada termicamente previamente à irradiação [7]. Sugerimos que mesmo possa ter acontecido na irradiação das FBGs, ou seja, libertação da tensão no núcleo ao longo do tempo de irradiação, mas no nosso caso devido a variações de densidade momentâneas provocadas pela irradiação. Tendo em conta que há um alívio de tensões no núcleo é esperado um desvio negativo, tal como observado (equação 2.3).

No entanto no caso da FBG-MM-1550, para além deste efeito, deverá haver um efeito adicional relacionado com o impacto dos protões no núcleo. Pois pela simulação os protões atravessam a bainha e atingem o núcleo da fibra. Como foi mencionado o desvio total observado nesta FBG é menor do que o observado na FBG-SM-1550. Além disso pelo gráfico da Figura 6.12 a) também podemos ver que o desvio da FBG-SM-1550 começa a acentuar-se visivelmente a partir dos 3000 s. Pelo que acreditamos que o impacto dos protões no núcleo da FBG-MM-1550 contribui para desvio positivo do λ_B (que pode estar relacionado com uma variação positiva do índice de refração efetivo ou do período da rede). Mas que o efeito dominante ao longo da irradiação está associado ao impacto da radiação na bainha.

Resumidamente, foram observados dois efeitos distintos induzidos pela radiação nestas FBGs. Um efeito instantâneo responsável pelo aumento instantâneo do comprimento de onda de Bragg quando o feixe incide na amostra, sendo que este desaparece quando o feixe é interrompido. E um efeito a longo prazo responsável pela diminuição gradual do comprimento de onda de Bragg ao longo do tempo de irradiação. Sugerimos que este efeito possa estar também principalmente relacionados com o impacto dos protões na bainha e a criação de tensões no núcleo que levam a um desvio do comprimento de onda de Bragg. No entanto, seria necessário repetir o estudo de forma mais rigorosa, especificamente com controlo de temperatura. Mas não foi possível continuar a investigação com este feixe de protões, como tencionávamos, uma vez que o acelerador Van de Graaff precisou de manutenção e não foi concluída até ao final deste trabalho. Por esta razão o restante trabalho realizado de forma a caracterizar o efeito da irradiação dos protões nas FBGs foi feito com o acelerador Tandem.

Neste acelerador, Tandem, tal como na irradiação das fibras óticas, usou-se uma energia de irradiação de 3 MeV. Foram usadas novas amostras do mesmo tipo de FBGs (FBG-SM-1550 e FBG-MM-1550). Tendo em conta a montagem experimental disponível, a irradiação foi feita no interior de uma câmara de vácuo, pelo que desta vez, contrariamente ao realizada na irradiação das fibras óticas, não foi possível monitorizar as FBGs em tempo real. Devido a uma grande diferença entre o diâmetro do núcleo das fibras das FBGs e o diâmetro do núcleo do passador ótico (*optical fiber feedthrough*). Esta diferença de dimensões levava a grandes perdas de sinal o que impossibilitou observar o sinal refletido da FBG no interrogador.

Posto isto, foram realizadas várias irradiações consecutivas, e no final de cada uma era gravado o espetro de reflexão das FBGs (posteriormente utilizados para analisar o desvio do comprimento de onda de Bragg e a variação de potência ótica do pico de reflexão). Para isso era aberta a janela da câmara de vácuo para ligar os sensores ao interrogador. Após a obtenção do espetro, a câmara era novamente colocada em vácuo e era feita uma nova irradiação. Este processo foi repetido 4 vezes. De referir que antes de cada irradiação era confirmado o alinhamento do feixe com a placa móvel.

Com o objetivo de realizar posteriormente a análise das variações de amplitude e da posição do pico de Bragg induzidas somente pela radiação, foi usada uma FBG de referência de forma a eliminar a influência das conexões dos sensores ao interrogador e das variações de temperatura. Para isso na mesma fibra SOF-SM foram gravadas duas FBGs com diferentes comprimentos de onda de Bragg, sendo uma colocada no porta-amostras (FBG exposta à radiação) e a outra colocada dentro da câmara de vácuo, mas fora da zona de incidência do feixe de prótons (FBG-referência). Na Figura 6.13 é apresentado um esquema da montagem experimental.

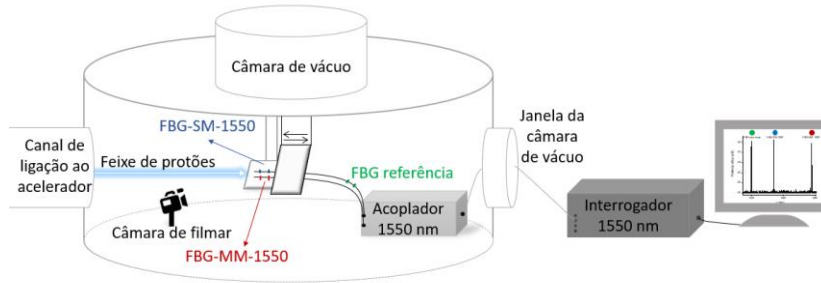


Figura 6.13 – Esquema da montagem experimental usada para irradiar simultaneamente as duas FBGs de sílica.

6.2.1 Efeitos da radiação no desempenho das FBGs

Como já foi referido quando as FBGs são expostas a radiação geralmente são observados dois efeitos: deslocamento da posição do pico de Bragg ou variação da sua amplitude.

Para analisar o desvio do comprimento de onda de Bragg de cada FBG irradiada induzido apenas por efeitos da radiação ($\Delta\lambda_{\text{radiação}}$), calculou-se a diferença entre o desvio total observado ($\Delta\lambda_{\text{total}}$) e o desvio ocorrido devido a variações de temperatura. O último pode ser obtido pela multiplicação do desvio observado na FBG de referência ($\Delta\lambda_{\text{ref}}$) pela razão das sensibilidades térmicas entre a FBG irradiada ($S_{T.FBG}$) e a FBG de referência ($S_{T.ref}$). Então o RI-BWS foi calculado pela seguinte expressão:

$$\Delta\lambda_{\text{radiação}} = \Delta\lambda_{\text{total}} - \frac{S_{T.FBG}}{S_{T.ref}} \Delta\lambda_{\text{ref}} \quad 6.4$$

Para calcular a variação da amplitude do pico das FBGs apenas devido à radiação ($\Delta PO_{\text{radiação}}$), calculou-se a diferença entre a variação de potência ótica total da FBG irradiada (ΔPO_{total}) e a variação de potência ótica da FBG não exposta à radiação (ΔPO_{ref}), através da equação:

$$\Delta PO_{\text{radiação}} = \Delta PO_{\text{total}} - \Delta PO_{\text{ref}} \quad 6.5$$

Assim são desprezadas as variações de potência ótica com origem no acoplamento ótico do interrogador à fibra ligada ao acoplador (onde estavam conectadas as FBGs irradiadas dentro da câmara de vácuo).

Os gráficos do desvio da posição do pico de Bragg e da variação da amplitude do pico, induzidos por radiação, são apresentados na Figura 6.14.

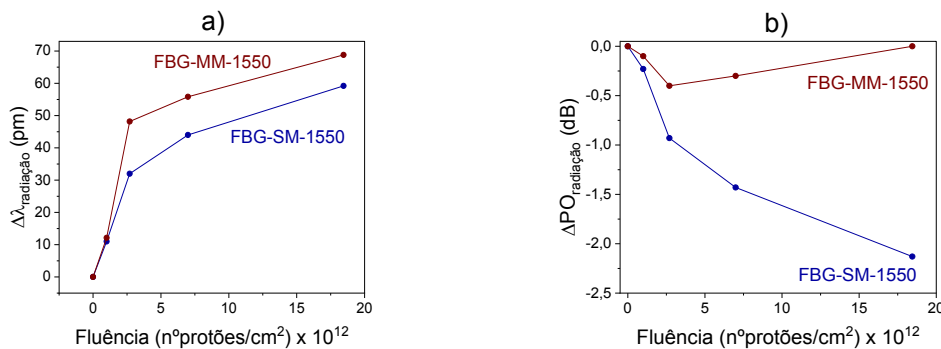


Figura 6.14 - Exposição da FBG-SM-1550 (azul) e FBG-MM-1550 (vermelho) a um feixe de prótons de 3 MeV de energia durante 4 irradiações com fluxos e fluências diferentes. Os gráficos representam: a) a variação do comprimento de onda de Bragg induzido por radiação e b) a variação da potência ótica induzida por radiação.

Verifica-se que o RI-BWS é positivo em ambas as FBGs, logo, devem estar relacionado com uma variação positiva do índice de refração efetivo e/ou do período da rede. Observa-se também que o desvio total para uma fluência de $18,45 \times 10^{12}$ *protões/cm²* na FBG em fibra multimodo é cerca de 1,16 vezes maior ao desvio na FBG em fibra monomodo. Nomeadamente, os desvios totais obtidos foram de 68,8 pm e 59,2 pm para a FBG-MM-1550 e FBG-SM-1550, respetivamente, indicando que a variação maior no caso da FBG-MM-1550. Este comportamento está de acordo com o trabalho T. Blanchet et al. [51] em que foram reportados desvios de 17 ± 2 pm e 13 ± 2 pm para uma FBG inscrita numa fibra de sílica dopada com Ge (tal como a fibra da FBG-MM-1550) e uma fibra de sílica dopada com B e Ge (tal como a fibra da FBG-SM-1550), respetivamente quando irradiadas com um feixe de protões de 63 MeV de energia.

Pela análise da Figura 6.14 b), verifica-se que a FBG-MM-1550 apresenta maior resistência à radiação quanto a variações de potência ótica. Já na FBG-SM-1550 a potência ótica do pico de Bragg diminui com a radiação. Esta variação da amplitude do pico de Bragg induzida pela radiação pode ser devido a RIA ou a mudanças de algum parâmetro da rede de Bragg.

Pelos gráficos presentes na Figura 6.3 a) e b) da simulação do feixe de protões de 3 MeV a incidir nas fibras (SOF-SM e SOF-MM) onde estas FBGs (FBG-SM-1550 e FBG-MM-1550) foram inscritas, vemos a interação da radiação no núcleo e na bainha de cada fibra é diferente. No caso da fibra SOF-SM há um maior depósito de energia na bainha e na fibra SOF-MM há um maior depósito de energia no núcleo. Logo os danos formados pela radiação no núcleo de cada fibra são distintos, tal como sugerem os resultados observados nos gráficos da Figura 6.14. Uma vez que na FBG inscrita na SOF-MM, observámos um maior desvio do comprimento de onda, mas menor atenuação do pico da rede de Bragg. No caso da FBG inscrita na SOF-SM observámos que houve um menor desvio, mas maior atenuação no pico de Bragg.

É importante comparar o desvio do comprimento de onda de Bragg observado nestas FBGs quando foram expostas ao feixe de protões com 3 MeV de energia (Figura 6.14 a)) e quando foram expostas ao feixe de protões com 1,7 MeV de energia (Figura 6.12). No caso do feixe com 3 MeV de energia, observamos que o desvio do λ_B é positivo. E segundo os resultados da simulação para esta energia dos protões, apresentados na Figura 6.3, os protões passam no núcleo de ambas as fibras. Relativamente ao feixe com menor energia, vemos que o desvio do λ_B ao longo da irradiação é negativo. Conforme os resultados da simulação para esta energia dos protões (Figura 6.11), os protões não têm profundidade de penetração suficiente para atingir o núcleo da fibra SOF-SM. Estes resultados sugerem que o desvio positivo do λ_B poderá estar relacionado com danos provocados pelos protões no núcleo da fibra ótica, enquanto o desvio negativo do λ_B está relacionado principalmente com danos provocados pelos protões na bainha das fibras.

6.2.2 Recuperação dos efeitos causados pela irradiação

Após aproximadamente 67 horas do final da irradiação foram analisados os espectros das FBGs. Para averiguar se houve recuperação do comprimento de onda de Bragg para o seu valor original (pré-irradiação) ou se o desvio provocado pela irradiação era irreversível. Verificou-se que o $\Delta\lambda_B$ diminui 44,43% e 28,51% para as FBG-SM-1550 e FBG-MM-1550 respetivamente. O que indica que parte dos efeitos causados pelos protões na fibra foram reversíveis. Estes valores foram calculados pela seguinte expressão:

$$\Delta\lambda_{recuperação} = \Delta\lambda_{total} - \frac{S_{T.FBG}}{S_{T.ref}} \Delta\lambda_{ref} \quad 6.6$$

Ou seja, primeiro obteve-se a variação do comprimento de onda de Bragg total ($\Delta\lambda_{total}$), que corresponde à diferença entre λ_B dias após 67 horas do final da irradiação e o λ_B pré-irradiação. Depois subtraiu-se o desvio do λ_B devido à diferença de temperatura em que os espectros de recuperação e da pré irradiação foram obtidos (2º termo da expressão, já explicado na equação 6.4). Por fim obteve-se o desvio do comprimento de onda devido à recuperação dos danos causados pela radiação ($\Delta\lambda_{recuperação}$). Este valor foi comparado com a variação do comprimento de onda no final da irradiação ($\Delta\lambda_{radiação}$). Por exemplo no caso da FBG-SM-1550, $\Delta\lambda_{radiação} = 59,2$ pm e $\Delta\lambda_{recuperação} = 32,9$ pm. Logo a variação de comprimento de onda diminui 44,43 %.

Os resultados obtidos estão de acordo com o reportado por E. Taylor et al em [82], onde foi analisado os efeitos de protões (com 63 MeV de energia) em FBGs inscritas numa fibra de sílica dopada com Ge. Também observaram que após a irradiação da FBG o desvio do comprimento de onda observado durante a irradiação diminuía, mas que haveria a possibilidade de terem sido induzidos danos permanentes devido a formação de centros de cor durante a irradiação.

Neste caso não foi possível analisar as variações da amplitude do pico de Bragg devido a alterações significativas da montagem experimental para obtenção do espectro de recuperação e ainda devido a realização de novas fusões entre as FBGs e os *pigtails* para ligar os sensores ao interrogador. Ambos os fatores mencionados podem ter um impacto significativo na potência ótica da rede de Bragg.

6.2.3 Sensibilidade térmica das FBGs após a irradiação

Foi realizada uma caracterização à temperatura das FBGs irradiadas, com o fim de perceber se a radiação poderá ter afetado a sensibilidade térmica das mesmas. Os coeficientes de sensibilidade térmica obtidos da mesma forma descrita no subcapítulo 4.2. Ou seja, foram calculados através da equação 2.3 ($\Delta\lambda_B = S_T\Delta T$). As FBGs irradiadas foram colocadas na câmara climática com $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ até 45°C , com passos de 5°C e intervalos de 30 minutos entre cada medição. Na Figura 6.15 são apresentadas as sensibilidades térmicas das FBGs antes e após a exposição à radiação.

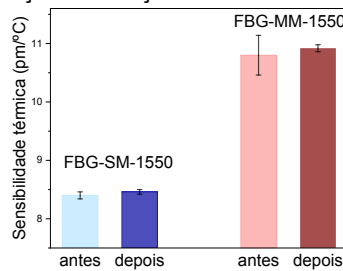


Figura 6.15 – Sensibilidade térmica antes (cor clara) e depois (cor escura) da exposição a um feixe de prótons dos sensores: a) FBG-SM-1550 (azul) e FBG-MM-1550 (vermelho).

A sensibilidade térmica da FBG-SM-1550 não irradiada, apresentada na figura acima, corresponde à da FBG de referência (ou seja, a FBG-SM-1550 colocada dentro da câmara de vácuo, mas não exposta ao feixe de prótons). Em vez de ser reportada na secção 4.2. Apenas porque neste caso as duas FBGs estavam exatamente inscritas na mesma fibra.

Pela análise do gráfico, podemos ver que nenhuma alteração dos coeficientes S_T foi observada nas FBGs irradiadas. Tal como foi reportado em [51] para uma FBG inscrita numa fibra de sílica e irradiada com prótons de 63 MeV de energia.

Seria interessante estudar a hipótese de desenvolver um sensor composto por estas duas FBGs para monitorizar simultaneamente a temperatura e radiação num ambiente hostil (neste caso com prótons). Uma vez que as duas FBGs apresentam diferentes sensibilidades à radiação e sensibilidades térmicas (à partida não afetadas pela exposição à radiação). Para isso seria necessário gravar uma FBG na fibra SOF-SM e outra na fibra SOF-MM com comprimentos de onda de Bragg diferentes. Inclusive podia-se fazer uma fusão destas duas fibras de forma que numa só fibra teríamos os dois sensores. Através de um cálculo matricial seria possível calcular a variação de temperatura e de radiação no ambiente:

$$\frac{\Delta\lambda_{SM} = S_{T,SM}\Delta T + S_{R,SM}\Delta R}{\Delta\lambda_{MM} = S_{T,MM}\Delta T + S_{R,MM}\Delta R} \quad 6.7$$

Onde as mudanças de comprimento de onda experimentadas pelas duas FBGs ($\Delta\lambda_{SM}$ e $\Delta\lambda_{MM}$) codificam a informação das variações de temperatura (ΔT) e de radiação (ΔR). Os coeficientes de sensibilidade à temperatura e à radiação das FBGs de sílica monomodo e multimodo são representados por S_T e S_R . Para mais detalhes de como realizar os cálculos recomenda-se a leitura da secção 17.6.4 de [24].

Capítulo 7 - Conclusões e trabalho futuro

7.1 Conclusões

A aplicação de sensores baseados em fibras óticas em ambientes com radiação, exige uma avaliação prévia do impacto dessa radiação no desempenho dos sensores. Neste trabalho diferentes fibras óticas (sílica monomodo, sílica multimodo, polimérica CYTOP multimodo) foram expostas a radiação gama e a um feixe

de prótons, para avaliar como este tipo de radiação afeta transmissão do sinal ótico pelas fibras. Também foram estudados os efeitos dos mesmos tipos de radiação em FBGs inscritas nas fibras de sílica mencionadas (monomodo e multimodo), com comprimento de onda de Bragg em redor dos 1550 nm. Para a radiação gama foi adicionalmente estudado os efeitos em duas FBGs inscritas numa fibra ótica polimérica microestruturada de PMMA dopada com Benzildimethylketal, uma com comprimento de onda de Bragg em redor dos 800 nm e outra em redor dos 1550 nm.

Relativamente aos efeitos da radiação gama, observou-se atenuação da transmissão ótica induzida pela radiação nas 3 fibras óticas, sendo dependente do comprimento de onda e é mais notória para os 400 nm. A fibra CYTOP foi a que apresentou maior sensibilidade à radiação nesse comprimento de onda. Demonstrou-se que as três fibras analisadas apresentam potencial para ser usadas para aplicações de dosimetria em tempo real em que a informação da dose é obtida pela razão de dois comprimentos de onda específicos ao longo do tempo de irradiação.

Relativamente à exposição das FBGs à radiação gama sem “build up”, os resultados obtidos sugerem que todas as FBGs são sensíveis à radiação gama, uma vez que se demonstrou que grande parte do desvio do comprimento de onda de Bragg observado ao longo da irradiação deveu-se aos efeitos da radiação. Com este trabalho foi também possível demonstrar que as FBGs poliméricas apresentam uma maior sensibilidade à radiação que as FBGs em sílica. Considerando o desvio negativo do comprimento de onda de Bragg induzido pela radiação gama e comparando com o desvio positivo induzido pela radiação de neutrões (reportado na literatura), concluiu-se que o tipo de defeitos induzidos por radiação gama são possivelmente de origem distinta aos criados pela interação com neutrões.

Quanto à variação da refletividade da rede de Bragg sob irradiação, apenas no caso da FBG em fibra de sílica multimodo, foi observada uma alteração significativa de -4,62 dB. Essa variação da potência ótica seguiu uma tendência negativa ao longo do tempo, indicando que a partir da análise deste parâmetro, pode ser estimada a dose de irradiação.

Por fim, após o final da irradiação, observou-se que nas FBGs em sílica o desvio observado durante a irradiação recuperou parcialmente. No entanto no caso das FBGs em fibra polimérica, o desvio continuou no mesmo sentido observado durante a irradiação. Pelo que os resultados sugerem que estas FBGs apresentam limitações para aplicação em dosimetria passiva.

Relativamente à sensibilidade térmica das FBGs irradiadas, verificou-se que a das FBGs em fibra de sílica se manteve inalterada. Já no caso das FBGs em fibra poliméricas, os coeficientes de sensibilidade diminuíram após a irradiação. Quanto à sensibilidade à humidade relativa das FBGs em PMMA, verificou-se que estas não foram alteradas pela radiação, o que indica que estas FBGs têm potencial para ser usadas simultaneamente para a medição de radiação e humidade relativa, se a temperatura do ambiente onde foram aplicadas for constante. Para ambientes de temperatura não constantes, seriam necessários mais estudos da sensibilidade térmica destas FBGs para inferir se a diferença observada é mesmo resultado da exposição à radiação.

Relativamente à irradiação realizada com partículas carregadas (prótons), em todas as fibras foi observada uma degradação da transmissão ótica com a irradiação, demonstrando serem sensíveis à radiação na região espectral estudada (200 nm a 1100 nm). Mais especificamente a atenuação induzida pela radiação observada nas fibras de sílica foi na região espectral entre os 350 nm e os 800 nm. No caso da fibra polimérica CYTOP observou-se degradação da transmissão ótica apenas na região entre os 750 nm e os 1000 nm. De acordo com a literatura a origem da atenuação observada nas fibras de sílica é associada às bandas de absorção de defeitos pontuais criados pela interação da radiação com a fibra. No caso da fibra CYTOP, segundo uma simulação da incidência de prótons nesta fibra, a atenuação observada deverá ter origem no impacto da radiação na bainha externa da fibra. Estes resultados demonstram, a viabilidade do uso destas fibras como sensores intrínsecos para monitorização de dose de prótons em tempo real.

Relativamente à exposição das FBGs com prótons com uma energia de 1.7 MeV em sílica foram observados dois comportamentos distintos para o desvio do comprimento de onda ao longo da radiação. Ao interromper o feixe de prótons de incidir nas FBGs, o comprimento de onda de Bragg diminuía rapidamente recuperando para o valor antes da interrupção quando o feixe voltava a incidir. Por outro lado, observou-se uma diminuição lenta e continua ao longo do tempo de irradiação. No caso do aumento instantâneo com a irradiação, quando se fazia incidir o feixe na FBG, este efeito foi interpretado como estando relacionado com o impacto da radiação na bainha das fibras que leva a tensões induzidas no núcleo e consequente desvio do comprimento de onda de Bragg. O desvio negativo lento e continuo ao longo de todo o tempo de irradiação pode estar relacionado com uma libertação do stress induzido por essa tensão instantânea. O facto de o

desvio total ter sido ligeiramente menor na FBG na fibra multimodo, pode ter origem numa combinação de dois efeitos da radiação, um no núcleo e outro na bainha. Uma vez que pela simulação realizada da profundidade de penetração do feixe na fibra, foi estimado que nesta fibra os prótons atingem o núcleo. Pelo que o efeito da radiação no núcleo parece resultar num desvio positivo pela variação positiva índice de refração efetivo e/ou período da rede de Bragg.

Relativamente ao efeito da irradiação com prótons de 3 MeV que garantem que o núcleo das fibras é irradiado, foi observado um desvio positivo do comprimento de onda de Bragg em ambas as FBGs. Sendo que o desvio foi maior para a FBG em sílica multimodo. Já em termos de variação da potência ótica, na FBG em fibra monomodo verificou-se que a potência ótica diminuía com o aumento da fluência acumulada, enquanto na outra FBG em fibra multimodo manteve-se aproximadamente constante. Os diferentes comportamentos das FBGs podem ter origem no facto do maior depósito de energia dos prótons se localizar em regiões diferentes em cada FBG. Pelos resultados de uma simulação realizada para este caso, os prótons atravessam o núcleo de ambas as fibras, mas no caso da fibra multimodo depositam mais energia no núcleo e no caso da fibra monomodo depositam mais energia na bainha. Os resultados obtidos para o feixe de maior energia estão de acordo com os resultados obtidos com o feixe de menor energia. Ou seja, quando os prótons depositam parte da sua energia no núcleo da fibra ótica contribuem de forma predominante para um desvio positivo do comprimento de onda de Bragg.

Apesar do claro desvio do comprimento de onda com a radiação verificou-se que as sensibilidades à temperatura das duas FBGs não foram afetadas pela exposição ao feixe de prótons. Como as FBGs apresentam diferentes sensibilidades à radiação e diferentes sensibilidades térmicas (que não são afetadas pela exposição à radiação), este facto sugere que para medir a dose de radiação e a temperatura num ambiente com radiação será necessário desenvolver um sensor multiparâmetros.

Por último, e de uma forma geral podemos claramente afirmar as FBGs em fibra de PMMA e de sílica demonstraram ter potencial para serem usadas como detetores de radiação gama. As FBGs em sílica demonstraram ser bastante sensíveis à radiação das partículas carregadas. No caso das FBGs em sílica, as sensibilidades térmicas não são afetadas nem pela radiação gama nem pela radiação das partículas carregadas. Pelo que se confirma a necessidade de realizar testes à radiação nas FBGs usando o tipo de radiação esperada no ambiente de interesse, previamente à sua aplicação.

7.2 Trabalho futuro

No futuro, certas alterações deverão ser implementadas em alguns dos procedimentos experimentais utilizados neste trabalho de forma a monitorizar a temperatura e a humidade (quando a FBG é sensível a este parâmetro) em simultâneo com a monitorização do espetro de reflexão da FBG sob radiação. Desta forma podemos estimar com mais precisão a real contribuição dos efeitos da radiação no desvio do comprimento de onda de Bragg.

Tendo em conta que a fibra de PMMA é sensível à temperatura e à humidade e, portanto, são mais dois parâmetros a influenciar o desvio do comprimento de onda de Bragg para além da radiação, seria particularmente interessante analisar o comportamento de outra FBG polimérica que insensível à humidade, por exemplo fibra polimérica ZEONEX [45].

Relativamente à radiação dos prótons, seria interessante completar o estudo de irradiação com mais energias diferentes e numa maior gama para melhor distinguir os efeitos da irradiação na bainha e no núcleo. Este especto tem particular importância para o estudo de fibras com um maior diâmetro, como por exemplo o caso da fibra polimérica CYTOP que no caso deste trabalho não foi possível avaliar o efeito da irradiação no núcleo da fibra.

Recomenda-se que num trabalho sejam usadas técnicas complementares de análise de forma a melhor identificar os mecanismos específicos que originam as mudanças observadas em cada FBG irradiada. Como por exemplo recorrer a espectroscopia de Raman para identificar defeitos pontuais e sistemas conjugados ou Ressonância Paramagnética Eletrónica para identificar a contribuição da absorção por radicais livres.

Seria também particularmente interessante como trabalho futuro complementar os estudos de simulação realizados com o Geant 4 com simulações das alterações das propriedades óticas de um material em função da concentração de defeitos promovidos pela irradiação. Sugerimos por exemplo o software de simulação PHITS (<https://phits.jaea.go.jp/>), que permite simular os defeitos criados nos materiais e os efeitos da radiação nas propriedades óticas das fibras.

Capítulo 8 - Referência

1. Bailey DL, Humm JL, Todd-Pokropek A, Van Aswegen A. Nuclear medicine physics : a handbook for students and teachers. 2014.
2. Zhang J, Xiang Y, Wang C, Chen Y, Tjin SC, Wei L. Recent Advances in Optical Fiber Enabled Radiation Sensors. *Sensors* 2022; 22.
3. Knoll GF. Radiation Detection and Measurement. 2010.
4. Morana A. Gamma-rays and neutrons effects on optical fibers and Bragg gratings for temperature sensors. 2013 <https://theses.hal.science/tel-01064993>.
5. Fernandes António LL. Efeitos da Radiação em Sensores de Fibra Ótica. 2015.
6. Prajzler V, Masopoustova K, Sarsounova Z. Gamma radiation effects on plastic optical fibers. *Optical Fiber Technology* 2022; 72.
7. Morana A, Marin E, Lablonde L *et al.* Radiation Effects on Fiber Bragg Gratings: Vulnerability and Hardening Studies. *Sensors* 2022; 22.
8. Gusarov A, Hoeffgen SK. Radiation effects on fiber gratings. *IEEE Trans Nucl Sci* 2013; 60: 2037–2053.
9. O’Keeffe S, Fitzpatrick C, Lewis E, Al-Shamma’A AI. A review of optical fibre radiation dosimeters. *Sensor Review* 2008; 28: 136–142.
10. Girard S, Kuhnenn J, Gusarov A *et al.* Radiation effects on silica-based optical fibers: Recent advances and future challenges. *IEEE Trans Nucl Sci* 2013; 60: 2015–2036.
11. Girard S, Alessi A, Richard N *et al.* Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers. *Reviews in Physics* 4 2019.
12. Kovačević MS, Savović S, Djordjevich A *et al.* Measurements of growth and decay of radiation induced attenuation during the irradiation and recovery of plastic optical fibres. *Opt Laser Technol* 2013; 47: 148–151.
13. Stajanca P, Mihai L, Sporea D *et al.* Impacts of gamma irradiation on Cytop plastic optical fibres. The 25th International Conference on Plastic Optical Fibers, 2016, 114–117.
14. Correia A, Rosa CC, Santos PMP, Falcão AN, Lorentz K. Real-time dosimeter targeted to nuclear applications. Second International Conference on Applications of Optics and Photonics, SPIE 2014, 92864R.
15. Chapalo I, Gusarov A, Kinet D, Chah K, Nan YG, Megret P. Postirradiation Transmission Characteristics of CYTOP Fiber Exposed by Gamma Radiation. *IEEE Trans Nucl Sci* 2022; 69: 656–662.
16. Fernandez Fernandez A, O’Keeffe S, Fitzpatrick C, Brichard B, Berghmans F, Lewis E. Gamma dosimetry using commercial PMMA optical fibres for nuclear environments. 17th International Conference on Optical Fibre Sensors, SPIE 2005, 499.
17. Stajanca P, Mihai L, Sporea D *et al.* Effects of gamma radiation on perfluorinated polymer optical fibers. *Opt Mater (Amst)* 2016; 58: 226–233.
18. Baccini D. The effect of gamma radiation on fibre Bragg grating sensors when used as radiation dosimeters when used as radiation dosimeters. 2013 https://ro.ecu.edu.au/theses_hons/79.
19. Hamdalla TA, Nafee SS. Bragg wavelength shift for irradiated polymer fiber Bragg grating. *Opt Laser Technol* 2015; 74: 167–172.
20. Gusarov A, Fernandez AF, Defosse Y, DecrBton M, MBgrel P, Blondel M. Behavior of Fibre Bragg Gratings Under High Total Dose Gamma Radiation. 2000.
21. Gusarov AI, Berghmans F, Deparis O *et al.* High Total Dose Radiation Effects on Temperature Sensing Fiber Bragg Gratings. 1999.
22. Fernandez AF, Brichard B, Berghmans F, Decréton M. Dose-rate dependencies in gamma-irradiated fiber Bragg grating filters. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, 2874–2878.
23. Krebber K, Henschel H, Weinand U. Fibre Bragg gratings as high dose radiation sensors? *Measurement Science and Technology*, Institute of Physics Publishing 2006, 1095–1102.
24. Santos JL, Farahi F. Handbook of Optical Sensors. In: *Handbook of Optical Sensors*. CRC Press, 2014.
25. Pereira LM. Técnicas e dispositivos em fibras óticas de plástico para sensoriamento. 2017.
26. Shino Connecting Future. Single Mode Fiber VS Multimode Fiber. 2020 https://www.xhfiber.com/blog/single-mode-fiber-vs-multimode-fiber_b37 (23 October 2023, date last accessed).
27. Sabri N, Aljunid SA, Salim MS, Fouad S. Fiber optic sensors: Short review and applications. *Springer Series in Materials Science* 2015; 204: 299–311.

28. Ali J, Tahir BA, Rahman RA. Strain Measurements Using Fibre Bragg Grating Sensor. *American Journal of Applied Science (Special Issue)* 2005; 40–48.
29. Ferreira M. *Ótica e Fotónica*. .
30. Fernando P, Antunes C. *Sensores ópticos para monitorização dinâmica de estruturas*. 2011.
31. Doyle C. *Fibre Bragg Grating Sensors An Introduction to Bragg gratings and interrogation techniques*. Smart Fibres Ltd 2003; 1: 1–5.
32. Díaz CAR, Leitão C, Marques CA *et al*. Low-Cost Interrogation Technique for Dynamic Measurements with FBG-Based Devices. *Sensors* 2017, Vol 17, Page 2414 2017; 17: 2414.
33. Lebel-Cormier MA, Boilard T, Bernier M, Beaulieu L. On the feasibility of using an optical fiber Bragg grating array for multi-point dose measurements in radiation therapy. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd 2022.
34. Chen J, Liu B, Zhang H. Review of fiber Bragg grating sensor technology. *Frontiers of Optoelectronics in China* 4 2011 204–212.
35. Nunes Nogueira R. *Redes de Bragg em fibra óptica*. 2005.
36. Correia SFH, Antunes P, Pecoraro E *et al*. Optical fiber relative humidity sensor based on a FBG with a di-ureasil coating. *Sensors (Switzerland)* 2012; 12: 8847–8860.
37. Othonos A, Kalli K, Pureur D, Mugnier A. *Fibre Bragg Gratings*. In: *Wavelength Filters in Fibre Optics*. Springer Berlin Heidelberg, 1999: 189–269.
38. Alfonso JE, Cardenas LG, Triana CA, Varon Duran M. Design of an optical sensing interrogator using an edge filter scheme. 2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), IEEE 2013, 1–5.
39. Min R, Pereira L, Paixão T *et al*. Inscription of Bragg gratings in undoped PMMA mPOF with Nd:YAG laser at 266 nm wavelength. *Opt Express* 2019; 27: 38039.
40. Erdogan T. Fiber Grating Spectra. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY* 1997; 15: 1277–1294.
41. Lu C, Cui Y. Fiber bragg grating spectra in multimode optical fibers. *Journal of Lightwave Technology* 2006; 24: 598–604.
42. Huang B, Shu X. Ultra-compact strain- and temperature-insensitive torsion sensor based on a line-by-line inscribed phase-shifted FBG. *Optics InfoBase Conference Papers*, Optica Publishing Group (formerly OSA) 2016.
43. Kashyap Raman. *Fiber Bragg gratings*. Academic Press, 2010.
44. Theodosiou A, Leal-Junior A, Marques C *et al*. Comparative study of γ -and e-radiation-induced effects on fbgs using different femtosecond laser inscription methods. *Sensors* 2021; 21.
45. Qu H, Huang W, Lin Z *et al*. Influence of Annealing on Polymer Optical Fiber Bragg Grating Inscription, Stability and Sensing: A Review. *Sensors* 23 2023.
46. Broadway C, Kinet D, Theodosiou A *et al*. CYTOP fibre bragg grating sensors for harsh radiation environments. *Sensors (Switzerland)* 2019; 19.
47. Lacraz A, Polis M, Theodosiou A, Koutsides C, Kalli K. Femtosecond Laser Inscribed Bragg Gratings in Low Loss CYTOP Polymer Optical Fiber. *IEEE Photonics Technology Letters* 2015; 27: 693–696.
48. Min R, Ortega B, Leal-Junior A, Marques C. Fabrication and Characterization of Bragg Grating in CYTOP POF at 600-nm Wavelength. *IEEE Sens Lett* 2018; 2.
49. Podgoršak EB. Interactions of Charged Particles with Matter. In: 2016: 229–276.
50. *Radiation interaction with matter*. 2021.
51. Blanchet T, Morana A, Allanche T *et al*. X-Ray, proton, and electron radiation effects on type i fiber bragg gratings. *IEEE Trans Nucl Sci* 2018; 65: 1632–1638.
52. Bakaic M, Hanna M, Hnatovsky C *et al*. Fiber-optic Bragg gratings for temperature and pressure measurements in isotope production targets for nuclear medicine. *Applied Sciences (Switzerland)* 2020; 10.
53. Bushberg JT, Seibert JA, Leidholdt EM, Boone JM. *The essential physics of medical imaging*. 3rd ed. Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, 2012.
54. Chieng R. Compton effect. 2023 <https://radiopaedia.org/articles/compton-effect> (25 October 2023, date last accessed).
55. Girard S, Ouerdane Y, Origlio G *et al*. Radiation effects on silica-based preforms and optical fibers: Experimental study with canonical samples. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, 3473–3482.
56. Law SH, Suchowerska N, McKenzie DR, Fleming SC, Lin T. Cerenkov radiation in optical fibres. *ACOFT/AOS 2006 - Australian Conference on Optical Fibre Technology/Australian Optical Society*, 2006, 100–102.

57. Primak W, Kampwirth R. The Radiation Compaction of Vitreous Silica. *J Appl Phys* 1968; 39: 5651–5658.
58. Di Francesca D, Vecchi GL, Girard S *et al.* Qualification and Calibration of Single-Mode Phosphosilicate Optical Fiber for Dosimetry at CERN. *Journal of Lightwave Technology* 2019; 37: 4643–4649.
59. O'keeffe S, Lewis E. POLYMER OPTICAL FIBRE FOR IN SITU MONITORING OF GAMMA RADIATION PROCESSES. *INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS* 2009; 2.
60. Li Z, Ran Z, Qing X *et al.* Study of the Sensing Characteristics of Irradiated Fiber Bragg Gratings and Fabry-Perot Interferometers Under Gamma Radiation. *Photonic Sensors* 2022; 12: 91–98.
61. Fibercore. Boron Doped Photosensitive Fiber. 2013 www.fibercore.com (1 July 2023, date last accessed).
62. Thorlabs. Graded-Index (GRIN) Multimode Fibers. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=358&pn=GIF625-100 (1 July 2023, date last accessed).
63. Thorlabs. Graded-Index Polymer Optical Fiber (GI-POF). <https://www.thorlabs.com/catalogPages/1100.pdf> (30 June 2023, date last accessed).
64. Sáez-Rodríguez D, Nielsen K, Rasmussen HK, Bang O, Webb DJ. Highly photosensitive polymethyl methacrylate microstructured polymer optical fiber with doped core. *Opt Lett* 2013; 38: 3769.
65. Pereira L, Min R, Woyessa G *et al.* Interrogation Method with Temperature Compensation Using Ultra-Short Fiber Bragg Gratings in Silica and Polymer Optical Fibers as Edge Filters. *Sensors* 2023; 23.
66. Pereira L, Min R, Hu X *et al.* Polymer optical fiber Bragg grating inscription with a single Nd:YAG laser pulse. *Opt Express* 2018; 26: 18096.
67. Marques CAF, Bilro LB, Alberto NJ, Webb DJ, Nogueira RN. Narrow bandwidth Bragg gratings imprinted in polymer optical fibers for different spectral windows. *Opt Commun* 2013; 307: 57–61.
68. Hill KO, Meltz G. *Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview*. 1997.
69. Zhang C, Zhang W, Webb DJ, Peng GD. Optical fibre temperature and humidity sensor. *Electron Lett* 2010; 46: 643–644.
70. Pereira LM, Pospori A, Antunes P *et al.* Phase-Shifted Bragg Grating Inscription in PMMA Microstructured POF Using 248-nm UV Radiation. *Journal of Lightwave Technology* 2017; 35: 5176–5184.
71. Pereira L, Min R, Paixao T *et al.* Compact Dual-Strain Sensitivity Polymer Optical Fiber Grating for Multi-Parameter Sensing. *Journal of Lightwave Technology* 2021; 39: 2230–2240.
72. Ahmed SN. Properties and sources of radiation. In: *Physics and Engineering of Radiation Detection*. Elsevier, 2015: 1–64.
73. Stajanca P, Krebber K. Towards on-line radiation monitoring with perfluorinated polymer optical fibers. .
74. Ye H, Geng C, Tang X, Tian F, Wu R, Xu P. Radiation and temperature effect of fiber Bragg grating sensor under Co-60 irradiation. *Radiat Meas* 2021; 142.
75. Shultis JK, Faw RE. *Radiation Shielding*. Illinois: American Nuclear Society, 2000.
76. Alves E, Lorenz K, Catarino N *et al.* An insider view of the Portuguese ion beam laboratory. *Eur Phys J Plus* 2021; 136.
77. Geant4. <https://geant4.web.cern.ch/> (9 October 2023, date last accessed).
78. Ziegler JamesF. SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter. <http://www.srim.org/> (9 October 2023, date last accessed).
79. Griscom DL. *The Centennial Memorial Issue of The Ceramic Society of Japan Optical Properties and Structure of Defects in Silica Glass*. Washington, 1991.
80. Perry M, Niewczas P, Johnston M. Effects of neutron-gamma radiation on fiber bragg grating sensors: A review. *IEEE Sens J* 2012; 12: 3248–3257.
81. CTN. Feixe Externo - Microssonda Iónica. <http://www.ctn.tecnico.ulisboa.pt/projs/microfex/> (8 October 2023, date last accessed).
82. Taylor' EW, Hulick K, Battiato2 JM, Sanchez' AD, Winter' JE, Pinch2 A. Response of germania doped fiber Bragg gratings in radiation environments. *Enabling Photonic Technologies for Aerospace Applications* 1999; 3714: 106–113.
83. Gusarov A, Chojetzki C, McKenzie I, Thienpont H, Berghmans F. Effect of the fiber coating on the radiation sensitivity of type i FBGs. *IEEE Photonics Technology Letters* 2008; 20: 1802–1804.

- 84.** Morana A, Girard S, Marin E *et al.* Radiation Tolerant Fiber Bragg Gratings for High Temperature Monitoring at MGy Dose Levels. *Opt Lett* 2014; 39: 5313–5316.