



Universidade de Aveiro Departamento de Física
Ano 2014

**MARIA DE FÁTIMA
FONSECA
DOMINGUES**

**ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DO TEMPO DE VIDA
DAS FIBRAS ÓTICAS E O SEU IMPACTE NO
DESEMPENHO DAS REDES DE COMUNICAÇÕES**



**MARIA DE FÁTIMA
FONSECA
DOMINGUES**

**ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DO TEMPO DE VIDA
DAS FIBRAS ÓTICAS E O SEU IMPACTE NO
DESEMPENHO DAS REDES DE COMUNICAÇÕES**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Paulo Sérgio de Brito André, Professor Associado do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, co-orientação do Professor Doutor João de Lemos Pinto, Professor Catedrático da Universidade de Aveiro, e co-orientação do Doutor Paulo Antunes, Investigador do Instituto de Telecomunicações e do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Apoio financeiro da FCT e do FSE no âmbito do III Quadro Comunitário de Apoio.



Aos meus pais e irmãos,
Ao Ayman...

...Pelo apoio contínuo e incondicional, presença constante ... e paciência infinita!

o júri

Presidente

Carlos Fernandes da Silva
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor José Manuel Marques Martins de Almeida
Professor Associado com Agregação da Universidade de Trás os Montes e Alto Douro

Doutora Graça Maria Henriques Minas
Professora Associada da Escola de Engenharia da Universidade do Minho

Doutor Orlando José Reis Frazão
Professor Auxiliar Convidado da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

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

Doutor Paulo Sérgio de Brito André
Professor Associado com Agregação do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
(orientador)

agradecimentos

Ao longo desta etapa, pude contar com o apoio de várias pessoas e instituições que de alguma forma contribuíram para desenvolvimento do trabalho aqui exposto, sendo por isso necessário manifestar o meu agradecimento a todos eles.

Ao meu orientador e co-orientadores, o Prof. Doutor Paulo André, Doutor Paulo Antunes e Professor Doutor João de Lemos Pinto, por todo o apoio, cooperação e disponibilidade, demonstradas ao longo das várias etapas do trabalho desenvolvido.

Ao Instituto de Telecomunicações – Aveiro, ao Instituto de Nanoestruturas, Nanomodelação e Nanofabricação (I3N) - Aveiro e ao Centre for Research in Ceramics and Composite Materials (CICECO), pelo apoio logístico disponibilizado.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo suporte financeiro através da bolsa doutoramento (SFRH/BD/69097/2010) do projeto FEFOF (PTDC/EEA-TEL/72025/2006).

Aos colegas do Instituto de Telecomunicações-Aveiro e do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, pelo apoio e disponibilidade demonstrada.

A todos os meus familiares e amigos que de alguma forma estiverem presentes ao longo desta etapa e cujo apoio contribuiu para a finalização deste projeto.

A todos, o meu muito obrigado!

M. Fátima F. Domingues

palavras-chave

Fibra ótica, degradação de fibra ótica, degradação de conectores óticos, efeito rastilho, sensores em fibra ótica, micro-cavidades Fabry Perot

resumo

Este trabalho focou-se no estudo do impacto das condições ambientais, de instalação e de utilização na degradação da fibra ótica, que frequentemente resultam na redução do desempenho das fibras óticas.

Entre estes fatores, foram estudados os efeitos de ambientes agressivos para o revestimento da fibra, nomeadamente no tempo de vida e resistência. Foi também estudado o efeito da propagação de sinais óticos de elevadas potências em curvaturas apertadas e a sua influência na degradação do desempenho da fibra ótica. Ainda neste âmbito, foi também estudado o desempenho de fibras óticas insensíveis a curvatura e fibras dopadas com Érbio, sendo analisada a dinâmica do efeito rastilho nestas fibras.

Como parte integrante das redes óticas, os conectores óticos são de extrema importância na sua estrutura. O seu desempenho será refletido na qualidade do serviço da rede, e por isso é determinante estudar os fatores que contribuem para a sua degradação e mau funcionamento. Assim, este trabalho apresenta um estudo do comportamento de conectores óticos perante situações de mau manuseamento (como são limpeza insuficiente e degradação física da face final).

Em adição foi também dada ênfase à reutilização de fibra danificada pelo efeito rastilho no desenvolvimento de sensores, passíveis de serem utilizados na monitorização de índice de refração, pressão hidrostática, tensão ou alta temperatura. Este procedimento surge como uma solução de baixo custo para o desenvolvimento de sensores em fibra ótica a partir de fibra danificada e inutilizável para as suas habituais aplicações em transmissão e/ou reflexão de sinais óticos.

keywords

Optical fiber, optical fiber degradation, optical connectors degradation, fuse effect, optical fiber sensors, Fabry Perot micro-cavities

abstract

This work focused on the study of the impact of environmental conditions, installation and use, on the degradation of the optical fiber, which often result in decreased performance of the optical fibers.

Among those factors, the effects of aggressive environments on the fiber coatings in its lifespan and resistance were studied. Also, the study of the effects of high optical power signals in tight bends and its influence on the degradation of the optical fiber performance is presented. Moreover, within this framework, the performance of the bend insensitive optical fibers is studied, and the dynamics of the fiber fuse effect for these fibers and fibers doped with Erbium are analyzed.

Optical connectors represent vital components of the structure of optical networks. Their performance is reflected in the quality of network service, and so it is crucial to study factors that may contribute to their degradation and malfunction. Thus, this work additionally presented a study of the behavior of optical connectors under the simulation of its mishandling (such as the insufficient cleaning and physical degradation of its end face).

At last, emphasis was given to the reuse of the fiber damaged by the fuse effect in the development of optical fiber sensors, suitable for the monitoring of parameters such as the refractive index, pressure, strain or high temperature sensors. This procedure was a low-cost solution for the development of fiber optic sensors from damaged and unusable fiber.

Índice

Glossário de Acrônimos.....	iii
Lista de Símbolos e Constantes	v
Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Estado da arte	3
1.3 Estrutura do trabalho desenvolvido e principais contribuições	6
1.4 Lista de publicações no âmbito da tese	8
Referências	12
Capítulo 2 Degradação de fibras óticas	17
2.1 Contextualização.....	17
2.2 Influência de ambientes marítimos na fibra ótica	19
2.2.1 Processo de envelhecimento da fibra	19
2.2.2 Tempo de vida útil da fibra ótica.....	26
2.3 Conclusão	31
Referências.....	32
Capítulo 3 Sinais de alta potência em fibra e conectores óticos.....	35
3.1 Contextualização.....	35
3.2 Efeito de curvaturas apertadas no tempo de vida da fibra ótica	38
3.2.1 Análise microscópica da fibra danificada.....	43
3.3 Degradação de conectores óticos	45
3.3.1 Eficiência ótica dos conectores contaminados	47
3.3.2 Efeitos térmicos da contaminação nos conectores óticos	49
3.3.3 Desempenho dos conectores danificados perante altas potências.....	54
3.3.4 Análise microscópica após testes a altas potências	55
3.4 Conclusão	58
Referências.....	59

Capítulo 4 Efeito rastilho em fibras especiais	61
4.1 Contextualização.....	61
4.2 Caraterísticas do efeito rastilho induzido na fibra G.657	64
4.3 Monitorização da zona de paragem do efeito rastilho	68
4.3.1 Análise térmica do revestimento da fibra	69
4.3.2 Análise microscópica	76
4.4 Regime de velocidade não linear do efeito rastilho	78
4.5 Conclusão	82
Referências.....	83
Capítulo 5 Sensores FPI com base no efeito rastilho	85
5.1 Contextualização.....	85
5.2 Produção de sensores	89
5.3 Sensores de índice de refração.....	91
5.4 Sensores de pressão hidrostática	97
5.5 Sensores de tensão	103
5.6 Sensores para altas temperaturas	109
5.7 Conclusão	114
Referências.....	116
Capítulo 6 Considerações finais e trabalho futuro.....	119
6.1 Considerações finais.....	119
6.2 Trabalho futuro.....	123

Glossário de Acrônimos

DCF	<i>Dispersion Compensating Fiber</i>	Fibra para a compensação da dispersão cromática
DSF (G.653.B)	<i>Dispersion Shift Fiber</i>	Fibras de dispersão deslocada
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifiers</i>	Amplificador de fibra ótica dopada com Érbio
EM12-980-125	<i>Erbium doped fiber</i>	Fibra ótica dopada com Erbium
FBG	<i>Fiber Bragg Gratings</i>	Rede de Bragg em fibra ótica
FPI	<i>Fabry-Perot Interferometer</i>	Interferômetro Fabry-Perot
FTTH	<i>Fiber to the Home</i>	Fibra ótica até à residência do subscritor
MFD	<i>Mode Field Diameter</i>	Diâmetro do campo modal
NZDSF (G.655.C)	<i>Non-Zero Dispersion Shift Fiber</i>	Fibra de dispersão deslocada não nula
RFBG	<i>Regenerated Fiber Bragg Gratings</i>	Rede de Bragg regenerada em fibra ótica
RIMG	<i>Refractive Index Matching Gel</i>	Gel adaptador de índice de refração
SMF (G.656)	<i>Bend insensitive Single Mode Fiber</i>	Fibra ótica monomodo insensível a curvatura
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>	Microscopia eletrônica de varrimento
SMF (G.652.D)	<i>Single Mode Fiber</i>	Fibra ótica monomodo

Lista de Símbolos e Constantes

a	Semi-eixo de uma elipsoide (x)
B	Parâmetro de fator ambiental ($1.3 \times 10^{-8} \text{ GPa} \cdot \text{s}^{-1}$)
b	Semi-eixo de uma elipsoide (y)
c	Semi-eixo de uma elipsoide (z)
d	Distância entre placas
d_c	Diâmetro da bainha da fibra ótica
dc/dt	Ritmo de crescimento de falhas
d_f	Diâmetro da fibra ótica
d_g	Profundidade das fendas de fixação da fibra
d_x	Declive da transição de fadiga
E_0	Módulo de Young
F	Probabilidade de falha
I	Intensidade ótica
IR	Índice de Refração de uma solução
K_I	Fator de intensidade de fadiga
K_{IC}	Fator de intensidade de fadiga crítico
L	Comprimento de uma micro-cavidade
m	Declive de Weibull
m^{th}	Número de modos de interferência
n	Coefficiente de degradação da fibra
n_{eff}	Índice de refração
P	Pressão
P_{in}	Potência ótica inseria
P_{out}	Potência ótica de saída
S	Tensão
S_T	Sensibilidade térmica
T	Temperatura
t	Tempo
t_{dg}	Tempo de degradação da fibra
t_f	Tempo de vida da fibra ótica
T_{max}	Temperatura máxima

V	Volume
X_0	Período de transição de fadiga
α	Parâmetro elástico não linear da fibra, (19/4)
α_T	Coefficiente de expansão térmica da sílica ($0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
β	Constante de saturação para absorção pelo revestimento
ΔS	Período espacial entre lacunas
ΔT	Varição de temperatura
$\Delta \lambda$	Varição de comprimento de onda
$\Delta \lambda_{Bragg}$	Varição do comprimento de onda de Bragg
ε	Fadiga induzida na fibra
ε_z	Alongamento longitudinal relativo
λ	Comprimento de onda
π	Constante matemática (3.14159)
σ	Tensão de rutura
σ_0	Limite superior de tensão na fibra
σ_1	Limite inferior de tensão na fibra
σ_a	Tensão na fibra durante o tempo de serviço
ϕ_{FPI}	Diferença de fase de uma cavidade interferométrica Fabry-Perot
Γ	Período de modulação do sinal ótico refletido numa cavidade FPI

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Nos últimos anos tem-se observado uma alteração no paradigma das redes de comunicações, nomeadamente das redes óticas. A evolução das redes de comunicação tem passado pela disseminação da tecnologia ótica, prevendo-se, num futuro próximo, a massificação das ligações até residência do subscritor (FTTH). Esta alteração na estrutura das redes vem realçar a importância da qualidade das fibras óticas utilizadas, bem como da sua correta instalação. Vários problemas emergem do uso massificado de fibra ótica em cenários habitacionais, nomeadamente, atenuação adicional originada pela curvatura da fibra e a sua degradação como resultado da exposição a ambientes severos ou menos protegidos. Para além destes fatores, a utilização de sinais com elevada potência ótica origina efeitos adicionais que podem reduzir o tempo de vida útil das fibras instaladas.

Atualmente, é evidente que a fiabilidade de uma ligação ótica é dependente da qualidade e do desempenho das fibras óticas utilizadas na infra-estrutura. A qualidade das junções óticas (por fusão ou com recurso a conetores) e a sua degradação em função das condições de operação é também um fator de especial relevância. Estas questões assumem particular relevo num cenário previsto de elevada disseminação das redes FTTH, onde muitas vezes não é possível controlar as condições de instalação.

A sensibilidade da fibra ótica em termos de atenuação induzida por micro-curvaturas é também uma característica de extrema importância para a sua incorporação nas redes de telecomunicações e para o desenvolvimento de novas soluções para FTTH. As micro-curvaturas da fibra ótica, resultam num aumento da atenuação local, que induz um aumento localizado da temperatura, que resulta num incremento adicional da absorção ótica da sílica. Este processo, pode, em situações extremas (presença de sinais de alta potência) induzir um aumento catastrófico da temperatura, até valores aos quais ocorre a vaporização do núcleo da fibra, despoletando o designado efeito rastilho. O efeito de rastilho é caracterizado por uma zona de fusão (plasma), acompanhada pela emissão de luz branca, que se propaga no sentido da fonte do sinal ótico. Após a ocorrência do efeito rastilho, o núcleo da fibra apresenta uma cadeia periódica de lacunas ficando permanentemente destruída. Num contexto de redes óticas, este efeito pode causar a completa destruição da infraestrutura ao longo de vários quilómetros, acarretando custos elevados para a sua reparação.

O objetivo central deste trabalho focou-se no estudo do impacto das condições ambientais, de instalação e de utilização na degradação da fibra ótica, que frequentemente resultam na redução do seu desempenho.

Como complemento a estes objetivos, foi também dada alguma ênfase à reutilização de fibra danificada pelo efeito rastilho no desenvolvimento de sensores óticos. Nomeadamente, sensores de índice de refração, pressão, tensão ou ainda altas temperaturas. Este procedimento surge como uma solução de baixo custo para o desenvolvimento de sensores em fibra ótica a partir de fibra danificada e inutilizável para as suas habituais aplicações em transmissão e/ou reflexão de sinais óticos.

1.2 Estado da arte

Os fatores pertinentes a considerar para uma instalação de fibra ótica, num cenário FTTH são a redução do espaço ocupado pelos componentes e a redução dos custos de instalação através da aplicação de fibra com caráter mais robusto. Sobre esta questão, existem já fabricantes que propõem fibras com baixa atenuação mesmo quando sujeitas a curvaturas apertadas [1]. No entanto, um outro fator relevante é o estudo da evolução das características das fibras ao longo do seu tempo de vida. Nesse âmbito, vários autores reportaram as consequências do envelhecimento das camadas de proteção das fibras e a consequente degradação das características da ligação ótica, nomeadamente em termos de atenuação [2,3]. Foi já descrito previamente o efeito na resistência física das fibras e no seu revestimento, quando estas são sujeitas a ambientes extremos tais como elevadas variações de temperatura ou humidade, ou mesmo devido à presença de ambientes marítimos onde uma elevada concentração de sais agressivos está presente [4,7-10].

O revestimento das fibras, é também um importante fator a considerar nas implementações do sistema FTTH, tendo sido esta problemática alvo de vários estudos [4-10]. Os trabalhos apresentados até à data corroboram a teoria de que a difusão de iões, ou outros materiais para além da água, no revestimento da fibra, controla a degradação da sua resistência mecânica durante o processo de envelhecimento. Foi verificado que o revestimento de acrilato apesar de proteger mecanicamente a fibra é permeável à água [5]. Neste seguimento, em estudos efetuados com diferentes tipos de revestimentos, foi patente a alteração no comportamento da fibra, de acordo com o revestimento utilizado [6,7]. Estes autores verificaram também que em ambientes mais agressivos, as fibras revestidas a poliamida e acrilato apresentaram um aumento abrupto do ritmo de envelhecimento, isto é, uma diminuição drástica da resistência da fibra em função do tempo de envelhecimento [7].

A sensibilidade da fibra ótica em termos de atenuação induzida por micro-curvaturas é também uma característica de extrema importância na sua incorporação nas redes de telecomunicações e para o desenvolvimento de novas soluções para aplicações FTTH. Nesse âmbito, foi apresentado um estudo relativo a novos tipos de fibras e revestimentos, solucionando a lacuna existente nas aplicações FTTH, anunciando a sua insensibilidade (ou sensibilidade reduzida) a pequenas curvaturas [11-13]. Para as fibras monomodo padrão (SMF), como é o exemplo da fibra G.652.D, existem já estudos relativos ao seu desempenho e tipo de danos induzidos, quando esta fibra é submetida a curvaturas com um pequeno diâmetro [14-18]. Os efeitos nefastos observados nestes estudos estimulam a necessidade de efetuar testes para fibras insensíveis a curvatura, tais

como a G.656, para que a sua implementação num cenário FTTH seja efetuada de acordo com parâmetros de segurança necessários.

O efeito rastilho em fibra ótica, observado pela primeira vez em 1987 por Kashyap [19,20] pode ocorrer em fibras óticas onde se propaguem sinais com elevada potência (usualmente superior a 1.0 W), levando à destruição catastrófica da fibra ao longo de vastas distâncias [21]. No entanto, para que este efeito ocorra, é necessária a existência de um ponto de ignição, caracterizado por uma elevada temperatura [22]. O conhecimento da dinâmica de propagação do efeito rastilho é de extrema importância para a manutenção e preservação das redes óticas, em particular em pontos onde existam sinais de elevadas potências, onde a sua ignição pode facilmente ocorrer. Neste âmbito, o estudo do efeito rastilho tem sido aprofundado para diferentes tipos de fibras passíveis de serem implementadas num contexto de redes óticas. Em estudos anteriormente apresentados, foram reportados valores de velocidade de propagação da zona de fusão para diferentes tipos de fibras, bem como os valores do limiar de potência para a sua propagação e também foi efetuada a caracterização das lacunas geradas [20,21,23,24]. No entanto, as fibras recentemente desenvolvidas e com larga perspetiva para implementação no cenário FTTH, G.656, não foram ainda contempladas na literatura existente, sendo por isso necessária a sua caracterização perante este fenómeno catastrófico como é o efeito rastilho.

Outra questão relevante, num cenário FTTH é a utilização das ligações óticas com sinais de potência cada vez mais elevadas, podendo-se antever uma degradação resultante do aquecimento das camadas de proteção externas da ligação, que deverá ser considerada em termos de impacto no tempo de vida das fibras e ligações óticas [16].

Do ponto de vista de degradação dos conetores óticos, componente essencial de uma rede ótica, o parâmetro chave a considerar no estudo do seu desempenho é a atenuação do sinal ótico induzido. Esta atenuação ocorre quando os conetores estão fisicamente danificados ou deficientemente limpos, e na presença de sinais de alta potência podem desencadear o efeito rastilho, originando a destruição da fibra [25]. Estudos anteriores debruçaram-se já sobre o efeito de sinais de alta potência em conetores óticos com superfícies degradadas por contaminantes externos [26], e mais recentemente foram também publicados trabalhos sobre a destruição catastrófica (estando o efeito rastilho entre os mais relevantes) resultante da utilização de sinais de elevada potência em conetores óticos danificados ou na presença de impurezas, na zona de conexão [27,28].

O efeito rastilho é uma realidade, indesejável, mas por vezes despoletado pelo incorreto

manuseamento de fibra ótica e/ou dos componentes integrantes da rede [20]. A propagação da zona de fusão ao longo da fibra, deixa-a, como já referido anteriormente irremediavelmente danificada, apresentando uma cadeia periódica de lacunas no interior do núcleo, com dimensões na ordem dos micrómetros. Embora a fibra nestas condições seja inútil para a sua integração em redes óticas, as lacunas no seu interior podem ser integradas em dispositivos de sensoriamento [29-31].

Nas últimas décadas os sensores em fibra ótica são uma das tecnologias de sensoriamento mais promissoras e com maior desenvolvimento ativo. Tal, deve-se às inúmeras vantagens que apresenta face à tradicional tecnologia de sensoriamento eletrónica, nomeadamente, o reduzido peso e volume, a imunidade a interferências eletromagnéticas e o isolamento elétrico [32]. Em termos de aplicação, estes sensores podem ser largamente utilizados em diversas áreas, tais como a medicina ou monitorização de integridade estrutural de edifícios, ciências biológicas, indústrias químicas e alimentares, petrolíferas, entre muitos outros [31-35]. De entre as diversas tecnologias de sensoriamento em fibra ótica, as baseadas em redes de Bragg (FBG) e em micro-cavidades Interferométricas Fabry-Perot (FPI) tornaram-se atraentes devido ao seu tamanho reduzido, à sua resposta linear e maior sensibilidade [29-32,36].

No entanto, a produção de sensores com base nestas tecnologias requer um investimento financeiro significativo para a aquisição dos equipamentos necessários ao seu fabrico. Tal deve-se ao fato de, usualmente, a produção de micro-cavidades FPI requerer o uso de um laser pulsado femtosegundo e sistemas de alinhamento e posicionamento complexos e de elevado custo [30,31]. Nos últimos anos, vários trabalhos foram apresentados envolvendo a produção, aplicação e caracterização de micro-cavidades em fibra ótica para monitorização de parâmetros como, tensão, pressão, índice de refração ou ainda temperatura [29-31,36-41]. A quantidade de trabalhos desenvolvidos e apresentados nos últimos anos sobre esta temática, corrobora o seu potencial de tecnologia e estimula o desenvolvimento de soluções semelhantes, mas com custo de produção e implementação mais reduzido.

1.3 Estrutura do trabalho desenvolvido e principais contribuições

Com a ambição de contribuir para o desenvolvimento e disseminação de novas soluções para sistemas FTTH, numa primeira fase do trabalho, apresentada no Capítulo 2, procedeu-se ao estudo do impacte das condições ambientais no decaimento do tempo de vida das fibras óticas. Assim, foi estudado o impacte resultante da utilização de fibras óticas em ambientes adversos (condições ambientais adversas de temperatura, humidade ou presença de elementos externos tais como Cloreto de Sódio) bem como o resultante da incorreta instalação das ligações e da utilização de sinais com potências óticas elevadas que podem originar uma degradação acelerada da infra-estrutura ótica. Neste âmbito, foi analisado qual o impacto do envelhecimento da fibra em soluções com diferentes concentrações de NaCl no seu tempo de vida. Neste estudo, os resultados obtidos apontam para uma redução drástica do tempo de vida da fibra quando o revestimento de acrilato é deixado em contato com soluções de NaCl por períodos inferiores a 4 meses [9,10].

Tendo em consideração as novas soluções de fibra apresentadas para um cenário FTTH, nomeadamente as fibras insensíveis a curvatura (G.656), é apresentado no Capítulo 3 um estudo do seu desempenho perante a inserção de sinais óticos de altas potências quando estas são sujeitas a curvaturas com pequenos diâmetros. Foi verificado que perante curvaturas de pequenos diâmetros, inferiores a 4.0 mm, a probabilidade de falha da fibra G.656 aumenta consideravelmente e os danos da potência ótica irradiada para modos não guiados, na zona curvada foram evidentes [18].

Ainda nesta temática é apresentado também os efeitos e consequências da inserção de sinais com elevada potência em conetores óticos fisicamente danificados e contaminados. Os resultados obtidos neste estudo corroboram a necessidade de manter as ligações em perfeito estado de manutenção, em particular no que diz respeito à limpeza da face final do conector, de modo a preservar a segurança e qualidade de serviço da rede ótica [27,28,46].

No Capítulo 4, é apresentado o trabalho desenvolvido relativo ao estudo das características e dinâmica do efeito rastilho para as fibras insensíveis a curvatura (G.656), amplamente utilizadas para instalações FTTH. Neste estudo são analisadas a velocidade de propagação da zona de fusão do efeito rastilho e o formato e período das lacunas de acordo com a potência ótica do sinal injetado. É ainda apresentado o valor de potência limiar do sinal, obtido para a mitigação do efeito rastilho [42]. Uma análise semelhante é também efetuada para as fibras óticas dopadas

com Érbio (Er^{3+}), fibras estas comumente utilizadas em amplificadores óticos [43]. Ainda neste âmbito, é estudado o efeito da re-inserção de sinais óticos na fibra, após a mitigação do efeito rastilho. Os efeitos destrutivos provocados pela irradiação do sinal ótico no revestimento da fibra são também reportados nesta secção [44,45].

O efeito rastilho, foi um fenómeno frequentemente presente nos estudos efetuados e descritos. Com o objetivo de reutilizar a fibra permanentemente danificada por este fenómeno catastrófico, e inutilizável para o propósito que é inicialmente desenvolvida (comunicações óticas), no Capítulo 5, é apresentado o processo de desenvolvimento de novos sensores, com base nas micro-cavidades originadas pelo efeito rastilho. Neste âmbito, foram desenvolvidos sensores de tensão [47-49] índice de refração [47, 50], altas temperaturas [47] e pressão hidrostática [47], com sensibilidades semelhantes às soluções apresentadas na literatura para dispositivos semelhantes, mas com custos de produção e implementação consideravelmente bastante mais reduzidos.

1.4 Lista de publicações no âmbito da tese

Capítulos de livros

1. P.S. André, N. Fernandes, F. Domingues, A. Rocha, M. Granada, M. Lima, A.L.J. Teixeira; "POWER TRANSMISSION OVER OPTICAL FIBERS" - Chapter in Advances in Energy Research – Volume 8, Morena V. Acosta, Nova Publisher, New York, 2011.
2. Antunes, Paulo, Fátima Domingues, Marco Granada, and Paulo André, "Mechanical properties of optical fibers", Selected Topics on Optical Fiber Technology, 2011.
3. André, P.S; Rocha, Ana M.; Domingues, M.F.; M. Facão; "Thermal effects in optical fibers" - Chapter in Heat Transfer - Book 1, Marco Aurélio dos Santos Bernardes, In-Tech, 2011.

Artigos de revistas

1. M. Fátima Domingues, M. Granada, Paulo Antunes, Paulo S. B. André, "Lifetime Prediction of Optical Fibers Deployed in Seashore Regions", (*submitted to Strain*)
2. Fátima Domingues, Paulo Antunes, Nélia Alberto, Rita Frias, Rute A. S. Ferreira, Paulo André, "Cost effective refractive index sensor based on optical fiber micro cavities produced by the catastrophic fuse effect" (*submitted to Measurement, Manuscript ID: MEAS-D-14-00491*)
3. F. Domingues, T. Paixão, E. Mesquita, N. Alberto, A. R. Frias, R. A. S. Ferreira, H. Varum, P. Antunes, P.S. André, "Liquid hydrostatic pressure optical sensor based on micro-cavity produced by the catastrophic fuse effect" (*Submitted to Sensors Journal, IEEE, Sensors-11336-2014*)
4. M. F. Domingues, P. Antunes, N. Alberto A. R. Frias, A. R. Bastos, R. A. S. Ferreira and P. S. André, "Enhanced sensitivity high temperature optical fiber FPI sensor created with the catastrophic fuse effect", aceite para publicação *in Microwave and Optical Technology Letters*, (Manuscript ID: MOP-14-1181)
5. Antunes, P.F.C.; Domingues, M.F.F.; Alberto, N.J.; Andre, P.S., "Optical Fiber Microcavity Strain Sensors Produced by the Catastrophic Fuse Effect," *Photonics Technology Letters, IEEE* , vol.26, no.1, pp.78,81, Jan.1, 2014.
6. Pereira, Nelson Mateus, Ilda Abe, Paulo Fernando da Costa Antunes, Maria Fátima Domingues, Ana Pratas e Sousa, Licínio Ferreira, Humberto Varum, Luis Cadillon Costa, and Paulo Sérgio de Brito André. "Conjugation of optical and microwave techniques to monitor the early age concrete cure." *Instrumentation Science & Technology* 41, no. 2, 117-124, 2013.
7. Domingues, F.; R Frias; Antunes, P.; Sousa, A.; M.R. Ferreira; André, P.S; "Observation of fuse effect discharge zone nonlinear velocity regime in erbium-doped fibres", *Electronics Letters*, Vol. 48, No. 20, pp. 1295 - 1296, September, 2012.

8. Rocha, Ana M.; Fernandes, G.; Domingues, F.; M. Niehus; Pinto, A. N.; M. Facão; André, P.S; "Halting the fuse discharge propagation using optical fiber microwires", Optics Express, Vol. 20, No. 19, pp. 21083 - 21088, September, 2012.
9. Domingues, F.; Rocha, Ana M.; André, P.S; "High-power effects in damaged and contaminated optical fiber connectors", Microwave and Optical Tech. Letters, Vol. 53, No. 11, pp. 2485 - 2488, November, 2011.
10. Domingues, F., P. André, and M. Granada. "Optical fibres coating aging induced by the maritime environment." Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications 10, no. 1, 259-265, 2011.
11. Rocha, Ana Maria, P. F. D. C. Antunes, F. Domingues, Margarida Facão, and Paulo Sergio Andre. "Detection of fiber fuse effect using FBG sensors." Sensors Journal, IEEE 11, no. 6, 1390-1394, 2011.
12. Andre, P. S., A. M. Rocha, F. Domingues, and A. Martins. "Improved thermal model for optical fibre coating owing to small bending diameter and high power signals." Electronics Letters 46, no. 10, 695-697, 2010.

Publicações em conferências

1. André, Paulo S., M. Fátima Domingues, Paulo Antunes, Nélia Alberto, Ana Rita Frias, and R. A. S. Ferreira, "Sensors based on recycled optical fibers destroyed by the catastrophic fuse effect", In Second International Conference on Applications of Optics and Photonics, pp. 92862U-92862U. International Society for Optics and Photonics, 2014.
2. Domingues, M. Fátima, Paulo Antunes, Nélia Alberto, Rita Frias, Rute AS Ferreira, and Paulo André, "Optical strain sensor based on FPI micro-cavities produced by the fiber fuse effect", In OFS2014 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors, pp. 91571Q-91571Q. International Society for Optics and Photonics, 2014.
3. Domingues, Fátima, Paulo Antunes, Nelia Alberto, and Paulo S. Andre, "Refractive Index Sensor Based on Optical Fiber Void Cavities Produced by the Catastrophic Fuse Effect", In Optical Sensors, pp. SM4C-3. Optical Society of America, 2013.
4. P. Antunes, F. Domingues, N. Alberto, P. S. André, "Optical fiber strain sensor based on micro-cavities produced by the catastrophic fuse effect", VIII Iberoamerican Optics Meeting & XI Latinamerican Meeting on Optics, Lasers and Applications, Porto, Portugal, July 22 to 26, 2013.
5. Domingues, F.; Rocha, Ana M.; Antunes, P.; André, P.S; "Evaluation of the fuse effect propagation velocity in bend loss insensitive fibers", Proc Optoelectronics and Communications Conf. - OECC, Busan, Korea, South, Vol. 17, pp. 799 - 800, July, 2012.

6. Domingues, F.; Rocha, Ana M.; R Frias; André, P.S; "Evaluation of the temperature increase on the fiber fuse effect end point", Proc International Conf. on Transparent Optical Networks - ICTON, Coventry, United Kingdom, Vol. 14, pp. 1 - 3, July, 2012.
7. Domingues, F.; Rocha, Ana M.; André, P.S; R Frias; M.R. Ferreira; "Temperature Monitoring of Bend Insensitive Fibers After the Fuse Effect Propagation", Proc Optical Fiber Sensors Conf., Monterey, United States, Vol. STu1F, pp. STu1F.4 - STu1F.4, June, 2012.
8. Paulo Antunes, F. Domingues, L. F. Ferreira, P. A. Silva e P. S. André, "Monitorização das variações da topografia de uma praia com sensores de fibra óptica", MEC2011 - Conferência sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira, LNEC, Lisboa, Portugal, 3-4 February, 2011.
9. Domingues, F.; Rocha, Ana M.; André, P.S; "Failure Probability of Optical Fiber under High Optical Power and Small Bend Diameters", Proc International Microwave and Optoelectronics Conf. - IMOC, Natal, Brazil, October, 2011.
10. Rocha, Ana M.; Fernandes, G.; Domingues, F.; Pinto, A. N.; M. Facão; André, P.S; "Fiber fuse effect propagation break using optical fiber taper ", Proc Optoelectronics and Communications Conf. - OECC, Kaohsiung, Taiwan, Vol. , pp. 593 - 594, July, 2011.
11. Rocha, Ana M., F. Domingues, M. Facão, and P. S. André. "Threshold power of fiber fuse effect for different types of optical fiber", *In* 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), pp. 1-3. IEEE, 2011.
12. André, P.S; Domingues, F.; F Granada; "Impact of the Maritime Environment on the Aging of Optical Fibers", Proc Conf. on Lasers and Electro-optic - CLEO, Baltimore, United States, May, 2011.
13. André, Paulo S., Fatima Domingues, Margarida Facão, and Ana M. Rocha, "Optical Fuse Discharge Temperature Determination Employing the CIE Color Coordinates", *In* Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim, p. C491. Optical Society of America, 2011.
14. Rocha, AM.; Andre, P.S.; Domingues, F.; Facão, M., "Reflected light from the fiber fuse propagation," EUROCON - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), 2011 IEEE, pp.1,3, 27-29 April 2011.
15. Ana M. Rocha, P. Antunes, F. Domingues, M. Facão, P.S. André, "Configuration for detect the fiber fuse propagation using a FBG sensor", *In* 12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2010), Munich, Germany, 2010.
16. Domingues, F.; André, P.S; "Optical Fibers Coating Aging Induced by the Maritime Environment", Proc Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoelectrónica, Vila Velha, Brazil, August, 2010.
17. P. S. André, A. M. Rocha, F. Domingues, A. Martins, "Thermal model for optical fiber coating under tight bending diameters", *In* 15th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2010), Japan, July 2010.
18. M. Fátima F. Domingues, Ana M. Rocha, André Martins, P.S.André, "Effect of contaminants in optical fibre connectors under high power", *In* 15th European Conference on Networks and Optical Communications (NOC/OC&I 2010), Faro, Portugal, June 2010.

Outras publicações

1. Rocha, Ana Maria, Fátima Domingues, Margarida Facão, António Teixeira, Mário Lima, Rogério Nogueira, Marta Ferreira, and Paulo André. "Degradação de fibras ópticas devido à propagação de sinais de elevada intensidade." *Electrónica e Telecomunicações* 5, no. 3, 324-330, 2013.

Referências

- [1] G. S. Glaesemann, P. Dainese, M. Edwards and J. Dhliwayo, "The Mechanical Reliability of Corning Optical Fiber in small Bend Scenarios", Corning White Paper, December, 2007.
- [2] P. Matthijsse and W. Griffioen, "Matching optical fiber lifetime and bend-loss limits for optimized local loop fiber storage", *Optical Fiber Technology*, V. 11, Issue 1, Pages 92-99, 2005.
- [3] A. Méndez and T. F. Morse, "Specialty Optical Fibers Handbook", Chapter 4, pp. 95-122, Elsevier Inc., 2007.
- [4] J. L. Armstrong, M. J. Matthewson, M. G. Juarez, C. Y. Chou, "Effect of diffusion rates in optical fiber polymer coatings on aging", *Proc. SPIE*, Vol. 3848, 62-69, 1999.
- [5] R. El Abdi, A. D. Rujinski, M. Poulain, I. Severin, "Damage of Optical Fibers Under Wet Environments", *Experimental Mechanics*, 2009.
- [6] E. A. Lindholm, J. Li, A. Hokansson, B. Slyman, D. Burgess "Aging behavior of optical fibers in aqueous environments", *Proceedings of the SPIE*, V. 5465, pp. 25-32, 2004.
- [7] V. M. Thirtha, M. J. Matthewson, C. R. Kurkjian, K. C. Yoon, J. S. Yoon, C. Y. Moon, "Effect of secondary coating on the fatigue and aging of fused-silica fibers"; *Proc. SPIE* Vol. 4639, p. 75-81, 2002.
- [8] M. Granada, F. Domingues, P.S. Andre, " Aging Behavior of Optical Fibers Coatings in Maritime Environment", *Proc Symp. on Enabling Optical Networks - SEON*, Porto, Portugal, 2010.
- [9] P. S. Andre, F. Domingues, M. Granada, M. Ferreira, "Impact of the maritime environment on the aging of optical fibers," *Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2011 Conference on , vol., no., pp.1-2, 1-6, 2011.
- [10] F. Domingues, P.S. André and M. Granada, "Optical fibres coating aging induced by the maritime environment". *J. Microw. Optoelectron. Electromagn.*, vol.10, n.1, pp. 259-265, 2011.
- [11] M. Li, P. Tandon, D. Bookbinder, S. Bickham, M. McDermott, R. Desorcie, D. Nolan, J. Johnson, K. Lewis, and J. Englebert, "Ultra-Low Bending Loss Single-Mode Fiber for FTTH," *J. Lightwave Technol.* 27, 376-382, 2009.
- [12] J. Fini, P. Borel, P. Weimann, P. Kristensen, J. Bjerregaard, K. Carlson, M. Yan, P. Wisk, S. Ramachandran, A. Yablon, D. DiGiovanni, D. Trevor, C. Martin, and A. McCurdy, "Bend Insensitive Fiber for FTTX Applications," in *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference*, OSA Technical Digest, 2009.
- [13] P. Watekar, S. Ju, and W. Han, "Near zero bending loss in a double-trenched bend insensitive optical fiber at 1550 nm," *Opt. Express* 17, 20155-20166, 2009.
- [14] Gerard Kuyt, et al., "The Impact of New Bend-insensitive Single Mode Fibers on FTTH Connectivity and Cable Designs", *proceedings of the 56th IWCS*, 2007.
- [15] Ming-Jun Li and Daniel A. Nolan, "Optical Transmission Fiber Design Evolution", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 26, Issue 9, pp. 1079-1092, 2008.

- [16] P.S. André, A.M. Rocha, F. Domingues and A. Martins, "Improved thermal model for optical fibre coating owing to small bending diameter and high power signals", *ELECTRONICS LETTERS*, Vol. 46 No. 10, 2010.
- [17] P.S. André et al., "Optical Fibers Bending Limits for the Optical Fiber Infrastructures", *Proc IEEE AFRICON Conf. in Africa, Nairobi, Kenya, 2009*.
- [18] F. Domingues, A. M. Rocha, P.S. André, "Failure Probability of Optical Fiber under High Optical Power and Small Bend Diameters", *Proc International Microwave and Optoelectronics Conf. - IMOC, Natal, Brazil, 2011*.
- [19] R. Kashyap and K. J. Blow, "Spectacular demonstration of catastrophic failure in long lengths of optical fiber via self-propelled self-focusing," Post deadline paper PD7, 8th National Quantum Electronics Conf., QE8, St. Andrews, Scotland, UK, 1987.
- [20] R. Kashyap, "The Fiber Fuse - from a curious effect to a critical issue: A 25th year retrospective," *Opt. Express* 21, 6422-6441, 2013.
- [21] Rocha, Ana M., F. Domingues, M. Facão, and P. S. André. "Threshold power of fiber fuse effect for different types of optical fiber", *In 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1-3. IEEE, 2011.
- [22] P. S. André, M. Facao, A. M. Rocha, P. Antunes, A. Martins, "Evaluation of the fuse effect propagation in networks infrastructures with different types of fibers", *Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)*, pp.1-3, 2010.
- [23] Todoroki, Shin-ichi. "Fiber fuse propagation behavior." *Selected Topics on Optical Fiber Technology*, ed. Y. Moh, SW Harun, and H. Arof, 551-570, (2012).
- [24] Todoroki, Shin-ichi. "Fiber Fuse: Light-Induced Continuous Breakdown of Silica Glass Optical Fiber", Springer, 2014.
- [25] K. Seo, N. Nishimura, M. Shiino, R. Yuguchi, H. Sasaki, "Evaluation of High-power Endurance in Optical Fiber Links", *Furukawa Review* 24, 17-22 (2003).
- [26] M. De Rosa, J. Carberry, V. Bhagavatula, K. Wagner, and C. Saravanos, "High-Power Performance of Single-Mode Fiber-Optic Connectors", *J. of Lightwave Technology* 20, 879-885, 2002.
- [27] F. Domingues, A. M. Rocha, A. Martins, P.S. André, "Effect of contaminants in optical fibre connectors under high power", *proceedings of the 15th European Conference on Networks and Optical Communications (NOC/OC&I 2010)*, Faro, Portugal, 2010.
- [28] F. Domingues, A. M. Rocha, A. Martins, P. S. André "Contaminated Connectors Behavior under High Optical Power", *Proc. of Symposium on Enabling Optical Networks*, Portugal, 2010.
- [29] B. H. Lee, Y. H. Kim, K. S. Park, J. B. Eom, M. J. Kim, B. S. Rho, and H. Y. Choi, "Interferometric Fiber Optic Sensors," *Sensors*, vol. 12, pp. 2467-2486, 2012.

- [30] C. R. Liao, T. Y. Hu, and D. N. Wang, "Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser micromachining and fusion splicing for refractive index sensing," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 22813-22818, 2012.
- [31] T. Zhu, D. Wu, M. Liu, and D.-W. Duan, "In-Line Fiber Optic Interferometric Sensors in Single-Mode Fibers," *Sensors*, vol. 12, pp. 10430-10449, 2012.
- [32] J. M. Lopez-Higuera, L. Rodriguez Cobo, A. Quintela Incera, and A. Cobo, "Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 29, pp. 587-608, 2011.
- [33] N. Basumallick, I. Chatterjee, P. Biswas, K. Dasgupta, and S. Bandyopadhyay, "Fiber Bragg grating accelerometer with enhanced sensitivity," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 173, pp. 108-115, 2012.
- [34] C. Leitão, L. Bilro, N. Alberto, P. Antunes, H. Lima, P. S. André, R. Nogueira, and J. L. Pinto, "Feasibility studies of Bragg probe for noninvasive carotid pulse waveform assessment," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 18, pp. 017006-017006, 2013.
- [35] V. Mishra, N. Singh, U. Tiwari, and P. Kapur, "Fiber grating sensors in medicine: Current and emerging applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 167, pp. 279-290, 2011.
- [36] Z. Ran, C. Li, H. Zuo, and Y. Chen, "Laser-Machined Cascaded Micro Cavities for Simultaneous Measurement of Dual Parameters Under High Temperature," *Sensors Journal, IEEE*, vol. PP, pp. 1-1, 2013.
- [37] Favero, F. C., L. Araujo, G. Bouwmans, V. Finazzi, J. Villatoro, and V. Pruneri. "Spheroidal Fabry-Perot microcavities in optical fibers for high-sensitivity sensing." *Optics express* 20, no. 7, 7112-7118, 2012.
- [38] Wu, Di, Tao Zhu, Guo-Yin Wang, Jian-Yu Fu, Xiao-Guang Lin, and Guang-Lei Gou. "Intrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometer based on arc discharge and single-mode fiber." *Applied optics* 52, no. 12, 2670-2675, 2013.
- [39] Yu, Qingxu, and Xinlei Zhou. "Pressure sensor based on the fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer." *Photonic Sensors* 1, no. 1, 72-83, 2011.
- [40] Duan, De-Wen, Yun-jiang Rao, Yu-Song Hou, and Tao Zhu. "Microbubble based fiber-optic Fabry-Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement." *Applied optics* 51, no. 8, 1033-1036, 2012.
- [41] Zhang, Yinan, Lei Yuan, Xinwei Lan, Amardeep Kaur, Jie Huang, and Hai Xiao. "High-temperature fiber-optic Fabry-Perot interferometric pressure sensor fabricated by femtosecond laser." *Optics letters* 38, no. 22, 4609-4612, 2013.
- [42] Domingues, F.; Rocha, Ana M.; Antunes, P.; André, P.S; "Evaluation of the fuse effect propagation velocity in bend loss insensitive fibers", Proc Optoelectronics and Communications Conf. - OECC, Busan, Korea, South, Vol. 17, pp. 799 - 800, 2012.

- [43] Domingues, F.; R Frias; Antunes, P.; Sousa, A.; M.R. Ferreira; André, P.S; "Observation of fuse effect discharge zone nonlinear velocity regime in erbium-doped fibres", *Electronics Letters*, Vol. 48, No. 20, pp. 1295 - 1296, 2012.
- [44] Domingues, F.; Rocha, Ana M.; André, P.S; R Frias; M.R. Ferreira; "Temperature Monitoring of Bend Insensitive Fibers After the Fuse Effect Propagation", *Proc Optical Fiber Sensors Conf.*, Monterey, United States, Vol. STu1F, pp. STu1F.4 - STu1F.4, 2012.
- [45] Domingues, F.; Rocha, Ana M.; R Frias; André, P.S; "Evaluation of the temperature increase on the fiber fuse effect end point", *Proc International Conf. on Transparent Optical Networks - ICTON*, Coventry, United Kingdom, Vol. 14, pp. 1 - 3, 2012.
- [46] Domingues, F.; Rocha, Ana M.; André, P.S; "High-power effects in damaged and contaminated optical fiber connectors", *Microwave and Optical Tech. Letters*, Vol. 53, No. 11, pp. 2485 - 2488, 2011.
- [47] Paulo S. André ; M. F. Domingues ; Paulo Antunes ; Nélia Alberto ; Ana Rita Frias ; R. A. S. Ferreira; "Sensors based on recycled optical fibers destroyed by the catastrophic fuse effect", *Proc. SPIE 9286*, Second International Conference on Applications of Optics and Photonics, 92862, 2014.
- [48] Domingues, M. Fátima, Paulo Antunes, Nélia Alberto, Rita Frias, Rute AS Ferreira, and Paulo André, "Optical strain sensor based on FPI micro-cavities produced by the fiber fuse effect", In *OFS2014 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors*, pp. 91571Q-91571Q. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [49] Antunes, P.F.C.; Domingues, M.F.F.; Alberto, N.J.; Andre, P.S., "Optical Fiber Microcavity Strain Sensors Produced by the Catastrophic Fuse Effect," *Photonics Technology Letters, IEEE* , vol.26, no.1, pp.78,81, Jan.1, 2014.
- [50] Domingues, Fátima, Paulo Antunes, Nelia Alberto, and Paulo S. Andre, "Refractive Index Sensor Based on Optical Fiber Void Cavities Produced by the Catastrophic Fuse Effect", In *Optical Sensors*, pp. SM4C-3. Optical Society of America, 2013.

Capítulo 2

Degradação de fibras óticas

2.1 Contextualização

Nos últimos anos, a inovação relativa às tecnologias óticas fizeram da aplicação FTTH uma realidade, sendo que, atualmente, o novo objetivo é o desenvolvimento e disseminação de novos e aperfeiçoados sistemas FTTH. Com o intuito de contribuir para esse desenvolvimento, esta secção do trabalho centrou-se no estudo do impacte das condições ambientais na degradação do tempo de vida das fibras óticas. Assim, pretende-se, estudar o impacte resultante da utilização de fibras óticas em ambientes adversos de temperatura, humidade, presença de elementos externos (tal como NaCl).

O generalizado uso de fibra ótica em telecomunicações não teria sido tão amplamente aplicável sem a proteção e robustez fornecida pelos revestimentos de fibra ótica. Neste âmbito, várias considerações têm sido feitas relativamente aos requisitos necessários para um bom revestimento de fibra ótica, sendo que as considerações atuais ditam que sejam de espessura constante, resistentes à abrasão e retardantes da humidade [1,2]. Para além destas características é sobretudo necessário que os revestimentos aplicados sejam resistentes à fadiga e ofereçam uma proteção eficaz a micro-curvaturas [3,4]. Assim, a possibilidade de implementação de novos

revestimentos tem sido estudada com o objetivo de melhorar as características e propriedades da fibra, para que estas sejam o mais adequadas possível para aplicação em FTTH, baixando o custo de instalação e melhorando o desempenho do sistema.

Torna-se portanto necessário estudar exaustivamente os parâmetros que influenciam em primeira análise o desempenho ótico da fibra, mas também todos aqueles que possam contribuir para a sua degradação física e conseqüente degradação ótica.

2.2 Influência de ambientes marítimos na fibra ótica

O uso generalizado de fibras óticas em telecomunicações e como sistemas de sensoriamento é, nos dias de hoje, uma realidade bem implementada. No entanto, a sua aplicação em ambientes mais agressivos, onde a fibra está exposta a vários agentes de degradação, pode implicar uma deterioração da sua integridade física e, portanto, do desempenho de todo o sistema [5]. É do conhecimento comum que os revestimentos de fibras óticas oferecem uma proteção robusta contra a abrasão e a humidade e, por conseguinte, contribui para preservar as características da fibra durante o seu tempo de vida. No entanto, os revestimentos de fibras óticas também sofrem a influência de ambientes agressivos [1,2,5]. Apesar da proteção proporcionada pelos revestimentos de acrilato, a fibra ótica é permeável a água [5], uma vez que é capaz de reter os grupos hidroxilo (OH) a partir de moléculas de água [6]. Além disso, a difusão de iões através do revestimento, ou outros materiais para além da água, é um fator que controla a degradação da resistência da fibra durante o processo de envelhecimento [7]. Assim, é evidente que o comportamento da resistência das fibras ao envelhecimento não é só proporcional à humidade, como relatado na referência [8], mas está também relacionada com a taxa de difusão de iões através do revestimento [9]. Quando as instalações são efetuadas em ambientes onde a humidade é elevada, as fibras ficam sujeitas à degradação provocada por tais condições agressivas [10]. Para melhor entender o processo de degradação da fibra quando colocada em ambientes de elevada humidade, foi implementada uma metodologia para proceder ao envelhecimento da fibra, simulando o efeito dos ambientes marítimos (extremamente abrasivos devido não só à elevada humidade mas também à concentração de cloreto de sódio).

2.2.1 Processo de envelhecimento da fibra

Para estudar o efeito do ambiente marítimo no envelhecimento de revestimentos de fibra ótica, amostras de 20 cm de comprimento de fibra SMF-28e-Corning, foram imersas em soluções aquosas de cloreto de sódio (NaCl) à temperatura ambiente, com as seguintes concentrações: 35, 100 e 250 g.L⁻¹. As fibras testadas têm um diâmetro de bainha de 125 µm, d_f , e um diâmetro total de revestimento, d_c , de 250 µm.

As amostras em estudo foram posteriormente removidas da solução de NaCl, após diferentes períodos de envelhecimento, e secas à temperatura ambiente durante 24 horas. Após este procedimento a sua tensão de rutura foi medida. Para tal, a fibra envelhecida é sujeita a uma

tensão dinâmica, e calculada a sua tensão de rutura [11,12]. Para realizar esta caracterização foi implementado um método de flexão, de acordo com a configuração experimental representada na Figura 2.1 [2]:

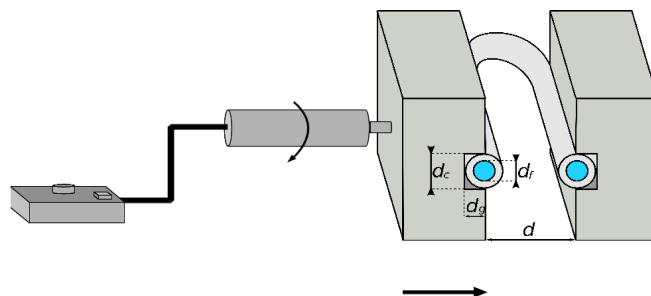


Figura 2.1- Esquema do aparato experimental implementado para a análise da resistência física da fibra.

A opção pela aplicação deste método resulta da ductilidade das amostras. O aparato experimental é composto por um conjunto de placas (uma móvel, e outra fixa), ambas com fendas para manter fixa a fibra durante o processo de medição. A fibra em teste é colocada entre as placas, como representado na Figura 2.1, com uma distância inicial entre as placas de 20 mm. Posteriormente, a placa móvel, controlável por um motor de translação elétrico (Newport, modelo 861), permite diminuir a distância entre as duas placas a uma velocidade de 0.55 mm/s, até que se verifique a rutura da fibra. Após a rutura, a distância entre as placas, d , é medida e correlacionada com a tensão de rutura da fibra, através de [5]:

$$\sigma = E_0 \varepsilon \left(1 + \frac{1}{2} \alpha \varepsilon \right) \quad (2.1)$$

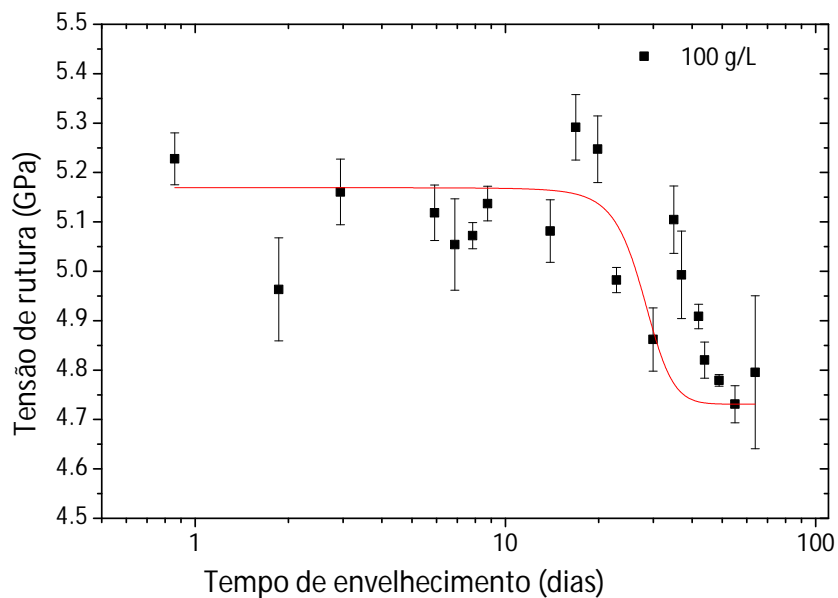
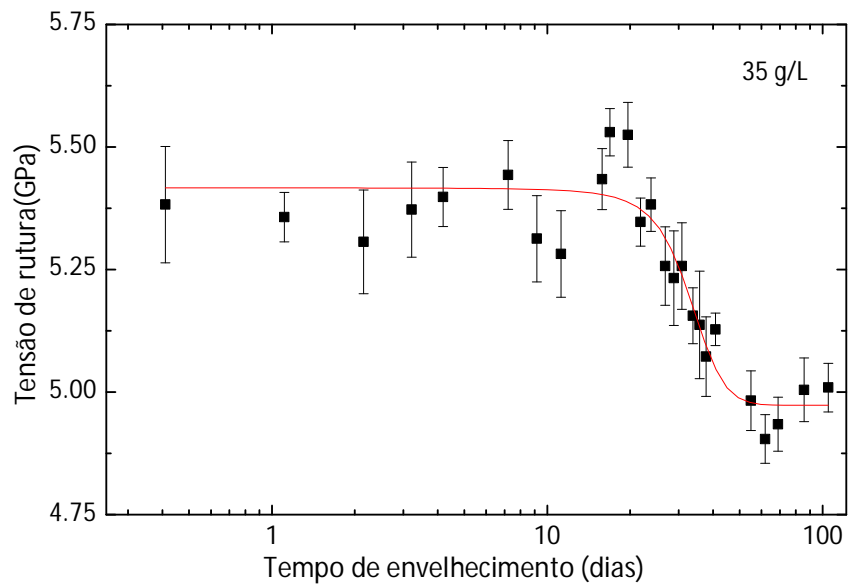
onde σ é a tensão aplicada à fibra, E_0 é o módulo de Young da fibra, ε é a deformação a que a fibra é sujeita, e α é um parâmetro elástico não linear que assume o valor de $\alpha = 19/4$ para uma fibra ótica [11]. Uma vez que o módulo de Young da sílica é mais elevado do que do revestimento, este foi negligenciado na aproximação efetuada. Assim, a deformação na fibra, ε , é dada por [5]:

$$\varepsilon = 1.198 \left[\frac{d_f}{d - d_c + 2d_g} \right] \quad (2.2)$$

onde, d a distância entre as placas e d_g é a profundidade das duas fendas de fixação da fibra.

Assim, através da medição da distância entre placas e com base na aplicação das equações (2.1) e (2.2), é possível obter a tensão aplicada na fibra no momento de fratura. Este procedimento foi executado em amostras submetidas a degradação/envelhecimento em diferentes concentrações

de NaCl, mas também para diferentes períodos de envelhecimento. Para cada amostra a média do valor de tensão foi calculada para cinco amostras idênticas. Na Figura 2.2, está representado o comportamento da tensão de rutura da fibra em função do tempo de envelhecimento nas soluções de NaCl. De ressaltar, que a concentração 35 g.L⁻¹ corresponde ao valor médio de concentração de NaCl passível de ser encontrado na água do mar.



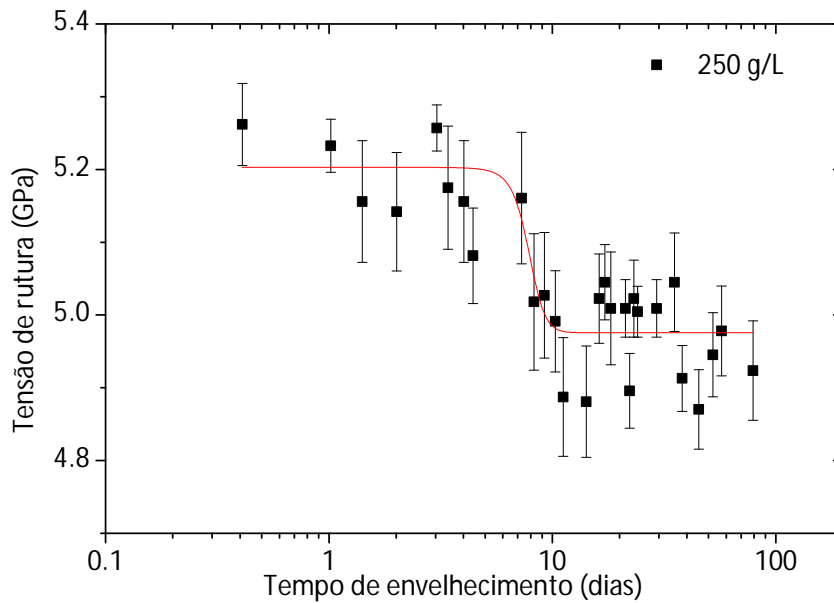


Figura 2.2- Tensão de rutura em função do tempo de exposição da fibra em soluções com diferentes concentrações de NaCl. A linha corresponde ao ajuste teórico à função de Boltzmann.

As fibras envelhecidas apresentaram uma transição abrupta na resistência (transição de fadiga) da fibra em função do tempo de envelhecimento [12]. Este fenómeno está estritamente relacionado com a transferência de iões/moléculas a partir do meio em que a fibra é imersa para o interior da fibra. Em tal situação, os iões ou moléculas presentes no meio aquoso infiltram-se na fibra através dos canais criados no acrilato, atingindo a sílica e danificando-a na reação decorrente [13]. Isto implica que, quanto maior a taxa de difusão de iões mais rápido se verificará a região de transição de fadiga da sílica [14]. Na análise dos dados recolhidos, apresentados na Figura 2.2, a transição de fadiga torna-se evidente. Este comportamento representa a diminuição repentina da resistência da fibra ótica e a sua transição para um regime de degradação, afetando o tempo de vida e a fiabilidade da fibra ótica. Um comportamento semelhante também foi observado para os dados recolhidos para as fibras envelhecidas em concentrações diferentes, 100 e 250 g.L⁻¹.

Os dados experimentais obtidos para a diminuição da tensão da fibra ao longo do tempo de envelhecimento foi ajustado a uma função de Boltzmann, dada por:

$$\sigma = \frac{(\sigma_0 - \sigma_1)}{1 + e^{\left(\frac{t_{dg} - x_0}{d_x}\right)}} + \sigma_1 \quad (2.3)$$

Os parâmetros σ_0 e σ_1 são respetivamente, o limite superior e inferior da tensão de rutura na fibra. O parâmetro x_0 representa o tempo de transição de fadiga, d_x é o declive de transição e t_{dg}

representa o tempo de degradação da fibra. O ajuste efetuado à expressão (2.3) é também apresentado na Figura 2.2. Deste ajuste, verificamos que o período de transição (x_0) é de 29.05 ± 2.46 dias para uma concentração de 35 g.L^{-1} [11]. Os dados obtidos para as diferentes concentrações são apresentados na Figura 2.3. Quando comparamos o período de transição entre as diversas concentrações em estudo verificamos que o período de transição tem um ritmo de degradação de $0.1174 \text{ dias}/(\text{g.L}^{-1})$.

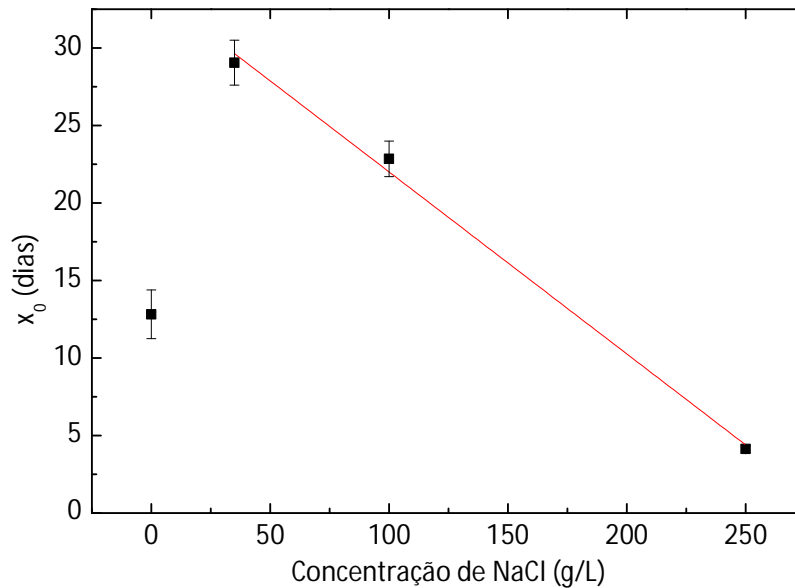


Figura 2.3- Decaimento do tempo de transição de fadiga em função da concentração NaCl. Os pontos correspondem aos dados experimentais e a linha ao ajuste linear ($r^2 > 0.99$)

Nesta representação, torna-se evidente que com exceção de fibras envelhecidas em água pura, o tempo de transição diminui com a concentração de NaCl. Isto significa que quanto maior for a concentração de NaCl, mais cedo ocorrerá a região de transição de fadiga, como já referido anteriormente. A exceção verificada para a concentração de 0 g/L , pode ser explicada se considerarmos as dimensões e a solubilidade dos iões Na^+ e Cl^- no revestimento da fibra. Podemos assim assumir que dois mecanismos podem ser responsáveis pela degradação do revestimento, um referente à água e o outro aos iões Na^+ e Cl^- . Estes iões têm um raio superior ao das moléculas de água e assim, num regime de baixas concentrações o fator dominante de degradação é a água.

Em concentrações mais elevadas de NaCl, os iões Na^+ e Cl^- bloqueiam os canais utilizados pela água para se infiltrar no revestimento até atingir a sílica, e para os respectivos produtos dessa reação (água+sílica) serem removidos do interior da fibra, diminuindo assim a velocidade de reação [11]. Contudo, na presença de elevadas concentrações de NaCl a degradação do

revestimento aumenta e este mecanismo de bloqueio torna-se ineficaz para as moléculas de água.

Na análise dos parâmetros de declive de transição, podemos observar que este diminui exponencialmente com o aumento da concentração de NaCl, indicando um decréscimo na região de transição, Figura 2.4. Este comportamento indica que com o aumento da concentração de NaCl a região de transição torna-se mais acentuada. Assim, é possível afirmar que a água, bem como os iões Na^+ e Cl^- têm também um efeito de degradação conjunta no polímero de proteção.

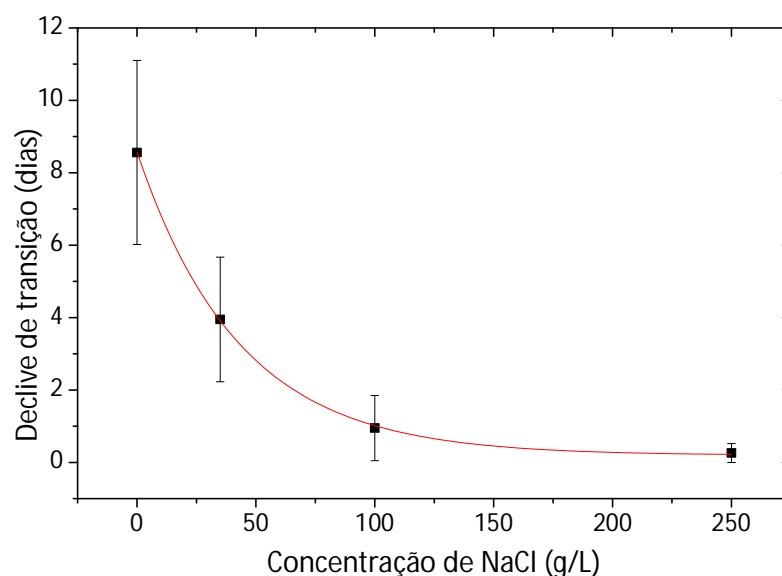


Figura 2.4- Declive de transição para as fibras envelhecidas em diferentes concentrações de NaCl. Os pontos correspondem aos dados experimentais e a linha ao ajuste teórico.

Para complementar os ensaios mecânicos, as amostras de fibra ótica foram analisadas microscopicamente. Na Figura 2.5 são apresentadas as imagens obtidas por microscopia ótica de transmissão (BH2 Olympus e da câmera digital Sony DKC-CM30), para fibras degradadas em uma solução aquosa de NaCl 35 g.L⁻¹ durante, a) 31 dias e b) 105 dias.

Nestas imagens podemos ver a diferença na transparência do polímero de revestimento, como consequência da sua degradação

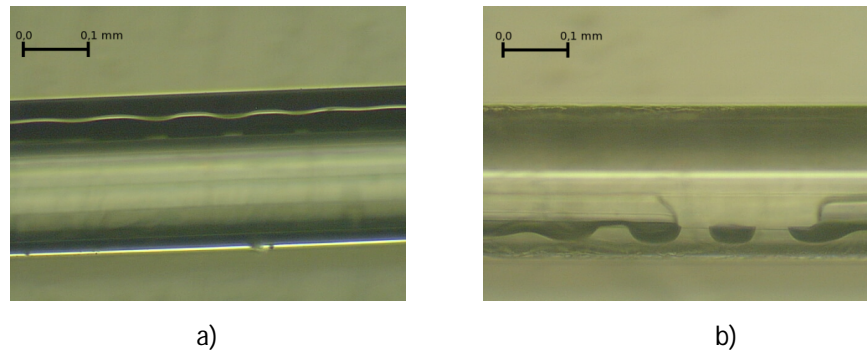


Figura 2.5- Imagens de microscopia recolhidas para a fibra ótica após um período de, a) 31 dias e b) 105 dias, numa solução aquosa de 35 g/L de NaCl.

A condição final da fibra foi também estudada através de uma análise de microscopia eletrónica de varrimento (SEM) (SU-70 sistema Hitachi). Na Figura 2.6- a) e b) são apresentados alguns resultados dessas análise para as amostras expostas a uma concentração de 250 g.L^{-1} durante 17 dias. Na Figura 2.6- c), é apresentada imagem de uma amostra com um período de envelhecimento de 61 dias em um de solução de NaCl 35 g.L^{-1} . A imagem na Figura 2.6- d) corresponde à microscopia de uma fibra sem envelhecimento.

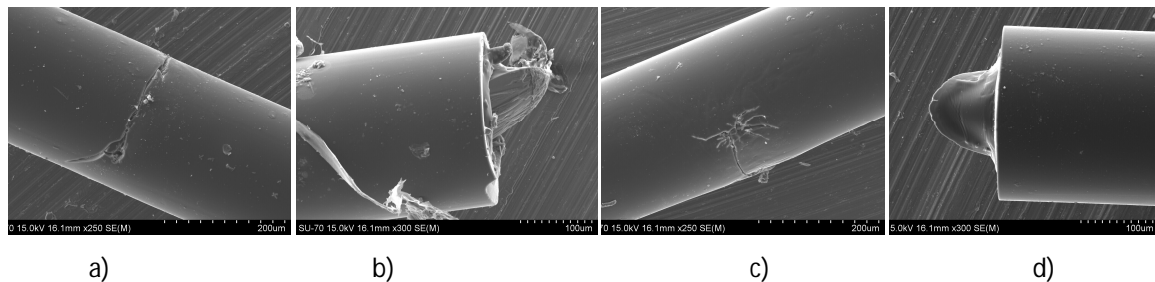


Figura 2.6- Imagens SEM par a fibra exposta a) e b) 17 dias a uma solução aquosa de 250 g.L^{-1} de NaCl, c) 61 dias em uma solução 35 g.L^{-1} . e d) Sem exposição a soluções aquosas,

A partir destas imagens, torna-se visível o efeito abrasivo das soluções no revestimento de fibra, uma vez que se tornam evidentes as falhas na superfície do revestimento, através das quais as moléculas de água e iões Na^+ e Cl^- se podem infiltrar até atingir a sílica. Na imagem obtida para o ponto de rutura da fibra sujeita a envelhecimento e para uma não envelhecida é possível ver as diferenças no perfil interior. A fibra não envelhecida apresenta um perfil uniforme, enquanto que a fibra envelhecida apresenta vários relevos no seu interior. Este facto é também um indicador de que a solução de NaCl aumenta a permeabilidade dos revestimentos da fibra ótica, facilitando a difusão da solução aquosa na sílica, diminuindo a sua resistência mecânica [11].

2.2.2 Tempo de vida útil da fibra ótica

A probabilidade de fratura no material aumenta com o número de falhas e com a sua dimensão [15]. Assim, a partir da probabilidade de falha das diferentes amostras, envelhecidas durante diferentes períodos de tempo reais, pode-se obter a informação relativa ao número de falhas nas amostras. Para estudar a relação entre a probabilidade de falha de fibra, F , com a tensão aplicada, σ , foi utilizada uma análise estatística, com base na lei de Weibull, dada por[15]:

$$\ln \left[\ln \left\{ \frac{1}{1-F} \right\} \right] = m[\ln(\sigma) - \ln(\sigma_0)] \quad (2.4)$$

o primeiro termo da equação (2.4) representa a probabilidade de falhas cumulativa Os parâmetros σ_0 e m são constantes, sendo m também referido como o declive de Weibull. Na Figura 2.7 é representada a probabilidade de falha cumulativa de fibras sem degradação e fibras envelhecidas numa solução 35 g.L⁻¹ de NaCl por diversos períodos de tempo.

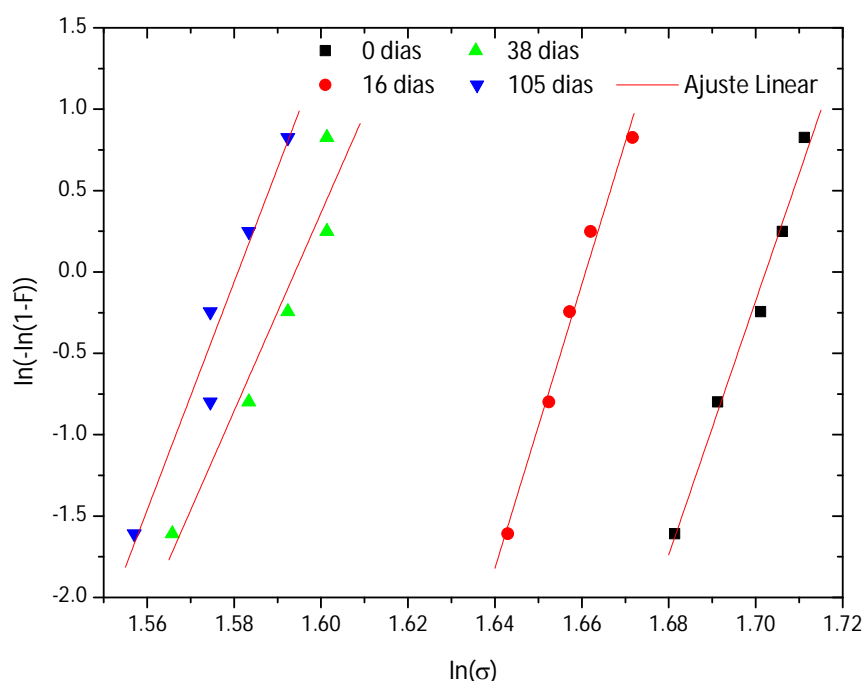


Figura 2.7- Distribuição de Weibull para diferentes períodos de envelhecimento numa solução aquosa de NaCl com uma concentração de 35 g.L⁻¹.

É possível verificar que, quanto maior o período de envelhecimento, mais baixa é a tensão necessária para fraturar a fibra, como já constatado anteriormente. Os valores do ajuste linear são apresentados na Tabela 2.1:

Tabela 2.1- Valores de ajuste

Tempo (dias)	m	σ_0 (GPa)
0	78.06±5.34	0.18±0.04
16	87.32±5.91	0.19±0.04
38	60.93±9.46	0.20±0.10
105	70.05±9.23	0.21±0.08

Também para as fibras envelhecidas em diferentes concentrações de NaCl, com iguais períodos de envelhecimento, foi efetuado uma análise estatística de Weibull, Figura 2.8. Nesta análise torna-se evidente que, quanto maior a concentração de NaCl, mais baixa é a tensão necessária para a rutura ocorrer.

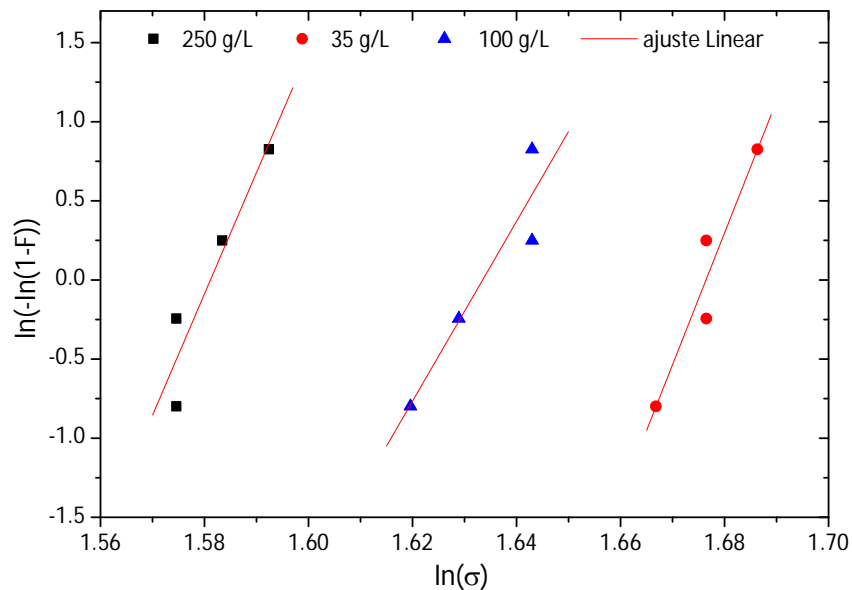


Figura 2.8. Distribuição de Weibull para fibras envelhecidas durante 16 dias em soluções aquosas com diferentes concentrações de NaCl.

Os parâmetros de ajuste obtidos são apresentados na Tabela 2.2.

Estes resultados vão de encontro ao descrito anteriormente, face a à análise das tensões de rutura obtida para as diferentes condições de envelhecimento. Estes servirão de base para quantificar a influência de ambientes mais agressivos no tempo de vida da fibra ótica.

Tabela 2.2 - Valores de ajuste

Concentração (g.L ⁻¹)	m	σ_0
250	76.71±19.28	0.21±0.16
100	83.29±17.91	0.19±0.13
35	56.82±14.51	0.20±0.16

Para descrever o processo de fadiga numa fibra, quando inserida num ambiente hostil, o seguinte modelo exponencial pode ser utilizado [16,17]:

$$\frac{dc}{dt} = B e^{n \frac{K_I}{K_{IC}}} \quad (2.5)$$

sendo dc/dt o ritmo de crescimento das falhas, indicando também o ritmo de degradação da fibra. Os valores K_i e K_{ic} são respetivamente o fator de intensidade de fadiga e o fator de intensidade de fadiga crítico. O valor de $K_i=K_{ic}$ corresponde ao ponto de falha da fibra, e assim, neste estudo assumimos que $K_i/K_{ic}=1$, uma vez que se verificou a rutura de todas as fibras em teste [16, 18]. Para a estimativa do valor de n , utilizou-se o valor de $B= 1.3 \times 10^{-8} \text{ GPa}^2 \cdot \text{s}$, como descrito na literatura [19].

A curva de envelhecimento obtida inicialmente (tensão de rutura em função do tempo de degradação) pode ser ajustada a uma função exponencial do tipo [20]:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t_{dg} \frac{dc}{dt}} \quad (2.6)$$

sendo σ a tensão de rutura, t_{dg} , tempo de envelhecimento, σ_0 o valor inicial da tensão de rutura e dc/dt o ritmo de degradação da fibra. Desta análise podemos retirar o valor para o ritmo de degradação correspondente aos diferentes tempos de envelhecimento. Este valor é posteriormente utilizado para o cálculo do parâmetro de corrosão, n . Assim, através das equações (2.5) e (2.6) é possível estimar o valor do parâmetro de corrosão, n , para os diferentes tempos de envelhecimento da fibra:

$$n = \ln\left[\left(\frac{1}{B}\right) \left(-\frac{1}{t_{dg}}\right) \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)\right] \quad (2.7)$$

Na Figura 2.9 são apresentados os valores obtidos para o decaimento do parâmetro de corrosão de acordo com os diferentes tempos de degradação.

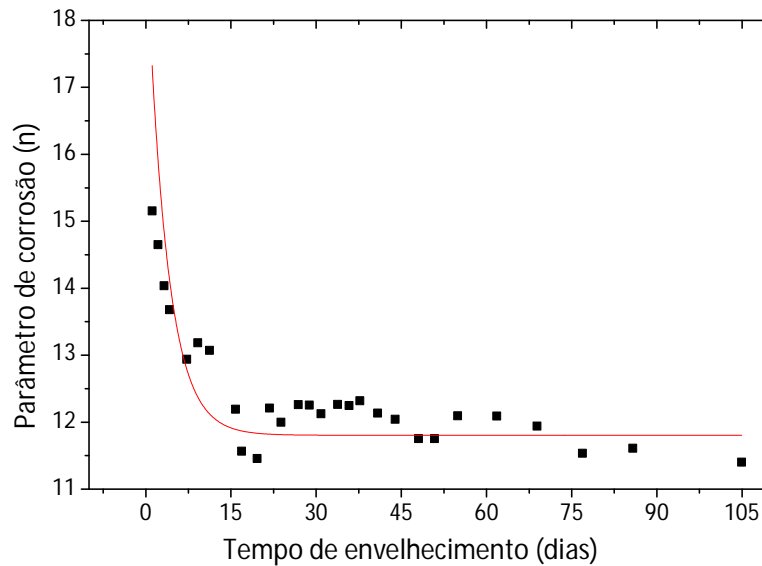


Figura 2.9- Decaimento do parâmetro de corrosão em função do tempo de envelhecimento. Os pontos correspondem aos dados experimentais; a linha corresponde ao ajuste teórico efetuado.

É visível que o parâmetro de corrosão tende para um valor limite (~ 11.5), a partir do qual, a degradação o tempo de vida da fibra será mínimo.

A previsão do tempo de vida de uma fibra deve ser efetuada tendo em especial atenção o parâmetro de corrosão da fibra, n , que caracteriza a capacidade do material de resistir à tensão aplicada; e o parâmetro de fator ambiental, B , relativo ao ambiente em que a fibra se encontra [16,17]. Assim, a previsão do tempo de vida de uma fibra pode ser efetuada através de seguinte equação [21]:

$$t_f = \frac{\sigma_a^{n+1}}{n+1} F^{\frac{n+1}{m}} \sigma_a^{-n} \quad (2.8)$$

onde t_f é o tempo de vida previsto para uma probabilidade de falha F sobre uma tensão aplicada durante o tempo de serviço σ_a , σ é a tensão de rutura e m corresponde ao declive de Weibull. De notar que, nesta equação, o parâmetro de maior influência no tempo de vida da fibra é o parâmetro de corrosão, n , que descreve o ritmo de degradação da fibra.

Em relação à estimativa de tempo de vida, na Tabela 2.3, é apresentado um resumo dos valores obtidos nesta aproximação para as fibras envelhecidas por 16, 38 e 105 dias, em uma solução de

35 g.L⁻¹. É possível notar uma diminuição no tempo de vida da fibra (estimada em 20 anos para as fibras não envelhecidas).

Tabela 2.3- Estimativa do tempo de vida para fibras envelhecidas numa solução 35g.L⁻¹ de NaCl.

Tempo de envelhecimento (dias)	σ (GPa)	n	Tempo de vida (anos)
16	5.17	11.89	9.37
38	4.77	11.81	8.08
105	4.74	11.80	6.65

2.3 Conclusão

Nesta secção foi apresentado o estudo efetuado ao impacto de ambientes marítimos, em particular o efeito de cloreto de sódio, no envelhecimento do revestimento de fibra ótica. Neste âmbito, na análise da tensão de rutura em função do tempo de envelhecimento foi possível verificar que, depois de algum período de envelhecimento sem que se note um decréscimo abrupto, é observável um aumento repentino na diminuição da tensão de rutura. Com base nos dados recolhidos, foi possível correlacionar a região de transição observada na tensão da rutura de fibra, com a concentração e tempo de exposição a uma solução aquosa de NaCl, verificando-se que, quanto maior a concentração de NaCl da solução, menor é a tensão necessária para a fratura da fibra. Perante o comportamento da fibra foi também estimado o tempo de vida para fibras sujeitas a semelhantes ambientes agressivos, verificando-se que, para uma solução de NaCl com concentração de 35g.L^{-1} , (semelhante à concentração de NaCl presente no oceano), o tempo de vida da fibra pode ser diminuído de 20 para 9 anos, considerando um tempo de degradação de 16 dias, mas num cenário mais dramático, o seu tempo de vida poderá ser reduzido até 6 anos.

A fibra envelhecida foi também analisada por microscopia ótica e SEM, através das quais foi possível identificar alguns defeitos ao longo do revestimento induzidos pelo envelhecimento da fibra. Estas imperfeições na fibra permitem a infiltração dos elementos externos na sílica, o que contribui para a redução da sua resistência.

Referências

- [1]. Alexis Méndez and T. F. Morse, "Specialty Optical Fibers Handbook", Chapter 4, pp. 95-122, Elsevier Inc., 2007.
- [2]. P.S. André, F. Domingues, M. Granada, "Impact of the Maritime Environment on the Aging of Optical Fibers", proceedings of CLEO2011: Laser Science to Photonic Applications, Baltimore, USA, 2011.
- [3]. P. S. André, A. M. Rocha, F. Domingues and A. Martins, "Improved model for coating heating by high power signals optical fiber under small bending diameters", Electron. Lett, vol.46, n°10, 2010.
- [4]. Pieter Matthijsse and Willem Griffioen, "Matching optical fiber lifetime and bend-loss limits for optimized local loop fiber storage", Optical Fiber Technology, vol. 11, Issue 1, pp. 92-99, 2005.
- [5]. R. El Abdi, A.D. Rujinski, M. Poulain, I. Severin, "Damage of optical fibers under wet environments", Experimental Mechanics, 2009.
- [6]. Stephanie Berger, Minoru Tomozawa, "Water diffusion into a silica glass optical fiber", Journal of Non-Crystalline Solids, V.324, pp.256-263, 2003.
- [7]. Eric A. Lindholm, Jie Li, Adam Hokansson, Brian Slyman, David Burgess "Aging behavior of optical fibers in aqueous environments", Proceedings of the SPIE, V. 5465, pp. 25-32, 2004.
- [8]. Y. Yamada, K. Nakajima, T. Kurashima, S. Tomita, "Static fatigue characterization with uniform and ultra-small bending", Proceedings of OFC/NFOEC 2011, Los Angeles, USA, 2011.
- [9]. Janet L. Armstrong, M. John Matthewson, Mayra G. Juarez, Catherine Y. Chou, "Effect of diffusion rates in optical fiber polymer coatings on aging", Proc. SPIE, Vol. 3848, 62-69, 1999.
- [10]. Luís F. Ferreira, et all., "Monitorization of Sea Sand Transport in Coastal Areas Using Optical Fiber Sensors", Proceedings of the 8th IEEE Conference on Sensors, Christchurch, NEW ZEALAND, 25-28 October, 2009.
- [11]. Willem Griffioen, "Optical Fiber Mechanical Reliability", PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, p.127-137, 1995.
- [12]. Thirtha, Vivek M.; Matthewson, M. John; Kurkjian, Charles R.; Yoon, K. C.; Yoon, J. S.; Moon, C. Y.; "Effect of secondary coating on the fatigue and aging of fused-silica fibers"; Proc. SPIE Vol. 4639, p. 75-81, 2002.
- [13]. F. Domingues P. André, M. Granada, "Optical Fibres Coating Aging induced by the Maritime Environment", J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl., vol.10, n.1, pp. 259-265, 2011.
- [14]. F. Domingues, P. André, M. Granada, "Optical Fibres Coating Aging induced by the Maritime Environment", Proceedings of (MOMAG2010), Brasil, 2010
- [15]. R. Danzer, P. Supancic, J. Pascual, and T. Lube. "Fracture statistics of ceramics - Weibull statistics and deviations from Weibull statistics", Engineering Fracture Mechanics, p. 2919-2932, 2007.

- [16]. P. Lefebvre, A. Vincelette, P. Ficocelli, S. Allard, and S. Carbonneau, " Eliability Characterization of Fiber Bragg Grating," in *Optical Fiber Sensors*, OSA Technical Digest, 2006.
- [17]. Matthewson, M. John, "Environmental effects on fatigue and lifetime predictions for silica optical fibers", *Reliability of Optical Fiber Components, Devices, Systems, and Networks*,. Proceedings of the SPIE, Volume 4940, pp. 80-92, 2003.
- [18]. Rocha, A. M., et al., "The effect of high power propagation in bended fibers", *Proceedings of 10th International Conference on Telecommunications*. , pp. 303-304, 2009.
- [19]. Willem W. Griffioen, "Evaluation of optical fiber lifetime models based on the power law", *Optical Engineering* 33(02), pp.488-497,1994.
- [20]. Daniele Cuomo, Lidia Terruzzi, "Coating Ageing and Impact on Fibre Performances", *International Wire & Cable Symposium*, Proceedings of the 58th IWCS/IICIT, Charlotte, North Carolina, USA, 2009.
- [21]. Semjonov, S. L.; Glaesemann, G. Scott; Bubnov, Mikhail M., "Fatigue behavior of silica fibers of different strengths", In *Photonics East'99*, pp. 102-107. International Society for Optics and Photonics, 1999.

Capítulo 3

Sinais de alta potência em fibra e conectores óticos

3.1 Contextualização

Nos últimos anos, os requisitos necessários para otimizar e preservar as redes de comunicações óticas têm aumentado significativamente, tendo em vista a exigente demanda relativamente à capacidade de transmissão, sendo que o objetivo primário é a transmissão de maior quantidade de informação para maiores distâncias. Consequentemente, a introdução de tecnologias como a amplificação Ramam, provocam um aumento considerável na potência ótica dos sinais utilizados nas ligações [1-3].

Num cenário FTTH é necessário que a fibra tenha elevada resistência a micro-curvaturas devido às condições físicas em que é efetuada a instalação. Na sua aplicação em habitações, raios de curvatura na ordem dos 5 mm são comuns e a atenuação induzida deve ser mantida num valor reduzido para que se possa garantir a qualidade do serviço fornecido, e preservar a integridade da fibra. No caso de aplicação com sinais de elevada potência, as pequenas curvaturas são um perigo real e promovem o conseqüente envelhecimento rápido da fibra [4-6].

Face aos sinais de altas potências usados, o método mais eficaz para reduzir o risco de dano e proteger a fibra ótica é através da fusão da fibra, contudo, este método nem sempre é aplicável, e por isso os conetores óticos são comumente usados [7].

A intensificação da utilização de conetores óticos na construção de redes óticas flexíveis, amplifica também a preocupação relativa ao seu desempenho mediante a inserção de sinais de altas potências, uma vez que, com o aumento da potência dos sinais óticos nas redes também a probabilidade de falha nos seus componentes pode aumentar [3,8].

Relativamente aos conetores óticos, os danos mais comuns são frequentemente devidos à sua contaminação, devido a uma fraca limpeza e/ou manutenção e também resultado do desgaste natural resultante do processo de conetar/desconetar, podendo os sinais de desgaste ser visíveis na sua extremidade final. Quanto à sua contaminação, esta pode dever-se a poeiras ou outras partículas orgânicas constantemente presentes no contexto de instalação das redes óticas que, com o contínuo procedimento de conectar/desconectar, facilmente se podem alojar no núcleo da fibra, bloqueando-o [9]. Estes tipos de impurezas localizadas podem atuar como centros de absorção, aquecendo as regiões circundantes, até temperaturas suscetíveis à indução de danos locais permanentes, degradando assim o desempenho ótico da rede [7]. É exemplo desta situação, a atenuação ótica que ocorre devido a radiação de parte do sinal transmitido para os modos não guiados. Geralmente, o efeito desta radiação aparece sobre a forma de calor [10], mas em situações mais extremas, também o efeito rastilho pode ser iniciado nestes pontos de absorção [11]. Nesta situação, o núcleo da fibra é continuamente destruído, através de uma zona de fusão que emite radiação visível, que se propaga em direção à fonte ótica, até que esta seja desligada, ou a sua potência ótica diminua para um limiar de 1.4 W, no caso de uma fibra SMF (G.652.D) [12]. No contexto das redes óticas, este efeito pode provocar a destruição completa da fibra ao longo de vários quilómetros, originando um cenário economicamente catastrófico [12]. Assim, a existência de conetores óticos contaminados ou danificados representam um perigo constante para as redes óticas e frequentemente resultam na degradação do seu desempenho, traduzidas por falhas funcionais e o conseqüente aumento do custo de instalação/manutenção.

Para que se possam evitar e contornar este tipo de situação indesejável, foi estudado o processo de degradação da fibra quando esta é sujeita a curvaturas com pequenos diâmetros na presença de sinais de alta potência. É também apresentado neste capítulo, um estudo relativo ao desempenho de conetores óticos contaminados e/ou danificados na sua extremidade final, e

quais os efeitos desses danos na transmissão ótica. Este estudo foi efetuado em termos de temperatura e perdas óticas para conectores gradualmente contaminados.

3.2 Efeito de curvaturas apertadas no tempo de vida da fibra ótica

Os sistemas de comunicações óticas têm vindo a sofrer uma evolução crescente com as demandas para os níveis mais elevados de transmissão, uma vez que o objetivo final é implantar a fibra diretamente na casa dos clientes. Deste uso massivo de fibra ótica em ambientes residenciais novos problemas surgem, entre eles, a atenuação adicional provocada pela curvatura da fibra durante a instalação e sua degradação ao longo do tempo [13,14]. Este conjunto de fatores: a evolução de redes óticas, acompanhada pelo aumento da potência ótica do sinal propagado na fibra, conjuntamente com as curvaturas apertadas resultantes das infra-estruturas de FTTH, pode induzir a degradação do tempo de vida da fibra, devido ao aumento local da temperatura no revestimento [13].

Nas regiões curvadas da fibra ótica, parte do sinal ótico é transferido a partir do núcleo para o revestimento envolvente [13,14-17], o que conduz à degradação das camadas de revestimento e à consequente rutura da fibra, mas que também, em situações extremas pode levar à ignição do efeito rastilho na fibra ótica [5,6, 13-17].

Em estudos anteriores foi relatado que o diâmetro da curvatura crítica da fibra ótica, a partir do qual se verificam perdas significativas, tem o valor de 20 mm, o que significa que para diâmetros inferiores a este valor, a fibra apresentará falhas de operação [13,18]. Estas dobras de pequenos diâmetros na fibra podem tornar-se um problema para os equipamentos óticos e para a qualidade de serviço instalado, uma vez que a redução da curvatura resulta no aumento da atenuação do sistema [18,19]. Esta atenuação é provocada pela perda do sinal ótico para modos não guiados da fibra, e representa um fator de risco para a rede instalada uma vez que o sinal ótico irradiado é absorvido na camada de acrilato e convertida em calor, provocando um aumento da temperatura da fibra na zona de curvatura, Figura 3.1 [18].

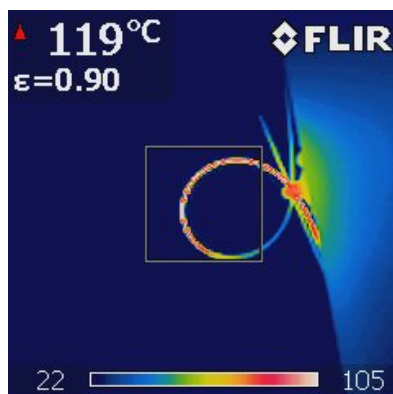


Figura 3.1- Imagem térmica da zona de curvatura para um sinal injetado com potência de 2.0 W, e diâmetro de curvatura de 15.04 mm.

Nesta secção, analisamos o tempo de falha de uma fibra ótica SMF, quando esta é dobrada em curvaturas de pequenos diâmetros (inferiores a 20 mm) e submetida a sinais de alta potência óticas. Nesta análise pretende-se avaliar qual a probabilidade de rutura das fibras sob tais condições.

Assim, para o estudo do tempo de vida e resistência da fibra quando esta é sujeita a pequenos diâmetros e sinais de alta potência utilizou-se um aparato experimental como o esquematizado na Figura 3.2. A fibra em análise é colocada entre duas plataformas, com uma distância entre si conhecida (equivalente ao diâmetro de curvatura pretendido). Um sinal ótico de alta potência (laser Raman (IPG - RLR-10-1480)), com emissão a 1480 nm e com uma potência ótica máxima de 2.0 W é lançado na fibra e o sinal de saída é monitorizado em tempo real. Através da análise do comportamento da potência do sinal de saída pode-se determinar o tempo que a fibra resiste até que a sua falha total se verifique [20]. As potências óticas em teste têm os valores de 1.0, 1.5 e 2.0 W.

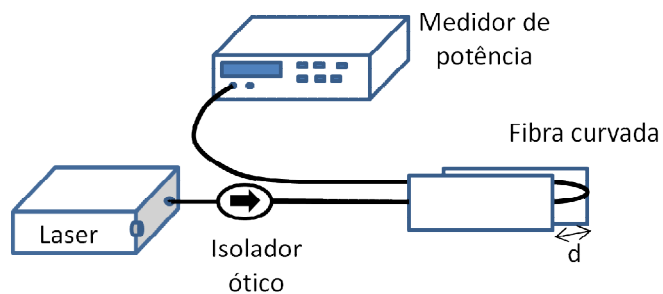


Figura 3.2- Aparato experimental para a análise da resistência da fibra quando sujeita a sinais de alta potência e pequenos diâmetros de curvatura.

A fibra foi colocada entre duas placas, com distância variáveis, de modo a obter diâmetros de curvatura da fibra, d , de 2.9, 3.1 e 3.3 mm. Na outra extremidade da fibra, o sinal ótico recebido foi analisado e registado em contínuo por um medidor de potência (HP 81531A, 800-1700 nm) [3]. Na Figura 3.3 é apresentado um exemplo do registo efetuado. Neste exemplo a potência ótica do sinal injetado tem o valor de 2.0 W.

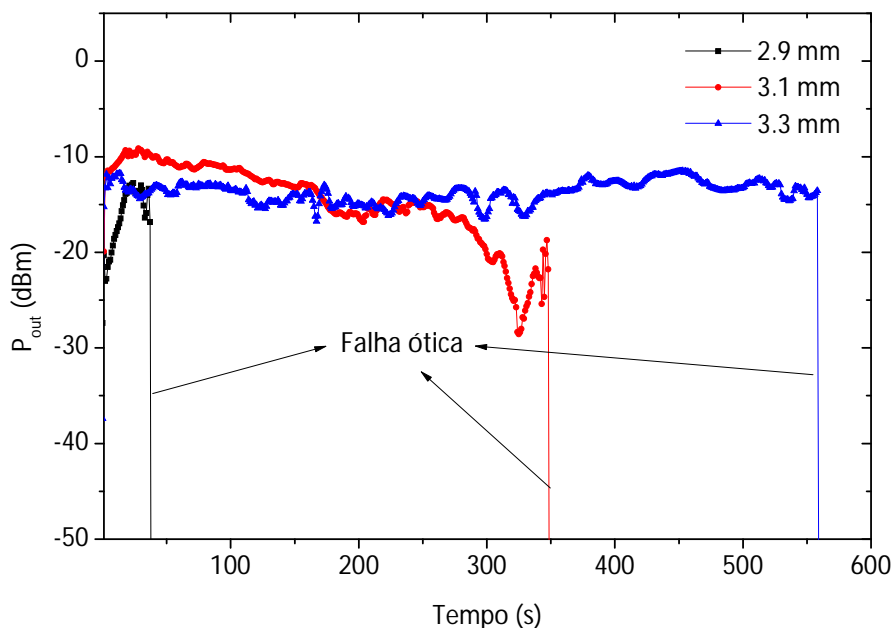


Figure 3.3- Potência ótica do sinal de saída em função do tempo para uma fibra com um diâmetro de curvatura de 2.9, 3.1 e 3.3 mm e uma potência ótica injetada de 2.0 W.

Nesta figura é possível ver o valor da potência do sinal em monitorização e a sua falha abrupta perto dos 50 segundos de ensaio, para um diâmetro de curvatura de 2.9 mm. O valor do tempo ao qual esta falha abrupta ocorre foi registado como sendo o tempo de falha da fibra, nas condições em análise.

Para cada valor potência ótica e diâmetro de curvatura em teste, foram efetuados cinco ensaios consecutivos e o valor médio do tempo de falha da fibra foi calculado. Na Figura 3.4 está representado o tempo de falha, como função do diâmetro da flexão para os três valores de potência ótica testados. Nesta representação torna-se óbvio que, para o menor diâmetro, 2.9 mm, o tempo de falha é muito curto para os três valores de potências óticas injetados. Por outro lado, à medida que aumenta o diâmetro da curvatura, também o tempo até à falha é maior [20].

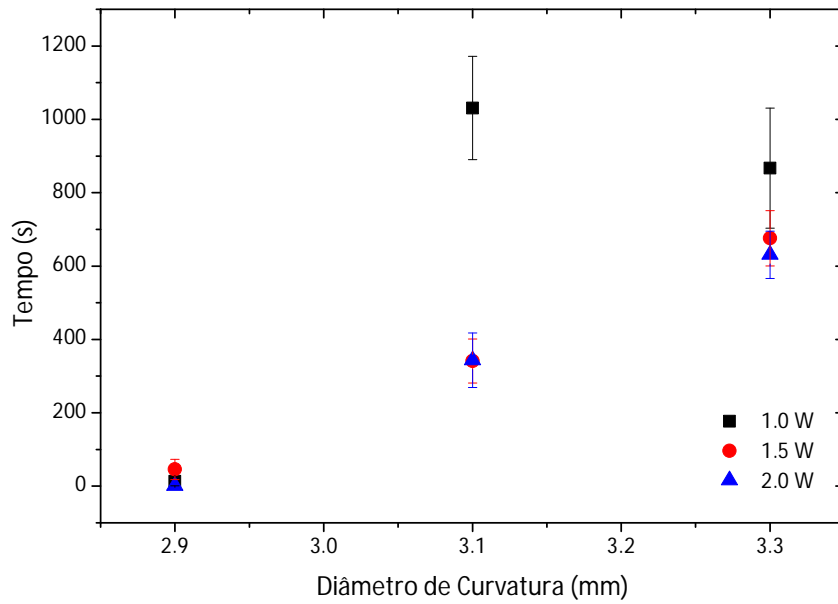


Figure 3.4- Tempo para falha em função do diâmetro de curvatura.

Na análise do tempo de falha em função da potência ótica do sinal injetado, Figura 3.5, é possível observar que para o mesmo diâmetro de curvatura, um aumento na potência do sinal injetado origina um decréscimo do tempo de falha da fibra ótica. Contudo, é também visível que para as potências mais elevadas a tendência é para manter o tempo de falha, num valor aproximadamente constante, indicando a existência de um limiar para o valor de potência do sinal que é possível injetar na fibra, quando esta é sujeita a diâmetros tão pequenos [20].

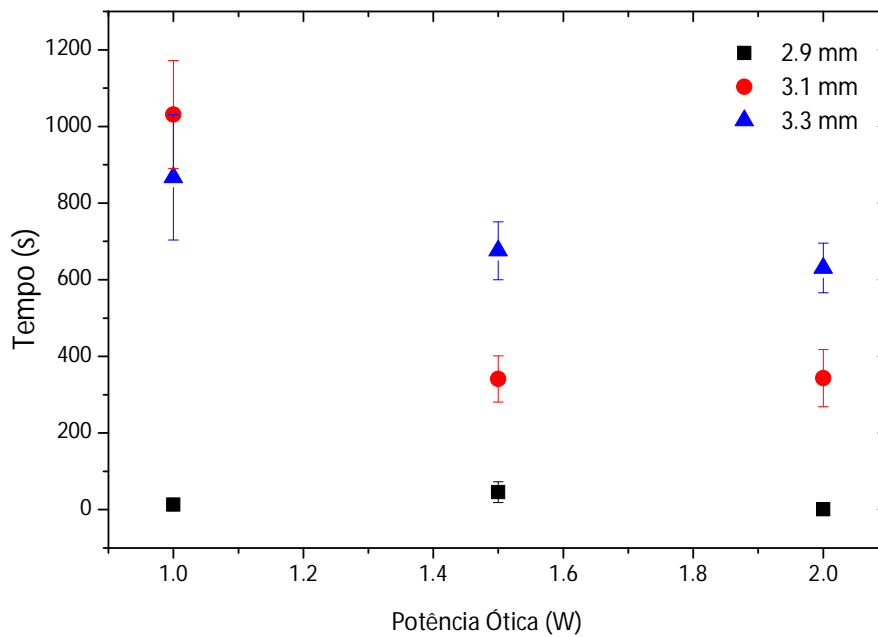


Figure 3.5 - Tempo para falha em função da potência ótica do sinal injetado.

Os ensaios efetuados para a fibra com uma curvatura de 2.9 mm afastam-se desta tendência, uma vez que o tempo de falha foi semelhante para todas as potências dos sinais injetados, sendo o seu valor consideravelmente inferior ao registado para os restantes diâmetros.

Para calcular a probabilidade de falha, F , da fibra testada, foi aplicada a expressão (3.1) aos dados recolhidos [21].

$$F = \frac{i-0.5}{N} \quad (3.1)$$

Nesta expressão, i corresponde ao valor medido e N é o número total de medidas efetuadas. Os dados recolhidos foram posteriormente representados graficamente de acordo com a distribuição de Weibull dada por:

$$\ln(-\ln(1 - F)) = m \ln(t) \quad (3.2)$$

Na Figura 3.6 é apresentado o comportamento da fibra submetida a uma potência ótica de 2.0 W e um diâmetro de curvatura de 3.1 e 3.3 mm. É possível observar que para um diâmetro de curvatura menor, o tempo para falha diminui. No ajuste linear efetuado foi obtido um declive com o valor de -0.307 ± 0.025 para o diâmetro de curvatura de 3.1 mm e -0.617 ± 0.036 para o diâmetro de curvatura de 3.3 mm.

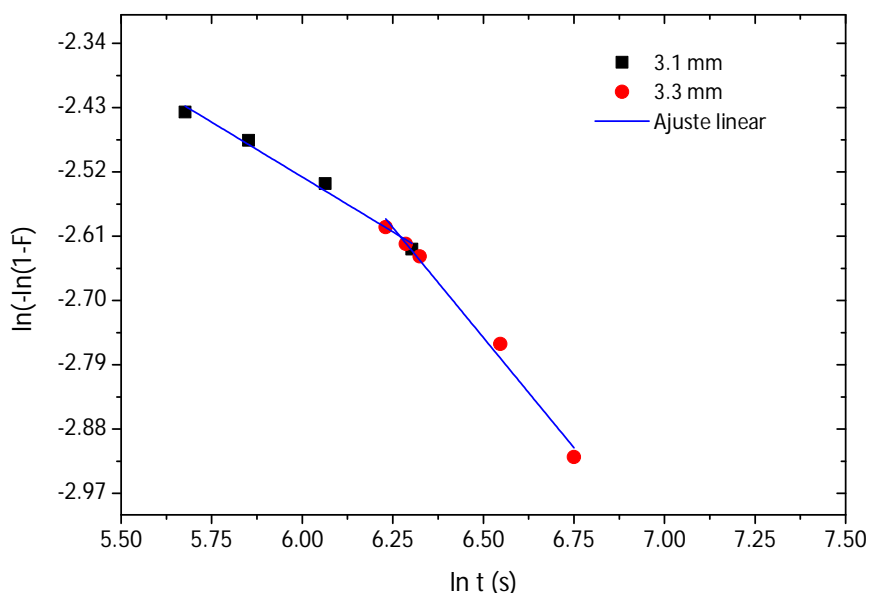


Figura 3.6- Probabilidade de falha em função do tempo para falha para a mesma potência do sinal injetado de 2.0 W.

Numa perspetiva diferente, Figura 3.7, é também analisado para o mesmo diâmetro de curvatura, 3.1 mm, o efeito de sinais com diferentes potências óticas, nomeadamente 1.5 e 1.0 W.

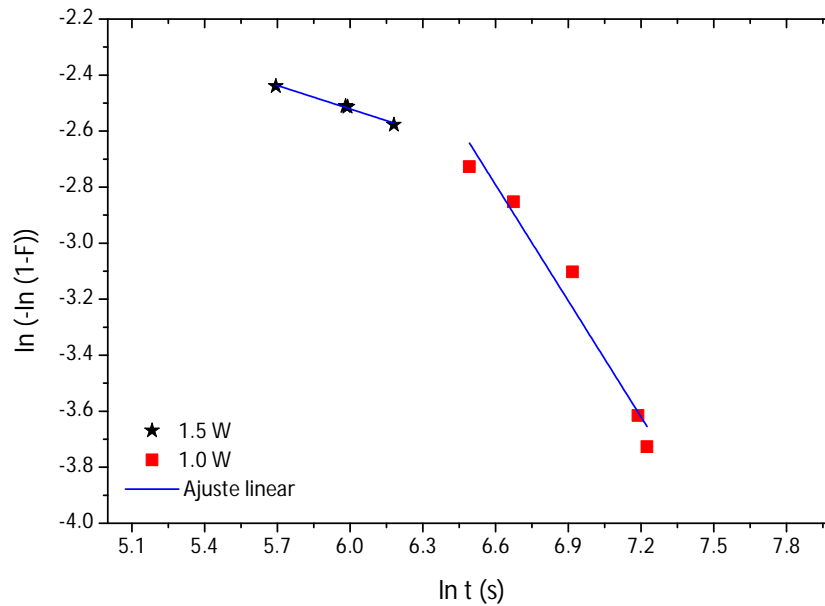


Figure 3.7- Probabilidade de falha em função do tempo para o mesmo diâmetro de curvatura e sinais de diferentes potências óticas.

Também nesta análise, é visível que quanto maior a potência ótica aplicada, menor será o tempo para falha da fibra. No ajuste linear efetuado foi obtido o declive com o valor de -0.279 ± 0.021 para um sinal com potência de 1.5 W e -1.38 ± 0.16 para um sinal com potência de 1.0 W [21].

3.2.1 Análise microscópica da fibra danificada

Após a exposição a sinais de alta potência, o estado físico da fibra na região de curvatura foi analisado recorrendo a um microscópio ótico. Na Figura 3.8 são apresentadas as imagens recolhidas nesta análise. Esta imagem corresponde a uma fibra sujeita a um sinal com uma potência de 1.5 W durante 60 s, com um diâmetro de curvatura de 2.9 mm.

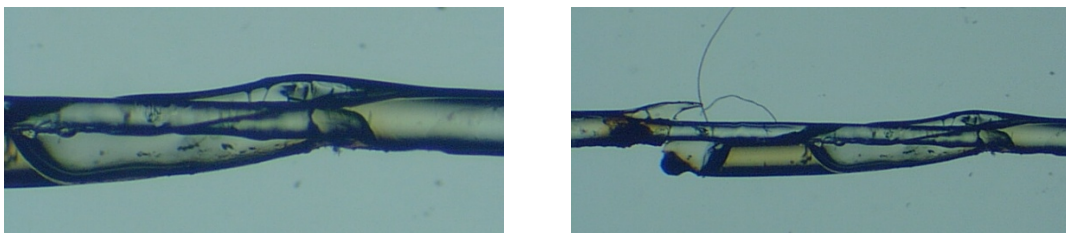


Figura 3.8- Imagem da zona de curvatura (diâmetro 2.9 mm) após ter sido exposta a um sinal de potência ótica de 1.5 W. O tempo de exposição foi de 60 s e temperatura máxima de 165°C.

A temperatura atingida foi de 165 °C. Nesta imagem são visíveis os danos provocados pelo aquecimento do revestimento da fibra, que resultaram na desagregação da camada de acrilato e na sua separação da sílica.

3.3 Degradação de conectores óticos

Para estudar o efeito de contaminantes na degradação dos conectores óticos quando estes são sujeitos a sinais óticos de elevada potência, conectores do tipo FC/PC, com uma estrutura semelhante à ilustrada na Figura 3.9, foram sujeitos a diferentes níveis de contaminação.

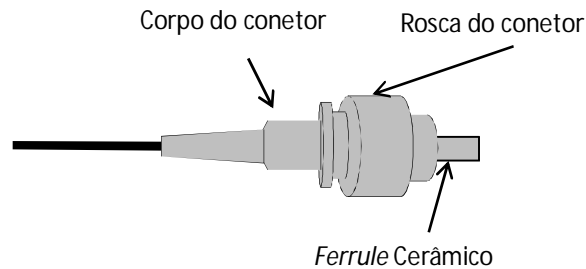


Figura 3.9- Estrutura do conector FC/PC utilizado neste estudo.

Para o processo de contaminação, foram aplicadas camadas de uma solução aquosa (25%) de tinta preta na extremidade dos conectores de modo a obter as atenuações na interligação de 2, 4, 6, 8, e 10 dB. Para comparação, um grupo de conectores foi mantido limpo (atenuação 0 dB). Na Figura 3.10- a) é visível a face final de um conector contaminado antes de ser sujeito a sinais óticos de elevada potência.

Relativamente ao estudo da degradação física dos conectores, e com o objetivo de reproduzir a degradação da face ocorrida durante o processo de conetar/desconetar, a face final de cada conector foi polida com filme de diamante de 6 μm durante 30 segundos, obtendo-se uma degradação semelhante à visível na Figura 3.10-.b). Para comparação os testes foram efetuados em conectores com e sem gel adaptador de índice de refração (RIMG) na sua face final. A Figura 3.10- b) mostra uma imagem microscópica do conector após o polimento [8,11].

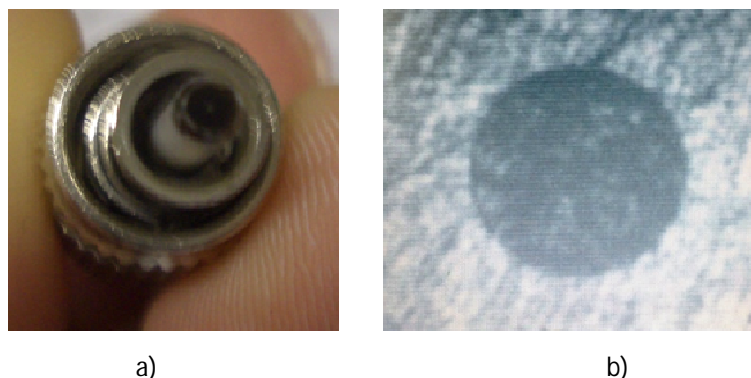


Figura 3.10- a) Face de um conector FC/PC depois de contaminado; b) extremidade do conector depois de polida com filme de diamante.

Para analisar o nível de degradação e a temperatura atingida pelos conectores contaminados

quando submetidos a sinais de alta potência, foi utilizado um aparato experimental como ilustrado na Figura 3.11.

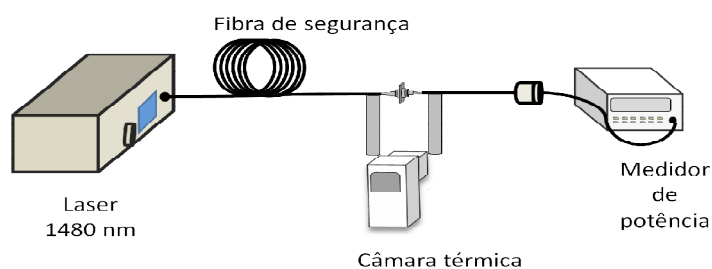


Figura 3.11- Esquema do aparato experimental utilizado para a análise da temperatura na ligação entre dois conectores óticos contaminados.

Um sinal ótico de alta potência, gerado por um laser Raman (IPG, model RLR-10-1480), com comprimento de onda de 1480 nm e uma potência máxima de 1.5 W é injetado na ligação ótica FC/PC, com um dos conectores contaminados com tinta preta, Figura 3.12.

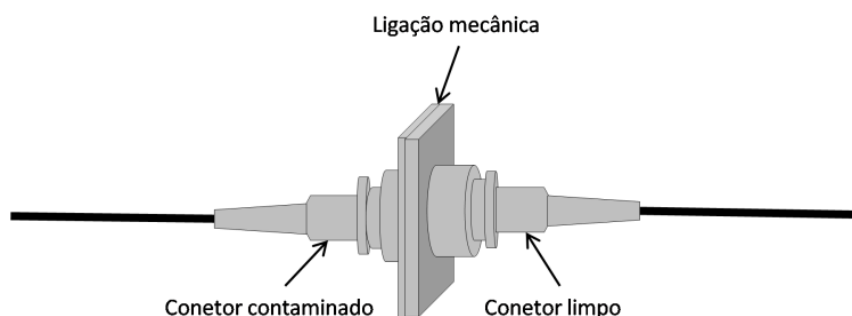


Figura 3.12- Estrutura da ligação dos conectores com contaminante.

Por questões de segurança dos equipamentos utilizados, em caso de ignição do efeito rastilho, um troço de fibra com vários metros foi colocada entre os conectores em teste e a fonte ótica.

Na outra extremidade da ligação ótica foi medida continuamente a potência do sinal ótico transmitido através de um medidor de potência (HP, 81531A Power Sensor, 800-1700 nm). Os valores de potência ótica de teste à saída da fonte ótica foram de 0.5, 1.0, 1.5 W, e o tempo máximo de exposição dos conectores a esses sinais foi de 10 min. Durante todo o tempo de exposição dos conectores a sinais de alta potência, a sua temperatura foi também monitorizada através de uma câmara térmica (ThermaCAM™ Flir i50), sendo registados valores em intervalos de 10 s.

3.3.1 Eficiência ótica dos conectores contaminados

No registo da potência ótica do sinal transmitido pelos conectores contaminados foram observados comportamentos diferentes de acordo com a potência ótica do sinal injetado e os níveis de contaminação nos conectores, como era expetável.

Relativamente aos testes efetuados para uma potência ótica de inserção de 0.5 W, não foram assinaladas alterações significativas a nível da variação das perdas óticas no decorrer dos testes, como se pode verificar pelo registo gráfico da Figura 3.13. Contudo, e como será explorado nas secções seguintes, apesar da diminuta variação do valor da atenuação registada, estes conectores sofreram danos físicos assinaláveis.

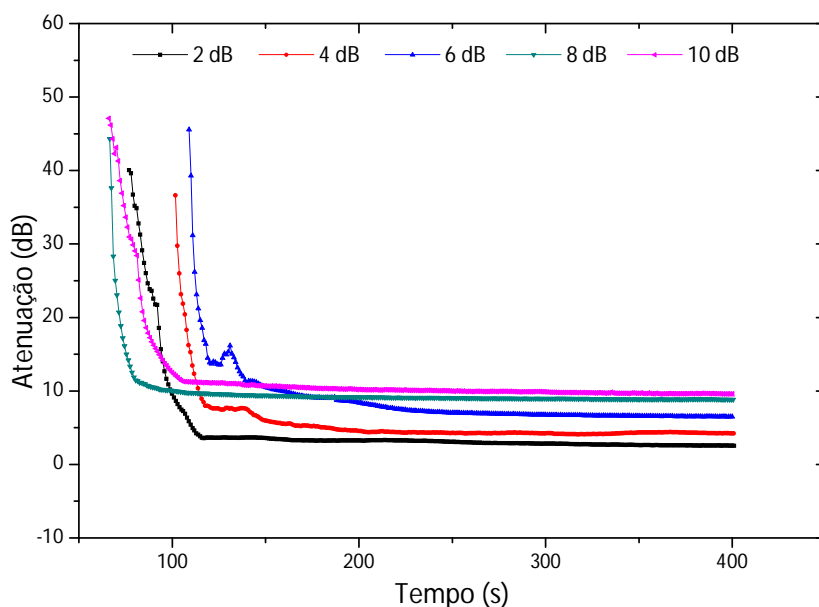


Figura 3.13- Evolução das perdas óticas registadas ao longo do tempo para os conectores com 2, 4, 6, 8 e 10 dB de atenuação inicial. (Potência do sinal ótico de teste = 0.5 W)

Para os testes realizados com sinais com potências óticas de 1.0 W, verificamos que a partir de um valor de contaminação de 4 dB, o comportamento dos conectores é semelhante, apresentando uma falha ótica abrupta, observável pelo decréscimo instantâneo da potência do sinal de saída registada e conseqüente aumento no registo das perdas óticas. Na Figura 3.14 estão representadas a atenuação ótica dos conectores com atenuações iniciais de 4, 6 e 8 dB para um sinal injetado com a potência de 1.0 W. Como pode ser visto, a partir de um determinado tempo de exposição a sinais de alta potência, a perda ótica aumenta abruptamente, indicando a ocorrência de falha no funcionamento do conector.

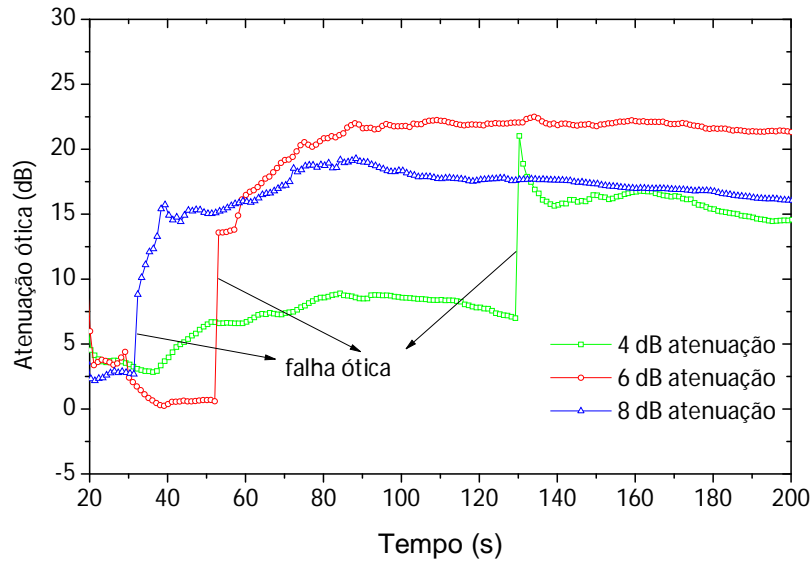


Figura 3.14- Evolução da atenuação ótica registada ao longo do tempo para os conetores com 4, 6 e 8 dB de atenuação.

É também possível verificar pela figura anterior que, quanto maior o grau de contaminação do conetor, menor será o tempo de funcionamento do conetor.

No estudo das atenuações óticas para potências de inserção de 1.5 W, nos conetores óticos contaminados com atenuações iniciais de 4, 6 e 8 dB, foi registada a ignição do efeito rastilho, Figura 3.15.

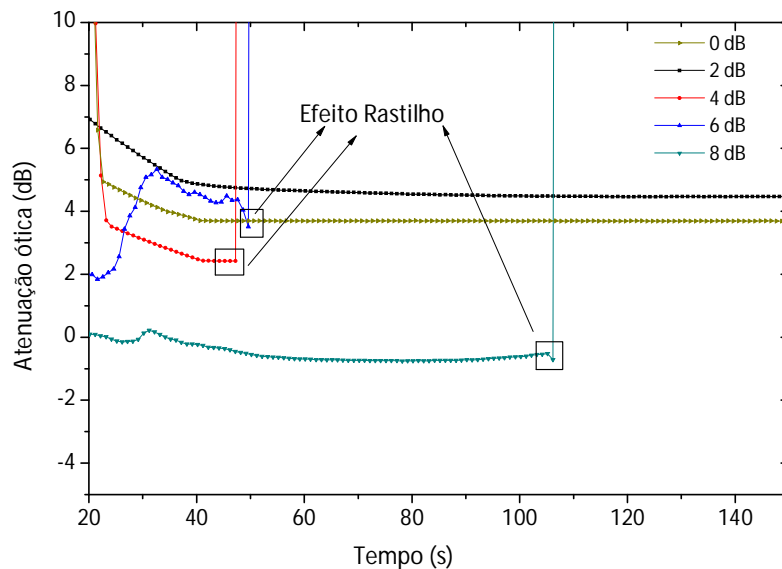


Figura 3.15- Registo das perdas óticas para os testes efetuados com sinais de potência ótica de 1.5 W.

Nesta situação, as perdas óticas aumentaram bruscamente e foi observável a zona de fusão emitindo radiação visível propagando-se em direção à fonte. Na Figura anterior é possível

observar o aumento súbito da atenuação ótica nos conectores que sofreram o efeito rastilho.

No contexto da segurança das redes óticas, é de maior importância registrar o fato de que, para a potência do sinal de teste de 1.5 W, os conectores contaminados com 4, 6 e 8 dB de atenuação deram origem ao efeito de rastilho (assinalado na Figura 3.15), mas também que, para a o sinal com potência de 1.0 W, os conectores ficaram fisicamente danificados o que se traduziu na sua falha ótica. Apesar de a potência de teste de 0.5 W não ter registado um efeito catastrófico semelhante aos anteriores (em termos óticos), registou-se todavia que, os conectores ficaram fisicamente danificados e o seu desempenho ótica foi reduzido, como se pode constatar pelos dados de transmissão obtidos, Tabela 3.1, no final dos testes efetuados e depois dos conectores serem devidamente limpos.

Tabela 3.1- Dados de transmissão final nos conectores testados

Nível de contaminação (dB)	Potência ótica do sinal de teste (W)	Total perdas na ligação (dB)
2	0.5	1.05
	1.0	1.82
	1.5	0.84
4	0.5	3.98
	1.0	19.31
	1.5	s/ sinal
6	0.5	s/ sinal
	1.0	14.28
	1.5	s/ sinal
8	0.5	19.36
	1.0	27.55
	1.5	s/ sinal
10	0.5	16.47
	1.0	16.22
	1.5	15.87

3.3.2 Efeitos térmicos da contaminação nos conectores óticos

Relativamente à análise térmica efetuada, na Figura 3.16 estão representadas um conjunto de imagens térmicas adquiridas com uma câmara térmica (ThermaCAM™, © FLIR Systems), durante a exposição dos conectores contaminados a sinais óticos com diferentes valores de potências. Estas imagens foram adquiridas após 10 min de exposição a sinais com potência de 0.5, 1.0 e 1.5 W, para conectores com uma atenuação de 10 dB.

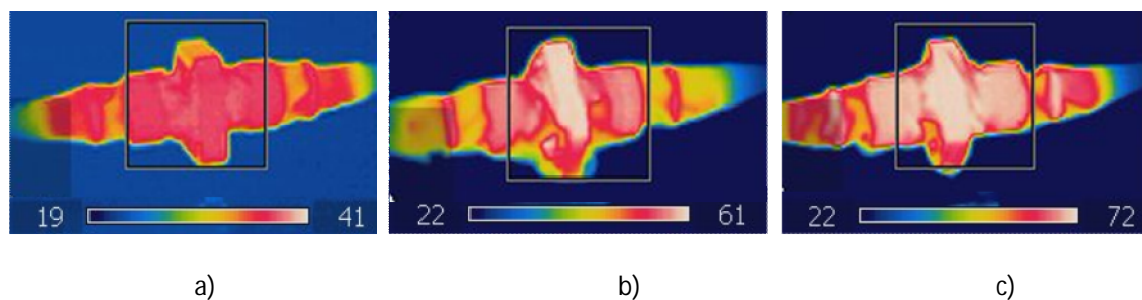


Figura 3.16- Imagens térmicas de conetores contaminados com uma atenuação de 10 dB e testes efetuados para sinais óticos de potência: a) 0.5 W; b) 1.0 W e c) 1.5 W.

Pela observação das imagens anteriores é possível verificar que a temperatura máxima registada ocorre na zona de junção entre os conetores. Esta observação vai de encontro ao já reportado anteriormente por [10] onde os autores afirmam que a perda ótica num conetor é causada pela perda de parte da radiação transmitida, sendo que radiação perdida aparece sobre a forma de calor. Com base na análise das imagens térmicas adquiridas, foram recolhidos os valores de temperatura registados na zona de junção dos conetores, correspondente também à temperatura máxima registada no conjunto da ligação. A sua variação ao longo do tempo (exposição máxima de 10 min) para os vários valores de atenuação é apresentada na Figura 3.17.

Pela análise gráfica dos dados obtidos, verifica-se que a variação da temperatura T ao longo do tempo para sinais com diferentes potências óticas, pode ser descrita através de:

$$T = T_{max} + Ae^{\frac{-t}{\beta}} \quad (3.3)$$

onde T_{max} é o valor máximo de temperatura alcançado, β é a constante de saturação e A uma constante do sistema. Assim, no ajuste teórico dos dados experimentais à equação 3.1 (com correlação de ajuste superiores a 0.99), foram obtidos os parâmetros teóricos apresentados na Tabela 3.2.

Na análise desta representação é possível verificar que o conetor utilizado para controle (0 dB de perdas), mantém uma temperatura estável ao longo do tempo. Por outro lado, todos os conetores contaminados apresentaram um aumento de temperatura ao longo do tempo de exposição. Contudo, para a mesma potência de inserção de 1.5 W, verificamos que a temperatura dos conetores que sofreram o efeito rastilho não aumentou tão consideravelmente, o que é explicado pelo facto de este ter sido iniciado nos 2 min iniciais de exposição a sinais óticos de alta potência, como foi referido na secção anterior e é também visível na Figura 3.17- c). Todavia,

analisando estes 3 valores (4, 6 e 8 dB de atenuação) é observável um ligeiro aumento na temperatura à qual o efeito rastilho foi iniciado.

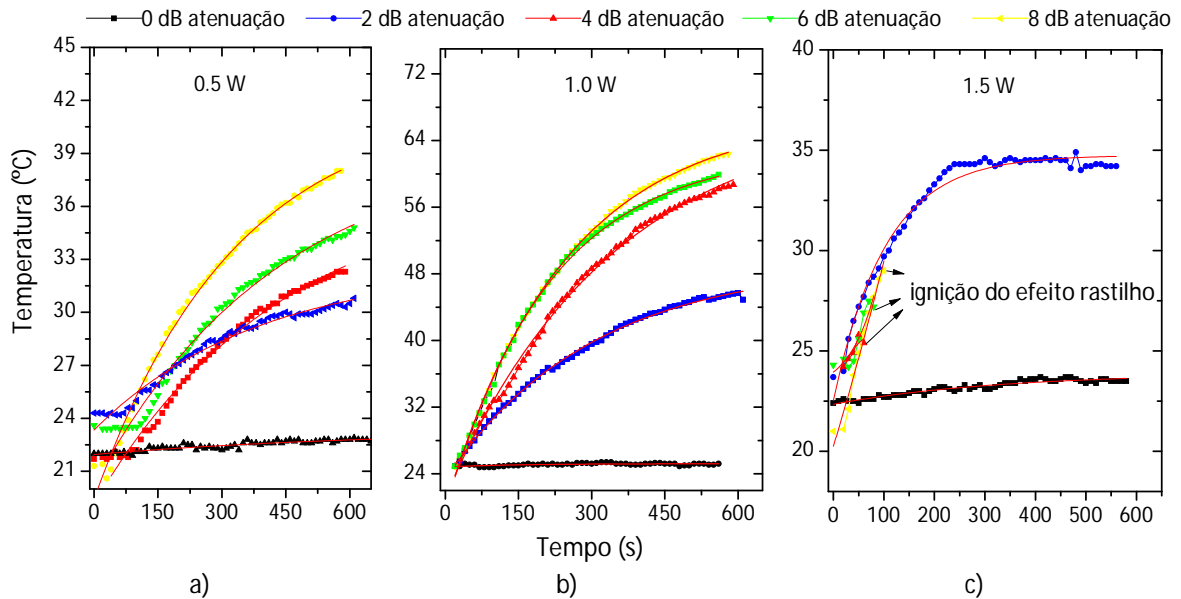


Figura 3.17- Comportamento térmico dos conectores contaminados para os diferentes níveis de atenuação e potência ótica do sinal injetado. (Pontos correspondem a dados experimentais e linha ao ajuste teórico efetuado (equação 3.3)).

Nesta análise verifica-se que a constante de saturação, β , de uma maneira geral, diminui com o aumento da potência do sinal, mas não apresenta um comportamento linear com a variação dos valores de atenuação

Tabela 3.2- Dados de ajuste teórico dos dados experimentais à equação (3.3)

Nível Contam.	T_{max} (°C)		β		A	
	0.5 W	1.0 W	0.5 W	1.0 W	0.5 W	1.0 W
0 dB	23.3±0.4	25.2±0.1	657.4±27.6	137.7±69.6	-1.4±0.3	-0.4±0.1
2 dB	32.1±0.4	49.3±0.2	382.6±34.9	299.1±7.1	-9.3±0.4	-25.9±0.2
4 dB	37.5±0.7	67.1±0.2	443.9±35.1	247.0±2.7	-18.3±0.6	-46.9±0.2
6 dB	39.1±0.7	62.8±0.3	430.4±39.4	213.2 ±3.9	-19.5±0.7	-43.1±0.2
8 dB	41.9±0.4	67.8±0.7	330.2±14.3	346.4±11.7	-22.5±0.4	-46.5±0.6

Pelos dados dos ajustes teóricos é possível concluir também que a temperatura máxima nos conectores contaminados aumenta quer com o aumento da atenuação (nível de contaminação) quer com o aumento do valor de potência do sinal ótico injetado, o que é também observável nas representações gráficas dos valores de temperatura para o mesmo grau de contaminação mas

com sinais óticos de diferentes potências, Figura 3.18.

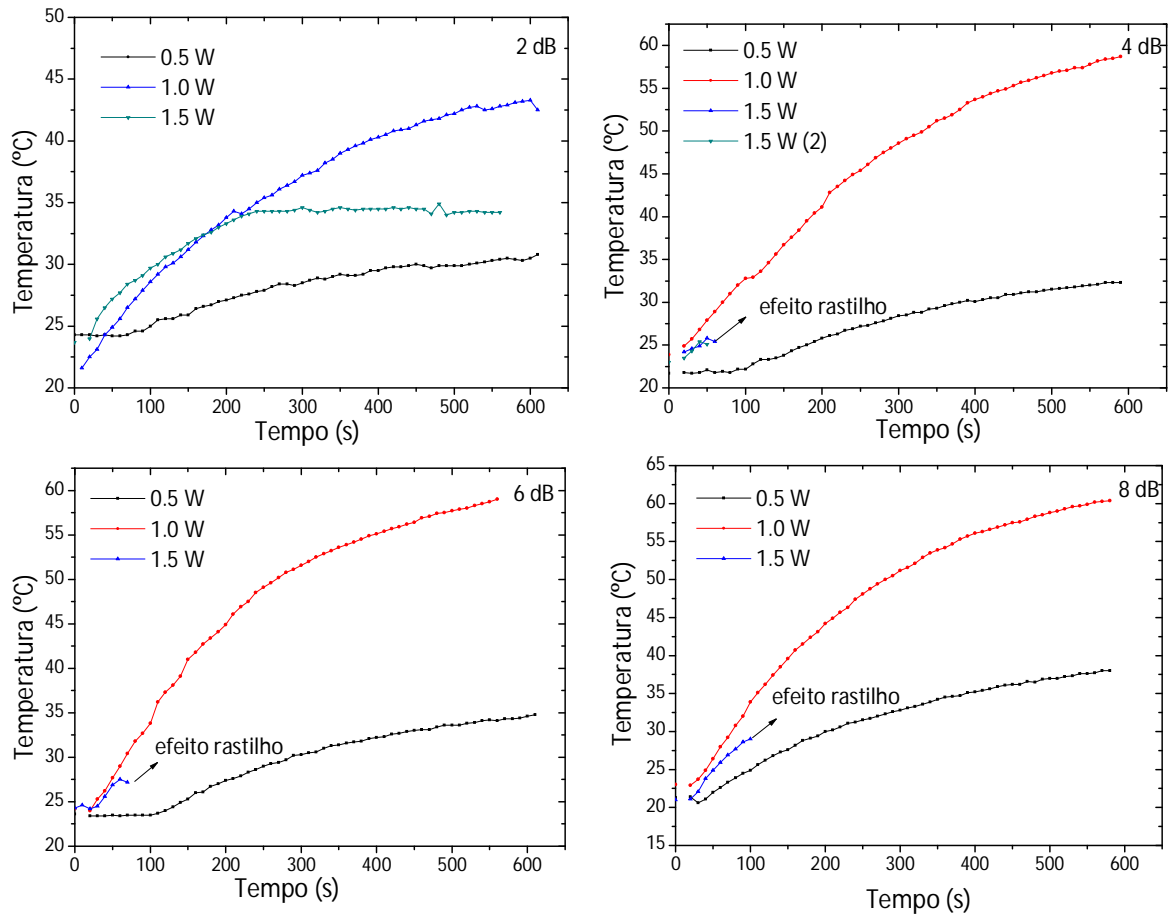


Figura 3.18- Valores de temperatura obtidos para o mesmo grau de contaminação mas com diferentes potências óticas de teste.

Se nos focarmos nos valores de temperaturas máximas obtidas em função da contaminação provocada, para os sinais óticos com diferentes potências em estudo, verifica-se que esta aumenta quer com o aumento da potência do sinal como também com os níveis de contaminação. Na Figura 3.19 estão sumarizados os resultados obtidos.

Na análise da temperatura máxima atingida pelos conectores quando expostos a um sinal com potência ótica de 1.0 W, podemos ver que os conectores que sofreram falha ótica apresentam um valor máximo de temperatura muito semelhante entre si. Este resultado pode significar que o dano induzido nos conectores é semelhante a partir de um certo valor de contaminação inicial. Por outro lado, para uma inserção ótica de 0.5 W, é possível verificar um aumento gradual na temperatura máxima com o nível de contaminação. Também é possível verificar, pelos testes efetuados, que para um mesmo nível de contaminação, a temperatura máxima atingida pelos conectores aumenta com o aumento da potência ótica do sinal injetado.

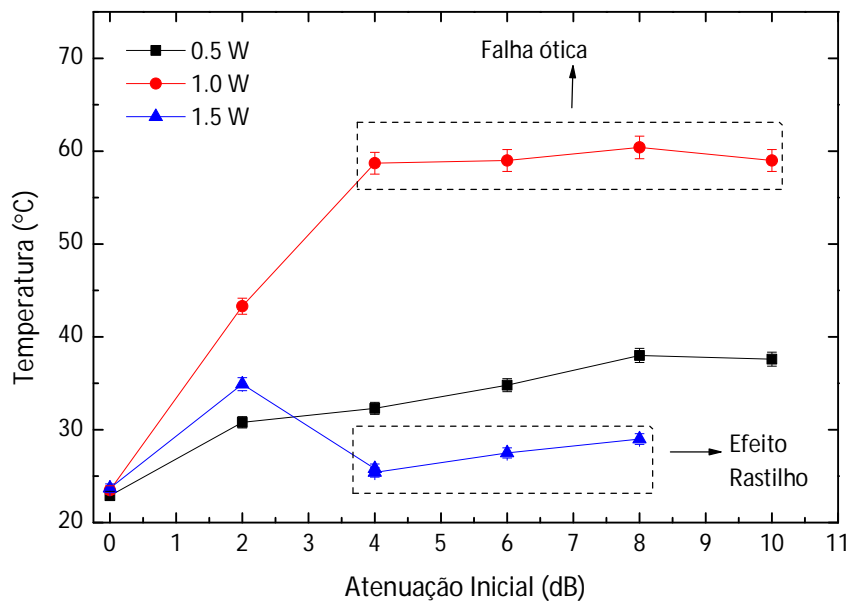


Figura 3.19- Valores de temperatura máxima em função a atenuação inicial no conetor para sinais óticos com diferentes potências.

Uma outra observação efetuada neste estudo está relacionada com a comparação entre as curvas de perdas óticas máxima e a temperatura máxima atingida para os diferentes níveis de contaminação, Figura 3.20.

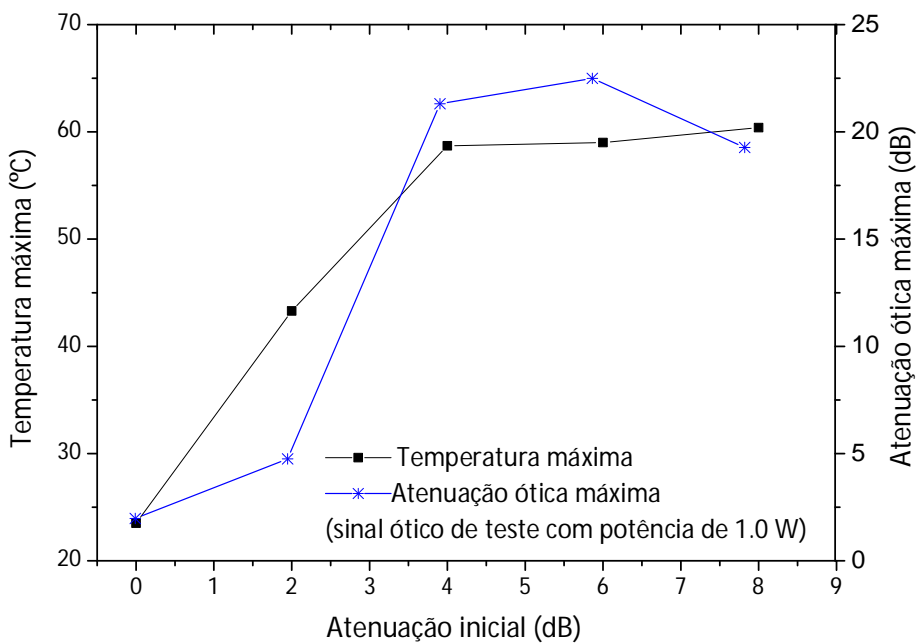


Figura 3.20- Comparação entre as curvas de perdas óticas máxima e a temperatura máxima atingida.

Como se pode observar, ambas as curvas apresentam um comportamento semelhante, o que implica uma relação próxima entre a atenuação ótica do conector e a sua temperatura máxima registada.

3.3.3 Desempenho dos conectores danificados perante sinais de alta potência

Para a análise dos conectores danificados fisicamente, a face final do conector foi devidamente limpa e as suas perdas óticas iniciais medidas. Para estes testes, o valor médio de atenuação para 5 conectores foi de 2.11 ± 0.52 e 1.46 ± 0.44 , para os conectores com e sem o gel adaptador de índice, respetivamente [8,11].

A temperatura destes conectores foi medida para diferentes valores de potência ótica do sinal injetado sem que durante essas medidas tenha sido observada alguma degradação permanente do sinal ótico injetado. A temperatura medida no conector em função da potência ótica injetada é apresentada na Figura 3.21 [8].

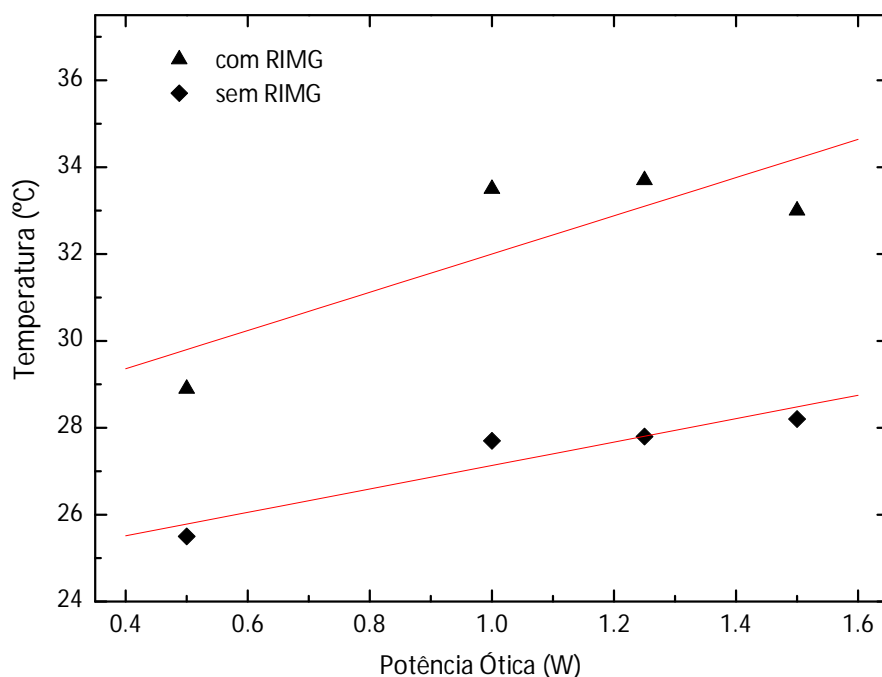


Figura 3.21- Temperaturas medidas nos conectores óticos danificados fisicamente para sinais óticos com diferentes potências

Também nesta situação, tal como com os conectores contaminados, é observado um aumento da temperatura em função da potência ótica do sinal injetado. O ajuste linear para as duas

temperaturas apresentam declives com os valores de $4.4 \pm 2.1 \text{ } ^\circ\text{C.W}^{-1}$ e $2.7 \pm 0.7 \text{ } ^\circ\text{C.W}^{-1}$ para o conector com e sem gel adaptador de índice, respetivamente. Assim, torna-se óbvio que a presença do gel resulta num aumento da potência ótica do sinal absorvido, originando um aumento da temperatura. Considerando o modelo térmico simples para o conector, podemos assumir que a superfície danificada resulta numa perda de sinal para a vizinhança, o que contribui para o aumento da temperatura na manga de junção dos conectores. Contudo, quando comparamos os comportamentos dos conectores com contaminantes com os conectores fisicamente danificados, verificamos que as temperaturas máximas atingidas pelos conectores contaminados são consideravelmente mais elevados do que aquelas registadas nos conectores danificados fisicamente [8,11].

3.3.4 Análise microscópica após testes com sinais de alta potência

No final dos testes efetuados, os conectores foram inspecionados fisicamente através de um microscópio ótico (ABSYS, AFM3-E).

Independentemente do seu comportamento durante o decorrer dos testes experimentais, quer a nível de temperatura como a nível de atenuação ótica, todos os conectores apresentaram danos físicos permanentes na sua face final, com crateras visíveis na zona do núcleo da fibra. Na Figura 3.22 é possível ver um exemplo das fotografias obtidas nesta microscopia.

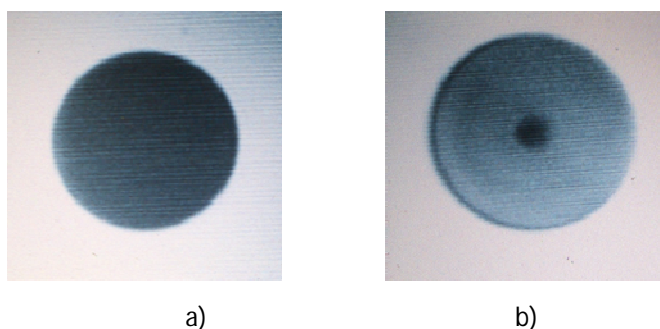


Figura 3.22- Fotografias microscópicas do conector testado com uma atenuação inicial de 4 dB, a) antes; e b) depois de ser submetido aos testes.

A imagem da Figura 3.22- a) corresponde ao conector antes da aplicação da solução contaminante, e a imagem b) é do mesmo conector após contaminação e após ter sido submetido a um sinal com uma potência ótica de 1.5 W. Como é possível verificar o conector ficou inutilizável.

Para além das imagens recolhidas microscopicamente, também uma análise SEM (*Scanning Electronic Microscopy*) foi efetuada a alguns dos conectores testados. Na Figura 3.23 são apresentadas imagens obtidas para conectores nos quais o efeito rastilho foi iniciado.

Nesta situação torna-se evidente o dano provocado no núcleo do conector, mas também em toda a área circundante, indicando que a parte do *ferrule* cerâmico é também danificada nesta situação.

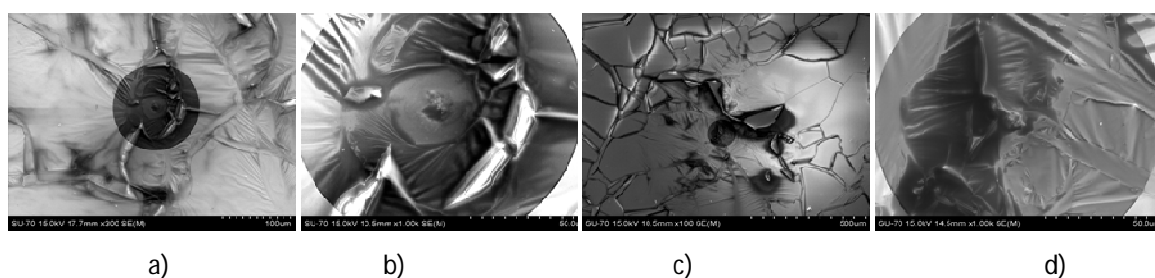


Figura 3.23 –Imagem SEM da face final dos conectores nos quais o efeito rastilho foi iniciado (conector contaminado com 4 dB atenuação e potência ótica de teste de 1.5 W).

Relativamente aos conectores que sofreram falha ótica sem que no entanto se tenha iniciado o efeito rastilho, é visível que a parte danificada no conector é centralizada somente na zona do núcleo da fibra, como se torna visível pelas imagens SEM obtidas, Figura 3.24

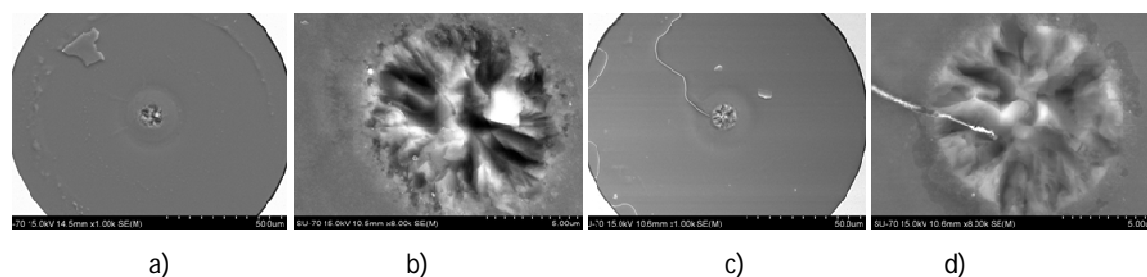


Figura 3.24- Imagem SEM da face final dos conectores nos quais se verificou falha ótica, sem que se tenha iniciado o efeito rastilho (conector contaminado com 6 dB atenuação e sinal de potência ótica de teste de 1.0 W).

Para comparação, foi também analisado um conector não contaminado, Figura 3.25, podendo-se constatar que este não apresenta qualquer dano físico ou semelhança com os conectores apresentados anteriormente, apesar de ter sido submetido aos mesmos testes com sinais óticos de elevada potência.

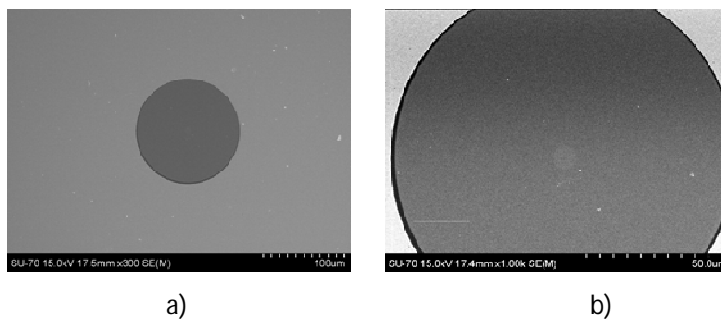


Figura 3.25- Imagem SEM da face final dos conectores limpo, a) antes e b) depois dos testes.

3.4 Conclusão

Para complementar o estudo de degradação da fibra ótica foram estudados os efeitos de pequenas curvaturas nas fibras quando a estas são associadas a sinais de alta potência. Analisando o tempo de falha apresentada pelas fibras em teste, concluiu-se que a probabilidade de falha da fibra ótica aumenta com o aumento da potência ótica injetada

Nesta secção foi apresentado também o estudo efetuado em termos de temperatura e perdas óticas para vários conectores óticos em função do seu nível de contaminação e potência ótica do sinal injetado. É demonstrado que o aumento da potência ótica do sinal e do nível de contaminação promovem um aumento da temperatura no conector.

Relativamente ao comportamento das perdas óticas, verificamos que para uma inserção ótica de 1.0 W, com exceção dos conectores com contaminações de 0 e 2 dB, todos os restantes sofreram falhas óticas. Com o aumento da potência injetada para 1.5 W, em vários conectores foi iniciado o efeito rastilho nos primeiros 2 minutos de teste. Comparando os dois parâmetros em estudo, verificamos também que um aumento nas perdas óticas é acompanhado por um aumento da temperatura máxima alcançada pelo conector.

Contudo, independentemente do comportamento em termos de perdas óticas, todos os conectores testados apresentaram danos físicos irreversíveis, o que significa que a deterioração da face final do conector pode ocorrer mesmo quando o nível de contaminação não tem qualquer efeito/influência aparente no desempenho ótico do conector. No entanto, é de salvaguardar que a degradação contínua desse tipo, pode, a longo prazo, induzir danos irreversíveis na rede ótica.

Relativamente aos conectores inicialmente danificados fisicamente, a temperatura máxima atingida não foi a suficiente para induzir a degradação do conector nestes testes. Podemos portanto concluir que o dano normal na face de um conector, característico de seu uso normal, não é relevante para a degradação do conector a curto prazo, desde que a sua face esteja devidamente livre/limpa de impurezas. Assim, os resultados indicam que o tempo de vida do conector sujeito a sinais de alta potência, depende principalmente da limpeza e não tanto da degradação da sua face final resultante do processo de ligar/desligar.

Referências

- [1] M. E. De Rosa, V.A. Bhagavatula, Q. Wu, K. Matusik, K. Wagner, "High optical power testing of physical connectors at 1550nm", OFC Conference, 2000.
- [2] Kazuo Hogari, Kenji Kurokwa, Izumi Sankawa, "Influence of high-optical power light launched into optical fibers in MT connector", Journal of Lightwave Technology, Vol.21, N°12, 2003.
- [3] K. Seo, N. Nishimura, M. Shiino, R. Yuguchi, H. Sasaki, "Evaluation of High-power Endurance in Optical Fiber Links", Furukawa Review, N°. 24, 2003.
- [4] Pieter Matthijsse and Willem Griffioen, "Matching optical fiber lifetime and bend-loss limits for optimized local loop fiber storage", Optical Fiber Technology, vol. 11, Issue 1, pp. 92-99, 2005.
- [5] Domingues, F.; Rocha, Ana M.; André, P.S; "Failure Probability of Optical Fiber under High Optical Power and Small Bend Diameters", Proc International Microwave and Optoelectronics Conf. - IMOC, Natal, Brazil, 2011.
- [6] P. S. André, A. M. Rocha, F. Domingues, A. Martins, "Thermal model for optical fiber coating under tight bending diameters", In 15th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2010), Japan, 2010.
- [7] M. De Rosa, J. Carberry, V. Bhagavatula, K. Wagner, and C. Saravanos, "High-Power Performance of Single-Mode Fiber-Optic Connectors", J. of Lightwave Technology, vol. 20, 5, pp 879-885, 2002.
- [8] André Matins, Ana M. Rocha, P.S. André, "High power effect on fiber optic connectors", International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), Brazil, 2009.
- [9] Tatiana Berdinskikh, et al., "Development of cleanliness specifications for single mode angled physical contact MT connectors", OFC/NFOEC, 2008.
- [10] S. Yanagi, S. Asakawa, R. Nagase, "Characteristics of Fibre-Optic Connector at High Power Optical Incidence", Electronics Letters, vol.38, n°12, 2002.
- [11] Domingues, F., Rocha, A. M. and André, P. S., "High-power effects in damaged and contaminated optical fiber connectors". Microw. Opt. Technol. Lett., 53: 2485–2488, 2011.
- [12] P.S. André, M. Facão, A.M. Rocha, P. Antunes, A. Martins, "Evaluation of the fuse effect propagation in networks infrastructures with different types of fibers", Proceedings of Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2010.
- [13] P. S. André, A. M. Rocha, F. Domingues and A. Martins, "Improved model for coating heating by high power signals optical fiber under small bending diameters", Electron. Lett, vol.46, n°10, 2010.
- [14] M. Bigot-Astruc, P. Sillard, S. Gauchard, P. Le Roux, E. Brandon, "Analysis of coating temperature increase in fibers under high power and tight bending", Proc. of OFC, 2006
- [15] Giraldi, M. T. M. R., et al. "Brillouin Effects in Distributed Raman Amplifiers under Saturated Conditions", Proceedings of IEEE Mtt-S International Microwave and Optoelectronics Conference pp. 831-835, 2009.

- [16] Rocha, A. M., A. Martins, M. Facao and P. S. Andre., "Effect of bending in SMF fibers under high power", Proceedings of 11th International Conference on Transparent Optical Networks, pp. Th.B2.1, Azores, Portugal, 2009.
- [17] Rocha, A. M., et al., "The effect of high power propagation in bended fibers", Proceedings of 10th International Conference on Telecommunications. , pp. 303-304, 2009.
- [18] Martino Travagnin, Marco Ruzzier, and Francesco Sartori, "Measurement of optical fiber macrobending losses in a single turn with continuously-varying radius" Proc. of OSA - OFC/NFOEC, San Diego (USA), 2009.
- [19] S. L.L ogunov, M. E. DeRosa, "Effect of coating heating by high power in optical fibres at small bend diameters", Electron. Lett, vol. 39, pp.897-898, 2003.
- [20] F. Domingues, A. M. Rocha, P.S. André,"Failure Probability of Optical Fiber under High Optical Power and Small Bend Diameters", Proc International Microwave and Optoelectronics Conf.-IMOC, Natal, Brazil, 2011.
- [21] I. Severin, M.Caramihai, R.El Abdi, M. Poulain and A. Avadanaii, "Modelling Silica Optical Fiber Reliability: A Software Application", World Academy of Science, Engineering and Technology, 66, 2010.

Capítulo 4

Efeito rastilho em fibras especiais

4.1 Contextualização

A aplicação de fontes de bomba Raman de alta potência nas estruturas de redes óticas, induz uma preocupação crescente no que se refere ao perigo de ignição do efeito rastilho no cenário FTTH [1, 2].

O efeito rastilho, observado pela primeira vez por Kashyap em 1987, é um fenómeno caracterizado pela auto-destruição da fibra ao longo de quilómetros, que se propaga em direção à fonte de sinal ótico danificando todos os componentes ativos intermédios [1]. Geralmente, este fenómeno pode ocorrer em fibras que sustentam a propagação de sinais óticos de potências iguais ou superiores a 1.0 W [3].

O ponto de ignição do efeito rastilho é, geralmente, um ponto de temperatura elevada gerado a partir do aquecimento localizado da fibra. Este aquecimento localizado pode ser provocado por imperfeições na fibra e/ou curvaturas apertadas (que induzem uma elevada atenuação da fibra e por conseguinte a absorção do sinal ótico pela fibra), mas também por conectores contaminados e/ou danificados [4,5]. Estas deficiências na fibra, em situações de transmissão de sinais de alta potência, podem induzir um aquecimento localizado na fibra até uma temperatura elevada o suficiente para provocar a vaporização do núcleo da fibra (sílica). Este processo de vaporização do núcleo (zona de fusão) é alimentado pela fonte ótica e desloca-se na sua direção, até que a fonte seja desligada ou o valor da densidade ótica injetada diminua para um limiar abaixo da necessária para a auto-indução do fenómeno [3]. Após a propagação da zona de fusão, a fibra danificada apresenta uma sequência periódica de lacunas semelhantes às visíveis na Figura 4.1, o que torna a fibra inutilizável para transmissões óticas.

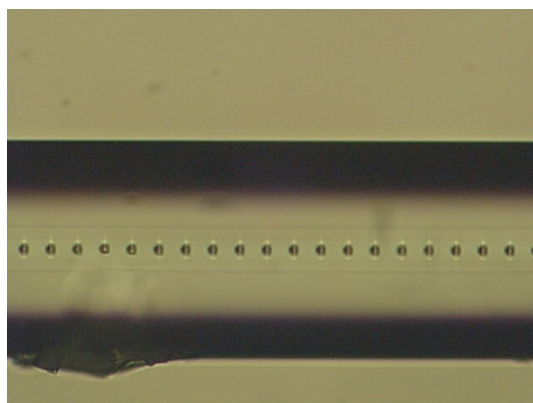


Figura 4.1- Imagem microscópica de uma fibra danificada pelo efeito rastilho, com uma sequência periódica de lacunas visíveis no núcleo da fibra.

Atualmente, este fenómeno auto-destrutivo da fibra tornou-se uma preocupação crescente tendo em conta o aumento da propagação de sinais óticos de elevada potência nas redes de comunicações [1, 2]. Para uma aplicação viável das FTTH, foram já propostas e estão em constante desenvolvimento novas soluções de fibra ótica para as operadoras de telecomunicações. Entre essas soluções encontra-se a fibra insensível à curvatura, em conformidade com a Recomendação ITU-T G.657.

O estudo da dinâmica de efeito rastilho na fibra monomodo, SMF (G.652.D), na fibra de dispersão deslocada não nula, NZDSF (G.655.C) e na fibra de dispersão deslocada (G.653.B) já foi reportada anteriormente [6,7]. No entanto, existe uma falta de conhecimento relacionado com o efeito rastilho em fibras G.657. Além disso, uma nova preocupação imergente está relacionada com o

facto de que, após a interrupção do efeito rastilho, o sinal ótico pode ser dispersado nas lacunas finais geradas pelo efeito rastilho e acoplado em modos não guiadas [8], o que resulta num aumento da temperatura local, devido à absorção do sinal no revestimento [5].

Assim, nesta secção do trabalho pretendemos avaliar o comportamento térmico das fibras G.657 e G.652.D, quando diferentes potências óticas são injetadas após o efeito rastilho ser interrompido.

Foram também estudadas as diferenças verificadas nas características do efeito rastilho para as fibras acima mencionadas, relativamente ao formato e período entre lacunas, quando o efeito rastilho é gerado com sinais de potências óticas diferentes.

4.2 Caraterísticas do efeito rastilho induzido na fibra G.657

A propagação do efeito rastilho foi avaliada em dois tipos de fibras: i) fibra insensível a curvaturas G.657 da Fujikura, com um diâmetro de campo modal (MDF) @ 1550 nm de 9.4 μm . Para efeito de comparação, o efeito rastilho foi também estudado na fibra padrão monomodo, SMF-28 G.652.D da Corning, com MDF @ 1550 nm de 10.4 μm . A fonte ótica usada para bombear a fibra foi um laser de Raman (IPG, modelo RLR-10-1480) com uma potência ótica máxima de 10.0 W emitindo a 1480 nm. O sinal ótico foi injetado na bobina de teste de fibra ótica através de um isolador ótico, e na outra extremidade da fibra, com a finalidade de despoletar o efeito rastilho, a fibra foi colocada em contacto com uma folha metálica.

Após a propagação do efeito rastilho, a fibra ótica ficou danificada permanentemente, apresentando um conjunto de lacunas na região do núcleo, como é característico deste fenómeno catastrófico. O núcleo da fibra ótica danificada foi observado com um microscópio ótico, sendo apresentadas na Figura 4.2, um exemplo das fotos recolhidas. Nestas, são visíveis as lacunas criadas depois da propagação do efeito rastilho, induzido por um sinal com uma potência ótica de 2.5 e 4.0 W.

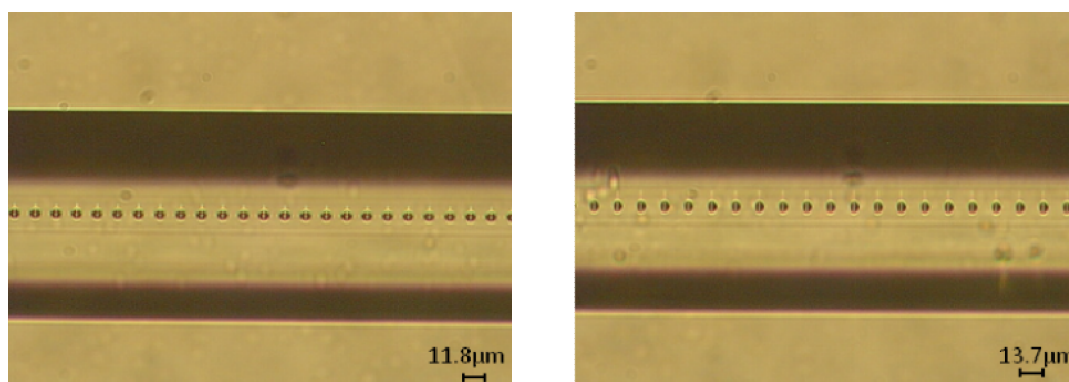


Figura 4.2- Fotografias de microscopia ótica das lacunas geradas pela zona de fusão do efeito rastilho na fibra G.657, para a potência ótica de 2.5 W (esquerda) e 4.0 W (direita).

Na Figura 4.3 são apresentados os valores do período espacial entre as lacunas em função da potência ótica injetada na fibra. Estes valores foram obtidos com base nas imagens microscópicas semelhantes às apresentadas na Figura 4.2. Para comparação, o período espacial das lacunas originadas numa fibra G.652 são também incluídas na representação gráfica.

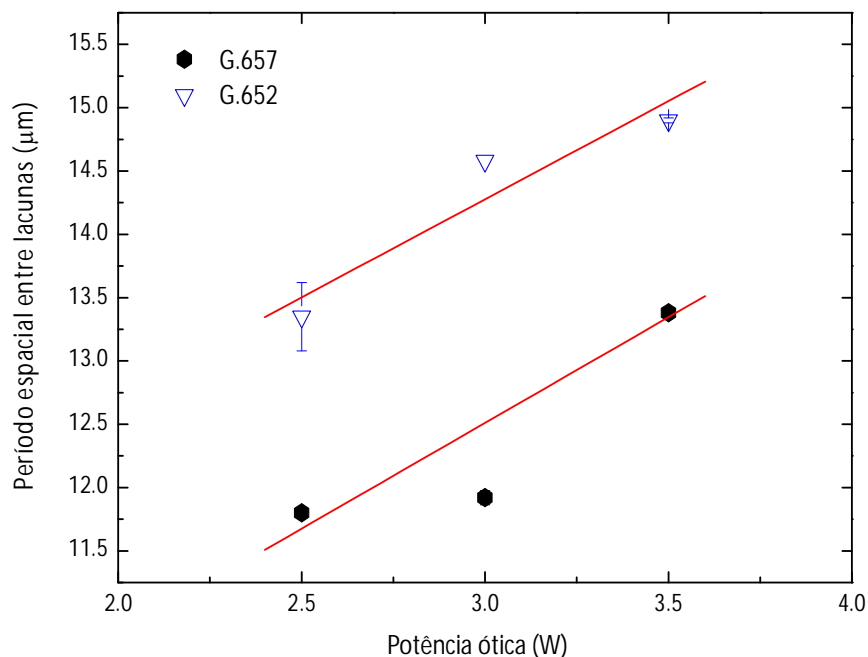


Figura 4.3 – Período espacial entre lacunas em função da potência ótica injetada para as fibras G.657 e G.652.D. Os pontos correspondem aos valores experimentais e a linha ao ajuste linear ($r^2 > 0.94$).

Para as gamas de potência ótica selecionada (2.5 - 4.0 W), embora o período espacial seja mais elevado (12%) para a fibra G.652.D (13.4-14.9 μm) relativamente aos medidos para a fibra G.657 (11.8 -13.4 μm), observou-se que estas fibras apresentam uma dependência linear semelhante, entre o período espacial das lacunas e a potência ótica injetada, sendo obtidos valores de proporcionalidade próximos (dentro da incerteza experimental), $0.155 \pm 0.12 \mu\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$ e $0.167 \pm 0.04 \mu\text{m}\cdot\text{W}^{-1}$ para as fibras G.652.D e G.657, respetivamente.

Para monitorizar a velocidade do efeito rastilho, foram utilizados dois sensores de temperatura com base em redes de Bragg (Fiber Bragg Gratings, FBG). Estes foram dispostos em contacto com a fibra ótica, na qual se induziu o efeito rastilho, para que a propagação da onda térmica associada a este efeito catastrófico fosse detetada, uma vez que a zona de propagação provoca um aumento da temperatura na superfície da fibra, passível de ser detetado por sensores FBG. Os sensores foram colocados com uma distância de 2.0 m entre si, e para assegurar um bom contacto térmico entre a fibra e o sensor FBG, um composto termo-condutor foi colocado na junção das fibras (sensor/fibra com efeito rastilho) [9].

As redes utilizadas foram inscritas com diferentes comprimentos de onda, para que pudessem ser multiplexadas e analisadas em simultâneo. Os comprimentos de onda de Bragg para as FBGs utilizadas tem os valores de 1545.15 nm e 1542.33 nm.

O comprimento de onda de Bragg medido é dependente da temperatura, e esta relação é representada pela equação (3.1), onde S_T representa a sensibilidade térmica da FBG [10].

$$\Delta\lambda_{Bragg} = S_T\Delta T \quad (4.1)$$

Após uma caracterização prévia, as redes utilizadas apresentaram uma sensibilidade térmica com o valor de $8.93 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Os resultados para o comprimento de onda de Bragg para ambas as FBGs foram obtidas através de um sistema de interrogação comercial FiberSensing, modelo FS4200, com um rácio de aquisição de 200 amostras por segundo. Na Figura 4.4 é apresentado o aumento da temperatura, em relação à temperatura ambiente, medido na interface externa da fibra, devido à propagação da onda térmica proveniente do efeito rastilho, gerado com um sinal com uma potência ótica de 4.0 W.

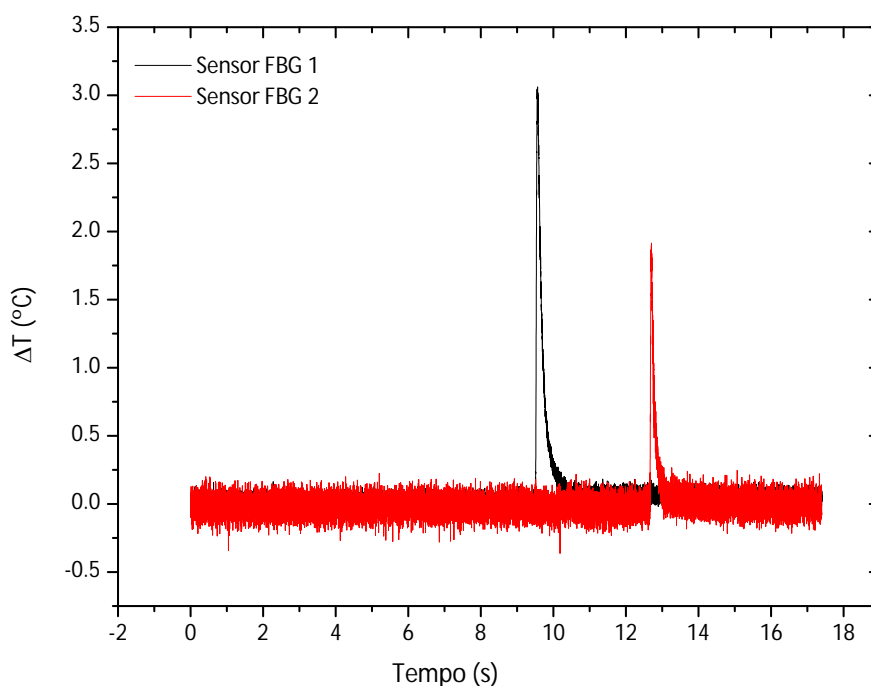


Figura 4.4 - Aumento da temperatura, em relação à temperatura ambiente, medido na interface externa da fibra, em função do tempo.

Os picos de temperatura correspondem ao momento em que a o efeito rastilho passa pelo local onde se encontra a FBG. A partir da diferença de tempo entre os picos de temperatura dos dois sensores é possível obter a velocidade de propagação do efeito rastilho.

Na Figura 4.5 é apresentada a velocidade de propagação do efeito rastilho, medida em função da potência ótica injetado na fibra, para as diferentes potências testadas.

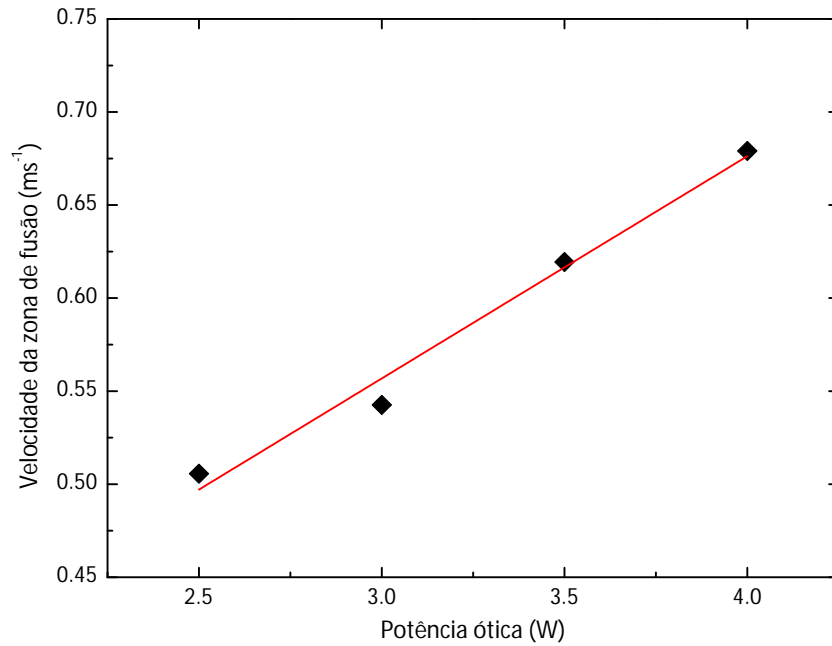


Figura 4.5- Velocidade da zona de fusão em função da potência ótica para a fibra G.657. Os pontos correspondem aos dados experimentais e as linhas ao ajuste linear ($r^2 > 0.97$).

A dependência da velocidade de propagação do efeito rastilho é facilmente ajustada a uma função linear, traduzida por uma constante de proporcionalidade de $0.17 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\text{MW}^{-1}\text{cm}^2$. Este valor é superior (32%) ao previamente reportado para as fibras G.652.D, G.653.B e G.655.C, $0.131 \pm 0.001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\text{MW}^{-1}\text{cm}^2$ [6]. Esta diferença pode estar relacionada com a diferença da concentração de dopante do núcleo e com os perfis de índice de refração.

O limiar de potência ótica do efeito rastilho foi também medido. Para tal, o sinal de laser foi injetado na fibra G.657, colocando um atenuador ótico variável entre a fonte de sinal e a fibra onde o efeito rastilho seria provocado. Após a ignição do efeito rastilho, a potência do sinal injetado na fibra foi reduzida continuamente, através do atenuador variável, até que o efeito rastilho cessasse [3]. Após a sua mitigação, o valor de potência limiar foi calculado obtendo-se um valor médio de $1.50 \pm 0.02 \text{ W}$. O valor obtido é ligeiramente superior (6%) ao valor reportado anteriormente para G.652.D fibras (1.39 ± 0.03) [3].

4.3 Monitorização da zona de paragem do efeito rastilho

Vários autores reportaram já que, após a mitigação do efeito rastilho, o sinal ótico poderá ser dispersado dos modos guiados e acoplados a modos não-guiados da fibra, o que resulta num aumento da temperatura local, devido à absorção do sinal pelo revestimento [8,5].

Neste contexto, a temperatura na zona de paragem do efeito rastilho foi monitorizado ao longo do tempo com uma câmara térmica (ThermaCAM™, © FLIR Systems), em dois tipos de fibras diferentes: i) fibras insensíveis à curvatura (G.657) da Fujikura (SR15E), e ii) fibra monomodo SMF-28 (G.652.D) da Corning.

Previamente, a esta análise térmica, o primeiro passo consistiu na ignição do efeito rastilho na extremidade da fibra ótica. A fonte de sinal ótico usado foi um laser de fibra de Raman (IPG, modelo RLR-10-1480), com um máximo de potência ótica de 10.0 W emitindo a 1480 nm. Para iniciar o efeito rastilho, o sinal ótico foi injectada numa bobina de fibra de teste, enquanto que a outra extremidade da fibra foi colocada em contacto com uma folha metálica para que a ignição do efeito do rastilho ocorresse. Este, foi iniciado com sinais com potências óticas de 3.0 e 4.0 W. Em seguida, o efeito rastilho foi interrompido numa região específica da fibra ótica, desligando-se a fonte de sinal ótico. Na zona de paragem do efeito rastilho, a fibra danificada apresentou lacunas semelhantes às visíveis na Figura 4.6. Nestas figuras são apresentas imagens de microscopia do ponto de paragem do efeito rastilho para as fibras G.652.D e G.657, e para as potências óticas de 3.0 e 4.0 W.

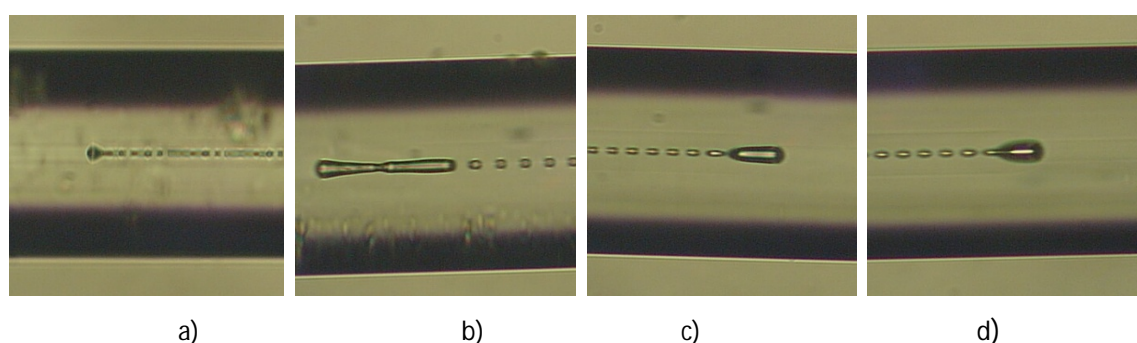


Figura 4.6 – Fotografias da microscopia ótica para a zona de paragem do efeito rastilho para, a) fibra G.657 com efeito rastilho a 3.0 W, b) fibra G.657 com efeito rastilho a 4.0 W c) fibra G.652.D com efeito rastilho a 3.0 W e d) fibra G.652.D com efeito rastilho a 4.0 W.

Quando a fonte ótica foi novamente ligada, o sinal ótico foi dispersado por estas lacunas finais e acoplado em modos não guiados, o que resultou num aumento da temperatura local, devido à absorção do sinal no revestimento. Para monitorizar esse aumento de temperatura, foi implementado um aparato experimental como ilustrado na Figura 4.7.

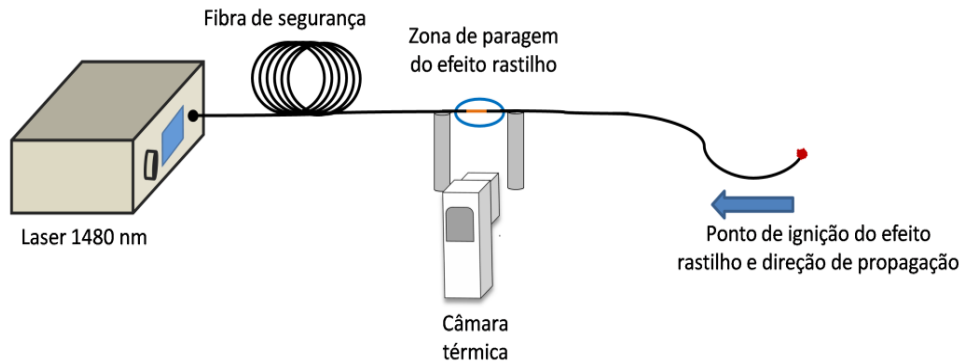


Figura 4.7- Aparato experimental implementado para monitorização da temperatura no ponto de paragem do efeito rastilho.

Um sinal ótico foi injetado na fibra e a temperatura na zona de paragem do efeito rastilho foi térmicamente monitorizada através de uma câmara térmica (ThermaCAM™, © FLIR Systems).

Este procedimento foi efetuado para fibras G.657-Fujikura e G.652.D- SMF-28 Corning. As potências óticas injetadas para esta análise térmica tiveram os valores de 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 e 3.0 W, num tempo máximo de exposição de 460 segundos. Durante este tempo de exposição, as imagens térmicas da zona final de fusão foram continuamente adquiridos em intervalos de 3 segundos.

4.3.1 Análise térmica do revestimento da fibra

Na Figura 4.8 apresentam-se as imagens térmicas recolhidas para um efeito rastilho gerado com 3.0 W para as duas amostras de fibras selecionadas (G.657 e G.652.D) e durante a injeção de uma potência ótica de 2.0 e 2.5 W.

Através das imagens térmicas adquiridas, é possível registar a temperatura atingida pelo revestimento para cada das amostras, sendo ainda de notar que, para a situação ilustrada ocorre a ignição e combustão do revestimento da fibra (figura inferior). De salguardar que, nas situações ilustradas, a fonte ótica foi colocada no lado direito da imagem. Este grupo de imagens são um exemplo do comportamento típico encontrado para as fibras em estudo.

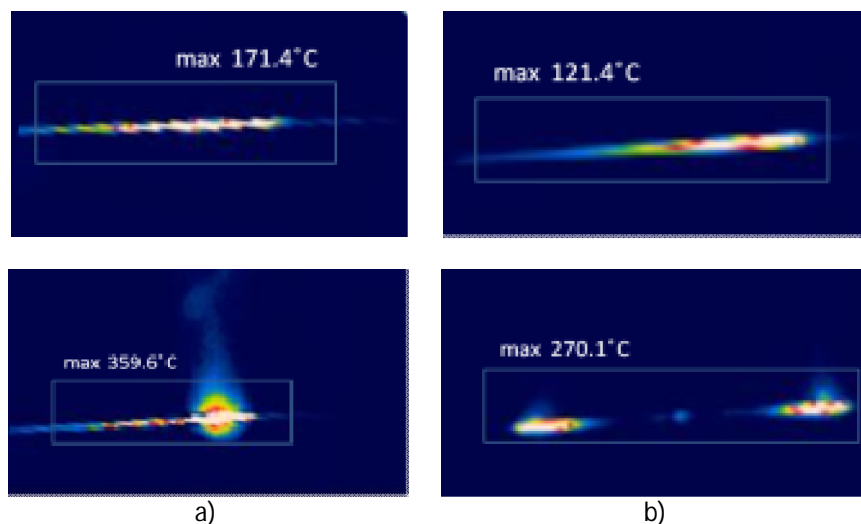
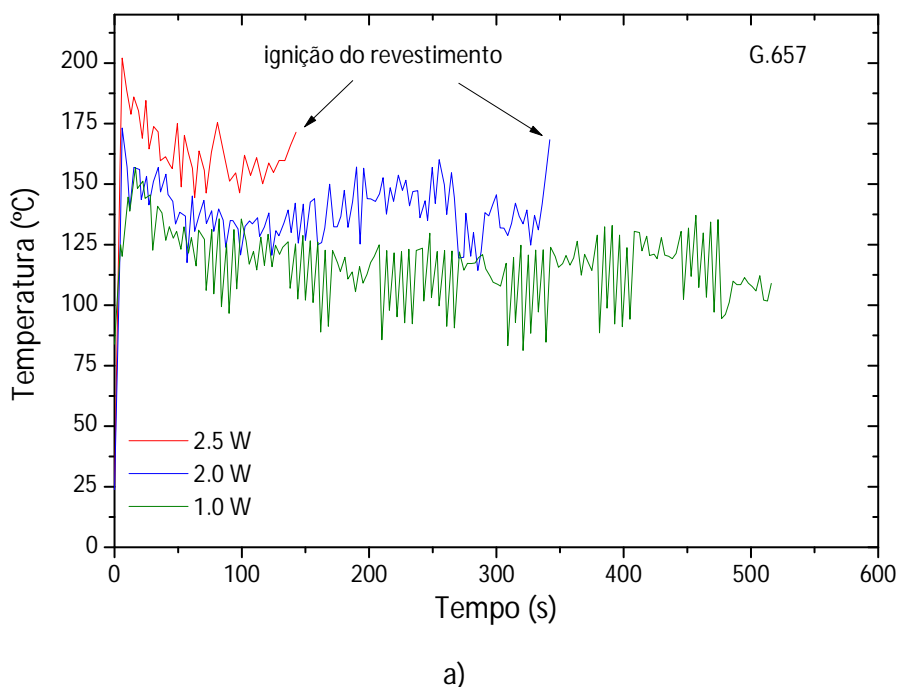
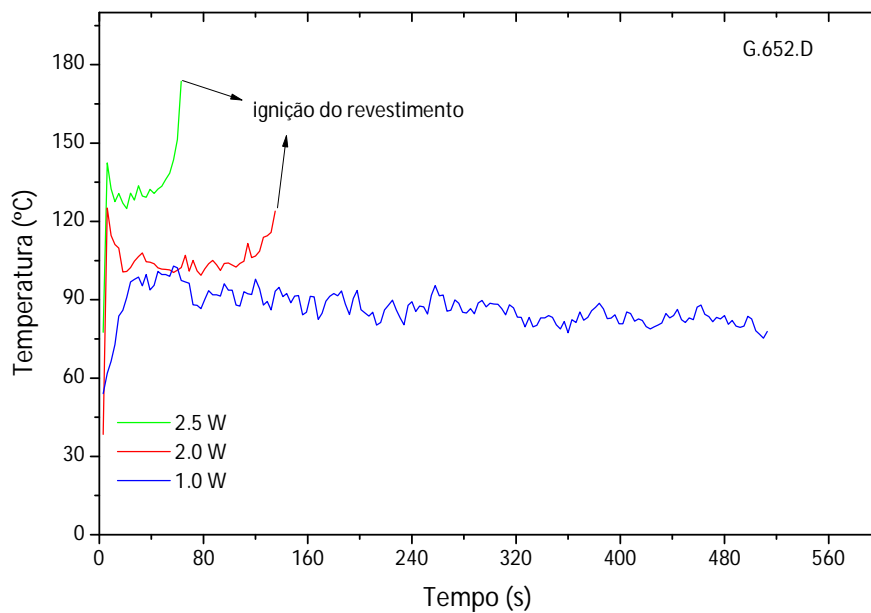


Figura 4.8- Sequência de imagens térmicas adquiridas da zona de paragem do efeito rastilho, perante a inserção de um sinal com potência ótica de 2.5 W para: a) Fibra G.657 e b) Fibra G.652.D. O efeito rastilho foi gerado a 3.0 W.

Os valores de temperatura recolhidos são apresentados graficamente na Figura 4.9. Nestas figuras estão representados os dados recolhidos para as fibras nas quais a potência ótica do sinal utilizado para a ignição e propagação de efeito rastilho teve o valor de 3.0 W.





b)

Figure 4.9- Variação de temperatura ao longo do tempo para sinais óticos com diferentes potências, para a) a fibra G657 e b) a fibra G.652.D.

É possível verificar que, a temperatura na zona de paragem do efeito rastilho aumenta com o aumento da potência ótica do sinal injetado. Da análise do valor médio da temperatura atingida pela fibra verificamos que o seu valor é 143 °C para a fibra G.657, em ambas as condições (efeito rastilho a 3.0 e 4.0 W), mas varia de 115.7 °C para 138.5 °C para as fibras G.652.D. Além disso, é visível que o valor médio da temperatura encontrada para a G.657 é superior ao medido para as fibras G.652.D. Ainda nesta análise, é perceptível que estas fibras (G.657) apresentam um valor de temperatura semelhante para ambas as condições de teste (efeito rastilho a 3.0 e 4.0 W).

Para além desta constatação, ficou também patente que para sinais com potências iguais ou superiores a 2.0 W, o revestimento da fibra entrou em ignição, nos tempos iniciais do teste, sendo este comportamento obtido para as duas fibras em análise.

Com base nos valores de temperatura recolhidos para as diferentes amostras, é possível comparar o comportamento térmico dos dois tipos de fibra em estudo, G.657 e G.652.D. Na Figura 4.10 apresenta-se o comportamento térmico de dois tipos de fibras testadas. A potência ótica do sinal inserido para a análise térmica, no ponto de paragem do efeito rastilho, tem o valor de 1.5 W.

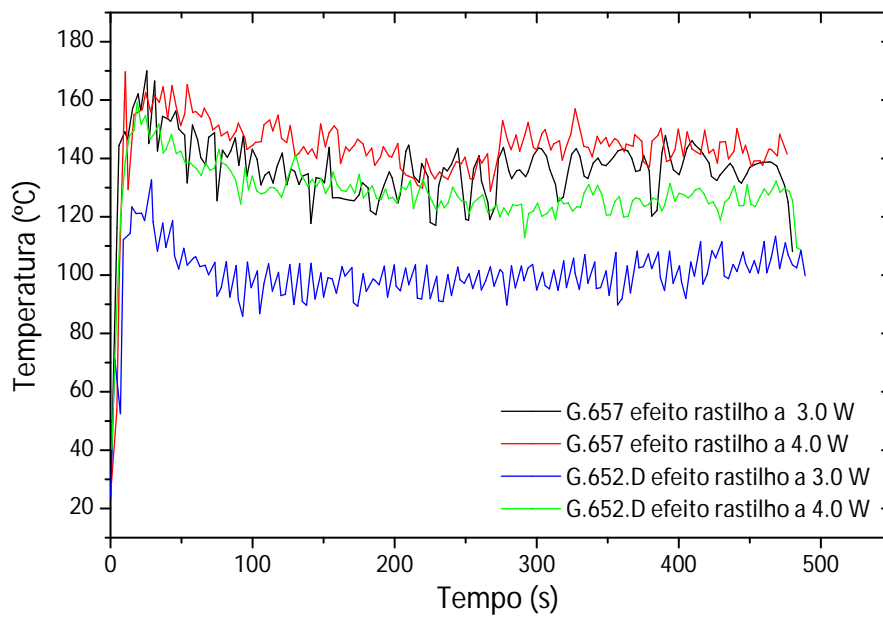


Figure 4.10- Dados recolhidos da monitorização térmica da zona de paragem do efeito rastilho para as fibras G.657 e G.652.D. O potência ótica de teste foi de 1.5 W.

Embora o comportamento térmico das duas fibras seja semelhante, a fibra G.657 regista um valor de temperatura mais elevado ao longo de todo o tempo de exposição. No entanto, as temperaturas atingidas pela G.652.D, com o efeito rastilho a 4.0 W, estão próximos das registadas para a fibra G.657. Este facto pode ser atribuído ao formato da lacuna final, e conseqüentemente ao tipo de dispersão do sinal ótico gerado, característico de cada uma das fibras e do valor do efeito rastilho induzido na fibra [11]. Na Figura 4.11 são apresentadas imagens microscópicas das lacunas finais (local onde ocorre a dispersão do sinal ótico para modos não guiados) geradas em cada uma das situações analisadas.

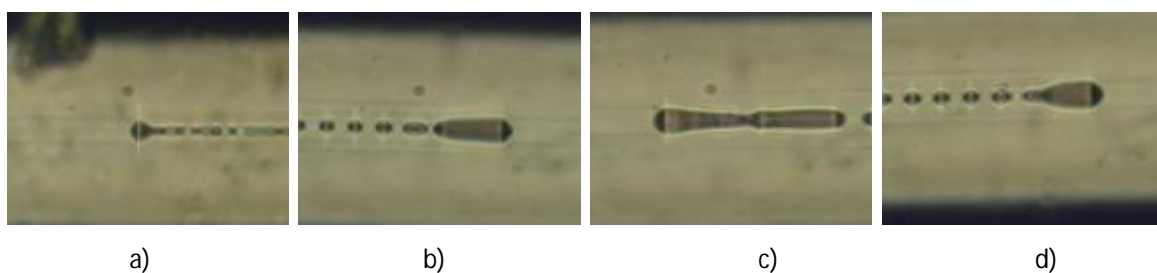


Figure 4.11- Imagens das lacunas finais para: a) fibra G.657 com efeito rastilho propagado a 3.0 W, b) fibra G.657 com efeito rastilho propagado a 4.0 W, c) fibra G.652.D com efeito rastilho propagado a 3.0 W, e d) fibra G.652.D com efeito rastilho propagado a 4.0 W.

Destas imagens de microscopia é possível observar que a forma da lacuna para a fibra G.652, com o efeito rastilho a 4.0 W é semelhante ao observado nas fibras G.657, o que pode explicar a proximidade dos valores de temperatura obtidos para os dois tipos de fibras.

Verifica-se também que, a fibra que apresenta um formato com diferenças mais acentuadas é a fibra G.652.D com o efeito rastilho gerado a 3.0 W, apresentando uma lacuna final com dimensões superiores às restantes lacunas. Na Tabela 4.1, são apresentadas as dimensões médias obtidas para as lacunas em análise.

Tabela 4.1- Dimensões das lacunas finais para as fibras G.657 e G.652.D.

Tipo de fibra	Altura (μm)	Largura (μm)
G.657 efeito rastilho 3.0 W	8.19	6.96
G.657 efeito rastilho 4.0 W	11.97	33.25
G.652.D efeito rastilho 3.0 W	9.65	69.69
G.652.D efeito rastilho 4.0 W	9.58	23.27

Na Figura 4.12 é apresentado um resumo dos valores da temperatura máxima atingida pelos dois tipos de fibra, em função da potência ótica injetada na fibra. De notar que, para os casos em que ocorreu a ignição do revestimento da fibra, os valores apresentados são os referentes ao momento que antecede o registo da ignição.

Nesta representação torna-se patente que o aumento do sinal de potência ótica injetado de 1.0 para 3.0 W é acompanhado por um aumento da temperatura, sendo este incremento menos acentuado para a fibra G.652.D com o efeito rastilho (ER) a 3.0 W.

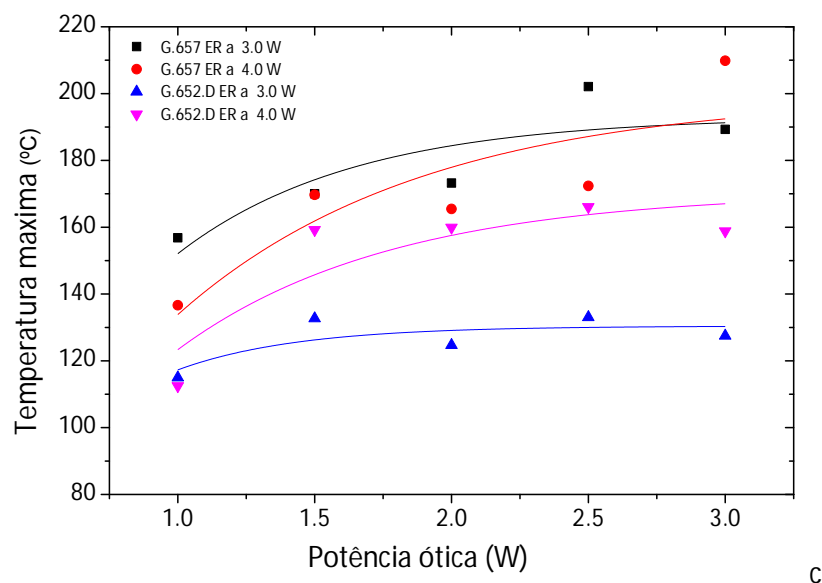


Figure 4.12- Valores de temperatura máxima obtidos em função da potência ótica injetada, para as fibras em teste. As linhas correspondem ao ajuste teórico.

A dependência da temperatura da fibra com a potência do sinal ótico pode ser reproduzida por um modelo térmico que considera que a saturação de absorção do revestimento, equação (4.2) o que implica uma saturação na temperatura máxima [5]:

$$T = T_{max}(1 - e^{-\beta P_{in}}) \quad (4.2)$$

onde, T_{max} corresponde aos valores de temperatura máxima atingida e β representa a constante de saturação. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores obtidos a partir do ajuste teórico da Equação (4.2) aos dados experimentais da Figura 4.12.

Tabela 4.2 Valores obtidos para a temperatura máxima teórica e constante de saturação.

	Temperatura máxima °C	Constante de saturação W^{-1}
G.657 ER a 3.0 W	193.1±8.6	1.6±0.3
G.657 ER a 4.0 W	199.6±17.9	1.1±0.3
G.652.D ER a 3.0 W	130.4±3.3	2.3±0.5
G.652.D ER a 4.0 W	170.7±10.8	1.3±0.3

É visível que à medida que a potência do sinal ótico injetado aumenta de 1.0 para 3.0 W, também a temperatura máxima aumenta, sendo este acréscimo menos acentuado para as fibras G.652.D.

Como referido anteriormente, além das amostras testadas para as potências óticas de 1.5 e 1.0 W, em todas as restantes amostras foi registada a ignição da combustão do revestimento durante a exposição a potências óticas superiores a 2.0 W. Na Figura 4.13 apresenta-se o tempo médio necessário que cada amostra demorou para iniciar a combustão do revestimento em função da potência ótica injetada.

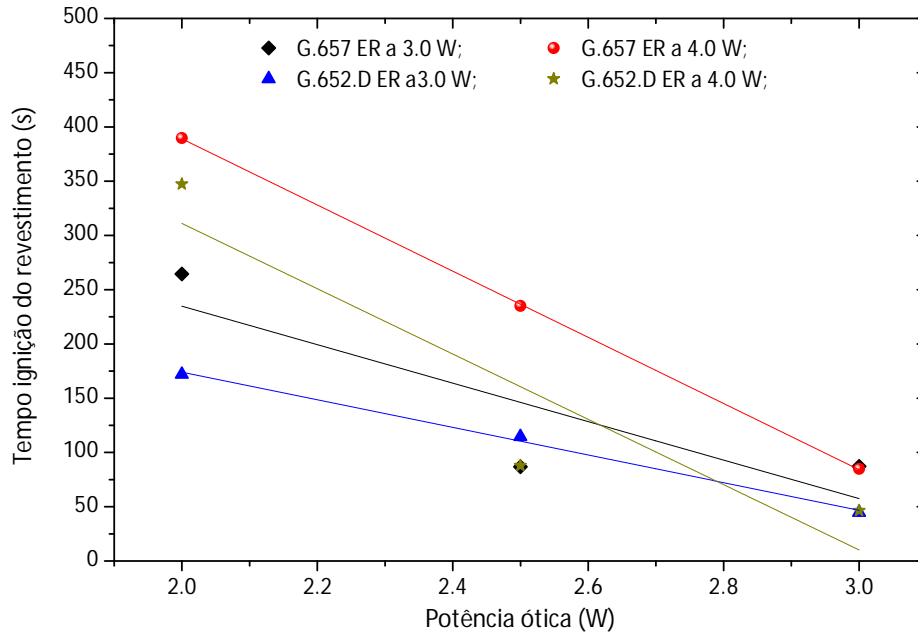


Figure 4.13-Tempo médio para ignição do revestimento em função da potência ótica inserida. As linhas correspondem ao ajuste teórico.

O tempo médio para ignição de revestimento, em geral, diminui à medida que a potência ótica inserida aumenta. Além disso, as amostras obtidas a partir do efeito rastilho propagado de 4.0 W apresentam uma razão entre o (tempo de ignição / potência inserida) maior do que as restantes amostras, tal como apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Ritmo de ignição do revestimento para as fibras G.657 e G.652.D

Tipo de Fibra	Ritmo de ignição do revestimento (s/W)
G.657 ER a 3.0 W	-177.3±10.3
G.657 ER a 4.0 W	-304.9±2.6
G.652.D ER a 3.0 W	-127.3±7.10
G.652.D ER a 4.0 W	-300.9±12.6

4.3.2 Análise microscópica

Após a realização dos testes térmicos, várias amostras da fibra danificada foram sujeitas a uma análise de microscopia da área lesada. Na Figura 4.14 apresenta-se as imagens obtidas para as amostras testadas para, 1.0 e 1.5 W para as fibras G.657 e G.652.D, respetivamente. Embora não se tivesse registado a ignição do revestimento da fibra no decorrer dos testes térmicos realizados para os sinais óticos com estas potências, é evidente pelas imagens recolhidas, que também o revestimento destas fibras sofreram danos visíveis. Além da área queimada (zona a castanho), é também patente uma diminuição no diâmetro de revestimento, na zona danificada pelo efeito rastilho.

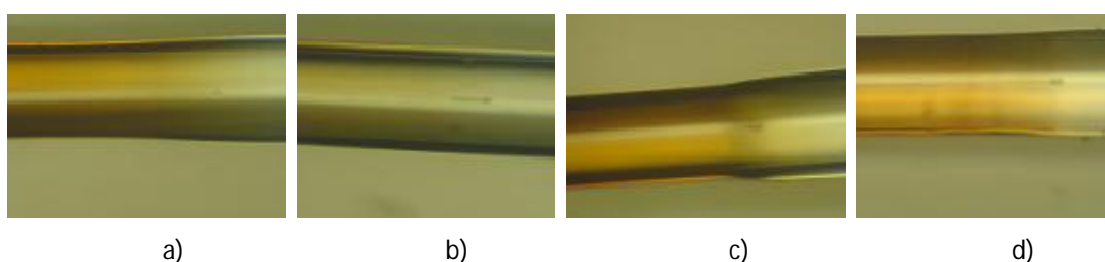


Figura 4.14- Imagens de microscopia para, a) fibra G.657 com o efeito rastilho (ER) a 3.0 W e sinal de potência ótica adicional (P_{AD}) de 1.0 W; b) fibra G.652.D com o ER a 3.0 W e P_{AD} de 1.0 W; c) fibra G.657 com o ER a 4.0 W e P_{AD} de 1.5 W e d) fibra G.652.D com ER a 4.0 W e P_{AD} de 1.5 W.

Na Figura 4.15, apresenta-se o valor da redução média do diâmetro do revestimento para cada situação estudada.

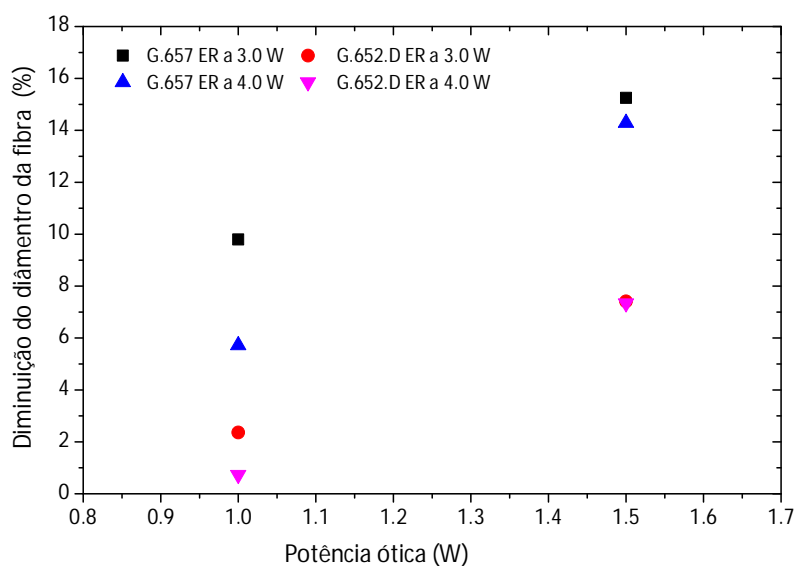


Figura 4.15- Diminuição média do diâmetro da fibra após a inserção de sinais de potências ótica de 1.0 W e 1.5 W durante 480 s.

Verifica-se que a fibra G.657 registou uma diminuição do diâmetro maior que a observada para a fibra G.652.D. Além disso, para uma potência ótica inserida de 1.5 W, a perda no diâmetro é superior à observada para a potência de 1.0 W. No entanto, no núcleo da fibra, onde se localizam as lacunas finais geradas pelo efeito rastilho não são registadas quaisquer alterações visíveis.

Para as restantes potências em teste (2.0, 2.5 e 3.0 W), os danos induzidos são mais evidentes, como é visível no exemplo apresentado na Figura 4.16. Este conjunto de imagens correspondem às microscopias recolhidas para a fibra G.652.D (à direita) e G.657 (à esquerda). Em ambas as amostras, o efeito rastilho foi iniciado com um sinal ótico de 3.0 W e a potência ótica injetada após a paragem de efeito rastilho teve o valor de 2.0 W.

Em todas as situações apresentadas a potência ótica foi inserida a partir da direita para a esquerda e todas as fibras sofreram a ignição durante os testes efetuados, o que significa que o revestimento foi completamente queimado e por isso, as imagens apresentadas correspondem ao conjunto bainha + núcleo da fibra ótica.

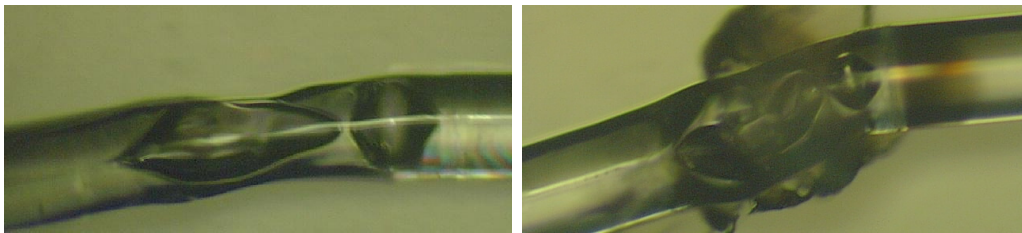


Figure 4.16- Imagens de microscopia da fibra G.657 (à esquerda) e G.652.D (à direita) após a ignição do revestimento originada por um sinal ótico de 2.0 W.

Nestas imagens é possível observar a dimensão dos danos adicionais causada pela potência ótica de 2.0 W, que conduz à fusão do núcleo de sílica e consequente rutura da fibra. É patente o aumento do volume considerável da lacuna final o que pode ser indicativo de que as temperaturas atingidas no núcleo da fibra são de facto bastante superiores àquelas medidas no revestimento da fibra, uma vez que os defeitos visíveis nas imagens recolhidas podem ser originados pela fusão do núcleo de sílica da fibra ótica.

4.4 Regime de velocidade não linear do efeito rastilho

Nos estudos previamente apresentados relativos à velocidade de propagação do efeito rastilho, esta apresenta um comportamento linear, quando correlacionado com a intensidade do sinal ótico [12]. No entanto, foi proposto um modelo teórico para descrever a dinâmica do efeito rastilho em fibras óticas que prevê uma correlação não linear entre a velocidade da zona fusível e a intensidade do sinal ótico [7].

Nesta secção, é apresentado o trabalho desenvolvido para observação experimental do regime não linear da velocidade de propagação do efeito rastilho, observada para a fibra dopada com Er^{3+} , proporcionando a verificação experimental das previsões teóricas desenvolvidas anteriormente [7].

O sinal ótico de um laser Raman (IPG, RLR-10-1480) emitindo em 1480 nm e com uma potência ótica máxima de 10 W foi injetada num comprimento de 5 m de fibra dopada com Er^{3+} (EM12-980-125, Fibercore), com um MFD@1480 nm de 5.9 mm. A potência do sinal ótico injetado variou entre 2.0 e 4.5 W (intensidade ótica de 5.6 e 16.5 MW.cm^{-2} , respetivamente). Para iniciar o efeito rastilho, a extremidade da fibra foi colocada em contacto com uma folha metálica, como já descrito em procedimentos anteriores. Para efeitos de comparação, uma fibra padrão monomodo (SMF28-G.652.D, Corning) com um MFD de 10.1 mm também foi utilizada. A velocidade de descarga ótica do efeito rastilho foi monitorizada com a implementação de dois sensores de temperatura FBG, dispostos em contacto com a fibra ótica com uma distância entre si de 2.0 m [9].

Assim, a velocidade da zona de fusão para fibra ótica dopada com Er^{3+} foi monitorizada em função da potência do sinal ótico injetado (2.0 - 4.5 W). Para comparação, os dados recolhidos foram relacionados com os obtidos anteriormente para a fibra SMF G.652.D [6]. Estes dois tipos de fibras óticas diferem no valor de MDF o que irá resultar em diferentes valores de intensidade do sinal ótico de propagação. Em particular, para os sinais óticos de energia dentro da gama 2.0 - 4.5 W, as respetivas intensidades irão variar de 2.5-5.6 MW.cm^{-2} e 7.3-16.5 MWcm^{-2} para as fibras SMF G.652.D e a fibra dopada com Er^{3+} , respetivamente. Estes resultados mostram claramente um aumento significativo da intensidade do sinal ótico para as fibras dopadas com Er^{3+} , o que terá um forte impacto sobre o regime de velocidade de propagação da zona de fusão, conforme detalhado a seguir.

A Figura 4.17 mostra a dependência da velocidade de zona de fusão em função da intensidade do sinal ótico de propagação para as fibras óticas seleccionadas. Considerando que é observado um

regime linear em toda a faixa de intensidades analisadas para a fibra SMF, para a fibra dopada com Er^{3+} , observa-se um regime transitório inicial, em que a velocidade da zona de fusão mostra uma dependência linear com intensidade do sinal ótico, seguido por um regime de saturação para uma intensidade ótica superior a $12.5 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}$. A observação deste regime não linear foi a primeira prova experimental de suporte ao modelo teórico descritivo da dinâmica de propagação do efeito rastilho em fibras óticas [7], o que confirma a capacidade do modelo para prever, de uma maneira rápida e simples, a evolução do efeito rastilho numa fibra ótica.

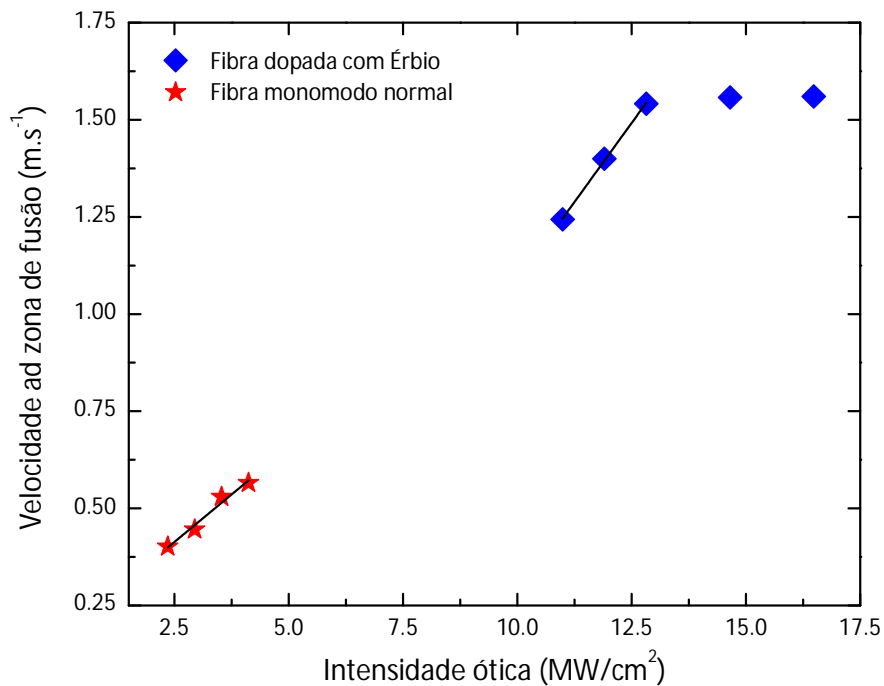


Figura 4.17- Velocidade da zona de fusão em função da intensidade do sinal ótico para fibras dopadas com Er^{3+} e fibra G.652.D.

A região linear da velocidade de propagação da zona de fusão em função da densidade de potência apresenta uma proporcionalidade de $0.1621 \pm 0.0006 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MW}^{-1}\cdot\text{cm}^2$ para as fibras dopadas com Er^{3+} (antes da saturação). Este valor é ligeiramente superior ao reportado para as fibras G.652.D ($0.1307 \pm 0.0006 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{MW}^{-1}\cdot\text{cm}^2$) [6]. No entanto, a velocidade da zona de fusão é maior para as fibras dopadas com Er^{3+} , do que aquela observada para as fibras SMF. Estes resultados podem ser explicados com base nos valores distintos de absorção ótica apresentados pelas duas fibras (a 1480 nm), nomeadamente, $8.0 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ e $0.24 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ para a fibra dopada com Er^{3+} e G.652.D, respetivamente. O valor mais elevado de absorção das fibras dopadas com

Er^{3+} impõe um aumento mais rápido da temperatura e, por conseguinte, uma mais rápida difusão térmica para as regiões vizinhas [13].

Para quantificar os danos provocados pelo efeito rastilho na fibra dopada com Er^{3+} , foram recolhidas imagens microscópicas da secção da fibra danificada após a propagação do efeito rastilho, Figura 4.18, revelando a presença de uma cadeia de lacunas periódica, no núcleo da fibra ótica, cujas dimensões e período espacial (Δs) dependem da intensidade ótica com que o efeito rastilho foi propagado, Tabela 4.4.

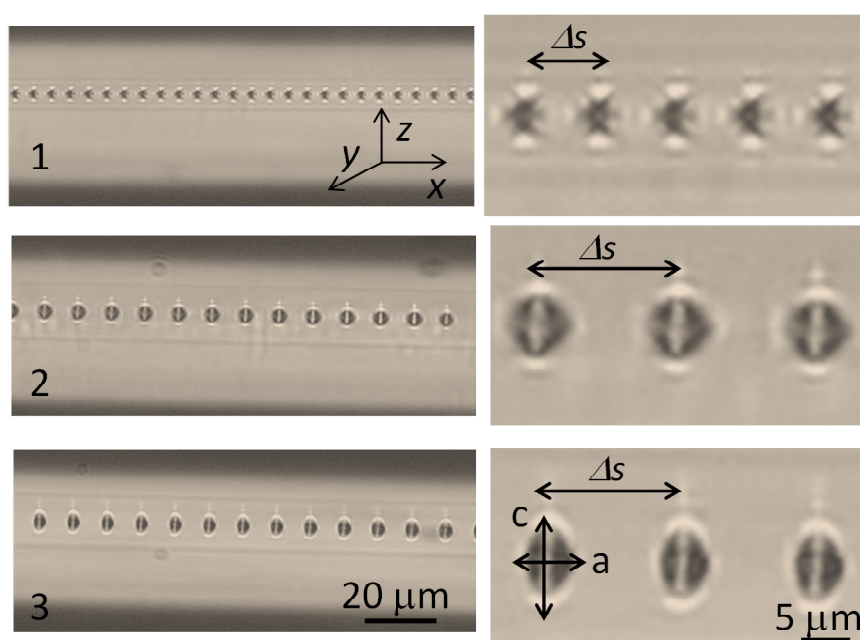


Figura 4.18- Imagens de microscopia para a fibra dopada com Er^{3+} , depois da passagem da zona de fusão com as intensidades de 1) 11.0, 2) 12.8 e 3) 14.6 MW cm^{-2} . As imagens da direita correspondem à ampliação das lacunas visíveis à esquerda.

O aparecimento destas lacunas é atribuído às reações exotérmicas, envolvendo os locais não oxidados da sílica dopada com Ge [14], sendo que as lacunas são o resultado da formação de uma ponte intrínseca no interior oco da sílica fundida, atrás da zona de fusão propagada e da sucessiva compressão devida ao arrefecimento brusco das lacunas isoladas, sob um gradiente de temperatura acentuado ao longo da fibra [6].

A partir da Figura 4.18, foi obtido o período espacial entre as lacunas (Tabela 4.4), sendo depois comparados com os reportados anteriormente para a fibra SMF, verificando-se que estes apresentam valores semelhantes [15]. De notar que o período espacial permanece constante para os valores de intensidade entre 12.8 e 14.6 MW cm^{-2} .

Tabela 4.4- Período especial das lacunas (ΔS), comprimento dos semi-eixos principais da elipsoide (a , b e c) e volume (V), em função da intensidade ótica (I) para fibras dopadas com Er^{3+} .

I (MWcm ⁻²)	ΔS ($\pm 0.5\mu\text{m}$)	$a=b$ ($\pm 0.5\mu\text{m}$)	c ($\pm 0.5\mu\text{m}$)	V (μm^3)
11.0	8.5	2.7	3.4	101
12.8	15.9	5.9	6.1	875
14.6	15.1	7.3	5.4	1202

Todos as lacunas podem ser descritas por um elipsoide com uma geometria tridimensional dada por:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c}\right)^2 = 1 \quad (4.3)$$

onde a , b e c representam o comprimento dos semi-eixos principais ao longo dos x , (propagação do sinal ótico) direções y e z , respectivamente. Os comprimentos a e c foram estimados como função da potência ótica a partir da Figura 4.18. Tendo em conta a simetria da fibra, a dimensão segundo a direção y (b) foi assumida como sendo igual à dimensão ao longo de x (a). Com base nas dimensões apresentadas na Tabela 4.4, foi calculado o volume das lacunas, tendo por referência que o volume de uma elipsoide é dada por:

$$V = \frac{4}{3} \pi abc \quad (4.4)$$

Assim, foi possível demonstrar que o volume, V , aumenta de ~101 para 1202 μm^3 , com o aumento da intensidade ótica de 11.0 para 14.6 MW.cm⁻², indicando que para valores de potência ótica mais elevados, o efeito rastilho induz um aumento da quantidade de plasma na zona de fusão.

4.5 Conclusão

Nesta secção foi apresentado o estudo efetuado em fibras insensíveis a curvaturas, relativamente ao seu desempenho perante a propagação do efeito rastilho e características do mesmo para este tipo de fibras. Após a propagação e mitigação do efeito rastilho, procedeu-se à análise térmica da zona de paragem deste fenómeno catastrófico, quando, adicionalmente, são injetados na fibra sinais óticos com diferentes potências. Verificamos que para potências óticas superiores a 1.5 W a fibra foi inflamada, provocando a combustão de revestimento. Embora a fibra G.567 tenha registado maiores valores de temperatura em todos os testes realizados, a ignição do revestimento teve início, em geral, mais tarde, quando comparado com a fibra G.652.D. Relativamente às temperaturas médias do revestimento registadas, foi verificado que as fibras G.657 exibiram um valor de temperatura média superior com os valores de 142.8 ± 5.8 e 144.3 ± 7.7 °C para as fibras G.657 e 115.7 ± 5.4 e 148.5 ± 11.2 °C para fibras G.652.D, respetivamente. A dinâmica da propagação da zona de fusão do efeito rastilho para as G.657 foi também estudada nesta secção e comparada com o desempenho das fibras G.652.D. Verificou-se que, para a mesma densidade de potência ótica, a velocidade da zona de fusão é 32% maior nas fibras G.657, quando comparadas com os valores obtidos para as fibras G.652.D. Esta diferença pode dever-se à variação da concentração de dopante entre as fibras, mas também aos diferentes perfis de índice de refração do núcleo. Além disso, as fibras G.657 exibem um período espacial entre lacunas menor (12%) sendo o limiar de potência ótica para a propagação da zona de fusão também menor.

Ainda neste âmbito, foi também estudada a velocidade da zona de fusão do efeito rastilho para fibras óticas dopadas com Er^{3+} , comparando os valores obtidos com os reportados para fibras SMF G.652.D. Para as fibras dopadas com Er^{3+} , foi observado experimentalmente, pela primeira vez, um regime de saturação da velocidade da zona de fusão para intensidades óticas superiores 12.5 MW.cm^{-2} . A observação deste regime de saturação proporciona o suporte experimental das previsões teóricas desenvolvidas anteriormente no contexto de um modelo teórico simples envolvendo equações diferenciais.

Referências

- [1] R. Kashyap, K. J. Blow, "Observation of catastrophic self-propelled self-focusing in optical fibres", *Electronic letters*, 24, 47–49, 1988.
- [2] P.S. André, et al., "Optical Fibers Bending Limits for the Optical Fiber Infrastructures", 9th IEEE Africon Conference, 882-884, 2009.
- [3] Rocha, Ana M., F. Domingues, M. Facão, and P. S. André. "Threshold power of fiber fuse effect for different types of optical fiber", *In 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1-3. IEEE, 2011.
- [4] Domingues, F.; Rocha, Ana M.; André, P.S; "High-power effects in damaged and contaminated optical fiber connectors", *Microwave and Optical Tech. Letters*, Vol. 53, No. 11, pp. 2485 - 2488, November, 2011.
- [5] Andre, P. S., A. M. Rocha, F. Domingues, and A. Martins. "Improved thermal model for optical fibre coating owing to small bending diameter and high power signals." *Electronics Letters* 46, no. 10, 695-697, 2010.
- [6] P. S. André, et al., "Evaluation of the Fuse Effect Propagation in Networks Infrastructures with Different Types of Fibers", *Conference on Optical Fiber Communication (OFC)/Collocated National Fiber Optic Engineers (NFOEC)*, JWA10, 2010.
- [7] M. Facão, et al., "Traveling Solutions of the Fuse Effect in Optical Fibers", *IEEE J. Journal of Lightwave Technology*, 29, 109-114, 2011.
- [8] Makoto Yamada, et al., "Heating and burning of optical fiber by light scattered from bubble train formed by optical fiber fuse", *Conference on Optical Fiber Communication (OFC)/Collocated National Fiber Optic Engineers (NFOEC)*, ThA1, 2011.
- [9] Ana M. Rocha, et al., "Detection of Fiber Fuse Effect Using FBG Sensors", *IEEE Sensors Journal*, 11, 1390-1394, 2011.
- [10] P. F. C. Antunes et al., "Optical fiber accelerometer system for structural dynamic monitoring," *IEEE Sensors J.*, vol. 9, no. 11, pp. 1346–1354, 2009.
- [11] Domingues, F.; Rocha, Ana M.; André, P.S; R Frias; M.R. Ferreira; "Temperature Monitoring of Bend Insensitive Fibers After the Fuse Effect Propagation", *Proc Optical Fiber Sensors Conf.*, Monterey, United States, Vol. STu1F, pp. STu1F.4 - STu1F.4, 2012.
- [12] Atkins, R.M., Simpkins, P.G., and Yablon, A.D., "Track of a Fiber Fuse: A Rayleigh Instability in Optical Waveguides", *Optics Letters*, 28, (12), pp. 974-976, 2003.
- [13] Shuto, Y., Yanagi, S., Asakawa, S., Kobayashi, M., and Nagase, R., "Evaluation of High-Temperature Absorption Coefficients of Optical Fibers", *Ieee Photonics Technology Letters*, 16, (4), pp. 1008-1010, 2004.
- [14] Todoroki, S.-i., "Fiber Fuse Propagation Behavior", in Moh. Yasin, S.W.H.a.H.A. (ed.), *Selected Topics on Optical Fiber Technology*, (InTech), 2012.

- [15] Driscoll, T.J., Calo, J.M., and Lawandy, N.M., "Explaining the Optical Fuse", *Optics Letters*, 16, (13), pp. 1046-1048, 1991

Capítulo 5

Sensores FPI com base no efeito rastilho

5.1 Contextualização

Nas últimas décadas, os sensores baseados em redes de Bragg (FBG) e em micro-cavidades interferométricas Fabry-Perot (FPI), tornaram-se um dos sistemas mais atraentes no que respeita a tecnologias de sensores em fibra ótica. Contudo, a sua produção requer um investimento financeiro elevado e implementações experimentais complexas [1,7,8].

Com o intuito de diminuir esse investimento e complexidade, foram investigadas soluções de baixo custo para a produção de micro-cavidades com características sensoriais, a partir da reciclagem de fibra ótica danificada pelo efeito rastilho. Esta técnica reduz significativamente a complexidade experimental dos mecanismos de sensoriamento, assim como os custos de produção. A viabilidade destes sensores foi estudada para implementação na monitorização de diferentes parâmetros, tais como, o índice de refração (IR), pressão hidrostática (P), tensão (S) e altas temperaturas (T).

Nas últimas décadas, devido aos consideráveis investimentos na investigação, os sensores de fibra ótica tornaram-se uma das tecnologias de monitorização mais promissoras. Este resultado advém das vantagens que estes sensores apresentam quando comparados com sistemas tradicionais de deteção eletrónica, sendo estas, o seu peso e volume reduzido, a imunidade à interferência eletromagnética, o isolamento elétrico, entre outras [1]. Assim sendo, hoje em dia, sensores de fibra ótica são amplamente utilizados para a monitorização de parâmetros físicos, tais como a tensão, a temperatura, o índice de refração e a pressão em diversas aplicações [2,4].

Entre as tecnologias de deteção em fibra ótica, as baseadas em FBG [1-4], ou micro-cavidades FPI [5-8], tornaram-se as mais atraentes para a comunidade científica e industrial, não só devido ao seu tamanho diminuto e à sua resposta linear mas também devido à sua maior sensibilidade. Embora as micro-cavidades Fabry Perot tenham já anteriormente mostrado possuir uma resposta e sensibilidade precisas, sendo, portanto, adequadas para tecnologias de sensores, os custos de implementação e de produção requerem altos investimentos económicos e implementações complexas [5-7]. Nos últimos anos, vários trabalhos foram apresentados envolvendo a produção, aplicação e caracterização de micro-cavidades. No entanto, a sua produção requer frequentemente o uso de um laser femtosegundo pulsado, o que necessita de sistemas de alinhamento e posicionamento complexos [7, 8].

Uma cavidade FPI é composta por duas superfícies refletoras com um meio intermédio, capaz de criar uma reflexão periódica no domínio espectral de frequência. A fase do sinal ótico refletido, ϕ_{FPI} , é influenciada pelo comprimento da cavidade, de acordo com a seguinte equação:

$$\phi_{FPI} = \frac{4\pi}{\lambda} n_{eff}L \quad (5.1)$$

onde, λ é o comprimento de onda do sinal ótico, n_{eff} é o índice de refração do material da cavidade ($n_{eff} = 1$ para o ar como o meio intermediário) e L é o comprimento físico de micro-cavidade. O período do sinal ótico refletido depende do comprimento da cavidade, e a sua dependência pode ser traduzida pela equação (5.2), segundo a qual, a relação entre o período de modulação, Γ , o comprimento de onda do sinal, λ , o índice de refração efetivo da cavidade, n_{eff} , e o comprimento da cavidade, L , é dada por [8]:

$$\Gamma = \frac{\lambda^2}{2 n_{eff}L} \quad (5.2)$$

Contudo, este modelo para uma cavidade FPI ideal, não é exato para a descrição de micro-cavidades em fibra ótica. Para uma descrição mais precisa deste tipo de micro-cavidades, é

necessário corrigir a equação 5.2, considerando que reflexão é originada por dois espelhos esféricos possibilitando a existência de vários modos transversais [9]. Os modos óticos na micro-cavidade podem ser descritos pelos modos Hermite-Gaussian, que comportam uma diferença de fase adicional (diferença de fase de Gouy) [10]. Assim a equação 5.2, poderá ser reescrita como:

$$\Gamma = \frac{\lambda^2}{2 n_{\text{eff}}L} (1 + \phi(L)) \quad (5.3)$$

onde $\phi(L)$ corresponde à diferença de fase adicional devida à geometria da micro cavidade, descrita por:

$$\phi(L) \propto \arccos \left(\sqrt{1 - \frac{L}{R_1}} \sqrt{1 - \frac{L}{R_2}} \right) \quad (5.4)$$

em que R_1 e R_2 são os raios de curvatura da micro-cavidade.

Com base nesta relação é possível monitorizar parâmetros físicos capazes de influenciar a resposta da micro-cavidade FPI através da alteração das condições iniciais que descrevem o seu funcionamento.

Nas secções seguintes será apresentada uma solução eficaz e inovadora para a produção de micro-cavidades, com base na reciclagem de fibras óticas destruídas pelo efeito rastilho. Esta técnica reduz consideravelmente os custos de produção dos sensores, fazendo com que o processo de fabricação apresente custos e complexidade experimental menores.

Como referido em secções anteriores, o efeito rastilho na fibra ótica foi testemunhado pela primeira vez em 1987 [11] e caracteriza-se pela autodestruição contínua de fibra ótica. Este fenómeno destrutivo e irreversível, cria uma região de plasma (~ 3000 K) que se move continuamente no sentido da fonte ótica, vaporizando o núcleo da fibra e criando estruturas periódicas (lacunas) como resultado da vaporização do núcleo da fibra de sílica [12-14].

Na Figura 5.1- a) é apresentada uma imagem do núcleo da fibra (modelo SMF28e, Corning) destruída pelo efeito rastilho, tendo este sido iniciado com uma potência ótica de 3.0 W. Na referida figura, é visível a presença de uma cadeia periódica de lacunas com um período de 14 μm , situação típica deste fenómeno já descrita anteriormente [15]. As lacunas geradas pelo efeito rastilho são na realidade micro-cavidades, como constatado por microscopia eletrónica de varrimento (SEM) da secção transversal da fibra, Figura 5.1- b). O efeito rastilho danifica permanentemente a fibra ótica, deixando-as impróprias para a sua usual aplicação para transmissão de sinais óticos.

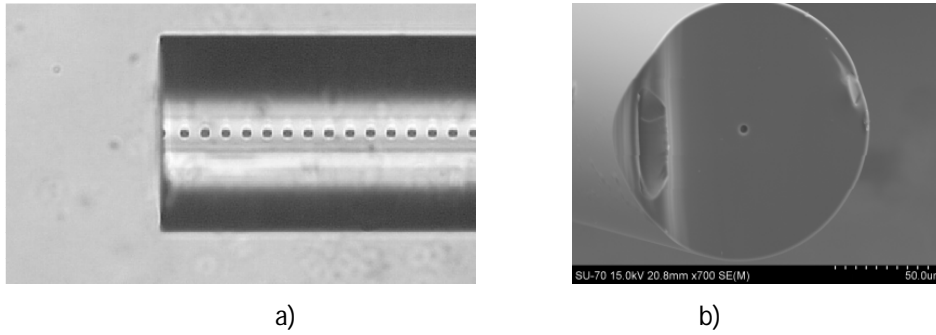


Figura 5.1- a) Imagem microscópica da fibra danificada pelo efeito rastilho, com as lacunas espaçadas periodicamente, visíveis no núcleo da fibra; b) Imagem SEM da secção transversal da fibra clivada numa lacuna.

Para obter as micro-cavidades usadas para a produção do sensor FPI, a fibra destruída, contendo as lacunas é acoplada com uma fibra padrão segundo os métodos descritos na secção seguinte.

5.2 Produção de sensores

A produção das micro-cavidades envolve, como referido anteriormente, a destruição da fibra ótica através do efeito rastilho, induzido numa fibra ótica padrão (SMF G.652.D Corning), através de um laser Raman (IPG, Modelo RLR-10-1480) com um sinal ótico de comprimento de onda de 1480 nm e uma potência ótica de 3.0 W. A fibra danificada foi, em seguida, clivada na área contendo as lacunas geradas pelo efeito rastilho, e fundida novamente a uma fibra padrão SMF G.652.D, utilizando uma máquina de fusão (Fujikura, modelo FSM-060S), Figura 5.2 a) e b), gerando uma lacuna maior na zona de fusão, como ilustrado nas Figura 5.2- c) e d).

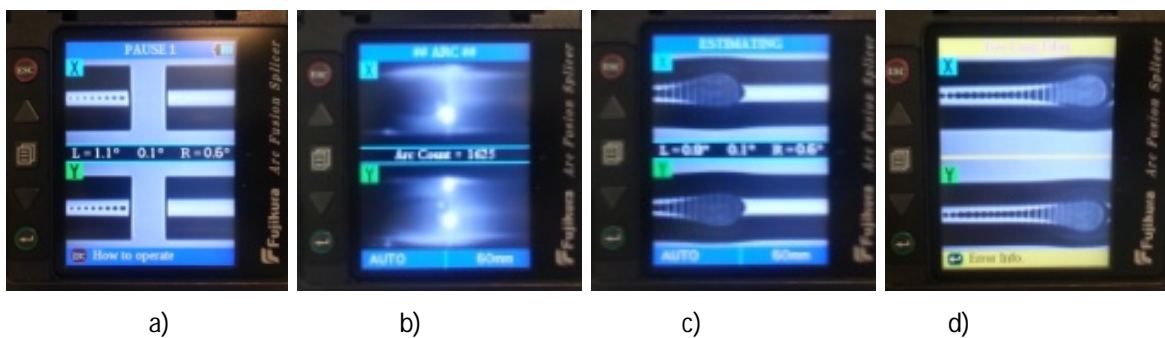


Figura 5.2- Fotografias ilustrativas das etapas efetuadas para a produção dos sensores baseados em micro-cavidades.

Para a obtenção de sensores de pressão hidrostática e índice de refração, a fibra contendo a lacuna de maior dimensão é clivada alguns micrómetros após a zona de fusão, Figura 5.3- a), com a finalidade de obter uma estrutura na extremidade da fibra, como é visível na Figura 5.3- b).

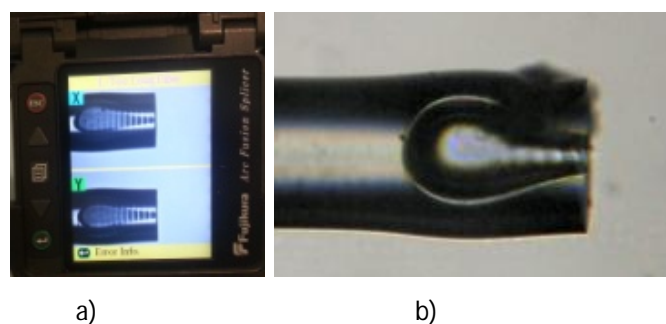


Figure 5.3 – Estrutura final tipicamente obtida no fabrico de sensores para monitorização de índice de refração e pressão hidrostática.

Para o fabrico das micro-cavidades aplicáveis para sensores de alta temperatura e tensão, é necessário efetuar um passo adicional, que consiste numa segunda fusão, entre a fibra contendo a estrutura visível na figura 5.3- b) com uma fibra SMF G.652.D (Figura 5.4- a) e 5.4- b)), de modo

a gerar as micro-cavidades visíveis nas Figuras 5.4- c) e 5.4- d).

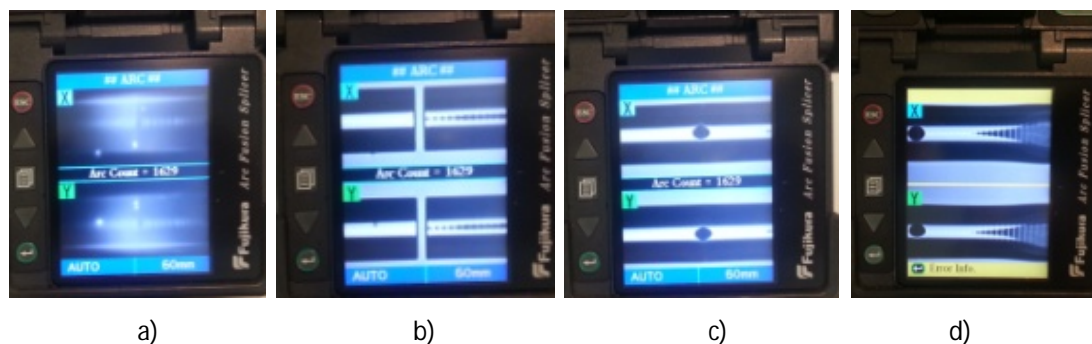


Figura 5.4 – Imagens das etapas complementares para a produção de sensores de deformação e temperatura.

Com base nesta metodologia foram produzidos quatro tipos de sensores, nomeadamente, sensores de índice refração (IR), pressão hidrostática (P), tensão (S) e altas temperaturas (T), visíveis na Figura 5.5.

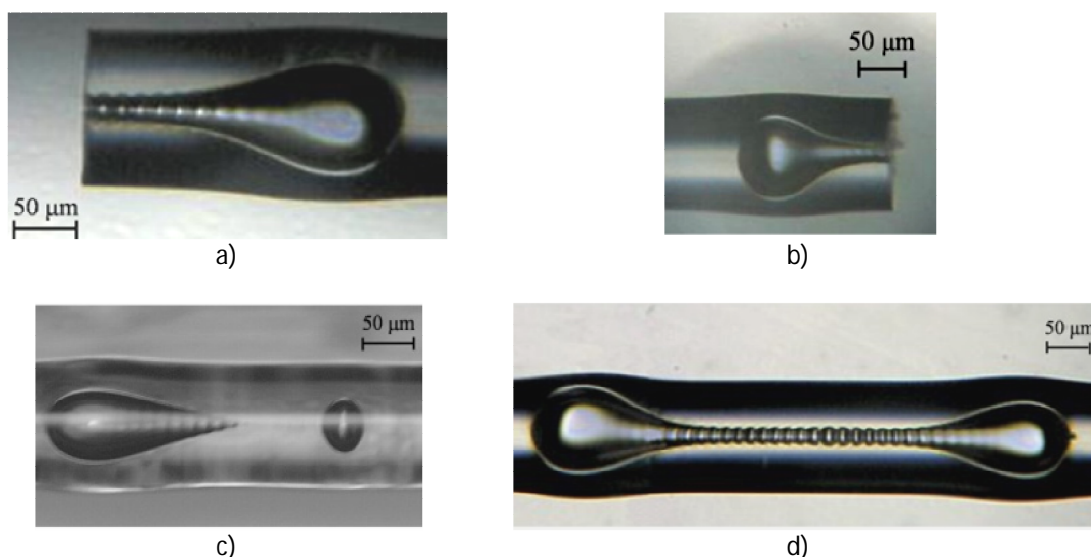


Figure 5.5 – Microscopia da estrutura final típica dos sensores desenvolvidos para monitorização de: a) Índice Refração; b) Pressão; c) Deformação; d) Altas Temperaturas.

Tendo em conta o método usualmente empregue para o fabrico de micro-cavidades, o que frequentemente requer o uso de lasers femtosegundo [5,6], a técnica apresentada reduz consideravelmente os custos e a complexidade de todo o processo. As micro-cavidades produzidas comportam-se como cavidades FPI, cujas dimensões influenciam as características do espectro ótico refletido, sendo que a diferença de fase do mesmo é influenciada segundo a equação (5.2) apresentada anteriormente. De seguida são mostrados os resultados experimentais obtidos durante a implementação destes sensores.

5.3 Sensores de índice de refração

A monitorização do índice de refração (IR) é um procedimento de extrema relevância em diversos campos industriais e de investigação, tais como biologia, química, medicina ou ainda na indústria do petróleo, necessários para a monitorização da evolução de reações químicas ou a presença de substâncias específicas; mas também para o controle da qualidade dos alimentos, sendo que estes são apenas alguns exemplos entre outros descritos anteriormente [16-18]. O índice de refração é geralmente determinado usando refratômetros óticos baseados preferencialmente na configuração Abbe [19], com a capacidade para atingir valores de resolução até 10^{-5} . No entanto, esta solução apresenta várias restrições em termos de sensoriamento remoto e miniaturização. Para superar tais limitações, novos tipos de refratômetros baseados em fibra ótica têm sido o foco de uma extensa investigação ao longo dos últimos anos, sendo que a sua tecnologia é maioritariamente baseada em redes de Bragg gravadas em fibras óticas [20], redes de período longo [21], redes de Bragg inclinadas [22] e ressonância de superfície de plasma [23]. Nesta secção é apresentada uma solução adicional, para a produção de sensores de índice de refração (IR) baseada em micro-cavidades FPI produzidas a partir do efeito rastilho. Os sensores produzidos apresentam as seguintes dimensões, Tabela 5.1:

Tabela 5.1- Dimensões dos sensores IR produzidos.

	Comprimento (μm)	Diâmetro máximo (μm)	Diâmetro extremidade da fibra (μm)
Sensor 1	251.7 ± 0.9	89.1 ± 0.7	18.8 ± 0.7
Sensor 2	169.8 ± 1.9	82.7 ± 1.5	24.8 ± 1.3

Na Figura 5.6 são apresentadas as imagens recolhidas por microscopia dos sensores desenvolvidos para monitorização do índice de refração:

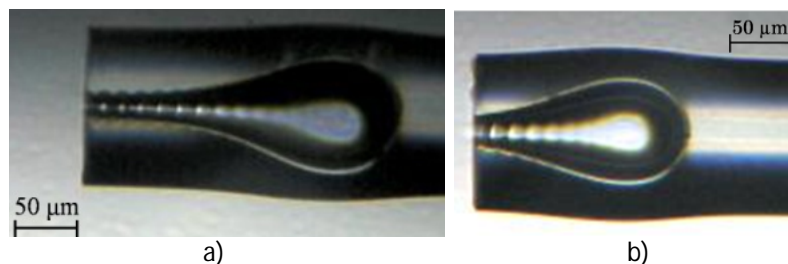


Figura 5.6- Imagens microscópicas dos sensores implementados para monitorização do índice de refração:
a) sensor 1 e b) sensor 2.

Para descrever o princípio de funcionamento desta micro-cavidade como sensor de índice de refração, podemos considerar que a função de reflexão do sinal é uma função periódica no domínio da frequência (ou no domínio do comprimento de onda para uma largura de banda limitada), com um período que depende do índice de refração ambiente circundante, como descrito anteriormente na equação (5.2). Com base nessa relação, podemos concluir que o período de modulação tem uma dependência inversa com o índice de refração, com uma sensibilidade dada por:

$$\frac{d\Gamma}{dn_{eff}} = -\frac{\lambda^2}{2n_{eff}^2L} \quad (5.5)$$

Para estudar o desempenho do sensor de IR, este foi testado em soluções aquosas com diferentes concentrações de sacarose, variando de 0.0 a 1.1 g.mL⁻¹, que fornecem uma variação IR entre 1.3320 e 1.4281. Os índices de refração foram inicialmente determinados a 22 °C, utilizando um refratômetro desenvolvido com base numa rede de Bragg inclinada (RFBG) a 8° [22].

Para garantir um comprimento constante da cavidade (L) (condição necessária para não influenciar o espectro ótico refletido), os ensaios experimentais foram realizados num ambiente controlado de pressão e temperatura constante. A sensibilidade do sensor a alterações de IR foi estimada por imersão da ponta terminal da fibra ótica em soluções de sacarose, para tal foi adicionado um suporte para a fibra capaz de permitir o controlo da profundidade a que o sensor é imerso nas soluções a analisar mantendo essa profundidade constante. O aparato experimental implementado está esquematizado na Figura 5.7.

O espectro refletido pelo sensor, aquando da sua imersão nas diversas soluções, foi monitorizado utilizando um interrogador, modelo sm125 MicronOptics, com 1 pm de resolução.

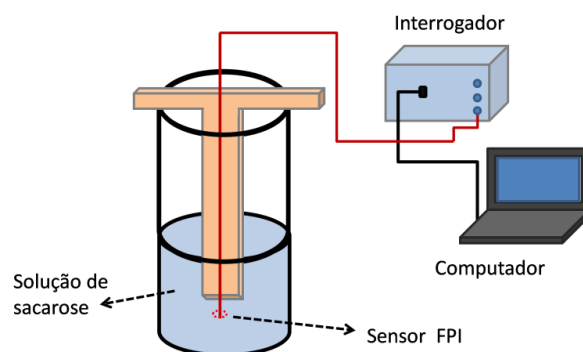
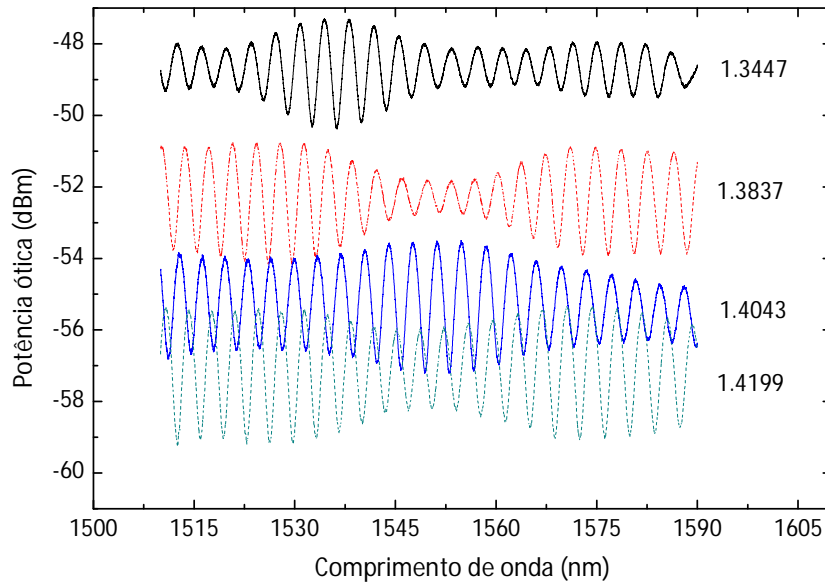
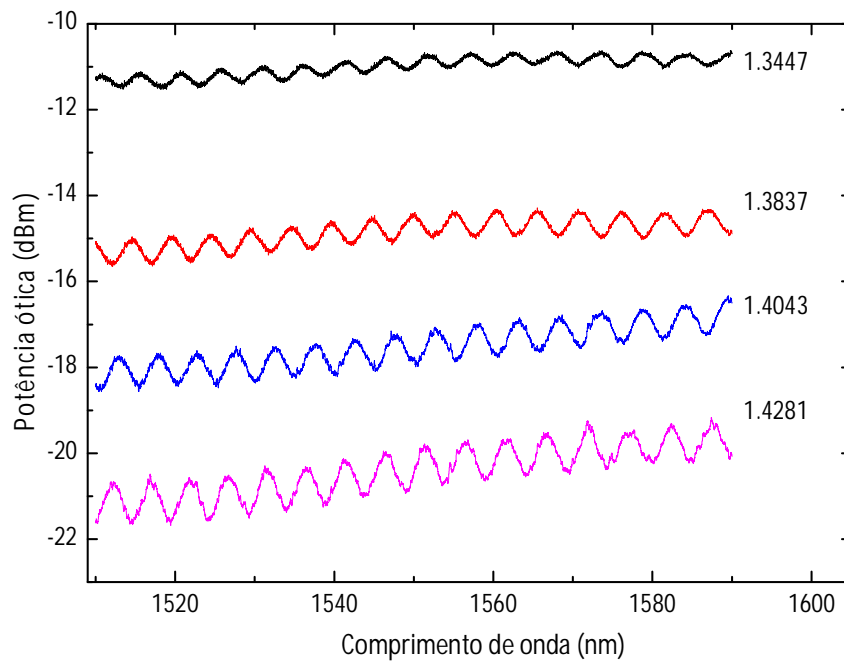


Figura 5.7- Esquema experimental implementado para a caracterização dos sensores a variações de índice de refração.

A Figura 5.8 mostra o espectro de reflexão do sensor sob imersão, revelando uma diminuição notória no período de modulação do espectro refletido com o aumento do IR da solução, comportamento este que está de acordo com o previsto pela equação (5.1).



a)

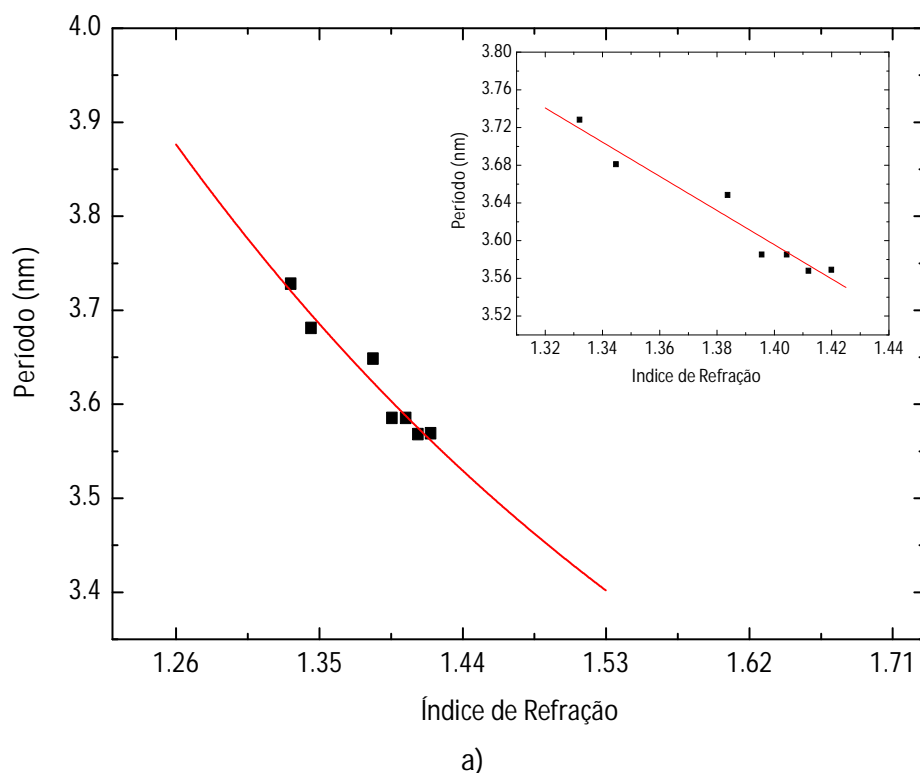


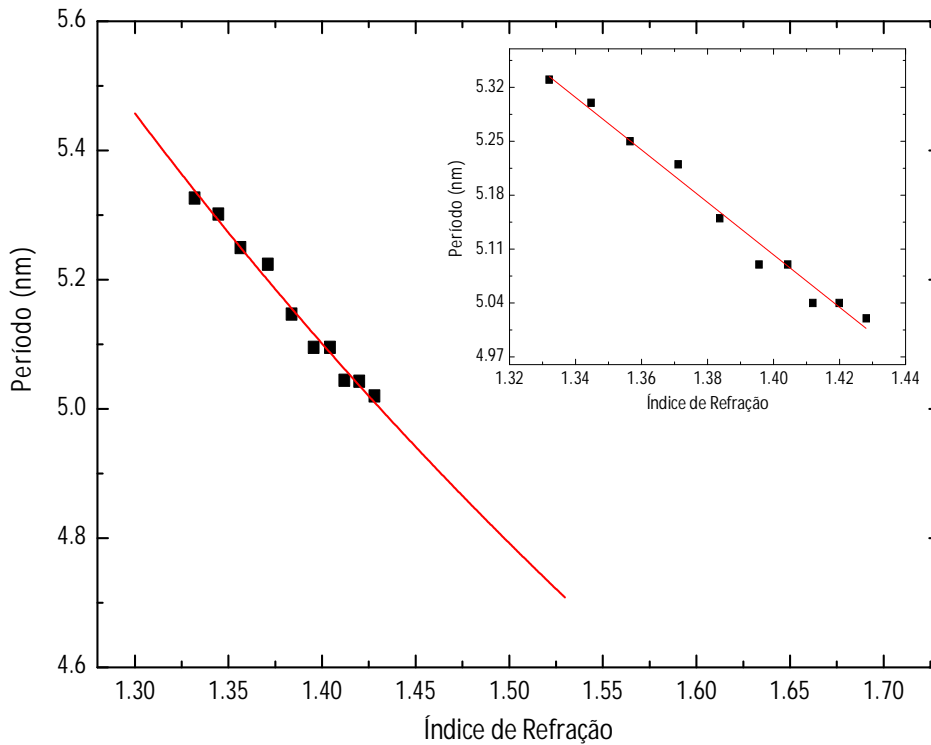
b)

Figura 5.8- Espectro óptico de reflexão da micro-cavidade ótica para os sensores: a) 1 e b) 2, para diferentes soluções aquosas de sacarose. Os valores de IR para as diferentes soluções, medidos com o sensor RFBG, são apresentados à direita dos espectros.

Foi também observado um acréscimo na modulação da amplitude das franjas com o aumento do índice de refração, o qual também é consistente com o comportamento de uma cavidade ótica, perante um aumento da reflexão.

Nesta situação, o aumento do índice de refração das soluções aquosas resulta no aumento do contraste refração (para a cavidade do índice de refração médio ≈ 1) e, por conseguinte, no aumento do coeficiente de reflexão, com o consequente aumento da profundidade do período de modulação que foi medido através da seleção de picos ao longo de uma larga região espectral, em função do IR. A representação gráfica dos valores do período de modulação obtidos em função dos valores de índice de refração são apresentados na Figura 5.9. Numa análise mais cuidada, torna-se evidente que os dados experimentais revelam uma dependência quase linear na gama de IR estudados 1.3320 to 1.4281 Figura 5.9. Através do ajuste linear efetuado para essa gama de valores, a sensibilidade dos sensores foi estimada em -1.81 ± 0.20 nm/RIU para o sensor 1 e -3.41 ± 0.17 nm / RIU para o sensor 2. Considerando a resolução do sistema de interrogação, (1 pm), a resolução estimada para estes sensores foi de 5.5×10^{-4} RIU e 3×10^{-4} RIU, para o sensor 1 e 2 respetivamente.





b)

Figura 5.9- a) Modulação do período dos espectros óticos de reflexão em função do índice de refração para os sensores a)1 e b) 2. Linha corresponde ao ajuste teórico à equação (5.2); O ajuste linear efetuado para a gama de índices de refração compreendida entre 1.34 e 1.43 é também apresentada ($r^2 > 0.981$ e 0.982 respetivamente para os sensores 1 e 2).

Estes valores, obtidos para a modulação do período e para a sensibilidade do mesmo, estão de acordo com o modelo teórico usado para descrever o comportamento sensorial da microcavidade. Para o sensor 2, e a partir dos dados de melhor ajuste com a equação (5.5), na Figura 5.9- b), pode-se estimar o comprimento da cavidade com um valor teórico de $178.62 \pm 8.16 \mu\text{m}$, o que está de acordo com o valor experimental medido, nomeadamente 169.8 ± 1.9 .

A sensibilidade térmica do sensor 2 foi também caracterizada. Para esse efeito, o sensor foi colocado numa câmara térmica (Angelantoni Industrie, modelo Challenge 340) e o seu espectro de reflexão foi monitorizada para vários patamares de temperatura, com incrementos de 10°C numa gama de 10 a 100°C . O período obtido a partir da modulação do comprimento de onda para cada uma das temperaturas é apresentado na Figura 5.10, revelando uma dependência linear.

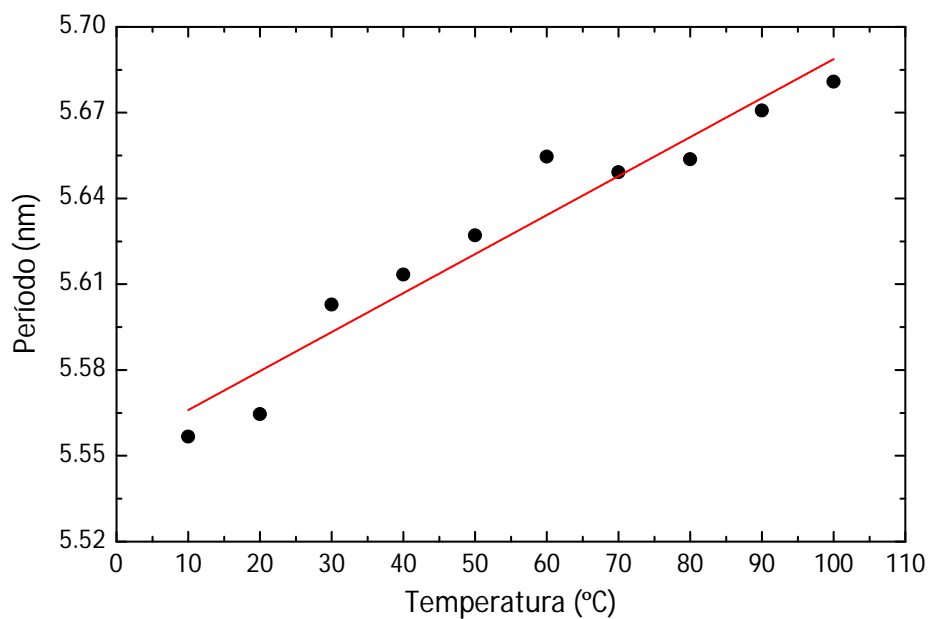


Figura 5.10- Modulação do período do espectro de reflexão em função da temperatura. A linha representa o ajuste linear aos dados experimentais.

A partir do ajuste linear aos dados experimentais na Figura 5.10, foi obtida uma sensibilidade térmica de $1.36 \pm 0.13 \text{ pm} \cdot \text{C}^{-1}$. Tendo em conta a gama de temperaturas avaliadas, podemos estimar um valor de $4 \times 10^{-4} \text{ RIU} \cdot \text{C}^{-1}$ para a dependência da temperatura da medição do IR. No entanto devemos ter em atenção que de uma maneira geral os valores de IR tendem a variar com a variação da temperatura, pelo que é suposto a sua avaliação ser efetuada em ambientes controlados de temperatura.

5.4 Sensores de pressão hidrostática

Ao longo dos últimos anos, têm sido propostas várias soluções para detecção de variações de pressão. O seu desenvolvimento e aperfeiçoamento têm maioritariamente como objetivo a sua aplicação em diversas áreas de investigação, mas também em indústrias, como as de produção de óleos e combustível, entre outras [24]. Entre as soluções frequentemente apresentadas para detecção de pressão, existem diferentes mecanismos (ultra-som e acústica, campos magnéticos, técnicas hidrostáticas e elétricas) que diferem entre si na metodologia aplicada para a detecção de variações de pressão [25]. No entanto, para medições efetuadas em ambientes hostis e perigosos, tais como tanques de óleo, é necessário ter um cuidado especial na escolha do sensor a implementar, para que sejam mantidas todas as condições de segurança. Assim, os sensores em fibra ótica são maioritariamente a melhor solução, não só devido à sua passividade (uma vez que não necessita de energia elétrica no local a monitorizar), mas também devido ao seu tamanho e peso reduzidos [25,26]. Entre os sensores de fibra ótica já desenvolvidos, as soluções baseados em micro-cavidades (FPI) têm já demonstrado possuir uma resposta e sensibilidade precisas, sendo, portanto, adequado para a implementação na detecção de variações de pressão [7-9,27].

O procedimento efetuado para o fabrico das micro-cavidades FPI para detecção de variações de pressão, é semelhante ao implementado para a detecção de IR, sendo que nesta situação, o dispositivo apresenta uma micro-cavidade com um comprimento total de $153.2 \pm 1.5 \mu\text{m}$, um diâmetro transversal de 88.3 ± 1.9 , na secção mais larga e um diâmetro na abertura de $29.8 \pm 1.6 \mu\text{m}$, Figura 5.11- a). Na Figura 5.11- b) é apresentada o diagrama da secção longitudinal do sensor, obtido através de um programa de desenho 3D, a partir do qual é possível estimar o volume da micro-cavidade, tendo sido obtido o valor de $(5.27 \pm 0.16) \times 10^5 \mu\text{m}^3$.

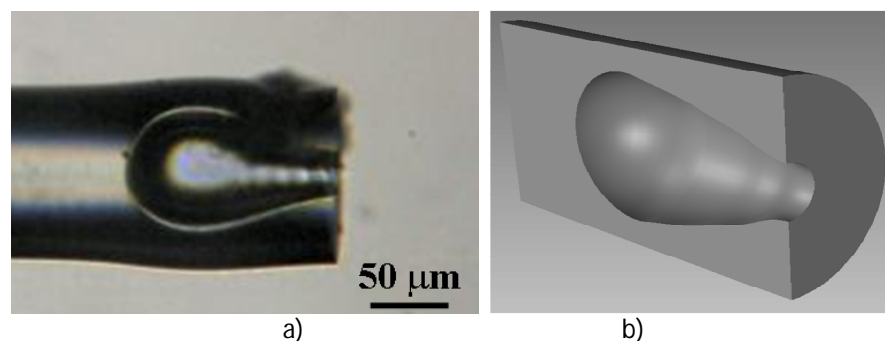


Figura 5.11- a) Microscopia do sensor implementado para testes de variação de pressão; b) diagrama esquemático da secção longitudinal da micro-cavidade.

Para a caracterização do sensor a variações de pressão hidrostática, e de forma a garantir a sua estabilidade do no decorrer dos testes, a fibra contendo o sensor foi acoplada num suporte metálico, ilustrado na Figura 5.12- a).

O suporte foi posteriormente colocado verticalmente no interior de uma coluna de água de 2.0 m de altura. A Figura 5.12- b) mostra um diagrama esquemático do mecanismo de funcionamento do sensor: para um nível de líquido W_1 haverá uma pressão P_1 na micro-cavidade e o seu comprimento será L_1 . Considerando-se um nível de líquido superior, W_2 , a pressão aumentará para P_2 , diminuindo o comprimento da cavidade para L_2 .

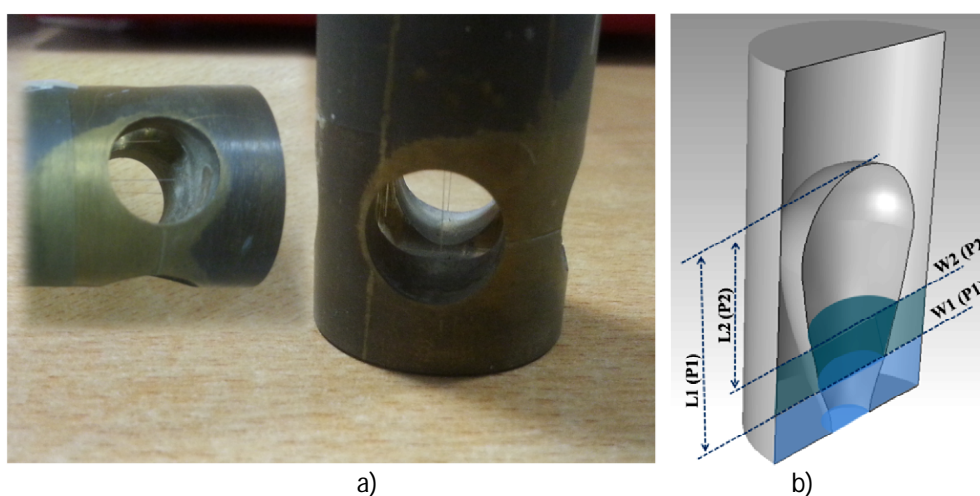


Figure 5.12- a) Suporte metálico desenvolvido para alocar o sensor; b) Esquema ilustrativo do princípio de funcionamento do sensor.

Assim, a sensibilidade do sensor a variações de pressão hidrostática foi testada colocando o sensor no interior de um reservatório e aumentando gradualmente o nível da coluna de água acima do sensor, induzindo assim o comprimento da cavidade L a diminuir. A resposta da micro-cavidade foi obtida através da monitorização do sinal ótico refletido pelo sensor durante a variação do valor de pressão (aumento da coluna de água), com patamares de pressão de +10 cmH₂O. Essa monitorização foi efetuada através de um sistema de interrogação (MicronOptics, modelo sm125-500) com uma resolução de 1 pm. Na Figura 5.13 é apresentado um esquema do aparato experimental implementado.

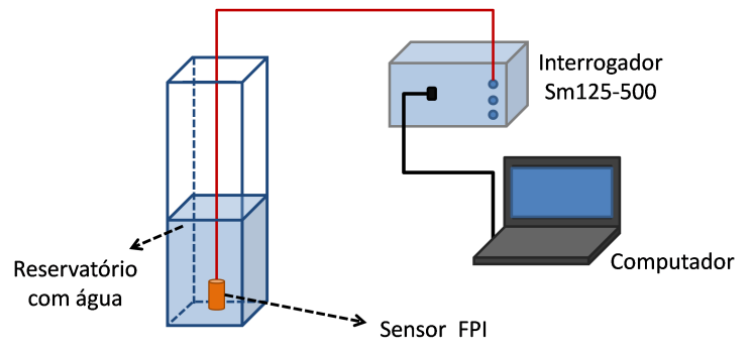


Figura 5.13- Esquema do aparato experimental implementado para a caracterização dos sensores de pressão.

Na figura 5.14 são apresentados parte dos espectros óticos de reflexão obtidos para os diferentes níveis de pressão.

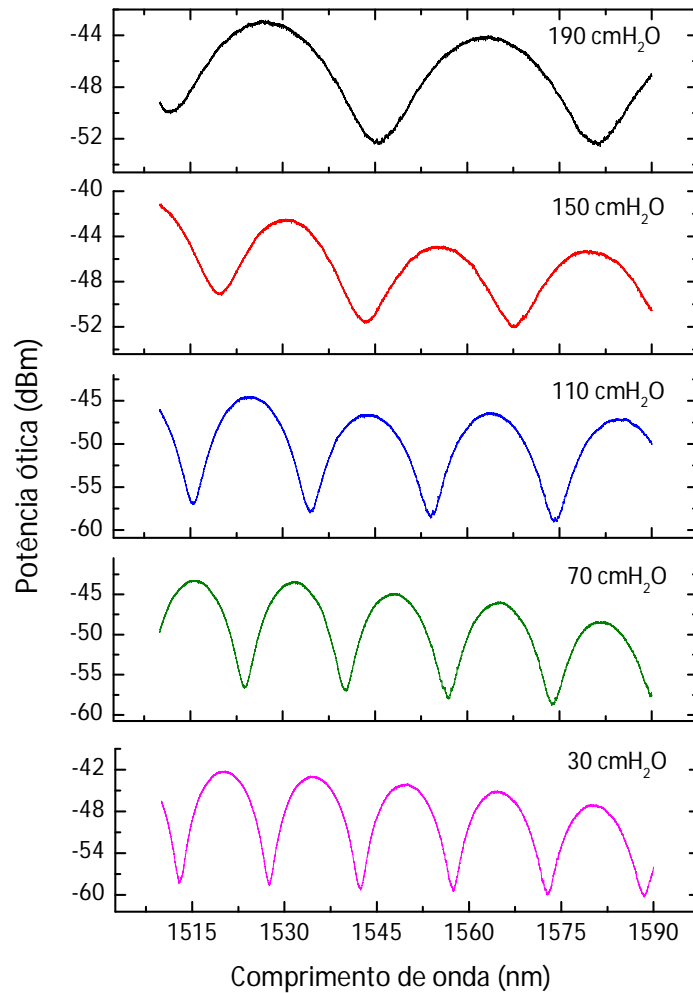


Figura 5.14- Espectro ótico de reflexão obtido para diferentes valores de pressão hidrostática.

Nesta representação torna-se evidente a variação no período de modulação adquirida para os diferentes níveis de água, com um aumento acentuado do seu valor. A modulação espectral do

período depende do comprimento da micro-cavidade, equação 5.2, e um aumento da pressão externa vai induzir o deslocamento da interface ar/liquido, no interior da cavidade, provocando a diminuição do seu comprimento e o conseqüente aumento do período espectral, Figura 5.15.

Para valores de pressão hidrostática até 8 kPa, pode-se considerar que o período do sensor depende linearmente do aumento da pressão, apresentando uma sensibilidade de $0.4 \pm 0.03 \text{ nm.kPa}^{-1}$.

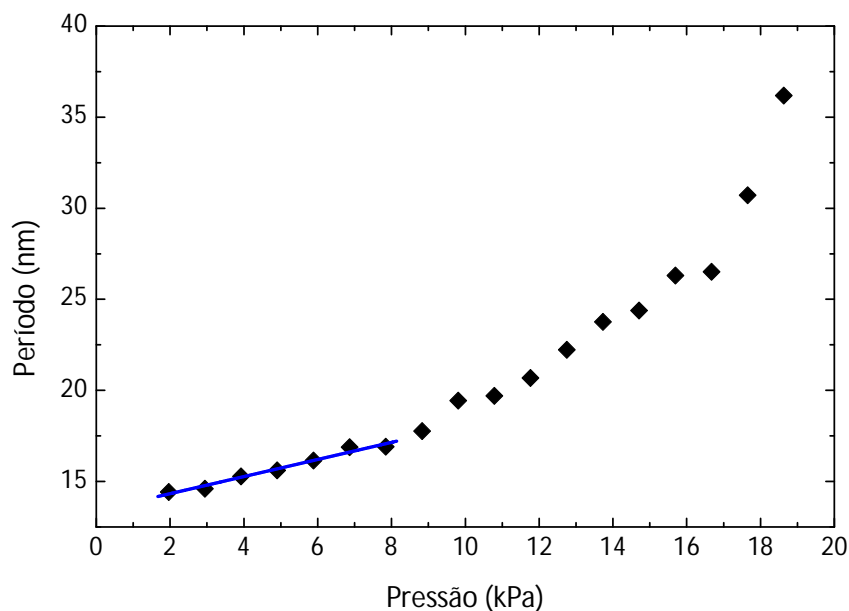


Figure 5.15- Modulação do período do comprimento de onda em função da pressão aplicada. Os pontos correspondem aos dados experimentais, a linha ao ajuste linear (5.4).

Para gamas de valores de pressão mais alargados, uma descrição mais exata da resposta do sensor requer a aplicação da equação 5.3 e a análise da dependência do volume da micro-cavidade com a pressão.

O coeficiente de compressibilidade do ar, K , no interior da cavidade é dado por:

$$K = -V \frac{dP}{dV} \quad (5.6)$$

a partir do qual obtemos a relação:

$$V = V_0 \exp\left(-\frac{P-P_0}{K}\right) \quad (5.7)$$

onde P corresponde à pressão e V ao volume. P_0 é o valor da pressão para um volume inicial V_0 . Para o ar, K assume o valor de $\sim 10^5 \text{ Pa}$. Assim, a partir da equação 5.7 é possível estimar o volume de ar no interior da micro-cavidade para os valores de pressão considerados.

Com base na Figura 5.11, podemos aproximar a geometria da micro-cavidade à conjugação entre uma meia esfera (topo) e um cone (secção final). Através desta geometria é possível correlacionar o volume da micro-cavidade com o seu comprimento relativo à interface ar/líquido. Esta correlação é apresentada na Figura 5.16.

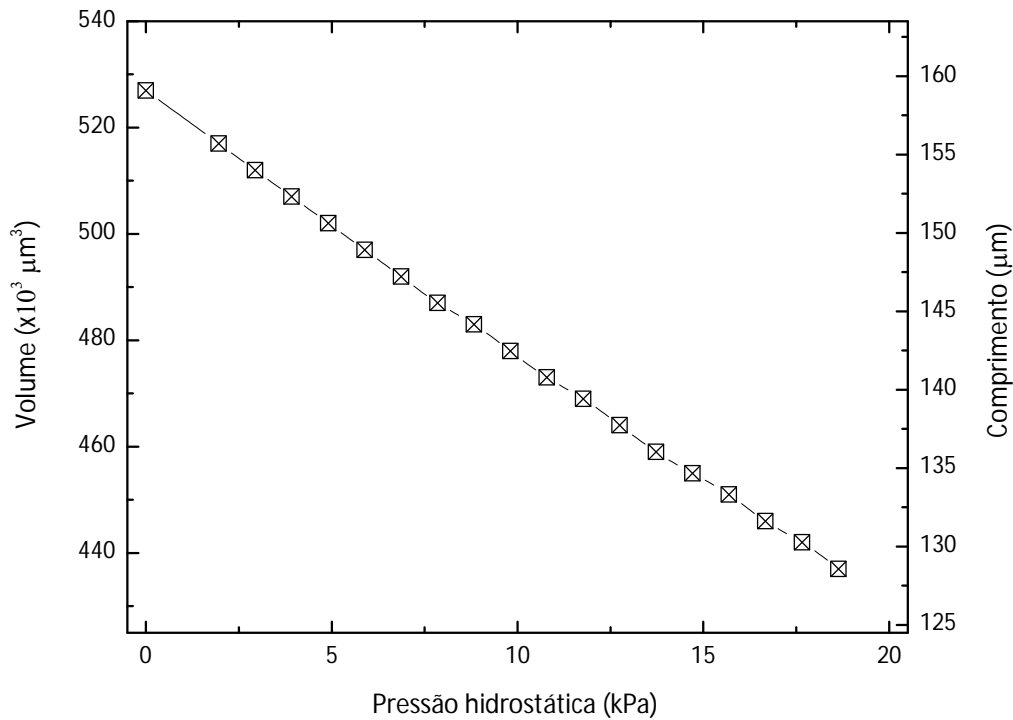


Figura 5.16- Variação do volume e comprimento da micro-cavidade com o aumento da pressão. A linha corresponde a um guia visual.

Através da dependência do comprimento da cavidade com a pressão, o período de modulação do espectro de reflexão, (Γ), pode ser correlacionado com o respetivo comprimento da micro-cavidade, apresentados na Figura 5.17.

A dependência de Γ com o comprimento da cavidade é corretamente ajustado à equação 5.3 e 5.4, considerando que a micro-cavidade é concavo-plana, devido à interface ar/líquido, assumindo assim $R_2 = \infty$.

Dos parâmetros de ajuste teórico, foi estimado um raio de curvatura para a micro cavidade de $46.1 \pm 2.5 \mu\text{m}$, o que está de acordo com o valor obtido através da análise microscópica da micro-cavidade, $49.1 \pm 0.9 \mu\text{m}$, Figura 5.11.

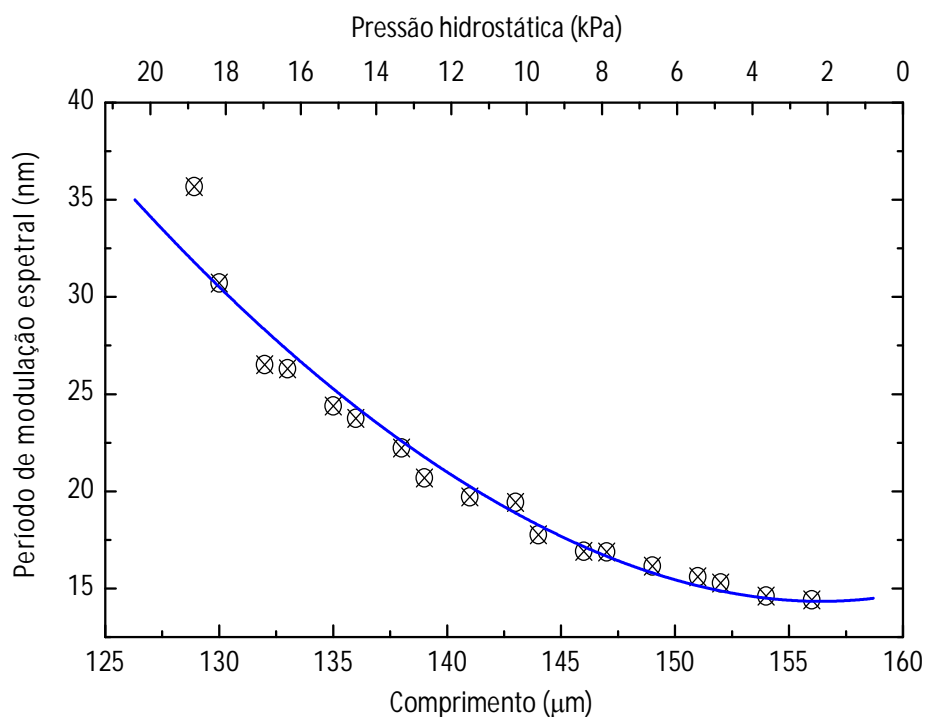


Figura 5.17- Período de modulação espectral em função do comprimento da micro-cavidade. Os pontos correspondem aos dados experimentais, e a linha ao ajuste teórico à equação 5.3 ($r^2 > 0.98$).

A sensibilidade do sensor à temperatura foi também caracterizada, através do procedimento descrito anteriormente na secção 5.3. A dependência térmica do período de modulação espectral $\left| \frac{d\Gamma}{dT} \right|$, apresentou um valor inferior a $0.1 \text{ nm} \cdot \text{C}^{-1}$, que pode ser considerado na gama da incerteza experimental.

5.5 Sensores de tensão

Sensores de tensão são amplamente utilizados por uma grande variedade de aplicações nas mais diversas áreas tais como, os desportos motorizados, indústria aeroespacial e automóvel, biotecnologia e biometria, para monitorização de integridade estrutural de estruturas de engenharia, entre outras [1-3]. A necessidade de sensores que garantam uma maior confiabilidade e segurança em locais de alto risco, como plataformas de petróleo e centrais nucleares, tem motivado significativamente a investigação sobre este tipo de sensores. De entre as soluções mais amplamente utilizadas, os sensores baseados em redes de Bragg (FBG) ou micro-cavidades FPI tornaram-se os mais atraentes devido ao seu tamanho diminuto, resposta linear e maior sensibilidade [1, 4-6].

De acordo com o método de fabrico anteriormente descrito, foram produzidos três sensores de micro cavidades óticas FPI, como ilustrado na imagem da figura 5.18.

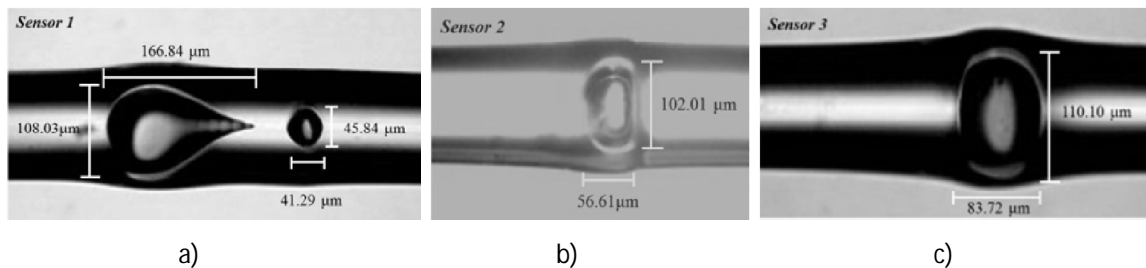


Figura 5.18- Microscopia das micro-cavidades FPI implementadas para os testes de deformação; a) sensor 1, b) sensor 2 e c) sensor 3.

Para a análise do desempenho das micro-cavidades perante a variação dos valores de tensão, foi utilizada uma plataforma de translação linear micrométrica, o que permite o aumento controlado dos valores de tensão na fibra contendo a micro-cavidade.

A fibra contendo o sensor FPI foi colada entre um suporte fixo e a plataforma de translação linear, com uma distância entre os pontos de fixação de 12.84 cm. A Figura 5.19 esquematiza o aparato experimental implementado.

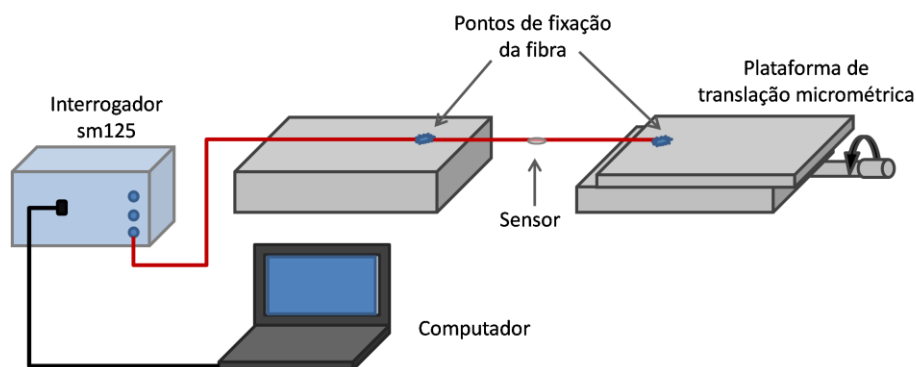


Figura 5.19- Esquema do aparato experimental implementado para o estudo das micro-cavidades como sensores tensão.

A micro-cavidade, quando sujeita uma perturbação física vai sofrer uma alteração na sua estrutura física. Assim sendo, uma alongação longitudinal aplicada à fibra irá alterar o comprimento físico da micro-cavidade FPI, o que resulta na variação de comprimento de onda da função de reflexão de cavidade FPI. A mudança de comprimento de onda pode ser relacionada com o alongamento longitudinal relativo, ϵ_z , através de [9]:

$$\frac{d\lambda_m}{dz} = \frac{4}{(2m^{th}+1)} L \epsilon_z \quad (5.8)$$

onde m^{th} corresponde ao número de modos de interferência e L é o comprimento da micro-cavidade.

O espectro de reflexão do sensor foi obtido para cada um dos sensores, em função do alongamento imposto, que teve uma variação entre 0 e 140 μm , o que corresponde a um valor máximo de tensão de 10903 $\mu\epsilon$.

Na Figura 5.20 são apresentados os espectros óticos relativos ao sinal refletido, para os três sensores, sob diferentes valores da tensão aplicada. A caracterização ótica foi realizada com um sistema de interrogação (Micron-Optics, modelo sm125) com uma resolução de 1 pm. Estes espectros de reflexão apresentam um padrão de franjas de interferência com uma amplitude superior a 5 dB, o que é amplo o suficiente para as aplicações de sensoriamento e semelhante a outros sensores baseados em micro-cavidades FPI [8].

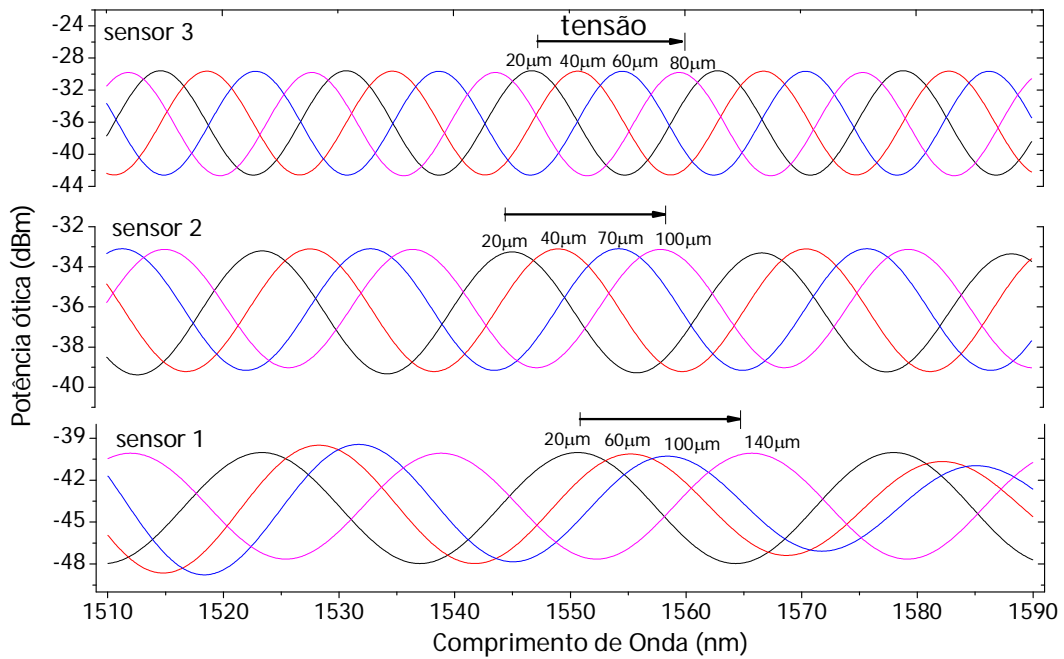


Figura 5.20- Espectro ótico de reflexão para diferentes valores de deformação induzidos nos sensores.

A partir dos espectros de reflexão é possível estimar as sensibilidades dos sensores à deformação imposta, através do ajuste linear obtido da relação entre o deslocamento do comprimento de onda espectral em função da tensão aplicada, Figura 5.21:

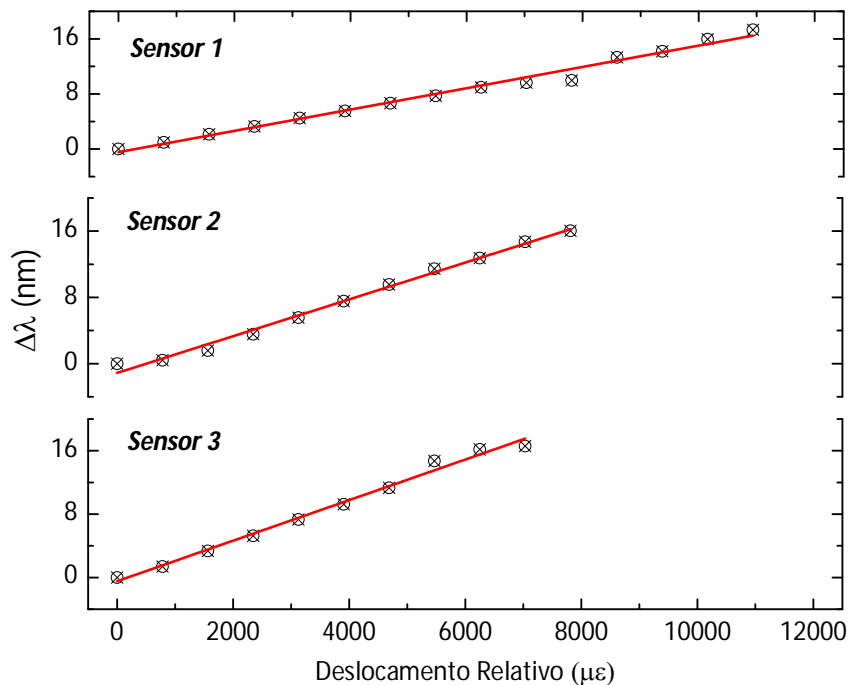


Figura 5.21- Deslocamento do comprimento de onda espectral em função da deformação aplicada. Os pontos correspondem aos dados experimentais, a linha ao seu ajuste linear ($r^2 > 0.99$).

Esta caracterização foi realizada até à fratura das fibras, revelando um limite de rutura de $10903 \mu\epsilon$ e $7812 \mu\epsilon$ e $7031 \mu\epsilon$, para os sensores 1, 2 e 3 respetivamente. Estes valores são idênticos, dentro da incerteza experimental, com os obtidos para o limite de rutura de fibras óticas de sílica [28], realçando que o presente processo de produção das micro-cavidades não debilita a robustez da fibra ótica. Pela análise microscópica da zona de fratura da fibra, Figura 5.22, confirmamos o acima descrito, pelo facto de a fratura da fibra ser afastada do sensor, sendo este ainda visível na secção da fibra observada.

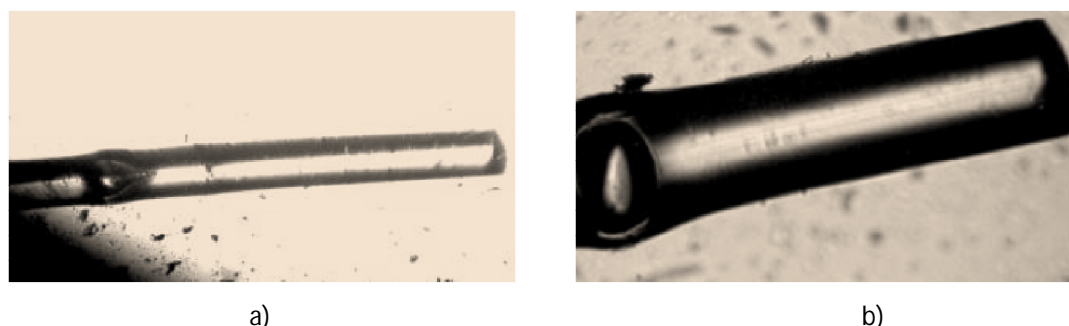


Figura 5.22 – Imagem microscópica da zona de fratura para os sensores a) 1 e b) 3.

Na Tabela 5.2 são apresentadas as dimensões das micro-cavidades, medidas a partir das imagens apresentadas na Figura 5.18, e a sensibilidade das mesmas às variações de tensão.

Tabela 5.2- Dimensões dos sensores e respetiva sensibilidade

Sensor	Dimensões micro-cavidade (μm)		Sensibilidade ($\text{pm}/\mu\epsilon$)
	Longitudinal	Transversal	
1	41.29	45.84	1.55 ± 0.04
2	56.61	102.01	2.22 ± 0.08
3	83.72	110.10	2.56 ± 0.09

Embora a equação (5.8) mostre uma dependência explícita com o comprimento físico da cavidade, o parâmetro m^{th} também é dependente de L . Assim, a sensibilidade de deslocamento do comprimento de onda para o alongamento externo não é somente dependente do comprimento físico da cavidade. Este facto é muitas vezes ignorado por outros autores que aplicam este modelo a micro-cavidades FPI [5]. Mesmo os modelos desenvolvidos para micro-

cavidades FPI esféricas não descrevem, com precisão, a dependência da sensibilidade do sinal com o comprimento da cavidade [29].

Note-se que a dimensão radial da micro-cavidade é muito maior do que o diâmetro do núcleo da fibra ótica, nos quais um grande número de modos óticos transversais é permitido. Além disso, devido à dimensão limitada do diâmetro da fibra, quando comparada com a largura da cavidade, uma tensão aplicada ao longo do eixo longitudinal da fibra, também impõe uma variação (redução) da largura da cavidade. Como a micro-cavidade exibe uma forma elipsoidal, é espectável que a condição de interferência e a sensibilidade do sinal apresentem uma dependência com o volume da cavidade.

Na Figura 5.23, é apresentada a sensibilidade da tensão como função do volume da micro-cavidade (obtido com os parâmetros na Tabela 5.2 e considerando uma simetria radial).

Os resultados apresentados mostram claramente que a resposta à deformação externa da micro-cavidade (sensibilidade do sinal) é dependente do volume da cavidade, com uma constante de proporcionalidade de $(4.8 \pm 0.4) \times 10^{-7} \text{ pm } \mu\epsilon^{-1} \mu\text{m}^{-3}$.

Esta dependência da sensibilidade do sensor de tensão, com o volume da cavidade pode ser utilizada para adaptar a produção do sensor para uma aplicação específica. Noutros trabalhos foi já demonstrada a possibilidade de controlar o volume das lacunas no interior da fibra através do controle da potência ótica utilizada para induzir o efeito rastilho [15].

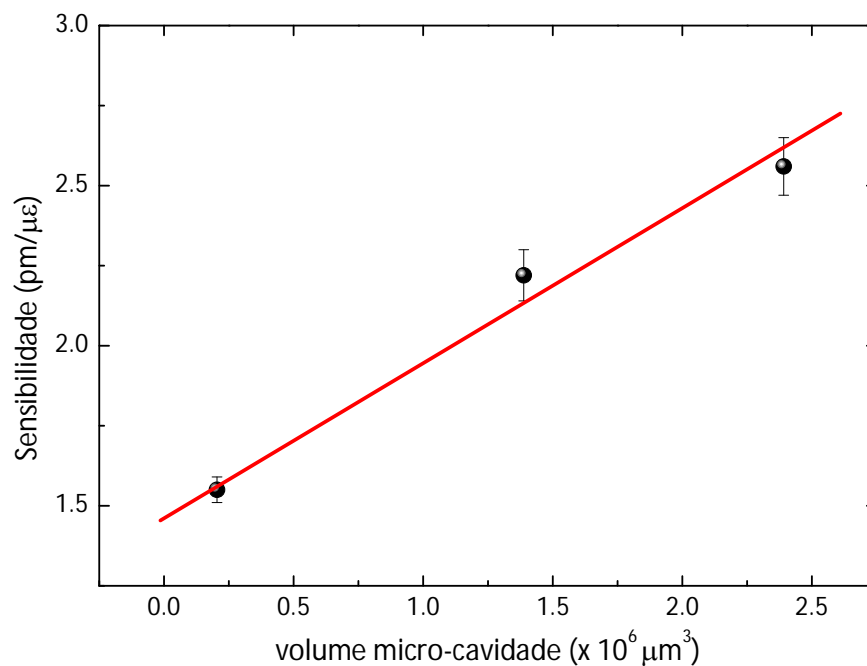


Figura 5.23- Sensibilidade à deformação em função do volume da micro-cavidade. Os pontos representam os dados experimentais, e a linha ao seu ajuste linear ($r^2 > 0.99$).

Nas aplicações dos sensores para a medição de valores de tensão, também a sua resposta térmica é relevante. Assim, a sensibilidade térmica para estes sensores foi caracterizada. Para tal, os sensores foram colocados numa câmara climática, (Challenge Angelantoni Industrie, modelo 340), a resposta dos sensores para uma faixa de temperaturas compreendidas entre 0 °C e 100 °C foi monitorizada. Os espectros óticos de reflexão para os sensores são apresentados na Figura 5.24, a partir da qual foram calculados os coeficientes de temperatura para os sensores em estudo, obtendo valores de $3.41 \pm 0.55 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $3.5 \pm 0.2 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ e $0.05 \pm 0.01 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, para os sensores 1, 2 e 3 respetivamente.

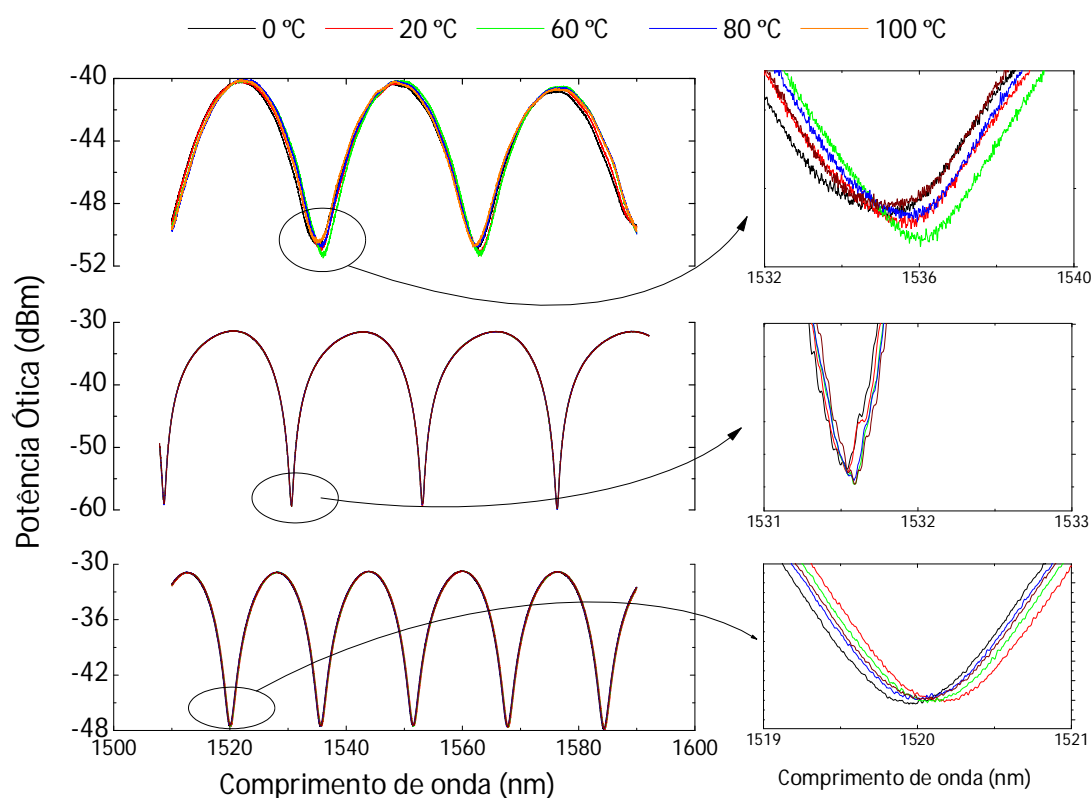


Figura 5.24- Espectro de ótico de reflexão para diferentes valores de temperatura para os sensores 1 a 3.

5.6 Sensores para altas temperaturas

A demanda por sistemas de sensores de temperatura, capaz de sustentar as suas características em ambientes agressivos com altas gamas de temperatura é elevada [30]. Sensores de baixo custo adequados à medição de altas temperaturas são de grande importância em áreas como as indústrias automóvel e aeronáutica, mas também na área da exploração energética, como em centrais de energia nuclear e plataformas petrolíferas [30]. Entre as várias tecnologias de sensores de fibra ótica, as mais utilizados para monitorização de altas temperaturas são baseados em redes de Bragg regeneradas (RFBG) [31, 32] e em micro-cavidades FPI [33, 34]. Sensores baseados em FBGs são também comumente usados para gamas de temperaturas inferiores, uma vez que a sua utilização para deteção de altas temperaturas é impraticável, pois a rede apaga-se para temperaturas superiores a 550 °C [35]. Para superar esta limitação, foram desenvolvidos sensores baseados em RFBGs, sendo adequados para medições de temperaturas até 1000 °C, com uma sensibilidade de 16.1 pm.°C⁻¹ [31], contudo, a sua produção é um processo moroso e economicamente dispendioso, uma vez que requer equipamento de elevado custo, para a inscrição da rede na fibra [33, 34].

Assim, pretendemos apresentar uma solução eficaz e de baixo custo para a obtenção de sensores de alta temperatura baseados em micro-cavidades FPI em fibra ótica, adequados para ambientes agressivos com elevados gradientes de temperatura. O sensor desenvolvido tem por base as micro-cavidades produzidas através da reciclagem de fibra ótica destruída pelo efeito rastilho [9]. A estrutura dos sensores usados é apresentada na Figura 5.25 e o seu processo de fabrico segue os passos descritos anteriormente na secção 5.3.

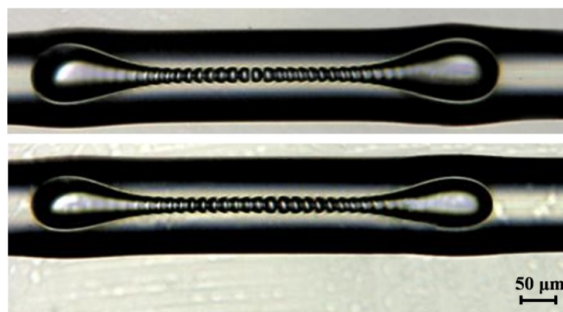


Figura 5.25- Imagem microscópica das micro-cavidade FPI implementadas para caraterização dos sensores de alta temperatura (comprimento de $606.2 \pm 1.1 \mu\text{m}$).

As micro-cavidades gerados na produção deste sensor apresentam um comportamento semelhante ao observado em cavidades FPI, onde a diferença de fase ótica, ϕ_{FPI} , após a propagação do sinal no interior da cavidade é dado pela equação (5.1) já descrita anteriormente.

Considerando-se a temperatura, T , e a sua influência no comprimento da cavidade por meio da sua expansão térmica, o deslocamento do comprimento de onda de interferência destrutiva, λ_m , seguirá a seguinte tendência [9]:

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \alpha \lambda_{0,m^{th}} \quad (5.9)$$

onde, $\lambda_{0,m}$ é o comprimento de onda de interferência destrutiva para uma temperatura de referência da ordem da interferência m^{th} e α é o coeficiente de expansão térmica de sílica, tipicamente $0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [33].

A caracterização térmica dos sensores foi realizada com recurso a um forno cerâmico tubular capaz de atingir temperaturas na ordem dos $1150 \text{ } ^\circ\text{C}$. Neste conjunto de testes, a temperatura do forno foi aumentada desde $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ até $1150 \text{ } ^\circ\text{C}$, em patamares de $50 \text{ } ^\circ\text{C}$. Para fins comparativos, um sensor baseado numa FBG uniforme também foi testado, sob as mesmas condições experimentais. Na Figura 5.26 é apresentado um esquema do aparato experimental implementado.

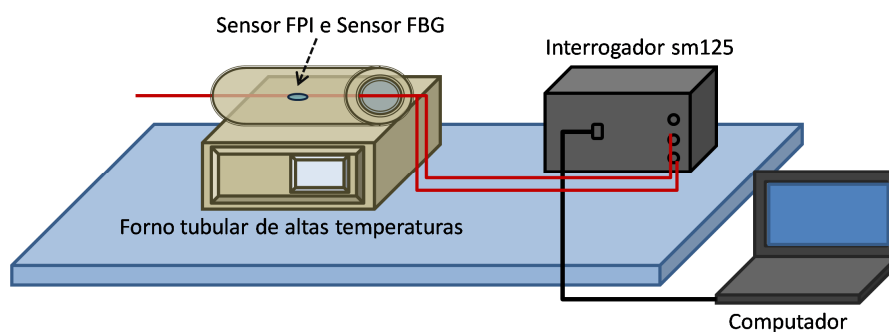


Figura 5.26- Aparato experimental implementado para o estudo das micro-cavidades como sensores de altas temperaturas.

Os espectros de reflexão dos sensores foram obtidos com o sistema de interrogação da MicronOptics, sm125-500, para cada patamar de temperatura. Na Figura 5.27 é apresentado o espectro ótico do sinal refletido para as gamas de temperatura de $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ até $1150 \text{ } ^\circ\text{C}$.

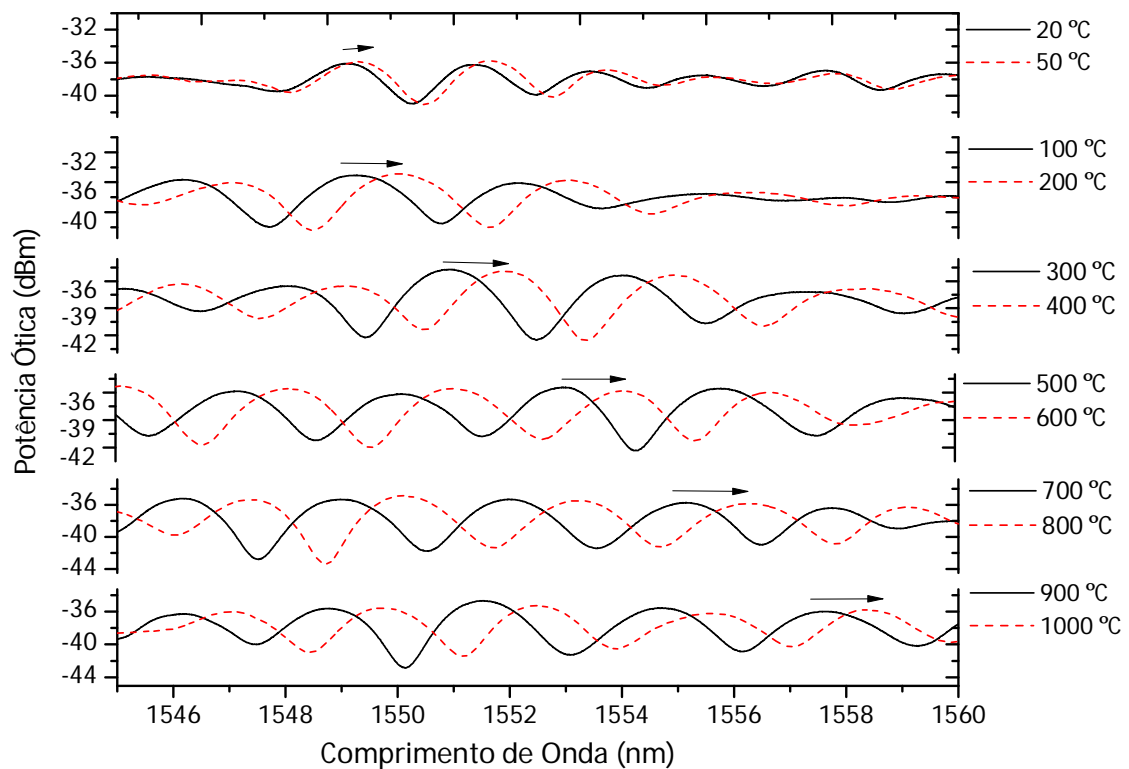


Fig. 5.27- Espectro óptico do sinal refletido na micro-cavidade FPI, para diferentes temperaturas numa gama compreendida entre 20 °C e 1150 °C.

Na Figura 5.28 é apresentado o deslocamento do comprimento de onda experimentado pelos sensores em estudo (FBG e micro-cavidades FPI) como função da temperatura imposta. Para o sensor analisado, o pico de interferência destrutiva considerado centra-se a 1545.43 a uma temperatura inicial de 20 °C. Para estimar a sensibilidade do sensor térmico, foi considerado um ajuste linear aos dados experimentais.

Ambos os sensores de micro-cavidades apresentaram uma resposta similar para o aumento da temperatura, com uma sensibilidade térmica de $10.43 \pm 0.15 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ e $10.44 \pm 0.15 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ respetivamente. Estes valores são muito próximos da sensibilidade obtida para o sensor de FBG, $13.93 \pm 0.34 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, com a vantagem de que os sensores FPI foram capazes de operar a temperaturas acima de 1100 °C, enquanto o sensor FBG perdeu a sua capacidade de resposta a 450 °C. Tendo em vista a resolução do sistema de interrogação usado (1 pm), foi alcançada uma resolução de temperatura de 0.1 °C.

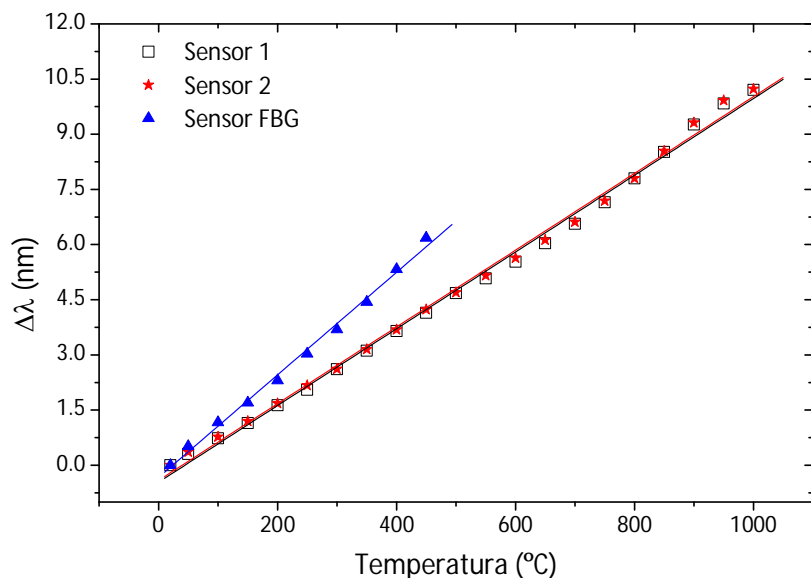


Figura 5.28- Deslocamento espectral do comprimento de onda em função da temperatura para o sensor FPI e FBG. Os pontos correspondem aos dados experimentais, a linha corresponde ao ajuste linear dos mesmos ($r^2 > 0.99$).

Neste conjunto de testes, foi também estudada a estabilidade dos sensores a 1150 °C, mostrando sua capacidade de sustentar tais condições adversas durante várias horas, sem alterações significativas no desvio do comprimento de onda dos espectros refletidos, como observável na Figura 5.29.

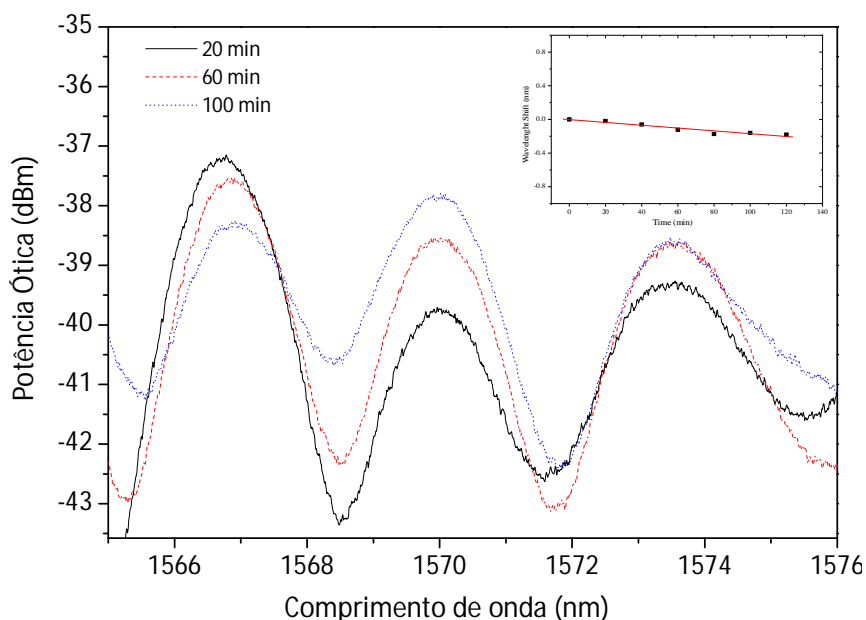


Figura 5.29- Espectro óptico refletido para o sensor 1 e variação de comprimento de onda para temperaturas de 1150 °C, durante 120 min.

Os pequenos desvios de comprimento de onda no espectro ótico, apresentam uma variação com uma proporção de $1.8 \pm 0.18 \text{ pm.min}^{-1}$, que se insere dentro da resolução do sistema de interrogação.

Quando comparado com sensores de alta temperatura semelhantes, como os sensores baseados em FBG regeneradas [31, 32], o dispositivo proposto apresenta uma sensibilidade na mesma ordem de grandeza e com uma gama de deteção que engloba temperaturas na faixa de 20 °C a 1150 °C.

No que diz respeito à robustez dos sensores, foram realizadas testes de tensão após os ciclos de aquecimento descritos anteriormente. Estes foram realizados até à fratura da fibra, que apresenta um ponto de rutura na ordem de 863 $\mu\epsilon$ para o sensor de FPI e 2888 $\mu\epsilon$ para o sensor FBG, com um ponto de fratura no meio da extensão da fibra testada. Para a fibra contendo o sensor FPI, a rutura foi próxima do ponto de fixação, e afastada da zona onde se localiza a microcavidade, o que indica, mais uma vez, que a produção de sensores (pontos de fusão) não induz uma fragilização significativa na fibra. No entanto, é notório que a temperatura elevada à qual as fibras são submetidas durante longos períodos de tempo, enfraquece a sua robustez [28].

5.7 Conclusão

Nesta secção do trabalho é descrita a produção e implementação experimental de sensores de índice de refração, pressão hidrostática, tensão e altas temperaturas, com base em micro-cavidades produzidas a partir da reciclagem de fibra ótica danificada pelo efeito rastilho. As micro-cavidades apresentam um comportamento semelhante ao observado numa cavidade FPI, e assim a análise da resposta dos sensores foi efetuada com base na modulação do sinal refletido pela micro-cavidade, perante a alteração dos parâmetros físicos correspondentes.

Relativamente ao sensor IR, o valor de sensibilidade não é superior aos valores obtidos por diferentes configurações com base em redes de Bragg (10^{-4} a 10^{-5}), no entanto estes sensores requerem técnicas especiais para o aperfeiçoamento da sua sensibilidade, o que resulta num aumento do custo e complexidade de implementação do sensor.

No que respeita ao sensor de pressão, verificamos que a modulação do comprimento de onda foi coerente com a redução do comprimento da cavidade e conseqüente aumento da pressão. Para pressões inferiores a 8 kPa, o sensor apresentou um comportamento linear com um valor de sensibilidade estimado em $0.47 \pm 0.03 \text{ nm.kPa}^{-1}$. Para maiores gamas de pressão foi apresentado um modelo teórico que descreve corretamente o comportamento da modulação do comprimento de onda refletido pela micro-cavidade na fibra ótica.

Relativamente aos sensores de tensão apresentados, estes apresentaram sensibilidades com valores de 1.55, 2.22 e $2.56 \text{ pm.}\mu\epsilon^{-1}$, sensibilidades estas que estão linearmente correlacionadas com o volume da micro-cavidade, com uma proporcionalidade de $(4.8 \pm 0.4) \times 10^{-7} \text{ pm } \mu\epsilon^{-1} \mu\text{m}^{-3}$. Os testes de tensão efetuados revelam também que o processo de fabrico dos sensores não fragiliza a fibra, uma vez a tensão de rutura apresentada pelos sensores insere-se na gama reportada anteriormente [28]. A microscopia efetuada após os testes, revelou ainda que a rutura ocorre em zonas afastadas do sensor.

Os sensores de temperatura produzidos têm uma sensibilidade térmica de $10.43 \pm 0.15 \text{ pm}^\circ\text{C}^{-1}$, com uma resposta estável a altas temperaturas até 1150°C . Quando comparados com os sensores de alta temperatura semelhantes, como RFBG [31, 35], as micro-cavidades do sensor em estudo apresentaram robustez semelhante e uma sensibilidade na mesma ordem de grandeza que um sensor RFBG típico ($16.1 \pm 0.15 \text{ pm.}^\circ\text{C}^{-1}$).

Assim, poderemos concluir que as sensibilidades obtidas para os sensores desenvolvidos estão de uma maneira geral dentro da gama apresentada por sistemas de monitorização com custos de fabrico e complexidades elevadas, pelo que, a solução aqui apresentada demonstra uma clara vantagem face a esses dispositivos, no que diz respeito a complexidade e custos de fabrico e de implementação.

Referências

- [1] J. M. Lopez-Higuera, L. Rodriguez Cobo, A. Quintela Incera, and A. Cobo, "Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 29, pp. 587-608, 2011.
- [2] N. Basumallick, I. Chatterjee, P. Biswas, K. Dasgupta, and S. Bandyopadhyay, "Fiber Bragg grating accelerometer with enhanced sensitivity," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 173, pp. 108-115, 2012.
- [3] C. Leitão, L. Bilro, N. Alberto, P. Antunes, H. Lima, P. S. André, R. Nogueira, and J. L. Pinto, "Feasibility studies of Bragg probe for noninvasive carotid pulse waveform assessment," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 18, pp. 017006-017006, 2013.
- [4] V. Mishra, N. Singh, U. Tiwari, and P. Kapur, "Fiber grating sensors in medicine: Current and emerging applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 167, pp. 279-290, 2011.
- [5] C. R. Liao, T. Y. Hu, and D. N. Wang, "Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser micromachining and fusion splicing for refractive index sensing," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 22813-22818, 2012.
- [6] Z. Ran, C. Li, H. Zuo, and Y. Chen, "Laser-Machined Cascaded Micro Cavities for Simultaneous Measurement of Dual Parameters Under High Temperature," *Sensors Journal, IEEE*, vol. PP, pp. 1-1, 2013.
- [7] B. H. Lee, Y. H. Kim, K. S. Park, J. B. Eom, M. J. Kim, B. S. Rho, and H. Y. Choi, "Interferometric Fiber Optic Sensors," *Sensors*, vol. 12, pp. 2467-2486, 2012.
- [8] T. Zhu, D. Wu, M. Liu, and D.-W. Duan, "In-Line Fiber Optic Interferometric Sensors in Single-Mode Fibers," *Sensors*, vol. 12, pp. 10430-10449, 2012.
- [9] P. F. C. Antunes, M. F. F. Domingues, N. J. Alberto, P. S. André, and S. Member, "Optical Fiber Microcavity Strain Sensors Produced by the Catastrophic Fuse Effect," vol. 26, no. 1, pp. 78-81, 2014.
- [10] L. G. Gouy, "Sur une propriete nouvelle des ondes lumineuses", *C. R. Acad. Sci. Paris* 110, 1251, 1890.
- [11] R. Kashyap and K. J. Blow, "Observation of Catastrophic Self-Propelled Self-Focusing in Optical Fibers," *Electronics Letters*, vol. 24, pp. 47-49, 1988.
- [12] F. Domingues, A. M. Rocha, and P. S. Andre, "High-Power Effects in Damaged and Contaminated Optical Fiber Connectors," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 53, pp. 2485-2488, Nov 2011.
- [13] A. M. Rocha, P. F. C. Antunes, F. Domingues, M. Facão, and P. André, "Detection of Fiber Fuse Effect Using FBG Sensors," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 11, pp. 1390-1394, 2011.
- [14] F. Domingues, A. R. Frias, P. Antunes, A. O. P. Sousa, R. A. S. Ferreira, and P. S. Andre, "Observation of fuse effect discharge zone nonlinear velocity regime in erbium-doped fibres," *Electronics Letters*, vol. 48, pp. 1295-1296, 2012.

- [15] André, P.S; M. Facão; Rocha, Ana M.; P. Antunes; "Evaluation of the Fuse Effect Propagation in Networks Infrastructures with Different Types of Fibers", Proc OSA Optical Fiber Communications - OFC, San Diego, United States, Vol. JWA10, 2010.
- [16] S. Przibilla, S. Dartmann, A. Vollmer, S. Ketelhut, B. Greve, et al., "Sensing dynamic cytoplasm refractive index changes of adherent cells with quantitative phase microscopy using incorporated microspheres as optical probes", J. Biomed. Opt., 17-9, 2012.
- [17] C. Freitas, M. Ruggeri, F. Manns, A. Ho and Jean-Marie Parel, "In vivo measurement of the average refractive index of the human crystalline lens using optical coherence tomography", Opt. Lett., 38, 85-87, 2013.
- [18] A. Chamkalani, A. H. Mohammadi, A. Eslamimanesh, F. Gharagheizi, D. Richon, "Diagnosis of asphaltene stability in crude oil through 'two parameters' SVM model", Chemical Engineering Science, 81, 22, 202-208, 2012.
- [19] T. Niemczyk, "Refractive index measurement," in Physical methods in modern chemical analysis, vol. 2, K. Theodore, Ed. Academic Press, 337-400, 1980.
- [20] Q. Zhang, L. Hu, J. Tian, N. J. Ianno, M. Han, "Fiber optic refractive index sensor based on π -phase shifted fiber Bragg grating fabricated on etched side-hole fiber", Proc. SPIE 8722, Fiber Optic Sensors and Applications, 87220R, 2013.
- [21] J. Chong, P. Shum, H. Haryono, A. Yohana, M. Rao C. Lu and Y. Zhu, "Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer", Optics Communications, 229, 65-69, 2004.
- [22] N. Alberto, C. Marques, J. L. Pinto and R. Nogueira, "Three-parameter optical fiber sensor based on a tilted fiber Bragg grating", Appl. Optics, 49, 6085-6091, 2010.
- [23] P. Bhatia and B. Gupta, "Surface plasmon resonance based fiber optic refractive index sensor: sensitivity enhancement", Applied Optics, 50, 2032-2036, 2011.
- [24] Y. Zhao, Y. Jin, J. Wang, and X. Dong, "Detection of liquid-level variation using a SMS fiber structure," Opt. - Int. J. Light Electron Opt., vol. 124, no. 18, pp. 3771–3773, 2013.
- [25] K. T. V. Grattan and T. Sun, "Fiber optic sensor technology: an overview," Sensors Actuators A Phys., vol. 82, no. 1–3, pp. 40–61, 2000.
- [26] Méndez, Alexis, and Ted F. Morse, eds. "Specialty optical fibers handbook", Academic Press, 2011.
- [27] C. Lai, Y. Lo, J. Yur, and C. Chuang, "Application of Fiber Bragg Grating Level Sensor and Fabry-Pérot Pressure Sensor to Simultaneous Measurement of Liquid Level and Specific Gravity," vol. 12, no. 4, pp. 827–831, 2012.
- [28] P. Antunes, H. Lima, J. Monteiro, and P. S. André, "Elastic constant measurement for standard and photosensitive single mode optical fibres," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 50, pp. 2467-2469, 2008.
- [29] F. C. Favero, L. Araujo, G. Bouwmans, V. Finazzi, J. Villatoro, and V. Pruneri, "Spheroidal Fabry-Perot microcavities in optical fibers for high-sensitivity sensing," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 7112-7118, 2012.

- [30] Hang, S., Yu, F., "Piezoelectric Materials for High Temperature Sensors", *Journal of the American Ceramic Society*, 94, pp.3153–3170, 2011.
- [31] Alberto, N. J., Simões, R., Oliveira, V., Kalinowski, H. K., Neto, V. F., Nogueira, R. N., "Thermal monitoring of the diamond deposition process using regenerated FBG", *Proc. SPIE 8794, Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors*, 2013.
- [32] Wang, T., Shao, L., Canning, J., and Cook, K., "Temperature and strain characterization of regenerated gratings", *Opt. Lett.*, 38, pp.247-249, 2013.
- [33] Tan, X., Geng, Y., Li, X., Gao, R., and Yin, Z., "High temperature microstructured fiber sensor based on a partial-reflection-enabled intrinsic Fabry Perot interferometer", *Appl. Opt.*, 52, pp.8195-8198, 2013.
- [34] Rong, Q., Sun, H., Qiao, X., Zhang, J., Hu, M., and Feng, Z., "A miniature fiber-optic temperature sensor based on a Fabry–Perot interferometer", *J. Opt.*, 14, 2012.
- [35] Alberto, N. J., Santos, J. A., Marques, C. A. F., Neto, V. F. S., Nogueira, R. N., "Nanodiamond coated Bragg gratings for sensing applications", *Proc. SPIE 8421, OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*, 842120, 2012.

Capítulo 6

Considerações finais e trabalho futuro

6.1 Considerações finais

O trabalho realizado incidiu no estudo sobre dois tópicos principais: a degradação física de componentes integrantes de uma rede ótica, nomeadamente de conetores óticos e fibra ótica; e a reutilização de fibra ótica destruída pelo efeito rastilho para a produção de sensores. Relativamente ao primeiro tópico, são apresentados dados relativos a fatores degradantes da fibra ótica (ambientes agressivos, mau manuseamento de instalação da fibra conjugado com a utilização de sinais óticos de elevada potência) e ao seu impacto no tempo de vida da fibra e na degradação dos componentes e qualidade de serviço da rede ótica.

O segundo tópico incidiu no desenvolvimento de novos sensores em fibra ótica, desenvolvidos a partir da reciclagem de fibra destruída pelo efeito rastilho. Neste âmbito, foram implementados sensores de pressão hidrostática, temperatura, índice refração e tensão, cujo princípio de funcionamento se baseia na Interferometria Fabry-Perot.

O estudo do impacto de ambientes agressivos no tempo de vida da fibra ótica foi efetuado

recorrendo ao uso de soluções de NaCl para o envelhecimento da fibra durante diferentes períodos temporais, e o impacto desse envelhecimento no tempo de vida da fibra foi analisado através do estudo da tensão de ruptura das fibras. Nesse estudo verificou-se que, depois de um dado período de envelhecimento sem que se note um decréscimo abrupto, é observável um aumento repentino na diminuição da tensão de ruptura e que quanto maior a concentração de NaCl da solução, menor é a tensão necessária para fraturar a fibra. Foi também estimado o tempo de vida para fibras sujeitas a semelhantes ambientes agressivos, verificando-se que, para uma solução de concentração de NaCl de 35g.L^{-1} , (semelhante à concentração de NaCl presente no oceano), o tempo de vida da fibra pode ser diminuído de 20 para 6 anos. Na análise por microscopia ótica e SEM, foi possível identificar alguns defeitos ao longo do revestimento induzidos pelo envelhecimento da fibra, defeitos estes que permitem a infiltração de elementos externos para o interior da sílica contribuindo para a redução da sua resistência física.

Para complementar o estudo de degradação da fibra ótica foram também estudados os efeitos de pequenas curvaturas, com diâmetros inferiores a 4.0 mm, nas fibras quando estas são submetidas a sinais óticos de alta potência. Analisando o tempo de falha apresentada pelas fibras em teste, verificou-se que a probabilidade de falha da fibra ótica aumenta com o aumento da potência ótica injetada.

O efeito rastilho, é um fenómeno catastrófico, destrutivo da fibra ótica, presente em situações de sinais óticos de alta potência conjugados com o manuseamento deficiente da fibra ótica. A seriedade e potencial destruição que este fenómeno pode induzir numa rede ótica, requerem que o seu estudo seja efetuado de acordo com os componentes constituintes da rede ótica. Assim, uma vez que as fibras insensíveis a curvatura, G.656, são neste momento uma solução atrativa para implementação no cenário FTTH, foi efetuado um estudo da dinâmica de propagação da zona de fusão do efeito rastilho para estas fibras. Verificou-se que, para a mesma densidade de potência ótica, a velocidade da zona de fusão é 32% maior nas fibras G.657, exibindo um período espacial entre lacunas inferior (12%) e o limiar de potência ótica para a sua propagação é menor quando comparado com os valores obtidos para as fibras G.652.D, já estudadas por outros autores.

Seguindo ainda este tópico, foi também estudada a velocidade da zona de fusão do efeito rastilho para fibras óticas dopadas com Er^{3+} , comparando os valores obtidos com os reportados para fibras SMF G.652.D. Para as fibras dopadas com Er^{3+} , foi observado experimentalmente, pela primeira vez, um regime de saturação da velocidade da zona de fusão para intensidades óticas

superiores 12.5 MW.cm^{-2} . A observação deste regime de saturação proporciona o suporte experimental das previsões teóricas desenvolvidas anteriormente no contexto de um modelo teórico simples envolvendo equações diferenciais.

Após o estudo da dinâmica de propagação da zona de fusão, foi estudado o efeito térmico da irradiação do sinal ótico de alta potência do núcleo para o revestimento da fibra, quando um sinal ótico é inserido na fibra após a mitigação do efeito rastilho. Estes testes incidiram sobre dois tipos de fibra, G.652.D e G.656. Verificou-se que, para potências óticas superiores a 1.5 W a fibra foi inflamada, provocando a combustão do revestimento. Embora a fibra G.567 tenha registado maiores valores de temperatura, a ignição do seu revestimento iniciou-se mais tarde. Relativamente às temperaturas médias do revestimento registadas, as fibras G.657 exibiram um valor de temperatura superior quando comparado com o valor obtido para as fibras G.652.D.

Neste trabalho foi também estudado o desempenho de conetores óticos perante sinais de elevada potência, tendo sido dado particular relevância a situações de mau manuseamento dos conetores e quais as suas consequências no desempenho dos mesmos. Para tal procedeu-se à simulação do uso de conetores contaminados e fisicamente danificados em situações de transmissão de sinais óticos de alta potência. O estudo efetuado centrou-se na análise da atenuação ótica provocada e na temperatura dos conetores em função do grau de contaminação e degradação dos conetores.

Relativamente ao comportamento das perdas óticas, verificamos que para um sinal ótico com uma potência de 1.0 W , todos os conetores com atenuações superiores ou iguais a 4 dB sofreram falhas óticas. Com o aumento da potência injetada para 1.5 W , foi iniciado o efeito rastilho nos primeiros 2 minutos de teste.

Comparando os dois parâmetros em estudo, nomeadamente, perdas óticas e temperatura, verificamos também que um aumento nas perdas óticas é acompanhado por um aumento da temperatura máxima alcançada pelo conetor.

Relativamente aos conetores inicialmente danificados fisicamente, a temperatura máxima atingida não foi a suficiente para induzir a degradação do conetor nestes testes. Podemos portanto concluir que o dano normal na face de um conetor, característico de seu uso normal, não é relevante para a degradação do conetor a curto prazo, desde que a sua face esteja devidamente livre/limpa de impurezas. Assim, os resultados indicam que o tempo de vida de conetor sujeito a sinais de elevada potência, depende principalmente da limpeza e não tanto da degradação da sua face final resultante do processo de ligar/desligar.

As micro-cavidades geradas pela zona de fusão do efeito de rastilho serviram de base para o desenvolvimento de sensores em fibra ótica com um comportamento semelhante ao observado numa cavidade FPI. Neste âmbito foram desenvolvidos sensores para altas temperaturas, índice de refração, tensão e pressão hidrostática, com sensibilidades próximas aos sensores em fibra ótica usualmente descritos para estes parâmetros. A principal vantagem destes sensores face aos reportados previamente na literatura é o seu reduzido custo e baixa complexidade de produção e implementação.

6.2 Trabalho futuro

Os sistemas de comunicações estão em constante desenvolvimento, e novas soluções para mitigar lacunas ou imperfeições nos sistemas de transmissão são apresentadas constantemente. Tal inovação, nomeadamente ao nível do tipo de fibras a implementar, requer um estudo exaustivo dos seus parâmetros de degradação e do seu desempenho quando sujeitas a situações extremas como as reportadas neste trabalho. Assim, propõe-se um estudo minucioso a novas soluções de fibra e conetorização, tendo em conta a instalação da fibra ótica na casa dos subscritores, mas também o aumento da potência ótica transportada na rede.

Relativamente à reutilização da fibra ótica danificada para o desenvolvimento de sensores, devem ser considerados novas/diferentes configurações para que estes sejam capazes de monitorizar novos parâmetros. O aperfeiçoamento das configurações já existentes é também uma mais-valia a ser considerada. O seu método de produção pode também ser sistematizado, de modo a que as configurações de sensores obtidas sejam mais regulares e os parâmetros que influenciam a sua resposta e sensibilidade sejam controláveis.

