

Degradação de fibras ópticas devido à propagação de sinais de elevada intensidade

Ana Maria Rocha¹, Fátima Domingues, Margarida Fação¹, António Teixeira, Mário Lima, Rogério Nogueira¹, Marta Ferreira², Paulo André¹

¹Departamento de Física, Campus de Santiago, 3810-193 Aveiro

²CICECO, Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193 Aveiro

Resumo – A propagação de sinais com elevada intensidade em fibras ópticas pode levar à sua degradação ou destruição. Neste trabalho foram estudados três tipos de degradação resultante de sinais de elevada intensidade: i) aumento da temperatura do revestimento de fibras sujeitas a curvaturas apertadas; ii) degradação física de conectores ópticos; e iii) ignição e propagação do efeito rastilho, com a consequente destruição da fibra óptica ao longo de vários quilómetros.

Abstract – The propagation of high power signals in optical fibers can lead to the fibre degradation and destruction. In this work we study three forms of degradation resulting from the high optical power propagation: i) increasing of the fiber coating temperature for bending situation, ii) degradation of optical connectors; and iii) ignition and propagation of the fuse effect that can lead to the destruction of the optical fiber along several kilometres.

I. INTRODUÇÃO

As fibras ópticas são actualmente o suporte das redes de telecomunicações. Actualmente a estimativa para a produção mundial de fibras óptica é de 200 milhões de quilómetros por ano.

Continuamente novos desafios tem vindo a ser impostos, nomeadamente, a extensão das redes actuais até casa dos subscritores (fiber to the home - FTTH). Estes desafios conduziram ao desenvolvimento e implementação de técnicas de amplificação óptica nas redes de telecomunicações, com o consequente aumento da potência total dos sinais propagados nas fibras ópticas.

Este aumento de potência começa a levantar preocupação entre os operadores, devido à redução imposta na vida útil das fibras e/ou a degradação do serviço providenciado aos utilizadores. A interacção dos sinais de elevada potência com as fibras ópticas, ocorre a dois níveis: indução de fenómenos não lineares e degradação física da fibra. O primeiro tópico tem sido intensivamente estudado por vários grupos de investigação, já para o segundo tópico existe um vazio de estudo, como resultado da inexistência de redes a operarem nestas condições. Mas tal como referido, actualmente este paradigma está a sofrer uma alteração significativa.

Neste artigo relata-se o trabalho desenvolvido no estudo da degradação física das fibras ópticas. A degradação

física das fibras ópticas pode ocorrer a três níveis: i) aumento da temperatura das camadas de protecção da fibra de sílica quando sujeita a curvaturas apertadas (o que ocorre sistematicamente nas redes FTTH); ii) danificação dos conectores ópticos utilizados na interligação de fibras e iii) ignição do efeito de rastilho (ou de fusível) com a consequente destruição da fibra ao longo de vários quilómetros.

II. AUMENTO DA TEMPERATURA DE FIBRAS ÓPTICAS

O desenvolvimento de fibras ópticas de sílica com perdas reduzidas revolucionou as comunicações ópticas. As fibras ópticas monomodo padrão (SMF do Inglês Single Mode Fiber), actualmente utilizadas pelos operadores de telecomunicações são constituídas por um núcleo cilíndrico envolvido por uma camada com índice de refração ligeiramente inferior, que se designa como bainha. Estas estruturas de Sílica são revestidas com um material polimérico.

A conjugação de sinais com elevada potência com a sua propagação em fibras sujeitas a curvaturas com baixos diâmetros, tal como existente nas actuais infra-estruturas FTTH, é responsável pela degradação do tempo de vida da fibra. Esta degradação resulta do aumento da temperatura do revestimento na zona de curvatura. Este aumento de temperatura está relacionado com a saída do sinal óptico do núcleo da fibra (modo guiado) e a consequente absorção dessa radiação pelo revestimento [1-3]. Este efeito pode levar à degradação das camadas de protecção das fibras, com a consequente ruptura, ou até à ignição do efeito fusível e consequente destruição da fibra óptica [4]. Alguns trabalhos recentes descrevem estudos relativos à resistência das fibras ópticas perante altas potências [5]. A temperatura máxima obtida nestas situações foi um tópico recentemente estudado por vários grupos de investigação, tendo sido proposto um modelo térmico para as fibras para propagação de sinais com baixas potências (<0.5 W) [6].

Para analisar a temperatura do revestimento das fibras ópticas, quando esta é sujeita a curvaturas com diâmetros reduzidos e perante a propagação de sinais ópticos com altas potências, foram medidos, para diferentes diâmetros de curvatura, os valores da temperatura no revestimento e a atenuação sofrida no sinal óptico. Para esse efeito, foi utilizado um anel circular, de raio controlável,

implementado de forma a assegurar que a fibra completa um curva de 360° segundo uma curvatura constante.

O sistema experimental implementado está representado na figura 1. Os diâmetros estudados estão compreendidos entre 2.95 mm e 20.14 mm.

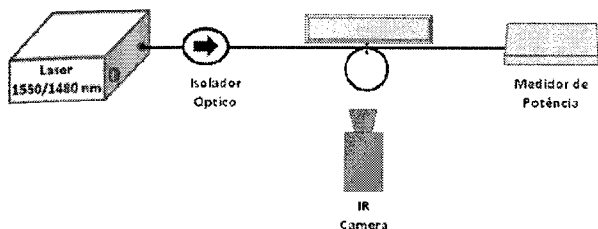


Figura 1- Esquema do sistema utilizado para a medição da temperatura em fibras sujeitas a curvaturas.

Para medir a temperatura do revestimento da fibra óptica, é injectado um sinal óptico na fibra em estudo, e a temperatura na zona de curvatura é medida com uma câmara térmica IR (ThermaCAM™ Flir i40). A fonte óptica utilizada foi um laser Raman (IPG - RLR-10-1480), emitindo com um comprimento de onda de 1480 nm e com uma potência óptica máxima de 2W. Para determinar a atenuação total na zona de curvatura o sinal óptico de saída é observado com um medidor de potência óptica (EXFO FPM-600).

Na análise utilizou-se uma fibra SMF28 G.652.D, fabricada pela Corning, sendo este tipo de fibra a mais utilizada actualmente nas redes de telecomunicações. Esta fibra óptica possui com um diâmetro da bainha de 125 μm e um revestimento primário de acrilato com diâmetro externo de 250 μm , sendo que a região do núcleo tem um diâmetro de 10 μm . A temperatura ambiente durante os testes efectuados foi de 23°C.

Na figura 2 encontra-se uma imagem térmica capturada para um diâmetro de curvatura de 15.04 mm, obtida após 1 minuto de exposição ao sinal óptico de 2 W.

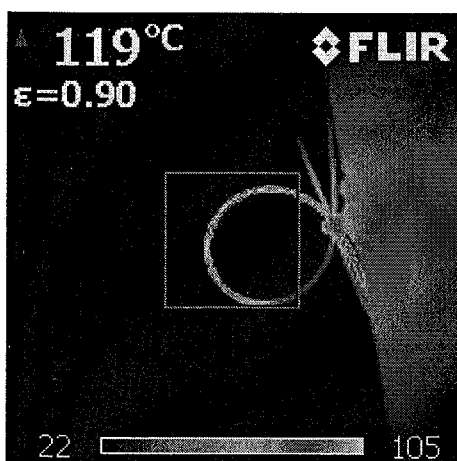


Figura 2 - Imagem térmica da zona de curvatura para uma potência injectada de 2W e um diâmetro de curvatura de 15.04 mm.

Na figura 3, estão representados os valores máximos de temperatura, obtidos no estado estacionário, em função da potência óptica injectada na fibra óptica e para diversos

valores do diâmetro de curvatura.

Verifica-se que o diâmetro crítico de curvatura é de 20mm, uma vez que para diâmetros de curvatura superiores o aumento da potência injectada não tem impacto significativo na temperatura registada no exterior da fibra [7].

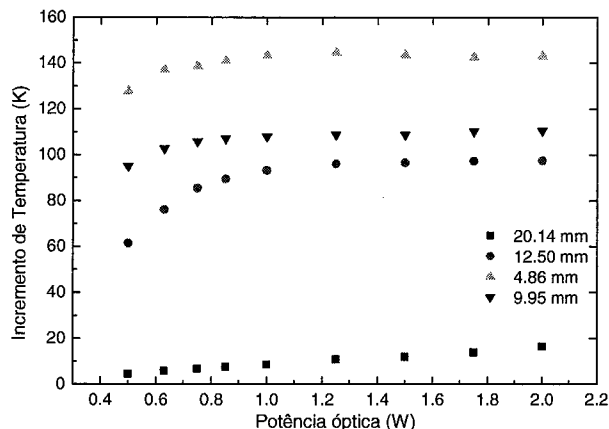


Figura 3 - Temperatura máxima atingida em função da potência óptica injectada para diversos valores do diâmetro de curvatura da fibra.

Estes valores confirmam a relação descrita previamente [6], entre o incremento de temperatura na fibra e o diâmetro de curvatura da fibra, no entanto esse modelo térmico só é válido para baixos valores de potência óptica. Após a exposição a altas potências, o estado físico da fibra na região de curvatura foi analisado recorrendo a um microscópio óptico. Na figura 4 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. Nesta imagem foi observada uma fibra sujeita a uma potência de 1.5 W e um diâmetro de curvatura de 2.9 mm durante 60 s. A temperatura atingida foi de 165°C.

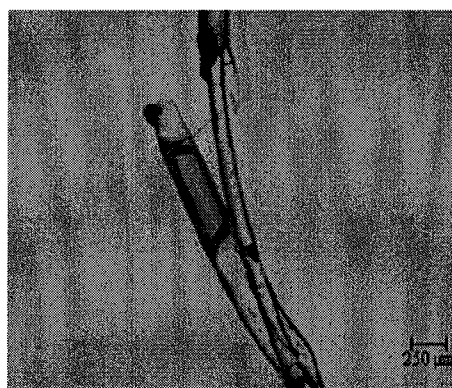


Figura 4- Imagem da zona de curvatura após ter sido submetida a uma potencia de 1.5W, com um diâmetro de curvatura de 2.9 mm. O tempo de exposição foi de 60s e uma temperatura máxima de 165°C

A temperatura da fibra na zona de curvatura para valores elevados da potência óptica (>0.5 W), pode ser modelizada assumindo um modelo térmico que considera que a energia do sinal óptico irradiada para modos não guiados do núcleo da fibra é absorvida na camada de

acrilato e é convertida em calor. Devido à saturação da absorção do revestimento para potências elevadas nem toda a energia é absorvida [8]. Num regime estacionário, a fonte de calor (P_c), originada pela absorção de radiação no acrilato é equilibrada pela capacidade de armazenamento de calor (Q_{stored}) na fibra e pelo calor perdido para o exterior (Q_{out}), que pode ser modelizado pelo coeficiente de transferência de calor (h) [17]

$$Q_{stored} = \rho c_p A l \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

$$Q_{out} = \pi d l h (T - T_0) \quad (2)$$

Onde d e l são, respectivamente, o diâmetro e comprimento da fibra na região curvatura, T_0 é a temperatura ambiente, A corresponde à área de fibra óptica e ρ e c_p são, respectivamente, os valores para a densidade e calor específico da fibra (considerando os valores médios da sílica e acrilato).

A potência óptica irradiada para fora do núcleo da fibra é dada por:

$$\Delta P = P_{in} \left(1 - 10^{\left(-\frac{\alpha_{fiber} L}{10} \right)} \right) \quad (3)$$

onde P_{in} é a potência óptica injectada na fibra, α_{fiber} é a atenuação associada à perda do sinal na região de curvatura, expressa em dB/m e L é o comprimento da fibra curvada.

No entanto, na presença de sinais ópticos de elevadas potências, a absorção da camada de acrilato torna-se não linear e a potência absorvida pelo acrilato satura num valor máximo.

$$P_c = P_{max} (1 - \exp(-\beta \Delta P)) \quad (4)$$

Assim, no equilíbrio, o aumento de temperatura total pode ser expresso como [17]:

$$\Delta T = \frac{P_{max} (1 - \exp(-\beta \Delta P))}{\pi d l h} \quad (5)$$

Onde ΔT é a variação máxima de temperatura em relação à temperatura de equilíbrio ambiente, P_{max} é a potência máxima absorvida pelo revestimento e β é uma constante de activação [8].

Os valores experimentais de temperatura obtidos anteriormente para diferentes diâmetros de curvatura e potências ópticas injectadas nas fibras foram ajustados a curva dada pela expressão (5).

Na figura 5 está representada a relação entre o valor do incremento de temperatura na fibra, o diâmetro de curvatura e a potência inserida, juntamente com os valores teóricos obtidos a partir da equação (5). O ajuste teórico

foi efectuado simultaneamente para todos os conjuntos de dados, tendo como variáveis os parâmetros P_{max}/h e β .

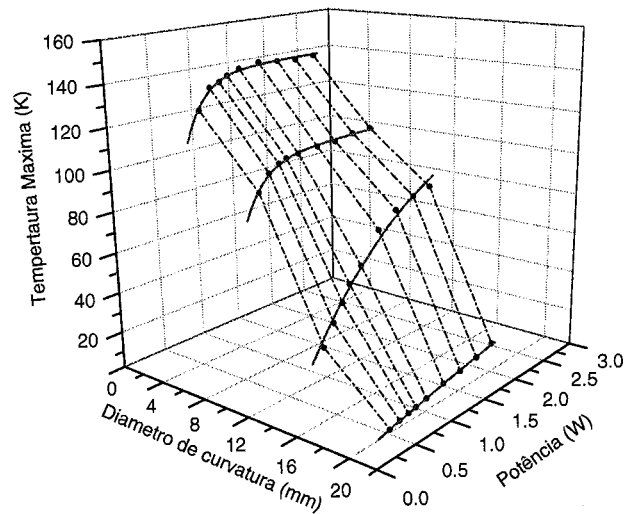


Figura 5- Relação entre o aumento de temperatura, o diâmetro de curvatura e a potência injectada. As linhas sólidas representam a dependência simulada através do modelo descrito pela equação anterior, com $P_{max}/h=0.00245 \pm 0.00010 \text{ K} \cdot \text{m}^2$ e $\beta=5.03 \pm 0.68 \text{ W}^{-1}$, $\chi^2 = 0.4542$.

Os resultados do ajuste entre as variações previstas pela equação (5) e os dados experimentais, mostram que é possível correlacionar o diâmetro de curvatura das fibras ópticas, a potência óptica aplicada e a variação de temperatura no revestimento da fibra óptica.

III. CONECTORES ÓPTICOS SUJEITOS A SINAIS DE ELEVADAS POTÊNCIAS

Usualmente as ligações entre fibras ópticas ou das fibras a equipamentos é realizada por conectores ópticos. Na figura 8 está representado um esquema de um conector óptico assim como da ligação efectuada entre dois conectores através de uma ligação mecânica.

Num conector óptico, a fibra, está localizada no centro do ferrule cerâmico no interior do conector. A união entre os dois conectores é formada pelo alinhamento preciso dos ferrule desses mesmos conectores. Apesar deste tipo de ligação óptica ser a mais prática e usual, o procedimento mais seguro para realizar uma ligação entre duas fibras, especialmente na presença de sinais ópticos com potências elevadas, é através da fusão das fibras. Contudo, este método pode não ser sempre aplicável, e assim, os conectores por contacto físico (FC/PC) são actualmente os mais utilizados nestas situações [9].

Com o aumento da utilização dos conectores PC na construção das redes ópticas, cresce a preocupação em relação à implementação em sistemas que utilizem sinais de elevada potências, uma vez que tal implica o aumento dos riscos e probabilidades de dano para a fibra e componentes ópticos [4,10].

Um dos danos mais comuns verificados nos conectores ópticos advém da contaminação das suas extremidades ou do dano físico facilmente provocado pelo acto de

ligar/desligar os conectores. A contaminação nos conectores ópticos pode ser devida a pó ou outras partículas orgânicas facilmente encontradas num contexto de instalação de redes ópticas. À medida que o procedimento de ligar/desligar é efectuado com conectores contaminados, as impurezas podem ser facilmente deslocadas e alojadas na região correspondente ao núcleo da fibra [11]. Essas impurezas localizadas podem actuar como centros de absorção do sinal óptico resultando num aquecimento local até temperaturas elevadas, o que induz danos permanentes na região do núcleo da fibra, com a conseqüente degradação do desempenho do conector [8,9,12,13].

Para além dos danos localizados, este ponto de aquecimento local pode induzir a ignição do efeito de rastilho, descrito na secção seguinte. Assim, conectores ópticos contaminados geralmente resultam na degradação do desempenho da ligação óptica, falhas funcionais e no aumento dos custos de instalação. Para evitar tais situações indesejáveis, o efeito da degradação da extremidade dos conectores para sinais de altas potências deve ser estudado.

Para analisar o efeito de altas potências em conectores contaminados, vários pares de conectores do tipo FC/PC foram submetidos a diferentes níveis de contaminação. Com essa finalidade, foram aplicadas várias camadas de uma solução aquosa a 25% de tinta preta, por deposição por mergulho do substrato, na extremidade dos conectores, de modo a obter uma atenuação inicial de 2, 4, 6, 8 e 10 dB. Para efeitos de comparação foram também testados conectores limpo (atenuação inicial 0 dB).

Para analisar o grau de degradação e a temperatura atingida pelos conectores contaminados submetidos a elevadas potências, o sinal óptico do laser Raman descrito anteriormente (IPG, modelo RLR-10-1480), foi injectado numa junção FC/PC, estando um dos conectores dessa junção contaminado, como descrito anteriormente. A potência óptica foi depois medida na outra extremidade da junção com um medidor de potência óptica (HP, 81531A Power Sensor, 800-1700 nm). Os valores da potência óptica utilizados neste estudo foi de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 W, e o tempo máximo de exposição foi de 10 min. A temperatura dos conectores e do ligador mecânico foi monitorizada com uma câmara térmica IR (ThermaCAM™ Flir i50), registando os valores de temperatura em intervalos de 10 s durante todo o período de exposição ao sinal óptico. O esquema do sistema experimental está representado na figura 6.

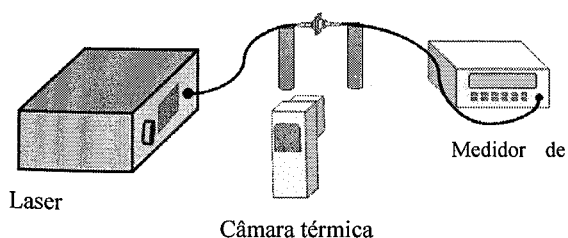


Figura 6- Esquema do sistema experimental implementado.

Neste estudo, todos os conectores em teste apresentaram um aumento de temperatura ao longo do tempo. Sendo que a temperatura atingida no ligador mecânico é proporcional ao nível de contaminação, como se pode verificar pela análise da figura 7. Ainda neste estudo verificamos que o conector usado para controlo, sem qualquer tipo de contaminação, manteve uma temperatura constante próxima da temperatura ambiente.

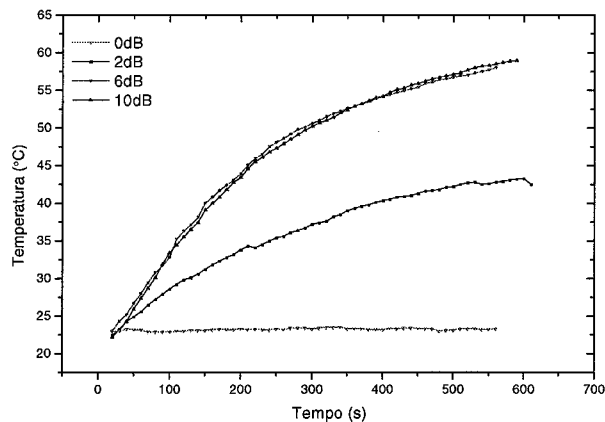


Figura7-Variação da temperatura ao longo do tempo para todos os graus de contaminação e uma potência óptica de entrada de 1W.

No decorrer dos ensaios experimentais efectuados verificou-se também que, para valores de 1W, todos os conectores com excepção do conector com contaminação de 2 dB, sofreram falha óptica. Relativamente aos testes efectuados para uma potência de 1,5 W, verificamos que os conectores com uma atenuação inicial de 4, 6, e 8 dB sofreram efeito rastilho. Para estes conectores a temperatura exterior não aumentou consideravelmente. Tal pode ser explicado pelo facto de o efeito de rastilho ter sido despoletado nos primeiros dois minutos de exposição às altas potências, e a temperatura máxima ser atingida após 10 minutos de exposição.

Por outro lado para potência injectada de 0,5 W, foi possível verificar o aumento da temperatura máxima com o aumento do nível de contaminação, mas sem existência do efeito de rastilho ou falha óptica, como se pode verificar na figura 8.

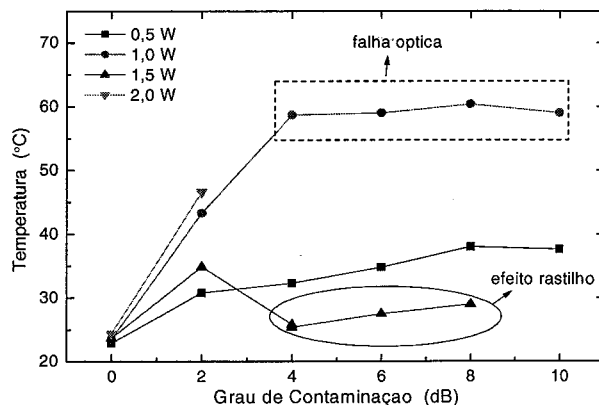


Figura 8 - Temperatura máxima registada no exterior dos conectores em função do grau de contaminação para as diferenças potências ópticas aplicadas.

Comparando ainda os valores para o mesmo nível de contaminação e para as diferentes potências injectadas, verificou-se que, um aumento da potência injectada no conector é acompanhado pelo aumento da temperatura máxima atingida. Assim, a temperatura nos conectores contaminados aumenta com três factores, o tempo de exposição, o aumento da potência aplicada e o com grau de contaminação.

Os conectores sujeitos aos testes descritos, foram posteriormente sujeitos a uma análise de microscopia electrónica de varrimento (SEM). Para efectuar a análise SEM, os conectores necessitaram de uma preparação prévia para que o seu comportamento seja o equivalente ao de um condutor eléctrico. Com esse objectivo, foi efectuada uma deposição de carbono por evaporação na superfície dos conectores em análise.

Independentemente do seu comportamento durante os testes realizados todos os conectores testados ficaram danificados permanentemente, apresentando uma "cratera" na zona do núcleo da fibra, como se pode verificar pelas imagens SEM exibidas na figura 9.

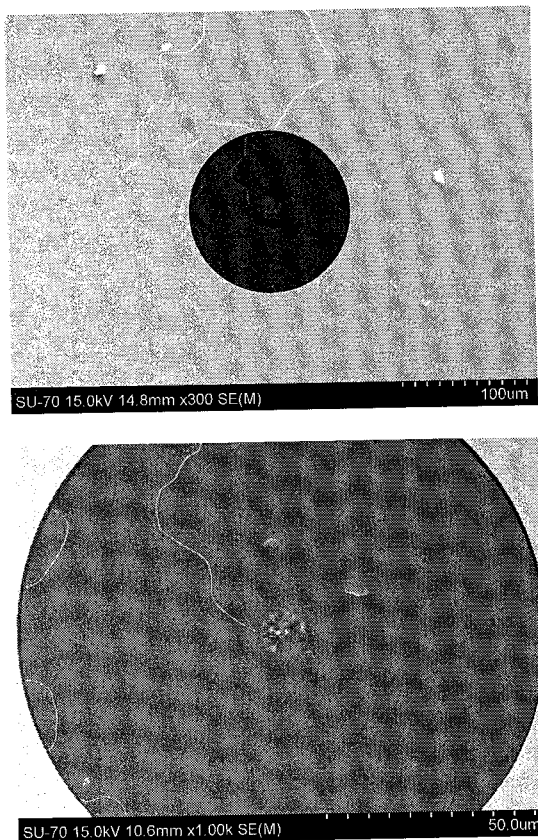


Figura 9- Imagens SEM dos conectores após os ensaios experimentais, contaminação de 4dB e potência de entrada de 1,5W.

Estes dados comprovam que a conjugação de potências ópticas elevadas e atenuação nos conectores resultam na degradação dos conectores ou da fibra óptica.

IV. EFEITO DE RASTILHO EM FIBRAS ÓPTICAS

O efeito rastilho em fibra óptica (fuse effect) é um fenómeno que pode ocorrer em fibras ópticas nas quais se propagam sinais com elevadas potências (usualmente superiores a 1W), levando à destruição catastrófica da fibra óptica ao longo de longas distâncias. No entanto este fenómeno só ocorre se existir um ponto de ignição com uma elevada temperatura [4,14].

Este fenómeno foi observado pela primeira vez por Kashyap em 1987 [15], contudo, não foi considerado um problema pois a potência óptica injectada nas fibras ópticas era claramente inferior a 1W. Com o desenvolvimento das comunicações ópticas que levou a um aumento da potência injectada na fibra óptica, o estudo do efeito rastilho tornou-se essencial para o desenvolvimento das redes ópticas.

O efeito rastilho em fibra é iniciado em localizações de perdas de potência óptica elevadas, usualmente em conectores contaminados/degradados ou em fibras ópticas sujeitas a curvaturas apertadas, sendo que estas perdas geram um aquecimento localizado [8,10]. O aumento da temperatura localizada resulta num aumento da absorção óptica da Sílica, levando a uma situação catastrófica que cria uma zona de fusão, que vaporiza o núcleo da fibra óptica, emitindo uma luz branca. Esta zona de fusão, devido a condução do calor na fibra, propaga-se em direcção à fonte de sinal, esta propagação só é interrompida quando a potência óptica injectada na fibra diminui abaixo do limiar. Depois da propagação do efeito rastilho o núcleo da fibra apresenta uma cadeia periódica de bolhas ficando permanentemente destruída. Num contexto de redes ópticas, este efeito pode causar a completa destruição da infra-estrutura ao longo de vários quilómetros, o que seria um incidente extremamente dispendioso [14].

O esquema da figura 10 representa o processo de ignição e propagação do efeito rastilho em fibras ópticas,

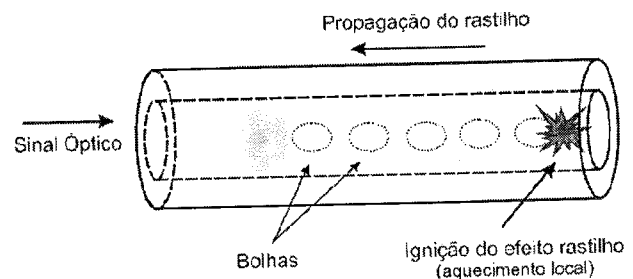


Figura 10- Representação esquemática do processo de ignição e propagação do efeito em rastilho em fibra ópticas

A figura 11 apresentam 3 fotogramas de um vídeo que mostra a propagação do efeito rastilho numa fibra

utilizada em telecomunicações (SMF), onde é visível a propagação da luz branca emitida na zona fusão.



Figura 11- Sequência de imagens da propagação do efeito rastilho numa fibra SMF (o intervalo temporal entre as imagens é de 0.7 s).

O limiar de potência óptica abaixo do qual não existe ignição nem propagação do rastilho é proporcional ao diâmetro do campo óptico modal da fibra óptica e ao comprimento de onda do sinal óptico. A densidade de potência óptica limiar situa-se entre 1-5 MW/cm², dependendo da composição da fibra e do comprimento de onda do sinal, contudo, para fibras microestruturadas, o limiar de potência aumenta aproximadamente 10 vezes [16]. Para as fibras ópticas SMF, usadas em telecomunicações o limiar de potência óptica é aproximadamente 1.0 W para um comprimento de onda de 1060 nm [17] e 1.5W para um comprimento de onda de 1467 nm [4].

A velocidade de propagação do efeito rastilho aumenta com a densidade de potência na fibra óptica e pode chegar 10 m.s⁻¹[14,18]. O gráfico da figura 12 apresenta as velocidades de propagação do rastilho numa fibra SMF medidas para sinais ópticos com comprimento de onda de 1480 nm e diferentes potências. Para estes valores de potências ópticas a velocidade aumenta linearmente com a densidade de potência do sinal propagado, contudo para valores de densidades de potências maiores este aumento da velocidade não é linear [18,19].

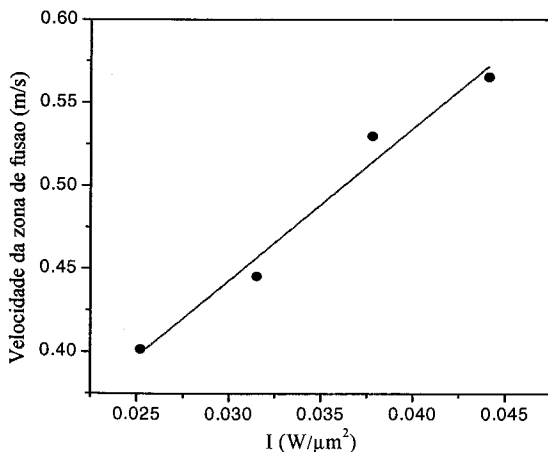


Figura 12- Velocidades experimentais em função da densidade de potência óptica para uma fibra SMF. A linha corresponde ao ajuste linear com declive de $9.1 \pm 1.0 \text{ ms}^{-1} \text{ W}^{-1} \mu\text{m}^2$ ($r^2=0.964$)

Como já foi referido, o núcleo da fibra, depois da propagação do efeito rastilho, apresenta uma cadeia periódica de bolhas, o tamanho e o espaçamento destas bolhas varia com a intensidade de potência óptica [14]. A figura 13 apresenta imagens microscópicas da fibra SMF

depois de sofrer propagação do efeito rastilho para duas potências ópticas. Nestas fotografias não só é visível a cadeia bolhas no núcleo da fibra como também as diferenças entre as duas potências, para a potência de 2.5 W o espaçamento entre as bolhas é menor. O gráfico da figura 13 apresenta o espaçamento entre bolhas em fibra SMF que sofreu propagação do efeito rastilho com sinais ópticos de 1480 nm de comprimentos de onda e diferentes potências ópticas, Para esta gama de potências o intervalo entre as bolhas varia linearmente com a densidade de potência.

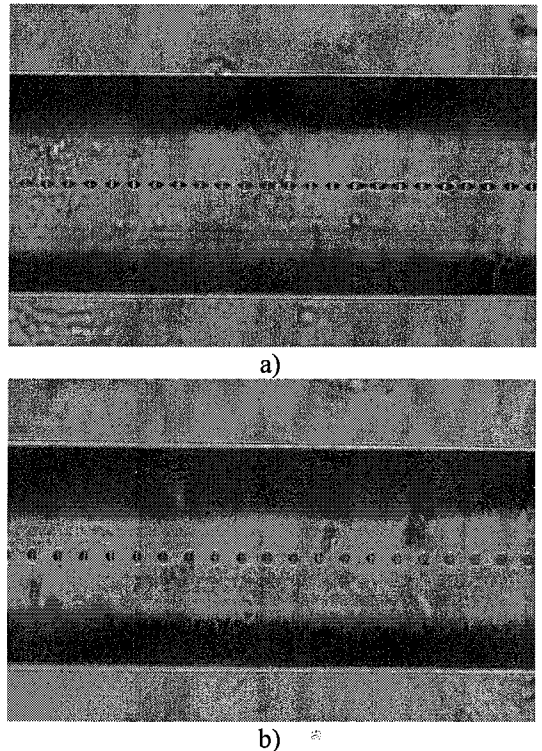


Figura 13 - Fotografias, obtidas com microscópio óptico, de uma fibra óptica depois de sofrer propagação do efeito rastilho com uma potência óptica de a) 4W (direita) e b) 2.5W e comprimento de onda de 1480 nm. (fotografias obtidas com um ampliação de 50x)

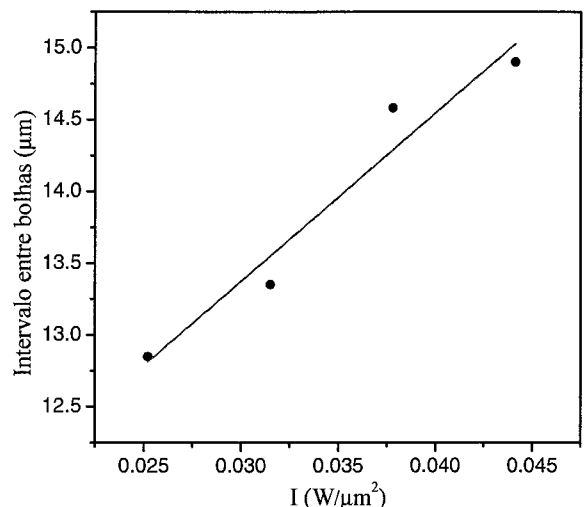


Figura 14- Intervalo entre bolha em função da densidade de potência óptica para uma fibra SMF. A linha corresponde ao ajuste linear com declive de $117 \pm 18.9 \mu\text{m}^3 \text{ W}^{-1}$ ($r^2=0.925$)

O efeito rastilho depois de iniciado pode destruir vários quilómetros de fibra óptica, para além disso pode chegar aos equipamentos de emissão e processamento óptico e causar estragos e prejuízos elevados. Por estes motivos é necessário detectar efeito rastilho uma vez iniciada a sua propagação, para que as fontes de sinal óptico sejam desligadas e a propagação pare. Foram propostas algumas técnicas para detectar a propagação do efeito rastilho, como a observação do espectro eléctrico da luz reflectida para identificar a presença do rastilho [20], e mais recentemente foi proposto um método baseado no uso de sensores de redes de Bragg gravadas em fibra ópticas, este sensores detectam o aumento da temperatura na superfície da fibra provocado pela passagem do rastilho e assim identificam a propagação do efeito rastilho [21].

Também podem ser usadas técnicas que param a propagação do efeito rastilho, que são úteis como protecção adicional dos componentes activos da rede óptica. Um exemplo de um método deste tipo é a introdução de uma microfibras com um elevado diâmetro modal o que diminui a densidade de potência e consequentemente promove a extinção da propagação do rastilho [22]. Estes métodos são úteis como protecção adicional dos componentes activos da rede óptica.

V. CONCLUSÕES

No estudo apresentado foram analisados vários factores, responsáveis pela degradação física da fibra óptica e a sua relação com a potência óptica do sinal injectado. Os factores em análise foram o diâmetro de curvatura a que uma fibra é sujeita, a contaminação de conectores ópticos e o efeito rastilho, como possível consequência da existência dos dois primeiros factores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FCT através do projecto FEFOF (PTDC/EEA-TEL/72025/2006). Fátima Domingues e Ana Maria Rocha agradecem as suas bolsas de doutoramento, respectivamente, SFRH/BD/69097/2010 e SFRH/BD/41773/2007.

REFERÊNCIAS

[1] A. M. Rocha, A. Martins, M. Facao and P. S. Andre, 11th International Conference on Transparent Optical Networks, 2009.

- [2] A. M. Rocha, B. Neto, A. Martins, G. Incerti, D. Forin, G. Bellefi, M. Facao, J. L. Pinto, A. L. J. Teixeira, R. N. Nogueira, M. J. Lima and P. S. Andre, 10th International Conference on Telecommunications, 2009.
- [3] M. Bigot-Astruc, P. Sillard, S. Gauchard, P. Le Roux and E. Brandon, Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, 2006.
- [4] K. Seo, N. Nishimura, M. Shiino, R. Yuguchi and H. Sasaki, Furukawa Review 24 (2003), 17.
- [5] S. L. Logunov and M. E. DeRosa, Electronics Letters 39 (2003), 897.
- [6] R. M. Percival, E. S. R. Sikora and R. Wyatt, Electronics Letters 36 (2000), 414.
- [7] P. S. Andre, A. M. Rocha, B. Neto, A. Martins, M. Facao, J. L. Pinto, A. L. J. Teixeira, R. N. Nogueira, M. J. Lima, G. Incerti, D. Forin and G. T. Belleffi, IEEE Africon, Nairobi, Kenya, 2009.
- [8] P. S. Andre, A. M. Rocha, F. Domingues and A. Martins, Electronics Letters 46 (2010), 695.
- [9] M. de Rosa, J. Carberry, V. Bhagavatula, K. Wagner and C. Saravanos, Lightwave Technology, Journal of 20 (2002), 879.
- [10] A. Martins, A. M. Rocha and P. S. Andre, International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Belem, Brazil, 2009.
- [11] T. Berdinskikh, A. Lau, D. Fisher, H. Sun-Yuan, M. Hughes, S. Lytle, T. Mitcheltree, B. J. Roche, H. Tkalec and D. H. Wilson, Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, San Diego, CA, USA, 2008.
- [12] S. Yanagi, S. Asakawa and R. Nagase, Electronics Letters 38 (2002), 977.
- [13] P. S. Andre, A. M. Rocha, F. Domingues and A. Martins, 15th Optoelectronics and Communications Conference Sapporo, Japan, 2010.
- [14] P. S. Andre, M. Facao, A. M. Rocha, P. Antunes and A. Martins, Conference on Optical Fiber Communication, collocated National Fiber Optic Engineers Conference San Diego, CA, USA, 2010.
- [15] R. Kashyap and K. J. Blow, Electronics Letters 24 (1988), 47.
- [16] E. M. Dianov, I. A. Bufetov, A. A. Frolov, Y. K. Chamorovsky, G. A. Ivanov and I. L. Vorobjev, Ieee Photonics Technology Letters 16 (2004), 180.
- [17] D. D. Davis, S. C. Mettler and D. J. DiGiovanni, SPIE, 1997.
- [18] E. M. Dianov, V. E. Fortov, I. A. Bufetov, V. P. Efremov, A. E. Rakitin, M. A. Melkumov, M. I. Kulish and A. A. Frolov, Ieee Photonics Technology Letters 18 (2006), 752.
- [19] M. Facao, A. M. Rocha and P. S. Andre, Lightwave Technology, Journal of 29 (2011), 109.
- [20] K. S. Abedin and T. Morioka, Conference on Optical Fiber Communication, collocated National Fiber Optic Engineers Conference San Diego, CA 2009.
- [21] A. M. Rocha, P. Antunes, F. Domingues, M. Facao and P. S. André, 12th International Conference on Transparent Optical Networks Munich, Germany, 2010.
- [22] D. P. Hand and T. A. Birks, Electronics Letters 25 (1989), 33.