

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

ROBERTA CARDOSO CHAVES

**GRAVAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE BRAGG E REDES
DE PERÍODO LONGO EM FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE
NÚCLEO SÓLIDO**

TESE DE DOUTORADO

CURITIBA
2016

ROBERTA CARDOSO CHAVES

**GRAVAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE BRAGG E REDES
DE PERÍODO LONGO EM FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE
NÚCLEO SÓLIDO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Almeida Prado Pohl

**CURITIBA
2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

TXXX Chaves, Roberta C.

GRAVAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE BRAGG E REDES DE PERÍODO LONGO EM FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE NÚCLEO SÓLIDO / Roberta Cardoso Chaves. – 2016.
89 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Almeida Prado Pohl.

Tese de Doutorado (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2016.

Bibliografia: f. 83-89.

1. Fibras de Cristal Fotônico. 2. Redes de Período Longo. 3. Redes de Bragg. 4. Gravação de Redes. 5. Laser CO₂.

CDD (XX. ed.) XXX.X

Biblioteca Central

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

C512g Chaves, Roberta Cardoso
2016 Gravação e caracterização de redes de bragg e redes de período longo em fibras de cristal fotônico de núcleo sólido / Roberta Cardoso Chaves.-- 2016.
89 f.: il; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês.

Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2016.
Bibliografia: f. 83-89.

1. Fibras ópticas. 2. Óptica de cristais. 3. Redes de Bragg. 4. LPG (Redes de período longo). 5. Fotônica. 6. Detectores de fibra óptica. 7. Métodos de simulação. 8. Engenharia elétrica - Teses. I. Pohl, Alexandre de Almeida Prado, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Tese Nº. _____

Gravação e Caracterização de Redes de Bragg e Redes de Período Longo em Fibras de Cristal Fotônico de Núcleo Sólido

por

Roberta Cardoso Chaves

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Almeida Prado Pohl

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de DOUTOR EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: **Fotônica em Engenharia**, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às **15:00h** do dia **13 de outubro de 2015**. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

Prof. Dr. Alexandre Pohl
(Presidente – UTFPR)

Prof. Dr. Aleksander Sade Paterno
(UDESC)

Prof. Dr. Roberson Assis de Oliveira
(VOLVO DO BRASIL S.A)

Profa. Dra. Marcia Muller
(UTFPR)

Prof. Dr. Valmir de Oliveira
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

Prof. Dr. Emilio Carlos Gomes Wille
(Coordenador do CPGEI)

À minha filha, Nicole, que nasceu junto com esta tese.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelos dons e graças recebidos todos os dias da minha vida, agradeço.

Aos meus pais, José e Maria, que me sustentaram emocional e financeiramente até o dia de hoje, mas nunca deixaram de acreditar no meu sucesso, agradeço.

Ao meu amado, Lauro, pai querido e presente da Nicole, amigo inseparável, pelas vezes que chorei no seu ombro e você enxugou minhas lágrimas, agradeço.

Às minhas irmãs Marcela e Fernanda, que cuidaram da minha Nicole quando precisei me ausentar em viagens, e proporcionaram a ela momentos de verdadeiras férias, agradeço.

Ao meu cunhado Diego, que adotou a Nicole como uma segunda filha, e a acarinhou como pai na minha ausência, agradeço.

Ao meu mestre, Professor Hypolito José Kalinowski, pela incontestável e sincera amizade, agradeço.

À minha amiga, Professora Ilda Abe, pela sua presença em minha vida, sinceramente, agradeço.

Ao meu amigo, Professor Valmir de Oliveira, pelas palavras de incentivo durante os momentos difíceis do trabalho, agradeço.

Ao professor Aleksander Paterno, que confiou a mim a chave do seu laboratório como se eu fosse uma de suas alunas, agradeço.

Com todo respeito que ele merece, meu orientador e professor Alexandre de Almeida Prado Pohl, que durante este percurso enxergou em mim além da aluna e me deu uma segunda chance de mostrar o meu valor, eterna gratidão.

“Combati o bom combate, completei a corrida, guardei a fé”. *São Paulo Apóstolo, 2 Timóteo 4:7*

RESUMO

CHAVES, Roberta Cardoso. GRAVAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE BRAGG E REDES DE PERÍODO LONGO EM FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE NÚCLEO SÓLIDO. 89 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Com o intuito de agregar valor à literatura numa área onde resultados positivos são incentivadores no processo de continuidade de pesquisas nesta área, até que se consiga obter a necessária reprodutibilidade do processo para gravação de redes em fibras óticas micro-estruturadas, este trabalho mostra o sucesso obtido na gravação de redes de Bragg e redes de período longo em fibras de cristal fotônico de núcleo sólido. As redes de Bragg são gravadas em fibras micro-estruturadas de 12 anéis de furos ao redor do núcleo, dopado com uma pequena quantidade de germânio. A gravação destas redes é feita utilizando radiação ultravioleta (UV) do laser excímero KrF em 248 nm e máscara de fase, e são obtidas redes de Bragg de ≈ 11 dB de refletividade.

As redes de período longo, por sua vez, são gravadas em fibras micro-estruturadas de sílica pura de 6 anéis de furos de ar ao redor do núcleo. Utilizando o método de gravação ponto-a-ponto e radiação infra-vermelha (IR) do laser CO₂ são obtidas redes com resultados condizentes com a literatura, ou seja, redes de período longo com um modo principal de ressonância e perda na transmissão de até 17 dB.

Também são detalhadas as caracterizações das redes de período longo quanto à tração mecânica e à temperatura, com o diferencial da repetibilidade de ambos os testes para maior confiabilidade nos resultados. Foram obtidas sensibilidades à tração entre $-0,85 \text{ pm}/\mu\epsilon$ e $-6,3 \text{ pm}/\mu\epsilon$. Obtiveram-se sensibilidades à temperatura iguais a $-18,4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ e $-19,6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.

Palavras-chave: *Fibras de Cristal Fotônico, Redes de Bragg, Redes de Período Longo*

ABSTRACT

CHAVES, Roberta Cardoso. WRITTING AND CHARACTERIZATION OF BRAGG GRATINGS AND LONG PERIOD GRATINGS IN ALL SOLID MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBER . 89 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

In order to contribute to literature in an area where successful results are important in the process of further research in this area, until it can be obtained the necessary reproducibility of the process of writting gratings in micro-structured optical fibers, this work shows positive Bragg and long period gratings written in solid core photonic crystal fibers. The Bragg gratings are written in a 12 rings of holes around the core doped with a small amount of germanium micro-structured fiber. Written process of these gratings is made using ultraviolet excimer laser KrF at 248 nm and phase mask, and are obtained Bragg gratings with ≈ 11 dB reflectivity.

Long period gratings, in turn, are written in micro-structured optical fibers made of pure silica 6 rings of air holes around the core. Using the method of point-to-point and infrared radiation CO₂ laser are obtained gratings with consistent results within the literature, that is, gratings with a main mode of resonance and transmission loss of up to 17 dB.

This work also detailed characterizations of long period gratings on mechanical stress and temperature variation, emphasizing the repeatability of both tests for more reliable results. Sensitivity to mechanical stress were obtained between $-0,85 \text{ pm}/\mu\epsilon$ and $-6,3 \text{ pm}/\mu\epsilon$. More, sensitivities to temperature variation were equal to $-18,4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ and $-19,6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.

Keywords: Photonic Crystal Fiber, Bragg Gratings, Long Period Gratings

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| FIGURA 1 | – Estrutura básica da seção transversal em uma fibra de cristal fotônico. O núcleo sólido é formado pela ausência de um furo de ar no centro da estrutura | 21 |
| FIGURA 2 | – PCFs fabricadas por Russell (2006); (a) Primeira PCF de núcleo sólido fabricada, casca micro-estruturada de 300nm com $\Lambda = 2,3\mu\text{m}$; (b) PCF de baixa perda, $\Lambda = 2\mu\text{m}$; (c) PCF fabricada em vidro (Schott SF6) com diâmetro do núcleo $d = 2\mu\text{m}$ | 22 |
| FIGURA 3 | – Perfil de campo próximo do modo fundamental guiado na PCF: $\Lambda = 2,3\mu\text{m}$ e $\frac{d}{\Lambda} = 0,23$. (a) para o comprimento de onda $\lambda = 458\mu\text{m}$ o modo fundamental possui menor diâmetro e penetra na região de sílica da casca micro-estruturada da PCF desviando-se dos furos de ar; e (b) para o comprimento de onda $\lambda = 1550\mu\text{m}$, o modo fundamental possui maior diâmetro e se comporta como uma fibra SMF padrão | 23 |
| FIGURA 4 | – Parâmetro V_{PCF} para fibras de núcleo sólido versus a razão entre o espaçamento entre os furos e o comprimento de onda no vácuo para diferentes valores $\frac{d}{\Lambda}$ | 24 |
| FIGURA 5 | – Seção transversal da fibra micro-estruturada: $d = 0,8$, $\Lambda = 7\mu\text{m}$ e $\rho = 1,2\mu\text{m}$ | 27 |
| FIGURA 6 | – Seção transversal da PCF utilizada para a gravação de LPG. (a) Diagrama esquemático da PCF fotossensível e (b) Escaneamento com microscópio eletrônico da seção transversal da PCF | 29 |
| FIGURA 7 | – (a) Montagem experimental: espelho controlado automaticamente para a varredura do feixe ao longo da PCF. (b) Seção transversal da PCF de 7 anéis; $\frac{d}{\Lambda} = 0,167$, $d = 0,5\mu\text{m}$ e $\Lambda = 3\mu\text{m}$ | 30 |
| FIGURA 8 | – Espectro de transmissão da LPG após a gravação de 60 períodos. <i>inset</i> : Sulcos formados na casca da PCF | 30 |
| FIGURA 9 | – Seções transversais de PCF aquecida por corrente de 25 mA e tempos de descarga de 55 ms, 70 ms, 80 ms e 90 ms, respectivamente | 31 |
| FIGURA 10 | – Seção transversal da LMA-10 (a) antes e (b) depois da gravação da LPG. Seção longitudinal da PCF (c) vista da direção C e (d) vista da direção D . | 32 |
| FIGURA 11 | – Seção transversal da fibra PCF NL-1550-POS-1 | 36 |
| FIGURA 12 | – Curva de dispersão da fibra PCF NL-1550-POS-1 | 36 |
| FIGURA 13 | – Atenuação, dispersão e diâmetro de campo modal da PCF LMA-10 | 37 |
| FIGURA 14 | – Microscopia ótica da seção transversal da fibra PCF LMA-10. Os furos de ar de diâmetro $d = 2,95\mu\text{m}$ estão arranajados de forma triangular com espaçamento entre eles igual a $\Lambda = 6,9\mu\text{m}$ | 37 |
| FIGURA 15 | – Distribuição da intensidade de campo na seção transversal da fibra LMA-10; $n_{\text{núcleo}}^{\text{eff}} = 1,441024$ | 38 |

| | | |
|-----------|--|----|
| FIGURA 16 | – Distribuição da intensidade de campo na seção transversal da PCF. Propagação dos modos de casca 1 e 2 da fibra ótica micro-estruturada LMA-10 | 39 |
| FIGURA 17 | – Distribuição da intensidade do campo elétrico na seção transversal da PCF. Propagação dos modos de casca 3 e 4 nas micro-estruturas da LMA-10 .. | 39 |
| FIGURA 18 | – Distribuição da intensidade do campo elétrico na seção transversal da PCF. Propagação dos modos de casca 5 e 6 nas micro-estruturas da LMA-10 .. | 40 |
| FIGURA 19 | – Distribuição da intensidade do campo elétrico na seção transversal da PCF. Propagação dos modos de casca 7 e 8 nas micro-estruturas da LMA-10 .. | 40 |
| FIGURA 20 | – Distribuição da intensidade do campo elétrico na seção transversal da PCF. Propagação dos modos de casca 9 e 10 nas micro-estruturas da LMA-10 .. | 41 |
| FIGURA 21 | – Distribuição da intensidade do campo elétrico na seção transversal da PCF. Propagação dos modos de casca 11 e 12 nas micro-estruturas da LMA-10 .. | 41 |
| | | |
| FIGURA 22 | – Ilustração do processo de fusão entre uma PCF de diâmetro de núcleo menor que da SMF. A temperatura ao longo do eixo longitudinal da PCF diminui da centro (eletrodos) para a extremidade da fibra | 43 |
| FIGURA 23 | – Deslocamento da extremidade da PCF em relação ao eixo central de descarga elétrica $gap = 50 \mu m$ | 44 |
| FIGURA 24 | – Diagrama esquemático do procedimento de fusão entre fibras PCF e SMF | 45 |
| FIGURA 25 | – (a) Fotografia do ajuste automático entre as fibras PCF-SMF. (b) Fotografia do ajuste manual entre as fibras. (c) Emissão do arco e fusão entre as fibras | 46 |
| FIGURA 26 | – Perdas registradas nas emendas entre fibras PCF NL-1550-POS-1 e SMF: (a) 0,35 dB; (b) 0,35 dB, e entre fibras PCF LMA-10 e fibras SMF: (c) 0,04 dB e (d) 0,03 dB | 47 |
| | | |
| FIGURA 27 | – Montagem experimental para gravação de FBG em PCF NL-1550-POS-1 utilizando máscara de fase | 49 |
| FIGURA 28 | – Seção transversal da fibra PCF NL-1550-POS-1 utilizada na gravação das FBGs | 49 |
| FIGURA 29 | – Espectro da rede de Bragg FBG-X ao longo do tempo. Observa-se o deslocamento do comprimento de onda de Bragg $\lambda_{Bragg} \approx 1513 nm$ para valores maiores e o aumento da refletividade a cada rajada de pulsos do feixe UV até um valor máximo de $\approx 22 dB$ | 51 |
| FIGURA 30 | – Deslocamento do comprimento de onda de Bragg com o aumento da fluência acumulada para a amostra FBG-X. Observa-se o aumento da refletividade da rede (quadrados cheios) à medida que a energia fornecida à rede se acumula. Ao mesmo tempo, nota-se um deslocamento do comprimento de onda de Bragg (quadrados vazados) para valores maiores | 52 |
| FIGURA 31 | – Espectro de evolução da rede de Bragg FBG-Y1 até uma fluência acumulada $\leq 500.000 \frac{mJ}{cm^2}$. Observa-se o deslocamento do comprimento de onda de Bragg λ_B para valores maiores com o aumento da fluência acumulada até $\approx 1513 nm$ e refletividade máxima de 17,5 dB | 53 |
| FIGURA 32 | – Espectro de evolução da rede de Bragg FBG-Y2 para fluência acumulada $\geq 500.000 \frac{mJ}{cm^2}$. Nota-se que o comprimento de onda de Bragg λ_B desloca-se para valores maiores, porém com sua refletividade decrescendo | 53 |
| FIGURA 33 | – (a) Deslocamento do comprimento de onda de Bragg na amostra FBG-Y | |

| | | |
|-----------|--|----|
| | para valores maiores e (b) deslocamento do comprimento de onda de Bragg para valores menores com o aumento da fluência acumulada para valores $\geq 500.000 \frac{mJ}{cm^2}$ | 54 |
| FIGURA 34 | – Deslocamento irregular do comprimento de onda de Bragg com o aumento da fluência acumulada devido ao maior espalhamento do feixe UV nas micro-estruturas da PCF na amostra FBG-W | 55 |
| FIGURA 35 | – Evolução do crescimento da rede de Bragg da amostra FBG-W | 56 |
| FIGURA 36 | – Diagrama esquemático da montagem experimental para gravação de LPG em SMF-28 | 58 |
| FIGURA 37 | – (a) Fotografia da montagem experimental para a gravação de LPG em fibra SMF-28 padrão. (b) Conjunto de roldanas que sustenta a fibra SMF-28 para que a mesma fique na posição horizontal ortogonalmente ao feixe do laser | 59 |
| FIGURA 38 | – Evolução da LPG gravada na amostra SMF-1 com laser CO ₂ e números de períodos (a) 10, (b) 20, (c) 30 e (d) 40 | 59 |
| FIGURA 39 | – (a) Comportamento da LPG à medida que se aumenta o número de períodos; (b) Fotografias da LPG gravada em fibra SMF-1 | 60 |
| FIGURA 40 | – Fotografias das LPGs gravadas em amostras de fibras da NKT | 62 |
| FIGURA 41 | – Espectro de transmissão da LPG na amostra NKT-02 | 63 |
| FIGURA 42 | – (a) Picos de ressonância apresentados pela LPG gravada na amostra NKT05; $\lambda_1 = 1521,2\text{nm}$ e $\approx 5\text{dB}$ de atenuação e $\lambda_2 = 1546,6\text{nm}$ com $\approx 3\text{dB}$ de atenuação em transmissão; (b) Fotografias da seção longitudinal da LPG-NKT05, onde é possível observar o afunilamento da PCF até sua completa ruptura | 63 |
| FIGURA 43 | – (a) Montagem experimental para verificação da LPG através do OVA. (b) Fotografias da LPG gravada na NKT Photonics | 64 |
| FIGURA 44 | – Pico de ressonância apresentado pela LPG gravada na amostra NKT-08 .. | 64 |
| FIGURA 45 | – Seção longitudinal da LPG em fibra LMA-10 | 66 |
| FIGURA 46 | – Diagrama esquemático da montagem experimental para gravação de LPG em LMA-10 | 68 |
| FIGURA 47 | – Fotografia da seção transversal das LPGs M e N gravadas em fibra micro-estruturada. Notam-se a formação de bolhas de ar quente no interior da fibra, acumulando calor até o rompimento da mesma. Na LPG-N observa-se o afunilamento da fibra ótica antes do rompimento | 69 |
| FIGURA 48 | – Diagrama esquemático utilizado na caracterização das LPGs quanto à tração e temperatura. O símbolo (*) indica o equipamento utilizado somente nos testes de temperatura | 70 |
| FIGURA 49 | – Microscopia óptica da seção longitudinal da PCF LMA-10 mostrando as marcas produzidas pelos pulsos do laser de CO ₂ | 71 |
| FIGURA 50 | – Espectro de transmissão das LPGs A, B, C e D. O comprimento de onda de ressonância é diferente para cada LPG, mas todos os vales na transmissão apresentam boa profundidade. No comprimento de onda de ressonância, a LPG-A apresenta rejeição de 14dB, LPG-B mostra um vale de 11dB, LPG-C alcança 17dB e LPG-D apresenta uma rejeição de 13dB | 72 |
| FIGURA 51 | – Espectro de transmissão das LPGs E e F | 73 |
| FIGURA 52 | – Comprimento de onda da LPG-B em relação à tração mecânica axial aplicada. O desvio padrão típico é de 1,3% | 74 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 53 – Comprimento de onda da LPG-C em relação à tração mecânica axial aplicada. O desvio padrão típico é de 1,2% | 74 |
| FIGURA 54 – Comprimento de onda da LPG-D em relação à tração mecânica axial aplicada. O desvio padrão típico é de 4,1% | 75 |
| FIGURA 55 – Variação do comprimento de onda de ressonância em relação à tração mecânica aplicada para LPG-B, LPG-C e LPG-D | 75 |
| FIGURA 56 – Comprimento de onda versus tração aplicada para a LPG-A de apenas $L = 0,7$ mm de comprimento. | 77 |
| FIGURA 57 – Variações dos comprimentos de onda das LPG-E e LPG-F medidos com relação à variação de temperatura para redes de diferentes períodos | 78 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|---|----|
| TABELA 1 | – Parâmetros utilizados para a emenda entre fibras SMF e NL-1550-POS-1 e LMA-10 no terceiro ciclo | 46 |
| TABELA 2 | – Gravação das FBGs | 50 |
| TABELA 3 | – Parâmetros de Gravação da FBG-X | 50 |
| TABELA 4 | – Parâmetros de Gravação da FBG-Y | 52 |
| TABELA 5 | – Parâmetros de Gravação da FBG-W | 55 |
| TABELA 6 | – Parâmetros utilizados para a gravação da LPG em fibra LMA-10 de 5cm . | 65 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|------|--|
| UV | <i>Ultraviolet Radiation</i> |
| IR | <i>Infrared Radiation</i> |
| PCF | <i>Photonic Crystal Fibers</i> |
| MOF | <i>Microstructured Optical Fiber</i> |
| FBG | <i>Fiber Bragg Grating</i> |
| LPG | <i>Long Period Grating</i> |
| LMA | <i>Large Mode Area</i> |
| TIR | <i>Total Internal Reflexion</i> |
| FDTD | <i>Finite Difference Time Domain</i> |
| PML | <i>Perfectly Matched Layer</i> |
| SLED | <i>Superluminescent Light Emitting Diode</i> |
| LED | <i>Light Emitting Diode</i> |
| OVA | <i>Optical Vector Analyser</i> |
| ASE | <i>Amplified Spontaneous Emission</i> |
| FWHM | <i>Full Width at Half Maximum</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS | 16 |
| 1.2 CONTRIBUIÇÕES À ÁREA DE PESQUISA | 19 |
| 2 FUNDAMENTOS | 21 |
| 2.1 FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE NÚCLEO SÓLIDO | 21 |
| 2.2 REDES DE BRAGG EM FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE NÚCLEO SÓLIDO | 25 |
| 2.2.1 Fluência Acumulada | 28 |
| 2.3 REDES DE PERÍODO LONGO EM FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE | |
| NÚCLEO SÓLIDO | 29 |
| 3 CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE NÚCLEO | |
| SÓLIDO | 35 |
| 3.1 NL-1550-POS-1 NKT PHOTONICS | 35 |
| 3.2 LMA-10 | 35 |
| 4 FUSÃO ENTRE FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE NÚCLEO SÓLIDO E | |
| MONOMODO PADRÃO | 42 |
| 4.1 METODOLOGIA E RESULTADOS | 45 |
| 4.2 CONCLUSÃO | 46 |
| 5 GRAVAÇÃO DE FBGS | 48 |
| 5.1 FBGS EM PCF NL-1550-POS-1 | 48 |
| 5.1.1 Procedimento Experimental, Resultados e Discussão | 48 |
| 6 GRAVAÇÃO DE LPGS | 57 |
| 6.1 LPGS EM FIBRAS SMF-28 | 57 |
| 6.1.1 Procedimento Experimental, Resultados e Discussão | 57 |
| 6.2 LPGS EM FIBRAS NKT PHOTONICS | 60 |
| 6.2.1 Procedimento Experimental, Resultados e Discussão | 60 |
| 6.3 LPGS EM FIBRAS LMA-10 | 67 |
| 6.3.1 Procedimento Experimental, Resultados e Discussão | 67 |
| 7 CONCLUSÃO | 79 |
| 7.1 TRABALHOS FUTUROS | 82 |
| 7.2 TRABALHOS PUBLICADOS | 82 |
| REFERÊNCIAS | 83 |

1 INTRODUÇÃO

As fibras de cristal fotônico PCF (*Photonic Crystal Fibers*), também conhecidas como fibras óticas micro-estruturadas MOF (*Microstructured Optical Fiber*), são fibras óticas que possuem sua casca micro-estruturada, melhorando algumas características da propagação da luz e até mesmo introduzindo novas propriedades quando comparadas às fibras óticas convencionais (RUSSELL, 2006), (JR., 2010). Por exemplo, elas operam como guias de onda monomodo em uma larga faixa de comprimentos de onda (BIRKS *et al.*, 1997); apresentam baixa perda em curvaturas (NAKAJIMA *et al.*, 2003); possibilitam projetos específicos para a exploração de suas características não-lineares (FATOME *et al.*, 2009) e podem também guiar a luz em estruturas com núcleos ocos (POTTAGE *et al.*, 2003). Esta classe de fibras óticas possui um conjunto de parâmetros que as caracterizam: o diâmetro dos furos de ar da casca micro-estruturada, d , o raio do núcleo, ρ , e o espaçamento medido entre o centro de dois furos próximos, denominado *pitch*, Λ . A combinação destes parâmetros permite o projeto de PCFs para propósitos operacionais específicos. O sensoriamento com fibras de cristal fotônico, por exemplo, possibilita novas maneiras de medir parâmetros físicos como pressão e temperatura, componentes químicos, entre outros. Os furos na casca micro-estruturada, por exemplo, podem ser preenchidos apropriadamente com líquidos ou gases proporcionando um aumento da sensibilidade das grandezas a serem medidas (CORDEIRO *et al.*, 2006), (CHOI *et al.*, 2007).

As redes de Bragg são o resultado de modulações periódicas no índice de refração do núcleo da fibra ótica causada pela exposição da fibra a um intenso padrão de interferência, descoberto por Hill *et al.* em 1978 (HILL *et al.*, 1978). O método mais comum de gravação de redes de Bragg FBG (*Fiber Bragg Grating*) em PCFs de núcleo sólido encontra-se na modulação do índice de refração (GROOTHOFF *et al.*, 2003). Na ausência da fotossensibilidade observada em fibras que possuem dopantes na matriz, a gravação utilizando o método tradicional com radiação ultra-violeta UV em 244nm e em 248nm produz redes “fracas”, ou seja, redes de baixa refletividade. Entretanto, desde a primeira demonstração de FBGs em PCFs dopadas com germânio (EGGLETON *et al.*, 1999), novas técnicas foram desenvolvidas para a gravação de FBGs em PCFs de núcleo sólido de sílica pura utilizando

laser ArF em 193 nm, através do processo de absorção de dois fótons (EGGLETON *et al.*, 1999), (CANNING, 2007). A absorção de dois fótons em 193 nm quebra as ligações entre $Si - O_2$, causando um re-arranjo estrutural que leva à densificação do material e à alteração do índice de refração (GROOTHOFF *et al.*, 2003). Outra problemática a ser considerada na gravação de FBGs em PCFs através da exposição ao feixe UV é o forte espalhamento da luz nas micro-estruturas da casca. Trabalhos já privilegiaram a fabricação de FBGs em PCFs com um número menor de anéis ao redor do núcleo para a redução do espalhamento da luz (GEERNAERT *et al.*, 2008), inclusive as primeiras redes de Bragg gravadas no Brasil foram inscritas em fibras de cristal fotônico de 5 anéis de furos de ar ao redor do núcleo (MARTELLI *et al.*, 2010). Outra solução também utilizada é a produção de *tapers* com a PCF e a gravação das FBGs sobre o *taper*, porém com algumas ressalvas: todos os furos podem ser colapsados na fabricação do *taper*, e a rede de Bragg gravada nesta região produziria resposta multimodal na transmissão/reflexão (SMELSER, 2007).

Vários métodos de fabricação são empregados para a gravação de redes de período longo LPG (*Long Period Grating*) em fibras de cristal fotônico de núcleo sólido como, por exemplo, exposição à radiação UV (EGGLETON *et al.*, 2000), exposição ao feixe de CO_2 (RAO *et al.*, 2003), (WANG, 2010), e exposição ao laser de femtosegundos (KONDO *et al.*, 1999). A técnica de irradiação com laser CO_2 é a mais flexível e a que possui menor custo, já que não necessita do uso de máscara de fase e nenhuma fotossensibilidade específica para a inscrição das redes em fibras de cristal fotônico de sílica pura. Ademais, o processo de exposição ao feixe de CO_2 pode ser controlado ponto-a-ponto, possibilitando a inscrição de redes de perfis diversos. Desta forma, o uso do laser CO_2 para a gravação de redes de período longo é um dos métodos mais adequados para a obtenção de redes flexíveis.

Basicamente, LPGs acoplam luz entre o modo fundamental de núcleo e modos copropagantes de casca, resultando em vales no espectro de transmissão nos comprimentos de onda que cumprem a condição de ressonância. Dessa forma, as propriedades das LPGs são diferentes das FBGs, que trabalham com o espectro de reflexão. Supondo que as PCFs de sílica pura são feitas fundamentalmente de um único material, as LPGs gravadas nestas fibras apresentam sensibilidades a tração e temperatura diferentes quando comparadas às redes gravadas em fibras convencionais, já que estas últimas são compostas de, no mínimo, dois tipos de vidro, possuindo, portanto, diferentes coeficientes de expansão térmica (WANG, 2010). Desta forma, LPGs escritas em PCFs podem ser insensíveis à temperatura, e têm atraído a atenção por causa do seu potencial em sensoriamento óptico em dispositivos que necessitam de estabilidade térmica (ZHAO *et al.*, 2008), assim como na fabricação de filtros ópticos estáveis (VENGSARKAR *et al.*, 1996b), (WANG *et al.*, 2010) e equalizadores de ganho

(VENGSARKAR *et al.*, 1996a), sem a necessidade de nenhum encapsulamento complexo por parte do sensor. Ademais, como dispositivos gravados em fibras, as LPGs em PCFs possuem baixa perda de inserção, são imunes à interferência eletromagnética e possuem pequenas dimensões, o que é uma vantagem para a compactação e a miniaturização dos sensores em demanda no ambiente industrial.

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

As redes de Bragg abrem um vasto campo de pesquisas e aplicações em sensoriamento quando gravadas em fibras ópticas micro-estruturadas de núcleo sólido (EGGLETON *et al.*, 1999), (STEINVURZEL *et al.*, 2006), podendo ser utilizadas em lasers a fibra e compensadores de dispersão, *switches* ópticos, roteadores, sensores de índice de refração, por exemplo (CANNING; CARTER, 1997), (HUY *et al.*, 2006), (CANNING, 2007), (SUO *et al.*, 2008), (HOO *et al.*, 2009). Com um leque de aplicações a serem exploradas e com os desafios que a gravação de uma FBG em fibra de cristal fotônico implica, este trabalho não somente colabora com a comunidade científica com seus resultados positivos, mas também traz a experiência da fabricação de uma FBG em PCF para dentro da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O conhecimento das fibras micro-estruturadas, suas propriedades e os desafios da gravação experimental são de valor essencial na formação do cientista, pois somente enxergam-se os problemas teóricos quando tem-se que resolvê-los na prática.

O crescimento da FBG durante o processo de gravação depende de fatores como a energia do pulso e da fluência acumulada. Este trabalho explora o processo eficiente de gravação de FBGs em uma fibra de cristal fotônico comercial multi-camadas, com 12 anéis de furos de ar ao redor do núcleo dopado com pequena quantidade de germânio, utilizando o laser excímero 248 nm e máscara de fase. São feitas as caracterizações das FBGs avaliando-se a variação do comprimento de onda de Bragg em relação à fluência acumulada e à energia inicial do pulso do laser. É discutido o espalhamento do feixe UV na micro-estrutura da casca da PCF à medida que a fluência acumulada aumenta e sua relação com a refletividade da FBG nela gravada. Mostra-se ainda que as FBGs tendem a apagar à medida que a fluência acumulada atinge um valor máximo, efeito que pode levar à degeneração/regeneração deste tipo de rede em fibras de cristal fotônico.

Em comparação com as FBGs, as LPGs oferecem algumas vantagens como, por exemplo, podem ser fabricadas de diversas maneiras, possui alta sensibilidade térmica, oferecendo a possibilidade de sensoriamento especial nesta área (SHU *et al.*, 2001), funcionam com equalizadores (VENGSARKAR *et al.*, 1996a), conversores de modo (HILL *et al.*, 1990)

e sensores para diversos parâmetros físicos como tração, temperatura, índice de refração, curvatura, entre outros (ZHANG *et al.*, 1999). Contabilizando a flexibilidade e aplicações das LPGs em relação às FBGs, vislumbrou-se o desafio da gravação e caracterização de LPGs em PCFs também neste trabalho. Não se pretende aqui mostrar um novo método de gravação LPGs em PCFs, pelo contrário, pretende-se somar à literatura internacional resultados relevantes e consistentes, colocando o Brasil no cenário científico internacional no que tange às gravações de LPGs em PCFs.

O crescimento de uma rede de período longo depende de vários fatores como o tempo de exposição ao feixe do laser, potência do laser, período e o comprimento da rede gravada (WANG, 2010). Devido à importância das LPGs em PCF para aplicações diversas em sensoriamento, este trabalho descreve o processo de fabricação da LPG usando o laser CO₂ em dois tipos de fibras de cristal fotônico de núcleo sólido:

1. fibra de cristal fotônico comercial multi-camadas, com 12 anéis de furos de ar ao redor do núcleo dopado com pequena quantidade de germânio;
2. fibra de cristal fotônico comercial de núcleo sólido, grande área modal LMA (*Large Mode Area*), composta de sílica pura e 6 anéis de furos de ar ao redor do núcleo.

O trabalho relata também o processo de caracterização da fibra de cristal fotônico de grande área modal com relação à tração mecânica e à temperatura e suas possíveis aplicações em sensoriamento ótico. Os resultados obtidos, tanto com relação à tração, quanto em relação à temperatura, são discutidos e comparados a resultados da literatura atual e são de relevância para a composição do quadro científico no que tange à área de sensores de tração e temperatura utilizando LPGs em PCFs.

A primeira etapa deste trabalho constitui-se da descrição das fibras óticas micro-estruturadas de núcleo sólido, dos processos de gravação das redes de Bragg e das redes de período longo em fibras óticas micro-estruturadas de núcleo sólido. Além disso, O Capítulo 2 descreve também a gravação de redes de período longo em PCFs de núcleo sólido utilizando laser CO₂ e as principais publicações relativas a sensores utilizando FBGs e LPGs em fibras de cristal fotônico.

O Capítulo 3, Características das Fibras de Cristal Fotônico de Núcleo Sólido, faz uma descrição detalhada dos tipos de fibras micro-estruturadas utilizadas durante o trabalho, desde informações disponíveis na folha de especificações (*Data Sheet*), até informações complementares obtidas em laboratório de testes e simulações com software comercial. Também, relata as montagens experimentais utilizadas para tal.

Para a acomodação das fibras de cristal fotônico nas montagens experimentais que fazem a gravação tanto das FBGs quanto das LPGs, foi preciso emendar as duas extremidades da PCF em fibras monomodo padrão, dado que a intenção era a fabricação de sensores com pequenos trechos de PCF, e mesmo para a conexão com os demais equipamentos da rede, como *pigtails* para acesso à fonte ASE, ao OSA e demais componentes óticos. A programação regular da máquina de emendas resultou em perdas de inserção da ordem de 25 dB a 30 dB, impossibilitando a visualização das redes gravadas e mesmo comprometendo a qualidade das mesmas. Por isso, durante a realização da pesquisa, fez-se necessário o desenvolvimento de técnicas específicas de emendas entre as fibras micro-estruturadas utilizadas e a fibra SMF padrão para diminuir a perda de inserção, evitando o colapso total dos furos ao redor do núcleo da PCF e preservando a resistência mecânica das emendas evitando o rompimento da mesma. Foram obtidos resultados satisfatórios, comparáveis à literatura atual, com perdas da ordem de 0,3 dB a 1 dB. Este assunto é discutido no Capítulo 4.

A gravação das FBGs é descrita no Capítulo 5, bem como os resultados e discussão dos mesmos. A gravação das FBGs foi realizada no Laboratório de Nanoestruturas LANOE da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR. Esta etapa do trabalho contou com a colaboração do grupo de pesquisa do prof. Dr. Hypolito J. Kalinowski, que disponibilizou o laboratório para o trabalho e seus alunos, Rodolfo Luiz Patyk e Isis Conselvan (*in memoriam*). Foram as primeiras redes gravadas em fibras de cristal fotônico de núcleo sólido de 12 anéis com a utilização de máscara de fase na Universidade Tecnológica Federal do Paraná em abril de 2011.

A gravação das redes de período longo, por sua vez, foi realizada em conjunto com dois grupos de pesquisa: o do prof. Dr. Cristiano M. B. Cordeiro do Departamento de Eletrônica Quântica do Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, e o do prof. Aleksander Paterno, do Laboratório de Sistemas Opto-Eletrônicos da Universidade de Santa Catarina, UDESC. Esta etapa foi subdividida em duas fases:

1. LPGs gravadas na UNICAMP antes da otimização da técnica de emendas entre PCF-SMF. Nesta fase, foram gravadas LPGs em fibras micro-estruturadas de 12 e 6 anéis e em fibras SMF-28, com o laser de CO₂ e técnica ponto-a-ponto. As perdas de inserção medidas foram da ordem de 20 dB a 30 dB para as LPGs gravadas em fibras micro-estruturadas e os resultados não foram satisfatórios do ponto de vista técnico, porém forneceram-nos subsídios no que se refere aos parâmetros utilizados para a gravação das redes, a melhor montagem experimental e até em relação ao manuseio de pequenos trechos de PCF para a realização de gravações posteriores;

2. LPGs gravadas na UDESC após a otimização da técnica de emendas entre PCF-SMF. Nesta fase, as LPGs foram gravadas apenas em fibras micro-estruturadas de 6 anéis, também com o laser de CO₂ e técnica ponto-a-ponto. Como já havia se desenvolvido a técnica para minimizar as perdas nas emendas entre PCF-SMF, as perdas foram menores, da ordem de 2dB. O conhecimento prévio da fibra e de alguns parâmetros iniciais para o *setup* do sistema realizados na fase anterior facilitaram o sucesso dessas gravações.

As caracterizações das LPGs quanto à tração e à temperatura, por sua vez, foram feitas no Laboratório Avançado de Telecomunicações, LATE, e no Laboratório de Fotônica, FOTON, com a colaboração do prof. Hypolito J. Kalinowski, prof. Valmir de Oliveira e Prof. Ilda Abe. Somente as LPGs gravadas nas fibras micro-estruturadas de 6 anéis foram submetidas aos testes de tração e temperatura. Este assunto é tratado no Capítulo 6.

A Conclusão do trabalho é feita no Capítulo 7, onde são discutidos os resultados com comparações com a literatura e trazendo à tona a contribuição do trabalho de pesquisa para a ciência. São sugeridos também, neste capítulo, trabalhos futuros que apontam a possibilidade de continuidade de desenvolvimento de um sensor de tração mecânica e de outro de temperatura utilizando LPG em PCF.

1.2 CONTRIBUIÇÕES À ÁREA DE PESQUISA

O sucesso nas gravações das redes de Bragg na fibra micro-estruturada de 12 anéis foi detalhado neste trabalho. A análise das redes mostrou que, mesmo com um número grande de furos ao redor do núcleo da fibra micro-estruturada, pode-se reduzir o espalhamento diminuindo a energia por pulso do laser durante o processo de gravação. Dessa forma, a rede cresce monotonicamente com até 17dB de refletividade. Todas estas medidas foram feitas num momento em que não havia técnica especial de emenda entre fibra PCF-SMF, para diminuir a perda de inserção. O resultado positivo dos experimentos mostrou que redes de Bragg em fibras micro-estruturadas possuem características de crescimento monotônico quando gravadas com baixa energia por pulso do laser. Porém, quando a energia por pulso é aumentada, a fibra micro-estruturada requer um tratamento diferenciado em relação às fibras monomodo padrão, pois acontece o fenômeno do espalhamento da luz nas micro-estruturas da casca. Neste trabalho, constatou-se este fenômeno e, ainda, com o aumento do tempo de exposição da fibra à radiação ultra-violeta, houve a constatação da saturação na modulação do índice de refração do núcleo da fibra ótica, e a rede começou a apagar.

As gravações das redes de período longo, por sua vez, foram a etapa mais difícil do

trabalho. Nada que ainda não houvesse sido feito comparando com a literatura atual, nenhuma técnica nova em desenvolvimento. O desafio encontrava-se na composição de um sistema único onde as gravações da rede pudessem ocorrer e as caracterizações pudessem ser feitas em seguida. Com a sensibilidade de um sistema opto-mecânico, o ambiente de trabalho deve possuir características mínimas de controle como, por exemplo, de temperatura, estabilidade de montagem experimental, isoladores que protejam as montagens de ventilação indesejada e de sujeira, sem mencionar partes e peças adequadas para os ensaios, dentre outros. Tudo isso o grupo de trabalho do Projeto Pró-Defesa tinha e tem, cada qual em seu laboratório específico. O Engenheiro, o Físico, os alunos, os estagiários, os mestrandos, os doutorandos e os orientadores de diversos laboratórios deram seu tempo e suas idéias para que estes experimentos pudessem acontecer. Sem este conjunto de valores agregados, talvez não fosse possível vislumbrar possibilidades de realização dos ensaios sem os aparatos adequados. Ou talvez os obstáculos pudessem parecer maiores do que realmente são, e o desafio superasse a coragem. Porém, conseguimos desenvolver sensores com trechos mínimos de LPGs gravadas em fibra de cristal fotônico com relação à tração mecânica e à temperatura, que podem, num futuro próximo, ser utilizados em diversos campos de concentração como telecomunicações, engenharias, biomedicina, entre outros.

2 FUNDAMENTOS

2.1 FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE NÚCLEO SÓLIDO

As fibras de cristal fotônico, também chamadas fibras óticas micro-estruturadas constituem um novo tipo de fibras objeto de intensas pesquisas nas últimas décadas (KNIGHT *et al.*, 1996). A estrutura básica de uma fibra de cristal fotônico de núcleo sólido é ilustrada na Figura 1. Os furos de ar possuem diâmetro d , a distância entre o centro de dois furos é designada por Λ , e o núcleo possui raio ρ . A ausência de um ou mais furos de ar é o que forma o núcleo e causa a diferença na simetria do cristal, transformando-o num guia de onda (ZOLLA *et al.*, 2005).

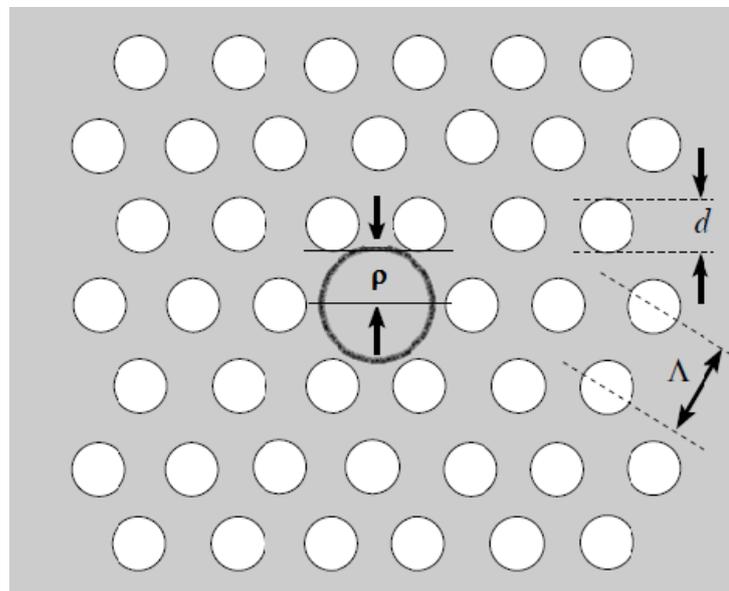


Figura 1: Estrutura básica da seção transversal em uma fibra de cristal fotônico. O núcleo sólido é formado pela ausência de um furo de ar no centro da estrutura.

Fonte: Zolla *et al.* (2005).

O primeiro projeto de uma fibra de cristal fotônico de núcleo sólido proposto por (RUSSELL, 2006) consiste de uma fibra de sílica pura cuja casca possui micro-estruturas de simetria hexagonal. A Figura 2 ilustra três estruturas de PCF de núcleo sólido com diferentes

razões $\frac{d}{\Lambda}$. Este parâmetro indica o tamanho dos furos de ar e a proximidade entre eles: quanto maior a razão $\frac{d}{\Lambda}$, maior o diâmetro dos furos de ar e mais próximos eles estão uns dos outros.

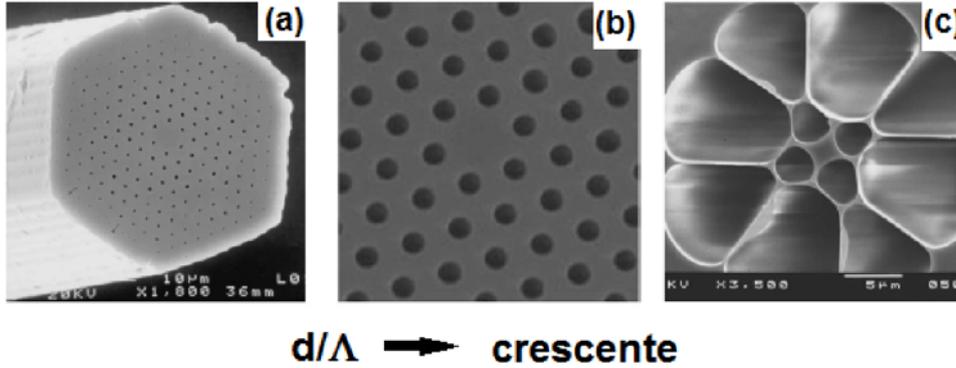


Figura 2: PCFs fabricadas por Russell (2006); (a) Primeira PCF de núcleo sólido fabricada, casca micro-estruturada de 300 nm com $\Lambda = 2,3 \mu\text{m}$; (b) PCF de baixa perda, $\Lambda = 2 \mu\text{m}$; (c) PCF fabricada em vidro (Schott SF6) com diâmetro do núcleo $d = 2 \mu\text{m}$.

Fonte: Russell (2006).

As fibras micro-estruturadas de núcleo sólido podem operar de forma monomodal para uma larga faixa de comprimentos de onda: de 458 nm a 1550 nm, aproximadamente (BIRKS *et al.*, 1997), (KNIGHT *et al.*, 1998a).

A constante de propagação de onda β é proporcional ao número de onda $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ e à diferença de índices de refração entre núcleo e casca da PCF, Δn , como descrito pela Equação 1 (KNIGHT *et al.*, 1998a).

$$\beta = K\Delta n \quad (1)$$

Para comprimentos de onda maiores que 1550 nm, onde λ possui escala maior do que os parâmetros d e Λ da fibra de cristal fotônico, a luz é fracamente modulada pelos furos de ar da casca micro-estruturada, fazendo com que ela enxergue o material da casca como homogêneo, penetrando fracamente na região micro-estruturada da PCF; esta se comporta, portanto, como uma fibra SMF padrão. Ao contrário, para comprimentos de onda menores que 458 nm, onde λ é da mesma ordem da grandeza d , a distribuição de campo modal forma um padrão diferenciado: o modo penetra na casca micro-estruturada e desvia fortemente dos furos de ar (KNIGHT *et al.*, 1998a). A Figura 3 ilustra a distribuição modal para estas duas situações.

Definindo Λ como o espaçamento entre os furos de ar da PCF e n_1 e n_2 como os índices de refração dos dois materiais utilizados na fabricação da fibra de cristal fotônico, núcleo e casca

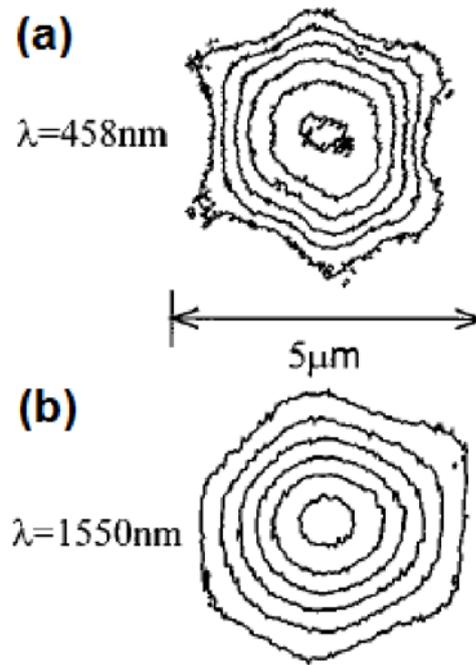


Figura 3: Perfil de campo próximo do modo fundamental guiado na PCF: $\Lambda = 2,3 \mu\text{m}$ e $\frac{d}{\Lambda} = 0,23$. (a) para o comprimento de onda $\lambda = 458 \mu\text{m}$ o modo fundamental possui menor diâmetro e penetra na região de sílica da casca micro-estruturada da PCF desviando-se dos furos de ar; e (b) para o comprimento de onda $\lambda = 1550 \mu\text{m}$, o modo fundamental possui maior diâmetro e se comporta como um modo de uma fibra SMF padrão.

Fonte: Knight *et al.* (1998b).

micro-estruturada, respectivamente, o parâmetro V_{PCF} (frequência normalizada) é definido pela Equação 2 (BIRKS *et al.*, 1997):

$$V_{PCF} = K\Lambda (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\Lambda (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

K representa o número de onda.

Em PCFs de núcleo sólido, tomando-se $\Lambda = \rho$ (BIRKS *et al.*, 1997), o número de modos guiados na PCF é dado pela Equação 3, e para que a fibra seja monomodo, V_{PCF} deve ser menor que 2,405.

$$V_{PCF} = K\Lambda (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\rho (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Segundo (RUSSELL, 2006) em PCFs de núcleo sólido e usando a análise numérica de Birks *et al.* (1997), o número de modos guiados da PCF pode ser calculado para uma larga faixa de comprimentos de onda, e pode ser aproximado pela Equação 4:

$$N_{modos} = \frac{V_{PCF}^2}{2} \quad (4)$$

o que o deixa aproximadamente independente do comprimento de onda. Numericamente, segundo (RUSSELL, 2006), o modelo geométrico da fibra de cristal fotônico pode ditar o comportamento monomodal da mesma, desde que o parâmetro $\frac{d}{\Lambda} \leq 0,43$ conforme ilustra a Figura 4.

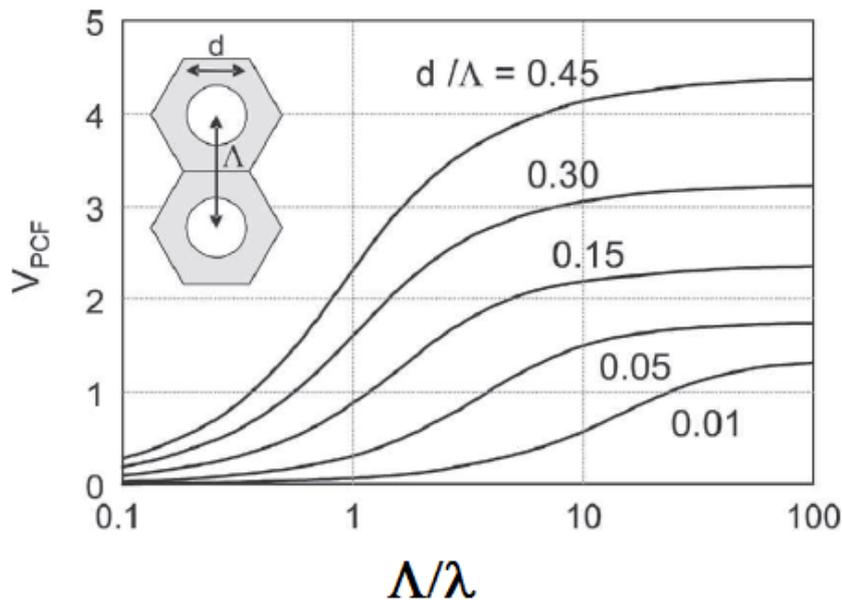


Figura 4: Parâmetro V_{PCF} para fibras de núcleo sólido versus a razão a razão entre o espaçamento entre os furos e o comprimento de onda no vácuo para diferentes valores $\frac{d}{\Lambda}$.

Fonte: Russell (2006).

Numa fibra de cristal fotônico de núcleo sólido formada pela ausência de um furo de ar, ilustrada na Figura 1, a casca micro-estruturada é formada, geralmente, pelo mesmo material do núcleo. Desde que se cumpra esta condição, o núcleo possui um índice de refração maior do que o da casca micro-estruturada, pois os furos com ar reduzem o índice de refração da mesma. Este tipo de PCF guia a luz baseada na diferença de índice de refração entre núcleo e casca, cujo princípio é conhecido como reflexão interna total modificada TIR (*Total Internal Reflection*) (BJARKLEV *et al.*, 2012). Este método de guiamento é semelhante ao da fibra SMF padrão, daí o nome reflexão interna total modificada.

O método de fabricação da fibra de cristal fotônico permite não somente o controle dos parâmetros físicos da fibra, d e Λ , como também a fabricação de fibras de um único material para núcleo e casca (BJARKLEV *et al.*, 2012). Uma gama de materiais pode ser usada na fabricação de PCFs como, por exemplo, vidros de telureto (KUMAR *et al.*, 2002) e polímeros

(EIJKELENBORG *et al.*, 2001), (LARGE *et al.*, 2006). No processo, chamado empilhar-e-puxar, os tubos de sílica e os capilares são projetados com extrema precisão e são empilhados de forma hexagonal, ou conforme projeto específico. A razão entre os diâmetros externo e interno dos capilares deve ser escolhida apropriadamente para se aproximar da proporção de ar, representada pela razão $\frac{d}{\Lambda}$, que se deseja na PCF. O arranjo é, então, colocado num forno e aquecido a uma temperatura de, $\approx 1950^{\circ}C$, enquanto é feito o puxamento da PCF ($1 \frac{m}{min}$) na extremidade oposta.

Em fibras convencionais, pequenas imperfeições na fibra ótica podem causar birrefringência, ou seja, a constante de propagação dos modos β será diferente para cada modo ortogonal. Para manter a polarização de um modo, a birrefringência deve ser introduzida na fibra, de forma que os índices de refração efetivos dos dois modos ortogonais de polarização sejam diferentes para compensar as imperfeições do guia ótico. Por outro lado, em uma fibra micro-estruturada, a birrefringência pode ser introduzida de várias maneiras como, por exemplo, através do arranjo dos elementos que compõem a casca, ou através da tração mecânica, que altera o formato do núcleo sólido de circular para elíptico. As fibras PCF podem ser usadas, então, como mantenedoras de polarização (RUSSELL *et al.*, 2004).

2.2 REDES DE BRAGG EM FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE NÚCLEO SÓLIDO

Redes de Bragg em fibras de cristal fotônico de núcleo sólido também têm sido foco de pesquisas por sua aplicabilidade em sensores, lasers, compensadores de dispersão, entre outros. Com o surgimento de novos projetos de PCFs a gravação de FBGs nestas fibras tornou-se um campo importante de investigação (HOLDSWORTH *et al.*, 2008).

A característica mais importante das redes de Bragg é sua propriedade de, conforme o período da modulação do índice de refração do núcleo, refletir um determinado comprimento de onda, ou seja, ela funciona como um filtro de comprimentos de onda. O comprimento de onda refletido é chamado de comprimento de onda de Bragg λ_B . Na condição de casamento de fase tem-se a interação mais intensa entre os modos de núcleo co e contra-propagantes, definida pela Equação 5 (HILL; MELTZ, 1997):

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2 \cdot n_{\text{eff}}^{\text{núcleo}} \cdot \Lambda_{\text{FBG}} \quad (5)$$

em que $n_{\text{eff}}^{\text{núcleo}}$ representa o índice de refração efetivo do núcleo e Λ_{FBG} representa o período da rede de Bragg.

O método convencional mais aplicado para a gravação de redes de Bragg em fibras

ópticas baseia-se no uso de lasers ultra-violeta UV e máscara de fase. O feixe UV incidente na máscara de fase se difrata e o padrão de interferência gerado produz a modulação do índice de refração do núcleo da fibra (GROOTHOFF *et al.*, 2003), (OTHONOS *et al.*, 2006). As primeiras FBGs foram gravadas em PCFs dopadas com germânio por (EGGLETON *et al.*, 1999) pelo método de absorção de um fóton. Neste método, a fotossensibilidade da PCF é caracterizada pela banda de absorção em 242 nm, associada à concentração dos centros de defeitos, que são um centro de germânio com deficiência de oxigênio presente no núcleo da fibra (CUSANO *et al.*, 2009). A fotossensibilidade está associada a uma mudança permanente no índice de refração do núcleo de uma fibra óptica exposta à radiação UV com frequência e intensidade adequadas. As fibras podem ser dopadas com germânio ou outros dopantes para se tornarem mais fotossensíveis (ATKINS *et al.*, 1993).

O desafio da escrita de FBGs em PCFs consiste no fato de se conseguir modular o índice de refração da sílica pura. Atualmente é possível realizar esta gravação usando o processo de absorção de dois fótons com radiação UV pulsada em 248 nm ou em 193 nm. Neste processo, ocorre na estrutura da sílica o que é chamado dano por radiação. A diferença de energia do nível mais alto e ocupado da molécula de sílica SiO_2 para o primeiro nível desocupado de ligações $Si - O$ é igual a ≈ 10 eV. Os lasers KrF e ArF fornecem, respectivamente, 5,0 eV e 6,4 eV. Através da absorção de dois fótons, a molécula de sílica consegue energia suficiente para se rearranjar estruturalmente, causando uma densificação do vidro e, conseqüentemente, uma modulação no índice de refração do núcleo da fibra (BORRELLI *et al.*, 1997), (BORRELLI *et al.*, 1999), (PIAO *et al.*, 2000).

Gravações de FBGs em PCFs através de radiação UV em 193 nm são demonstradas por (CANNING, 2007), em 248 nm, por (LIM *et al.*, 2004) e, com laser de femtosegundos em 800 nm, por (FU *et al.*, 2005). Uma vantagem das redes gravadas em PCF de sílica pura é a maior estabilidade térmica. Em seu trabalho, (GROOTHOFF *et al.*, 2003) relatam o aquecimento de FBGs a temperaturas próximas a 500°C com redução de apenas 5% na sua refletividade. Para evitar o espalhamento da radiação UV na micro-estrutura, pode-se introduzir líquidos nos capilares, cujos índices de refração são próximos da sílica (CANNING, 2007). Redes de Bragg em PCF hidrogenada, sem a adição de líquido nos furos, utilizando um laser em 193 nm também são demonstrada por (POHL *et al.*, 2008) e (COOK *et al.*, 2008b).

FBGs foram produzidas em fibra micro-estruturada dopada com germânio utilizando o laser excímero em 248 nm e máscara de fase adequada (MARTELLI *et al.*, 2010). A seção transversal da fibra é mostrada na Figura 5:

A mudança de índice de refração induzida pela luz UV é da ordem de 10^{-5} a 10^{-3} .

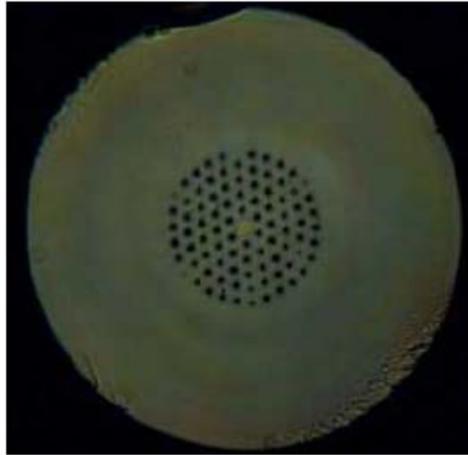


Figura 5: Seção transversal da fibra micro-estruturada: $d = 0,8$, $\Lambda = 7 \mu\text{m}$ e $\rho = 1,2 \mu\text{m}$.

Fonte: Martelli *et al.* (2010).

Esse valor influencia nas propriedades refletivas da rede. Qualquer mudança nos parâmetros que alterem o índice de refração efetivo ou período da rede modificará o comprimento de onda de Bragg (ERDOGAN, 1997).

O deslocamento do comprimento de onda de Bragg em função da variação da tração mecânica e da temperatura é descrito utilizando-se a Equação 6 (KASHYAP, 1999):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\Lambda_{\text{FBG}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial L} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda_{\text{FBG}}}{\partial L} \right] \Delta L + 2 \left[\Lambda_{\text{FBG}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda_{\text{FBG}}}{\partial T} \right] \Delta T, \quad (6)$$

em que ΔL é a variação do comprimento da rede e ΔT é a variação da temperatura. $\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}$ e $\frac{\partial \Lambda_{\text{FBG}}}{\partial T}$ representam, respectivamente, a variação do índice de refração efetivo e do período da rede com relação à temperatura. $\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial L}$ e $\frac{\partial \Lambda_{\text{FBG}}}{\partial L}$ representam a variação do índice efetivo e do período da rede com relação à tensão aplicada sobre ela.

A aplicação de tração ou compressão mecânica, mudança de temperatura, ou ambos, provocam alteração no índice de refração efetivo e/ou período da rede e, conseqüentemente, do comprimento de onda de Bragg. Ou seja, a FBG funciona como um sensor que proporciona a mudança do espectro de um sinal incidente (refletido/transmitido), quando as condições externas são alteradas por causa de suas propriedades elásticas, elasto-ópticas e termo-ópticas (VASIL *et al.*, 2005).

2.2.1 FLUÊNCIA ACUMULADA

A variação do comprimento de onda de Bragg e da amplitude da rede são analisadas em função da energia acumulada pela rede de Bragg a cada sequência de pulsos durante o processo de gravação, denominada fluência acumulada. Esta energia, medida em J/cm^2 , é calculada pelos passos seguintes de acordo com a montagem mecânica e com o laser utilizado:

1. a radiação emitida pelo laser, com energia de fóton E_1 , atravessa a fenda do laser utilizado, cuja fenda possui seção retangular de área $3 * 6\text{mm}^2$. A fluência de saída do laser, f_1 , é a razão entre a energia do laser e a área da fenda do laser, $\frac{E_1}{18}$;
2. o próximo passo é o cálculo da energia que passa pela íris, denominada E_2 . Esta energia é o produto da fluência de saída do laser, f_1 , pela área da íris: $E_2 = (f_1)(A_{ris})$;
3. a energia E_2 passará, então, pela lente cilíndrica de distância focal F_0 para atingir a fibra ótica. A área da seção transversal da fibra ótica iluminada pelo feixe do laser, cuja cintura é denominada por ω_0 , é dada por $A_{fibra} = 2\omega_0 Y_0$, em que Y_0 é a largura do feixe do laser, correspondente à abertura da íris
4. a fluência acumulada, denominada f_2 , é a razão entre a energia E_2 e a área da fibra, $f_2 = \frac{E_2}{A_{fibra}}$
5. no cálculo final da fluência acumulada deve ser considerada a perda na lente de $\approx 10\%$
6. para o cálculo da cintura do feixe gaussiano ω_0 , utilizou-se a Equação 7

$$2\omega_0 = \left(\frac{4\lambda}{\pi}\right) \cdot \left(\frac{F_0}{Y_0}\right) \quad (7)$$

7. a energia calculada até aqui é de apenas um pulso do laser; para o cálculo de um trem de pulsos do laser configurado com frequência f e tempo de exposição da fibra ao feixe t , deve-se utilizar a Equação 8:

$$\text{Fluência Acumulada} = \text{fluência por pulso} \cdot f \cdot t \quad (8)$$

Este foi o procedimento utilizado para calcular a fluência acumulada para a análise das redes de Bragg gravadas nas PCFs de 12 anéis.

2.3 REDES DE PERÍODO LONGO EM FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE NÚCLEO SÓLIDO

As redes de período longo também podem ser gravadas em PCFs utilizando radiação UV (EGGLETON *et al.*, 1999) ou IR através de laser CO₂, (KAKARANTZAS *et al.*, 2002), (KAKARANTZAS *et al.*, 2001). A primeira LPG foi gravada em uma fibra de cristal fotônico fotossensível por (EGGLETON *et al.*, 1999) através do método de escaneamento ponto-a-ponto e radiação UV com laser excímero em 242nm. A Figura 6 ilustra a seção transversal da fibra utilizada.

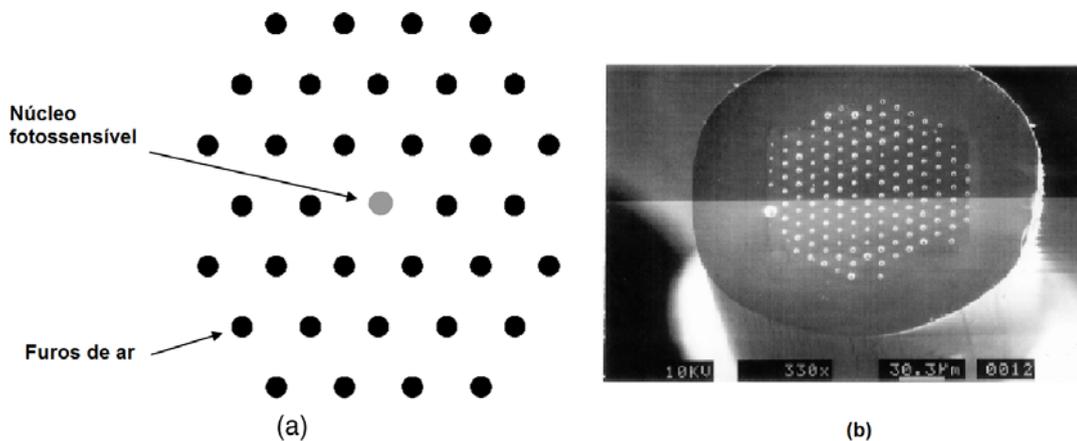


Figura 6: Seção transversal da PCF utilizada para a gravação de LPG. (a) Diagrama esquemático da PCF fotossensível e (b) Varredura com microscópio eletrônico da seção transversal da PCF.

Fonte: Eggleton *et al.* (1999).

A Figura 7 ilustra a seção transversal da fibra utilizada por (KAKARANTZAS *et al.*, 2002) para a gravação da LPG através da técnica ponto-a-ponto, fazendo o colapso dos capilares da PCF através do feixe do laser CO₂.

O espaçamento entre a sequência de pulsos do laser e o tempo de exposição da fibra à radiação IR são controlados por computador, o que torna o processo ponto-a-ponto muito versátil. A Figura 8 interna mostra os sulcos formados na PCF após a gravação da rede de período longo e o espectro de transmissão da LPG gravada.

Redes de período longo foram gravadas em PCFs sem a ocorrência de deformações físicas na fibra micro-estruturada, ou seja, conseguidas apenas através da mudança local do índice de refração da fibra induzida por arco elétrico (MORISHITA; MIYAKE, 2004). LPGs foram gravadas em PCF de sílica pura com $d = 4,3 \mu\text{m}$ e $\Lambda = 7,5 \mu\text{m}$. A Figura 9 (a), (b), (c) e (d) ilustra seções transversais da PCF após a exposição a diferentes tempos de duração de arco elétrico. Na Figura 9 (e), (f) e (g) veem-se trechos longitudinais que registram a forma física da

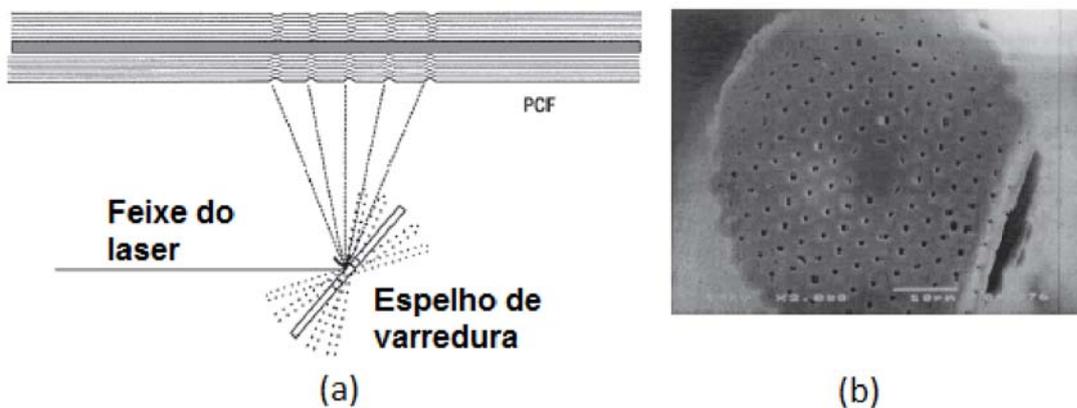


Figura 7: (a) Montagem experimental: espelho controlado automaticamente para a varredura do feixe ao longo da PCF. (b) Seção transversal da PCF de 7 anéis; $\frac{d}{\Lambda} = 0,167$, $d = 0,5 \mu\text{m}$ e $\Lambda = 3 \mu\text{m}$.

Fonte: Kakarantzas *et al.* (2002).

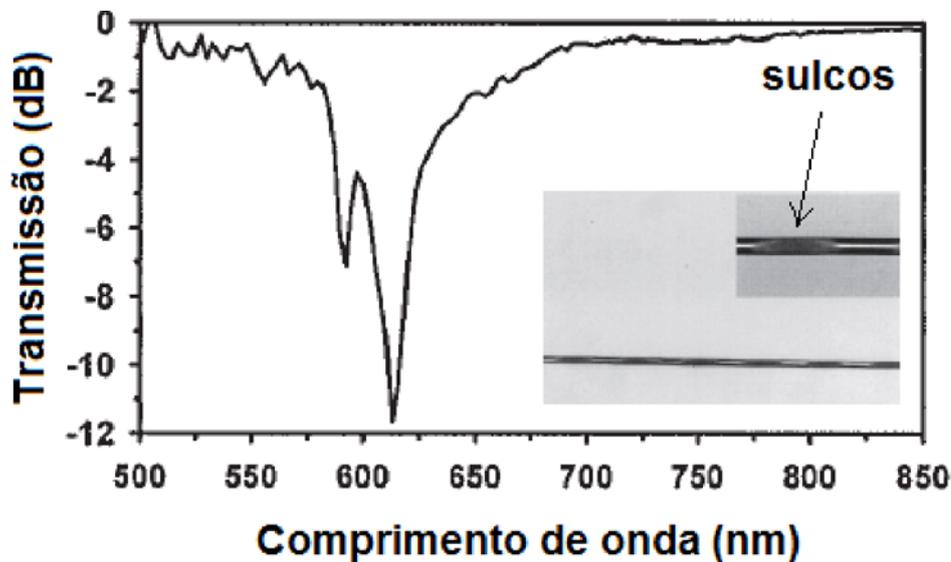


Figura 8: Espectro de transmissão da LPG após a gravação de 60 períodos. *inset*: Sulcos formados na casca da PCF.

Fonte: Kakarantzas *et al.* (2002).

PCF antes e após a exposição da mesma a diferentes tempos de duração de arcos elétricos.

Outro método proposto para a gravação de LPGs em fibras de cristal fotônico é através da deformação assimétrica e periódica das microestruturas da casca da PCF (WANG *et al.*, 2006a), (WANG *et al.*, 2006b), (WANG *et al.*, 2007), (WANG *et al.*, 2008), (WANG *et al.*, 2009), (WANG, 2010). Os sulcos na PCF são produzidos por varreduras sucessivas da fibra exposta ao feixe IR do laser de CO₂. O aquecimento local causa o colapso dos capilares e, até mesmo, um achatamento da casca micro-estruturada da PCF, e produz uma modulação periódica no índice de refração efetivo n_{eff} da fibra ótica micro-estruturada .

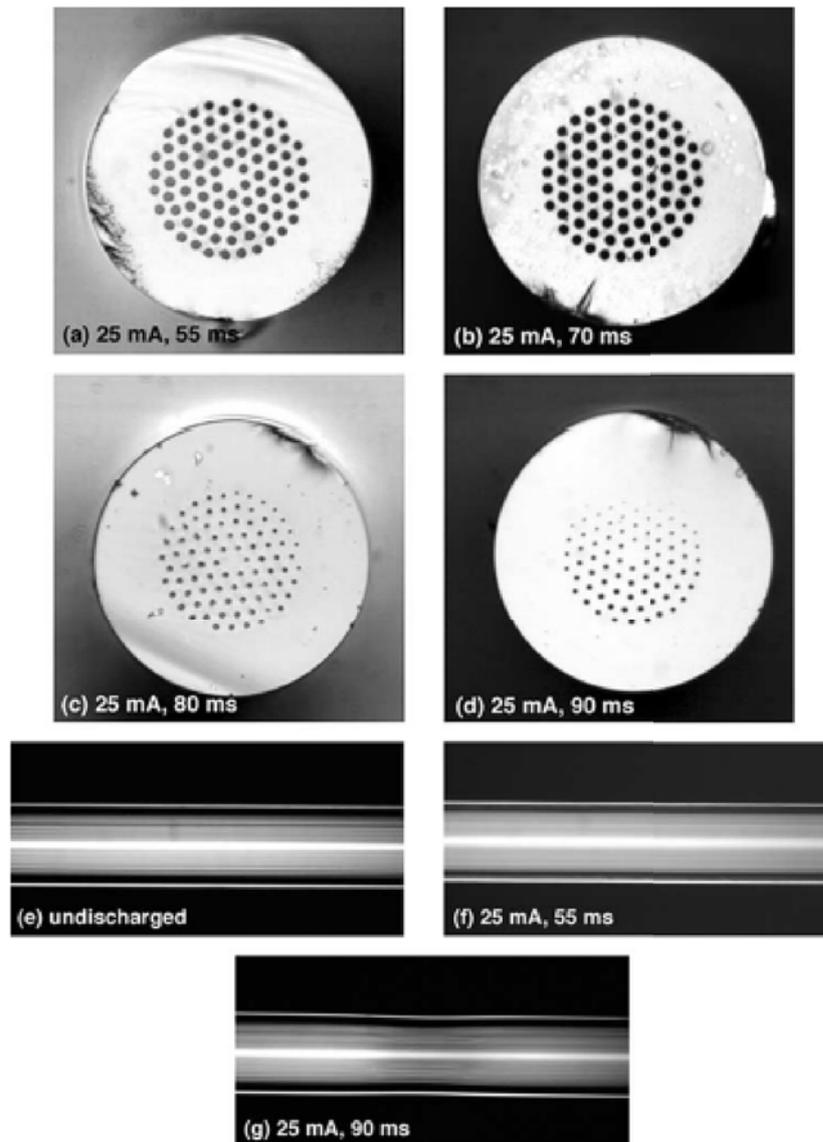


Figura 9: Seções transversais de PCF aquecida por corrente de 25 mA e tempos de descarga de (a) 55 ms, (b) 70 ms, (c) 80 ms e (d) 90 ms, respectivamente. (e) Seção longitudinal da PCF antes da aplicação da descarga elétrica; (f) e (g): seções longitudinais da PCF após arco elétrico de 25 mA e 55 ms e 90 ms de tempo de descarga, respectivamente.

Fonte: Morishita e Miyake (2004).

A Figura 10 mostra as seções transversal e longitudinal da PCF após a gravação da LPG de 40 pontos e período $\Lambda = 410 \mu\text{m}$.

A causa da modulação do índice de refração efetivo em redes de período longo gravadas com laser de CO_2 pode ser atribuída a três fatores principais (WANG, 2010):

1. Relaxamento da fibra à tração mecânica residual;
2. Mudanças na estrutura do vidro;

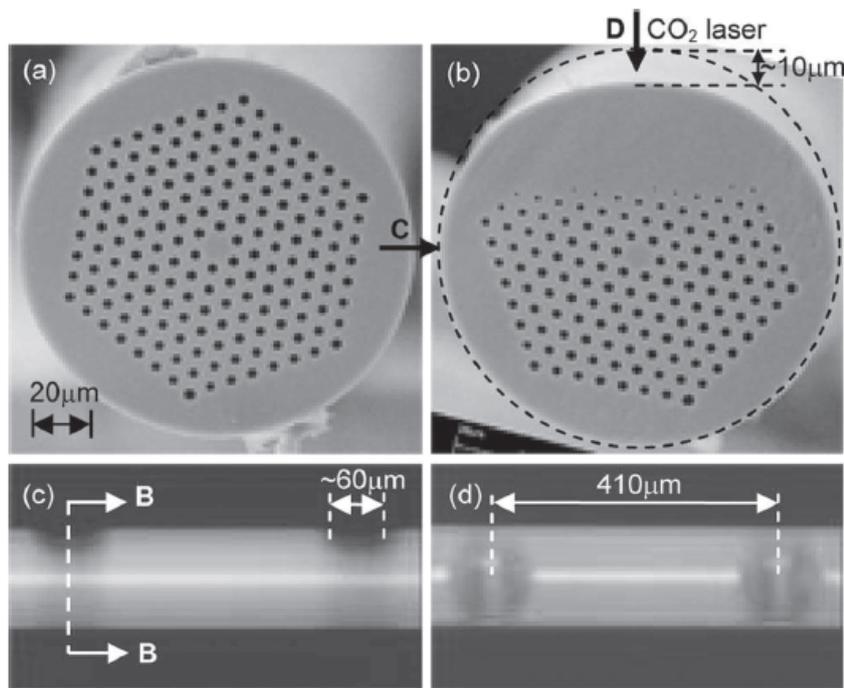


Figura 10: Seção transversal da LMA-10 (a) antes e (b) depois da gravação da LPG. Seção longitudinal da PCF (c) vista da direção C e (d) vista da direção D.

Fonte: Wang *et al.* (2007).

3. Deformações físicas da fibra.

A tração mecânica residual é formada na fibra ótica durante o processo de gravação da LPG. É considerado um dos principais fatores que causam a modulação do índice de refração em LPGs gravadas com laser CO_2 (KIM *et al.*, 2000), (KIM *et al.*, 2001), (KIM *et al.*, 2002). A tração residual, por sua vez, consiste da sobreposição do *stress* térmico, causado pela diferença entre os coeficientes de expansão térmica do núcleo e da casca da fibra ótica, e do *stress* mecânico, causado pela diferença entre as propriedades visco-elásticas do núcleo e da casca da fibra ótica. Em geral a tração mecânica residual causa um decréscimo no índice de refração da fibra e a intensidade deste decréscimo está associada à força aplicada à fibra durante o processo de gravação da LPG (LI *et al.*, 2008).

Mudanças na estrutura do vidro referem-se à densificação do vidro nas fibras micro-estruturadas de núcleo sólido quando da gravação de LPGs com laser de CO_2 (KIM *et al.*, 2000), (KIM *et al.*, 2001), (KIM *et al.*, 2002). Como a tração mecânica residual é alta na gravação de PCFs, o comprimento de onda de ressonância varia para valores menores à medida que a fibra fica mais tempo exposta ao feixe IR, ou seja, o índice de refração sofre uma modulação negativa (MORISHITA; KAINO, 2005).

O laser CO₂ utilizado para a gravação das LPGs provoca um aquecimento a altas temperaturas no local onde o feixe IR alcança a fibra. Este aquecimento é o responsável pelas deformações físicas da PCF, podendo causar diminuição do diâmetro da fibra, alongamento da fibra que está sendo tracionada, achatamento da superfície da casca, e até mesmo o colapso parcial ou total dos furos de ar da casca micro-estruturada (ZHU *et al.*, 2005), (KIM *et al.*, 2009b), (SU *et al.*, 2006). Podem ser criadas estruturas periódicas de várias formas em PCFs de núcleo sólido utilizando esta propriedade como, por exemplo, sulcos na casca da PCF com colapso total ou parcial dos furos de ar, ou mesmo micro-curvaturas (KAKARANTZAS *et al.*, 2002), (WANG *et al.*, 2006b), (ZHU *et al.*, 2003).

Em fibras ópticas micro-estruturadas estudos teóricos e experimentais mostram que as micro-deformações produzidas pelas LPGs gravadas com o laser de CO₂ produzem picos de atenuações (vales) no espectro de transmissão cujas posições estão relacionadas com o comprimento de batimento entre o modo fundamental, ou seja, o modo LP₀₁, e os modos de alta ordem. É de particular observação o resultado da ressonância entre o modo LP₀₁ e o primeiro modo de alta ordem, ou seja, o modo LP₁₁ (NIELSEN *et al.*, 2003).

A condição de casamento de fase para o acoplamento entre o modo fundamental de núcleo e modos de casca de uma rede de período longo em fibra de cristal fotônico de núcleo sólido é dada pela Equação 9:

$$\lambda_{\text{res}} = \Lambda_{LPG}(n_{\text{eff}}^{\text{núcleo}} - n_{\text{eff}}^{\text{casca,m}}) \quad (9)$$

em que Λ_{LPG} é o período da LPG e λ_{res} é o comprimento de onda de ressonância da LPG, $n_{\text{eff}}^{\text{núcleo}}$ representa o índice de refração efetivo do modo fundamental de núcleo e $n_{\text{eff}}^{\text{casca,m}}$ representa o índice de refração efetivo do m-ésimo modo de casca. Conforme (SHU *et al.*, 2002), (NIELSEN *et al.*, 2003), as mais fortes ressonâncias ocorrem entre os modos fundamentais de núcleo, LP₀₁, e de casca, LP₁₁.

Dada a relação apresentada pela Equação 9 e considerando a temperatura constante, nota-se que, quando submetida a uma tração axial, o comprimento de onda de ressonância da LPG sofre um deslocamento porque o período Λ_{LPG} da LPG aumenta com a tração e, em segundo lugar, ambos os índices de refração efetivos dos modos de núcleo e de casca diminuem devido ao efeito foto-elástico (KIM *et al.*, 2000), (KIM *et al.*, 2001), (KIM *et al.*, 2002). Esta dependência do comprimento de onda de ressonância à tração axial é descrita através da Equação 10 (HUANG *et al.*, 2014) quando a temperatura é mantida constante.

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\varepsilon} = \left[\left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{núcleo}}}{d\varepsilon} \right) - \left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{casca, m}}}{d\varepsilon} \right) \right] \Lambda_{LPG} + (n_{\text{eff}}^{\text{núcleo}} - n_{\text{eff}}^{\text{casca, m}}) \frac{d\Lambda_{LPG}}{d\varepsilon} \quad (10)$$

Da mesma forma, quando a LPG é submetida a variações de temperatura com uma tração constante, o comprimento de onda de ressonância, λ_{res} , varia devido a expansão ou contração térmica da rede e, também, devido ao efeito termo-óptico. Este deslocamento é descrito através da derivada de λ_{res} em relação à temperatura, segundo a Equação 11 (HUANG *et al.*, 2014).

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{dT} = \left[\left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{núcleo}}}{dT} \right) - \left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{casca, m}}}{dT} \right) \right] \Lambda_{LPG} + (n_{\text{eff}}^{\text{núcleo}} - n_{\text{eff}}^{\text{casca, m}}) \frac{d\Lambda_{LPG}}{dT} \quad (11)$$

Nas Equação 12 e Equação 13, ε é a tração axial aplicada à LPG e T é a temperatura à qual a LPG é submetida. Os coeficientes elasto-óptico e termo-óptico são definidos, respectivamente, conforme as equações Equação 12 e Equação 13 (ZHAO *et al.*, 2008), (HUANG *et al.*, 2014).

$$\eta = \left(\frac{1}{n} \right) \left(\frac{dn}{d\varepsilon} \right) \quad (12)$$

$$\xi = \left(\frac{1}{n} \right) \left(\frac{dn}{dT} \right) \quad (13)$$

A Equação 12 descreve a dependência dos índices de refração efetivo de núcleo e casca com a tração. Estes coeficientes são denominados $\eta_{\text{núcleo}}$ e η_{casca} , respectivamente. De forma similar, a Equação 13 descreve a dependência dos índices de refração efetivo de núcleo e casca com a temperatura, e os respectivos coeficientes são chamados $\xi_{\text{núcleo}}$ e ξ_{casca} .

3 CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE NÚCLEO SÓLIDO

3.1 NL-1550-POS-1 NKT PHOTONICS

A fibra micro-estruturada NL-1550-POS-1 é constituída de sílica cujo núcleo apresenta concentração de germânio de $\approx 6,7 \text{ wt}/\%$ e simetria triangular com 12 anéis como mostra a seção transversal da fibra ilustrada na Figura 11. Possui as seguintes características:

1. Diâmetro do núcleo $\rho = (2,1 \pm 0,3) \mu\text{m}$.
2. Diâmetro externo $d = (128 \pm 5) \mu\text{m}$.
3. Atenuação $\leq 9 \text{ dB}/\text{km}$ na região de comprimento de onda entre (1510 – 1620) nm.
4. Diâmetro de campo modal igual a $(2,8 \pm 0,5) \mu\text{m}$.

Esta fibra de cristal fotônico possui o núcleo projetado para que sua curva de dispersão seja plana, ou seja, tenha baixa dispersão na faixa de comprimento de onda de telecomunicações, $\cong 1,2 \text{ ps}/\text{km}\cdot\text{nm}$. A Figura 12 ilustra esta característica.

3.2 LMA-10

A fibra de cristal fotônico de grande área modal LMA-10 (NKT Photonics) é constituída de sílica pura. Não contém germânio no núcleo e é constituída por 6 anéis de furos ao redor do mesmo. Possui as seguintes propriedades:

1. Diâmetro do núcleo $\rho = (10,1 \pm 0,5) \mu\text{m}$.
2. Baixa perda na região de comprimento de onda entre (500 – 1700) nm.
3. Diâmetro externo $d = (125 \pm 5) \mu\text{m}$.

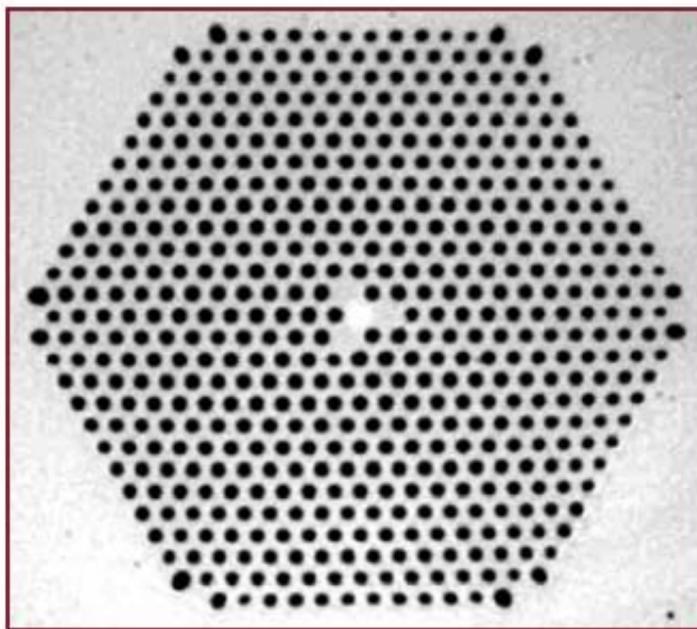


Figura 11: Seção transversal da fibra PCF NL-1550-POS-1.

Fonte: Data Sheet

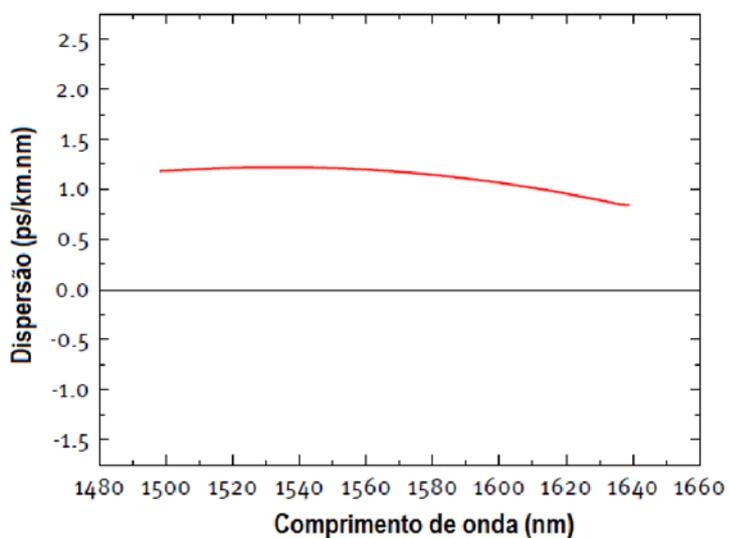


Figura 12: Curva de dispersão da fibra PCF NL-1550-POS-1.

Fonte: Data Sheet.

A Figura 13 mostra as curvas de atenuação e dispersão características da PCF LMA-10.

Observa-se que a atenuação da fibra LMA-10 aproxima-se de 2 dB/km na região de 1550 nm e a dispersão aproxima-se de 40 ps/(nm)(km). Em (b) observa-se que o diâmetro de campo modal da PCF LMA-10 é de, aproximadamente, 9,7 μ m em 1550 nm. A seção

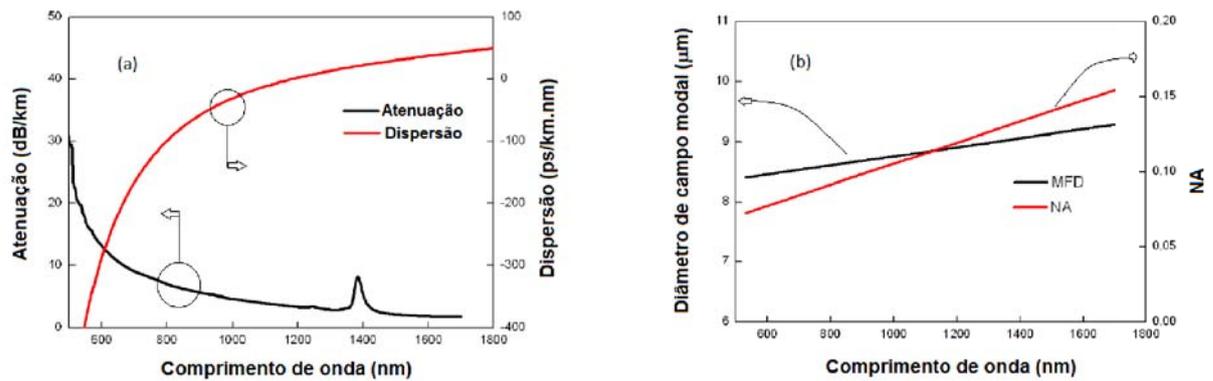


Figura 13: (a) Curvas de atenuação e dispersão da fibra ótica micro-estruturada LMA-10; (b) Curvas de diâmetro de campo modal e abertura numérica da PCF LMA-10.

Fonte: Data Sheet.

transversal da fibra LMA-10 é mostrada na Figura 14. O diâmetro d dos capilares é de, aproximadamente, $d = 2,95 \mu\text{m}$, $\Lambda = 6,9 \mu\text{m}$ e 6 anéis ao redor do núcleo da PCF.

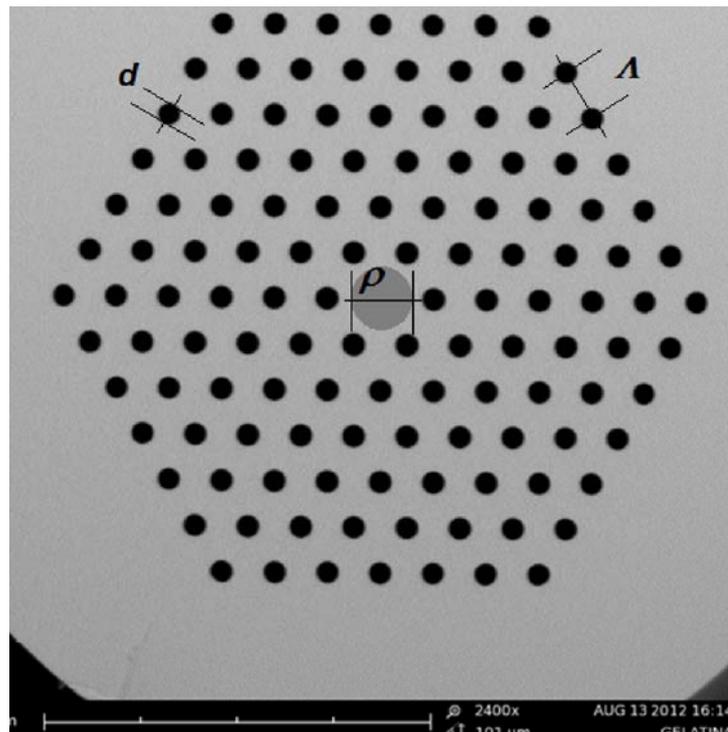


Figura 14: Microscopia ótica da seção transversal da fibra PCF LMA-10. Os furos de ar de diâmetro $d = 2,95 \mu\text{m}$ estão arranjados de forma triangular com espaçamento entre eles igual a $\Lambda = 6,9 \mu\text{m}$.

Fonte: Autoria Própria.

O valor do índice de refração efetivo do modo fundamental núcleo de fibras micro-estruturadas pode ser calculado utilizando *softwares* comerciais como o COMSOL

Multiphysics. Foram feitas simulações utilizando o COMSOL com a colaboração do Dr. Marcos A. R. Franco do Instituto de Estudos Avançados da Aeronáutica (IEAv) em São José dos Campos, para o cálculo do índice de refração efetivo do modo fundamental de núcleo da LMA-10 em $\lambda = 1550 \text{ nm}$. A Figura 15 mostra o resultado da simulação da distribuição da intensidade do campo elétrico na direção de propagação da fibra do modo fundamental de núcleo da fibra LMA-10. O valor do índice de refração efetivo do modo fundamental de núcleo da PCF LMA-10 encontrado foi igual a $n_{\text{núcleo}}^{\text{eff}} = 1,441024$ e foi a base para o cálculo do período Λ_{LPG} na gravação das LPGs.

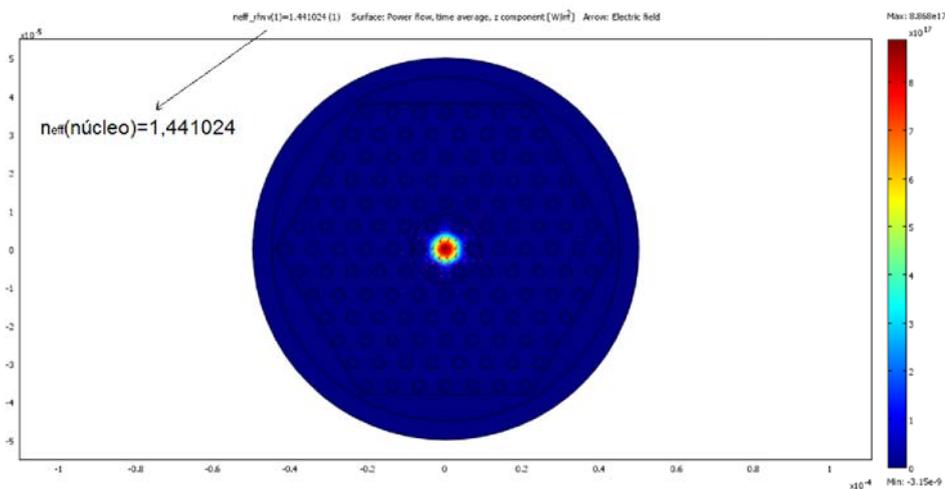


Figura 15: Distribuição da intensidade de campo na seção transversal da fibra LMA-10; $n_{\text{núcleo}}^{\text{eff}} = 1,441024$.

Fonte: Autoria Própria.

Foram feitas também simulações dos 12 primeiros modos acoplados para a casca da fibra micro-estruturada usando o método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo FDTD (*Finite Difference Time Domain*) e a condição de contorno absorvente, conhecida como Camada Perfeitamente Casada PML (*Perfectly Matched Layer*). A PML é capaz de absorver ondas com qualquer ângulo de incidência em qualquer frequência, assim não há reflexão da luz nas micro-estruturas da casca da PCF (BERENGER, 1994).

As Figuras 16 (a) e (b), Figuras 17 (c) e (d), Figuras 18 (e) e (f), Figuras 19 (g) e (h), Figuras 20 (i) e (j) e Figuras 21 (k) e (l) mostram, respectivamente, a distribuição do campo elétrico na propagação dos 12 modos que se propagam na casca micro-estruturada da LMA-10. As setas vermelhas internas representam a direção do campo elétrico transversal. Observe-se o aumento gradual dos índices de refração efetivos dos modos e a diferente distribuição dos mesmos pela casca. Observam-se índices de refração iguais quando os modos são anti-simétricos.

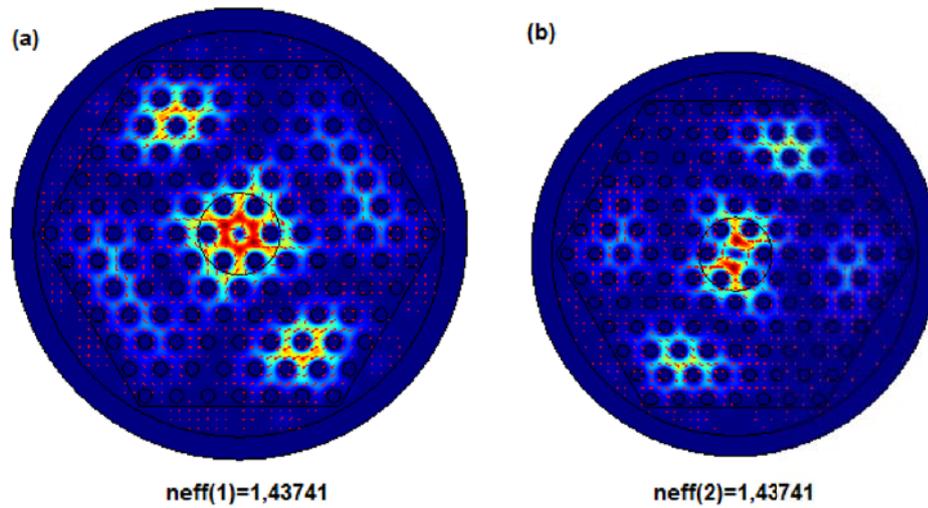


Figura 16: Distribuição da intensidade de campo na seção transversal da PCF. Propagação dos modos de casca 1 e 2 da fibra ótica micro-estruturada LMA-10.

Fonte: Autoria Própria.

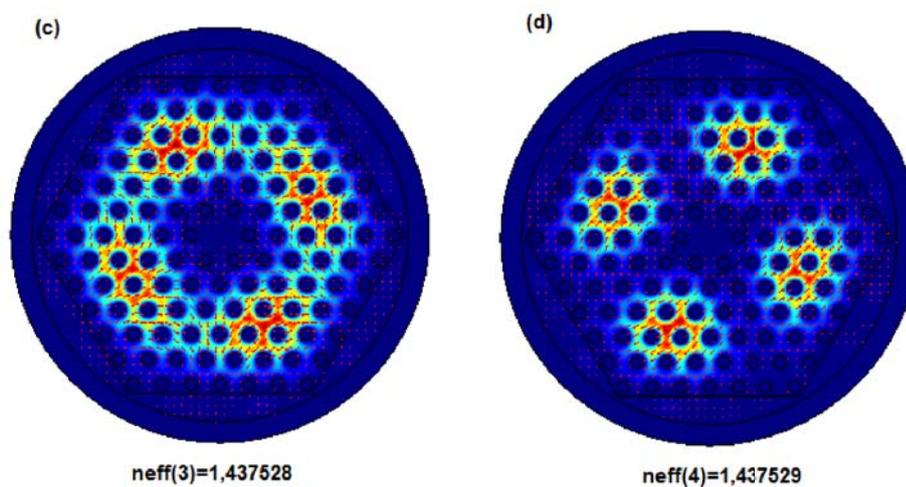


Figura 17: Distribuição da intensidade do campo elétrico na seção transversal da PCF. Propagação dos modos de casca 3 e 4 nas micro-estruturas da LMA-10.

Fonte: Autoria Própria.

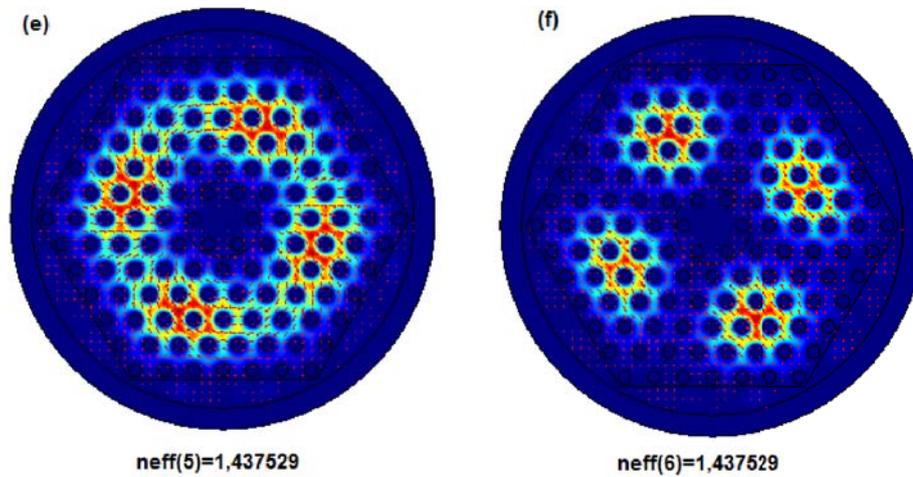


Figura 18: Distribuição da intensidade do campo elétrico na seção transversal da PCF. Propagação dos modos de casca 5 e 6 nas micro-estruturas da LMA-10.

Fonte: Autoria Própria.

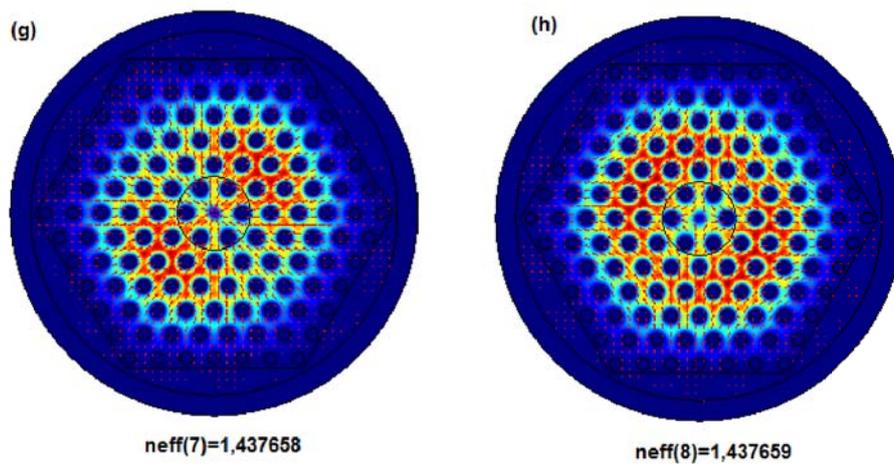


Figura 19: Distribuição da intensidade do campo elétrico na seção transversal da PCF. Propagação dos modos de casca 7 e 8 nas micro-estruturas da LMA-10.

Fonte: Autoria Própria.

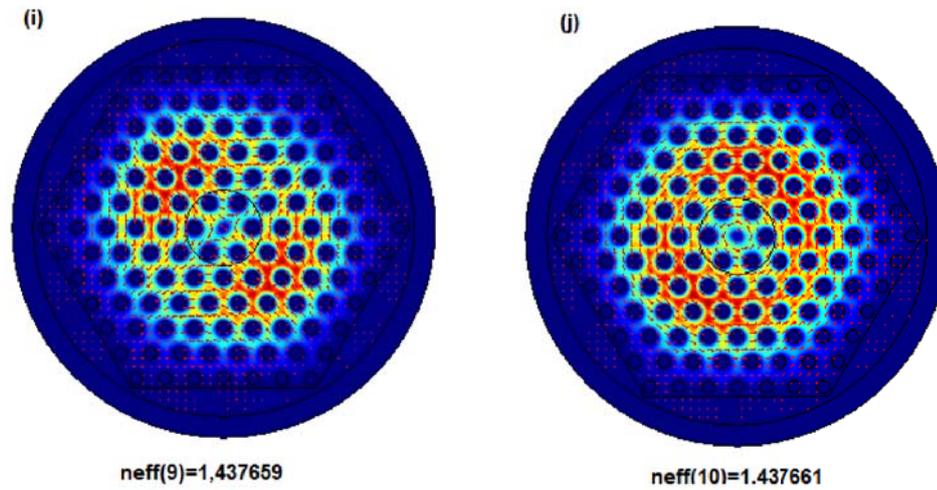


Figura 20: Distribuição da intensidade do campo elétrico na seção transversal da PCF. Propagação dos modos de casca 9 e 10 nas micro-estruturas da LMA-10.

Fonte: Autoria Própria.

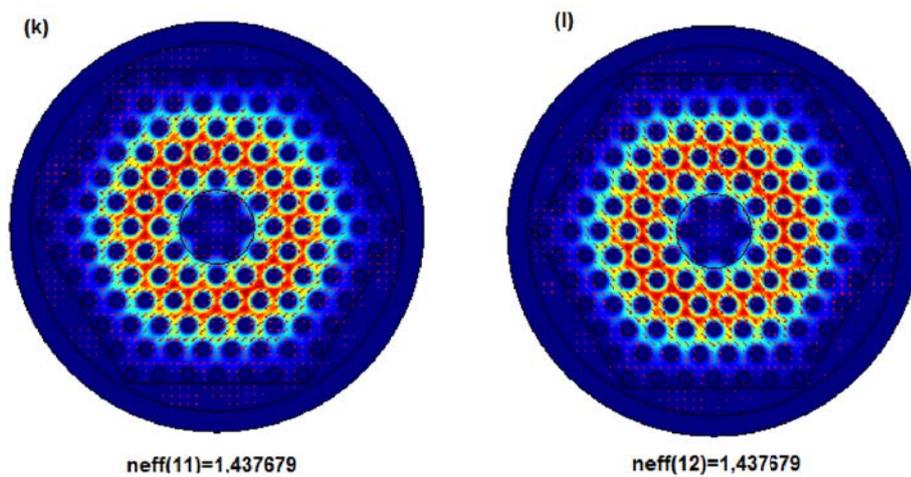


Figura 21: Distribuição da intensidade do campo elétrico na seção transversal da PCF. Propagação dos modos de casca 11 e 12 nas micro-estruturas da LMA-10.

Fonte: Autoria Própria.

4 FUSÃO ENTRE FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO DE NÚCLEO SÓLIDO E MONOMODO PADRÃO

Para potencializar o uso das fibras de cristal fotônico é necessário um acoplamento eficiente da luz entre elas e as fibras monomodo convencionais para que se obtenham perdas mínimas. Com sua microestrutura na casca, a PCF requer cuidados específicos para ser emendada com as fibras SMF. A fusão é obtida empregando-se máquina de fusão com a descarga em arco elétrico. O colapso dos furos de ar durante o processo de fusão é um fator agravante no aumento da perda de inserção (XIAO *et al.*, 2007b).

As máquinas de emendas possuem parâmetros, tais como corrente e tempo de fusão, pré-definidos para a emenda entre vários tipos de fibras convencionais. Destacam-se entre eles:

1. Tempo de duração do primeiro e do segundo arco.
2. Corrente de fusão.
3. Alinhamento entre as fibras - *Align*.
4. Tempo de espera até as fibras começarem a ser puxadas para o afinilamento - *Taper wait*.
5. Velocidade de puxamento do taper - *Taper speed*.
6. Comprimento de fibra a ser puxado - *Taper length*.
7. Deslocamento entre a PCF e o ponto central da emenda - conhecido como *offset* ou *gap*.
8. Refere-se ao quanto as fibras são aproximadas uma da outra após o arco, podendo ocorrer até mesmo uma sobreposição (*Overlap*) entre elas.

De acordo com (XIAO *et al.*, 2007b), durante o processo de fusão entre as fibras SMF-28 ($d = 10,4 \mu\text{m}$) e fibras PCF de diâmetros de núcleo menores como, por exemplo, a PCF NL-1550-POS-1 ($d = 2,1 \mu\text{m}$), o aquecimento aplicado deve se deslocar sobre a fibra SMF com o objetivo de não formar bolhas nem no núcleo nem na casca da PCF. Desta forma, o calor atinge a PCF de forma gradual para expandir o núcleo e colapsar, gradualmente, seus tubos de

ar com o objetivo de formar um taper expander e diminuir as perdas na transição de uma fibra para outra. A Figura 22 ilustra o processo.

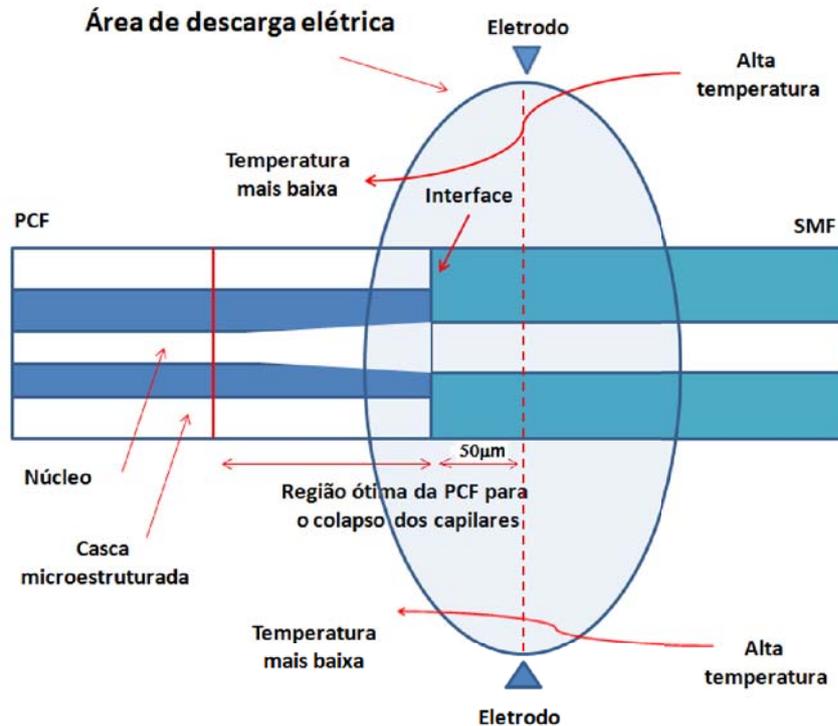


Figura 22: Ilustração do processo de fusão entre uma PCF de o diâmetro de núcleo menor que da SMF. A temperatura ao longo do eixo longitudinal da PCF diminui da centro (eletrodos) para a extremidade da fibra.

Fonte: Xiao *et al.* (2007b).

Devido ao ponto de fusão da PCF ser menor do que o da SMF, a solução proposta por (XIAO *et al.*, 2007a) é introduzir uma distância adequada entre a junção das fibras e o ponto central da descarga elétrica, chamada *offset*, de forma que o arco elétrico atinja mais fracamente a PCF em detrimento da SMF.

Na fusão entre fibras PCF e SMF de diâmetros aproximadamente iguais as extremidades das duas fibras são aquecidas igualmente. Entretanto, o ponto de fusão das PCFs é mais baixo que o da SMF devido à presença dos tubos de ar na micro-estrutura da casca, tornando-a mais viscosa. Desta forma, no momento da tração mecânica que une as duas fibras, a viscosidade da PCF acaba por colapsar os tubos de ar (XIAO *et al.*, 2007a), podendo ocorrer até mesmo a sobreposição entre as fibras, termo denominado *overlap* (XIAO *et al.*, 2007a), e um desalinhamento do campo modal. O *overlap* ideal para a emenda entre fibras de cristal fotônico NL-1550-POS-1 e LMA-10 e SMF padrão é de 5 µm (XIAO *et al.*, 2007a).

Outra forma de diminuir a descarga elétrica sobre a PCF para não colapsar os túneis

de ar é possível através do parâmetro *offset*, ou seja, o deslocamento da PCF em relação ao ponto central da emenda. Na fusão entre uma fibra SMF padrão e as fibras PCF e LMA-10 o *offset* sugerido é de $50\mu\text{m}$ (XIAO *et al.*, 2007a). Com este deslocamento da PCF para a esquerda, o calor aquece mais a fibra SMF e menos a PCF, que possui um ponto de fusão menor, evitando colapsar totalmente seus furos de ar. Estas mesmas configurações foram utilizadas neste trabalho para a emenda entre as fibras SMF-28 e a fibra NL-1550-POS-1, porém, para esta última, foram utilizados dois arcos voltaicos com parâmetros do ciclo número 3 aplicados manualmente devido ao maior número de anéis 12 (doze) desta PCF com relação à LMA-10, 6 (seis) anéis. A Figura 23 ilustra o deslocamento da extremidade da PCF (*gap*) em relação ao eixo central da descarga elétrica.

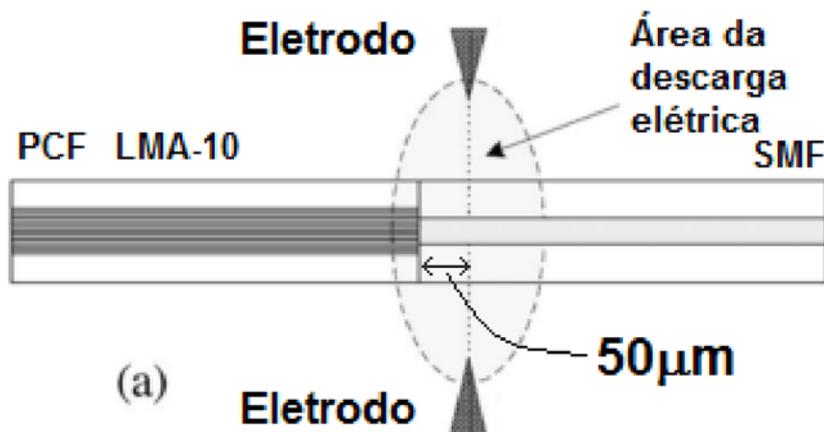


Figura 23: Deslocamento da extremidade da PCF em relação ao eixo central de descarga elétrica $gap = 50\mu\text{m}$.

Fonte: Xiao *et al.* (2007a).

Para a fusão entre fibras SMF-SMF, há 4 (quatro) ciclos automáticos para que a emenda se concretize com perdas mínimas na máquina de emendas Arc Fusion Splicer FSM-50S, Fujikura. Para a emenda entre uma fibra SMF e as fibras PCF NL-1550-POS-1 e PCF LMA-10, porém, há a necessidade de somente dois ciclos: o ciclo número 1 (um), chamado de pré-fusão, referente à limpeza das extremidades das duas fibras, e o ciclo número 3 (três), onde a corrente de fusão e o tempo de fusão são manualmente configurados de acordo com as fibras que estão sendo emendadas. Através do modo manual de configuração da máquina de emendas os ciclos 2 (dois, corrente e tempo de fusão número 2) e 4 (quatro, corrente e tempo de fusão número 4) são colocados na posição *OFF* (desligado).

Os parâmetros corrente do arco elétrico e tempo de fusão do ciclo de pré-fusão entre as fibras de cristal fotônico e as fibras SMF padrão são os mesmos de uma emenda entre fibras SMF: 16,3 mA e 2s, respectivamente, utilizados por (XIAO *et al.*, 2007a). No terceiro ciclo,

a corrente de fusão entre fibras SMF-SMF é de, aproximadamente, 16,3 mA (XIAO *et al.*, 2007a). As fibras de cristal fotônico possuem uma região de sílica menor que as fibras SMF. Deve-se configurar, portanto, uma corrente do arco elétrico menor que 16,3 mA, para que não ocorra o colapso total dos furos de ar da PCF. A corrente do arco elétrico para uma fibra de cristal fotônico LMA-10 é igual a 12 mA (XIAO *et al.*, 2007a). O tempo de duração dos arcos elétricos também é relevante para que as fibras possuam emendas com resistência mecânica suficiente. De 2 s, tempo padrão para emendas entre fibras SMF-28, o tempo foi diminuído para 0,3 s para emendas entre fibras SMF-28 e LMA-10 (XIAO *et al.*, 2007a). É aplicado apenas um arco voltaico neste processo de fusão.

Com esta programação as perdas diminuíram da ordem de 30 dB para, no máximo, 2,0 dB.

4.1 METODOLOGIA E RESULTADOS

A máquina de emenda Arc Fusion Splicer FSM-50S, Fujikura, existente no Laboratório de Fotônica da UTFPR, foi configurada para o modo manual através do seu menu principal. Em seguida, as duas extremidades das fibras, PCF e SMF foram posicionadas nos guias de alinhamento da máquina. A PCF é posicionada no guia do lado esquerdo e a SMF, do lado direito, de acordo com o diagrama mostrado na Figura 24:

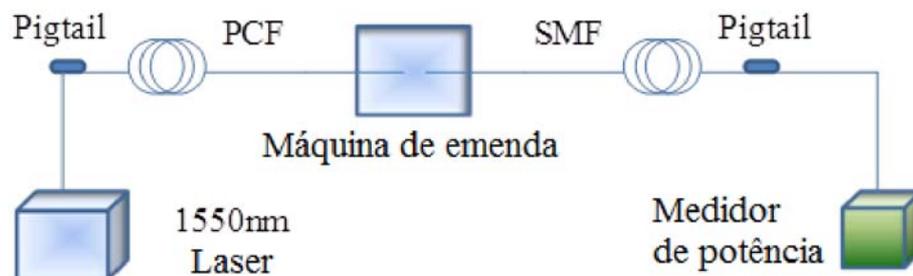


Figura 24: Diagrama esquemático do procedimento de fusão entre fibras PCF e SMF.

Fonte: A autoria Própria.

O medidor de potência ótica monitora a potência oriunda do laser, que emite em 1550 nm e atravessa as fibras. No monitor da máquina de emendas aparece a opção de ajuste manual de posicionamento das fibras. Esse ajuste é feito até que se consiga um valor máximo de potência ótica. Quando o arco é emitido, ocorre a fusão. Foi utilizada neste experimento a PCF NKT-1550-POS-1 posicionada no guia da esquerda, e a fibra SMF padrão, posicionada no guia da direita. A Figura 25 ilustra o processo do ajuste manual das fibras para a emenda.

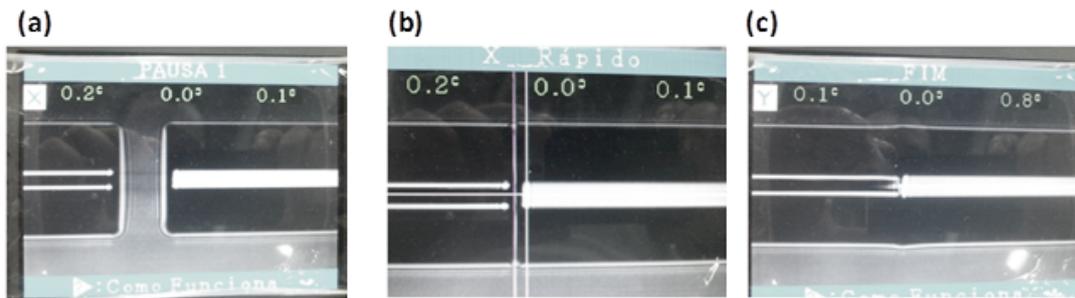


Figura 25: (a) Fotografia do ajuste automático entre as fibras PCF-SMF. (b) Fotografia do ajuste manual entre as fibras. (c) Fibras emendadas.

Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 1 resume os parâmetros utilizados nas emendas. Os demais parâmetros padrões da máquina permaneceram inalterados.

Tabela 1: Parâmetros utilizados para a emenda entre fibras SMF e NL-1550-POS-1 e LMA-10 no terceiro ciclo

| | |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Tempo de fusão 2 | 0seg |
| Tempo de fusão 3 | 0,3seg |
| Posição central | Posição central = 205 |
| Corrente pré-fusão | 16,3mA |
| Overlap | 5 μ m |
| Tempo de corrente de pré-fusão | 2seg |
| Corrente de fusão 3 | 12mA |

4.2 CONCLUSÃO

Um fator que deve ser levado em consideração em se tratando de fibras micro-estruturadas é a perda de atenuação. Para as PCFs NL-1550-POS-1 e LMA-10 utilizadas neste trabalho, a atenuação é de ≤ 9 dB/km e 2 dB/km na região de 1550nm, respectivamente. Como a atenuação é alta por causa das rugosidades na estrutura dos capilares (RUSSELL, 2006), os dispositivos óticos construídos com tais fibras possuem comprimento da ordem de centímetros. Assim, a fusão com fibras padrão para a conexão mecânica com os demais componentes do sistema ótico torna-se um processo de relativa dificuldade técnica.

A partir destes resultados, o desenvolvimento de emendas entre as fibras micro-estruturadas e as fibras monomodo e, até mesmo, multimodo padrão tornam-se possíveis para a implementação de sensores de tração e temperatura. Dadas as características estruturais e mecânicas dos aparatos óticos, também relevantes, as emendas das PCFs com fibras SMF

propiciam melhor manuseio das PCFs nos suportes para a gravação das FBGs e LPGs. Como a atenuação nas PCFs são maiores do que as perdas nas fibras SMF padrão, são utilizados trechos pequenos das PCFs para a fabricação de sensores. Nos casos em que são utilizados somente 10cm de fibra micro-estruturada ou, até mesmo 1cm, as emendas são mandatórias para o posicionamento da fibra no conjunto opto-mecânico.

Com o desenvolvimento de uma programação específica para a máquina de emenda Arc Fusion Splicer FSM-50S, Fujikura, foram obtidas emendas com baixas perdas, entre 0,1 dB e 0,3 dB. São resultados compatíveis com a literatura (XIAO *et al.*, 2007a), (XIAO *et al.*, 2007b).

Com estes parâmetros foram conseguidas emendas com perdas menores que 0,5 dB cujos valores estão ilustrados na tela da máquina de emendas para 2 amostras diferentes entre emendas de fibra PCF NL-1550-POS-1 e fibra SMF padrão, e outras 2 (duas) amostras entre emendas de fibra PCF LMA-10 e fibra SMF padrão, como mostra a Figura 26. Ressalta-se que, para a emenda entre a NL-1550-POS-1 e a SMF, são aplicados dois arcos voltaicos manualmente devido ao maior número de anéis desta PCF.



Figura 26: Perdas registradas nas emendas entre fibras PCF NL-1550-POS-1 e SMF: (a) 0,35 dB; (b) 0,35 dB, e entre fibras PCF LMA-10 e fibras SMF: (c) 0,04 dB e (d) 0,03 dB.

Fonte: Autoria Própria.

5 GRAVAÇÃO DE FBGS

5.1 FBGS EM PCF NL-1550-POS-1

5.1.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, RESULTADOS E DISCUSSÃO

A linha que separa as FBGs gravadas em fibras monomodo convencionais e FBGs gravadas em fibras micro-estruturadas pode parecer tênue, porém, as PCFs oferecem a possibilidade do controle de seus parâmetros intrínsecos, e isso faz a diferença no que tange a sensores de grandezas diversas. Alterando as propriedades físicas de uma fibra micro-estruturada como o diâmetro dos furos de ar, o espaçamento entre eles, ou, até mesmo, inserindo líquidos ou gases nestes furos, torna-se possível a flexibilização no projeto de sensores específicos, ao contrário das fibras SMF padrão.

Para a gravação das redes de Bragg nas fibras micro-estruturadas foi utilizado o método padrão utilizando máscara de fase com o laser excímero pulsado KrF 500-248-XS-L Xanto XS-Coherent. A montagem experimental é mostrada na Figura 27, em que o feixe do laser é focalizado através de uma lente cilíndrica Zylinderl 310/60*50, e ilumina a máscara de fase, atrás da qual a PCF é posicionada. Com um alinhamento apropriado da máscara de fase Ibsen Photonics, $\Lambda_{PM} = 1068,50 \text{ nm}$, 12 mm, há a geração de franjas de interferência no núcleo da PCF. O SLED (*Superluminescent Light Emitter Diode*) ASLD14-HP1-B, Amonics, foi usado como fonte para lançar luz na fibra através de um circulador ótico Reliable Photonics, 6015-3-FC-PC. À medida que a FBG crescia em refletividade durante o processo de gravação, tanto os espectros de transmissão quanto de reflexão eram monitorados através de um analisador de espectro ótico (OSA) e uma chave óptica, que direcionava o sinal de transmissão ou de reflexão através do circulador ótico. O sistema de controle do laser permite o controle da energia do pulso, do número de pulsos por rajada do laser, do número de rajadas e da frequência com que o laser emitia as rajadas.

A PCF NL-1550-POS-1, com razão $d/\Lambda = 0,58$ relativamente alta, apresenta germânio numa concentração de, $\approx 6,7 \text{ wt\%}$ no núcleo para garantir uma fotossensibilidade suficiente e permitir a gravação da FBG em 248 nm. As amostras de PCF, de comprimento entre

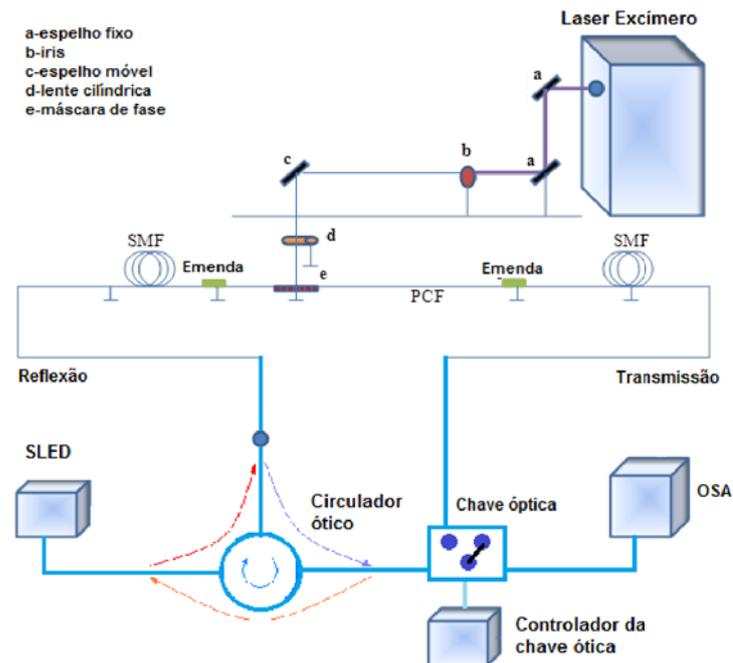


Figura 27: Montagem experimental para gravação de FBG em PCF NL-1550-POS-1 utilizando o método da máscara de fase.

Fonte: Autoria Própria.

10cm e 15cm, foram emendadas em cada extremidade com fibra SMF-28 padrão utilizando a máquina de emendas Arc Fusion Splicer FSM-50S, Fujikura. A perda média obtida foi de ≈ 7 dB/emenda. A seção transversal da fibra é mostrada na Figura 28.

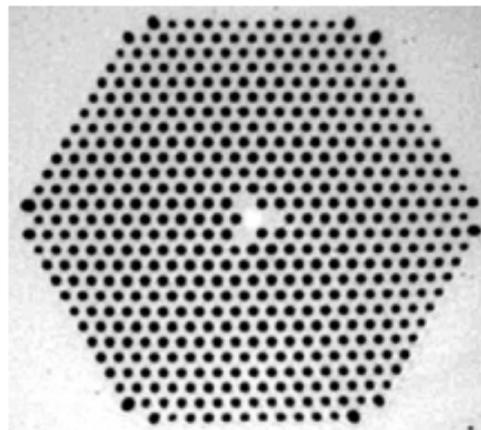


Figura 28: Seção transversal da fibra PCF NL-1550-POS-1 utilizada na gravação das FBGs.

Fonte: Sheet (2012).

Três amostras de PCF, denominadas FBG-W, FBG-X e FBG-Y, foram utilizadas para a gravação de redes de Bragg. O laser KrF em 248 nm iluminou as PCFs para a inscrição das

redes de Bragg. O parâmetro variável foi a energia de saída do laser para cada amostra: FBG-W: 8,5mJ ou 0,485W; FBG-X; 7,5mJ ou 0,397W; FBG-Y: 6,0mJ ou 0,283W. O número de pulsos por rajada emitido pelo laser foi 5.000 pulsos para as amostras FBG-W, FBG-X e 10.000 pulsos para a amostra FBG-Y. Foram feitas 20 repetições da sequência de pulsos para as amostras FBG-W e FBG-X, 85 repetições para a amostra FBG-Y. A frequência utilizada foi de 250Hz para todas as amostras.

A Tabela 2 mostra os parâmetros usados para fabricar as redes de Bragg. Observa-se que em cada uma das gravações a energia do pulso (mJ) permanece fixa e o número de vezes em que o laser é acionado varia, permitindo diferentes valores de fluência acumulada, ou seja, da energia fornecida para a inscrição da FBG na PCF. Parâmetros tais como o número de pulsos por rajadas do laser e a frequência de emissão das rajadas também permanecem constantes. Através da variação da energia do pulso para cada uma das redes gravadas é possível caracterizar o crescimento da rede e o espalhamento da luz nas micro-estruturas da casca.

Tabela 2: Gravação das FBGs

| Parâmetros Utilizados na Gravação das Redes de Bragg | | |
|---|------------------------------|----------------|
| Amostras | Parâmetros | |
| FBG-W, FBG-X, FBG-Y | Número de pulsos por rajadas | 5000 |
| | Frequência | 250Hz |
| FBG-W, FBG-X | Número de rajadas do laser | 20 |
| FBG-Y | Número de rajadas do laser | 85 |
| FBG-W | Energia do laser por pulso | 8,5mJ – 0,485W |
| FBG-X | Energia do laser por pulso | 7,5mJ – 0,397W |
| FBG-Y | Energia do laser por pulso | 6,0mJ – 0,283W |

A Tabela 3 refere-se aos parâmetros utilizados na gravação da amostra FBG-X, e a Figura 29 ilustra o aumento da refletividade da rede de Bragg FBG-X ao longo do tempo de exposição ao feixe UV. O eixo horizontal representa o comprimento de onda de Bragg correspondente à potência ótica refletida pela rede a cada rajada de pulsos do laser, representada no eixo vertical.

Tabela 3: Parâmetros de Gravação da FBG-X

| Amostra FBG-X | |
|-----------------------------|----------------|
| Parâmetros | |
| Número de pulsos por rajada | 5000 |
| Frequência do laser | 250Hz |
| Número de rajadas do laser | 20 |
| Energia do laser por pulso | 7,5mJ – 0,397W |

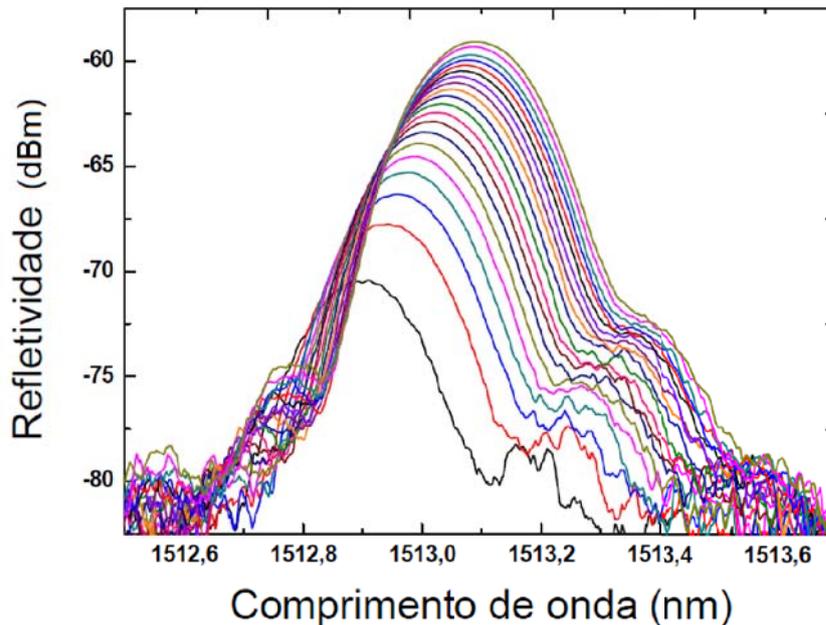


Figura 29: Espectro da rede de Bragg FBG-X ao longo do tempo. Observa-se o deslocamento do comprimento de onda de Bragg $\lambda_{\text{Bragg}} \approx 1513$ nm para valores maiores e o aumento da refletividade a cada rajada de pulsos do feixe UV até um valor máximo de ≈ 22 dB.

Fonte: A autoria Própria.

Os lobos laterais observados em torno do comprimento de onda de Bragg na Figura 29, assim como nas demais amostras FBG-Y, Figura 31 e Figura 32, e FBG-W, Figura 35, são modos acoplados irradiados pela casca. Como a proteção polimérica da fibra é retirada previamente para se fazer a gravação da FBG, outros modos podem escapar devido à interface cilíndrica entre a casca da fibra e o ar. Para amenizar a irradiação destes modos, pode-se passar glicerina na superfície da casca da fibra ótica, eliminando a forma cilíndrica da mesma (OTHONOS *et al.*, 2006).

A Figura 30 mostra a refletividade da FBG-X, representada no eixo vertical esquerdo, em relação à fluência acumulada mJ/cm^2 , representada no eixo X. Nota-se que, à medida que a fluência acumulada pela rede aumenta, ou seja, à medida que o sistema fornece mais energia para a rede, ela aumenta sua refletividade (quadrados cheios). O eixo vertical direito representa o comprimento de onda de Bragg λ_B . Os quadrados vazados mostram os pontos correspondentes entre a fluência acumulada e o λ_B . Observa-se que a refletividade da rede aumenta monotonicamente de acordo com a mudança do índice de refração do núcleo da fibra obedecendo à condição de Bragg dada pela Equação 5.

Entretanto, com o aumento da fluência acumulada para valores $\geq 500.000 \frac{mJ}{cm^2}$, a variação no índice de refração sofre uma saturação e a refletividade da rede de Bragg alcança

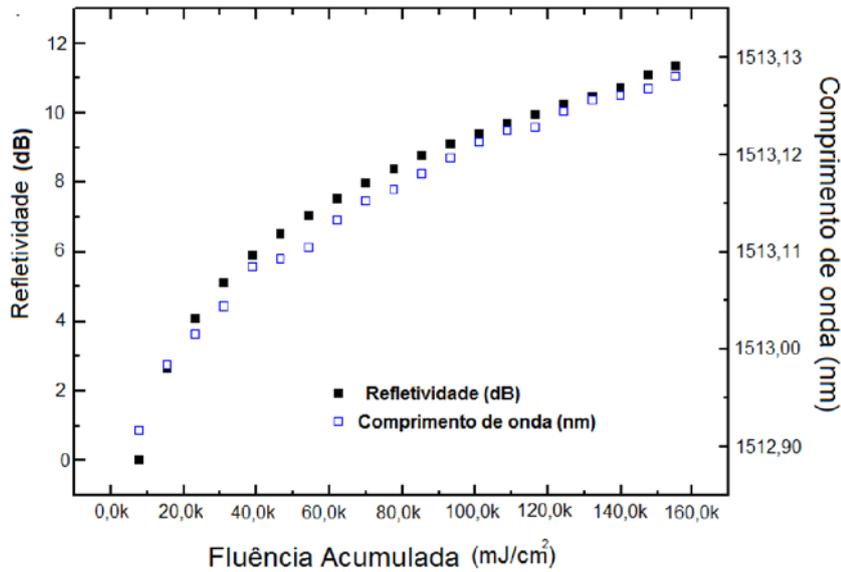


Figura 30: Deslocamento do comprimento de onda de Bragg com o aumento da fluência acumulada para a amostra FBG-X. Observa-se o aumento da refletividade da rede (quadrados cheios) à medida que a energia fornecida à rede se acumula. Ao mesmo tempo, nota-se um deslocamento do comprimento de onda de Bragg (quadrados vazados) para valores maiores.

Fonte: Autoria Própria.

um limite máximo em $\lambda_B = 1513$ nm. Isso acontece para a gravação da amostra FBG-Y, cujos parâmetros de gravação utilizados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros de Gravação da FBG-Y

| Amostra FBG-Y | |
|-----------------------------|----------------|
| Parâmetros | |
| Número de pulsos por rajada | 5000 |
| Frequência | 250Hz |
| Número de rajadas do laser | 85 |
| Energia do laser por pulso | 6,0mJ – 0,283W |

As Figura 31 e Figura 32 ilustram o espectro de evolução da rede de Bragg gravada na amostra FBG-Y em função do comprimento de onda de Bragg λ_B para valores de fluência acumulada $\leq 500.000 \frac{mJ}{cm^2}$ e $\geq 500.000 \frac{mJ}{cm^2}$, respectivamente.

A refletividade da FBG-Y alcança um valor limite em $\lambda_B \cong 1513$ nm, ilustrado pela Figura 33 (a). Observa-se que quando a fluência acumulada chega a $\approx 500.000 \frac{mJ}{cm^2}$, a alteração no índice de refração atinge um ponto de saturação. O aumento subsequente na fluência para valores maiores que $\geq 500.000 \frac{mJ}{cm^2}$ causa um decaimento na refletividade da rede, observado pela Figura 33 (b).

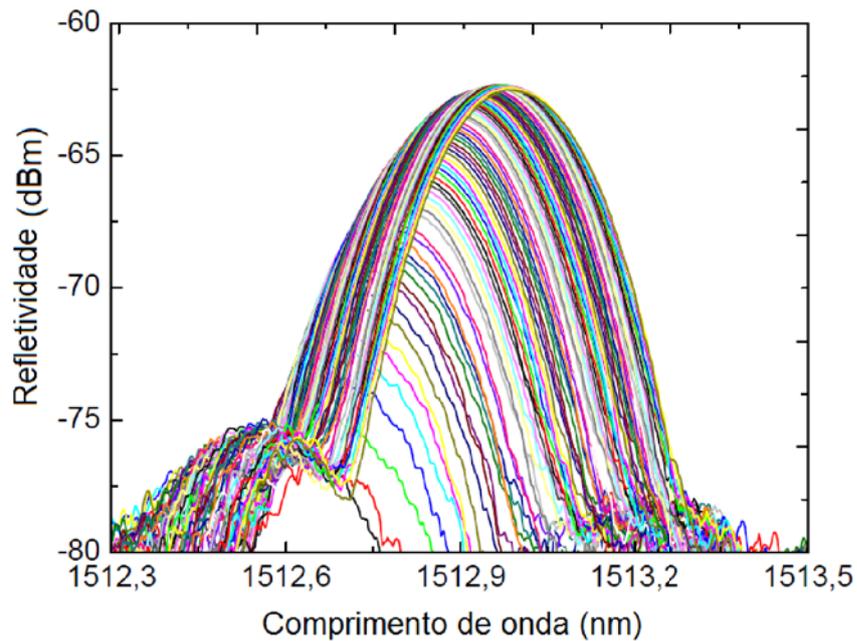


Figura 31: Espectro de evolução da rede de Bragg FBG-Y1 até uma fluência acumulada $\leq 500.000 \frac{mJ}{cm^2}$. Observa-se o deslocamento do comprimento de onda de Bragg λ_B para valores maiores com o aumento da fluência acumulada até ≈ 1513 nm e refletividade máxima de 17,5 dB.

Fonte: Aatoria Própria.

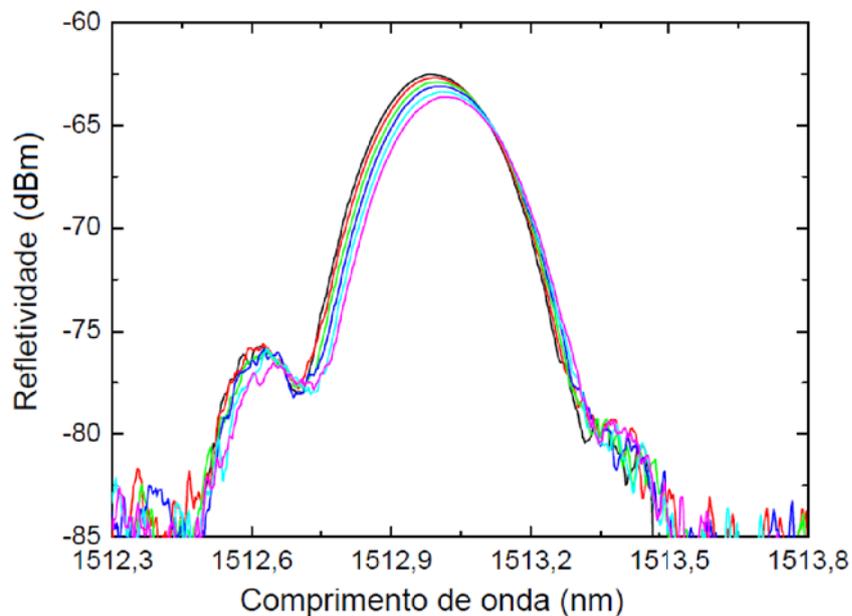


Figura 32: Espectro de evolução da rede de Bragg FBG-Y2 para fluência acumulada $\geq 500.000 \frac{mJ}{cm^2}$. Nota-se que o comprimento de onda de Bragg λ_B desloca-se para valores maiores, porém com sua refletividade decrescendo.

Fonte: Aatoria Própria.

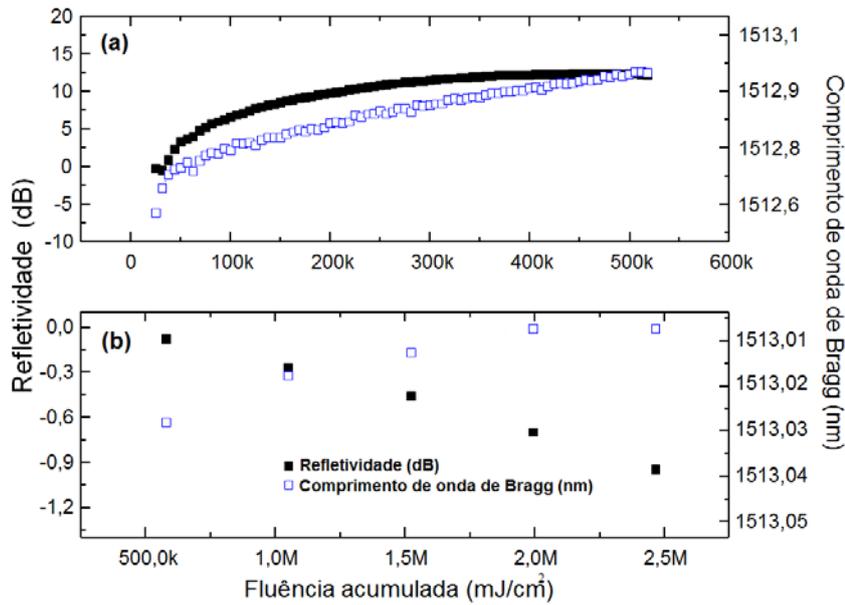


Figura 33: (a) Deslocamento do comprimento de onda de Bragg na amostra FBG-Y para valores maiores e (b) deslocamento do comprimento de onda de Bragg para valores menores com o aumento da fluência acumulada para valores $\geq 500.000 \frac{mJ}{cm^2}$.

Fonte: Autoria Própria.

O comportamento apresentado pelas amostras FBG-X e FBG-Y em relação à gravação das redes de Bragg surgiu para faixas de energia do laser iguais, aproximadamente, a 7,5 mJ. Quando a energia do pulso foi aumentada para valores além de 7,5 mJ, aumentou também o espalhamento do feixe UV nas micro-estruturas da casca da PCF. Consequentemente, diminuiu-se a eficiência do mesmo feixe UV na modulação do índice de refração do núcleo. A Figura 34 ilustra o comportamento da amostra FBG-W, iluminada com energia igual a 8,5 mJ. Esta amostra apresentou λ_B e amplitude da rede irregulares com o aumento da fluência acumulada. O comprimento de onda de Bragg λ_B desloca-se para valores maiores, mas apresenta pontos em que desloca-se para a esquerda, ou seja, desloca-se para valores menores. Quanto à intensidade de pico de reflexão, observa-se a mesma irregularidade: o aumento da fluência nem sempre aumenta a amplitude da rede; em alguns pontos, ela diminui. Isto pode ocorrer por causa de um maior grau de espalhamento da luz nos furos de ar da casca da PCF. Como a potência é maior, a irregularidade se acentua, causando variações para mais e para menos tanto em λ_B quanto na amplitude da rede gravada (KNIGHT *et al.*, 1998a). A Tabela 5 refere-se aos parâmetros utilizados na gravação da rede de Bragg da amostra FBG-W.

A Figura 35 mostra a evolução do espectro de reflexão da rede de Bragg da amostra FBG-W.

As redes de Bragg gravadas utilizando máscara de fase terão a metade do período

Tabela 5: Parâmetros de Gravação da FBG-W

| Amostra FBG-W | |
|-----------------------------|----------------|
| Parâmetros | |
| Número de pulsos por rajada | 5000 |
| Frequência | 250Hz |
| Número de rajadas do laser | 20 |
| Energia do laser por pulso | 8,5mJ – 0,485W |

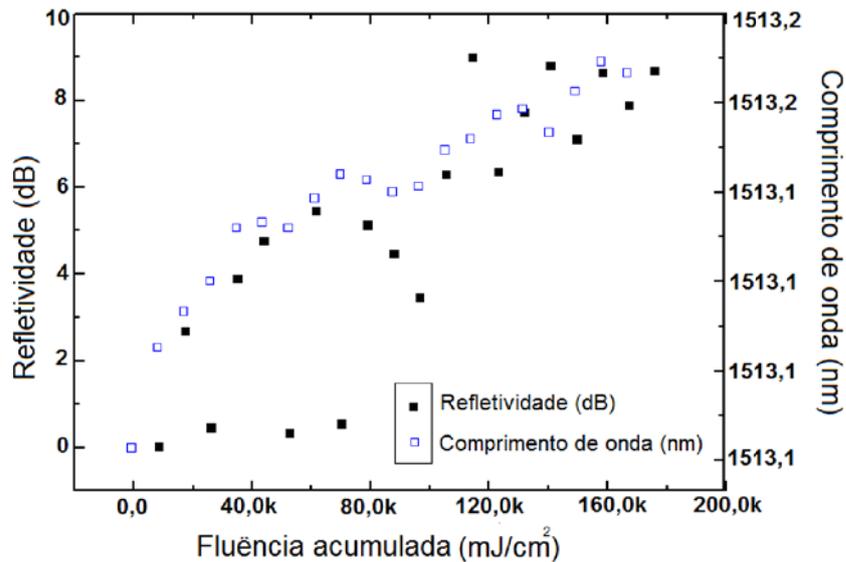


Figura 34: Deslocamento irregular do comprimento de onda de Bragg com o aumento da fluência acumulada devido ao maior espalhamento do feixe UV nas micro-estruturas da PCF na amostra FBG-W.

Fonte: Autoria Própria.

da máscara de fase usada na sua fabricação. Para se obterem redes com períodos diferentes, devem ser usadas máscaras de fases diferentes. Isso é considerado um fator limitante no que se refere à produção de redes através deste método. O resultado do crescimento das FBGs podem apresentar algumas variações (HILL; MELTZ, 1997) oriundas do espalhamento da luz nas micro-estruturas da casca da PCF durante o processo de gravação da FBG. Para diminuir o espalhamento do feixe UV, pode-se controlar a orientação rotacional da fibra micro-estruturada (CANNING *et al.*, 2008). Particularmente para uma fibra de 12 anéis, é sugerido por Holdsworth *et al.* (2008) gravar a FBG usando um motor controlador de rotação (HOLDSWORTH *et al.*, 2008). Esta solução não foi implementada nos experimentos relatados neste trabalho por falta de equipamentos opto-mecânicos, incluindo o motor que controla o ângulo em que o feixe UV incide sobre a fibra micro-estruturada durante a gravação da rede de Bragg. Outra alternativa citada por (CANNING *et al.*, 2008) é mais sofisticada e envolve a

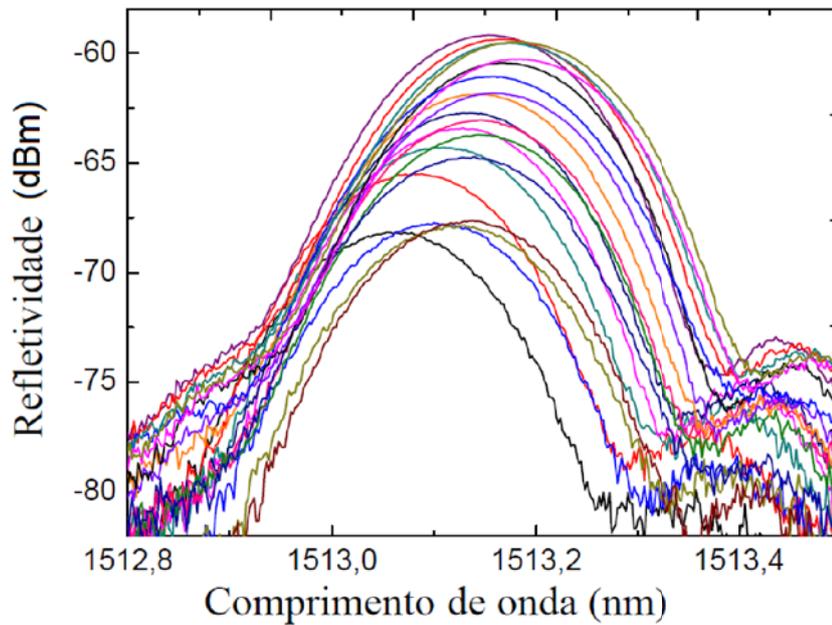


Figura 35: Evolução do crescimento da rede de Bragg da amostra FBG-W.

Fonte: Autoria Própria.

visualização da frente de onda, inserida na entrada do enlace, na saída do mesmo, para verificar e controlar a fase da frente de onda ao longo da gravação da FBG. Este controle depende também da disponibilidade de ajustadores de fase adequados (MOSK; VELLEKOOP, 2007).

O método de hidrogenação das fibras micro-estruturadas é também utilizado para a redução do espalhamento da luz (SORENSEN *et al.*, 2005). Porém, ressalta-se que as duas extremidades da PCF devem estar emendadas com fibras SMF padrão para que não haja a difusão do hidrogênio para fora da PCF, o que diminuiria a fotossensibilidade da fibra. Para a gravação de redes de Bragg em PCFs com laser de femtosegundos, (GROOTHOFF *et al.*, 2007) sugere a inserção de gel casador de fase para um tipo especial de fibra (a casca possui um anel de ar ao redor do núcleo).

6 GRAVAÇÃO DE LPGS

6.1 LPGS EM FIBRAS SMF-28

6.1.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, RESULTADOS E DISCUSSÃO

As redes de período longo, assim como as redes de Bragg, também são o resultado de modulações periódicas no índice de refração do núcleo da fibra, seja ela micro-estruturada ou não. A diferença está no fato de que as LPGs possuem períodos maiores que as FBGs, além de propiciarem o acoplamento da luz do núcleo para modos de casca, deixando de transmitir determinada faixa de comprimentos de onda. As LPGs possuem aplicações também como sensores de grandezas diversas, sendo o seu estudo e desenvolvimento também de grande importância para o aprimoramento de sua aplicabilidade.

Num primeiro momento, com o objetivo de fazer o alinhamento do laser dentro da montagem opto-mecânica, o sistema composto pelo laser de CO₂, 25 W, $\lambda = 10.600$ nm, foi utilizado para gravar as redes de período longo em fibras SMF-28, Corning, de sílica pura, no Departamento de Eletrônica Quântica do Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas, Laboratório do Prof. Cristiano Cordeiro, na UNICAMP. Foi utilizada uma fonte luminescente LED (*Light Emitting Diode*) OFLS-6, Safira, emitindo de 1450 nm a 1650 nm. Para o acoplamento da luz na fibra foram utilizados dois posicionadores ópticos XYZ e duas lentes objetivas M-20x da Thorlabs, Newport, além de acopladores de fibra nua. Uma massa de 5 gr foi presa na fibra ótica após as roldanas para prevenir possíveis deslizamentos durante o deslocamento da fibra durante a gravação da LPG. Para as emendas entre as fibras SMF-SMF foram utilizados o clivador Fiber Cleaver FC-6S, Sumitomo Electric, e a máquina de fusão Fitel S177, Furukawa Electric. O diagrama esquemático da montagem experimental é ilustrado na Figura 36.

A técnica de gravação utilizada no experimento consiste na escrita ponto-a-ponto: a fibra é movida para a direita através de um deslocador controlado automaticamente após cada rajada de pulsos do laser. O alinhamento lateral entre o eixo da fibra e o feixe do laser é feito manualmente antes de cada novo trem de pulsos para que o feixe atinja o centro da

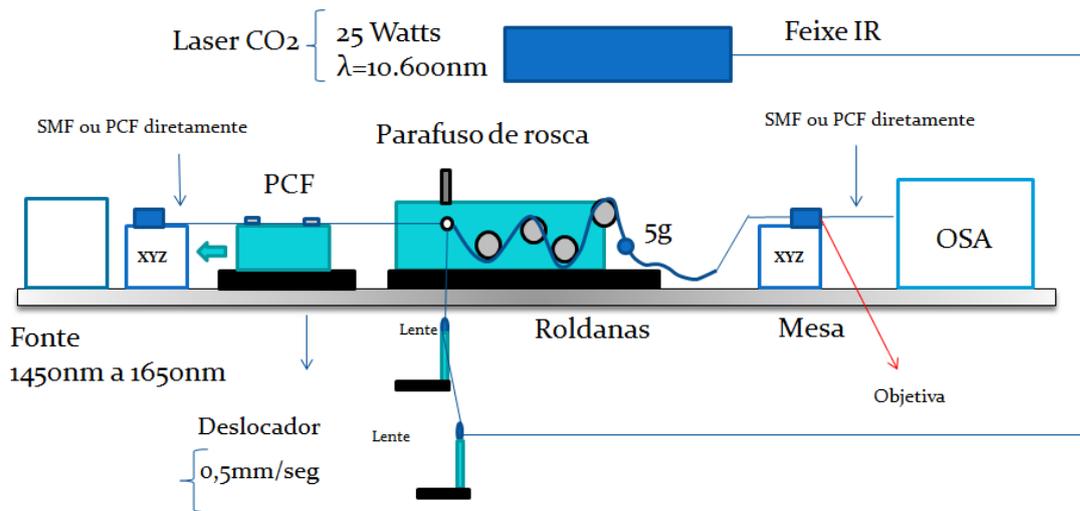


Figura 36: Diagrama esquemático da montagem experimental para gravação de LPG em fibra ótica monomodo padrão SMF-28.

Fonte: Autoria Própria.

SMF. Desta forma, o intervalo entre cada deformação produzida na fibra é diferente, pois outro procedimento manual é requerido para o alinhamento lateral. O comprimento L da LPG, o período Λ_{LPG} , o tempo de exposição t ao feixe do laser e a potência P do laser CO_2 são definidos no controlador do sistema. Todo o processo foi monitorado em tempo real pelo OSA.

A montagem opto-mecânica do laboratório da UNICAMP é mostrada nas fotografias a seguir. A Figura 37 (a) mostra todo o conjunto composto pelo laser, o deslocador, o suporte da fibra, a lente e os espelhos. A Figura 37 (b) mostra mais detalhadamente as roldanas que sustentam a fibra ortogonalmente ao feixe do laser.

Uma amostra denominada SMF-1 de fibra monomodo padrão foi utilizada para o estabelecimento de parâmetros iniciais na gravação das redes de período longo em PCFs e para uma calibração da montagem mecânica. Os parâmetros utilizados para a gravação da amostra SMF-1 foram estabelecidos com base em valores de literatura (WANG *et al.*, 2006), (KATSUYAMA; KOYAMA, 2011), (KAKARANTZAS *et al.*, 2001). A potência do laser P foi fixada em 0,75 W, o tempo de exposição t da fibra ao feixe IR $t = 250$ ms e periodicidade da LPG teve seu valor estabelecido em $\Lambda = 600 \mu\text{m}$. Foram obtidos os resultados ilustrados na Figura 38:

A LPG gravada na amostra SMF-1 apresentou o comprimento de onda de ressonância em $\lambda_{\text{res}} = 1560$ nm, com atenuação de $\approx 2,5$ dB com 10 pontos iniciais de marcação. Observou-se um aumento da atenuação da LPG quando o número de pontos aumentou para 20 e 30 pontos, atingindo, respectivamente, ≈ 12 dB e ≈ 19 dB. Porém, com a continuidade no aumento do

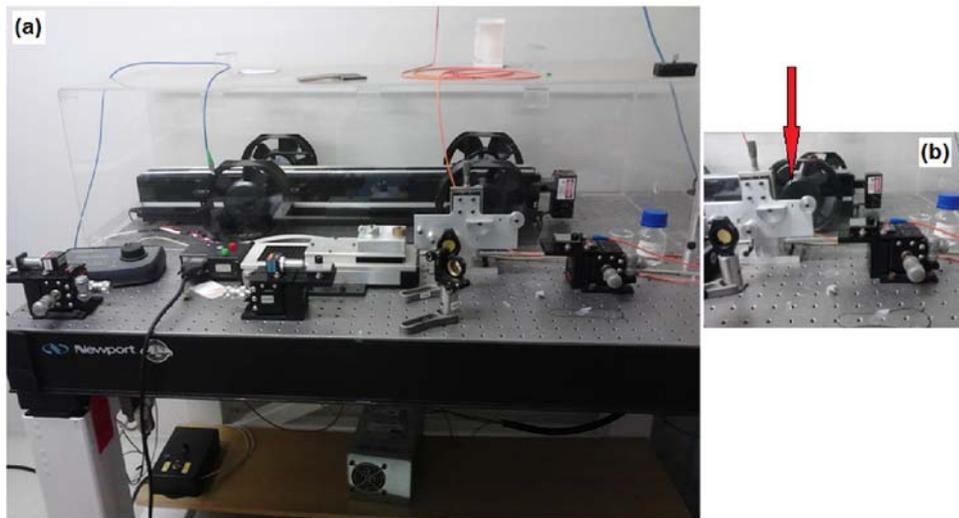


Figura 37: (a) Fotografia da montagem experimental para a gravação de LPG em fibra SMF-28 padrão. (b) Conjunto de roldanas que sustenta a fibra SMF-28 para que a mesma fique na posição horizontal ortogonalmente ao feixe do laser.

Fonte: Autoria Própria.

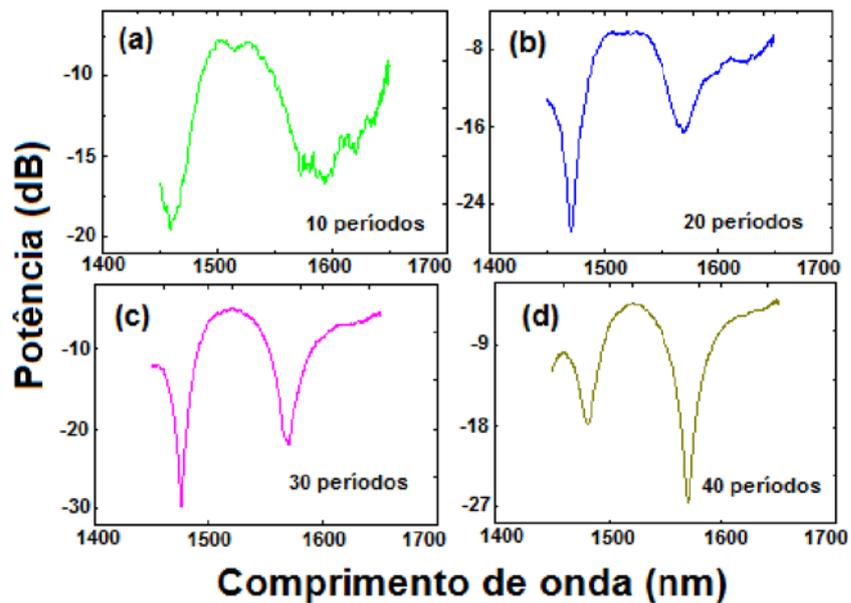


Figura 38: Evolução da LPG gravada na amostra SMF-1 com laser CO₂ de acordo com o número de pontos de marcação; $\lambda_{\text{res}} = 1560 \text{ nm}$. (a) 10 pontos de marcação, $\approx 2,5 \text{ dB}$ de atenuação; (b) 20 pontos de marcação, $\approx 12 \text{ dB}$ de atenuação; (c) 30 pontos de marcação, $\approx 19 \text{ dB}$ de atenuação e (d) 40, $\approx 8 \text{ dB}$ de atenuação.

Fonte: Autoria Própria.

número de pontos da rede, 40 pontos, verificou-se que a LPG diminuiu sua atenuação para $\approx 8 \text{ dB}$, conforme ilustra a Figura 39. Isso ocorre porque, inicialmente, a energia luminosa numa LPG é acoplada do modo fundamental de núcleo para diferentes modos de casca

(VENGSARKAR *et al.*, 1996c). Durante a fabricação da LPG o pico de atenuação aumenta com a modulação do índice de refração induzida pelo laser CO₂ devido ao acoplamento do modo fundamental de núcleo para um único modo de casca. Porém, esta atenuação aumenta até um valor máximo. A partir deste ponto, quando toda a energia do modo fundamental de núcleo é acoplada para a casca, começa a ocorrer o fenômeno chamado de acoplamento reverso (VENGSARKAR *et al.*, 1996c), em que ocorre o acoplamento do modo de casca para o modo fundamental de núcleo.

Como o experimento realizado com a amostra SMF-1 tinha o objetivo de alinhamento e calibração do sistema para a gravação posterior das LPGs em fibras micro-estruturadas, não se deu prosseguimento ao aumento do número de marcações para a visualização do fenômeno acoplamento reverso.

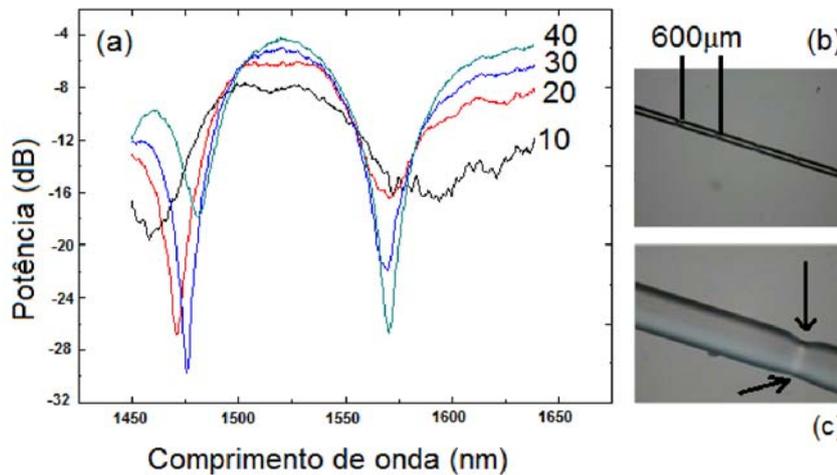


Figura 39: (a) Comportamento da LPG à medida que se aumentam o número de pontos de marcação; (b) Fotografias da LPG gravada em fibra SMF-1. Em (c) notam-se os sulcos assimétricos formados na casca micro-estruturada devido à incidência irregular do feixe de CO₂ sobre a fibra.

Fonte: Autoria Própria.

6.2 LPGS EM FIBRAS NKT PHOTONICS

6.2.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, RESULTADOS E DISCUSSÃO

As redes de período longo foram gravadas na fibra PCF NKT Photonics utilizando o laser CO₂ através da técnica ponto-a-ponto. A fibra de 12 anéis possui índice de refração efetivo do núcleo e da casca iguais a $n_{\text{eff}}^{\text{núcleo}} = 1,44$ e $n_{\text{eff}}^{\text{casca}} = 1,410175$, respectivamente, de acordo com as especificações. Utilizando a Equação 14

$$\lambda_{\text{res}} = \Lambda_{LPG}(n_{\text{eff}}^{\text{núcleo}} - n_{\text{eff}}^{\text{casca,m}}) \quad (14)$$

e assumindo $\lambda_{\text{res}} = 1550 \text{ nm}$, obteve-se o valor inicial do período da Λ_{LPG} para começar as gravações na fibra micro-estruturada no Laboratório do Prof. Cristiano Cordeiro, no Departamento de Eletrônica Quântica do Instituto de Física Gleb Wataghin da UNICAMP. Ressalta-se que a diferença do número de anéis da fibra micro-estruturada deve ser levada em consideração quando da gravação das LPGs devido, principalmente, ao maior espalhamento da luz durante a incidência do feixe IR. O diagrama esquemático da montagem experimental para a gravação das LPGs nas fibras micro-estruturadas é o mesmo já ilustrado na Figura 36 utilizado para a gravação de LPGs em SMF padrão.

Nos experimentos realizados o tempo de exposição da fibra t e a potência P do CO_2 permaneceram fixos e iguais a $t = 250 \text{ ms}$ e $P = 3 \text{ W}$, respectivamente. A periodicidade da rede variou entre $50 - 500 \mu\text{m}$. Para o período $\Lambda = 50 \mu\text{m}$ calculado inicialmente pela Equação (14), a primeira amostra arrebentou no primeiro trem de pulsos do laser. Desta forma, foi-se aumentando o período com passo de $50 \mu\text{m}$ para que a fibra não rompesse pelo aquecimento. As amostras gravadas na sequência com períodos iguais a $\Lambda = 100 \mu\text{m}$ e $\Lambda = 150 \mu\text{m}$ também romperam no primeiro trem de pulsos e foram descartadas.

A Figura 40 mostra fotografias de seções longitudinais de quatro amostras de LPGs gravadas em fibras NKT Photonics que não romperam, denominadas NKT-01, NKT-02, NKT-03 e NKT-04, depois de quatro processos de gravação de LPGs com períodos diferentes. Para a amostra NKT-01 o período foi fixado em $\Lambda = 200 \mu\text{m}$; a amostra NKT-02 apresenta período $\Lambda = 250 \mu\text{m}$ e as amostras NKT-03 e NKT-04 possuem, respectivamente, períodos iguais a $\Lambda = 300 \mu\text{m}$ e $\Lambda = 350 \mu\text{m}$. Observa-se pela Figura 40 o maior afunilamento do diâmetro da fibra para periodicidades menores. Este fato pode ser atribuído aos maiores danos causados no núcleo da fibra por causa do curto intervalo de tempo entre o processo de aquecimento e resfriamento produzido por cada trem de pulsos do laser.

Das amostras fotografadas, foi possível a captura do espectro de transmissão pelo OSA de apenas algumas delas devido às altas perdas de inserção. A amostra NKT-03, Figura 41, por exemplo, não mostrou nenhum pico de ressonância dos modos acoplados para a casca da PCF com 28 pontos de exposição ao feixe IR. As demais amostras da NKT Photonics apresentaram perdas de inserção da ordem de $\approx 35 \text{ dB}$.

A amostra de NKT-05, gravada com os mesmos parâmetros da amostra NKT-01, ou seja, potência $P = 3 \text{ W}$, tempo de exposição $t = 250 \text{ ms}$ e período $\Lambda_{LPG} = 200 \mu\text{m}$ apresentou

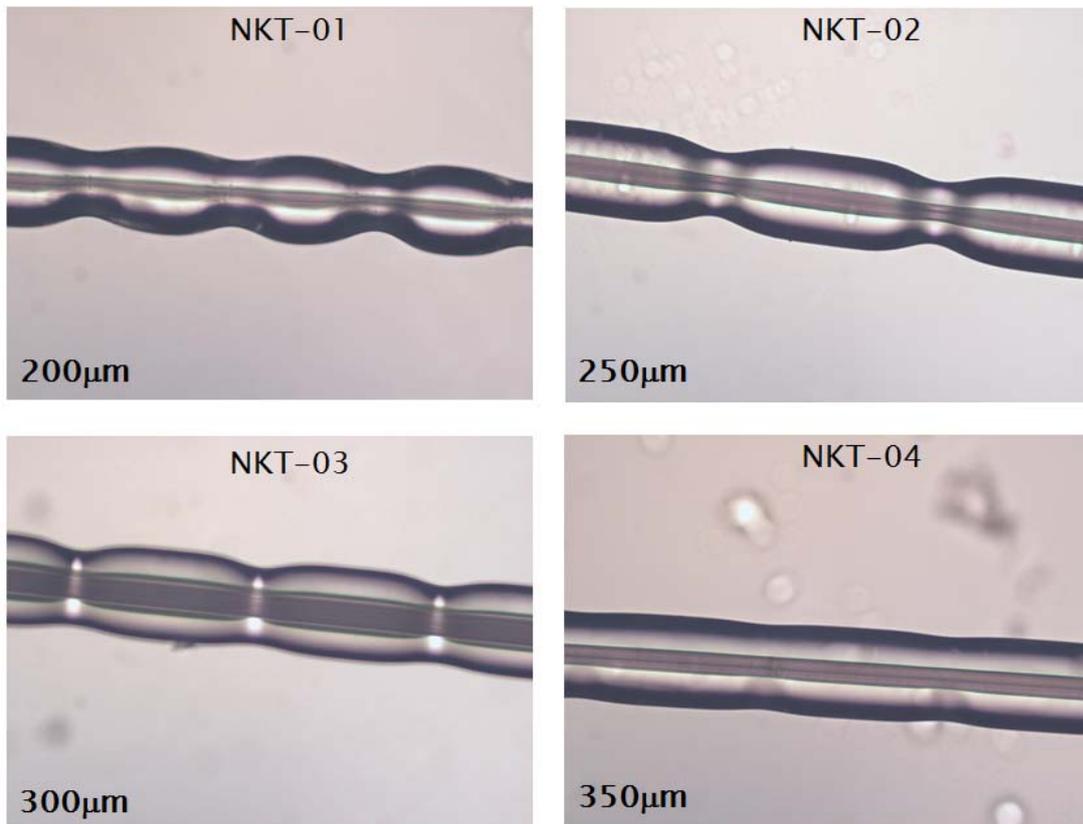


Figura 40: Fotografias das LPGs gravadas nas amostras NKT-01, NKT-02, NKT-03 e NKT-04 para $t = 250$ ms e $P = 3$ W constante para todas as amostras.

Fonte: Autoria Própria.

dois picos de ressonância $\lambda_1 = 1521,2$ nm e $\lambda_2 = 1546,6$ nm. Entretanto, na tentativa de aumentar a atenuação em transmissão de um dos picos de ressonância da LPG, e verificar a possível ocorrência de um acoplamento reverso como ocorreu com a fibra SMF-1, a fibra se rompeu após 32 marcações do feixe do laser CO₂.

Com o aprimoramento da técnica de emenda com baixa perda entre PCF-SMF, as amostras NKT foram novamente analisadas através do OVA (*Optical Vector Analyser*) 5000 LUNA Technologies, no Laboratório Avançado de Telecomunicações, LATE. O OVA possui a fonte óptica e o detector dentro do mesmo equipamento. Os *pigtails* das amostras são, então, encaixados diretamente no OVA, dispensando a necessidade de acopladores óticos e/ou conectores mecânicos para a medida da perda de inserção. A montagem experimental é ilustrada na Figura 43 (a). As fotografias da LPG gravada na amostra NKT-08 foram ampliadas em 4 e 20 vezes, respectivamente, conforme mostra a Figura 43 (b).

A curva ilustrada na Figura 44 mostra a perda de inserção (*dB*) do sinal que atravessa a LPG em função do comprimento de onda λ . Observa-se a existência de um pico ressonância

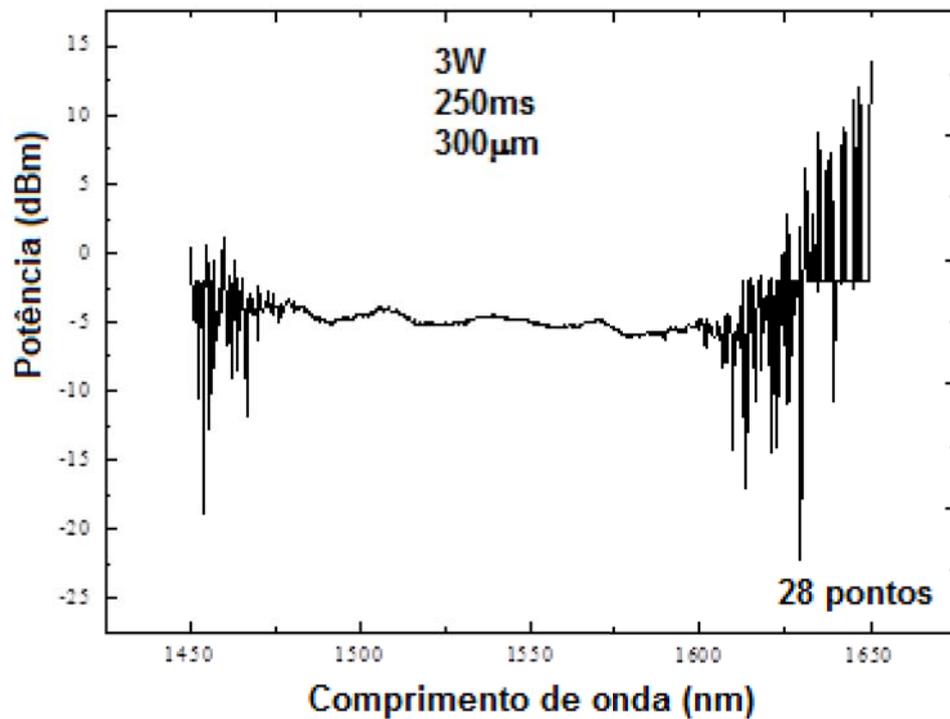


Figura 41: Espectro de transmissão da LPG na amostra NKT-03.

Fonte: Autoria Própria.

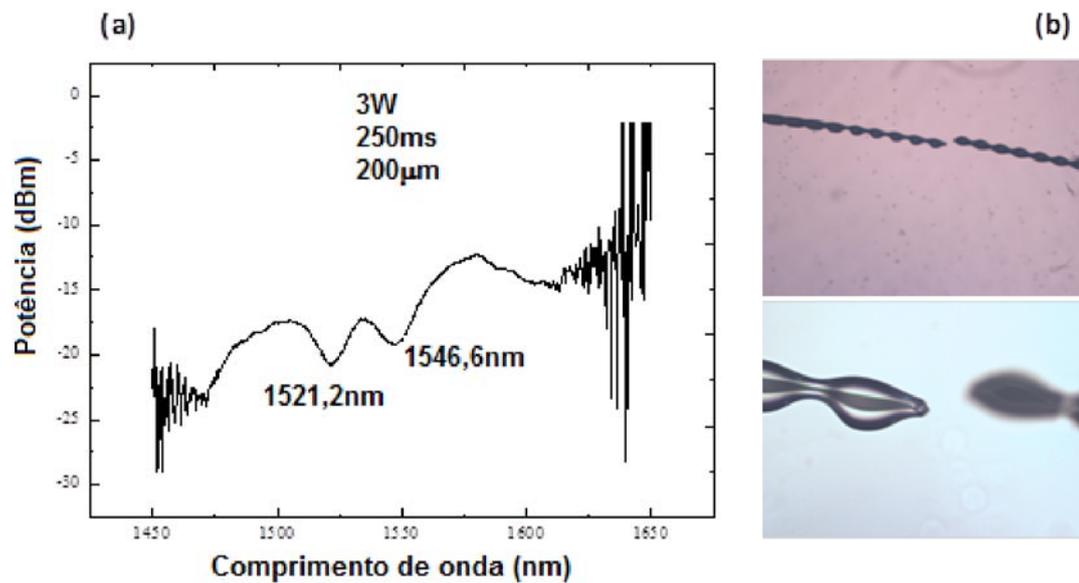


Figura 42: (a) Picos de ressonância apresentados pela LPG gravada na amostra NKT05; $\lambda_1 = 1521,2\text{nm}$ e $\approx 5\text{dB}$ de atenuação e $\lambda_2 = 1546,6\text{nm}$ com $\approx 3\text{dB}$ de atenuação em transmissão; (b) Fotografias da seção longitudinal da LPG-NKT05, onde é possível observar o afinilamento da PCF até sua completa ruptura.

Fonte: Autoria Própria.

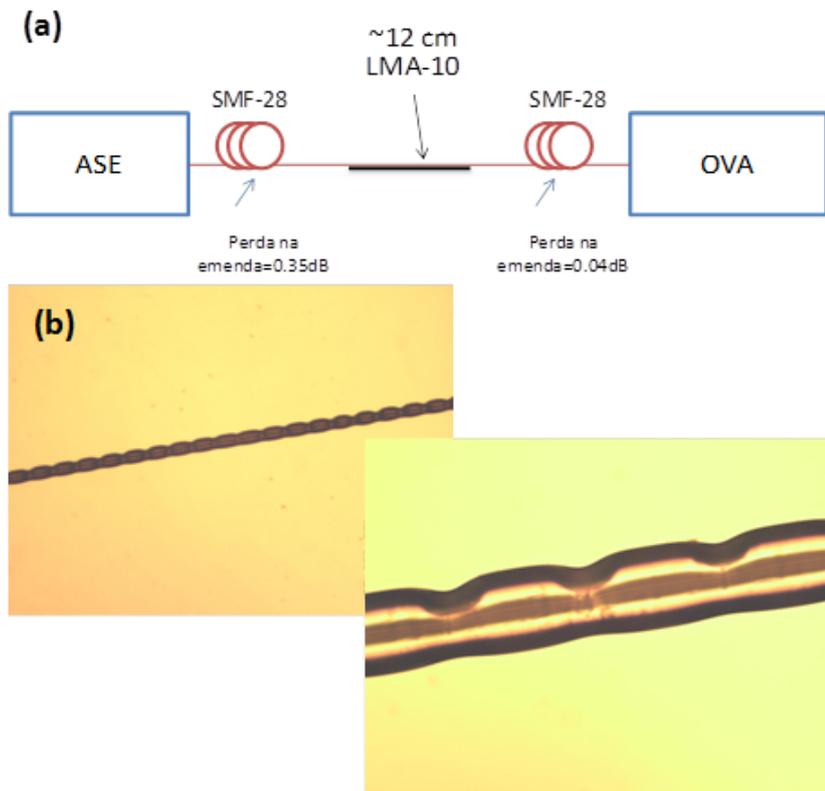


Figura 43: (a) Montagem experimental para verificação da LPG gravada na amostra NKT-08 através do OVA. (b) Fotografias da seção transversal da LPG gravada na fibra NKT-08.

Fonte: Autoria Própria.

em torno de $\lambda = 1553,8 \text{ nm}$ de $\approx 13 \text{ dB}$, confirmando o acoplamento do modo de núcleo para modos de casca e a existência da rede de período longo. Os parâmetros utilizados para a gravação desta LPG foram potência do laser $P = 3,5 \text{ W}$, $\Lambda = 210 \mu\text{m}$ e $t = 170 \text{ ms}$.

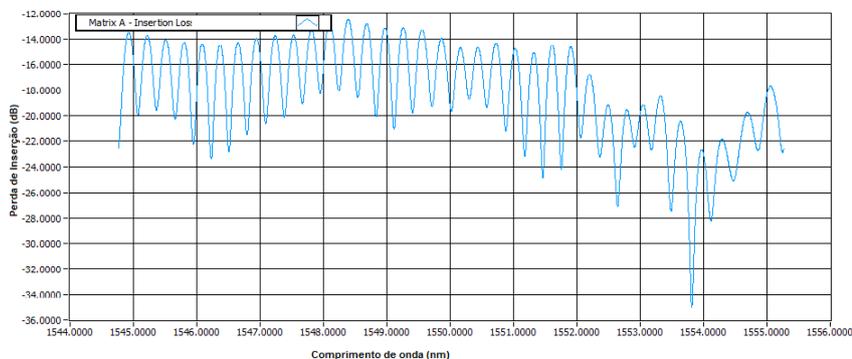


Figura 44: Pico de ressonância apresentado pela LPG gravada na amostra NKT-08; $\lambda_{\text{res}} = 1553,8 \text{ nm}$ e atenuação de $\approx 13 \text{ dB}$.

Fonte: Autoria Própria.

Foram necessários 54 pontos de marcação para o aparecimento do pico de ressonância, totalizando uma LPG de comprimento igual a $L = 1,134 \text{ cm}$ ($\Lambda = 210 \mu\text{m}$)($N = 54$). Observa-se pelas fotografias da Figura 43 (b) a formação de sulcos assimétricos na estrutura da fibra. Este fato pode ser explicado pela falta de equipamentos necessários para a rotação da fibra quando da gravação da LPG, pois a deformação é mais evidente no lado exposto ao feixe IR. A assimetria da rede é um dos fatores que impede o acoplamento adequado do modo fundamental de núcleo para os modos da casca micro-estruturada da fibra, formando, portanto, uma rede de baixa ressonância.

Por causa das altas perdas de inserção nas emendas entre as fibras, $\approx 15 \text{ dB}$, foram feitas as primeiras gravações de LPGs em trechos extensos de LMA-10 sem emenda com fibra SMF. De acordo com a Equação 14 o período ideal da LPG seria $\Lambda = 428 \mu\text{m}$ para acoplamento entre modo de núcleo e primeiro modo de casca, já que o índice de refração efetivo do núcleo da LMA-10 $n_{\text{eff}}^{\text{núcleo}} = 1,441024$. Fez-se uma extensa variação dos principais parâmetros que influenciam diretamente em sua gravação, dentre eles a potência do laser, a periodicidade da rede, o número de períodos e o tempo de exposição da fibra ao feixe IR. A Tabela 6 mostra todos os parâmetros utilizados:

Tabela 6: Parâmetros utilizados para a gravação da LPG em fibra LMA-10 de 5cm

| Potência do laser (W) | 2 | 2,5 | 3 | 3,2 | 3,4 | 3,6 | 3,8 |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Periodicidade (μm) | 400 | 420 | 440 | 460 | 500 | 600 | 650 |
| Número de períodos | 10 a 100 | Step = 10 | | | | | |
| Tempo de exposição ao feixe IR (ms) | 180 a 250 | Step = 10 | | | | | |

As faixas de potência do laser variaram de (2) W a (4) W e a periodicidade da rede, de (400) μm a (700) μm . O número de pontos de marcação foi de 10 a 100 em intervalos de 10 em 10; durante estes intervalos o crescimento da rede era observado em tempo real através do OSA. O tempo de exposição da fibra ao feixe IR também foi alterado de (180) ms a (250) ms. Observa-se na Figura 45 que não houve deformação na LMA-10 (número de pontos de marcação=100, $t = 250 \text{ ms}$, $\Lambda = 460 \mu\text{m}$, $P = 3,5 \text{ W}$). Quanto menor a periodicidade ou maior o tempo de exposição da fibra ao feixe do laser, menor a potência determinada para que não houvesse ruptura da fibra. Para uma potência de $P = 4 \text{ W}$ ou maior, houve o rompimento da fibra mesmo para períodos $\Lambda = 700 \mu\text{m}$. A Figura 45 mostra a seção longitudinal da fibra LMA-10 depois da gravação da LPG.

Na gravação das redes de período longo, observou-se que, quanto maior o tempo de exposição da fibra ao feixe do laser, maior é a profundidade do sulco formado na superfície da PCF. Ressalta-se também que o processo não é simétrico. Um lado da fibra recebe mais

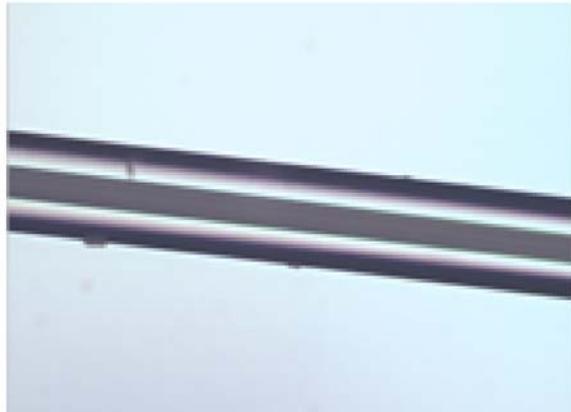


Figura 45: Seção longitudinal da LPG em fibra LMA-10. Com os parâmetros utilizados não foram observadas marcações na fibra.

Fonte: Autoria Própria.

radiação IR que o outro porque não há rotação da fibra em torno do seu eixo durante o processo de gravação. As fibras são somente deslocadas horizontalmente sobre as roldanas. Eventuais torções indesejadas podem acontecer, já que o sistema não é estável. (CANNING *et al.*, 2008) ressaltam a importância da montagem experimental adequada no que tange à gravação de redes em PCFs, pois a variação rotacional das PCFs na inscrição de redes pode causar variações na intensidade da luz que chega à seção transversal do núcleo, um problema a ser levado em conta quando se deseja reprodutibilidade e precisão no processo de gravação de redes.

Outro fator que pode ter levado a resultados negativos na gravação das LPGs nas fibras micro-estruturadas, refere-se à massa de 5 gramas utilizada para dar estabilidade à fibra. Ela pode não ter sido suficiente para evitar os deslizamentos da fibra nesta etapa do trabalho. Além disso, a inércia do motor de passo que fez o translado da fibra a cada pulso do *laser* pode ter interferido no tracionamento da fibra no momento inicial da translação deixando irregulares, até mesmo, os primeiros períodos da rede. Como os pulsos do *laser* de CO₂ eram aplicados manualmente, o intervalo de gravação entre dois pontos da LPG era variável. Isso implicou, também, num aquecimento e resfriamento irregulares dos pontos da LPG, interferindo na mudança estrutural da sílica. Como, num primeiro momento, as variáveis eram muitas em um sistema novo montado no Laboratório na UNICAMP e, em procedimentos experientais o tempo joga contra o cientista, não foi possível fazer todos os ajustes necessários para que se obtivessem redes de período longo satisfatórias em fibras micro-estruturadas.

Apesar das LPGs gravadas nas PCFs NL-1550-POS-1 e LMA-10 da NKT Photonics na UNICAMP não apresentarem picos de ressonância, os experimentos mostraram os fatores mais relevantes em todo o processo, desde a fusão da fibra micro-estruturada com a fibra monomodo

até o posicionamento horizontal e vertical da PCF em relação ao feixe do laser CO₂. Parâmetros como o período da LPG e o número de pontos da mesma podem ser calculados em função do comprimento de onda λ de acordo com a condição de casamento de fase entre o modo fundamental de núcleo e o modo copropagante de casca $\lambda_{\text{res}} = (n_{\text{eff}}^{\text{núcleo}} - n_{\text{eff}}^{\text{casca}})(\Lambda)$. Além disso, podem ser programados para uma PCF com diâmetro dos capilares d e *pitch* Λ específicos, de acordo com a aplicação a que se destina.

6.3 LPGS EM FIBRAS LMA-10

6.3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho foi utilizada a fibra de cristal fotônico LMA-10 para a gravação das LPGs no laboratório da UDESC, cujo diâmetro do núcleo é igual a $\rho = 10,1\mu\text{m}$, diâmetro dos furos de ar é igual a $d = 2,95\mu\text{m}$ e *pitch* igual a $\Lambda = 6,9\mu\text{m}$. A fibra possui núcleo de sílica pura com seis anéis ao redor do núcleo. A seção transversal da LMA-10 é ilustrada na Figura 14.

As amostras de PCF foram emendadas a trechos de fibra monomodo padrão, SMF, nas duas extremidades, usando a máquina de emendas FSM-50S, Fujikura, no modo manual com o intuito de controlar os parâmetros de fusão para reduzir as perdas nas emendas. Emendas de melhor qualidade e menor perda ocorrem quando o diâmetro de campo modal da PCF é aumentado e se aproxima do diâmetro de campo modal na interface da SMF. A perda média obtida foi de 1,5 dB/emenda. O *laser* de CO₂ utilizado (Coherent C30A) possui uma potência de pico de 30 W e opera a uma taxa de repetição de 5 kHz. Um micro-controlador controla a potência desejada do *laser*. Para gravar as LPGs a potência do laser P e o tempo de exposição da fibra ao feixe do laser t são fixados na unidade controladora do sistema. Este sistema é flexível, permitindo a variação dos parâmetros para a produção de LPGs personalizadas. A luz de uma fonte ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) é lançada na fibra e, juntamente com o OSA, monitoraram o espectro da LPG durante o processo de fabricação. A lente cilíndrica ZnSe (ULO Optics), cuja distância focal é 100 mm, é usada considerando o feixe IR aproximadamente colimado oriundo de um espelho ZnSe, que direciona a radiação do laser CO₂ para a fibra. Uma massa de 13 g é presa à extremidade livre da fibra, localizada sobre o primeiro estágio de translação à esquerda, para mantê-la tracionada durante o processo de gravação. A extremidade direita da fibra é fixada em um V-groove com uma presilha, o qual é puxado e tem seu movimento interrompido a cada ponto da LPG para que o laser emita um novo trem de pulsos. Alguns parâmetros permaneceram constantes durante os testes: a potência do laser foi fixada em 30% da potência máxima disponível, e o tempo de exposição da fibra ao feixe IR foi ajustado para $t = 150\text{ms}$. O número de pontos N e o período da LPG Λ_{LPG} foram

mudados durante o processo de gravação. Foi utilizado somente um ciclo para a gravação das amostras. O diagrama da montagem experimental é mostrado na Figura 46.

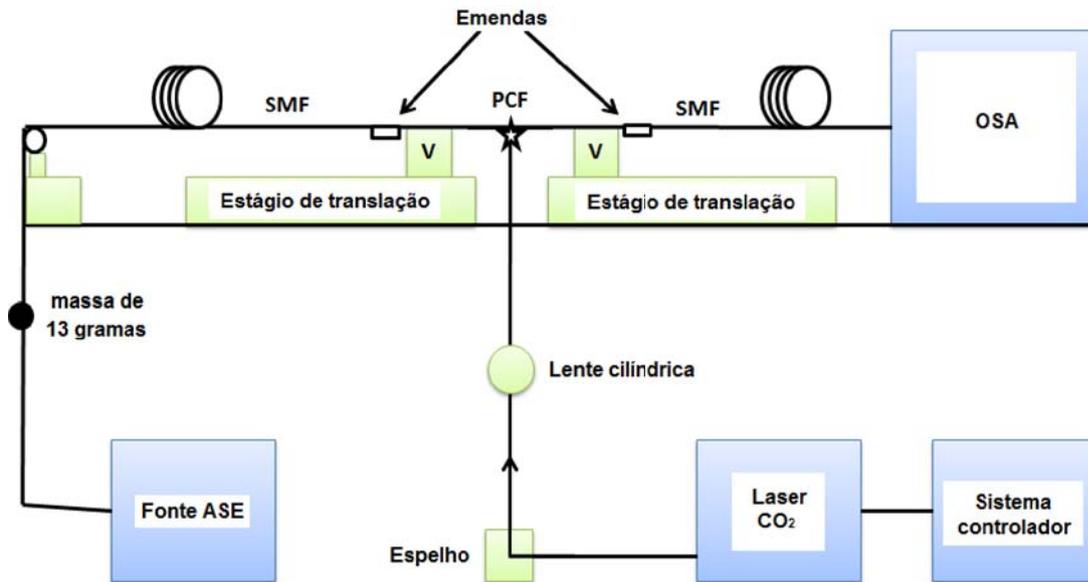


Figura 46: Diagrama esquemático da montagem experimental para gravação de LPG em fibra micro-estruturada LMA-10.

Fonte: Autorial Própria.

Os testes anteriores feitos em amostras de fibras SMF padrão, fibra micro-estruturada NL-1550-POS-1 e LMA-10, tanto na UNICAMP quanto na UDESC, mostraram-nos que os parâmetros utilizados para as gravações estavam em valores aproximados do ideal para fibras micro-estruturadas. Variações nestes parâmetros, mesmo que pequenas, podem causar danos na estrutura da fibra, rupturas ou obstrução do sinal de transmissão pela total obstrução dos capilares. Foram gravadas mais de 150 amostras de LPGs para que a primeira rede de período longo fosse gravada com sucesso. A Figura 47 é a fotografia a seção longitudinal da LPG gravada na fibra micro-estruturada LMA-10 que, devido à alta potência do *laser* de CO_2 , 4,0 W, e ao período $\Lambda = 150 \mu\text{m}$ da LPG, acumulou ar quente dentro dos capilares ao longo da gravação e se rompeu. São formadas bolhas de ar quente no interior da fibra até o seu rompimento. Isso deve-se ao processo de aquecimento da fibra micro-estruturada pelo feixe do laser com alta potência sem espaço suficiente para a distribuição do ar quente devido ao curto período da LPG; como a fibra micro-estruturada está emendada em fibras monomodo padrão nas duas extremidades, não há saída para o calor.

Depois de muitos testes no Laboratório da UDESC, as primeiras LPGs começaram a despontar nas gravações. Os parâmetros, senão assertivos, ficaram dentro de uma faixa menor de variação para que houvesse acoplamento entre o modo fundamental de núcleo e

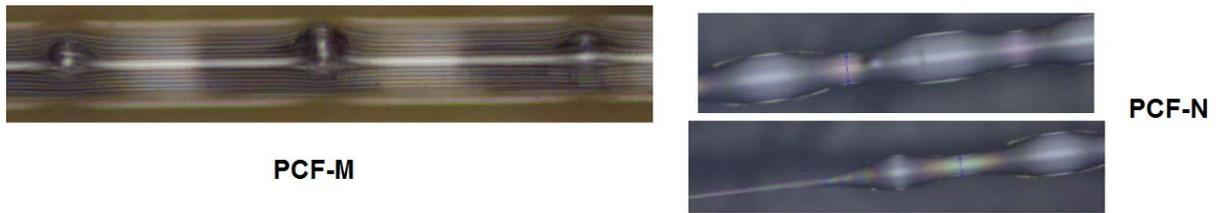


Figura 47: Fotografia da seção transversal das LPGs M e N gravadas em fibra micro-estruturada. Notam-se a formação de bolhas de ar quente no interior da fibra, acumulando calor até o rompimento da mesma. Na LPG-N observa-se o afunilamento da fibra ótica antes do rompimento.

Fonte: Autoria Própria.

modos de casca. A montagem opto-mecânica foi sendo ajustada à medida da necessidade e da disponibilidade de material. O objetivo da continuidade dos experimentos foi obter redes de período longo na fibra LMA-10 com um comprimento de onda de ressonância λ_{res} único, ou seja, com um acoplamento perfeito entre o modo fundamental de núcleo para o primeiro modo de casca. Em seguida, caracterizar estas LPGs quanto à tração mecânica e quanto à temperatura.

Após a gravação de seis redes de período longo, denominadas LPGs A, B, C, D, E e F, foram feitos testes de sensibilidade quanto à tração das amostras A, B, C e D, e sensibilidade quanto à temperatura das amostras E e F. A montagem experimental usada para as caracterizações é mostrada na Figura 48. As medidas foram realizadas mais de uma vez com o objetivo de aumentar a confiabilidade estatística dos resultados. Dois estágios posicionadores foram utilizados para segurar e manter as LPGs esticadas: uma extremidade da fibra é presa em um V-groove, e a outra extremidade é tracionada por uma massa de 13 gr com o objetivo de sintonizar a LPG no mesmo comprimento de onda de ressonância obtido durante o processo de gravação. A caracterização quanto à temperatura foi realizada para as amostras LPG-E e LPG-F com a mesma montagem experimental. Entretanto, as amostras foram fixadas sobre um elemento Peltier para o aquecimento. O termopar foi utilizado para monitorar a temperatura.

Basicamente, três mecanismos agem na modulação do índice de refração nas LPGs produzidas por laser de CO_2 : relaxamento ao *strain* residual, densificação do vidro e/ou deformação física da fibra (WANG, 2010). Apesar de não fazer parte do escopo deste trabalho experimental investir esforços em descobrir o mecanismo principal de modulação do índice de refração das LPGs gravadas em fibras de cristal fotônico, o relaxamento à tensão residual é considerado o principal fator na modulação do índice de refração das fibras óticas gravadas com laser CO_2 (KIM *et al.*, 2000), (KIM *et al.*, 2001), (KIM *et al.*, 2002), (LI *et al.*, 2008).

A tração mecânica residual é formada nas fibras óticas durante o processo de gravação das LPGs e resulta, principalmente, da superposição da tensão térmica, causada pela diferença

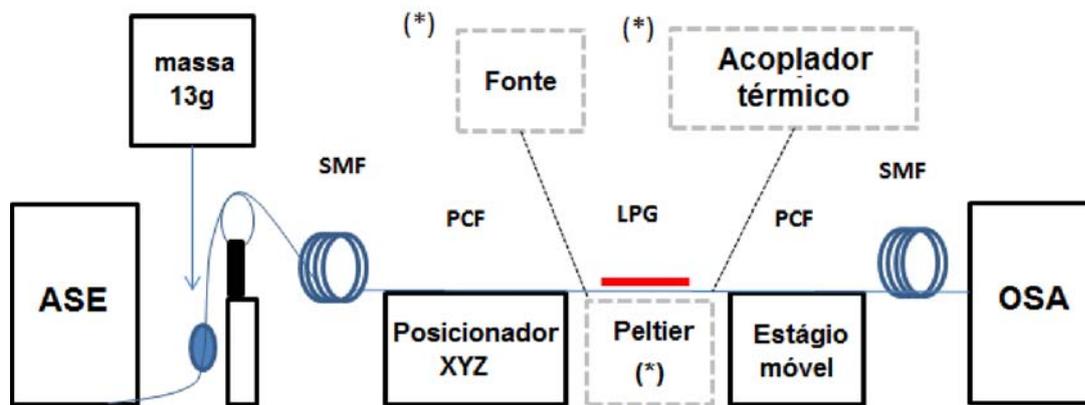


Figura 48: Diagrama esquemático utilizado na caracterização das LPGs quanto à tração e temperatura. O símbolo (*) indica o equipamento utilizado somente nos testes de temperatura.

Fonte: Autoria Própria.

entre os coeficientes de expansão térmica de núcleo e casca, e a tração mecânica, causada pela diferença nas propriedades visco-elásticas entre núcleo e casca da fibra micro-estruturada. Tal tensão residual pode mudar o índice de refração da fibra através do efeito opto-mecânico, afetando suas propriedades. Em geral a tração mecânica residual causa um decréscimo no índice de refração das fibras e a eficiência com que este efeito module o índice de refração depende linearmente da força aplicada à fibra durante o processo de gravação da LPG (KIM *et al.*, 2000), (KIM *et al.*, 2001), (KIM *et al.*, 2002).

As mudanças na estrutura do vidro referem-se ao aumento de volume e à sua densificação, porém estas mudanças são fatores dominantes na modulação do índice de refração do núcleo de fibras monomodo comerciais dopadas com boro, germânio, ou germânio e boro (GRUBSKY; FEINBERG, 2005), (LIU *et al.*, 2009).

A literatura menciona a deformação física da fibra óptica como um dos mecanismos de produção de redes de período longo com o uso do laser CO₂ (WANG *et al.*, 2006a), (WANG *et al.*, 2006), (COELHO *et al.*, 2013), (WANG *et al.*, 2013), (ZHU *et al.*, 2003). O achatamento do vidro na superfície da fibra é associado ao colapso total ou parcial dos furos da micro-estrutura da casca, baseando-se num mecanismo chamado de auto-regulagem (GRELLIER *et al.*, 1998). Esta auto-regulagem resulta da tração axial constante aplicada à fibra e da elevação local de temperatura induzida pelos pulsos do laser de CO₂, e seria a principal causa da modulação do índice de refração. Estas condições levam, por exemplo, à diminuição do diâmetro da fibra e, conseqüentemente, à mudança no índice de refração da mesma. A partir daí podem-se gravar LPGs nestes trechos de fibras com diâmetros bem menores, chamados *tapers* (XUAN *et al.*, 2009). Além de formar *tapers*, a alta temperatura do laser CO₂ pode também suavizar a casca

da fibra-microestruturada, formando defeitos periódicos, com o colapso parcial ou total dos furos de ar (KAKARANTZAS *et al.*, 2002), (WANG *et al.*, 2006a).

Quando os pulsos do *laser* atingem a fibra, o aquecimento local causa o colapso dos furos de ar na região da casca e um distúrbio periódico ao longo do guia de acordo com o movimento do estágio de translação. Ajustando-se adequadamente dois parâmetros, sendo eles a potência do laser e o tempo de exposição da fibra, é possível controlar o tamanho da região da fibra que se deseja colapsar. A Figura 49 mostra a fotografia microscópica de uma PCF LMA-10 que teve sua estrutura modificada.

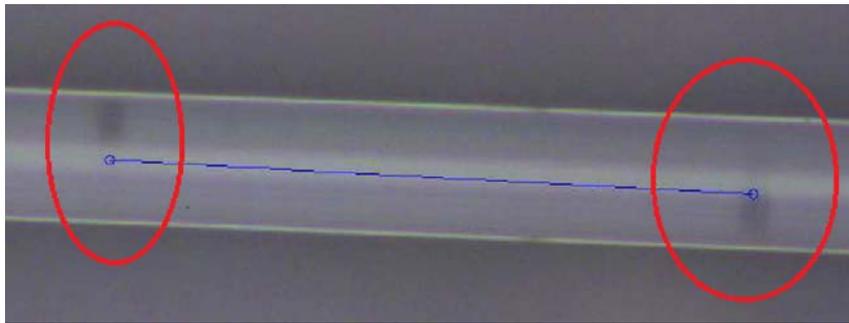


Figura 49: Microscopia óptica da seção longitudinal da PCF LMA-10 mostrando as marcas produzidas pelos pulsos do laser de CO₂.

Fonte: Autoria Própria.

O espectro de transmissão de quatro LPGs gravadas na PCF LMA-10, e identificadas como LPG-A, LPG-B, LPG-C e LPG-D, é mostrado na Figura 50. Ressalta-se que a Figura 50 não está em escala, é somente ilustrativa. As LPGs A, B, C e D possuem, respectivamente, *pitch* igual a: $\Lambda_A = 350 \mu\text{m}$, $\Lambda_B = 380 \mu\text{m}$, $\Lambda_C = 390 \mu\text{m}$ e $\Lambda_D = 400 \mu\text{m}$. O número de pontos N de cada LPG foi determinado durante o processo de gravação fazendo-se a interrupção do mesmo para preservar o menor pico de ressonância monitorado em tempo real. Para a LPG-A, $N = 3$; para a LPG-B o número de pontos foi 17; LPG-C obteve sua menor transmissão em $N = 12$ e LPG-D em $N = 17$. Estas quatro amostras apresentaram comprimento de onda de pico de ressonância em $\lambda_A = 1563 \text{ nm}$, $\lambda_B = 1547,6 \text{ nm}$, $\lambda_C = 1543,5 \text{ nm}$, $\lambda_D = 1541 \text{ nm}$, respectivamente. A largura de banda a meia altura FWHM (*Full Width at Half Maximum*) para cada amostra é ilustrada nos segmentos horizontais da Figura 50, medindo, respectivamente, 4,1 nm, 1,4 nm, 1,8 nm, and 6,1 nm para as LPGs A, B, C e D. Estas LPGs foram caracterizadas com relação à tração. A LPG-A, cujo comprimento é de apenas $L = 0,7 \text{ mm}$, apresentou FWHM igual a 4,1 nm. Para efeito de comparação, uma LPG fabricada por Zhu *et al* (ZHU *et al.*, 2003) apresenta largura de banda a meia altura igual a 0,7 nm em $L = 2,8 \text{ mm}$.

Duas outras amostras foram gravadas com a mesma montagem experimental com o

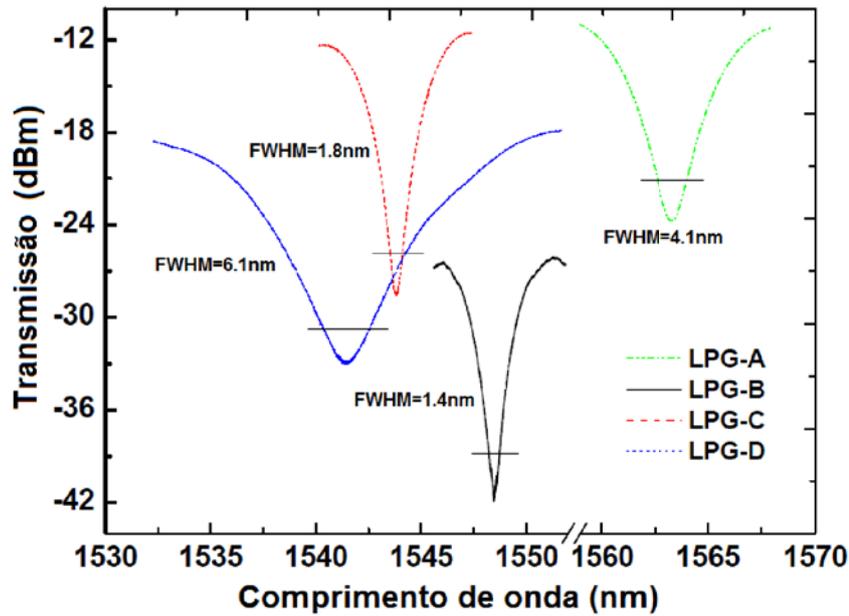


Figura 50: Espectro de transmissão das LPGs A, B, C e D. O comprimento de onda de ressonância é diferente para cada LPG, mas todos os vales na transmissão mostram a formação de redes fortes. No comprimento de onda de ressonância, a LPG-A apresenta rejeição de 14 dB, LPG-B mostra um vale de 15 dB, LPG-C alcança 17 dB e LPG-D apresenta uma rejeição de 13 dB.

Fonte: Autoria Própria.

objetivo de serem caracterizadas termicamente: a LPG-E e a LPG-F. A Figura 51, que é somente ilustrativa (não está em escala) mostra o espectro de transmissão de tais redes. O número de pontos N das duas amostras foi fixado em 20 e as LPGs possuem, respectivamente, períodos iguais a $\Lambda_E = 370 \mu\text{m}$ e $\Lambda_F = 380 \mu\text{m}$. Desta forma, as duas LPGs possuem aproximadamente o mesmo comprimento L de contato com o Peltier para serem aquecidas igualmente.

Com tais parâmetros, a LPG-E apresentou comprimento de onda de ressonância com perda máxima de -14 dB em $\lambda_E = 1551,4 \text{ nm}$. A LPG-F, por sua vez, apresentou transmissão mínima em $\lambda_F = 1548,8 \text{ nm}$ com rejeição de $-9,5 \text{ dB}$. A largura de banda a meia altura das bandas de ressonância espectrais são indicadas na Figura 51 pelos segmentos de reta e são iguais a $3,8 \text{ nm}$ e $5,4 \text{ nm}$ para as LPGs E e F, respectivamente.

A Figura 52 mostra o comportamento do comprimento de onda de ressonância da LPG-B com o aumento da tração mecânica ($\mu\epsilon$) aplicada à rede. O desvio padrão dos dados também é mostrado na Figura 52. Nota-se que o comprimento de onda de ressonância desloca-se para valores menores com o aumento da tração mecânica, implicando numa sensibilidade negativa da LPG à tração (ZHU *et al.*, 2003), (HUANG *et al.*, 2014), (KIM *et al.*, 2009a). A sensibilidade à tração das LPGs, tanto da LPG-B quanto das LPG-C e LPG-D é determinada por quatro parâmetros: os coeficientes elasto-ópticos do núcleo $\eta_{\text{núcleo}}$ e da casca η_{casca} com

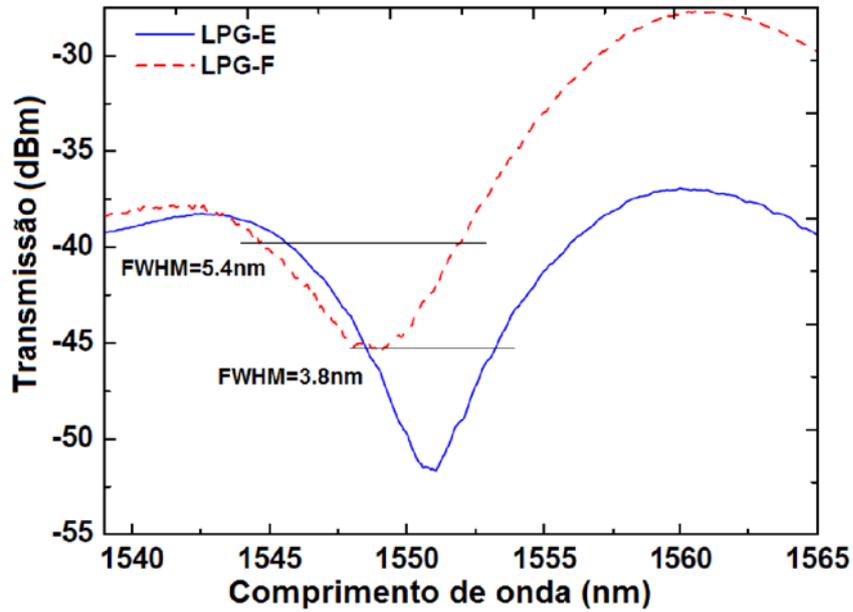


Figura 51: Espectro de transmissão das LPGs E e F.

Fonte: Autoria Própria.

a ordem do modo correspondente, o período Λ da LPG, e as propriedades do guia de onda. Uma tração mecânica axial aplicada à LPG afeta o modo fundamental do núcleo e o modo de casca da PCF porque o tamanho do guia de onda muda, de acordo com a Equação 15. Dessa forma, o índice de refração de grupo também muda (ZHAO *et al.*, 2008). Particularmente, o índice de refração de grupo do modo de casca mostra um comportamento dispersivo devido aos furos de ar existentes na casca micro-estruturada da PCF, o que contribui para o valor negativo da sensibilidade à tração calculada pela Equação 15, como mostram as curvas das Figura 52, Figura 53 e Figura 54.

A Figura 55 mostra a relação entre a variação do comprimento de onda de ressonância $\Delta\lambda$ em relação à posição inicial de pico para fins de comparação da sensibilidade das LPGs. As sensibilidades medidas das LPGs B, C e D, são, respectivamente, iguais a $-5,54 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $-4,93 \text{ pm}/\mu\epsilon$ and $-6,32 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\epsilon} = \left[\left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{núcleo}}}{d\epsilon} \right) - \left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{casca, m}}}{d\epsilon} \right) \right] \Lambda_{LPG} + (n_{\text{eff}}^{\text{núcleo}} - n_{\text{eff}}^{\text{casca, m}}) \frac{d\Lambda_{LPG}}{d\epsilon} \quad (15)$$

Apesar da LPG-A ter sido gravada no mesmo processo que as LPGs B, C e D, ela representa um caso especial. O período desta rede, fixado em $\Lambda = 350 \mu\text{m}$, apresentou forte ressonância com somente 3 marcações do laser de CO_2 , ou seja, $N = 3$ para a LPG-A. Desta

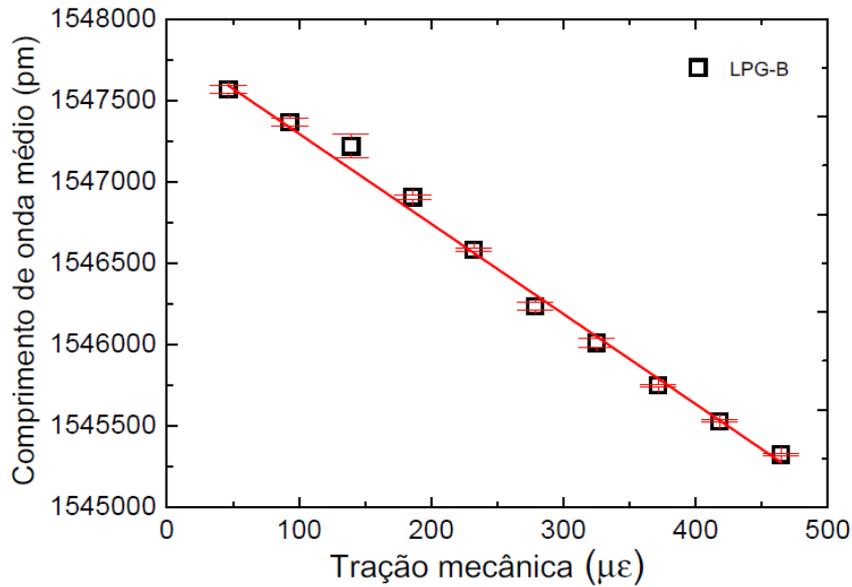


Figura 52: Comprimento de onda da LPG-B em relação à tração mecânica axial aplicada. O desvio padrão típico é de 1,3%.

Fonte: Autoria Própria.

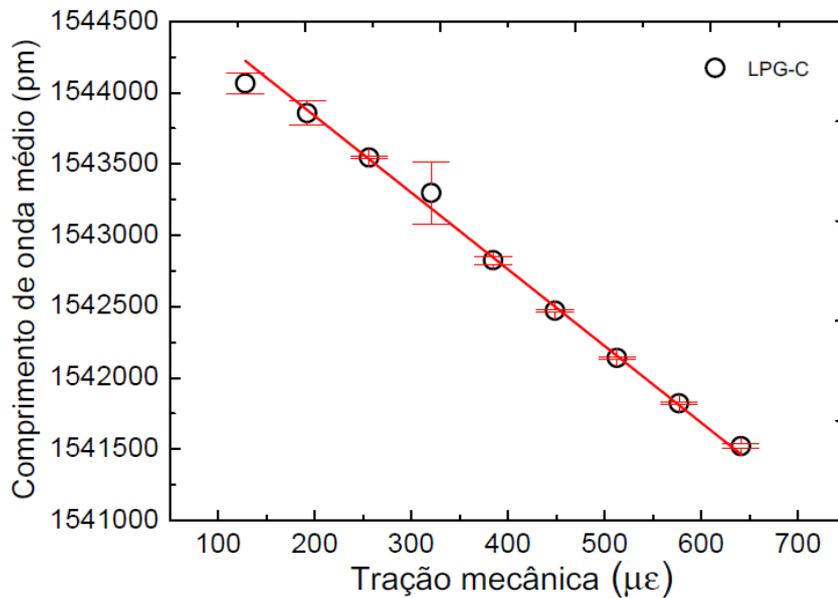


Figura 53: Comprimento de onda da LPG-C em relação à tração mecânica axial aplicada. O desvio padrão típico é de 1,2%.

Fonte: Autoria Própria.

forma, LPG-A possui um comprimento muito curto de apenas $L = 0,7$ mm. Para o cálculo do comprimento das LPGs A, B, C e D, utilizou-se a Equação 16:

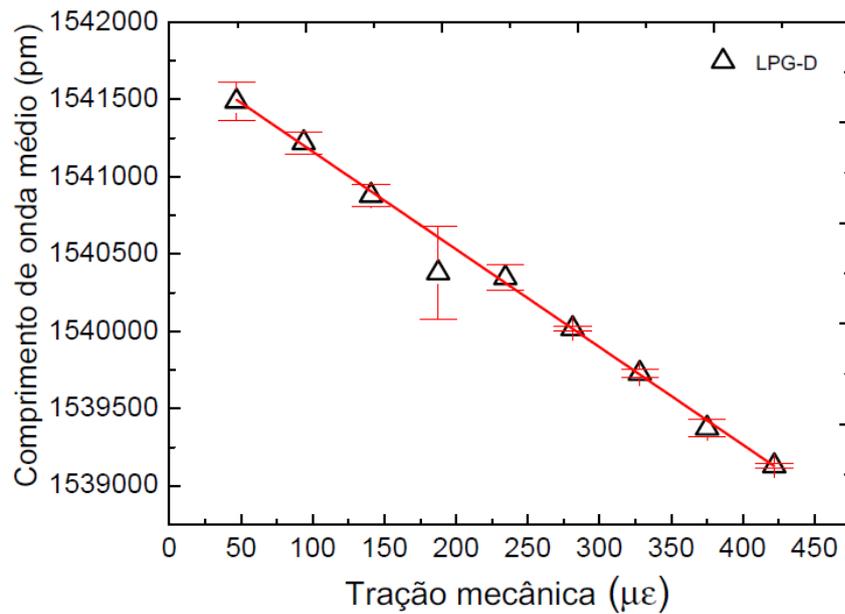


Figura 54: Comprimento de onda da LPG-D em relação à tração mecânica axial aplicada. O desvio padrão típico é de 4,1%.

Fonte: Autoria Própria.

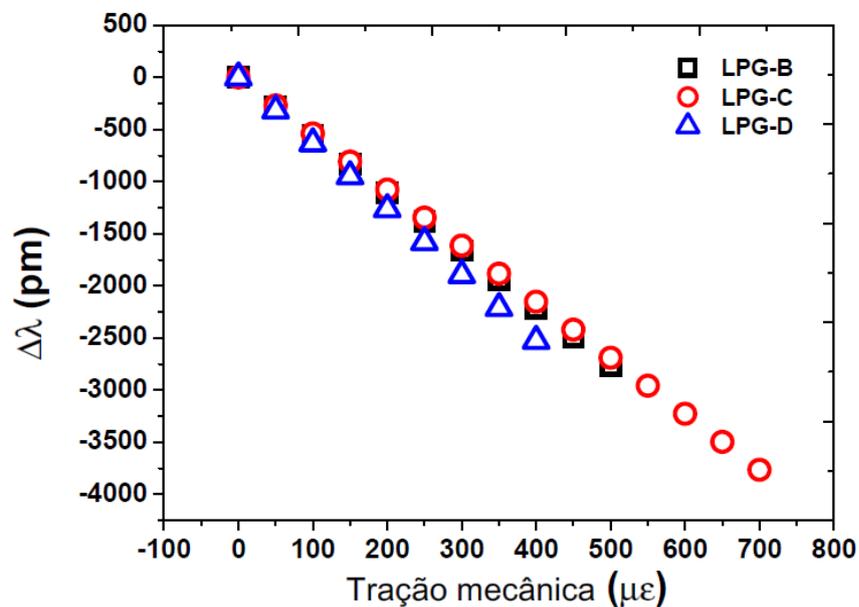


Figura 55: Variação do comprimento de onda de ressonância em relação à tração aplicada para LPG-B, LPG-C e LPG-D.

Fonte: Autoria Própria.

$$L = (N - 1) * \Lambda * 1 * 10^{-6} \quad (16)$$

em que N é o número de pontos da LPG. Como a LPG-A apresenta 3 pontos e período da rede

350 μm , $L = 0,7 \text{ mm}$. O fator 10^{-6} é utilizado para fazer a conversão do comprimento da LPG de μm para m . O comprimento da LPG-A $L = 0,0007 \text{ m}$. Esta definição é utilizada também para as demais LPGs B, C e D. O comprimento das LPGs B, C e D é calculado, respectivamente, na Equação 17, Equação 18 e Equação 19.

$$L = (N - 1) * \Lambda * 1 * 10^{-6} \Rightarrow L = (16) * 380 * 1 * 10^{-6} \Rightarrow L = 0,00608 \text{ m} \quad (17)$$

$$L = (N - 1) * \Lambda * 1 * 10^{-6} \Rightarrow L = (11) * 390 * 1 * 10^{-6} \Rightarrow L = 0,00429 \text{ m} \quad (18)$$

$$L = (N - 1) * \Lambda * 1 * 10^{-6} \Rightarrow L = (16) * 400 * 1 * 10^{-6} \Rightarrow L = 0,0064 \text{ m} \quad (19)$$

Por causa do seu pequeno comprimento, a faixa de tração mecânica axial aplicada à esta LPG foi menor do que a faixa de tração mecânica axial aplicada às LPGs B, C e D. Para a LPG-A, o tracionamento mecânico foi de 0,1 μm a 1,1 μm com passo de 0,1 μm . Para as LPGs B, C e D, o tracionamento mecânico foi de 0 μm a 3 μm com passo de 0,3 μm . O cálculo da tração mecânica em $\mu\epsilon$ foi feito segundo a Equação 20:

$$\frac{\Delta l}{L} \quad (20)$$

em que Δl refere-se ao deslocamento mecânico da LPG medido em μm e L refere-se ao comprimento total da LPG medido em m .

Para a LPG-A, a faixa de tração mecânica em $\mu\epsilon$ sofrida pela rede de período longo foi de 0 μm a 1000 μm por causa do seu pequeno comprimento, enquanto que, para as LPGs B, C e D, a tração mecânica em $\mu\epsilon$ sofrida pelas redes foi menor, de 0 μm a 500 μm , 700 μm e 450 μm respectivamente. A Figura 56 mostra a variação do comprimento de onda de ressonância da LPG-A com relação à tração mecânica aplicada. O desvio padrão calculado estatisticamente para as três repetições do teste feito com a LPG-A foi igual a 0,4%. Da melhor adequação linear do comprimento de onda em função da tração aos dados experimentais, a sensibilidade obtida da LPG-A foi igual a $-0,85 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

A caracterização quanto à variação de temperatura foi feita com as LPG-E e LPG-F, colocando-as sobre o elemento Peltier e aquecendo-as. A faixa de variação de temperatura foi

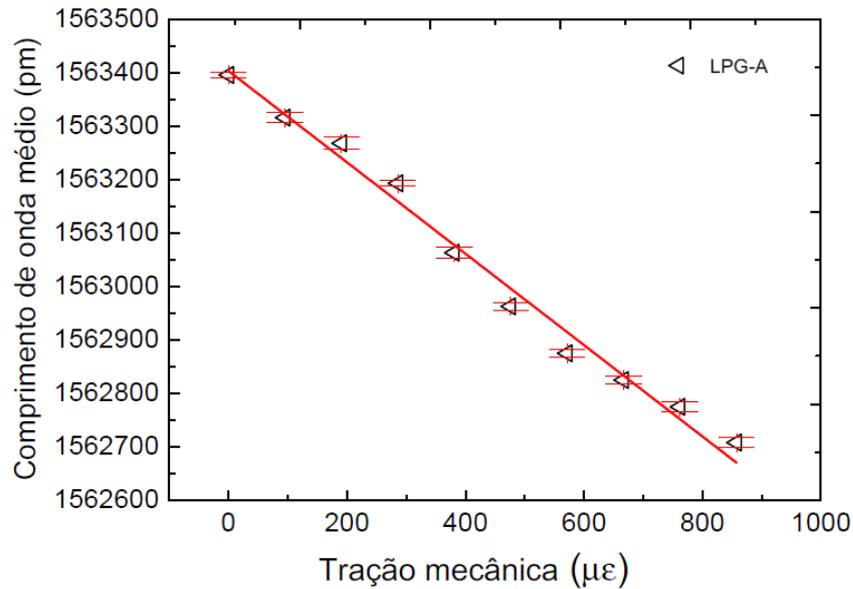


Figura 56: Comprimento de onda versus tração aplicada para a LPG-A de apenas $L = 0,7$ mm de comprimento.

Fonte: Autoria Própria.

de 0°C a 75°C com intervalos de 5°C . A temperatura ambiente foi mantida estável em 22°C . O comportamento da variação incremental do comprimento de onda de ressonância de acordo com a temperatura está plotado na Figura 57.

As curvas mostram que o comprimento de onda varia em direção a valores menores com o aumento da temperatura, indicando uma sensibilidade negativa para temperatura assim como obtido para a tração. A Equação 11 descreve este comportamento. A sensibilidade à temperatura depende dos coeficientes termo-ópticos da sílica pura do núcleo, $\xi_{\text{núcleo}} = 7,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, e da casca, ξ_{casca} , e também das propriedades do guia de onda e dos períodos das redes, afetados pelo coeficiente de expansão térmica da sílica pura $\alpha = 4,1 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$. Como no caso da sensibilidade à tração, as propriedades do guia de onda são determinantes para o comportamento positivo ou negativo da sensibilidade à temperatura. Como o índice de refração do núcleo $n_{\text{núcleo}}$ é sempre maior do que o índice de refração da casca n_{casca} , a contribuição negativa se origina do fato de que o coeficiente termo-óptico do núcleo, $\xi_{\text{núcleo}}$, é menor do que o coeficiente termo-óptico da casca, ξ_{casca} , para este tipo de fibra de cristal fotônico.

As LPGs E e F apresentaram linearidade em suas curvas de resposta à variação de temperatura dentro da faixa considerada nos testes, conforme observa-se na Figura 57. Com a melhor adequação da curva para o cálculo da sensibilidade à temperatura, LPG-E apresentou sensibilidade igual a $-19,6 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ e a LPG-F, $-18,4 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$. Pode-se notar que a inclinação da curva é maior para a LPG-E, que possui um período $\Lambda_E = 370 \mu\text{m}$ menor que a LPG-F, $\Lambda_F =$

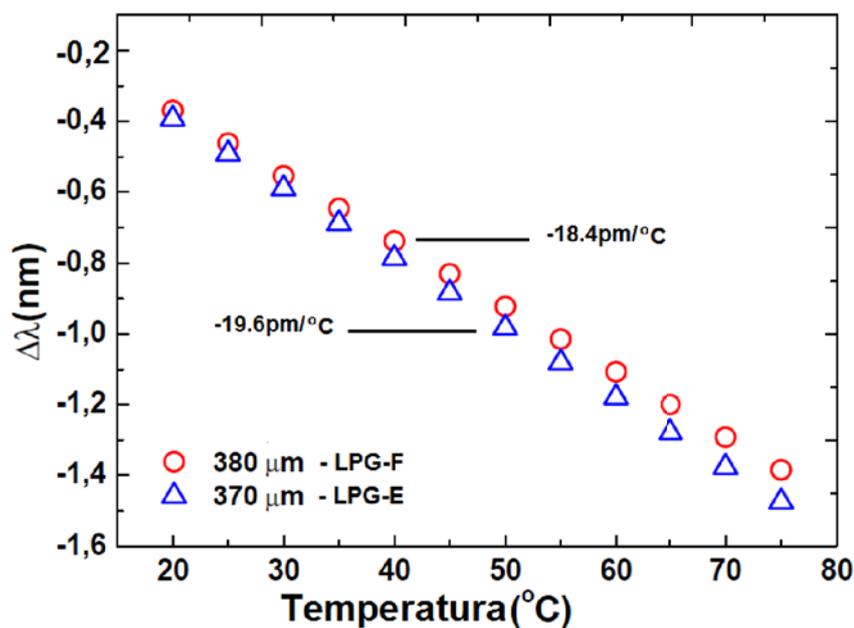


Figura 57: Variações dos comprimentos de onda das LPG-E e LPG-F medidos com relação à variação de temperatura para redes de diferentes períodos.

Fonte: Autoria Própria.

380 μm . Shu *et al* (SHU *et al.*, 2001) demonstraram em seu trabalho redes de período longo com períodos Λ entre 240 μm e 500 μm , cujas sensibilidades à temperatura também são maiores para as redes com menores períodos. As medidas feitas com as LPG-E e LPG-F foram realizadas três vezes em cada rede gravada com o objetivo de aumentar a confiabilidade estatística dos resultados encontrados.

7 CONCLUSÃO

Demonstrou-se neste trabalho a gravação de redes de Bragg em PCFs multi-anéis utilizando o laser excímero em 248 nm. Gravar redes em PCFs apresenta dificuldades como o forte espalhamento do feixe UV nas microestruturas da fibra. Quanto mais anéis, maior o espalhamento da luz (BEUGIN *et al.*, 2006). À medida que a energia do laser aumenta, o espalhamento do feixe UV nas microestruturas também aumenta, o que resulta em redes fracas, ou seja, com refletividades baixas. Mantendo esta energia abaixo do ponto de maior espalhamento da luz, a dinâmica do crescimento da FBG segue um padrão monotônico e apresenta um comportamento típico de uma rede tipo I. Neste caso, aumentando-se ainda mais a fluência acumulada, a refletividade da FBG atingiu um valor máximo e a modulação do índice de refração do núcleo saturou.

A gravação de redes de Bragg em fibras de cristal fotônico apresentou particularidades quando comparada à gravação em fibras SMF. Observou-se que, para potências mais altas do laser, as redes crescem de forma irregular devido ao maior espalhamento da luz nos anéis de furos da casca da PCF. A intensidade de pico de reflexão de Bragg da rede gravada na PCF também deve ser levada em conta, pois apresenta valores menores que a amplitude das redes gravadas em SMF, mesmo com a utilização de níveis de energia mais altos do excímero durante a gravação. Ressalta-se que a concentração de Ge ou P no núcleo da PCF também influencia na gravação das FBGs, aumentando a fotossensibilidade das fibras como menciona Groothoff *et al.* (2003). A rede de Bragg não apresentou ponto de saturação para seu comprimento de onda com a aplicação de 450.000 pulsos, abrindo a possibilidade de testes posteriores de saturação de potência e λ_B da rede com a elevação da fluência acumulada.

As amostras FBG-X, FBG-Y1 e FBG-Y2 mostraram um deslocamento monotônico e positivo do λ_B de acordo com o aumento da fluência acumulada. O espalhamento da luz nos furos da casca da PCF é menor, já que as redes foram gravadas com níveis de energia menores: 7,5 mJ; 6,0 mJ e 6,0 mJ, respectivamente. Ressalta-se que, para as amostras FBG-X e FBG-W, o total de pulsos do laser foi 100.000 (20 rajadas de 5.000 pulsos), e para a amostra FBG-Y1, foi de 400.000 (80 rajadas de 5.000 pulsos). Isso justifica o nível mais elevado de

fluência para a amostra FBG-Y1. O coeficiente de variação médio do índice de refração para as amostras FBG-X, FBG-Y1 e FBG-Y2 foram $\Delta n_{\text{eff}} = 3,41763 \times 10^{-5}$, $\Delta n_{\text{eff}} = 6,00283 \times 10^{-5}$ e $\Delta n_{\text{eff}} = 6,77906 \times 10^{-6}$, respectivamente.

A amostra FBG-W, iluminada com energia igual a 8,5 mJ, apresentou λ_B e amplitude da rede irregulares com o aumento da fluência acumulada. O λ_B deslocou-se para valores maiores, mas apresentou pontos em que deslocou-se para a esquerda, ou seja, diminuiu. Quanto à intensidade de pico de reflexão, observou-se a mesma irregularidade: o aumento da fluência nem sempre aumentou a amplitude da rede; em alguns pontos, ela diminuiu. Isto pode ocorrer por causa de um maior grau de espalhamento da luz nos furos de ar da casca da PCF. Como a potência é maior, a irregularidade se acentuou, causando variações para mais e para menos tanto em λ_B quanto na amplitude da rede gravada (KNIGHT *et al.*, 1998a). O coeficiente de variação médio do índice de refração da amostra FBG-W foi $\Delta n_{\text{eff}} = 2,15042 \times 10^{-5}$, valor compatível com os já encontrados para experimentos similares (VENGSARKAR *et al.*, 1996c), (VENGSARKAR *et al.*, 1996b).

A última amostra, FBG-Y2, constituiu-se da continuação da aplicação de rajadas na mesma amostra FBG-Y1. Como o λ_B mostrava ainda um deslocamento para valores maiores com o aumento da fluência, optou-se por continuar a aplicação de pulsos para observar o comportamento da rede. Partindo dos 400.000 pulsos já aplicados na amostra FBG-Y1, foram aplicadas mais 5 rajadas de 10.000 pulsos, resultando em 450.000 pulsos. Notou-se pela Figura 33, que o λ_B aumentou até a fluência acumulada atingir um valor $\approx 500.000 \frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}$. Após este ponto de saturação o comprimento de onda de Bragg começou a diminuir. Este comportamento requer investigações posteriores como, por exemplo, valores ainda maiores de fluência acumulada, para verificar a possibilidade de formação de redes de Bragg tipo IIa em PCF, como relatado em (MARTELLI *et al.*, 2010). Para uma fibra com alta concentração de germânio na região fotossensitível, a formação de redes tipo IIa é certa de acordo com (COOK *et al.*, 2008a), (COOK *et al.*, 2009). Entretanto, devem ser tomadas medidas para que o espalhamento da luz não prejudique a gravação das FBGs.

Com o aperfeiçoamento da técnica de emenda entre a LMA-10 e a SMF, as perdas de inserção diminuiriam consideravelmente, caindo de 15 dB para ≈ 1 dB, possibilitando uma maior facilidade de trabalho e manuseio das fibras micro-estruturadas NKT Photonics e LMA-10.

Durante a realização do trabalho observou-se que, para a gravação de LPGs em fibras ópticas micro-estruturadas, vários fatores devem ser levados em consideração como, por exemplo, a periodicidade da rede, o tempo de exposição ao feixe do laser, a potência de incidência do feixe IR, a rotação da fibra durante o processo de gravação, entre outros. Porém,

o tempo de exposição da fibra ao feixe do laser e a periodicidade da rede são os fatores que mais influenciam em sua formação. As LPGs apresentaram sensibilidades negativas com relação à tração, resultado considerado consistente com valores apresentados na literatura para LPGs gravadas em PCFs de núcleo sólido (ZHU *et al.*, 2003), (HUANG *et al.*, 2014), (KIM *et al.*, 2009a).

Uma comparação com resultados disponíveis na literatura mostra, por exemplo, que a sensibilidade da LPG-D à tração é, aproximadamente, 7 vezes maior do que a reportada por Kim *et al* (KIM *et al.*, 2009a) ($-0,992\text{pm}/\mu\epsilon$), ≈ 8 vezes maior do que a observada em um interferômetro modal desenvolvido por Villatoro *et al* (VILLATORO *et al.*, 2007) ($-0,81\text{pm}/\mu\epsilon$), e aproximadamente 2,5 vezes maior do que a relatada por Shu *et al* (SHU *et al.*, 2001) ($-2,8\text{pm}/\mu\epsilon$), interferômetro feito de um trecho de fibra de cristal fotônico com suas extremidades emendadas a fibras padrão.

A LPG-A, cujo comprimento é de apenas $L = 0,7\text{mm}$, apresentou FWHM igual a $4,1\text{nm}$. Para fins de comparação, a LPG fabricada por Zhu *et al* (ZHU *et al.*, 2003) apresenta largura de banda a meia altura igual a $0,7\text{nm}$ em $L = 2,8\text{mm}$ com pico de atenuação de 14dB . A LPG-A é 4 vezes menor que a LPG apresentada por (ZHU *et al.*, 2003) e pode ser aplicada como sensores em telecomunicações com as vantagens da (1) estabilidade à temperatura, (2) o tamanho compacto quando encapsulada, e (3) possibilita dispositivos como filtros baseados em PCFs práticos e de baixo custo, e outros dispositivos baseados em PCF. Os testes de temperatura mostraram que as LPG-E e LPG-F apresentaram resultados coerentes com dados disponíveis também na literatura. A LPG-E, por exemplo, apresenta sensibilidade à temperatura similar ($-19,6\text{pm}/^\circ\text{C}$) à encontrada por Kim *et al.* (KIM *et al.*, 2009a) em sua rede de período longo gravada em PCF de sílica pura também com laser de CO_2 .

Este trabalho, patrocinado pela CAPES e fazendo parte do Projeto e Aplicação de Fibras Ópticas Micro-estruturadas como Material Estratégico para Sensores Avançados e Telecomunicações (Capes - Pro Defesa), desde o início contou com a colaboração da UNICAMP e do IeAV para a sua realização. Sabemos das limitações de nossas estruturas no que se refere a materiais, equipamentos e, até mesmo, alunos, sejam eles estagiários, graduandos ou pós-graduandos, que manuseiem com conhecimento e responsabilidade tais peças. O conhecimento a fundo de um assunto, em si, não traz resultados em tais circunstâncias. É preciso colocar à prova a disponibilidade dos pesquisadores do grupo, agregar o conhecimento de todos e, principalmente, a vontade de vencer barreiras. Assim este trabalho foi construído.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Com relação à gravação às redes de Bragg na fibra NKT de 12 anéis, investigações posteriores com valores maiores de fluência acumulada maiores que $\geq 500.000 \frac{mJ}{cm^2}$ podem apontar a possibilidade de formação de redes de Bragg tipo IIa em PCFs.

Gravações de LPGs em fibras micro-estruturadas para a observação do fenômeno acoplamento reverso.

7.2 TRABALHOS PUBLICADOS

(CHAVES *et al.*, 2012) CHAVES, R. C. et al. Writing of Bragg and long period gratings in many-layered photonic crystal fibers. In: MOMAG. 15^oSBMO: Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica. 10^oCBMag: Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. [S.l.: s.n.], 2012.

CHAVES, R. C. et al. Writing of long period grating in large mode area photonic crystal fiber using CO₂ laser. In: MOMAG. 16^oSBMO: Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica. 11^oCBMag: Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. [S.l.: s.n.], 2014.

CHAVES, R. C. et al. Strain and temperature characterization of long period gratings written by CO₂ laser in pure silica large mode area photonic crystal fiber. **Photonics Sensors**, p.1-10, 2015.

REFERÊNCIAS

- ATKINS, R. M.; MIZRAHI, V.; ERDOGAN, T. 248 nm induced vacuum uv spectral changes in optical fibre preform cores: support for a colour centre model of photosensitivity. **Electronics Letters**, v. 29, n. 4, p. 385–387, 1993.
- BERENGER, J.-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. **Journal of Computational Physics**, v. 114, n. 2, p. 185–200, 1994.
- BEUGIN, V. *et al.* Efficient bragg gratings in phosphosilicate and germanosilicate photonic crystal fiber. **Applied Optics**, Optical Society of America, v. 45, n. 32, p. 8186–8193, 2006.
- BIRKS, T.; KNIGHT, J. C.; RUSSELL, P. S. J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. **Optics Letters**, v. 22, n. 13, p. 961–3, jul. 1997.
- BJARKLEV, A.; BROENG, J.; BJARKLEV, A. S. **Photonic crystal fibres**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- BORRELLI, N. F. *et al.* Densification of fused silica under 193-nm excitation. **Journal of the Optical Society of America**, v. 14, n. 7, p. 1606–1615, 1997.
- BORRELLI, N. F.; SMITH, C. M.; ALLAN, D. C. Excimer-laser-induced densification in binary silica glasses. **Optics Letters**, v. 24, n. 20, p. 1401–1403, 1999.
- CANNING, J. Gratings and grating devices in structured fibres using 193nm from an arf laser. **Lightwave**, p. 18–20, 2007.
- CANNING, J.; CARTER, A. L. G. Modal interferometer for in situ measurements of induced core index change in optical fibers. **Optics Letters**, v. 22, n. 8, p. 561–563, 1997.
- CANNING, J. *et al.* Gratings in structured optical fibres. **Laser Chemistry**, v. 2008, p. 1–19, 2008.
- CHAVES, R. C. *et al.* Writing of bragg and long period gratings in many-layered photonic crystal fibers. In: **MOMAG. 15^oSBMO: Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica. 10^oCBMag: Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo**. [S.l.: s.n.], 2012.
- CHOI, H. Y.; KIM, M. J.; LEE, B. H. All-fiber mach-zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber. **Optics Express**, v. 15, n. 9, p. 5711–20, abr. 2007.
- COELHO, J. M. P. *et al.* Modeling refractive index change in writing long-period fiber gratings using mid-infrared laser radiation. **Photonic Sensors**, v. 3, n. 1, p. 67–73, 2013.
- COOK, K. *et al.* Bragg grating writing in photonic crystal fibres. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **SPIE Europe Optics & Optoelectronics**. [S.l.], 2009. p. 73570H–73570H.

COOK, K.; POHL, A.; CANNING, J. Positive and negative index gratings in 10-ring photonic crystal fibres with germanosilicate cores using 193nm. **OECC/ACOFT 2008 - Joint Conference of the Opto-Electronics and Communications Conference and the Australian Conference on Optical Fibre Technology**, v. 2, p. 1–2, jul. 2008.

COOK, K.; POHL, A. A. P.; CANNING, J. High-temperature type iia gratings in 12-ring photonic crystal fibre with germanosilicate core. **Journal of the European Optical Society-Rapid Publications**, v. 3, 2008.

CORDEIRO, C. M. B. *et al.* Lateral access to the holes of photonic crystal fibers-selective filling and sensing applications. **Optics Express**, v. 14, n. 18, p. 8403–8412, 2006.

CUSANO, A.; PALADINO, D.; IADICICCO, A. Microstructured fiber bragg gratings. **Journal of Lightwave Technology**, v. 27, n. 11, p. 1663–1697, 2009.

EGGLETON, B. J. *et al.* Cladding-mode-resonances in air-silica microstructure optical fibers. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 18, n. 8, p. 1084–1100, 2000.

EGGLETON, B. J. *et al.* Grating resonances in air-silica microstructured optical fibers. **Optics Letters**, v. 24, n. 21, p. 1460–2, nov. 1999.

EIJKELENBORG, M. van *et al.* Microstructured polymer optical fibre. **Optics Express**, v. 9, n. 7, p. 319–327, 2001.

ERDOGAN, T. Fiber grating spectra. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1277–1294, 1997.

FATOME, J. *et al.* Linear and nonlinear characterizations of chalcogenide photonic crystal fibers. **Journal of Lightwave Technology**, v. 27, n. 11, p. 1707–1715, 2009.

FU, L. B. *et al.* Femtosecond laser writing bragg gratings in pure silica photonic crystal fibres. **Electronics Letters**, v. 41, n. 11, p. 10–11, 2005.

GEERNAERT, T. *et al.* Fiber bragg gratings in germanium-doped highly birefringent microstructured optical fibers. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 20, n. 8, p. 554–556, abr. 2008.

GRELLIER, A. J. C.; ZAYER, N. K.; PANNELL, C. N. Heat transfer modelling in co2 laser processing of optical fibres. **Optics Communications**, v. 152, n. 4, p. 324–328, 1998.

GROOTHOFF, N. *et al.* Bragg gratings in air-silica structured fibers. **Optics Letters**, v. 28, n. 4, p. 233–5, fev. 2003.

GROOTHOFF, N. *et al.* Gratings in large diameter air-clad optical fibre using a femtosecond laser. **Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling, Quebec City, Canada**, p. 2–6, 2007.

GRUBSKY, V.; FEINBERG, J. Rewritable densification gratings in boron-doped fibers. **Optics Letters**, v. 30, n. 11, p. 1279–1281, 2005.

HILL, K. O. *et al.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. **Applied Physics Letters**, v. 32, p. 647, 1978.

HILL, K. O. *et al.* Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings. **Electronics Letters**, v. 26, n. 16, p. 1270–1272, 1990.

- HILL, K. O. K. O.; MELTZ, G. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1263–1276, 1997.
- HOLDSWORTH, J. *et al.* Transversely illuminating the core of photonic crystal fibre. **OECC/ACOFT 2008 - Joint Conference of the Opto-Electronics and Communications Conference and the Australian Conference on Optical Fibre Technology**, p. 1–2, jul. 2008.
- HOO, Y. L. *et al.* Numerical study of refractive index sensing based on the anti-guide property of a depressed-index core photonic crystal fiber. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 136, n. 1, p. 26–31, 2009.
- HUANG, Q. *et al.* Refractive index and strain sensitivities of a long period fiber grating. **Photonic Sensors**, v. 4, n. 1, p. 92–96, 2014.
- HUY, M. C. P. *et al.* Fibre bragg grating photowriting in microstructured optical fibres for refractive index measurement. **Measurement Science and Technology**, v. 17, n. 5, p. 992, 2006.
- JR., S. A. C. Recent progress and novel applications of photonic crystal fibers. **Reports on Progress in Physics**, v. 73, n. 2, p. 024401, 2010.
- KAKARANTZAS, G.; BIRKS, T. a.; RUSSELL, P. S. J. Structural long-period gratings in photonic crystal fibers. **Optics Letters**, v. 27, n. 12, p. 1013–5, jun. 2002.
- KAKARANTZAS, G. *et al.* Miniature all-fiber devices based on co2 laser microstructuring of tapered fibers. **Optics Letters**, v. 26, n. 15, p. 1137–9, ago. 2001.
- KASHYAP, R. **Fiber bragg gratings**. [S.l.]: Academic Press, 1999.
- KATSUYAMA, Y.; KOYAMA, O. Long-period fiber grating with multi resonant wavelengths fabricated by a co2 laser for distributed sensing. p. 6–10, 2011.
- KIM, B. H. *et al.* Effect of co2 laser irradiation on the refractive-index change in optical fibers. **Applied Optics**, v. 41, n. 19, p. 3809–3815, 2002.
- KIM, B. H. *et al.* Residual stress relaxation in the core of optical fiber by co2 laser irradiation. **Optics Letters**, v. 26, n. 21, p. 1657–1659, 2001.
- KIM, C.-S. *et al.* Induction of the refractive index change in b-doped optical fibers through relaxation of the mechanical stress. **Optics Communications**, v. 185, n. 4, p. 337–342, 2000.
- KIM, G. *et al.* Strain and temperature sensitivities of an elliptical hollow-core photonic bandgap fiber based on sagnac interferometer. **Optics Express**, v. 17, n. 4, p. 2481–2486, 2009.
- KIM, H.; MAENG, W. J. *et al.* Applications of atomic layer deposition to nanofabrication and emerging nanodevices. **Thin Solid Films**, v. 517, n. 8, p. 2563–2580, 2009.
- KNIGHT, J. C. *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. **Optics Letters**, v. 21, n. 19, p. 1547–1549, 1996.
- KNIGHT, J. C. *et al.* Properties of photonic crystal fiber and the effective index model. **Journal of the Optical Society of America**, v. 15, n. 3, p. 748, 1998.

- KNIGHT, J. C. C. *et al.* Large mode area photonic crystal fibre. **Electronics Letters**, v. 34, n. 13, p. 1347, 1998.
- KONDO, Y. *et al.* Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses. **Optics Letters**, Optical Society of America, v. 24, n. 10, p. 646–648, 1999.
- KUMAR, V. *et al.* Extruded soft glass photonic crystal fiber for ultrabroad supercontinuum generation. **Optics Express**, v. 10, n. 25, p. 1520–1525, 2002.
- LARGE, M. C. J. *et al.* Microstructured polymer optical fibres: new opportunities and challenges. **Molecular Crystals and Liquid Crystals**, v. 466, p. 219–231, 2006.
- LI, Y. *et al.* Measurement of co2 laser irradiation induced refractive index modulation in single-mode fiber toward long-period fiber grating design and fabrication. **Applied Optics**, v. 47, n. 29, p. 5296–5304, 2008.
- LIM, J. H. *et al.* Mach-zehnder interferometer formed in a photonic crystal fiber based on a pair of long-period fiber gratings. **Optics Letters**, v. 29, n. 4, p. 346–8, fev. 2004.
- LIU, Y. *et al.* Glass structure changes in co2 laser writing of long-period fiber gratings in boron-doped single-mode fibers. **Journal of Lightwave Technology**, v. 27, n. 7, p. 857–863, 2009.
- MARTELLI, C.; OLIVEIRA, V.; KALINOWSKI, H. J. Redes de bragg em fibras Ópticas de cristal fotônico. In: MOMAG: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROONDAS E OPTOELETRÔNICA E 9. CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO. [S.l.], 2010. p. 306–309.
- MORISHITA, K.; KAINO, A. Adjusting resonance wavelengths of long-period fiber gratings by the glass-structure change. **Applied Optics**, v. 44, n. 24, p. 5018–5023, 2005.
- MORISHITA, K.; MIYAKE, Y. Fabrication and resonance wavelengths of long-period gratings written in a pure-silica photonic crystal fiber by the glass structure change. **Journal of Lightwave Technology**, v. 22, n. 2, p. 625–630, fev. 2004.
- MOSK, A. P.; VELLEKOOP, I. M. Focusing of light by disordered metamaterials. In: IEEE. **Lasers and Electro-Optics, 2007 and the International Quantum Electronics Conference. CLEOE-IQEC 2007. European Conference on**. [S.l.], 2007. p. 1–1.
- NAKAJIMA, K. *et al.* Hole-assisted fiber design for small bending and splice losses. **Photonics Technology Letters, IEEE**, v. 15, n. 12, p. 1737–1739, 2003.
- NIELSEN, M. D. *et al.* Investigation of microdeformation-induced attenuation spectra in a photonic crystal fiber. **Optics Letters**, v. 28, n. 4, p. 236–238, 2003.
- OTHONOS, A. *et al.* Fibre bragg gratings. In: VENGHAUS, H. (Ed.). [S.l.]: Springer Berlin / Heidelberg, 2006, (Springer Series in Optical Sciences, v. 123). p. 189–269.
- PIAO, F.; OLDHAM, W. G.; HALLER, E. E. The mechanism of radiation-induced compaction in vitreous silica. **Journal of non-crystalline solids**, v. 276, n. 1, p. 61–71, 2000.

- POHL, A. A.; COOK, K.; CANNING, J. 193nm bragg grating writing in h2 loaded many-layered pcf. In: IEEE. **Opto-Electronics and Communications Conference, 2008 and the 2008 Australian Conference on Optical Fibre Technology. OECC/ACOFT 2008. Joint conference of the.** [S.l.], 2008. p. 1–2.
- POTTAGE, J. *et al.* Robust photonic band gaps for hollow core guidance in pcf made from high index glass. **Optics Express**, v. 11, n. 22, p. 2854–2861, 2003.
- RAO, Y.-J. *et al.* Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency co2 laser pulses. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 21, n. 5, p. 1320–1327, 2003.
- RUSSELL, P. S. J. Photonic-crystal fibers. **Journal of Lightwave Technology**, v. 24, n. 12, p. 4729–4749, dez. 2006.
- RUSSELL, P. S. J.; BIRKS, T. A.; KNIGHT, J. C. **Photonic Crystal Fibres.** [S.l.]: Patent Application Publication, 2004.
- SHEET, D. **NL-1550-POS-1.** 2012. Data Sheet.
- SHU, X. *et al.* High-temperature sensitivity of long-period gratings in b-ge codoped fiber. **Photonics Technology Letters, IEEE**, v. 13, n. 8, p. 818–820, 2001.
- SHU, X.; ZHANG, L.; BENNION, I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings. **Journal of Lightwave Technology**, v. 20, n. 2, p. 255, 2002.
- SMELSER, C. W. Ultrafast infrared laser fabrication of fibre bragg gratings with a phase mask. **Electronics Letters**, v. 43, n. 16, 2007.
- SORENSEN, H. R. *et al.* Practical hydrogen loading of air silica fibres. **Poling and Photosensitivity Bragg Gratings**, p. 247–249, 2005.
- STEINVURZEL, P. *et al.* Long period grating resonances in photonic bandgap fiber. **Optics Express**, v. 14, n. 7, p. 3007–14, abr. 2006.
- SU, L.; CHIANG, K. S.; LU, C. Co2 laser-induced long-period gratings in graded-index multimode fibers for sensor applications. **Photonics Technology Letters, IEEE**, v. 18, n. 1, p. 190–192, 2006.
- SUO, R. *et al.* Fiber bragg gratings inscribed using 800nm femtosecond laser and a phase mask in single- and multi-core mid-ir glass fibers. **Strain**, v. 17, n. 9, p. 504–509, abr. 2008.
- VASIL, S. A. *et al.* Fibre gratings and their applications. **Quantum Electronics**, v. 35, n. 12, p. 1085–1103, 2005.
- VENGSAKAR, A. M. *et al.* Long-period fiber-grating-based gain equalizers. **Optics Letters**, v. 21, n. 5, p. 336–338, 1996.
- VENGSAKAR, A. M. *et al.* Long period fiber gratings as band-rejection filters. v. 14, n. 1, p. 58–65, 1996.
- VENGSAKAR, A. M. *et al.* Long-period fiber gratings as band-rejection filters. **Journal of Lightwave Technology**, v. 14, n. 1, p. 58–65, 1996.

VILLATORO, J. *et al.* Temperature-insensitive photonic crystal fiber interferometer for absolute strain sensing. **Applied Physics Letters**, v. 91, n. 9, p. 091109–091109, 2007.

WANG, Y. Review of long period fiber gratings written by co2 laser. **Journal of Applied Physics**, v. 108, n. 8, p. 081101, 2010.

WANG, Y. *et al.* Long period gratings in air-core photonic bandgap fibers. **Optics Express**, v. 16, n. 4, p. 2784–90, fev. 2008.

WANG, Y.; JIN, W.; WANG, D. Unique temperature sensing characteristics of co2-laser-notched long-period fiber gratings. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 47, n. 10, p. 1044–1048, out. 2009.

WANG, Y. *et al.* Long period fiber gratings written in photonic crystal fibers by use of co2 laser. **Photonic Sensors**, v. 3, n. 3, p. 193–201, 2013.

WANG, Y. *et al.* Asymmetric long period fiber gratings fabricated by use of co2 laser to carve periodic grooves on the optical fiber. **Applied Physics Letters**, v. 89, n. 15, p. 1–3, 2006.

WANG, Y. *et al.* In-fiber polarizer based on a long-period fiber grating written on photonic crystal fiber. **Optics Letters**, v. 32, n. 9, p. 1035–7, maio 2007.

WANG, Y.-P. *et al.* Asymmetric long period fiber gratings fabricated by use of co2 laser to carve periodic grooves on the optical fiber. **Applied Physics Letters**, v. 89, n. 15, p. 151105, 2006.

WANG, Y.-P. *et al.* Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity. **Optics Letters**, v. 31, n. 23, p. 3414–6, dez. 2006.

WANG, Z.; CHIANG, K. S.; LIU, Q. Microwave photonic filter based on circulating a cladding mode in a fiber ring resonator. **Optics Letters**, v. 35, n. 5, p. 769–771, 2010.

XIAO, L. *et al.* Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: Microhole collapse effect. **Journal of Lightwave Technology**, v. 25, n. 11, p. 3563–3574, nov. 2007.

XIAO, L.; JIN, W.; DEMOKAN, M. S. Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by repeated arc discharges. **Optics Letters**, v. 32, n. 2, p. 115–7, jan. 2007.

XUAN, H.; JIN, W.; ZHANG, M. Co2 laser induced long period gratings in optical microfibers. **Optics Express**, v. 17, n. 24, p. 21882–21890, 2009.

ZHANG, L. *et al.* Design and realization of long-period grating devices in conventional and high birefringence fibers and their novel applications as fiber-optic load sensors. **Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of**, v. 5, n. 5, p. 1373–1378, 1999.

ZHAO, C.-L. *et al.* Strain and temperature characteristics of a long-period grating written in a photonic crystal fiber and its application as a temperature-insensitive strain sensor. **Journal of Lightwave Technology**, v. 26, n. 2, p. 220–227, 2008.

ZHU, Y. *et al.* Strain-insensitive and high-temperature long-period gratings inscribed in photonic crystal fiber. **Optics Letters**, v. 30, n. 4, p. 367–9, fev. 2005.

ZHU, Y. *et al.* Deep-notch, ultracompact long-period grating in a large-mode-area photonic crystal fiber. **Optics Letters**, v. 28, n. 24, p. 2467–9, dez. 2003.

ZOLLA, F. *et al.* **Foundations of Photonic Crystal Fibres**. London: Imperial College Press, 2005. 343 p.