

# Relatório Escrita Direta com Laser Femtossegundo e Caracterização Técnicas Laboratoriais Avançadas II

Diana Faria Capela (201306290)

24 de maio de 2018

## Resumo

Neste trabalho experimental foi feita a caracterização de cinco guias de onda distintos, tendo para isso sido determinadas as perdas de propagação, as perdas de acoplamento e a eficiência de acoplamento, referentes a cada um deles. O menor valor relativo às perdas totais foi de 1.67 dB, correspondente ao terceiro guia em estudo e o guia com menor valor de perdas de acoplamento foi o quarto, apresentando este um valor de  $\alpha_{ac} = 0.034 \text{ dB}$ , correspondente a uma eficiência de acoplamento de  $\eta = 0.992$ . Relativamente às perdas de propagação, o primeiro guia foi o que teve melhores resultados, com perdas de  $\alpha_{prop} = 0.224 \text{ dB}$ .

Na segunda parte do trabalho, foi fabricada uma rede de período longo com recurso a uma técnica de escrita direta, ponto a ponto, com um laser femtossegundo.

## 1 Introdução Teórica

A escrita direta com um laser femtossegundo num material transparente é uma tecnologia muito relevante e versátil que permite a fabricação de diversos dispositivos tais como guias de onda, acopladores e gratings. Esta técnica foi demonstrada, pela primeira vez, em 1994 e desde então tem sofrido uma constante evolução.

As redes de período longo são um dos dispositivos que podem ser fabricados com recurso à escrita direta com o laser femtossegundo e que podem ser utilizados como sensores, ou em comunicações óticas.

### 1.1 Redes de período longo, LPG

As redes de fibras óticas modulam periodicamente o índice de refração do núcleo da fibra. No caso das redes de período longo, LPG, trata-se de redes cujo período é da ordem da centena de milímetro e que são altamente sensíveis à temperatura (devido à expansão térmica da sílica) e a alterações do índice de refração efetivo dos modos da bainha, ou seja, a alterações do acoplamento da luz do modo guiado no núcleo para os modos da bainha co-propagantes. Durante este processo, ocorre perda de potência luminosa do espectro, devida a fenómenos de absorção e de difração. Como o acoplamento do modo guiado dá-se em função do comprimento de onda, este processo resulta na perda de uma parte específica do espectro. Desta forma, o espectro de transmissão apresenta “vales” de atenuação centrados em determinados comprimentos de onda  $\lambda_i$ , que são condicionados por três parâmetros: temperatura, tração e índice de refração do meio externo (Figura 1):



Figura 1: Mecanismo de operação de uma LPG [5].

Os comprimentos de onda aos quais a luz é acoplada do núcleo para os modos da bainha, são dados

pela Equação 1:

$$\lambda_i = (n_{\text{núcleo}} - n_{\text{effbaínha}_i}) \Lambda \quad (1)$$

onde  $\lambda_i$  é o comprimento de onda da luz que é acoplado ao modo da baínha linearmente polarizado ( $LP_{0i}$ ) com  $i=1,2,3,\dots$ ;  $n_{\text{núcleo}}$  é o índice de refração do modo que se propaga no núcleo da fibra ótica,  $n_{\text{effbaínha}_i}$  é o índice de refração efetivo do modo  $LP_{0i}$  da baínha e  $\Lambda$  é o período da LPG.

Desta forma, o mecanismo de operação deste tipo de redes baseia-se na modulação dos índices de refração efetivos do modo do núcleo e dos modos da baínha e na periodicidade da rede [4].

## 1.2 Fabricação de LPG usando Escrita Direta com Laser Femtossegundo

O princípio de funcionamento desta técnica de escrita direta com laser femtossegundo baseia-se numa fibra ótica, colocada numa carruagem de translação, cujo núcleo é exposto durante um tempo fixo, a um feixe laser bem focado, que origina uma alteração permanente do seu índice de refração. Uma vez que a intensidade do feixe é muito alta, na “bulk” onde é focado o feixe ocorre absorção de inúmeros fótons e a formação de microplasma que solidifica rapidamente e que provoca uma alteração estrutural e do índice de refração.

Existem alguns parâmetros que devem ser tidos em conta:

- Comprimento de onda: o limiar de dano varia com o comprimento de onda;
- Abertura numérica: determina a área focal (quanto maior for a abertura numérica, maior é o foco e menor é a divergência);
- Intensidade do impulso: a energia mínima necessária para ocorrer absorção não linear é a energia limiar de dano. Consoante a intensidade do pulso, o material pode tornar-se birrefringente, dando-se alterações dos índices de refração isotrópico e anisotrópico superiores a  $\Delta n = 10^{-3}$ . Para intensidades superiores, podem ocorrer microexplosões que originam microespaços vazios, resultando contrastes de índice de refração na ordem de  $\Delta n = 10^{-1}$ .

- Polarização: a energia absorvida é dependente da polarização do feixe incidente.

Existem dois tipos distintos de escrita direta: a escrita paralela e a escrita lateral. No que diz respeito à escrita paralela, a amostra é translacionada paralelamente ao eixo de propagação dos pulsos laser, enquanto no caso da escrita lateral, a amostra é translacionada perpendicularmente ao feixe laser, tal como é exemplificado na Figura 2.

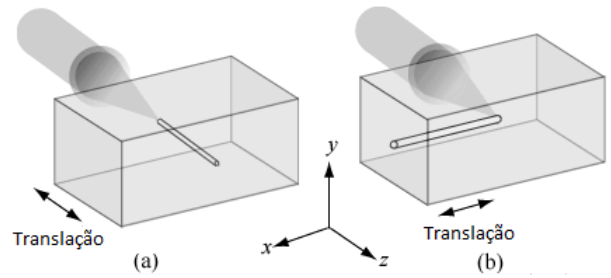


Figura 2: Dois tipos de escrita direta: a) escrita paralela e b) escrita lateral.

Neste trabalho experimental vai ser utilizada a escrita direta lateral, em que a direção do feixe laser é anti-paralela ao eixo dos yy e o movimento de translação é paralelo ao eixos dos zz. Para que a escrita tenha a melhor qualidade possível, é importante que a objetiva de focagem e a fibra ótica estejam posicionadas de forma a maximizar a intensidade incidente na fibra. A intensidade dos pulsos laser tem de ser suficientemente alta para causar a ocorrência de microexplosões com um único disparo do feixe laser e assim resultar um alto contraste de índice de refração nesse local.

Uma vez que as características destes componentes são altamente dependentes dos parâmetros de escrita, é necessário ter em atenção a potência dos pulsos laser, a velocidade de escrita e a duração de cada pulso.

## 1.3 Caracterização de guias de onda

Os guias de onda são dispositivos capazes de guiar as ondas eletromagnéticas, maioritariamente através do seu núcleo e que podem ter estruturas muito diversi-

ficadas. Os mais comuns são as fibras óticas que são guias de onda circulares, compostas por um núcleo de índice de refração superior e uma bainha com índice de refração inferior e também os guias de onda em canal embutidos, compostos por um núcleo e um substrato, sendo o primeiro a camada com índice de refração mais alto (Figura 3).

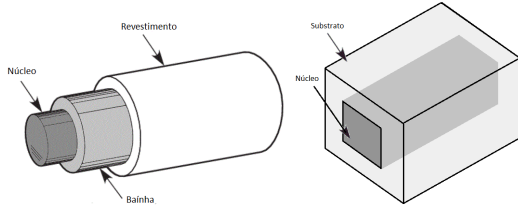


Figura 3: Esquerda: Estrutura de uma fibra ótica. Direita: Estrutura de um guia de onda em canal.

Para se proceder à caracterização de guias de onda é importante ter em conta alguns parâmetros, tais como, o índice de refração das diferentes camadas que compõem o guia de onda, os índices de refração efetivos dos modos que se propagam no guia, as perdas de propagação e a distribuição modal, entre outros.

## 2 Procedimento Experimental

### 2.1 Fabricação da rede de período longo, LPG

Para a fabricação da LPG, foi utilizado um laser linearmente polarizado de comprimento de onda de 515 nm (verde), com um período de 192.5  $\mu m$  e com uma potência de pulso de 70 mW. Foi utilizada uma velocidade de escrita de 50  $\mu m s^{-1}$ .

A montagem experimental utilizada, encontra-se esquematizada na Figura 4. Para variar a potência do feixe, foi utilizada uma lâmina de meia onda (HW1), controlada através do computador e um polarizador de ângulo de Brewster. Alterando o ângulo de polarização com recurso à lâmina de meia onda, a potência de cada feixe dividido pode ser ajustada sem que a polarização linear seja alterada. Por fim, um dos feixes resultantes foi utilizado, enquanto o outro descartado para

um depósito de feixes. Para amplificar o tamanho do feixe laser recorreu-se a um telescópio composto por duas lentes,  $L_1$  e  $L_2$  por forma a que a máxima potência incida na lente de focagem,  $L_3$ . A polarização do feixe foi ajustada para a direção de escrita utilizando uma segunda lâmina de meia onda (HW2). Com o intuito de focar o feixe no núcleo da fibra ótica, recorreu-se a um diafragma e à lente  $L_3$  mencionada anteriormente. Para que o tamanho do feixe coincida com a largura da lente, o diafragma tem de possuir a mesma abertura que a lente. Para se proceder a pequenos alinhamentos e visualizar todo o processo, recorreu-se a uma câmara CCD, acoplada a um filtro e a uma lente,  $L_4$ , que colima o feixe para a câmara. É necessária a utilização de um filtro para reduzir a intensidade que atinge a câmara, para garantir que a mesma não seja danificada.

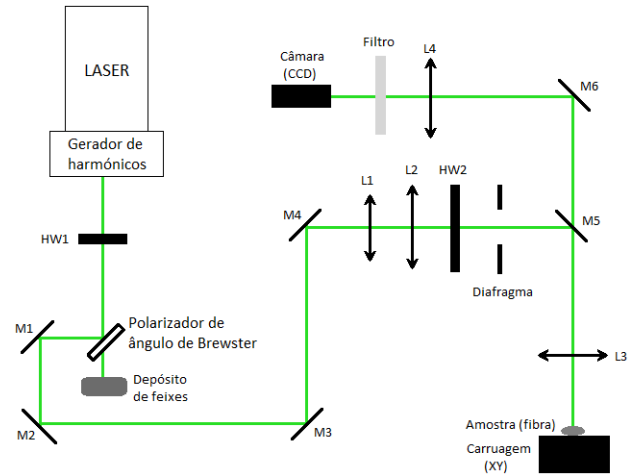


Figura 4: Esquemático da montagem experimental.

Uma vez otimizado todo o setup, segue-se o seu alinhamento, começando por garantir que todos os espelhos estão alinhados de forma a que o feixe laser seja refletido na amostra e descreva exatamente o mesmo caminho de ida e volta. Segue-se o alinhamento do último espelho,  $M_5$ , que deve ser posicionado de forma a que o feixe laser fique perpendicular à amostra. A terceira lente,  $L_3$ , e o suporte da amostra também devem estar perpendiculares ao feixe laser, com o intuito de uniformizar o processo de escrita e reduzir as

aberrações produzidas pela interface vidro-ar que podem deformar o perfil de intensidade. Para observar quando é que o feixe está realmente focado no topo da superfície da fibra, recorre-se à câmara CCD que, no caso deste estar focado, deverá exibir um ponto no ecrã. Uma vez que se pretende escrever no centro do núcleo da fibra, é necessário dividir o valor correspondente ao raio da fibra pelo índice de refração da mesma, para saber quanto é necessário descer para estarmos realmente no centro.

A amostra foi presa com recurso a vácuo e através de uma estação XY, controlada por computador, ao qual foi conectado o laser, foram ajustados os parâmetros referentes à velocidade e ao comprimento do passo.

Por fim, utilizando a lâmina de meia onda, controlada através do computador, foram procurados os ângulos correspondentes ao máximo e mínimo de potência do feixe laser que atinge a amostra, a energia foi selecionada automaticamente e deu-se início à escrita da rede de período longo.

## 2.2 Caraterização dos guias de onda

Para proceder à caraterização de cada guia de onda, realizou-se um estudo das perdas de propagação e do perfil de intensidade correspondentes a cada um. Para tal foram utilizados dois lasers distintos: um laser vermelho de  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , com o qual se realizou o alinhamento das montagens experimentais, uma vez que é visível a olho nu e um laser infravermelho de  $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$  com o qual foram realizadas as medições.

Para proceder ao estudo das perdas de propagação, foi acoplada uma amostra com cinco guias de onda a duas fibras monomodo. Uma das fibras foi conectada ao laser (fibra de entrada) e a outra a um detetor (fibra de saída) que irá medir a potência de saída da fibra. A amostra e as fibras monomodo foram colocadas numa estação de trabalho de precisão (com liberdade de movimento da amostra em X e com liberdade de movimento das fibras em X, Y e Z), controlada por piezoelétricos com precisão na ordem do nanómetro e a amostra foi imobilizada com recurso a vácuo. Sobre a estação de trabalho existe um microscópio *Leica* para facilitar o processo de alinhamento

dos guias de onda e das fibras. Por fim, cada guia de onda foi acoplado às fibras óticas tendo, para isso, se procedido ao alinhamento da posição de ambos os componentes através dos diferentes parafusos micrométricos da estação de trabalho. Utilizou-se um líquido index matching, com o intuito de diminuir as possíveis reflexões de Fresnel que pudessem ocorrer e assim melhorar a qualidade do acoplamento.

Tendo tudo alinhado, ligou-se o laser vermelho, para realizar pequenos ajustes até se verificar que a luz estava a ser realmente guiada através do guia de onda. De seguida, ligou-se o laser infravermelho e com a ajuda dos piezoelétricos fizeram-se os ajustes finais. Por fim, realizou-se a medição do sinal de saída da fibra ótica da outra extremidade. A montagem experimental realizada foi a seguinte (Figura 5):

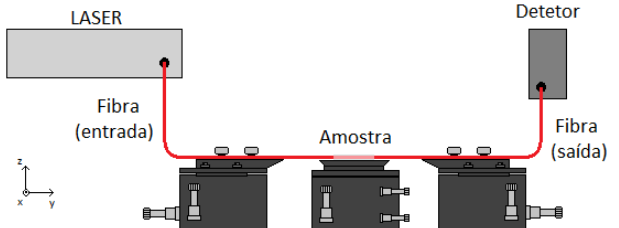


Figura 5: Montagem experimental para medição das perdas de propagação de um guia de onda.

As perdas totais num guia de onda podem ser calculadas através da Equação 2:

$$\alpha = -10 \log \frac{P_{out}}{P_{ref}} \quad (2)$$

onde  $\alpha$  representa as perdas de propagação em dB (incluindo as perdas do guia de onda, das fibras e do acoplamento entre ambas),  $P_{ref}$  é a potência de referência que é obtida quando se acoplam a fibra de “entrada” à fibra de “saída” diretamente (sem o guia de onda entre elas),  $P_{out}$  é a potência de saída medida quando as duas fibras estão acopladas ao guia de onda em estudo. A potência de entrada, correspondente à potência injetada pelo laser infravermelho, foi de  $1 \text{ mW}$  e a potência de referência medida foi de  $P_{ref} = 737 \mu\text{W}$ .

Para fazer o estudo do perfil modal, prendeu-se novamente a amostra à estação de trabalho com recurso a vácuo e a fibra de entrada foi montada num controlador piezoelétrico para garantir maior precisão no alinhamento entre a fibra e a amostra. Para receber o feixe que saía do guia de onda, foi utilizada uma lente convergente,  $L_1$ , também ela ligada a um piezoelétrico como mobilidade em X, Y e Z, para colimar o feixe que chega a uma câmara CCD, conectada a um computador. Realizaram-se várias medições para ajustar a potência do laser de forma a otimizar a imagem visualizada pela câmara, sem que ocorresse saturação da mesma. Para obter o perfil modal da fibra, foi necessário retirar a amostra e acoplar a fibra diretamente à lente, sendo este visualizado no computador. Para obtenção do perfil de intensidades do guia de onda, voltou-se a acoplar o guia de onda à fibra ótica de entrada e à lente colimadora, seguindo-se os passos de alinhamento mencionados anteriormente e este procedimento foi repetido para cada guia. O esquema da montagem experimental pode ser visualizado na Figura 6:

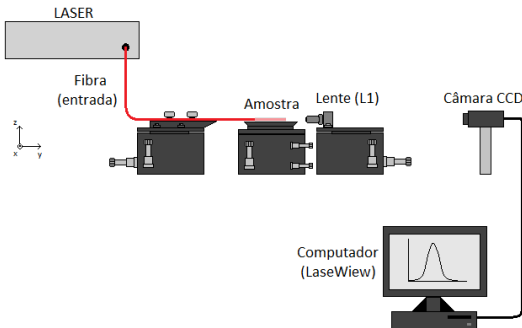


Figura 6: Montagem experimental para obtenção do perfil modal.

O perfil de intensidades foi visualizado com recurso ao programa *LaseView*.

### 3 Resultados Experimentais

#### 3.1 Fabricação da rede de período longo, LPG

Foram fabricadas duas LPG iguais, cada uma com um comprimento de 1.5 cm e afastadas de 2 cm. Esta configuração permite que este dispositivo funcione como um interferómetro Mach Zehnder pelo que, ligando-o a um OSA e analisando o espetro de saída, deveríamos obter algo idêntico à Figura 7:

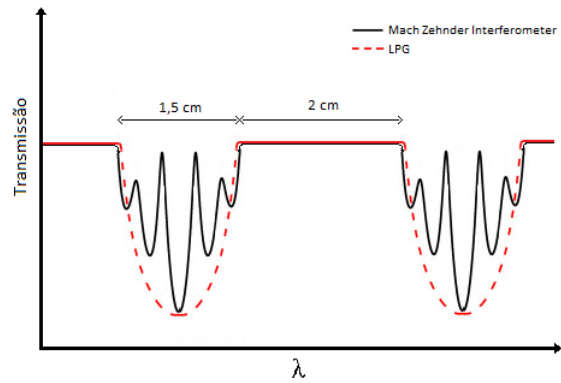


Figura 7: Gráfico do espetro de transmissão das duas LPG e do interferómetro de Mach Zehnder.

Verificou-se que o espetro obtido não correspondia muito ao esperado, o que pode dever-se a vários fatores inerentes à montagem utilizada. Uma forma de melhorar os resultados seria a utilização de uma lente de imersão, em vez de uma lente convencional, de forma a eliminar os fenómenos de dispersão e de reflexão que ocorrem frequentemente na interface ar-fibra, e o feixe manteria a sua forma original, não se observando o alongamento do mesmo.

#### 3.2 Caracterização dos guias de onda

Começou-se por determinar as perdas totais de cada guia de onda, tendo-se recorrido à Equação 2 para obtenção dos resultados da Figura 6. Importante referir que não se obteve informação precisa quanto à potência que foi utilizada para escrever cada um dos

guias de onda, sabendo-se apenas que foram utilizadas diferentes potências de escrita. Desta forma, optou-se por traçar um gráfico das perdas em função da posição do guia de onda na amostra.

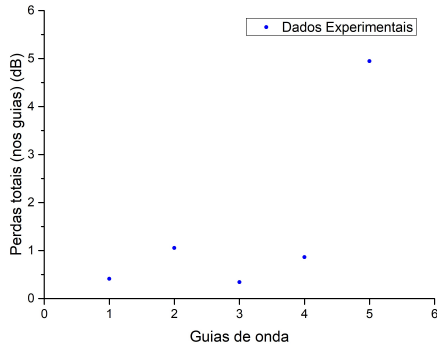


Figura 8: Gráfico das perdas de propagação referentes a cada guia de onda.

Pela análise do gráfico pode-se verificar que as perdas não obedecem a uma tendência, no entanto, os primeiros quatro guias apresentaram valores bastante inferiores aos do quinto guia. O guia que possui menores perdas é o terceiro, com perdas de 0,34 dB. Por outro lado, o quinto guia foi o que apresentou perdas superiores, de 4,94 dB.

No que toca ao perfil modal, recorreu-se ao programa LaseView, através do qual se encontraram os perfis modais e os respetivos parâmetros (Tabela 1). Uma vez que as imagens dos perfis modais eram todas muito idênticas, foi inserida apenas uma neste relatório a título representativo (Figura 9).

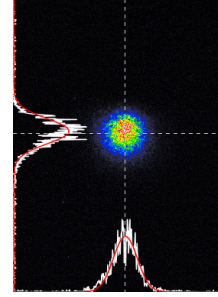


Figura 9: Perfil modal correspondente ao primeiro guia de onda.

|        | $d_x$ | $d_y$ |
|--------|-------|-------|
| Guia 1 | 68,5  | 128,2 |
| Guia 2 | 73,6  | 126,3 |
| Guia 3 | 67,96 | 82,03 |
| Guia 4 | 72,09 | 86,15 |
| Guia 5 | 63,59 | 92,84 |

|       | a     |
|-------|-------|
| Fibra | 79,01 |

Tabela 1: Valores retirados do programa LaseView correspondentes às larguras de intensidade em  $\frac{1}{e^2}$  para cada um dos guias (medidas em  $\mu m$ ). (a - diâmetro da fibra monomodo;  $d_x$  e  $d_y$  - diâmetros modais do guia de onda).

Uma vez que a fibra ótica utilizada possui um tamanho modal de  $10,4 \mu m$ , para o comprimento de onda em questão ( $\lambda = 1550 nm$ ), os valores da Tabela 1 sofreram um rescalamento em função deste mesmo valor, obtendo-se assim os valores correspondentes ao modo Gaussiano.

Para determinar a eficiência de acoplamento dos perfis dos modos gaussianos, foi utilizada a equação 3:

$$\eta = \frac{4a^2 d_x d_y}{(d_x^2 + a^2)(d_y^2 + a^2)} \quad (3)$$

onde  $a$  é o diâmetro da fibra monomodo e  $d_x$ ,  $d_y$  representam os diâmetros modais do guia de onda.

As perdas de acoplamento podem ser determinadas com recurso à expressão anterior da seguinte forma:

$$\alpha_{ac} = -10\log(\eta) \quad (4)$$

Os valores encontrados para cada guia, referentes a estes dois parâmetros foram colocados na tabela 2:

| Guia                     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\eta$                   | 0,957 | 0,900 | 0,988 | 0,992 | 0,964 |
| $\alpha_{ac}(\text{dB})$ | 0,190 | 0,472 | 0,052 | 0,034 | 0,158 |

Tabela 2: Valores da eficiência de acoplamento e das perdas de acoplamento para cada guia de onda.

Pela tabela 2, é possível afirmar que o guia que apresenta maior eficiência de acoplamento é o guia quatro com uma eficiência de acoplamento de  $\eta = 0.992$  cujas perdas de acoplamento são de  $\alpha_{ac} = 0.034 \text{ dB}$ , sendo o guia dois aquele que apresenta piores resultados, com uma eficiência de acoplamento de apenas  $\eta = 0.9$  e com perdas de acoplamento de  $\alpha_{ac} = 0.472 \text{ dB}$ .

Subtraindo aos dados correspondentes às perdas totais de cada guia as perdas de acoplamento, é possível determinar as perdas de propagação de cada guia, cujos resultados se encontram na Tabela 3:

| Guia                       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\alpha_{prop}(\text{dB})$ | 0,224 | 0,583 | 0,291 | 0,830 | 4,788 |

Tabela 3: Valores das perdas de propagação referentes a cada guia de onda.

Analisando os valores obtidos, é visível que o guia de onda que obteve menos perdas de propagação foi o primeiro. Por outro lado, o quinto guia apresentou perdas bastante superiores aos restantes.

## 4 Conclusão

Neste trabalho experimental fez-se a caracterização de diferentes guias de onda fabricados através do método de escrita direta, ponto a ponto, com laser femtossegundo. Estudou-se a influência da utilização de diferentes potências de escrita na qualidade dos guias de onda, nomeadamente através do cálculo das perdas de propagação e das perdas de acoplamento. O

guia que apresentou menores valores de perdas totais (perdas de acoplamento + perdas de propagação) foi o terceiro guia, cujo valor encontrado foi de 1.67 dB. Para cada um dos guias foram também estudadas as perdas de acoplamento e a sua eficiência. Nestes parâmetros, o guia que apresentou melhores resultados foi o quarto guia, cujo valor da perda de acoplamento foi de 0.034 dB, o que corresponde a uma eficiência de 0.992. No que toca às perdas de propagação, o guia com melhores resultados foi o primeiro guia de onda, com perdas de propagação de 0.224 dB.

No que diz respeito à escrita direta com o laser femtossegundo para fabricação de redes de período longo, é uma técnica que necessita de muita precisão e da escolha de parâmetros muito específicos para que se obtenham os resultados pretendidos, tendo sido verificada a dificuldade na obtenção dos mesmos.

## Referências

- [1] Itoh K, Watanabe W. Integration of Three-Dimensional Waveguides by Femtosecond Laser Pulses. IPAP Books 2 2005; 355-360.
- [2] Gattass RR, Mazur E. Femtosecond laser micro-machining in transparent materials. Nature Photonics 2008; 2:219-225
- [3] Nolte S, Will M, Burghoff J, Tunnermann A. Ultrafast laser processing: new options for three-dimensional photonic structures. Journal of Modern Optics 2004; 51: No.16-18, 2533-2542.
- [4] Narah Iuata Rank, Redes de Período Longo em Fibras óticas: Produção e Caracterização, Campus Curitiba, 2013.
- [5] [https://ac.els-cdn.com/S0956566315303717/1-s2.0-S0956566315303717-main.pdf?\\_tid=0d1efdcc-9732-4273-aee7-787967085fa2&acdnat=1526222351\\_13d65da82c680c145f88c9a2b29fb926](https://ac.els-cdn.com/S0956566315303717/1-s2.0-S0956566315303717-main.pdf?_tid=0d1efdcc-9732-4273-aee7-787967085fa2&acdnat=1526222351_13d65da82c680c145f88c9a2b29fb926)