

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

ISMAEL CHIAMENTI

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE GUIAS DE ONDA ÓTICOS  
EM FLUORETO DE LÍTIO**

TESE

CURITIBA

2012

ISMAEL CHIAMENTI

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE GUIAS DE ONDA ÓTICOS  
EM FLUORETO DE LÍTIO**

Tese 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: Fotônica em Engenharia.

Orientador: Dr. Hypolito José Kalinowski

**CURITIBA**

**2012**

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

C532 Chiamenti, Ismael  
PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE GUIAS DE ONDA ÓTICOS EM FLUORETO DE LÍTIUM/  
Ismael Chiamenti. – 2012.  
104 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Dr. Hypolito José Kalinowski.  
Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2012.  
Bibliografia: f. 87-93.

1. Guias de ondas ópticos. 2. Fluoreto de lítio - Propriedades ópticas. 3. Centros de cor. 4. Guias de ondas. 5. Redes de Bragg. 6. Engenharia elétrica - Teses. I. Kalinowski, Hypolito José, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

---

Biblioteca Central da UTFPR, Campus Curitiba

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial*

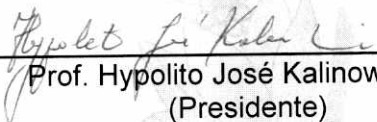
**Tese de Doutorado Nº.78**

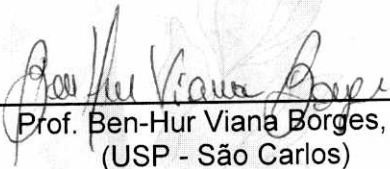
## “Produção e Caracterização de Guias de Ondas Ópticos em Fluoreto de Lítio”

por

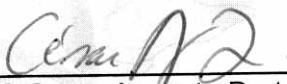
### **Ismael Chiamenti**


Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do título 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 08h do dia 24 de outubro de 2012. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Hypolito José Kalinowski, Dr.  
(Presidente)

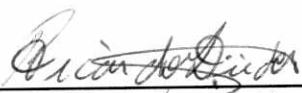
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Ben-Hur Viana Borges, Dr.  
(USP - São Carlos)

  
\_\_\_\_\_  
Prof.ª Meire Cristina Fugihara, Dr.  
(UNICENTRO)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Cesar Augusto Dartora, Dr.  
(UFPR)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. José Luis Fabris, Dr.  
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Ricardo Lüders, Dr.  
(Coordenador do CPGEI)

Aos meus pais, Vilson e Marta.

## AGRADECIMENTOS

Ao D'us de Avrohom, Yitschoc e Yaacoiv, D'us de Ysroeil, por tudo.

Ao Professor Dr. Hypolito José Kalinowski pela indelével orientação e exemplo.

Ao CNPq, CAPES e FINEP pelo fomento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Anderson S. L. Gomes e ao Departamento de Física da UFPE pela infraestrutura utilizada na gravação dos guias de onda.

Ao ENEA C. R. Frascati pelo estágio doutoral, em especial o apoio da Dr.<sup>a</sup> Rosa M. Montereali, Dr.<sup>a</sup> Francesca Bonfigli e Maria A. Vincenti.

Ao meu pai Vilson e minha mãe Marta pelo amor, apoio e compreensão neste meu período de filho omissor.

Ao meu irmão Moisés e a Fernanda pela amizade e paciência.

A minha mãe curitibana - tia Edite - pelo acolhimento familiar e apoio, fundamentais desde os tempos da graduação.

A Rosana Vasques pelo companheirismo incondicional.

Aos amigos e amigas do LOOP: Prof. Dr. Valmir de Oliveira, Rodolfo Patyk, Leandro Z. Karam, Ísis (*in memoriam*) e Larissa N. Costa.

Ao Prof. Dr. Fabris e a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Márcia, do Laboratório de Laser, pelo pronto e paciente empréstimo de peças.

A todos os colegas do Laboratório de Laser e do LATE.

A todas as outras pessoas que direta e indiretamente colaboraram com este trabalho.

...e ela, parando de arrumar o mais novo, olhou para a porta e ali o mais velho, com os olhos verdes arregalados, explicando: fogo mãe! fogo!

*Memórias...*

## RESUMO

CHIAMENTI, Ismael. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE GUIAS DE ONDA ÓTICOS EM FLUORETO DE LÍTIO. 104 f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Este trabalho descreve a produção e caracterização de guias de onda óticos em cristal de fluoreto de lítio (LiF) produzidos expondo o cristal a um feixe focalizado de um laser de femtosegundo, com o deslocamento do cristal na direção perpendicular ao eixo de propagação do feixe. A medida da emissão, sob iluminação específica, demonstra a presença de centros de cor dos tipos  $F_2$  e  $F_3^+$  nas regiões do cristal expostas ao feixe focalizado do laser. As estruturas produzidas possuem incremento do índice de refração em relação ao índice de refração do cristal. Tais estruturas são caracterizadas em termos da sua morfologia usando microscopia convencional e confocal. A capacidade de guiamento de luz é investigada acoplando fontes laser com diferentes comprimentos de ondas. Os modos suportados são também analisados, bem como as perdas na propagação. A produção de guias de ondas de Bragg é testada acoplando uma fonte de luz branca e comparando seu espectro com o espectro que passa somente pelo cristal. A capacidade de guiamento das estruturas produzidas é confirmada pela análise dos perfis de campo próximo. Os guias suportam poucos modos e os incrementos de índices obtidos são da ordem de  $10^{-4}$ .

**Palavras-chave:** Guia de onda ótico, Cristal de fluoreto de lítio, Centros de cor, Guias de ondas ativos, Guias de ondas de Bragg.



## ABSTRACT

CHIAMENTI, Ismael. PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF OPTICAL WAVEGUIDES IN LITHIUM FLUORIDE CRYSTAL. 104 f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

This work describes the production and characterization of optical waveguides in lithium fluoride crystal (LiF) produced by exposing the crystal to a focused femtosecond laser beam, with the crystal displacement perpendicular to the beam. The measured emissions, with specific illumination, demonstrate the presence of color centers of types  $F_2$  and  $F_3^+$  at the crystal regions exposed to the focused laser beam. The produced structures have increased refractive index relative to the crystal refraction index. Such structures are characterized in terms of their morphology using conventional and confocal microscopy. Their ability to guide light is investigated through coupling different laser light. The propagation modes supported by the guides are also estimated, as well as the propagation losses. The production of a Bragg grating waveguide is locked for by coupling a white light in the guides and comparing its spectrum with that passing only through the crystal. The guiding capacity of the structural changes produced is confirmed by the near-field profile analysis. The guides support few propagation modes and the obtained changes in the refractive index are in the order of  $10^{-4}$ .

**Keywords:** Optical waveguides, Lithium fluoride crystal, Color centers, Active waveguides, Bragg grating waveguides.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Esquema de gravação de dispositivos óticos com deslocamento na direção (a) perpendicular e (b) longitudinal do substrato e (c) limite de operação em função da distância focal. ....	17
FIGURA 2	– Relação entre área da seção transversal do feixe focalizado, da densidade de energia, e do nível de energia necessário para alteração da estrutura interna do cristal de LiF. ....	33
FIGURA 3	– Rede de Bragg em um guia de onda cilíndrico: FBG ( <i>Fiber Bragg Grating</i> ). ....	34
FIGURA 4	– Guia de Onda de Bragg: BGW. ....	35
FIGURA 5	– Detalhe do laser pulsado focalizado e formação do guia de onda de Bragg. ....	36
FIGURA 6	– Cristal de LiF com distribuição cúbica de face centrada (GRICEITE, 2009). ....	37
FIGURA 7	– Alguns dos centros de cor que podem ser comportados em um cristal de LiF. ....	38
FIGURA 8	– Ciclo de absorção e emissão de fótons dos CC. ....	39
FIGURA 9	– Bandas de absorção e emissão de alguns dos CC em cristal de LiF (VINCENTI et al., 2010, p. 11). ....	40
FIGURA 10	– (a) Arranjo experimental para inscrição dos guias, (b) focalização do laser no interior do cristal e (c) detalhes da profundidade de gravação. ....	44
FIGURA 11	– Fotografia do cristal de LiF, objetiva e deslocador usados na produção dos guias. ....	44
FIGURA 12	– Disposição das alterações estruturais no interior do cristal de LiF. ....	45
FIGURA 13	– Arranjo experimental para obtenção dos espectros emitidos pelos guias em diferentes situações. ....	47
FIGURA 14	– Arranjo experimental para acoplamento da luz e medida do perfil do campo próximo. ....	49
FIGURA 15	– Fotografia do arranjo experimental para o acoplamento de luz nos guias, LOOP-UTFPR. ....	51
FIGURA 16	– Fotografia do arranjo experimental para o acoplamento de luz nos guias, ENEA C. R. Frascati. ....	51
FIGURA 17	– Arranjo experimental para medida do perfil de campo próximo de uma fibra ótica monomodal. ....	54
FIGURA 18	– Perfil de campo próximo medido experimentalmente e mapeamento do incremento do índice de refração na região do núcleo da fibra ótica monomodal em (a) 632,8 nm e (b) 1550 nm. ....	54
FIGURA 19	– Fluxograma do processo de obtenção da faixa de valores para a seção reta transversal do núcleo do guia quando operando em 635 nm. ....	56
FIGURA 20	– Fluxograma do processo de estimativa da dimensão da seção transversal e do índice de refração do núcleo do guia quando operando em diferentes comprimentos de onda. ....	57
FIGURA 21	– Validação do processo de calculo das curvas de dispersão. ....	58
FIGURA 22	– NFP experimentais e simulados para fibras monomodais em (a) 632,8 nm e (b) 1550 nm. ....	59

FIGURA 23	– Duas amostras de cristal de LiF: um translucido e outro amarelo. ....	62
FIGURA 24	– Imagem a partir (a) da face superior, e das faces laterais (b) 1 e (c) 2 do Grupo O. ....	63
FIGURA 25	– Vista a partir da (a) face superior e das faces laterais (b) 1 e (c) 2 dos Grupos A, B e C. ....	64
FIGURA 26	– Imagem da face 1, Grupo A, utilizando objetiva de microscópio de 10X. .	64
FIGURA 27	– Imagem do (a) Grupo C, estruturas 24-27 e (b) Grupo A, estrutura 4. ....	65
FIGURA 28	– Detalhe e orientação espacial da profundidade real de gravação das alterações estruturais. ....	66
FIGURA 29	– Imagens por microscopia confocal (a) sem aplicação de filtro e com filtros seletores na banda do (b) verde e (b) do vermelho. ....	68
FIGURA 30	– Imagem obtida por microscopia confocal das estruturas do Grupo A. ....	68
FIGURA 31	– Perfis de intensidade ao longo do eixo y obtidos a partir de microscopia para as estruturas (a) 7 e (b) 9 do Grupo B. ....	69
FIGURA 32	– Imagens da seção reta transversal das estruturas por microscopia confocal da (a) face e (b-d) interior do cristal. ....	69
FIGURA 33	– Espectros de emissão das estruturas e do cristal de LiF sob o mesmo sistema de iluminação. ....	70
FIGURA 34	– Espectros de emissão dos CC não guiado e guiado. ....	71
FIGURA 35	– Perfil de campo próximo do guia de onda 5, Grupo O, acoplado com diferentes fontes de luz com em emissão centrada em: (a) 460 nm. (b) 635 nm e (c) 1550 nm. ....	72
FIGURA 36	– Perfil de campo próximo do guia de onda 5, Grupo O, acoplado com diferentes fontes de luz com em emissão centrada em: (a) 457,9 nm. (b) 514 nm e (c) 632,8 nm. ....	72
FIGURA 37	– Perfil do feixe do laser de 635 nm passando pelo cristal de LiF. ....	73
FIGURA 38	– Perfis obtidos a partir de diferentes comprimentos de ondas, para o guia de onda número 4 do Grupo O (UTFPR–LOOP), ao longo da direção (a) horizontal e (b) vertical. ....	73
FIGURA 39	– Perfis obtidos a partir de diferentes comprimentos de ondas, para o guia de onda número 4 do Grupo O (ENEA C. R. Frascati), ao longo da direção (a) horizontal e (b) vertical. ....	73
FIGURA 40	– Comparação dos perfis de campo próximo para acoplamento via faces 1 e 2 para as direções (a) horizontal e (b) vertical para o guia de onda 6 do Grupo O. ....	74
FIGURA 41	– Comparação dos perfis de campo próximo medidos utilizando fontes de luz com comprimentos de onda de 457,9 nm e 460 nm, para a direção (a) horizontal e (b) vertical. ....	75
FIGURA 42	– Comparação dos perfis de campo próximo medidos utilizando fontes de luz com comprimentos de onda de 635 nm e 632,8 nm, para a direção (a) horizontal e (b) vertical. ....	75
FIGURA 43	– Perfil de campo próximo, na direção horizontal, medido experimentalmente e mapeamento do incremento do índice de refração na região do núcleo do guia 4, Grupo O. ....	77
FIGURA 44	– Perfis de campo próximo medidos experimentalmente e simulados para comprimento de onda de 460 nm, nas direções (a) horizontal e (b) vertical. ....	79
FIGURA 45	– Perfis de campo próximo medidos experimentalmente e simulados para comprimento de onda de 635 nm, nas direções (a) horizontal e (b) vertical. ....	79

FIGURA 46	– Perfis de campo próximo medidos experimentalmente e simulados para comprimento de onda de 1550 nm, nas direções (a) horizontal e (b) vertical. ....	79
FIGURA 47	– (a) Imagem ao longo do guia de onda 6, Grupo O e (b) o gráfico do perfil de intensidade. ....	83
FIGURA 48	– (a) Espectros da fonte de luz medido quando acoplado no guia 5 e quando passando somente pelo cristal de LiF e (b) relação entre espectro medido no guia e no cristal. ....	84
FIGURA 49	– Esquema do Método do Índice Efetivo com (a) guia na direção x e (b) guia na direção y ....	95
FIGURA 50	– Perfil da seção transversal de uma guia de onda ótica. ....	97
FIGURA 51	– Escala de Intensidade. ....	98
FIGURA 52	– Guia de onda 2, acoplamento via face 1 Grupo O, UTFPR-LOOP. ....	98
FIGURA 53	– Guia de onda 3, acoplamento via face 1 Grupo O, UTFPR-LOOP. ....	98
FIGURA 54	– Guia de onda 4, acoplamento via face 1 Grupo O, UTFPR-LOOP. ....	99
FIGURA 55	– Guia de onda 5, acoplamento via face 1 Grupo O, UTFPR-LOOP. ....	99
FIGURA 56	– Guia de onda 6, acoplamento via face 1 Grupo O, UTFPR-LOOP. ....	99
FIGURA 57	– Guia de onda 7, acoplamento via face 1 Grupo O, UTFPR-LOOP. ....	100
FIGURA 58	– Guia de onda 4, acoplamento via face 1, Grupo O, ENEA C. R. Frascati. .	100
FIGURA 59	– Guia de onda 5, acoplamento via face 1, Grupo O, ENEA C. R. Frascati. .	100
FIGURA 60	– Guia de onda 6, acoplamento via face 1, Grupo O, ENEA C. R. Frascati. .	101
FIGURA 61	– Guia de onda 7, acoplamento via face 1, Grupo O, ENEA C. R. Frascati. .	101
FIGURA 62	– Perfis de campo próximo do guia de onda 2 ao longo dos eixos (a) horizontal e (b) vertical. ....	102
FIGURA 63	– Perfis de campo próximo do guia de onda 3 ao longo dos eixos (a) horizontal e (b) vertical. ....	102
FIGURA 64	– Perfis de campo próximo do guia de onda 4 ao longo dos eixos (a) horizontal e (b) vertical. ....	103
FIGURA 65	– Perfis de campo próximo do guia de onda 5 ao longo dos eixos (a) horizontal e (b) vertical. ....	103
FIGURA 66	– Perfis de campo próximo do guia de onda 6 ao longo dos eixos (a) horizontal e (b) vertical. ....	103
FIGURA 67	– Perfis de campo próximo do guia de onda 7 ao longo dos eixos (a) horizontal e (b) vertical. ....	104

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Configurações para a gravação dos guias de onda na cristal de LiF. ....	46
TABELA 2	– Componentes utilizados no experimento de acoplamento. ....	52
TABELA 3	– Larguras na meia altura dos perfis de campo próximo das fibras óticas. ...	59
TABELA 4	– Dimensões horizontais na meia altura das alterações estruturais. ....	65
TABELA 5	– Profundidade real de gravação e dimensões verticais das alterações estruturais. ....	66
TABELA 6	– Larguras estimadas das estruturas observadas por microscopia confocal. ..	69
TABELA 7	– Valores de pico e largura de banda dos espectros dos CC. ....	70
TABELA 8	– Largura na meia altura dos perfis de campo próximo. ....	76
TABELA 9	– Estimativa do Incremento do Índice de Refração a partir dos Respectivos NFP. ....	78
TABELA 10	– Estimativa da Dimensão e do Incremento do Índice de Refração do Núcleo dos Guias de Onda. ....	78
TABELA 11	– Largura na meia altura dos perfis de campo próximos simulados e medidos. 80	
TABELA 12	– Frequências normalizadas em função dos comprimentos de ondas. ....	81
TABELA 13	– Estimativa das perdas na propagação. ....	82

## LISTA DE SIGLAS

FTTH/B	Fiber to the Home/Building
LiF	Fluoreto de Lítio
CC	Centro de Cor
UV	Ultra Violeta
BGW	Guia de Onda de Bragg
AN	Abertura Numérica
CCL	Laser de centro de cor
DFB	<i>Distributed Feedback</i> - Realimentação distribuída

## LISTA DE SÍMBOLOS

fs	Femtosegundo
$\Delta n$	Incremento do Índice de Refração
dB	decibel
Ti:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Safira dopada com Titânio
ps	picosegundo
Er:Yb	Itérbio dopado com Érbio
Yb	Itérbio
KCl:Li	Cloreto de potássio dopado com lítio
NaF:Li	Fluoreto de sódio dopado com lítio
CaF <sub>2</sub> :Na	Fluoreto de cálcio dopado com sódio
SrF:Na	Fluoreto de estrôncio dopado com sódio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Safira
NaCl	Cloreto de sódio
KCl	Cloreto de potássio
KBr	Brometo de potássio
Li <sup>+</sup>	Íon de lítio
F <sup>-</sup>	Íon de Fluor
eV	Elétron volt
K	Kelvin

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.1.1 Guias de Ondas Óticas em Substratos Dielétricos	19
1.1.2 Guias de Ondas de Bragg em Substratos Dielétricos	22
1.1.3 Centros de Cor e Lasers de Centros de Cor	25
1.1.3.1 Lasers de centros de cor com realimentação distribuída	27
1.2 MOTIVAÇÃO	30
1.2.1 Objetivo Geral	31
1.2.2 Objetivos Específicos	31
1.3 ESTRUTURA DA TESE	31
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>32</b>
2.1 GRAVAÇÃO DE GUIAS DE ONDA ÓTICOS	32
2.2 REDES DE BRAGG EM GUIAS DE ONDA	33
2.2.1 Guias de Onda de Bragg	34
2.2.2 Processo de Gravação de Guias de Onda de Bragg em Substrato Dielétrico	35
2.3 PROPRIEDADES DO FLUORETO DE LÍTIUO	36
2.3.1 Centros de Cor em LiF	38
2.3.2 Ciclo Ótico dos Centros de Cor	39
2.3.3 Interação do Cristal de LiF com Laser de Femtosegundo	40
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>42</b>
3.1 INSCRIÇÃO DOS GUIAS DE ONDA ÓTICOS EM CRISTAL DE LIF	43
3.1.1 Inspeção das Alterações Estruturais	45
3.2 CENTROS DE COR PRODUZIDOS NO PROCESSO DE GRAVAÇÃO	46
3.2.1 Inspeção por Microscopia Confocal	47
3.2.2 Espectro de Emissão por Fotoluminescência Guiado e Não Guiado	47
3.3 CAPACIDADE DE GUIAMENTO DAS ESTRUTURAS	48
3.3.1 Estimativa das Perdas na Propagação	50
3.4 ESTIMATIVA DO INCREMENTO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO	52
3.4.1 Validação do Método de Estimativa do Incremento do Índice de Refração	53
3.5 ESTIMATIVA DAS DIMENSÕES E DO $\Delta n$ DOS GUIAS	55
3.5.1 Validação da Rotina de Simulação dos Perfis de Campo Próximo	57
3.6 ESTIMATIVA DOS MODOS PROPAGANTES	60
3.7 ANÁLISE DA MODULAÇÃO DO $\Delta n$ DOS GUIAS	60
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>61</b>
4.1 INSPEÇÃO VISUAL DAS ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS	62
4.1.1 Estimativa das Dimensões das Modificações Estruturais	65
4.2 ANÁLISE POR MICROSCOPIA CONFOCAL	67
4.3 FOTOLUMINESCÊNCIA	70
4.3.1 Emissão Guiada e Não Guiada nos Guias de Onda	71
4.4 GUIAMENTO LUZ E PERFIL DE CAMPO PRÓXIMO	71
4.4.1 Estimativa do Incremento do Índice de Refração do Núcleo dos Guias	77



4.4.2	Dimensões da Seção Transversal e do Incremento do Índice de Refração dos Guias	78
4.5	MODOS PROPAGANTES .....	80
4.6	PERDAS NA PROPAGAÇÃO .....	82
4.7	GUIAS DE ONDA DE BRAGG .....	83
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>87</b>
	<b>Apêndice A – ESTIMATIVA DO ÍNDICE, MÉTODO DO ÍNDICE EFETIVO E NFP</b>	<b>94</b>
	<b>Apêndice B – PERFIS DE CAMPO PRÓXIMO PARA OS GUIAS DO GRUPO O ..</b>	<b>98</b>
	<b>Apêndice C – ACOPLAMENTO VIA FACE 1 E VIA FACE 2 .....</b>	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente tráfego de dados nas redes de comunicações requer bandas cada vez mais largas e de altas velocidades até os usuários e/ou aplicativos finais da rede. Isto tem impulsionado a expansão dos sistemas óticos até os destinos finais da rede de comunicações usando a tecnologia chamada de FTTH/B (*Fiber to the Home/Building*) (CMOSS-ELECTRONIC, 2008).

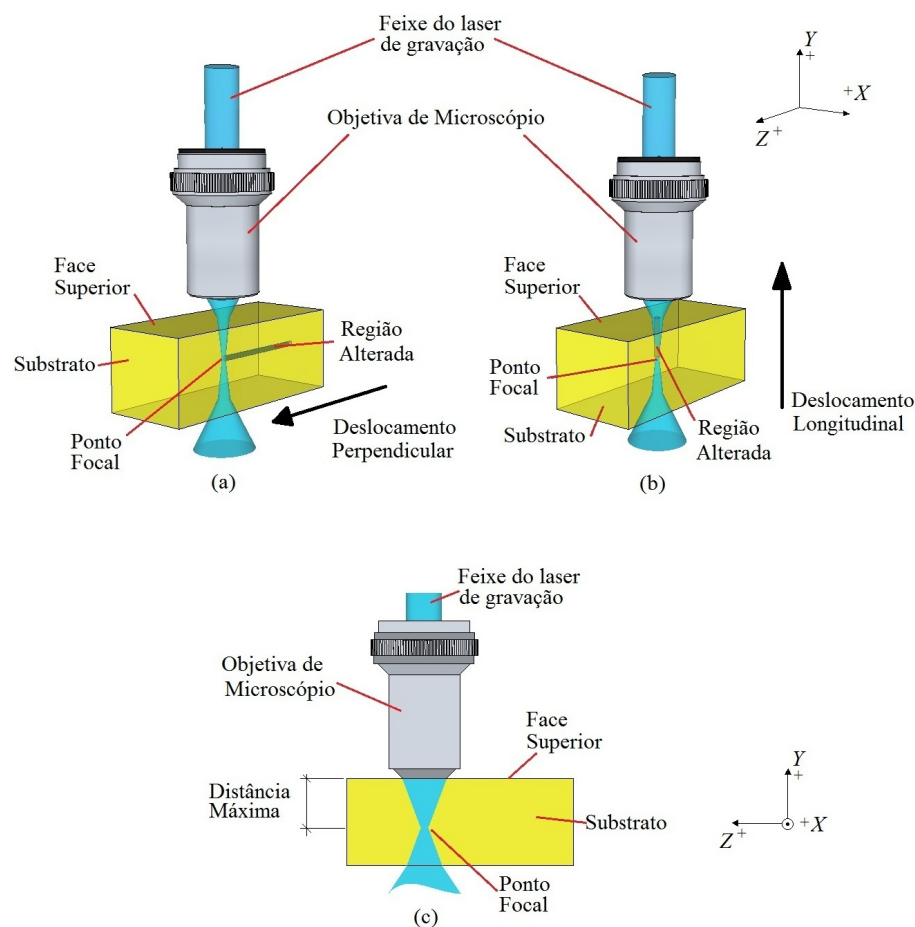
Nesses trechos finais da rede de comunicações, fora dos grandes e médios troncos óticos, existe uma considerável densidade de canais óticos dispersos em curtas distâncias, tipicamente em torno de 20 km (GEORGE, 2003). Para esses trechos, o uso de sistemas operando na banda do visível tem se apresentado atrativo no lugar de sistemas operando na banda do infravermelho, típica dos grandes e médios troncos óticos (ZIEMANN, 2005). A vantagem imediata é a fácil manutenção, uma vez que operam no comprimento de onda do visível. Outra vantagem é que, nessa banda, as fibras óticas plásticas apresentam janelas de baixa perda na propagação nos comprimentos de onda de 510 nm, 570 nm e 650 nm, além do baixo custo dessas fibras (POF-ALL, 2008). Uma necessidade para sistemas tão ramificados é que contenham o mínimo possível de dispositivos ativos e, quando necessários, que tenham um baixo custo de produção e manutenção.

Além da aplicação acima citada, fontes de luz e lasers com emissão na banda do visível encontram aplicações em outros sistemas óticos, podendo ser destacados:

- Comunicação e sensoriamento em águas submarinas, devido à janela de mínima absorção da água do mar na banda do ultravioleta ao verde (ITO; HARUYAMA, 2006; FALMOUTH, 2010);
- Na medicina e odontologia, pela interação das mais diversas estruturas biológicas com a luz na banda do visível (PRASAD, 2003, p. 162) ou com a associação dessas estruturas com fármacos, para interação com luz visível, facilitando, assim, a visualização das áreas específicas do tratamento (Ibid., p. 439);

- Na biologia, em diagnósticos baseados nas mais diversas interações das amostras com a luz na banda do visível permitindo, assim, a obtenção de uma grande gama de informações através da citometria de fluxo (Ibid., p. 395);
- Na comunicação ótica sem fio, devido à janela de baixa absorção da atmosfera na banda do visível (ALWAN, 2001; ROSENBERG, 2000);
- Em micro projetores de vídeo, que produzem todas as cores necessárias a partir das cores azul, verde e vermelho (MYSLEWSKI, 2009; LEMOPTIX, 2009).

Um das técnicas mais simples de produção de dispositivos óticos é a modificação da estrutura atômica de substratos através da exposição deste a um feixe focalizado de laser, deslocando, então, o substrato na direção perpendicular ou longitudinal ao eixo de propagação do laser, conforme ilustrado nas Figuras 1 (a) e (b), respectivamente.



**Figura 1 – Esquema de gravação de dispositivos óticos com deslocamento na direção (a) perpendicular e (b) longitudinal do substrato e (c) limite de operação em função da distância focal.**

A distância focal do sistema de focalização do feixe do laser de gravação limita, para o deslocamento perpendicular do substrato, a profundidade da alteração estrutural, enquanto que, no processo de gravação com deslocamento longitudinal a dimensão do dispositivo é limitada, conforme ilustrado na Figura 1.

Durante o processo de focalização do laser no interior do substrato são induzidas modificações do índice de refração, por compactação ou densificação estrutural, numa região limitada pela alta densidade de energia em torno do ponto focal do feixe de laser. Por meio dessa técnica, é possível desenvolver diversos dispositivos óticos integrados, como guias de onda, acopladores, divisores, chaves óticas, multiplexadores, demultiplexadores, moduladores, amplificadores e lasers, elementos importantes em sistemas óticos.

Além da direção de deslocamento do substrato, outros parâmetros estão diretamente relacionados com a gravação dos dispositivos, como a velocidade de deslocamento do substrato, o sistema de focalização (distância focal, abertura numérica), a profundidade do ponto focal no interior do substrato (que determinará a profundidade ou extensão do dispositivo ótico no interior do substrato), a energia por pulso e a frequência de repetição do laser de gravação.

Em termos de substratos utilizados na produção de dispositivos óticamente ativos, o fluoreto de lítio, LiF, é aplicado na produção de fontes de luz e de lasers com emissão na banda do visível. O cristal de LiF, na sua constituição básica, não é um material óticamente ativo, porém, é possível induzir modificações pontuais na sua rede atômica, denominadas centros de cor, CC, estes podendo possuir características de absorção e emissão de luz, tornando-o, assim, um cristal óticamente ativo. A nomenclatura da primeira família de CC estudada é expressa na forma  $F_x^y$ , onde o uso da letra F se deve a palavra alemã para cor, *farbe*, sendo o índice x relacionado ao número de elétrons ou valências e o índice y a polaridade da carga efetiva dos CC. Como exemplos, pode-se citar o centro F, que é passivo, no LiF, ou seja, ele somente absorve luz, enquanto os CC dos tipos  $F_2$  e  $F_3^+$  são centros de cor ativos, ambos com absorção em torno de 459 nm e emissão de luz nas bandas do visível centradas em torno de 539 nm e 670 nm, respectivamente (SCHNEIDER; RABIN, 1964; NAHUM; WIEGAND, 1967; NAHUM, 1967; TER-MIKIRTYCHEV; TSUBOI, 1996; TSUBOI; TER-MIKIRTYCHEV, 1996; KUROBORI et al., 2003; BALDACCHINI, 2002).

Esta tese trata da produção e caracterização de guias de onda óticamente ativos em cristal de LiF. A partir da revisão bibliográfica, é delineado o estado da arte das diferentes técnicas relativas ao processo de produção de guias de onda óticos e lasers de centros de cor em guias de onda por técnica fotorrefrativa. A motivação é então identificada, seguida pela apresentação do objetivo geral e dos objetivos específicos.

## 1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No decorrer desta seção é descrito o estado da arte das técnicas necessárias para a elaboração, usando laser com pulsos na ordem de femtosegundos, de guias de onda óticos e lasers de centros de cor em cristais de fluoreto de lítio. Inicialmente, é apresentada uma revisão sobre a produção de dispositivos óticos através da exposição de diferentes substratos a um dado feixe de laser focalizado, partindo do uso de substratos passivos para substratos ativos. Trata-se, em seguida, da construção de redes de Bragg simultaneamente a produção dos guias de onda óticos. Aborda-se, então, o uso de cristais de LiF contendo CC como meio ativo aplicado na construção de lasers, bem como as características dos centros de cor concernentes ao desenvolvimento desta tese. Por fim, é estudada a construção de lasers de guias de onda com realimentação distribuída integrados em substratos óticamente ativos.

### 1.1.1 Guias de Ondas Óticos em Substratos Dielétricos

A técnica de produção de guias de onda óticos e dispositivos a eles agregados, de interesse para esta tese, consiste de uma modificação na estrutura da rede atômica de um determinado substrato, produzida por focalização de um feixe de laser e deslocamento do substrato, ou do feixe, na direção do guia que será produzido, sendo que, na região onde se produz a alteração atômica é observada modificação do índice de refração.

O mecanismo da variação do índice de refração produzido pela técnica citada é atribuído, principalmente, à densificação do substrato nas regiões expostas aos pulsos do laser focalizado (DAVIS et al., 1996; MIURA et al., 1997; KAISER et al., 2000; SCHAFFER et al., 2001; CHAN, 2001; STRELTSOV; BORRELLI, 2002), mas outros fenômenos também podem contribuir com o incremento, como a produção de CC, reestruturação da rede cristalina e microfusão do substrato atribuído à ionização multifóton e/ou formação de plasma (MIURA et al., 1997; HIRAO; MIURA, 1998; BORRELLI et al., 1997, 1999; STRELTSOV; BORRELLI, 2002).

O estudo da interação entre radiação ultra violeta, UV, e diferentes substratos, com o objetivo de produzir dispositivos óticos, é realizado desde a década de 1970 (BJORKLUND et al., 1976). Já a utilização de radiações com comprimento de onda do visível ao infravermelho, no desenvolvimento de dispositivos óticos, se tornou possível com a produção de lasers com pulsos de duração na ordem de femtosegundo. Assim, utilizando um laser de safira dopado com titânio ( $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ ), com banda de emissão centrada em 810 nm, taxa de repetição de 200 kHz e duração dos pulsos de 120 fs Davis et al. (1996) produziram alterações estruturais

em diferentes substratos: sílica, borato e fluorzirconato. As alterações estruturais, produzidas pela interação do feixe do laser com os substratos estudados, foram caracterizadas em termos de dimensões, profundidade das estruturas a partir de uma das faces do substrato e do incremento do índice de refração em relação ao índice de refração do substrato usado. As alterações estruturais produzidas com deslocamento do substrato longitudinalmente ao feixe do laser de fs apresentaram diâmetros de  $5\ \mu\text{m}$  a  $12\ \mu\text{m}$  e, para o deslocamento do substrato perpendicularmente à direção de propagação do feixe do laser de fs, diâmetros de  $100\ \mu\text{m}$  a  $275\ \mu\text{m}$ . Foi observado um incremento do índice de refração, nas regiões expostas ao feixe do laser focalizado, na faixa de 0,01 a 0,035, em relação ao índice de refração dos substratos utilizados. As objetivas de microscópio utilizadas para focalizar o laser foram de 5X a 20X. Os autores afirmaram que o incremento do índice de refração produzido, juntamente com o perfil do volume da alteração estrutural obtido, possuiria potencial para o confinamento da luz, mas ressaltaram a necessidade de melhorias na homogeneidade do perfil do volume das alterações produzidas. A possível produção de estruturas óticas tridimensionais usando a técnica utilizada também foi ressaltada.

O potencial de guiamento das estruturas obtidas pela técnica apresentada por Ibid. foi comprovado em um trabalho publicado no ano seguinte (MIURA et al., 1997), onde produziram guias de onda óticos em sílica, sílica sintética, sílica dopada com germânio, borosilicato, borato, fosfato, fluorfosfato, vidros fluoretados de calcogênio. Os autores utilizaram o mesmo tipo de laser (800 nm, 200 kHz, 120 fs), focalizado por uma objetiva de microscópio de 10X. Os substratos foram deslocados longitudinalmente ao feixe do laser com velocidade  $20\ \mu\text{m/s}$ . Todos os guias produzidos apresentaram estabilidade em temperatura ambiente. Variando a potência média dos pulsos do laser de fs, foram produzidas guias com diferentes diâmetros transversais de  $8\ \mu\text{m}$ ,  $17\ \mu\text{m}$  e  $25\ \mu\text{m}$  em substrato de vidro fluoretado. Acoplando uma fonte com emissão centrada em 800 nm, no guia com diâmetro de  $8\ \mu\text{m}$ , observou-se propagação monomodal, nas outras duas, de  $17\ \mu\text{m}$  e  $25\ \mu\text{m}$  de diâmetro, a propagação visualizada foi multimodal.

Na continuação do trabalho, realizado pelo mesmo grupo, foi estudado o deslocamento perpendicular, em relação ao feixe do laser, de um substrato de sílica dopado com germânio (HIRAO; MIURA, 1998). O incremento do índice de refração foi aumentado expondo o substrato aos pulsos do laser por dez vezes, obtendo um aumento no incremento do índice de refração,  $\Delta n$ , de  $\sim 0,007$  para  $\sim 0,037$ . Guias de onda óticos funcionais monomodais e multimodais em 800 nm foram produzidas com comprimento de 15 mm e com perdas de propagação de  $\sim 0,1\ \text{dB/cm}$ . A passagem do feixe focalizado dez vezes no interior do substrato apresenta problemas de alinhamento e tempo de produção, que para um guia com extensão de

15 mm e deslocamento de  $20 \mu\text{m/s}$  é de aproximadamente duas horas, considerando os dez deslocamentos consecutivos do substrato.

A produção de guias de onda óticos expondo-se um substrato de sílica uma única vez aos pulsos de um laser focalizado de  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$  (800 nm, 1 kHz, 130 fs) foi apresentado por Yamada et al. (2001). Isso foi possível aumentando o tempo de exposição do substrato aos pulsos do laser usando uma velocidade de deslocamento do substrato de  $1 \mu\text{m/s}$ . A vantagem deste procedimento é a redução dos erros de alinhamento quando se repete o processo de deslocamento do substrato mais de uma vez, sendo a desvantagem o longo tempo de produção, que, para um guia com extensão de 15 mm, é de mais de quatro horas. O deslocamento do substrato foi longitudinal ao feixe do laser focalizado. O guia produzido apresentava diâmetro da seção transversal de  $1,7 \mu\text{m}$ , com propagação monomodal em 633 nm e incremento do índice de refração em relação ao substrato de  $\sim 0,008$  (Ibid.).

Em um experimento semelhante, Will et al. (2002), deslocaram um substrato de sílica fundida perpendicularmente ao feixe focalizado do laser a uma velocidade máxima de  $1 \text{ mm/s}$ . Nestas condições, o tempo para a produção de um guia com 15 mm de extensão é de 15 s. O tempo de gravação foi reduzido consideravelmente, porém, as perdas na propagação foram estimadas em  $1 \text{ dB/cm}$ , muito maiores que as obtidas por Hirao e Miura (1998).

A questão se o deslocamento do substrato é perpendicular ou longitudinal em relação ao feixe de um laser tem resultados distintos em termos do perfil transversal do guia produzido, sendo aproximadamente circular para o deslocamento longitudinal, e com perfil aproximadamente elipsoidal para o deslocamento perpendicular (CERULLO et al., 2002). O deslocamento perpendicular do substrato, em relação aos pulsos do laser, tem a vantagem de produzir guias com comprimentos maiores que a distância de trabalho da objetiva utilizada na focalização do feixe quando comparados com o deslocamento longitudinal, no qual o comprimento dos guias é limitado pela distância focal da objetiva utilizada.

Guias produzidos com deslocamento perpendicular e perfil circular foram produzidos a partir de uma associação de lentes para ajuste astigmático do feixe do laser focalizado em substrato de vidro de Érbio dopado com Itérbio (CERULLO et al., 2002) e vidro fosfatado dopado com Érbio e Itérbio (OSELLAME R. ANDTACCHEO et al., 2003), onde foram produzidos guias de onda ótico por deslocamento perpendicular e com diâmetro transversal circular de  $\sim 8 \mu\text{m}$ , monomodais em  $1,54 \mu\text{m}$  e com perdas entre  $0,25$  e  $0,4 \text{ dB/cm}$ .

Uma solução mais simples para obtenção do perfil circular dos guias produzidos com deslocamento perpendicular ao feixe de um laser foi obtida usando uma fenda para modificação do perfil do feixe focalizado (AMS et al., 2005). Antes de passar pela objetiva de microscópio

para focalização, o feixe do laser foi condicionado por uma fenda com largura de  $500 \mu\text{m}$ . A amostra utilizada foi de vidro fosfatado. Os guias produzidos apresentaram um diâmetro transversal circular de aproximadamente  $15 \mu\text{m}$ , com condição monomodal de guiamento em  $633 \text{ nm}$  e perdas na propagação de aproximadamente  $0,38 \text{ dB/cm}$  em  $1550 \text{ nm}$ . A versatilidade quanto à variação da profundidade de gravação dos guias de onda no interior do substrato foi demonstrada gravando diversos guias em diferentes profundidades, variando de  $50 \mu\text{m}$  a  $400 \mu\text{m}$ , com incremento da profundidade de  $50 \mu\text{m}$  entre cada guia.

A velocidade máxima possível de gravação dos guias de onda, com deslocamento perpendicular da amostra em relação ao eixo de propagação do laser, é determinada pela relação entre taxa de repetição do laser de gravação, diâmetro do feixe do laser focalizado e a velocidade de deslocamento do substrato. Tal relação foi aplicada na gravação de guias de onda formados por uma sequência de regiões expostas a um único pulso focalizado de um laser de  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$  ( $800 \text{ nm}$ ,  $1 \text{ kHz}$ ,  $50 \text{ fs}$  a  $5 \text{ ps}$ ) (ZHANG et al., 2006). Foi investigada a produção dos guias com diferentes tempos de duração e energia dos pulsos:  $50 \text{ fs}$  a  $1,5 \text{ ps}$ ;  $0,5$  a  $0,7 \mu\text{J/pulso}$  e diferentes velocidades:  $0,6$  a  $1,5 \text{ mm/s}$ . Todos os guias produzidos são monomodais em  $633 \text{ nm}$ , possuindo incremento do índice de refração do núcleo em relação ao índice de refração do substrato de  $4,5 \times 10^{-4}$ , com a menor perda de propagação, de  $0,2 \text{ dB/cm}$ , obtida na gravação com o pulso tendo duração de  $1 \text{ ps}$ ,  $0,6 \mu\text{J/pulso}$  e velocidade de deslocamento da amostra de  $1 \text{ mm/s}$ . Nesta configuração a superposição das regiões expostas a cada pulso foi de apenas  $20\%$ . A técnica de gravação descrita, além de operar na velocidade máxima possível e resultar em um guia com baixa perda na propagação, possibilita a produção de guias com modulação do incremento do índice de refração, com potencial uso na produção de filtros, sensores, cavidades óticas e demais estruturas baseadas em redes de Bragg.

Entre os dispositivos citados, diversos outros dispositivos óticos passivos podem ser construídos a partir de guias de onda óticos produzidos por focalização do feixe de um laser, como acopladores planares (STRELTSOV; BORRELLI, 2001), divisores (LIU et al., 2005), divisores tridimensionais (NOLTE et al., 2003), filtros (ZHANG et al., 2006b), acopladores na banda de telecomunicações (EATON et al., 2006), divisores por interferência multimodal (WATANABE et al., 2005), moduladores eletro-óticos (LI et al., 2006), acopladores e ressonadores de microanel tridimensional (KOWALEVICZ et al., 2005).

### 1.1.2 Guias de Ondas de Bragg em Substratos Dielétricos

Uma rede de Bragg em guia de onda é construída, tipicamente, em múltiplas etapas, uma vez que envolve a produção do guia e, posteriormente, da rede de Bragg, que pode



ser por técnica interferométrica, feixe de elétrons (WONG et al., 2003; YLINIEMI et al., 2006) ou usando múltiplas exposições a pulsos de laser focalizado (MARTINEZ et al., 2004; MARSHALL et al., 2006).

A produção de rede de Bragg em um guia de onda com processo de múltiplas etapas apresenta condições inerentes de alinhamento e deslocamento críticos. Isso foi contornado por Zhang et al. (2006a) ao apresentarem uma técnica de produção simultânea do guia e da rede de Bragg, gerando uma estrutura denominada guia de onda de Bragg BGW (*Bragg Grating Waveguide*). A técnica de etapa única apresentada consiste em expor regiões do substrato a uma sequência de pulsos que, pelo deslocamento do substrato, resulta em uma sequência de regiões expostas aos pulsos, parcialmente sobrepostas, compondo um BGW por meio da variação na diferença do incremento do índice de refração ao longo da região exposta. Os BGWs foram inscritos em um substrato de borosilicato,  $50 \times 50 \times 1 \text{ mm}^3$ , a uma profundidade  $200 \mu\text{m}$ . Foi utilizado um laser de  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$  (800 nm, 1 kHz, 200 fs) com  $4 \mu\text{J/pulso}$  e focalizado através de uma objetiva de microscópio com  $\text{AN} = 0,25$ . O substrato foi deslocado perpendicularmente ao feixe do laser com velocidade de  $0,52 \text{ mm/s}$ . O feixe do laser foi polarizado paralelamente ao deslocamento do substrato. Após a gravação, as faces laterais do substrato foram polidas. O perfil de campo próximo observado em 1550 nm mostrava dimensões de  $11 \times 14 \mu\text{m}^2$ . O incremento do índice de refração foi de  $\sim 0,01$  em 1550 nm. O BGW gravado apresentou banda espectral de rejeição de aproximadamente 5,7 dB e reflexão em torno de 18 %, com largura espectral a meia altura de  $\sim 0,12 \text{ nm}$ , ambas centradas em 1551,3 nm. A perda na propagação foi estimada em  $\sim 0,3 \text{ dB/cm}$ .

Posteriormente, (ZHANG et al., 2006b) melhoraram a técnica ao variar a duração dos pulsos e energia do laser de gravação para 320 fs e  $3 \mu\text{J/pulso}$ , obtendo um BGW com espectro de transmissão com rejeição de 11 dB e reflexão de 36 %, ambos com largura espectral a meia altura de 0,08 nm e centradas em 1551,2 nm. O BGW citado foi produzido em borosilicato com extensão de 25 mm e houve um incremento da perda em relação à obtida por Zhang et al. (2006a) de  $0,3 \text{ dB/cm}$  para  $0,6 \text{ dB/cm}$ . Uma melhoria nas características espectrais de transmissão e reflexão de BGW em sílica fundida foi obtida utilizando-se um laser de fibra IMRA FCPA, com taxa de emissão entre 100 kHz a 1 MHz (ZHANG et al., 2007). O feixe do laser foi modulado acusticamente para gerar uma emissão com taxa de repetição de 500 Hz e ciclo de trabalho de 60 %. Além da modulação, o feixe passou por um cristal de tribonato de lítio com espessura de 3 mm para geração de um feixe com emissão centrada em 522 nm, com duração dos pulsos de 300 fs. O feixe foi focalizado através de uma lente com  $\text{AN} = 0,55$ , a uma profundidade de  $75 \mu\text{m}$  a partir da face superior do substrato, que foi deslocado perpendicularmente aos pulsos do laser de gravação com velocidade de  $0,2678 \text{ mm/s}$ ,

gerando uma periodicidade da modulação do incremento do índice de refração de 535,6 nm. O BGW obtido apresentou uma rejeição de 35 dB e reflexão de  $\sim 89\%$ , ambos com largura espectral a meia altura de aproximadamente 0,2 nm e centradas em 1547,95 nm, com uma perda na propagação de 0,6 dB/cm.

No trabalho de Dubov et al. (2007) foram estudados os parâmetros que podem influenciar na redução da dimensão do feixe focalizado e, assim, possibilitar uma melhor resolução na produção dos BGW, permitindo periodicidades da modulação do índice de refração inferiores as anteriormente obtidas de  $\sim 500$  nm. Foram relatados o nível de energia de cada pulso, o comprimento de onda do laser e a polarização do feixe do laser como variáveis passíveis de otimização para a redução da periodicidade das estruturas produzidas. A técnica utilizada foi a ponto a ponto, proposta por Zhang et al. (2006) e o substrato usado foi sílica fundida. A velocidade de deslocamento do substrato foi de  $\sim 0,3$  mm/s, taxa de repetição dos pulsos de 1 kHz, 82 nJ/pulso e polarização do feixe do laser perpendicular à direção de deslocamento. O comprimento de onda do laser foi reduzido de 800 nm para 267 nm com a técnica descrita por Kudriasov et al. (2007), sendo a duração dos pulsos alterada de 150 fs em 800 nm para aproximadamente 300 fs em 267 nm. A menor periodicidade da alteração estrutural produzida para os parâmetros citados foi de  $\sim 300$  nm, em uma profundidade de 300  $\mu\text{m}$ . Posteriormente, o mesmo grupo obteve uma periodicidade das estruturas de  $\sim 250$  nm (DUBOV et al., 2008) mediante pequenas alterações da técnica descrita por Dubov et al. (2007): o feixe do laser foi polarizado paralelamente à direção de deslocamento do substrato, a energia dos pulsos reduzida para 30 nJ/pulso e a profundidade das alterações para 170  $\mu\text{m}$ . Contudo, em nenhum dos trabalhos, as alterações contendo periodicidade estrutural de 300 nm e de 250 nm foram caracterizadas em termos da capacidade de guiamento da luz e nem de operacionalidade do BGW (DUBOV et al., 2007, 2008), somente foram inspecionadas por técnicas de microscopia, visualizando os perfis das alterações estruturais e estimando suas periodicidades mínimas. O que os resultados desses autores demonstraram é uma potencial modulação do incremento do índice de refração em guias de onda óticos com periodicidade da ordem de 250 nm.

Os dispositivos citados, até agora, foram produzidos em substratos passivos. Para dispositivos óticamente ativos são usados materiais que possuem ciclo ótico de absorção e emissão de luz. Alguns exemplos de dispositivos ativos em sistemas óticos são os amplificadores óticos (FERNANDEZ et al., 2010; VALLÉS et al., 2010), chaves óticas (WEHRMANN et al., 1996; AKIN; DINLEYICI, 2010) e lasers (MOLLENAUER; OLSON, 1974; GUSEV et al., 1978; TER-MIKIRTYCHEV, 1995; YLINIEMI et al., 2006; KUROBORI et al., 2007; VALLÉS et al., 2010).

Diversos substratos óticamente ativos são utilizados na produção de dispositivos óticos, sendo alguns deles o Érbio dopado com Itérbio, Er:Yb (FUERBACH et al., 2010; VALLÉS et al., 2010; MARSHALL et al., 2008), Yb dopado (FUERBACH et al., 2010; BORCA et al., 2007; AMS et al., 2009), cristal de KCl:Li (SCHNEIDER; C., 1983; BJORKLUND et al., 1976), cristais de NaF:Li, CaF<sub>2</sub>:Na, SrF:Na, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (MIROV; BASIEV, 1995), cristal de LiF contendo centros de cor dos tipos F<sub>2</sub><sup>-</sup>, F<sub>2</sub>, F<sub>2</sub><sup>+</sup>, F<sub>2</sub><sup>\*\*\*</sup>, F<sub>3</sub><sup>+</sup> (TER-MIKIRTYCHEV; TSUBOI, 1996; TSUBOI; TER-MIKIRTYCHEV, 1996; KUROBORI et al., 2003; KAWAMURA et al., 2004b; MARTYSHKIN et al., 2004; MOLLENAUER et al., 1978). Entre os substratos citados, o cristal de LiF será tratado mais detalhadamente por compor o objeto de estudo desta tese.

### 1.1.3 Centros de Cor e Lasers de Centros de Cor

Em um cristal de LiF óticamente ativo, o mecanismo de absorção e emissão de luz é atribuído a defeitos pontuais na estrutura atômica do cristal (FOWLER, 1968, p. 61 e 121). Os defeitos pontuais citados são chamados de centros de cor, sendo que nem todo CC é óticamente ativo, ou seja, emite a energia absorvida na forma de fótons. Alguns CC são passivos óticamente, significando que emitem a energia absorvida por mecanismos que não envolvem a emissão de fótons, como fônons ou transferência de carga, dentre outros (FOWLER, 1968, p. 61).

CC em cristais de halogenetos alcalinos, categoria na qual se enquadra o LiF, são pesquisados desde a década de 1930, conforme relatado em um trabalho de revisão publicado em 1954 (SEITZ, 1954). Nesse trabalho foram compilados e apresentados resultados principalmente de investigações sobre os cristais de NaCl, KCl e KBr. Porém, já eram observadas peculiaridades do cristal de LiF entre os cristais estudados. Cogitou-se, inicialmente, que seriam impurezas contidas nos cristais de LiF as responsáveis pelas diferenças desse cristal em relação aos demais cristais da classe dos halogenetos alcalinos analisados (SEITZ, 1954; BALDACCHINI, 2002). Ao longo das pesquisas sobre LiF constatou-se que seu comportamento é realmente singular na sua classe: é praticamente não higroscópico, duro, bom dielétrico, suporta diversos CC estáveis em temperatura ambiente (BALDACCHINI, 2002) e com eficiência do ciclo ótico de 100 % para os centros F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub><sup>+</sup> (TER-MIKIRTYCHEV; TSUBOI, 1996). Atribuem-se as características peculiares do LiF, entre os halogenetos alcalinos, ao fato de o cristal possuir a menor distância entre os cátions e os ânions (FOWLER, 1968, p. 625)(BALDACCHINI, 2002), e ao fato dos íons de Li<sup>+</sup> e F<sup>-</sup> possuírem os menores raios entre os íons dos halogenetos alcalinos, além do menor índice de refração, ~1,3912 em 632,8 nm e da maior energia da banda proibida ~14 eV (BALDACCHINI, 2002).

As características dos CC produzidos em cristal de LiF foram investigadas com mais detalhamento a partir da década de 60 (NAHUM; WIEGAND, 1967; NAHUM, 1967), quando dúvidas sobre uma banda de absorção, denominada de banda M, foram esclarecidas, relatando-se que esta era composta por duas bandas, praticamente sobrepostas, uma em 458 nm, atribuída ao centro  $F_3^+$  e a outra em 441 nm, atribuída ao centro M, com o centro  $F_3^+$  tendo uma banda de emissão em torno de 528 nm e o centro M com banda de emissão centrada em, aproximadamente, 670 nm. Por questões de coerência com as primeiras referências sobre o assunto, manteve-se, até agora, a nomenclatura das bandas de absorção sobrepostas de banda M, embora o segundo centro tenha sido identificado como o centro  $F_2$ , nomenclatura adotada a partir do trabalho de Schneider e Rabin (1964). Em Nahum (1967) também foram relatas investigações sobre o centro de cor  $F_2^+$ , com absorção em torno de 645 nm e emissão em torno de 910 nm. Todos os centros de cor estudados nesses trabalhos (SCHNEIDER; RABIN, 1964; NAHUM; WIEGAND, 1967; NAHUM, 1967) foram produzidos por exposição do cristal de LiF a raios-X.

A aplicação de cristais óticamente ativos, devido à presença de CC, como meio ativo empregado na construção de lasers é pesquisada desde a metade da década de 60. Tais lasers são conhecidos como lasers de centros de cor - CCL (*Color Center Laser*), sendo o primeiro CCL construído utilizando-se como meio ativo um cristal de KCl dopado com Li, contendo CC do tipo  $F_A(II)$  (FRITZ; MENKE, 1965). Esses centros de cor, incorporados naquele cristal, são instáveis em temperatura ambiente (FOWLER, 1968, p. 221)(MOLLENAUER; OLSON, 1974), por isso tal CCL utilizou um sistema de refrigeração por nitrogênio líquido. O estudo de CCLs foi pouco desenvolvido desde a sua primeira demonstração, retornando a ser alvo de interesse praticamente uma década depois; a partir da metade da década de 70 o desenvolvimento de CCLs voltou a ser alvo do interesse de pesquisadores e de grandes laboratórios que voltaram a investigar o uso de KCl:Li com CC do tipo  $F_A(II)$  como meio ativo operando em 77 K (MOLLENAUER; OLSON, 1974, 1975; BJORKLUND et al., 1976). O estudo sobre a estabilidade e o ciclo ótico, em temperatura ambiente, dos cristais de LiF e de NaF contendo CC dos tipos  $F_2$ ,  $F_2^+$  e  $F_3^-$ , foram publicados a partir do final da década de 1970 (GUSEV et al., 1978, 1980). As emissões relatadas nestas publicações cobrem o espectro de 0,6  $\mu\text{m}$  a 1,3  $\mu\text{m}$ . As cavidades óticas ressonantes dos CCLs podem ser compostas usando três espelhos (ARKHANGEL'SKAYA; FEOFILOV, 1980; MOLLENAUER; OLSON, 1975) ou dois (GUSEV et al., 1978; TSUBOI; GU, 1994). Tais cavidades representam um ponto crítico para o alinhamento ótico, aumentando a sua complexidade estrutural. Uma alternativa é o uso, como descrito na seção seguinte, de cavidades óticas ressonantes formadas por realimentação distribuída.

### 1.1.3.1 Lasers de centros de cor com realimentação distribuída

O uso de estruturas periódicas, em termos da modulação do incremento do índice de refração ou do coeficiente de ganho, é investigado desde o final da década de 60 como formadores de cavidades óticas com realimentação distribuída, chamadas de DFB (*Distributed Feedback*), e aplicadas na construção de lasers, sendo ressaltada sua capacidade de sintonia (TIEN et al., 1969; KOGELNIK; SHANK, 1971).

O emprego de DFBs em cristais contendo CC ativos foi inicialmente reportado na metade da década de 70 (BJORKLUND et al., 1976). No trabalho citado, foi utilizado um cristal de KCl:Li, no qual foram produzidos CC do tipo  $F_A(II)$  utilizando-se dois feixes de laser, ambos com comprimento de onda de 266 nm, combinados para formar um padrão interferométrico e, assim, obter estruturas periódicas em termos da densidade de CC no interior do cristal. Os centros de cor  $F_A(II)$  são instáveis em temperatura ambiente (FOWLER, 1968, p. 221)(MOLLENAUER; OLSON, 1974), portanto, o cristal foi imerso em nitrogênio líquido. A banda de emissão dos centros de cor  $F_A(II)$  em cristal de KCl:Li é de aproximadamente 2,5  $\mu\text{m}$  a 3,2  $\mu\text{m}$  (MOLLENAUER; OLSON, 1975). A periodicidade das franjas do padrão interferométrico foi ajustada regulando-se o ângulo no qual os dois feixes do laser de gravação foram combinados, sendo obtidas três periodicidades das DFBs: 0,8804  $\mu\text{m}$ , 0,9185  $\mu\text{m}$  e 0,9483  $\mu\text{m}$  produzindo, assim, emissão laser em torno de 2,5878  $\mu\text{m}$ , 2,7033  $\mu\text{m}$  e 2,7921  $\mu\text{m}$ , respectivamente, demonstrando, desta forma, a capacidade de sintonia das estruturas DFBs (BJORKLUND et al., 1976).

Usando um cristal de LiF, com CC do tipo  $F_2$  produzidos pela exposição do cristal a raios-X, um CCL estável em temperatura ambiente foi produzido por Kurobori et al. (1983). A cavidade DFB foi formada temporariamente, em termos da periodicidade do ganho, utilizando-se dois feixes de laser, ambos com comprimento de onda de 450 nm, combinados para formação do padrão interferométrico gerando, com isso, uma emissão laser centrada em 686 nm e com largura espectral a meia altura de aproximadamente 0,2 nm. Entretanto, os CC produzidos no cristal de LiF apresentaram-se óticamente sensíveis, sendo sua densidade reduzida significativamente após 500 pulsos do laser de bombeamento.

O uso de dois feixes combinados do laser de gravação para a formação de cavidades DFB com modulação de ganho temporária por padrão interferométrico tem a vantagem de uma sintonização por controle do ângulo de cruzamento entre os feixes. Porém, a técnica apresenta problemas de estabilidade mecânica e repetibilidade, sendo requerida uma alta complexidade do sistema operacional do laser.

A produção de microestruturas periódicas em termos do incremento do índice de refração simultaneamente à criação de CC dos tipos F, F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub><sup>+</sup> em cristal de LiF foi inicialmente relatada por Kurobori et al. (2003). O processo utilizado para a produção das alterações estruturais usou uma técnica interferométrica semelhante à relatada anteriormente, com a diferença do laser possuir pulsos de curta duração na ordem de femtosegundos. O laser empregado foi de Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (800 nm, 10 Hz, 100 fs). Após a exposição aos pulsos do laser de fs, o cristal de LiF foi armazenado por 24 horas numa câmara escura, sendo constatado que os CC do tipo F<sub>2</sub> praticamente degradaram-se por completo após este período. Além disso, foi analisado o incremento do índice de refração nas regiões do cristal de LiF expostas aos pulsos do laser de fs, utilizando energia de 100 μJ/pulso, com o feixe focalizado no interior do cristal através de uma lente com distância focal de 50 mm, sendo o substrato deslocado com velocidade de 50 μm/s. O incremento do índice de refração para essa região exposta, em relação ao índice de refração do cristal, foi de aproximadamente 1 %, em 633 nm.

Quase simultaneamente ao trabalho de Kurobori et al. (2003), foi apresentado o trabalho de Zhong et al. (2003) que usou um único feixe de laser focalizado no interior de um cristal de LiF para a produção de alterações na rede atômica deste. Nesse trabalho, foi utilizado um laser de Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (800 nm, 1 kHz, 120 fs) focalizado em uma profundidade de 1 mm no interior do substrato por meio de uma objetiva de microscópio de 10X com AN = 0,30. A potência média dos pulsos foi de 50 mW e o deslocamento do cristal com velocidade de 1 mm/s. Os CC de cor produzidos foram os centros F e F<sub>3</sub><sup>+</sup>, tais centros permaneceram estáveis em temperatura ambiente, com estabilidade monitorada por dois meses. O incremento do índice de refração em relação ao índice de refração do cristal foi de aproximadamente  $1,08 \times 10^{-3}$  em 532 nm. Usando visualização por microscopia, estimou-se um período de  $\sim 10 \mu\text{m}$  das alterações produzidas. A estabilidade dos CC foi estudada aquecendo-se o cristal, sendo que em, aproximadamente, 300 °C a densidade dos CC extinguiu-se. Entretanto, observou-se que o incremento do índice de refração permaneceu praticamente inalterado. Os autores afirmam que o incremento do índice de refração não está relacionado aos CC e sim devido a rearranjos estruturais e densificação da região exposta aos pulsos do laser focalizados. Não foram encontrados trabalhos posteriores ao de Zhong et al. (2003) que apresentassem estudos sobre a capacidade de guiamento das estruturas produzidas, nem sobre as características de emissões referentes à cavidade DFBS construídas pela técnica aplicada.

Em trabalhos posteriores a Kurobori et al. (2003), foi apresentado o desenvolvimento de um CCL com cavidade DFB em cristal de LiF contendo CC do tipo F<sub>2</sub> (KUROBORI et al., 2004; KAWAMURA et al., 2004a, 2004b; KUROBORI et al., 2005; KAWAMURA et al., 2006). Nesses trabalhos o problema da estabilidade dos centros de cor F<sub>2</sub> relatado anteriormente

(KUROBORI et al., 2003) foi resolvido expondo-se, após o processo de formação dos CC, o cristal de LiF a raios-X por até 3 horas. Em (KUROBORI et al., 2007), utilizando-se um laser de Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (800 nm, 1 kHz, 120 fs) focalizado em uma profundidade de 100 μm no interior do substrato através de uma lente com  $f = 100$  mm, foram produzidas microestruturas com periodicidade de aproximadamente 510 nm, utilizadas na composição da cavidade DFB, obtendo, a partir dessa, uma emissão laser centrada em torno de 707 nm, com largura de banda a meia altura de 0,1 nm, caracterizando, assim, uma rede de Bragg de segunda ordem. O bombeamento foi realizado por um laser pulsado com frequência de 10 Hz, banda de emissão centrada em torno de 450 nm e energia de 0,8 mJ/pulso. Para bombeamento utilizando energia acima de 1 mJ/pulso os CC do tipo F<sub>2</sub> degradaram-se após alguns minutos (KUROBORI et al., 2005). Apesar de serem produzidos CC dos tipos F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub><sup>+</sup>, somente o laser com emissão localizada na banda de emissão do centro F<sub>2</sub>, entre ~610 nm a 760 nm (TER-MIKIRTYCHEV; TSUBOI, 1996; BALDACCHINI, 2002) foi produzido, porque o período mínimo obtido nas microestruturas, pela técnica utilizada, foi de 430 nm, sendo necessária uma periodicidade de aproximadamente 390 nm para a produção de um laser com realimentação do tipo DFB e emissão localizada dentro da banda de emissão do centro F<sub>3</sub><sup>+</sup>, ~ 510 nm a 580 nm (TER-MIKIRTYCHEV; TSUBOI, 1996; BALDACCHINI, 2002), sendo as periodicidades relacionadas as bandas dos centros F<sub>3</sub><sup>+</sup> e F<sub>2</sub> por redes de Bragg de segunda ordem.

A obtenção de periodicidade na ordem de 390 nm foi obtida pelo mesmo grupo, usando padrão interferométrico gerado a partir de uma divisão e posterior agrupamento do feixe do laser de gravação (OBAYASHI et al., 2008; KUROBORI et al., 2008b, 2008a). Empregou-se um laser de Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (780 nm, 10 Hz, 150 - 500 fs) na fabricação das microestruturas com periodicidade em torno de 500 nm para atuação na banda de emissão do centro do tipo F<sub>2</sub>. Para gravação das microestruturas com periodicidade em torno de 390 nm, o feixe do laser de gravação teve sua frequência dobrada, tendo o feixe resultante um comprimento de onda central de 390 nm, sendo o procedimento de produção das microestruturas realizada por padrão interferométrico. Após a exposição do cristal de LiF aos pulsos do laser de fs o cristal foi exposto a raios-X e a feixe de elétrons para aumento da densidade dos CC dos tipos F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub><sup>+</sup>, respectivamente (KUROBORI et al., 2008b, 2008a). A estrutura foi produzida focalizando-se os feixes combinados do laser com uma lente,  $f = 75$  mm, a uma profundidade de 150 μm, com um diâmetro aproximado de 150 μm e extensão de 15 mm. As estruturas foram expostas a um laser de bombeio, focalizado sobre as estruturas com uma lente cilíndrica, com banda de emissão em torno de 460 nm, taxa de repetição de 10 Hz e energia de ~1,5 mJ/pulso. A emissão do CCL produzido utilizando uma cavidade DFB com periodicidade do incremento do índice de refração em torno de 390 nm apresentou emissão laser com banda centrada em 537 nm, largura

espectral na meia altura de 0,5 nm, 4 % de eficiência e divergência do feixe de 20 mrad. O limiar de emissão laser foi de  $\sim 0,8$  mJ/pulso. Os CC produzidos degradam-se quando expostos a altas energias de bombeio, por isso foram expostos a pulsos de bombeio com energia menor que  $\sim 1,5$  mJ/pulso e com taxa de repetição de 1 Hz.

Em substratos de vidro fosfatado dopado com Itérbio e Érbio (MARSHALL et al., 2008) e somente com Itérbio (AMS et al., 2009), a técnica ponto a ponto de gravação foi aplicada com sucesso na produção de lasers de guias de onda de Bragg de primeira ordem com banda de emissão em torno de 1537 nm e 1033 nm, respectivamente, ambas com largura espectral na meia altura em torno de 4 pm. Nos dois trabalhos, os guias produzidos apresentaram seção transversal circular, obtido pelo posicionamento de uma fenda antes da objetiva para focalização do feixe do laser de fs, resultando num diâmetro entre 7  $\mu\text{m}$  a 8  $\mu\text{m}$ , ambos apresentando propagação monomodal na banda C. Os lasers de guia de onda de Bragg apresentaram potências de aproximadamente 0,37 mW (MARSHALL et al., 2008) e 100 mW (AMS et al., 2009).

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A técnica de inscrição ponto a ponto de guias de onda de Bragg foi aplicada com resultados funcionais em substratos passivos e ativos. Em substratos ativos, o potencial para o desenvolvimento de lasers microestruturados através de realimentação com cavidade do tipo DFB foi demonstrado para emissões laser na banda do infravermelho em substrato de vidro fosfatado dopado com Itérbio e/ou Érbio (MARSHALL et al., 2008; AMS et al., 2009). Em termos macroscópicos, a utilização do cristal de LiF, com diferentes CC, como meio ativo foi relatada, tanto com cavidades óticas externas, como com cavidades DFB. Foram relatados lasers de centros de cor integrados em cristal de LiF com dimensões de dezenas de micrometros produzidos por técnica interferométrica (OBAYASHI et al., 2008), com periodicidade mínima da rede de 390 nm. Em sílica fundida, foi relatada uma periodicidade mínima da alteração estrutural de 250 nm, porém, sem comprovação de capacidade de guiamento ótico ou formação de cavidade DFB (DUBOV et al., 2008). Até o momento, um laser de centro de cor, integrado com guia de onda em cristal de LiF, produzido por técnica ponto a ponto, com capacidade de emissão entre a banda do verde e do vermelho, não foi relatado. Assim, o potencial da aplicação da técnica ponto a ponto de gravação para a produção de guia de onda de Bragg, como elemento constituinte de uma cavidade ótica de realimentação em cristal de fluoreto de lítio, apresenta-se como uma área a ser desenvolvida.



### 1.2.1 Objetivo Geral

Contribuir com o desenvolvimento de um laser de centro de cor integrado em um guia de onda ótico gravado em cristal de LiF.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Aplicar a técnica ponto a ponto para gravar guias de onda óticos em cristal de LiF;
- Caracterizar os guias de onda óticos produzidos;
- Investigar a modulação do incremento do índice de refração induzido pelo laser de gravação;
- Investigar os tipos de centros de cor produzidos no processo de gravação dos guias.

## 1.3 ESTRUTURA DA TESE

No capítulo 2 são apresentados os conceitos teóricos relevantes para o desenvolvimento desta tese. No capítulo 3 são descritos os métodos e arranjos experimentais implementados para gravação e caracterização das alterações estruturais produzidas no cristal de LiF. No capítulo 4 são discutidos e apresentados os resultados. Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os aspectos teóricos relevantes para o desenvolvimento desta tese. Inicialmente, discorre-se sobre a técnica de gravação de guias de ondas usando um feixe de laser focalizado no interior de um substrato. É explanado o princípio de operação de uma rede de Bragg produzida em um guia de onda ótico e o conceito e a técnica de produção ponto a ponto de guias de onda de Bragg.

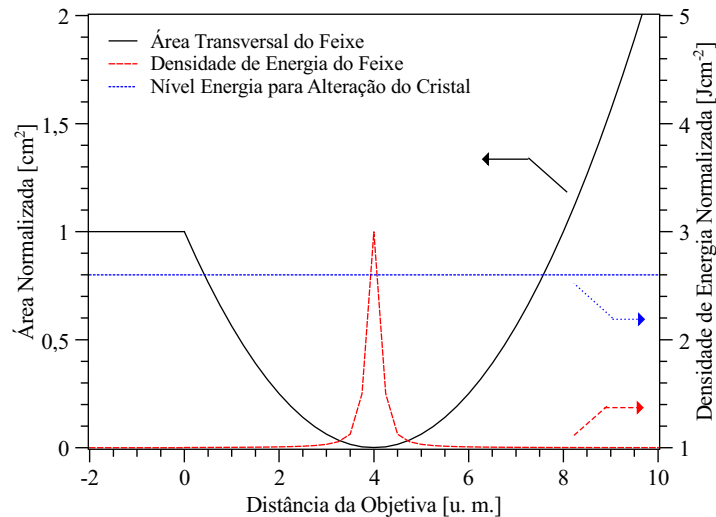
As características do cristal de LiF são comentadas, entre elas a possibilidade de conterem centros de cor, que são definidos. Discorre-se, então, sobre a capacidade dos centros de cor de absorverem e emitirem fótons e, por fim, é abordada a produção de centros de cor no cristal de LiF pela interação deste com pulsos de laser com duração na ordem de femtosegundos.

### 2.1 GRAVAÇÃO DE GUIAS DE ONDA ÓTICOS

Neste trabalho, a produção dos guias de ondas óticos foi realizada através da focalização, utilizando-se de uma objetiva de microscópio, de um feixe de laser com pulsos com duração na ordem de femtosegundo, no interior de um cristal LiF, que foi então deslocado perpendicularmente à direção de propagação do feixe focalizado. O laser focalizado possui uma densidade de energia na região focal capaz de produzir alterações na rede atômica do substrato, densificação e formação de centros de cor, induzindo, assim, um incremento do índice de refração na região exposta às altas densidades de energia (BALDACCHINI, 2002; COURROL et al., 2004; ZHONG et al., 2003). A Figura 2 mostra um gráfico que representa, qualitativamente, o processo de focalização e densificação da energia do feixe do laser no interior do cristal, sendo:

1. Curva contínua (preta): área da seção reta transversal do feixe;
2. Curva tracejada (vermelha): densidade de energia, sendo essa a relação entre a energia do feixe do laser e a área da sua seção reta transversal e;

3. Linha pontilhada (azul): limiar de energia necessária para modificação na estrutura da rede atômica do cristal de LiF.



**Figura 2 – Relação entre área da seção transversal do feixe focalizado, da densidade de energia, e do nível de energia necessário para alteração da estrutura interna do cristal de LiF.**

No gráfico acima, observa-se que a alteração da rede atômica do cristal é delimitada na região onde a densidade de energia do feixe focalizado do laser de gravação está acima do limiar para induzir uma alteração estrutural no cristal.

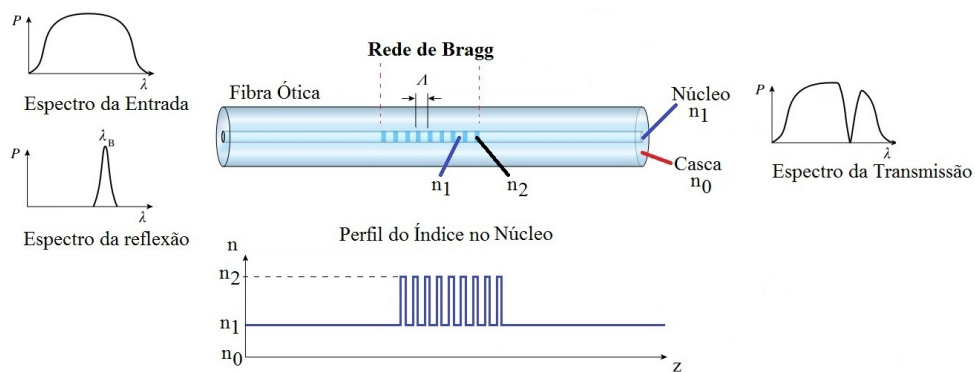
Utilizando uma relação apropriada entre a taxa de emissão dos pulsos do laser de gravação e a velocidade de deslocamento do substrato é possível induzir alterações estruturais no interior da amostra de forma não homogênea. Tal técnica permite que estruturas periódicas, como uma rede de Bragg integrada ao guia de onda, sejam produzidas.

## 2.2 REDES DE BRAGG EM GUIAS DE ONDA

A rede de Bragg, na sua configuração básica (OTHONOS; KALLI, 1999, p. 95), consiste de uma modulação periódica do índice de refração do núcleo de um guia de onda óptico. Uma onda que se propaga através de uma rede de Bragg sofre reflexão parcial em cada ponto onde há variação do índice de refração. Se a condição de Bragg é satisfeita, as parcelas refletidas da onda se combinam formando, assim, uma onda contra propagante com comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede de Bragg: ordem e período, sendo a condição de Bragg expressa por (HILL; MELTZ, 1997)

$$\lambda_B = \frac{2n_{eff}\Lambda}{N}, \quad (1)$$

onde  $N$  é a ordem da rede de Bragg,  $n_{eff}$  o índice de refração efetivo,  $\Lambda$  a periodicidade da modulação do índice de refração e  $\lambda_B$  o comprimento de onda de Bragg. A Figura 3 ilustra uma rede de Bragg em um guia de onda óptico com seção reta transversal cilíndrica, também são ilustrados o perfil do índice de refração ao longo do eixo de propagação  $z$  e os espectros teóricos de um dado sinal na entrada, na transmissão e sua reflexão.

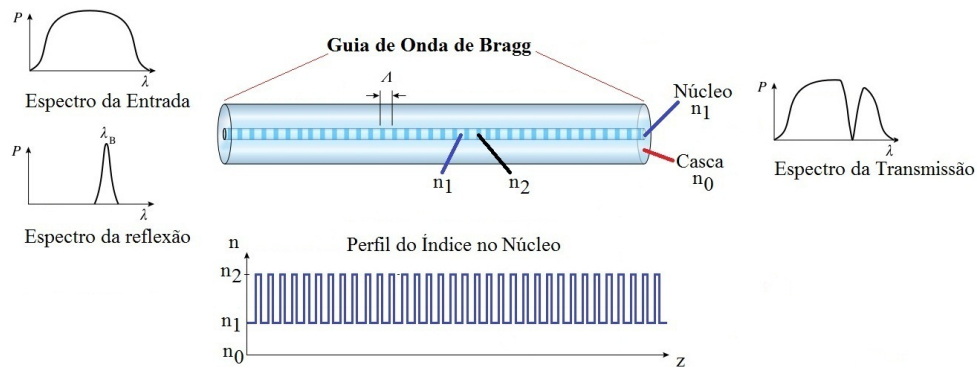


**Figura 3 – Rede de Bragg em um guia de onda cilíndrico: FBG (*Fiber Bragg Grating*).**

A rede de Bragg está presente em uma região delimitada ao longo do núcleo do guia de onda no qual há uma modulação periódica do incremento do índice de refração  $n_2$  em relação ao índice  $n_1$ , sendo  $n_0$  o índice de refração da casca do guia. Para um sinal de entrada acoplado no guia de onda, que possua uma banda larga do espectro de comprimento de onda, a rede de Bragg atuará refletindo uma parcela do sinal com banda estreita centrada no comprimento de onda  $\lambda_B$ . Idealmente, o espectro do sinal transmitido através da rede de Bragg consistirá do espectro do sinal de entrada menos a parte do espectro que foi refletida. As redes de Bragg são produzidas em uma região delimitada ao longo do guia, enquanto que um guia de onda de Bragg apresenta a modulação do índice de refração do núcleo ao longo de todo o guia de onda.

### 2.2.1 Guias de Onda de Bragg

Nesta estrutura a modulação do índice de refração é inerente a toda extensão do guia. A Figura 4 ilustra o princípio estrutural do guia de onda de Bragg, o perfil do índice de refração ao longo do eixo de propagação  $z$  e os espectros teóricos de um dado sinal na entrada, na transmissão e sua reflexão. Em termos dos espectros do sinal de entrada, de saída e refletido, não há nenhuma diferença significativa entre uma rede de Bragg e um guia de onda de Bragg.



**Figura 4 – Guia de Onda de Bragg: BGW.**

Para condições semelhantes de incremento e modulação dos índices de refração do núcleo, indicados por  $n_2$  e  $n_1$  nas Figura 3 e Figura 4, pode existir uma diferença devido ao estreitamento das bandas centradas no comprimento de onda  $\lambda_B$  devido a uma maior extensão na qual a onda contra propagante apresenta as condições construtivas e destrutivas, no guia de onda de Bragg, que resultam nos espectros característicos de reflexão e transmissão.

### 2.2.2 Processo de Gravação de Guias de Onda de Bragg em Substrato Dielétrico

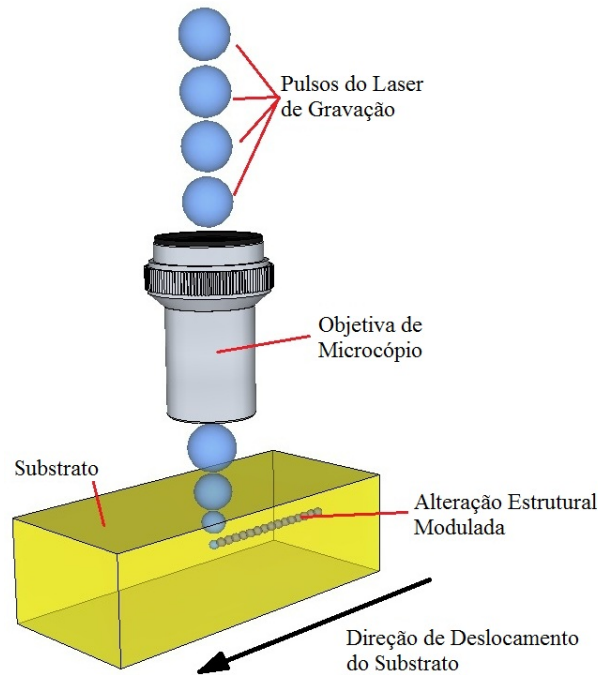
Utilizando um laser de gravação pulsado, pode-se determinar a periodicidade desejada da rede de Bragg, produzida simultaneamente com o guia de onda ótico, relacionando a velocidade de deslocamento do substrato com a taxa de repetição dos pulsos do laser por meio da seguinte relação

$$v_{deslocamento} = \Lambda f_{rep.}, \quad (2)$$

onde  $f_{rep.}$  é a taxa de repetição dos pulsos do laser de gravação e  $\Lambda$  o período da rede de Bragg, que pode ser determinado a partir de um comprimento de onda de Bragg específico  $\lambda_B$ , relacionados, para uma rede de primeira ordem, conforme a Equação (1), por  $\Lambda = 2n_{eff}/\lambda_B$ . A Figura 5 mostra o princípio de gravação descrito de um guia de onda de Bragg.

A técnica descrita, chamada de ponto-a-ponto, consiste em expor regiões do substrato a uma sequência de pulsos pouco sobrepostos, durante um deslocamento contínuo do substrato (ZHANG et al., 2006a). Outra técnica de gravação de guias de onda de Bragg consiste em deslocar o substrato em pequenos passos. Entre cada deslocamento o substrato é parado e uma sequência de pulsos do laser de gravação é disparada. Para-se, então, a emissão do laser de gravação e desloca-se a amostra para o próximo passo, repetindo o processo de exposição à

sequência de pulsos ao longo de todo o guia de onda (ZHANG et al., 2007).



**Figura 5 – Detalhe do laser pulsado focalizado e formação do guia de onda de Bragg.**

### 2.3 PROPRIEDADES DO FLUORETO DE LÍTIU

Um sal é uma estrutura química binária, sendo uma parte um halogênio e a outra parte um elemento, ou um radical, que possui menos eletronegatividade que o halogênio. Podem-se classificar os sais em diferentes grupos de acordo com as características dos elementos ou grupos de elementos que os compõem. Um sal com estrutura atômica regular é classificado como cristal. Alguns desses grupos são os cristais halogenetos alcalinos, fluoretos alcalinos terrosos e ainda os sais de óxidos metálicos:

- **Halogenetos alcalinos:** formados por compostos iônicos que possuem formulação do tipo  $X^+Y^-$  sendo X um metal alcalino e Y um halogênio;
- **Fluoretos alcalinos terrosos:** formulação  $X(F^-)_2$ , sendo X um elemento alcalino terroso e;
- **Óxidos metálicos:** formulação  $(X)_n(O_2^-)_m$ , onde X é o elemento metálico, n e m o número de cada elemento conforme o cálculo estequiométrico do composto.

O fluoreto de lítio, LiF, é um sal formado por íons de flúor e lítio pertencente à classe dos halogenetos alcalinos (LOWER, 2008, c. 7). Os elementos químicos classificados

como metais alcalinos pertencem à família 1A da Tabela Periódica, com o lítio (Li) fazendo parte desse grupo. O flúor pertence à família 7A da Tabela Periódica, que forma a série dos halogênios. Os elementos dessa família possuem 7 elétrons na camada de valência, sendo a sua configuração eletrônica terminada no nível p, com cinco elétrons. Naturalmente se apresentam como moléculas diatômicas:  $X_2$ . A estabilidade química é atingida nos halogênios incluindo-se um elétron no último nível da camada eletrônica ocorrendo, assim, a formação de um íon  $X^-$ , chamado de haleto ou halogeneto.

O cristal de LiF é isotrópico, não radioativo, dielétrico, não higroscópico, estável, duro e transparente na banda entre  $\sim 105$  nm e  $\sim 9000$  nm (BALDACCHINI, 2002). Em relação a outros cristais da classe dos halogenetos alcalinos, o cristal de LiF apresenta características peculiares como: menor distância entre seus elementos componentes, 0,2014 nm (FOWLER, 1968, p. 625), pois seus íons,  $Li^+$  e  $F^-$ , apresentam os menores raios entre os materiais alcalinos e halógenos, respectivamente, também possui o menor índice de refração, aproximadamente 1,3912 em 632,8 nm, e a maior banda proibida, aproximadamente 14 eV, entre os materiais halogenetos alcalinos e dielétricos em geral (BALDACCHINI, 2002). A rede atômica que compõe o cristal de LiF é do tipo cúbica de face centrada, com um Li em (000) e um F em (1/21/21/2), conforme ilustra a Figura 6.

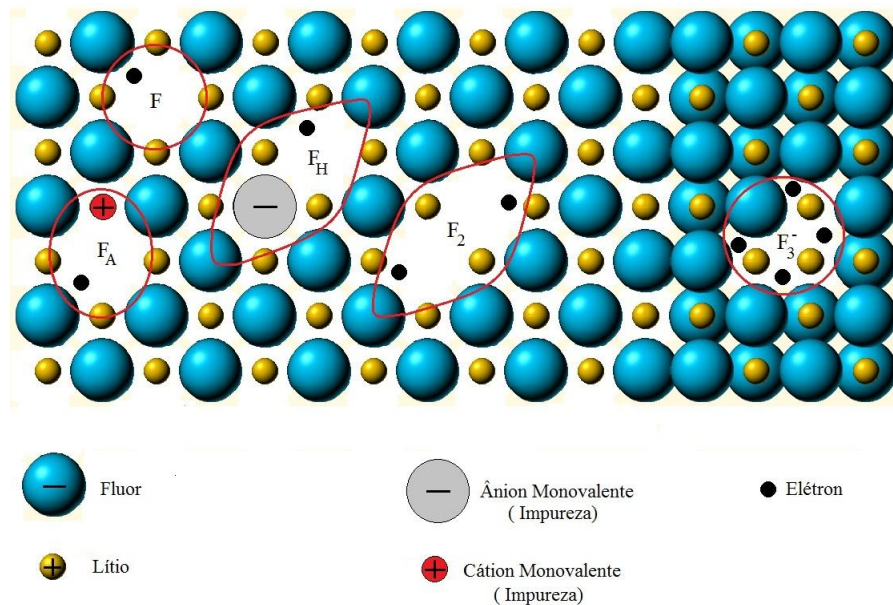


**Figura 6 – Cristal de LiF com distribuição cúbica de face centrada (GRICEITE, 2009).**

Além das características citadas, uma é de especial interesse: a possibilidade de formação de defeitos pontuais na rede atômica cristalina do LiF estáveis em temperatura ambiente. Esses defeitos são chamados de centros de cor, CC, e podem ser opticamente ativos em termos de emissão da energia absorvida por eles (TER-MIKIRTYCHEV; TSUBOI, 1996; TSUBOI; GU, 1994; BASIEV et al., 1988). Existem diferentes maneiras de produzir e modificar tais CC, entre elas a exposição de um cristal de LiF a raios-X (NAHUM, 1967; NAHUM; WIEGAND, 1967), raios- $\gamma$  (TER-MIKIRTYCHEV; TSUBOI, 1996), feixe de elétrons (BALDACCHINI, 2002; MONTEREALI; PICCININI, 2002), íons (PEREIRA et al., 2005; MUSSI et al., 2005), luz laser (VINCENTI et al., 2006; KALINOWSKI et al., 2010).

### 2.3.1 Centros de Cor em LiF

Centros de cor são defeitos pontuais localizados em uma rede atômica que podem ou não prender um elétron ou uma vacância a eles. O tipo mais simples de CC é conhecido como centro F e é formado por um elétron preso em uma vacância aniônica. Outros tipos de CC da mesma família consistem de uma associação entre dois ou mais centros F, com diferentes números de elétrons presos em uma dada vacância, ou do centro F associados a impurezas, chamados então de centros F agregados (ARKHANGEL'SKAYA; FEOFILOV, 1980; BALDACCHINI, 2002). A Figura 7 ilustra alguns dos centros de cor que podem ser formados em um cristal de LiF.



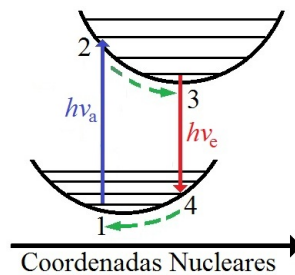
**Figura 7 – Alguns dos centros de cor que podem ser comportados em um cristal de LiF.**

Os CC dos tipos  $F_A$  e  $F_H$  possuem outros elementos que não os constituintes do material, sendo tais elementos tratados como impurezas presentes na rede cristalina (BALDACCHINI, 2002). Em ambos os centros há a presença de um elétron preso devido à falta do ânion. O CC do tipo  $F_2$  consiste da associação de dois centros do tipo F ao longo do eixo (110) (TER-MIKIRTYCHEV; TSUBOI, 1996). Se um terceiro elétron é aprisionado no centro  $F_2$ , um CC do tipo  $F_2^-$  é formado, e se um elétron é retirado do centro  $F_2$ , um CC do tipo  $F_2^+$  é então formado. O CC do tipo  $F_3^-$  consiste da ausência de três ânions da rede, distribuídos de forma não planar, formando um triângulo no plano (111) (TSUBOI; TER-MIKIRTYCHEV, 1996), com quatro elétrons aprisionados. Se um elétron é retirado do centro  $F_3^-$ , um CC do tipo  $F_3$  é formado, e se dois elétrons são retirados do centro  $F_3^-$  um CC do tipo  $F_3^+$  é obtido (TER-MIKIRTYCHEV; TSUBOI, 1996; BALDACCHINI, 2002).



### 2.3.2 Ciclo Ótico dos Centros de Cor

O ciclo ótico de um CC ativo se origina da interação entre este e a rede atômica cristalina na qual se encontra, em um processo que envolve a excitação do seu estado eletrônico, relaxação da rede cristalina, desexcitação eletrônica e nova relaxação da rede cristalina. A Figura 8 ilustra o ciclo ótico dos CC em termos da energia através do diagrama de Franck-Condon, onde o estado de repouso é representado pela parábola inferior, enquanto o estado eletrônico excitado é representado pela parábola superior (BASIEV et al., 1988).



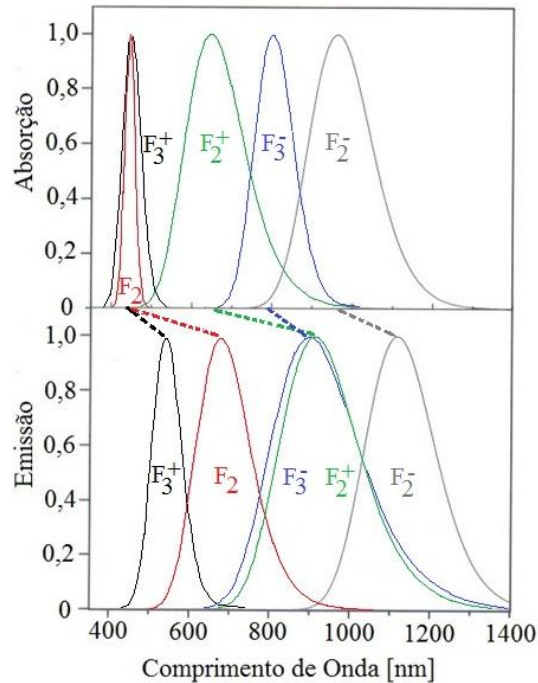
**Figura 8 – Ciclo de absorção e emissão de fótons dos CC.**

Os estados eletrônicos estão em equilíbrio nas indicações 1 e 3, para os estados eletrônicos de repouso e excitado, respectivamente. O estado eletrônico sai do repouso quando é excitado pela absorção de fótons, indicado pela transição 1-2. Há, então, uma reorganização dos íons da rede atômica, bem como a emissão de fônons, transição 2-3. Nesta etapa não há transferência de energia por radiação, sendo o tempo de relaxação da rede cristalina na ordem de  $10^{-12}$  s a  $10^{-13}$  s. Após isto, uma transição radiativa ocorre, transição 3-4, e depois a relaxação do estado vibracional ocorre, transição 4-1, retornando o CC ao seu estado fundamental, indicado por 1. Este ciclo pode ser considerado um sistema de 4 níveis (BASIEV et al., 1988). Os centros dos tipos  $F_2$  e  $F_3^+$ , no LiF, apresentam rendimento ótico de 100% em termos do número de fótons absorvidos e emitidos no decorrer do ciclo descrito, com tempo de decaimento,  $\tau$ , de  $\sim 17$  ns e 11,5 ns, respectivamente (TER-MIKIRTYCHEV; TSUBOI, 1996; BALDACCHINI et al., 2001).

Diferentes CC podem ser produzidos em um cristal de LiF, entre os mais comuns estão os centros do tipo F,  $F_2$ ,  $F_2^+$ ,  $F_2^-$ ,  $F_3$ ,  $F_3^-$ ,  $F_3^+$ , dentre estes, os centros F e  $F_3$  ainda não tiveram suas bandas de emissão identificadas (BASIEV et al., 1988; BALDACCHINI, 2002; COURROL et al., 2006). O centro F possui uma forte banda de absorção em torno de 248 nm, sendo importante porque outros centros de cor podem ser formados a partir da agregação de centros F (BALDACCHINI, 2002).

A Figura 9 mostra as bandas de absorção e emissão para alguns dos CC cor que podem

ser obtidos em cristal de LiF. A diferença entre a banda de absorção e emissão para cada CC é governada por um deslocamento Stokes (BASIEV et al., 1988; TER-MIKIRTYCHEV; TSUBOI, 1996).



**Figura 9 – Bandas de absorção e emissão de alguns dos CC em cristal de LiF (VINCENTI et al., 2010, p. 11).**

Verifica-se que existe sobreposição entre algumas bandas de absorção e emissão, principalmente entre a banda de absorção do CC do tipo  $F_2^+$  e a banda de emissão do centro do tipo  $F_2$ . Porém, os CC  $F_2^+$  são instáveis em temperatura ambiente e, caso não sejam tratados para alcançarem a estabilidade, se degradam por difusão, não havendo mais problemas de sobreposição entre estas bandas (TER-MIKIRTYCHEV; TSUBOI, 1996).

O ciclo de absorção e emissão dos CC ativos potencializa a aplicação de cristais que os contenham como meios ativos na produção de lasers (KUROBORI et al., 2008b), seja com cavidade externa (BASIEV et al., 1988) ou com realimentação distribuída (OBAYASHI et al., 2008), que pode ser implementada através de uma rede de Bragg.

### 2.3.3 Interação do Cristal de LiF com Laser de Femtosegundo

Um mecanismo proposto para formação de CC em cristais de LiF expostos a pulsos de laser com duração na ordem de femtosegundo envolve a ionização por múltiplos fótons (BLOEMBERGEN, 1974). O processo é multifóton porque a banda proibida de energia do LiF é de  $\sim 14$  eV, sendo que para uma laser com banda de emissão centrada em 780 nm são

necessários 9 fótons para ultrapassar essa banda proibida (ZHONG et al., 2003). Nesta proposta, o íon de flúor, que é negativo, torna-se neutro devido à ionização multifóton produzida pelo pulso de femtosegundo. Uma vez que o átomo de flúor não possui carga ele não é mais retido pela rede cristalina, ficando livre para se deslocar sob a influência de elétrons acelerados e deixando para trás uma vacância. Após o pulso, um elétron pode ser capturado pela vacância, formando um centro F. Parte dos centros F combina-se entre si, produzindo CC dos tipos  $F_2$ ,  $F_2^+$  e  $F_3^+$  (COURROL et al., 2004; BALDACCHINI, 2002).

Outra proposta do mecanismo de formação de CC supõe que os fótons provenientes dos pulsos do laser de femtosegundo utilizado desencadeiam uma ionização em avalanche. Tal avalanche seria responsável pela formação de plasma denso de alta absorção que facilitaria a transferência de energia do laser para o cristal. Neste processo seriam formados os centros F e demais centros, conforme descrito anteriormente (COURROL et al., 2004), sendo que, simultaneamente, a expansão do plasma induziria à micro fusão e deslocamento de material, resultando em alteração do índice de refração (ZHONG et al., 2003).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e arranjos experimentais, equipamentos utilizados e procedimentos seguidos durante o desenvolvimento desta tese. Inicialmente descreve-se o processo de gravação e de inspeção visual por microscopia em modo de transmissão dos guias de onda óticos no cristal de LiF. É explanado o experimento para verificar a formação de centros de cor no cristal de LiF, devido à exposição deste ao laser de femtosegundo. São utilizadas, para tal, microscopia confocal e captação do espectro emitido pelos guias quando iluminados com fonte de luz emitindo em torno de 460 nm. Duas configurações de medida dos espectros de emissão são apresentadas, uma captando o espectro de emissão não acoplado e outra captando o espectro de emissão acoplado.

Em seguida é descrito o arranjo experimental empregado na investigação do confinamento de luz pelas estruturas produzidas. Tal investigação foi desenvolvida acoplando nos guias, através de objetiva de microscópio, fontes de luz laser com diferentes bandas de emissão. Usando um microscópio e uma câmera fotográfica acoplada nele, foram obtidas imagens da luz espalhada ao longo dos guias de onda, sendo tais imagens utilizadas na estimativa das perdas na propagação dos guias de onda.

O incremento do índice de refração no núcleo dos guias em relação ao índice de refração do cristal de LiF foi estimado a partir da medida experimental do perfil de intensidade do campo próximo aplicado numa modificação da equação de onda escalar. Usando a estimativa dos índices de refração e simulação numérica dos perfis de campo próximo, foram estimadas as dimensões da seção reta transversal dos guias de onda. A partir do cálculo da frequência normalizada foi analisada a capacidade modal dos guias. A investigação da produção de guias de onda de Bragg foi realizada a partir da análise do espectro de transmissão de uma fonte de banda larga acoplada nos guias.

### 3.1 INSCRIÇÃO DOS GUIAS DE ONDA ÓTICOS EM CRISTAL DE LiF

A gravação dos guias foi realizada em duas visitas ao Departamento de Física da UFPE.

A técnica de gravação utilizada neste trabalho consistiu de um deslocamento contínuo do cristal de LiF, perpendicular ao eixo de propagação de um feixe de laser focalizado no seu interior. Dois cristais de LiF foram utilizados, um cristal de LiF translúcido (sem a presença de centros de cor), com volume de  $30 \times 6 \times 10 \text{ mm}^3$  e outro submetido a radiação gama (resultando em uma coloração amarela devida aos centros de cor formados pela exposição à radiação) com volume de  $15 \times 15 \times 3 \text{ mm}^3$ . As amostras foram crescidas no Instituto de Ciências Físicas de Minsk, Belarus. Devido às faces laterais rugosas e à presença de centros de cor em toda a amostra (cristal amarelado) que dificultava a análise dos CC formados nas regiões expostas ao laser de femtosegundo, somente o cristal translúcido foi caracterizado.

Para a gravação dos guias de onda, foi utilizado um laser de Ti:Safira da marca Coherent, modelo Libra, com banda de emissão centrada em torno de 780 nm, largura espectral na meia altura de aproximadamente 40 nm, duração dos pulsos em torno de 80 fs e taxa de repetição dos pulsos do laser de 1 kHz. O nível de energia do feixe do laser foi ajustado utilizando um disco atenuador linear, sendo a energia monitorada por um medidor Coherent, modelo FieldMaster, posicionado após o disco atenuador e antes da objetiva de microscópio utilizada na focalização do feixe do laser (PI Nacet France GF T.I.R 20X).

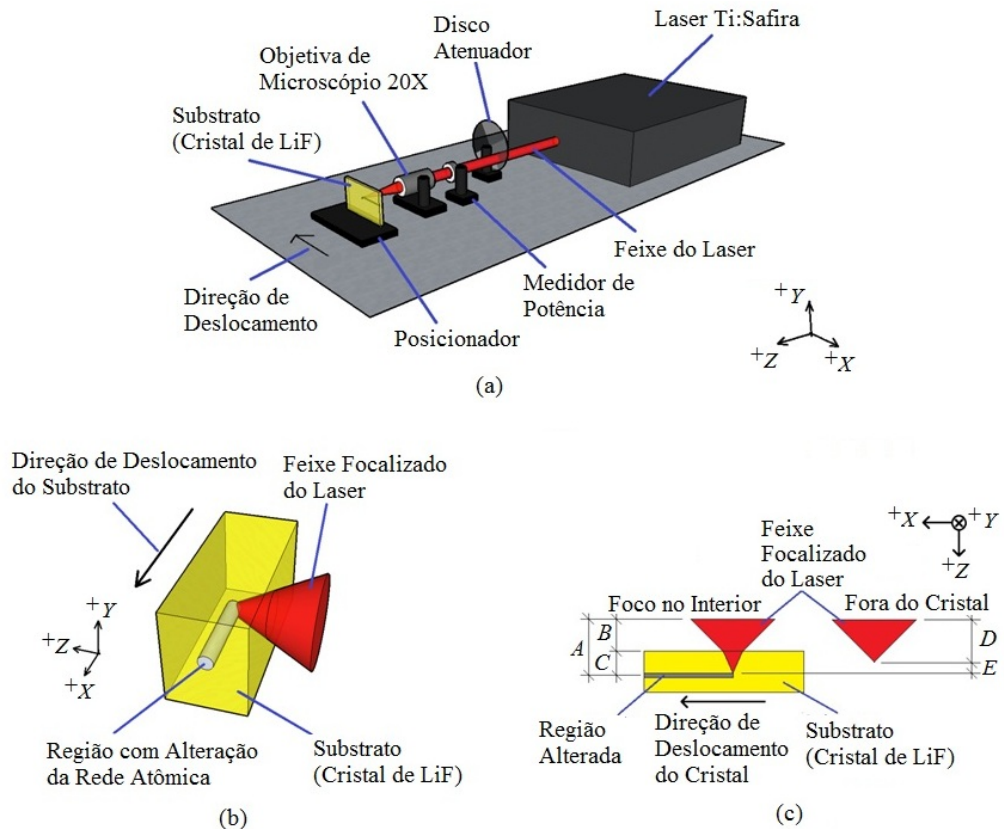
O cristal foi montado sobre um posicionador Newport modelo MPM 10137m04-9026, controlado por uma unidade Newport modelo PM500C, com resolução de passo menor que 20 nm. A Figura 10 ilustra (a) o arranjo experimental para a gravação dos guias, (b) o detalhe do feixe do laser focalizado bem como a região de incremento do índice de refração no interior do cristal e (c) as distâncias pertinentes à profundidade de gravação dos guias em relação à face superior do substrato.

Na Figura 10 (c)  $A$  é a distância entre a objetiva de microscópio e o ponto focal no interior do cristal de LiF,  $B$  a distância entre a objetiva e a face superior do cristal,  $C$  a profundidade da alteração estrutural a partir da face superior,  $D$  a distância focal da objetiva de microscópio utilizada e  $E$  a variação da distância do ponto focal quando o feixe é focalizado no interior do cristal de LiF. A partir das distâncias enunciadas, define-se a profundidade teórica de gravação ( $PTG$ ) como a diferença entre a distância focal e a distância entre a objetiva e a face superior do cristal de LiF e a profundidade real de gravação ( $PRG$ ) como a real posição do foco no interior do cristal, sendo a diferença entre a  $PTG$  e a  $PRG$  devido à inflexão do feixe do laser, por efeitos não lineares e de refração, ao passar do ar para o interior do cristal. As

profundidades anteriormente citadas  $PTG$  e  $PRG$  são expressas por

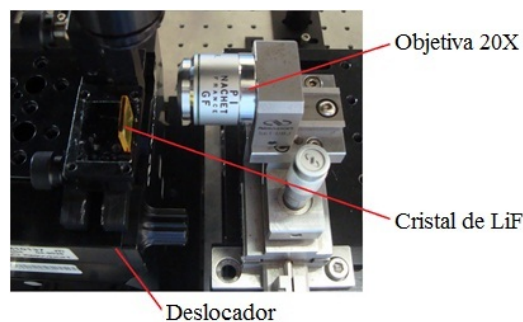
$$PTG = D - B \quad (3)$$

$$PRG = D + E - B \quad (4)$$



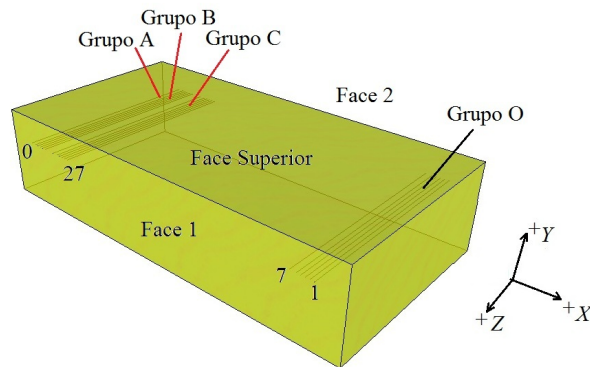
**Figura 10 – (a) Arranjo experimental para inscrição dos guias, (b) focalização do laser no interior do cristal e (c) detalhes da profundidade de gravação.**

A Figura 11 mostra uma fotografia de parte do arranjo experimental de gravação das estruturas utilizado na UFPE com um cristal de LiF montado sobre o posicionador e em frente à objetiva de microscópio utilizada na focalização do feixe do laser de gravação.



**Figura 11 – Fotografia do cristal de LiF, objetiva e deslocador usados na produção dos guias.**

No processo de gravação das estruturas foram ajustadas diferentes velocidades de deslocamento do posicionador, da energia do laser e da *PTG*. Quatro grupos foram gravados, identificados como Grupo O, A, B e C. A Figura 12 ilustra, qualitativamente, a posição das modificações estruturais, seus diferentes grupos e a nomenclatura adotada para as faces do cristal de LiF.



**Figura 12 – Disposição das alterações estruturais no interior do cristal de LiF.**

A Tabela 1 apresenta as configurações utilizadas e a periodicidade de exposição do cristal de LiF aos pulsos do laser focalizado. Também é mostrado o comprimento de onda de Bragg associado à periodicidade de exposição, à distância, ao longo do eixo x, entre cada estrutura e a numeração atribuída a cada uma. A periodicidade de exposição foi calculada usando o índice de refração do LiF para 633 nm devido ao desconhecimento sobre a efetiva dispersão dos guias que seriam produzidos. Após a gravação das estruturas, foi realizada a inspeção por microscopia convencional em modo de transmissão, conforme descrito na próxima seção.

### 3.1.1 Inspeção das Alterações Estruturais

Realizou-se a inspeção visual das modificações estruturais induzidas no interior do cristal a partir de imagens captadas usando microscópios com câmeras digitais acopladas. Foram usados dois microscópios:

1. LOOP - UTFPR: Microscópio Ningbo Trusdy Optics & Electronics, modelo XSZ - N107CCD, operando em modo de transmissão e acoplado a uma câmera DCE-2 para obtenção das imagens. A estimativa das dimensões das regiões expostas no cristal foi realizada por meio de um alvo de calibração de microscópio como referencial dimensional, sendo as imagens analisadas usando o programa ImageJ 1.42q.

2. UFPE - Departamento de Física: Microscópio Olympus, modelo BX 51, operando em modo de transmissão. A estimativa das dimensões das regiões expostas do cristal foi realizada usando padrão dimensional disponível no programa AnalySIS Imager 5.1, sendo as imagens analisadas usando o programa ImageJ 1.42q.

Captaram-se imagens da face superior e das faces laterais nas quais as regiões alteradas pelo laser no processo de inscrição dos guias eram visíveis.

**Tabela 1 – Configurações para a gravação dos guias de onda na cristal de LiF.**

Grupos	Guias	Energia [ $\mu\text{J}$ ]	Dist. [ $\mu\text{m}$ ]	PTG [ $\mu\text{m}$ ]	Vel. [ $\mu\text{m/s}$ ]	$\lambda_B$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Lambda$ [nm]
<b>O</b>	1			0 (Ref.)			
	2	5	200	50	237,0	659	237
	3						
	4						
	5	2		100	191,0	531	191
	6						
	7						
<b>A</b>	0	200		0 (Ref.)			
	1	2	100	100	284,0	635	228,4
	2	1					
	3	0,5					
	4	0,2					
	5	0,1					
6	0,05						
<b>B</b>	7	2	100	100	555,0	1.543	555
	8						
	9	1		150			
	10	0,5					
	11	0,2					
<b>C</b>	12 a 16				228,4	635	228,4
	17 a 21	1	20	150	195,0	542	195
	22 a 27				241,0	670	241

### 3.2 CENTROS DE COR PRODUZIDOS NO PROCESSO DE GRAVAÇÃO

Para verificar a formação de centros de cor na região exposta aos pulsos do laser de femtosegundo durante o processo de gravação das estruturas, foram registradas imagens utilizando microscopia confocal e medindo o espectro de emissão dos guias quando iluminados com fonte possuindo banda de emissão em torno de 460 nm. Dois aspectos foram investigados



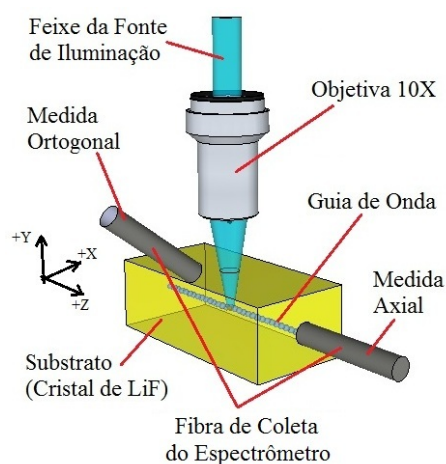
quando iluminando o guia de onda: a banda de emissão dos CC não guiada e a guiada pelos guias.

### 3.2.1 Inspeção por Microscopia Confocal

A presença dos CC limitada na região do cristal exposta ao feixe focalizado do laser de gravação foi analisada via microscopia confocal, realizada no laboratório do ENEA C. R. Frascati, utilizando um microscópio Nikon Eclipse 80-i C1, equipado com um laser de argônio Coherent, modelo INOVA 90 sintonizado em 457,9 nm. Foram obtidas imagens em três condições diferentes: sem filtro e com filtros passa faixa, um com banda de 496 nm a 527,5 nm e o outro com banda de 563,5 nm a 855 nm. Estas bandas seletoras permitem a identificação de diferentes tipos de CC presentes nas mudanças induzidas pelo laser focalizado no interior do cristal de LiF. As imagens registradas foram analisadas usando o programa ImageJ v.1.45S para determinação das dimensões das estruturas visualizadas.

### 3.2.2 Espectro de Emissão por Fotoluminescência Guiado e Não Guiado

A análise do espectro de emissão por fotoluminescência dos guias foi realizada iluminando-os com duas diferentes fontes de luz laser, com o feixe direcionado perpendicularmente aos guias, sendo a emissão gerada medida em duas configurações diferentes, conforme esquema experimental ilustrado pela Figura 13.



**Figura 13 – Arranjo experimental para obtenção dos espectros emitidos pelos guias em diferentes situações.**

A partir do esquema ilustrado, tem-se que a configuração nomeada de ortogonal capta o espectro de emissão não guiado e a nomeada de axial capta o espectro de emissão guiado que

se propaga a partir do ponto focal do sistema de iluminação até o final do guia. Na medida ortogonal a fibra de coleta foi posicionada paralelamente ao plano x-y com inclinação de  $45^\circ$  em relação ao plano x-z. O feixe do laser de iluminação foi focalizado por uma objetiva de microscópio 10X. Inicialmente o ponto focal do sistema de iluminação foi posicionado sobre cada um dos guias, sendo o espectro de emissão registrado para as condições guiado e não guiado. Posteriormente, o feixe do laser de iluminação foi posicionado em uma região sobre o cristal, distante dos guias, e o espectro de emissão captado, possibilitando, assim, uma confrontação entre os espectros das emissões registrados quando os guias são iluminados e quando somente o cristal é iluminado.

A medida do espectro de emissão não guiado foi realizada utilizando duas diferentes fontes de iluminação:

- No LOOP-UTFPR foi utilizado uma fonte de luz DPPS-SDLT-SDL-457-030T, com banda de emissão centrada em 460 nm, focalizada por uma objetiva de 10X, sendo o espectro medido por um espectrômetro Ocean Optics, modelo QE 65000.
- No ENEA C. R. Frascati foi usado um laser de Argônio Coherent Innova 308, sintonizado para emissão em 457,9 nm, com o feixe do laser direcionado sobre os guias sem focalização, sendo o espectro de emissão medido por um espectrômetro Acton Research CCD Spectra Pro 300i.

A medida do espectro guiado foi realizada somente no laboratório do ENEA C. R. Frascati, usando o mesmo instrumento para captação do espectro de emissão e a mesma fonte de iluminação empregada na medida da emissão não guiada, porém, nesta configuração, foi utilizada uma objetiva de 10X para focalização do sistema de iluminação. Tal focalização permite que seja iluminada de forma intensa um único guia de onda, uma vez que estão distantes entre si de 200  $\mu\text{m}$  (Grupo O), 100  $\mu\text{m}$  (Grupos A e B) e 20  $\mu\text{m}$  (Grupo C).

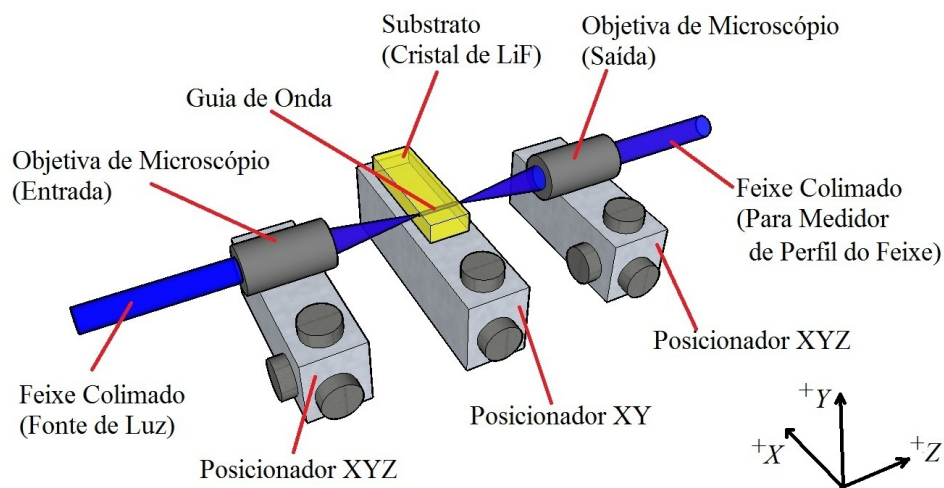
### 3.3 CAPACIDADE DE GUIAMENTO DAS ESTRUTURAS

Diferentes fontes de luz laser foram usadas para verificar a capacidade de guiamento das estruturas produzidas no interior do cristal de LiF, em experimentos realizados no laboratório LOOP-UTFPR, em Curitiba, e no ENEA C. R. Frascati, na Itália.

O arranjo experimental consistiu em focalizar o feixe de luz da fonte utilizada através de uma objetiva de microscópio com o foco posicionado na entrada de uma dada estrutura sob análise. Na saída da estrutura foi posicionada outra objetiva de microscópio, com o objetivo de

captar e colimar o feixe de luz presente no final da estrutura. O feixe colimado foi direcionado para um medidor de perfil de intensidade do feixe para processamento e registro do perfil de campo próximo.

Para verificar a correta colimação do feixe na saída da estrutura, o medidor de perfil do feixe foi deslocado ao longo do eixo z, sendo observado se a largura na meia altura do perfil medido se mantinha constante. Quando a medida da largura variava com o deslocamento do medidor ao longo do eixo z, era ajustada a distância entre a objetiva na saída e o cristal de LiF, até a largura do feixe permanecer constante com a variação da posição do medidor de perfil. A Figura 14 ilustra o princípio do arranjo experimental descrito.



**Figura 14 – Arranjo experimental para acoplamento da luz e medida do perfil do campo próximo.**

As objetivas de microscópio, de entrada e de saída, foram montadas sobre bases de translação tridimensionais Newport modelo ULTRAlign 561-D-M. O cristal de LiF foi alocado em uma base de translação bidimensional, também da Newport ULTRAlign 561-D-M. Os mesmos modelos de bases de translação foram utilizados nos laboratórios LOOP-UTFPR e ENEA C. R. Frascati. Diferentes fontes de luz, acessórios para colimação e adequação do feixe de luz da fonte, objetivas de microscópio e medidores de perfil do feixe foram utilizados.

O alinhamento óptico do experimento de acoplamento consistiu das seguintes etapas:

1. Alinhamento entre o feixe da fonte de luz e o medidor de perfil de intensidade do feixe; ajustando o alinhamento para que o ponto máximo de intensidade do feixe estivesse na coordenada (0,0) do medidor de perfil do feixe. Após este alinhamento as posições da fonte de luz e do medidor de perfil foram mantidas constantes nas direções x e y, durante os experimentos;
2. Inclusão da objetiva de microscópio de entrada e alinhamento desta via posicionamento

do ponto máximo do perfil transmitido pela objetiva na coordenada (0,0) do medidor de perfil do feixe, sendo deslocada somente a objetiva de entrada para tal alinhamento;

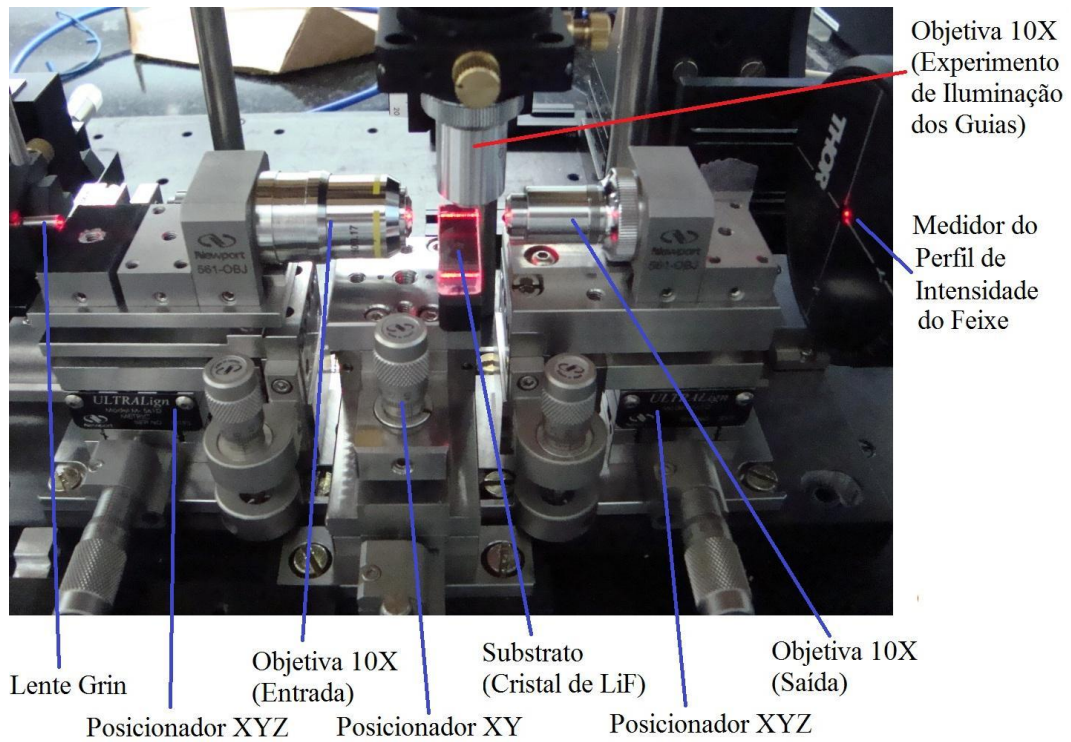
3. Inclusão da objetiva de microscópio de saída e alinhamento conforme descrito no item ii, porém, deslocando somente a objetiva de saída. (Observação: a distância entre as objetivas foi pré-definida somando a distância focal das respectivas objetivas mais o comprimento do guia de onda a ser acoplado no sistema);
4. Alocação do cristal de LiF, inicialmente posicionado de tal forma que o feixe da fonte de luz estivesse distante dos guias. Assim, pode-se alinhar o cristal observando se o pico máximo do perfil medido continuava na coordenada (0,0). Qualquer mudança desta posição indica um desalinhamento do cristal, sendo necessário ajustar sua alocação;
5. Translação do cristal de LiF somente ao longo dos eixos x e y, visando alinhar cada um dos guias para obtenção do acoplamento entre estes e o respectivo feixe da fonte de luz utilizada e;
6. Ajuste fino das distâncias das objetivas para correta localização do ponto focal destas nas extremidades dos guias bem como inclinação da objetiva de entrada visando reduzir efeitos de reflexão entre cristal-objetivas.

O alinhamento dos guias com o sistema ótico foi auxiliado por meio dos microscópios TIM-2B-2X-4X e Olympus SZ-CTV-Z60, montados sobre os experimentos realizados nos laboratórios LOOP-UTFPR e ENEA C. R. Frascati, respectivamente. A Tabela 2 contém a discriminação dos componentes usados nos experimentos realizados. As Figura 15 e Figura 16 mostram fotografias dos arranjos experimentais montados, nos laboratórios LOOP-UTFPR e ENEA C. R. Frascati, respectivamente, para a investigação da capacidade de guiamento ótico das estruturas gravadas no interior do cristal de LiF.

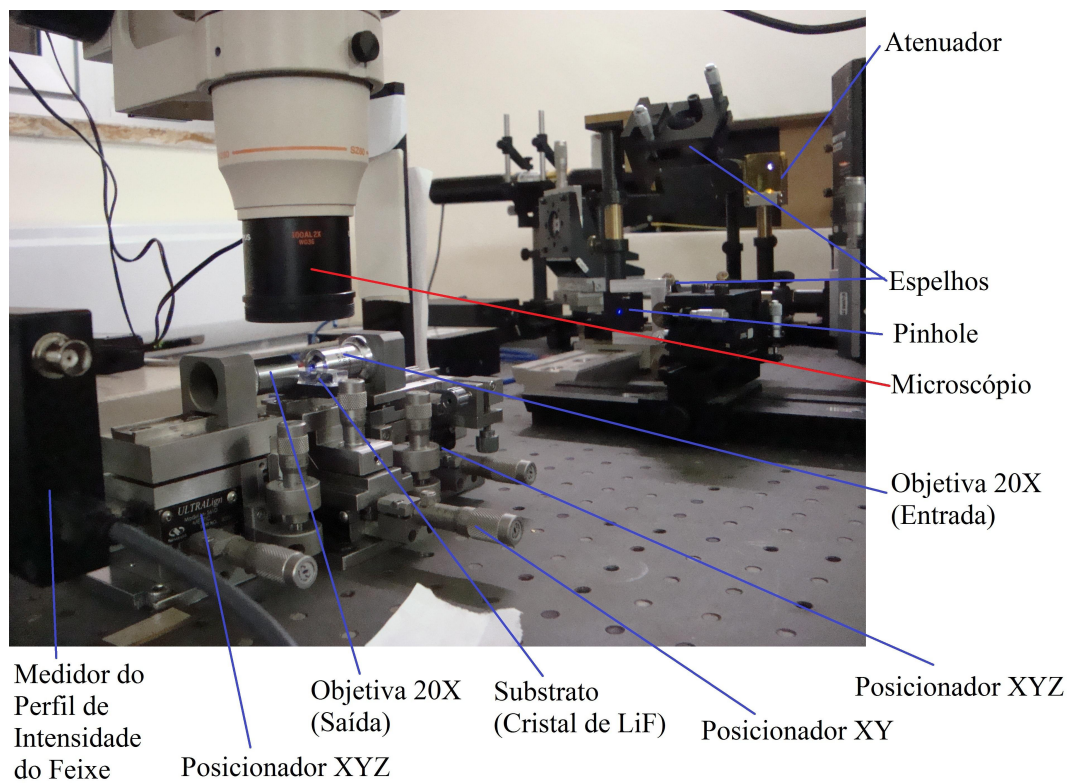
Com o objetivo de estimar as perdas na propagação uma câmera fotográfica, acoplada no microscópio, disponível no laboratório do ENEA C. R. Frascati, foi utilizada para registrar as imagens da luz espalhada ao longo dos guias.

### 3.3.1 Estimativa das Perdas na Propagação

A estimativa das perdas na propagação foi realizada a partir de imagens captadas da luz espalhada ao longo dos guias de onda quando luz era acoplada nelas. O experimento foi realizado no laboratório do ENEA C. R. Frascati, e utilizou um microscópio Olympus SZ-CTV-Z60, com uma máquina fotográfica Leica DC150-Power Shot S40 acoplada nele, para registro



**Figura 15 – Fotografia do arranjo experimental para o acoplamento de luz nos guias, LOOP-UTFPR.**



**Figura 16 – Fotografia do arranjo experimental para o acoplamento de luz nos guias, ENEA C. R. Frascati.**

das imagens. Na Figura 16 é possível ver parte do microscópio montado sobre o experimento, indicado por uma linha vermelha.

Depois de registrar as fotografias da luz espalhada, foi obtido o perfil de decaimento da intensidade desta ao longo do eixo de propagação da luz confinada no guia de onda. Para isto foi utilizado o software ImageJ v.1.45S, sendo o perfil de decaimento tratado usando o programa Qtiplot v.0.9.8.3 para obtenção das perdas na propagação em função da distância propagada.

**Tabela 2 – Componentes utilizados no experimento de acoplamento.**

Local	Fontes de Luz	CDO <sup>1</sup> [nm]	Acessórios	Objetivas		Medidor de Perfil do Feixe
				Entrada	Saída	
LOOP UTFPR	DPPS-SDLT SDL-457 030T	460	Íris ( $\phi$ 1 mm)	10X	10X	Thorlabs MP 104-UV
	Opnext HL6320G	~635	Fibra Thorlabs CFS2-532-FC terminada com lente GRIN			
	ASE Amonics ALS-10-M	~1550	Fibra Thorlabs 50-1550-FC terminada com lente GRIN			
ENEA C. R. Frascati	Hélio Neônio Melles Griot 25LHR 151 230	632,8	Atenuadores Balzers 24,2% + 19,4% + 16,1%	20X	20X	Spiricon BP SP 620U
	Argônio Coherent Innova 308	457,9 514	Pinhole ( $\phi$ 1 mm) e Atenuadores 369 e 371			

<sup>1</sup>Comprimento de Onda

### 3.4 ESTIMATIVA DO INCREMENTO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO

Através da inversão (ver seção A.1 do apêndice A) da equação escalar de onda (BIBRA; ROBERTS, 1997) é possível estimar o incremento do índice de refração na região do núcleo dos guias de onda óticos, conforme

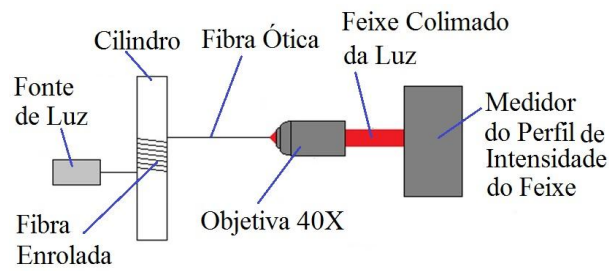
$$\Delta n(x,y) = \frac{\beta^2}{2n_B k_o^2} - \frac{n_B}{2} - \frac{\nabla_T^2 \sqrt{I(x,y)}}{2n_B k_o^2 \sqrt{I(x,y)}}, \quad (5)$$

onde  $\Delta n(x,y)$  é o incremento do índice de refração em função das coordenadas  $x$  e  $y$ ,  $\beta$  a constante de propagação,  $n_B$  o índice de refração do meio circundante do núcleo do guia, no caso, o índice de refração do cristal de LiF,  $k_o$  é o número de onda no espaço livre,  $\nabla_T^2$  é o operador Laplaciano nas coordenadas transversais  $x$  e  $y$  e  $I(x,y)$  a intensidade do perfil de campo próximo no plano  $x-y$ . O método contempla guias com baixo confinamento ótico e nos quais somente o modo fundamental é excitado. A estimativa do incremento foi obtida considerando dois planos:  $\Delta n(x,y_o)$  e  $\Delta n(x_o,y)$ , com  $y_o$  e  $x_o$  mantidos constantes, respectivamente. Na equação 5 os dois primeiros termos do lado direito possuem valores constantes para um dado comprimento de onda e não são calculados porque a estimativa do incremento do índice de refração é ajustada ao valor conhecido do índice de refração do cristal de LiF, em uma posição distante da região dos guias de onda fazendo com que  $\Delta n(x,y) \rightarrow 0$ .

#### 3.4.1 Validação do Método de Estimativa do Incremento do Índice de Refração

O método em questão foi validado via estimativa do incremento do índice de refração do núcleo de duas fibras óticas comerciais, uma monomodal em 632,8 nm (3M FSSN-3224) e outra monomodal em 1550 nm (COA-SMMF-29 COG 9/25). Em cada fibra ótica foi conectada uma fonte de luz diferente, uma com banda de emissão centrada em torno de 635 nm (Opnext HL6320G) e outra com emissão na banda C (ASE Amonics ALS10M). Durante a medida do perfil de campo próximo, as fibras óticas foram enroladas dez vezes em um cilindro com diâmetro de 12 mm, com o objetivo de priorizar a propagação do modo fundamental por meio da obtenção do estado estacionário de distribuição de potência e incremento das perdas dos modos de mais altas ordens (MARCUSE, 1981, p. 201).

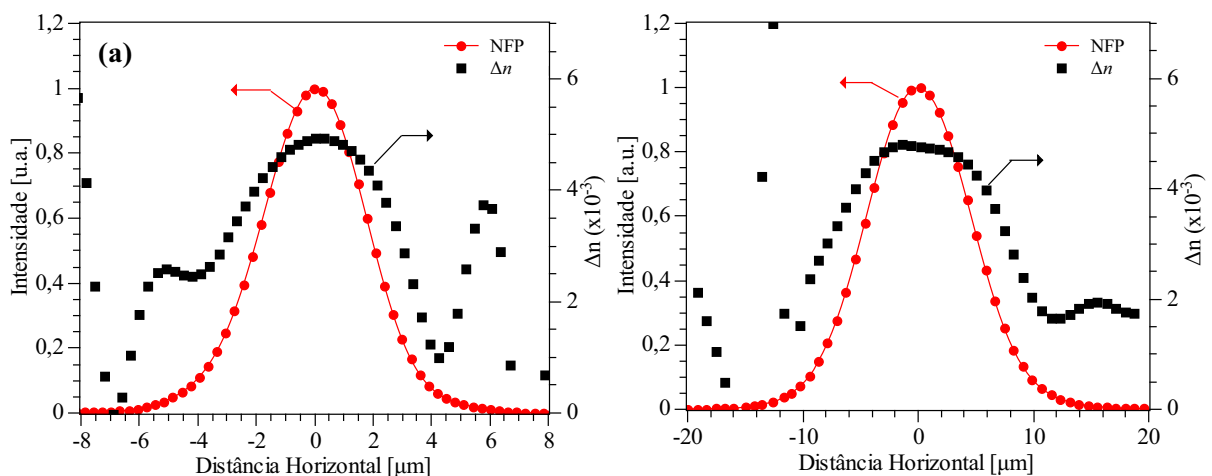
Para reduzir as distorções do perfil de campo próximo medido na saída das fibras, elas foram clivadas e suas faces verificadas utilizando uma máquina de emenda Fujikura FSM50S, demonstrando um ângulo de clivagem em torno de  $0,14^\circ$  a  $0,3^\circ$ . No final de cada fibra foi posicionada uma objetiva de microscópio de 40X sobre uma base de translação tridimensional Newport modelo ULTRAlign 561-D-M, para alinhamento desta com a fibra ótica. Após o feixe na saída da fibra ser colimado pela objetiva de microscópio, ele foi direcionado a um medidor de perfil de intensidade de feixe Thorlabs, modelo BP-104UV e BP-104IR, para as medidas na banda do visível e do infravermelho, respectivamente. O esquema experimental utilizado é ilustrado na Figura 17.



**Figura 17 – Arranjo experimental para medição do perfil de campo próximo de uma fibra óptica monomodal.**

Foi aplicado um filtro passa baixa com frequência de corte de 1 Hz nos perfis de intensidade dos campos próximo medidos experimentalmente,  $I(x,y)$ . Atenuando, assim, o ruído de alta frequência e diminuindo a sensibilidade do método devido à derivada de segunda ordem envolvida no cálculo da estimativa do incremento do índice de refração, conforme equação 5.

Os perfis de campo próximo medidos experimentalmente, bem como a estimativa do incremento do índice de refração para as fibras monomodais em 632,8 nm e 1550 nm são mostrados na Figura 18. Segundo as especificações do fabricante da fibra óptica monomodal em 632,8 nm, ela possui um diâmetro do núcleo de  $3,45 \mu\text{m}$  e um incremento máximo do índice de refração de  $5,3 \times 10^3$ . A estimativa obtida do incremento do índice de refração, na região do núcleo da fibra, apresenta um valor máximo de aproximadamente  $5,0 \times 10^3$ . Para a fibra monomodal em 1550 nm, as especificações providas pelo fabricante informam um diâmetro do núcleo da fibra de  $9 \mu\text{m}$  e um incremento máximo do índice de refração de  $5,4 \times 10^3$ . O valor máximo do índice de refração, na região do núcleo, foi estimado em, aproximadamente  $4,8 \times 10^3$ .



**Figura 18 – Perfil de campo próximo medido experimentalmente e mapeamento do incremento do índice de refração na região do núcleo da fibra óptica monomodal em (a) 632,8 nm e (b) 1550 nm.**

A distorção de alta frequência verificada na estimativa do incremento do índice de



refração em torno da distância horizontal de  $-14 \mu\text{m}$ , do gráfico mostrado na Figura 18 (b), se deve à presença da derivada de segunda ordem no método de estimativa do incremento do índice de refração que potencializa a influência do ruído presente nas medidas experimentais do perfil de intensidade do campo próximo.

Em relação ao valor máximo do índice de refração na região do núcleo das fibras, a monomodal em 632,8 nm apresentou uma variação de 5,6% em relação ao valor informado pelo fabricante, enquanto que para a fibra monomodal em 1550 nm a variação foi de 12,5%. Os valores estimados dependem diretamente da qualidade dos perfis de campo próximo medidos, sendo a incerteza dos dois medidores de perfil de intensidade de campo próximo utilizados de  $\sim 5\%$ . Os perfis de campo próximo dependem do comprimento de onda das fontes de luz acopladas nos guias. Assim, a variação do comprimento de onda das fontes de luz utilizada nos experimentos em relação ao comprimento de onda para o qual são informadas as especificações das fibras contribuiu para o erro relativo entre os valores máximos estimados e especificados do incremento do índice de refração das fibras óticas. No caso da fibra monomodal em 632,8 nm a diferença é de apenas  $\sim 2$  nm. No caso da fibra monomodal em 1550 nm a principal diferença é a fonte utilizada nas medidas experimentais possuir uma larga banda de emissão, aproximadamente 41 nm, sendo o perfil de campo próximo composto por todos os comprimentos de onda da fonte acoplada aos guias, diferenciando-se, assim, de um perfil de campo próximo observado a partir de uma fonte com banda estreita centrada em 1550 nm.

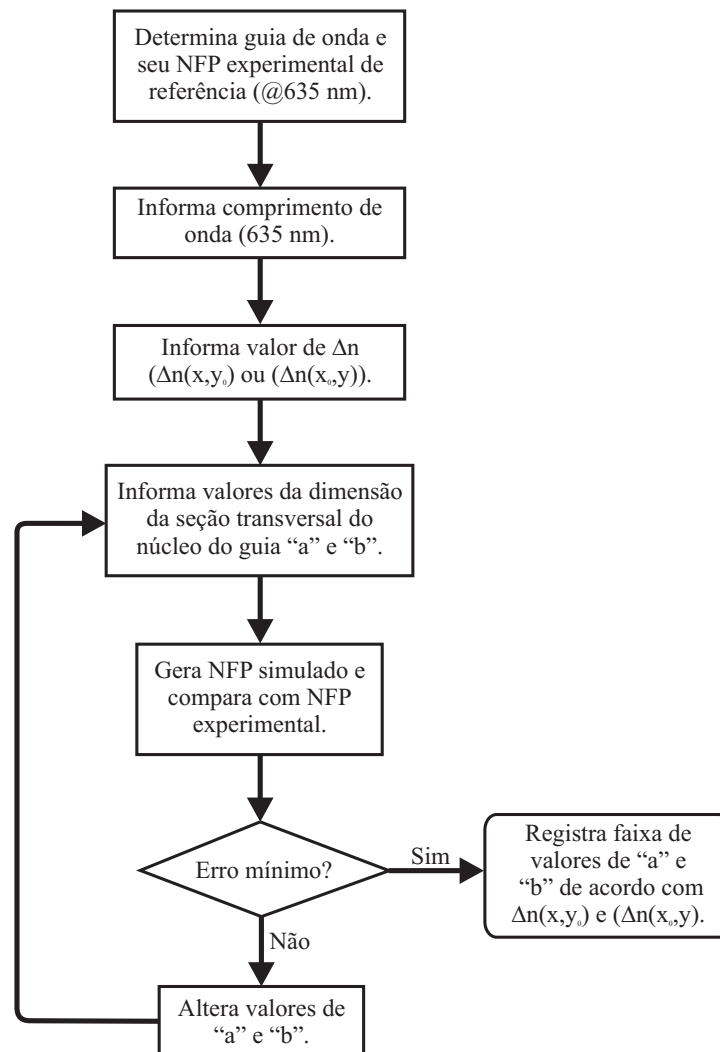
Quanto ao perfil da estimativa do incremento do índice de refração da região do núcleo das fibras óticas utilizadas, mostrados na Figura 18, constata-se uma discordância entre os diâmetros dos núcleos informados pelos fabricantes das fibras e as larguras na meia altura dos perfis de índice obtidos pelo método utilizado. Devido a isso, somente serão considerados como usuais as estimativas máximas do incremento do índice de refração ao aplicar o método utilizado no estudo dos guias de onda em cristal de LiF, desconsiderando-se a morfologia da estimativa do índice de refração.

### 3.5 ESTIMATIVA DAS DIMENSÕES E DO $\Delta n$ DOS GUIAS

Usando a equação 5 foi estimado o incremento dos índices de refração, a partir dos planos horizontal e vertical,  $\Delta n(x, y_0)$  e  $\Delta n(x_0, y)$ . Considerando esta estimativa, foram realizadas simulações do perfil de campo próximo na saída dos guias de onda. A dimensão do núcleo dos guias simulados foi ajustada de tal forma que os perfis simulados e os medidos experimentalmente convergissem. A rotina de simulação dos perfis de campo próximo foi implementada no programa MATLAB usando o método do índice efetivo (ADAMS, 1981,

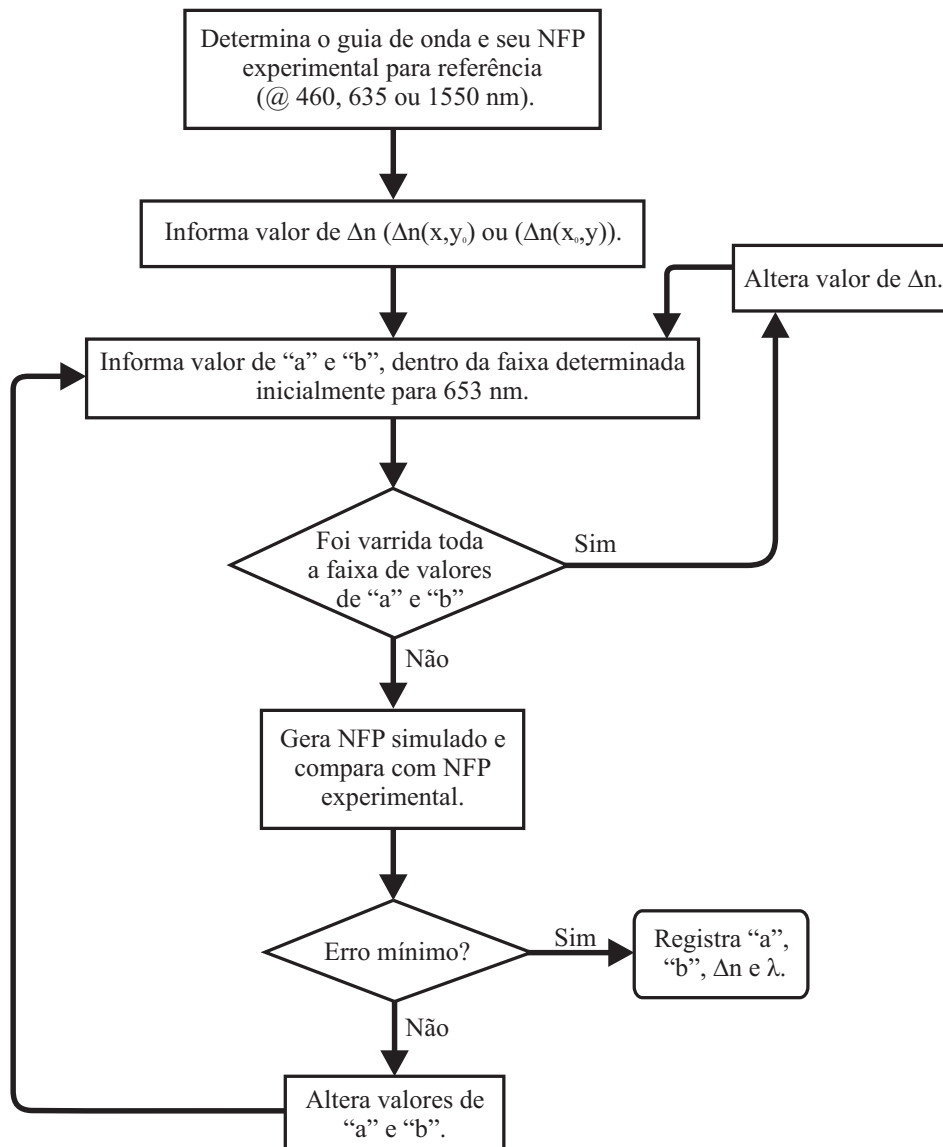
p. 188), sendo o cálculo da constante de propagação realizado a partir da solução da equação de dispersão por método gráfico (OKAMOTO, 2006, p. 29) e a distribuição espacial do perfil do campo eletromagnético considerando o método de Marcatili (KAWANO; KITO, 2001, p. 23) (ver seções A.2 e A.3 do apêndice A para detalhes dos métodos citados).

As dimensões horizontal, “a”, e vertical, “b”, da seção reta transversal dos guias foram ajustadas para que o perfil de campo próximo NFP (*Near Field Profile*) simulado se ajustasse ao medido experimentalmente com luz de 635 nm (Opnext HL6320G) acoplada nos guias. Os valores estimados para as dimensões “a” e “b”, em função dos incrementos estimados a partir dos planos horizontal e vertical,  $\Delta n(x, y_0)$  e  $\Delta n(x_0, y)$ , formam uma faixa de valores possíveis para as dimensões da seção reta transversal do núcleo dos guias de onda. A Figura 19 ilustra o fluxograma da obtenção da faixa de valores para as dimensões transversais dos guias de acordo com os valores estimados do incremento do índice de refração dos núcleos.



**Figura 19 – Fluxograma do processo de obtenção da faixa de valores para a seção reta transversal do núcleo do guia quando operando em 635 nm.**

Além das estimativas realizadas para o acoplamento com fonte de luz emitindo em torno de 635 nm, foram realizadas estimativas das dimensões da seção reta transversal quando fontes de luz com bandas de emissão centradas em torno de 460 nm e 1550 nm foram acopladas nos guias. No processo, para cada guia de onda analisado, foram considerados três conjuntos de perfis de campos próximos medidos experimentalmente, dependendo da fonte de luz utilizada (460 nm, 635 nm e 1550 nm). A Figura 20 mostra o fluxograma do processo de estimativa.



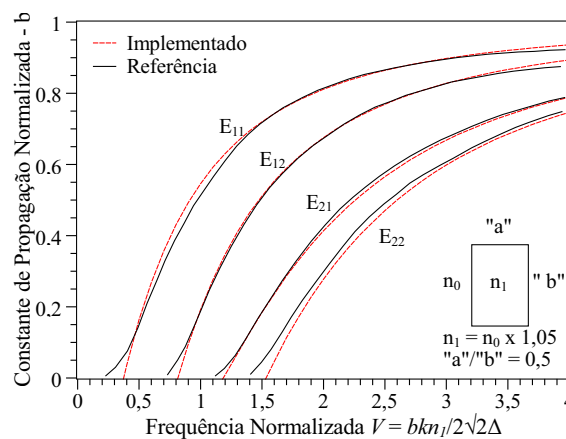
**Figura 20 – Fluxograma do processo de estimativa da dimensão da seção transversal e do índice de refração do núcleo do guia quando operando em diferentes comprimentos de onda.**

### 3.5.1 Validação da Rotina de Simulação dos Perfis de Campo Próximo

O método do cálculo das constantes de propagação foi validado comparando-se as curvas de dispersão obtidas na simulação com as curvas de dispersão mostradas em (KUMAR

et al., 1983, Fig. 2), para um guia de onda com seção reta transversal retangular do núcleo e com o índice de refração deste 1,05 vezes maior que o índice de refração do substrato que o envolve. O mesmo perfil da seção reta transversal do núcleo do guia de onda, no caso retangular, suas dimensões e do incremento do índice de refração do núcleo em relação ao meio envolvente utilizados na determinação das curvas de referência foram considerados no processo de cálculo das curvas de dispersão, com as curvas mostradas na Figura 21.

As curvas de dispersão utilizadas como referência e as calculadas pela rotina implementada foram obtidas a partir das mesmas equações características transcendentais (ver seção A.2 do apêndice A). As diferenças observadas entre elas podem ser atribuídas, principalmente, ao processo manual de digitalização das curvas de referência e também à não informação dos detalhes sobre a forma e critérios da solução numérica destas não sendo possível, dessa forma, replicar com precisão os resultados.

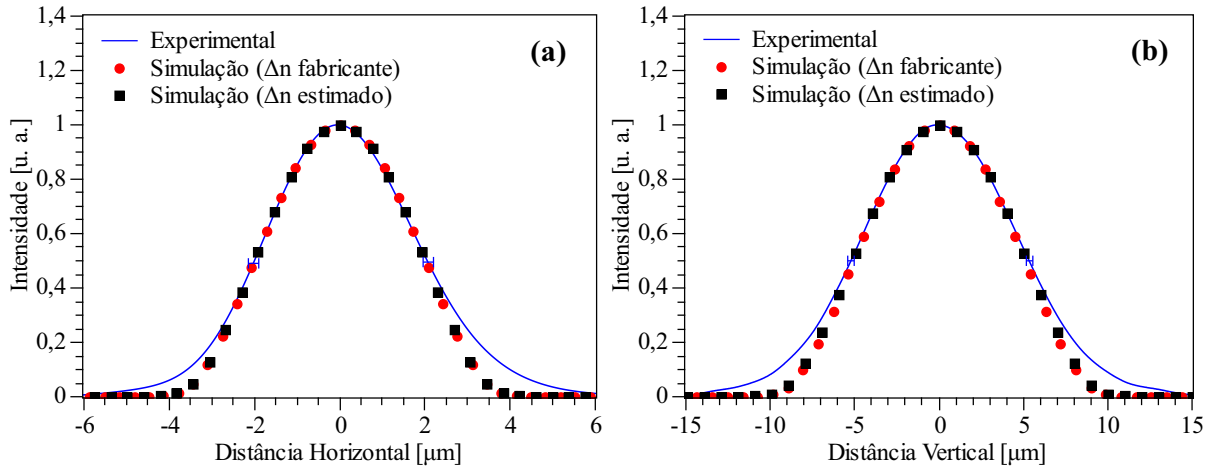


**Figura 21 – Validação do processo de cálculo das curvas de dispersão.**

O procedimento de simulação do perfil de campo próximo foi validado por meio da comparação entre o perfil de campo próximo simulado e o perfil de campo próximo medido experimentalmente de duas fibras óticas monomodais, uma em 632,8 nm e outra em 1550 nm (medida de campo próximo realizada conforme experimento descrito na seção 3.4). Nas simulações dos perfis de campo próximo foram considerados os diâmetros dos núcleos das fibras, informados pelos fabricantes como a dimensão de “a” e “b” da seção transversal do núcleo do guia simulada. Cada simulação foi executada com o comprimento de onda para o qual as fibras óticas operam na condição monomodal (~633 nm e 1550 nm). Na simulação foram utilizados dois incrementos do índice de refração do núcleo: um informado pelos fabricantes das fibras óticas e o outro estimado conforme apresentado na seção 3.4.1. A Figura 22 mostra os perfis simulados e os medidos experimentalmente.

O catálogo das fibras óticas informam a variação da largura dos perfis de campo

próximo de  $4,0 \pm 0,5$  e  $10,5 \pm 0,8 \mu\text{m}$ , para as fibras monomodais em  $\sim 633$  e  $1550$  nm, respectivamente. Do ponto máximo até aproximadamente 35% da intensidade os perfis simulados convergem para os medidos experimentalmente, sendo que a partir deste ponto é constatada uma diferença entre eles. Isso se deve aos perfis transversais dos núcleos, circular nas fibras e quadrado nas simulações.



**Figura 22 – NFP experimentais e simulados para fibras monomodais em (a) 632,8 nm e (b) 1550 nm.**

O erro médio absoluto entre o perfil experimental e os simulados, do ponto de intensidade máxima até 0,35, é menor que 1% para a fibra monomodal em 632,8 nm e menor que 2% para a fibra monomodal na banda C. A Tabela 3 mostra as larguras na meia altura dos perfis de campo próximo em questão.

**Tabela 3 – Larguras na meia altura dos perfis de campo próximo das fibras óticas.**

Fibra Ótica	Orientação	Largura na meia altura [ $\mu\text{m}$ ]		
		Experimental	$\Delta n$ simulação Fabricante	Estimado
FSSN - 3224 (SM@ 632,8 nm)	Horizontal	4,05	4,011	4,063
	Vertical	4,11	4,012	4,067
COA - SMMF (SM@ 1550 nm)	Horizontal	10,45	10,16	10,37
	Vertical	10,56	10,14	10,34

O erro relativo médio entre as larguras na meia altura dos perfis de campos próximos simulados e medidos experimentalmente, utilizando incremento do índice de refração informado pelo fabricante das fibras óticas, foi de, aproximadamente, 1,7% e 3,4%, para as fibras monomodais em  $\sim 633$  nm e  $1550$  nm, respectivamente, e, utilizando o incremento do índice de refração estimado a partir do perfil de campo próximo, os erros relativos foram de 0,4% e 1,4%, para as fibras monomodais em  $\sim 633$  nm e  $1550$  nm, respectivamente.

### 3.6 ESTIMATIVA DOS MODOS PROPAGANTES

Os valores das frequências normalizadas, para cada guia de onda e para cada comprimento de onda das fontes as quais são acoplados, são calculados considerando as estimativas das dimensões da seção reta transversal e dos incrementos dos índices de refração dos guias de onda analisados, sendo a frequência normalizada (OKAMOTO, 2006, p. 5) expressa por

$$V = kn_1 \frac{d}{2} \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}}, \quad (6)$$

onde  $k$  é o número de onda no vácuo,  $d$  largura característica (“a” ou “b”) da seção reta transversal do núcleo,  $n_1$  e  $n_2$  os índices de refração do núcleo e, neste caso, do cristal de LiF, respectivamente. Confrontando os valores calculados da frequência normalizada com as frequências de corte em função de diferentes perfis transversais são avaliados os modos propagantes suportados pelos guias de onda produzidos.

### 3.7 ANÁLISE DA MODULAÇÃO DO $\Delta n$ DOS GUIAS

O estudo sobre a produção dos guias de onda de Bragg foi realizado medindo-se o espectro de transmissão de uma fonte de banda larga Yokogawa, modelo AQ4305 (400 nm a 1700 nm) acoplada aos guias de onda. Para a medida do espectro na saída dos guias foi utilizado um espectrômetro OceanOptics, modelo QE 65000, conectado a uma fibra QP1000-2-VIS/NIR posicionada axialmente ao eixo de propagação dos guias de onda, sendo os dados registrados pelo programa SpectraSuite, também da Ocean Optics.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os principais resultados e discussões pertinentes a este trabalho.

Após a exposição do cristal ao laser focalizado de femtosegundo, uma inspeção visual foi realizada com o objetivo de verificar a produção ou não de alterações estruturais pelo laser, como descrito na seção 3.1.1. A partir desta inspeção, foram estimadas dimensões e profundidades, a partir da face observada do cristal, das estruturas presentes. As imagens obtidas por microscopia confocal, conforme descrito na seção 3.2.1, são apresentadas e demonstram a formação de centros de cor restritos às regiões do cristal expostas aos pulsos do laser de fs. Espectros de emissão medidos em diferentes condições de acoplamento demonstram o efeito do guiamento da luz emitida pelos centros de cor, segundo apresentado na seção 3.2.2.

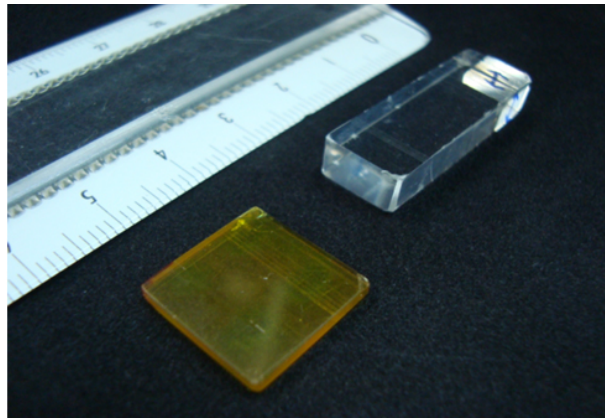
Em seguida, a capacidade de guiamento das estruturas foi analisada por meio do acoplamento de diferentes fontes de luz e registrando-se os perfis de campo próximo nas saídas dos guias. As perdas na propagação foram estimadas a partir do decaimento da intensidade do perfil de luz espalhada ao longo do guia de onda, como exposto nas seções 3.3 e 3.3.1, respectivamente.

A partir do descrito na seção 3.4, o incremento do índice de refração dos núcleos dos guias foi estimado empregando os perfis de campos próximo medidos experimentalmente em uma equação escalar de onda modificada. As dimensões da seção reta transversal do núcleo dos guias são avaliadas via comparação dos perfis de campo próximo medidos experimentalmente com perfis de campo próximo simulados, conforme procedimento exposto na seção 3.5. Usando as estimativas do incremento do índice de refração e das dimensões transversais dos guias de onda, são analisados os modos propagantes por eles suportados, como descrito na seção 3.6.

Por fim, de acordo com o exposto na seção 3.7, a modulação do incremento do índice de refração do núcleo dos guias de onda foi investigada para verificação da produção de guias de onda de Bragg.

#### 4.1 INSPEÇÃO VISUAL DAS ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS

A Figura 23 mostra a fotografia de dois cristais de LiF, um translúcido e outro com coloração amarelada. O cristal de LiF amarelo possui essa coloração devido à exposição a raios  $\gamma$ . Neste trabalho foi analisado somente o cristal translúcido. A verificação da produção das alterações estruturais no cristal de LiF pelo laser de gravação foi realizada a partir de uma inspeção visual por microscopia convencional em modo de transmissão.

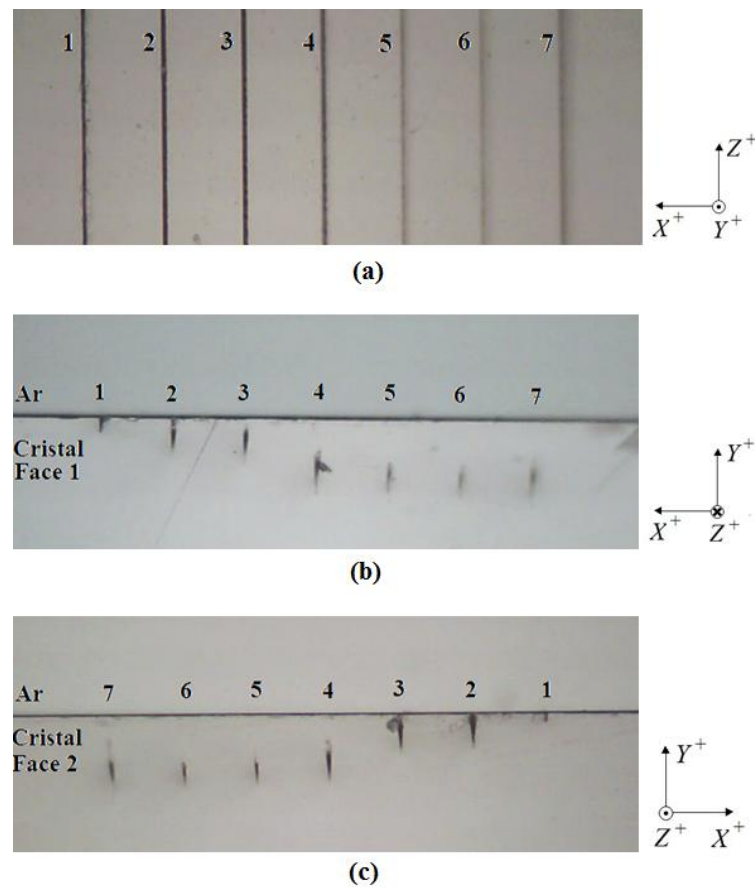


**Figura 23 – Duas amostras de cristal de LiF: um translúcido e outro amarelo.**

As Figura 24 (a), (b) e (c) mostram imagens captadas das faces superior e laterais do cristal de LiF, para as estruturas do Grupo O, usando uma objetiva de 4X. A numeração nas fotografias foi incluída a fim de facilitar a apresentação e discussão sobre as estruturas. A alteração estrutural indicada com o número 1 é simplesmente uma marcação para fins de referência, realizada posicionando o foco do laser de gravação na face superior do cristal. Observa-se, na Figura 24 (a), que as alterações numeradas de 1 a 3 apresentam uma resolução melhor que as alterações numeradas de 4 a 7. Isto se deve às diferentes profundidades de gravação configuradas para as estruturas, sendo que as numeradas de 4 a 7 são mais profundas, a partir da face superior (interface ar-cristal), do que as numeradas de 1 a 3, como pode ser verificado nas Figura 24 (b) e (c). Nota-se nestas figuras que as alterações estruturais produzidas apresentam uma dimensão transversal mais longa na direção y do que na direção x. Não é possível afirmar que as formas dos perfis observados se mantenham ao longo de toda a estrutura, na direção do eixo z, devido à ablação de material durante a passagem do feixe focalizado, no processo de gravação, pelas interfaces ar-cristal e cristal-ar, que causam irregularidades no início e no final das estruturas.

A Figura 25 mostra imagens, também captadas através de um microscópio operando em modo de transmissão com objetiva de 4X, dos Grupos A, B e C de estruturas. A Figura 25 (a) mostra a imagem da face superior do cristal enquanto que as Figuras 25 (b) e (c) imagens





**Figura 24 – Imagem a partir (a) da face superior, e das faces laterais (b) 1 e (c) 2 do Grupo O.**

das faces laterais do cristal de LiF.

Nos Grupos A, B e C as alterações estruturais não estão paralelas com a face superior do cristal, como é percebido por uma comparação entre as distâncias das modificações estruturais e a interface ar-cristal visualizadas nas Figura 25 (b) e (c). Observa-se que a face 1 apresenta danos (região escurecida) que dificultam a visualização das modificações estruturais do Grupo A e parcialmente do Grupo B. A Figura 26 mostra uma imagem da face lateral 1 do cristal, do Grupo A, obtida pelo mesmo microscópio, mas com ampliação de 10X, na qual é possível visualizar as alterações estruturais não observadas na Figura 25 (b). O número zero indica a alteração de referência produzida na face superior do cristal, sendo perceptível nesta estrutura a ablação de material produzida pela exposição do cristal ao feixe focalizado do laser de gravação. Não foi observada mudança estrutural para a estrutura 6, Grupo A, devido à baixa energia utilizada no processo de gravação,  $\sim 0,05 \mu\text{J/pulso}$ .

Utilizando outro microscópio (UFPE), operando em modo de transmissão com objetiva de 100X, foram obtidas imagens das alterações estruturais a partir da face superior do cristal dos Grupos A e C, mostradas nas Figura 27 (a) e (b).

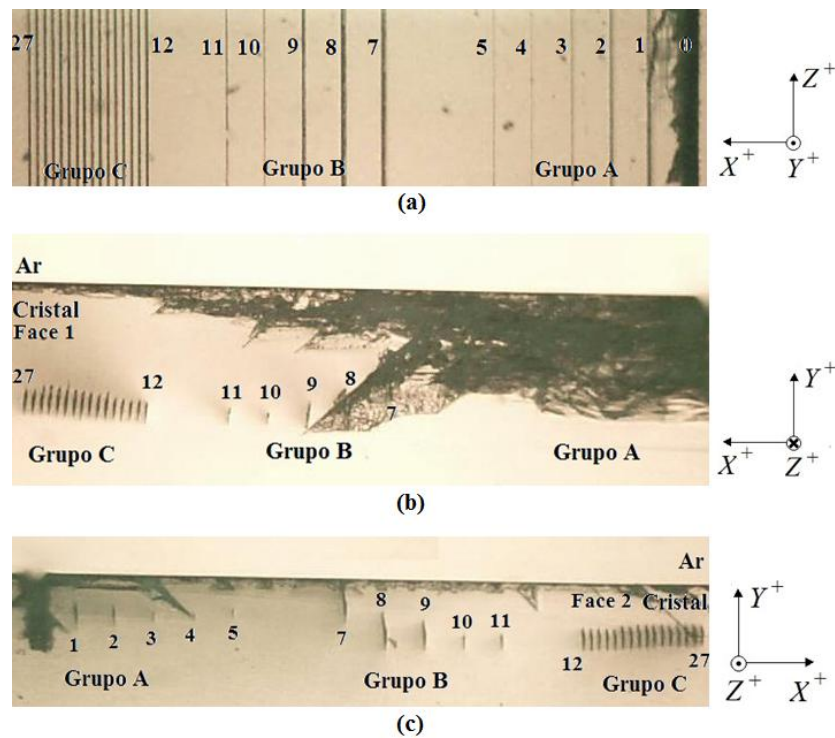


Figura 25 – Vista a partir da (a) face superior e das faces laterais (b) 1 e (c) 2 dos Grupos A, B e C.

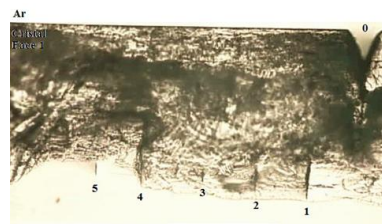
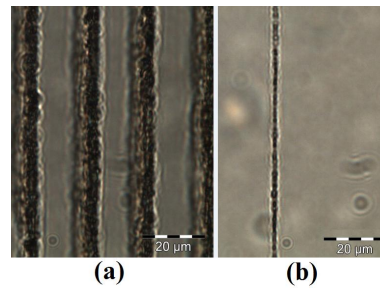


Figura 26 – Imagem da face 1, Grupo A, utilizando objetiva de microscópio de 10X.

Na Figura 27 (a), é mostrado o detalhe de parte do Grupo C, estruturas 24 a 27, gravadas com energia de  $1 \mu \text{ J/pulso}$ , velocidade de  $241 \mu \text{ m/s}$ , profundidade do foco de  $150 \mu \text{ m}$  e com distância entre elas de  $20 \mu \text{ m}$ . Na Figura 27 (b) o detalhe é da estrutura 4, Grupo A, gravada com energia de  $0,2 \mu \text{ J/pulso}$ , velocidade de  $228,4 \mu \text{ m/s}$  e profundidade do foco de  $100 \mu \text{ m}$ . As imagens mostram que é possível controlar as dimensões das estruturas produzidas a partir da variação dos parâmetros de gravação dessas. Entretanto, não é possível identificar nenhum padrão regular de periodicidade ao longo das estruturas visualizadas, sendo a periodicidade destas, teoricamente inferior a  $1 \mu \text{ m}$ , abaixo da resolução da imagem registrada. A variação observada deve-se, provavelmente, a oscilações nas condições de gravação (potência do laser, vibração do sistema de deslocamento, ruído externo, etc.).



**Figura 27 – Imagem do (a) Grupo C, estruturas 24-27 e (b) Grupo A, estrutura 4.**

#### 4.1.1 Estimativa das Dimensões das Modificações Estruturais

As dimensões das alterações estruturais foram analisadas aplicando as imagens captadas no programa ImageJ. A Tabela 4 agrupa as dimensões estimadas em meia altura das alterações estruturais ao longo do eixo x (plano horizontal), conforme as coordenadas espaciais mostradas nas Figuras 24 e 25.

**Tabela 4 – Dimensões horizontais na meia altura das alterações estruturais.**

Grupo	Guia	Largura [ $\mu\text{m}$ ]	Grupo	Guia	Largura [ $\mu\text{m}$ ]	
O	2	15	C	12	7	
	3			13		
	4			14		
	5	11		15		
	6	10		16		
	7	15		17		6
	A	1		8		18
2		6	19	4		
3		4	20	6		
4		3	21			
5		2	22			
B	7	13	23	5		
	8	12	24			
	9	9	25			
	10	3	26			
	11	4	27		4	

As profundidades reais de gravação (*PRG*), ao longo do eixo y, das estruturas produzidas foram estimadas a partir da distância da face superior do cristal (interface ar-cristal) até as extremidades das estruturas, nomeadas de Y1 e Y2, conforme indicadas na Figura 28. A Tabela 5 apresenta as estimativas das distâncias verticais Y1 e Y2 para cada uma das estruturas gravadas, medidas tanto para a face 1 quanto para a face 2 do cristal, bem como a extensão vertical absoluta de cada uma das estruturas analisadas.

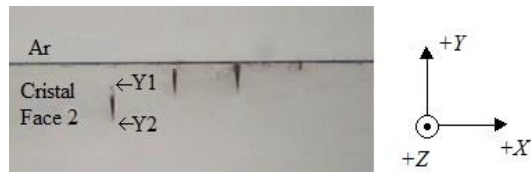


Figura 28 – Detalhe e orientação espacial da profundidade real de gravação das alterações estruturais.

Tabela 5 – Profundidade real de gravação e dimensões verticais das alterações estruturais.

G r u p o	G u i a	F a c e	Distância		Extensão	G r u p o	G u i a	F a c e	Distância		Extensão
			Y1 [ $\mu\text{m}$ ]	Y2 [ $\mu\text{m}$ ]	Y2-Y1 [ $\mu\text{m}$ ]				Y1 [ $\mu\text{m}$ ]	Y2 [ $\mu\text{m}$ ]	Y2-Y1 [ $\mu\text{m}$ ]
O	2	1	32	72	40	C	12	1	285	324	39
		2	19	76	56			2	118	163	45
	3	1	33	85	52		13	1	281	324	43
		2	22	71	49			2	118	168	50
	4	1	103	157	55		14	1	284	322	38
		2	102	165	63			2	118	165	46
	5	1	132	177	45		15	1	280	321	40
		2	130	181	50			2	116	162	46
	6	1	134	186	53		16	1	282	321	39
		2	135	186	51			2	115	160	45
	7	1	128	186	58		17	1	276	322	47
		2	129	193	65			2	108	156	48
	1	1	246	298	52		18	1	275	322	46
		2	71	121	50			2	110	157	47
2	1	255	299	44	19	1	269	318	48		
	2	79	125	46		2	108	155	46		
3	1	260	286	26	20	1	270	317	47		
	2	89	117	29		2	108	157	49		
4	1	245	288	43	21	1	267	318	51		
	2	88	108	20		2	105	151	46		
5	1	251	272	21	22	1	261	318	57		
	2	79	95	17		2	107	154	47		
7	1	198	268	71	23	1	263	315	52		
	2	39	104	65		2	109	152	43		
8	1	269	342	73	24	1	258	315	57		
	2	102	166	64		2	97	153	56		
9	1	275	320	45	25	1	262	315	53		
	2	114	163	49		2	102	152	50		
10	1	303	318	15	26	1	268	312	44		
	2	134	155	21		2	104	154	50		
11	1	293	330	37	27	1	267	315	48		
	2	131	163	32		2	104	151	47		

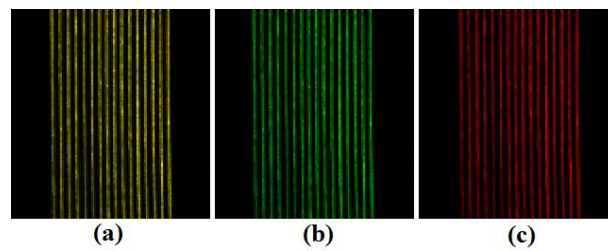
Os dados apresentados nas Tabela 4 e 5, indicam claramente uma maior dimensão ao longo da direção vertical (ao longo do eixo y) em relação às distâncias horizontais (ao longo do eixo x). Isso indica que a distribuição de alta densidade volumétrica da energia do laser de gravação na região do ponto focal se estende por dezenas de micrômetros na direção de propagação do feixe do laser, enquanto se restringe a unidades de micrômetros no sentido transversal de propagação devido à focalização pela objetiva utilizada. Entretanto, as imagens obtidas por microscopia convencional mostram, a partir das faces laterais 1 e 2, somente as extremidades dos guias, regiões estas que apresentam ablação de material devido ao processo de gravação. Portanto, não é possível afirmar que as dimensões estimadas se mantenham ao longo de toda a estrutura.

Os Grupos A, B e C foram gravados numa região do cristal de LiF que possui danos na face lateral 1 do cristal, conforme visualizado nas Figura 25 (b) e Figura 26. Além dos danos, observa-se uma inclinação nas estruturas dos Grupos A, B e C em relação à face superior do cristal, com diferença entre as profundidades médias das estruturas, entre a face 1 e a face 2, de aproximadamente  $165 \mu\text{m}$ , significando uma inclinação das estruturas de  $\sim 1^\circ$  em relação à face superior do cristal. Tentou-se inclinar o cristal bem como o feixe de entrada, mas sem melhora na condição de acoplado. Acredita-se que os danos na face lateral do cristal e a inclinação das estruturas tenham sido os motivos do difícil alinhamento ótico destas estruturas com o arranjo experimental, para acoplamento de fontes de luz nelas, o que inviabilizou a distinção consistente das estruturas dos Grupos A, B e C como guias de onda óticos.

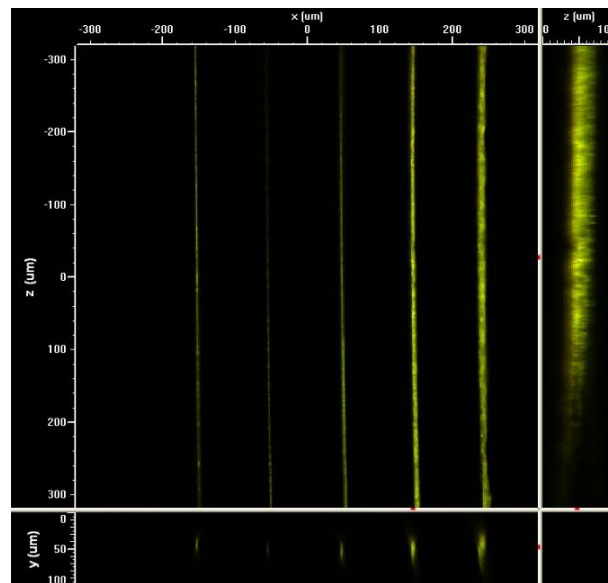
## 4.2 ANÁLISE POR MICROSCOPIA CONFOCAL

São apresentadas na Figura 29 três imagens captadas utilizando microscopia confocal, sob a mesma condição de iluminação do cristal (laser de argônio sintonizado em 457,9 nm). As três mostram a imagem de uma mesma região do cristal de LiF onde foram produzidas as estruturas do Grupo C. A Figura 29 (a) mostra a imagem captada sem a aplicação de nenhum filtro do microscópio, enquanto que em (b) e (c) as imagens foram captadas utilizando filtros passa faixa centrados em  $\sim 2,43 \text{ eV}$  e  $\sim 1,88 \text{ eV}$ , atuando nas bandas de emissão do verde e do vermelho, respectivamente. As imagens comprovam a formação de CC, com bandas de emissão nas bandas do vermelho e verde, limitados na região do cristal de LiF exposta ao feixe focalizado do laser de gravação.

Na Figura 30 é apresenta uma imagem captada por microscopia confocal das estruturas do Grupo A. Nela são mostrados diferentes planos de visualização e pequenos pontos vermelhos que indicam as regiões correspondentes entre cada plano.



**Figura 29 –** Imagens por microscopia confocal (a) sem aplicação de filtro e com filtros seletores na banda do (b) verde e (c) do vermelho.



**Figura 30 –** Imagem obtida por microscopia confocal das estruturas do Grupo A.

As dimensões das estruturas observadas foram estimadas a partir dos perfis de intensidade extraídos ao longo dos eixos  $x$  e  $y$  e são apresentadas na Tabela 25. Por questões de conveniência, são mostrados na tabela os dados de gravação das estruturas. Os valores das larguras indicam que é possível alterar as dimensões das estruturas produzidas pelos pulsos do laser de fs no cristal de LiF alterando a energia, velocidade ou profundidade do foco do feixe do laser no interior da amostra. Entretanto, a relação da variação das dimensões nas direções  $x$  e  $y$  são independentes, sendo observado que não são lineares entre elas quando é alterado o nível de energia. Isso pode ser observado, por exemplo, para as estruturas 1 a 5, ou considerando a variação da velocidade de gravação, conforme observado entre as estruturas 9, 14, 19 e 24.

A Figura 31 mostra os perfis de intensidade ao longo do eixo  $y$  das estruturas 7 e 9 do Grupo B. Nessa figura também são indicadas as diferentes medidas de larguras realizadas de acordo com o perfil observado, indicadas por  $W_1$ ,  $W_2$  e  $W_T$ . Os perfis transversais dos guias mostrados na Figura 32 demonstram que estes não possuem uma seção reta transversal regular, não podendo ser assegurado uma forma circular, elíptica ou retangular para tal.

Tabela 6 – Larguras estimadas das estruturas observadas por microscopia confocal.

Grupo	Guia	Largura na meia altura [ $\mu\text{m}$ ]		Parâmetros de gravação dos guais		
		Direção x	Direção y	Energia [ $\mu\text{J}$ ]	Velocidade [ $\mu\text{ms}^{-1}$ ]	Profundidade [ $\mu\text{m}$ ]
A	1	9,3	21,3	2	228,4	100
	2	5,4	18,9	1		
	3	3,7	19,4	0,5		
	4	3,2	8,9	0,2		
	5	3,2	13,3	0,1		
B	7	7,9	15,1 / 21,8 / 48,5 <sup>1</sup>	2	555,0	150
	8	8,4	12,5 / 21,6 / 40,4 <sup>1</sup>	2		
	9	7,2	28,3	1		
	10	4,5	18,6	0,5		
	11	4,2	18,4	0,2		
C	14	6,5	29,5	1	228,4	
	19	7,0	33,0		195,0	
	24	6,4	26,1		241,0	

<sup>1</sup>Os três valores mostrados referem-se às larguras  $W_1$ ,  $W_2$  e  $W_T$ , respectivamente, conforme indicadas na Figura 31 (a). Para todos os outros valores a medida é conforme a largura  $W_T$  indicada na Figura 31 (b).

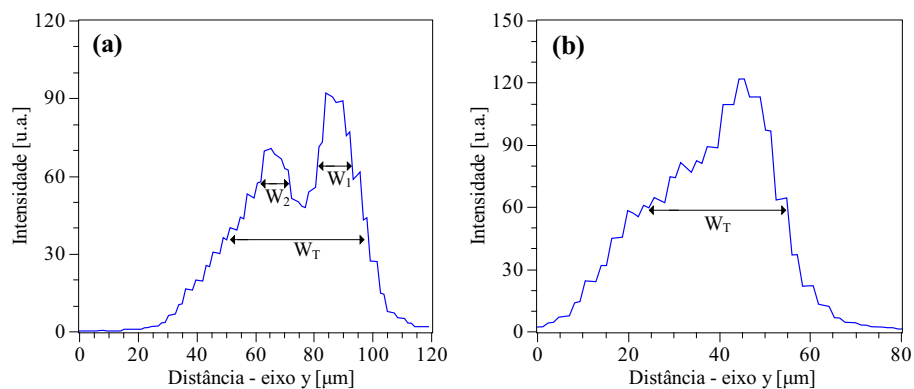


Figura 31 – Perfis de intensidade ao longo do eixo y obtidos a partir de microscopia para as estruturas (a) 7 e (b) 9 do Grupo B.

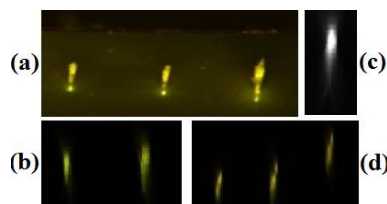
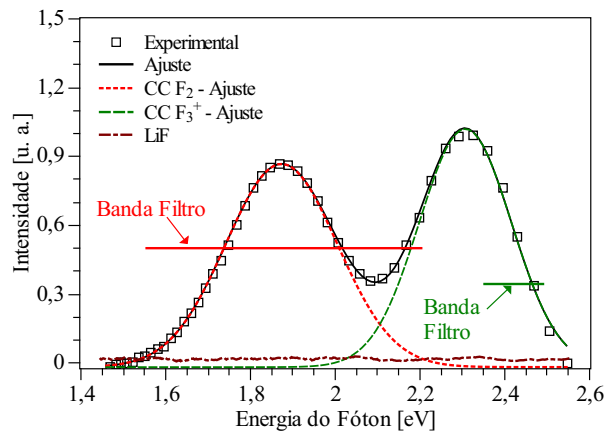


Figura 32 – Imagens da seção reta transversal das estruturas por microscopia confocal da (a) face e (b-d) interior do cristal.

### 4.3 FOTOLUMINESCÊNCIA

É mostrado na Figura 33 o gráfico do espectro de emissão das estruturas produzida quando iluminadas com um laser de argônio sintonizado em 457,9 nm. Também estão indicadas no gráfico - linhas retas horizontais - as larguras da banda passante dos filtros do microscópio confocal utilizados na obtenção das imagens mostradas nas Figura 29 (b) e (c). Os símbolos quadrados indicam a medida experimental de emissão das estruturas, a linha contínua é a aproximação por duas gaussianas, indicadas pelas linhas pontilhada e tracejada, bem como o espectro de emissão do cristal de LiF quando sob a mesma condição de iluminação das estruturas. Os dois picos de emissão observados demonstram que as bandas de emissão no verde e do vermelho originam-se apenas nas modificações estruturais induzidas pelo laser de fs no cristal de LiF.



**Figura 33 – Espectros de emissão das estruturas e do cristal de LiF sob o mesmo sistema de iluminação.**

Os valores característicos das duas gaussianas utilizadas no ajuste foram comparados com os publicados na literatura para as bandas de emissão dos centros de cor  $F_2$  e  $F_3^+$  (VINCENTI et al., 2010, p. 10), quando bombeados na banda em torno de 460 nm, conforme valores mostrados na Tabela 7.

**Tabela 7 – Valores de pico e largura de banda dos espectros dos CC.**

Centros de Cor	Guias em Cristal de LiF		Valores de Referência	
	Pico de Emissão [eV]	Bandas de Emissão [eV]	Pico de Emissão [eV]	Bandas de Emissão [eV]
$F_2$	1,87	0,30	1,83	0,36
$F_3^+$	2,31	0,25	2,29	0,31

Parte das diferenças entre os valores pode ser atribuída à resolução do espectrômetro

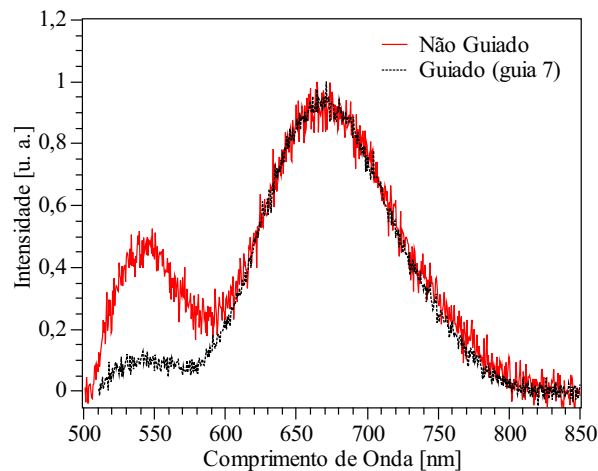


utilizado, em torno de 6 nm, sendo de, aproximadamente, 0,02 e 0,03 eV para as bandas centradas em 1,87 e 2,31 eV, respectivamente.

#### 4.3.1 Emissão Guiada e Não Guiada nos Guias de Onda

A Figura 34 apresenta os espectros medidos sob a mesma condição de iluminação das estruturas, porém, captando a emissão em condições diferentes, uma de forma a medir o espectro de emissão não guiado pelos guias de onda e outra registrando o espectro guiado pelo guia de onda 7 do Grupo O.

A curva vermelha contínua mostra o espectro de emissão sem o efeito de guiamento do guia de onda. A curva preta pontilhada mostra o espectro de emissão guiado pelo guia de onda. Observa-se uma redução do espectro na banda em torno de 540 nm. Não se sabe o mecanismo por trás deste favorecimento da propagação na região do vermelho, mas este comportamento também foi observado em um guia de onda planar em cristal de LiF produzido por um feixe de elétrons (MONTEREALI et al., 2001).

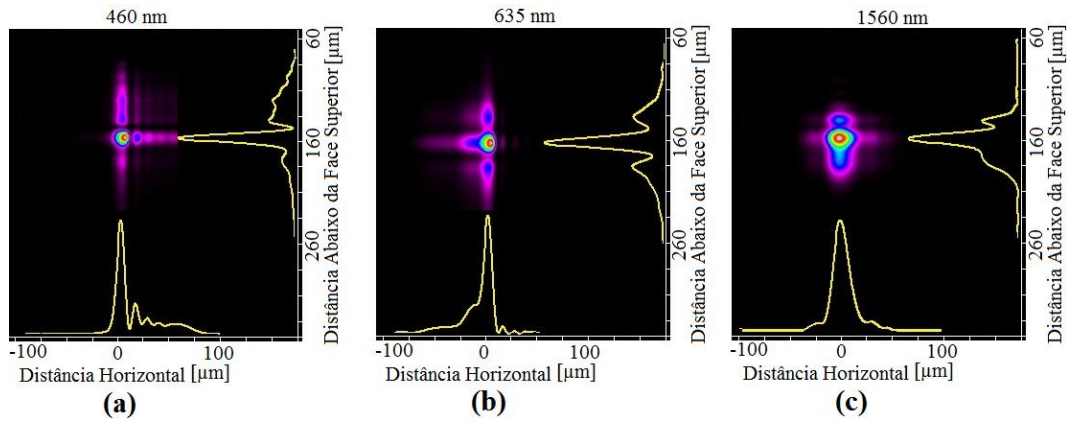


**Figura 34 – Espectros de emissão dos CC não guiado e guiado.**

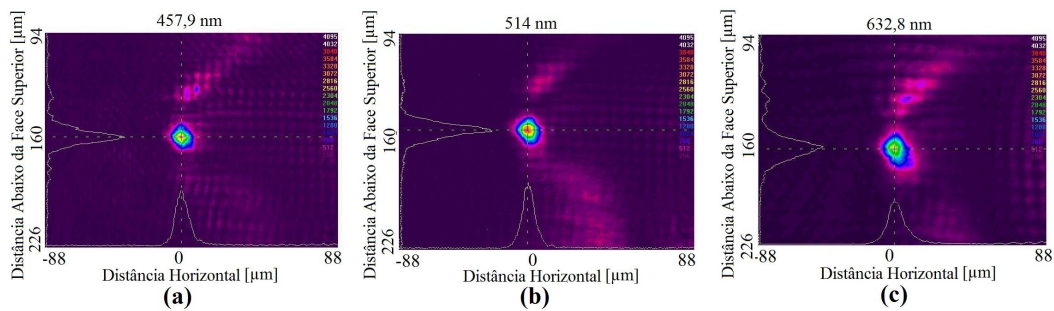
#### 4.4 GUIAMENTO LUZ E PERFIL DE CAMPO PRÓXIMO

A caracterização das estruturas produzidas no interior do cristal de LiF como guias de onda ópticos foi realizada via observação do perfil de intensidade do campo próximo. As Figuras 35 e 36 mostram os mapas bidimensionais e os cortes ao longo dos planos horizontal e vertical dos perfis de campo próximo medidos para o guia de onda 5 do Grupo O, sendo acoplado nele fontes de luz com banda de emissão centrada em diferentes comprimentos de

onda (457,9 nm, 460 nm, 514 nm, 632,8 nm, 635 nm e 1550 nm). No apêndice B são mostrados os perfis para os demais guias de onda do Grupo O.



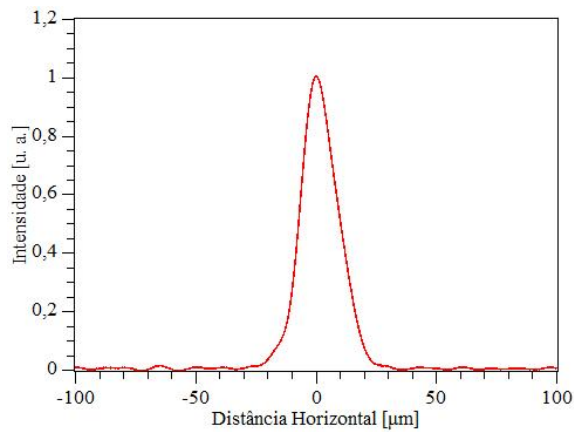
**Figura 35 – Perfil de campo próximo do guia de onda 5, Grupo O, acoplado com diferentes fontes de luz com em emissão centrada em: (a) 460 nm. (b) 635 nm e (c) 1550 nm.**



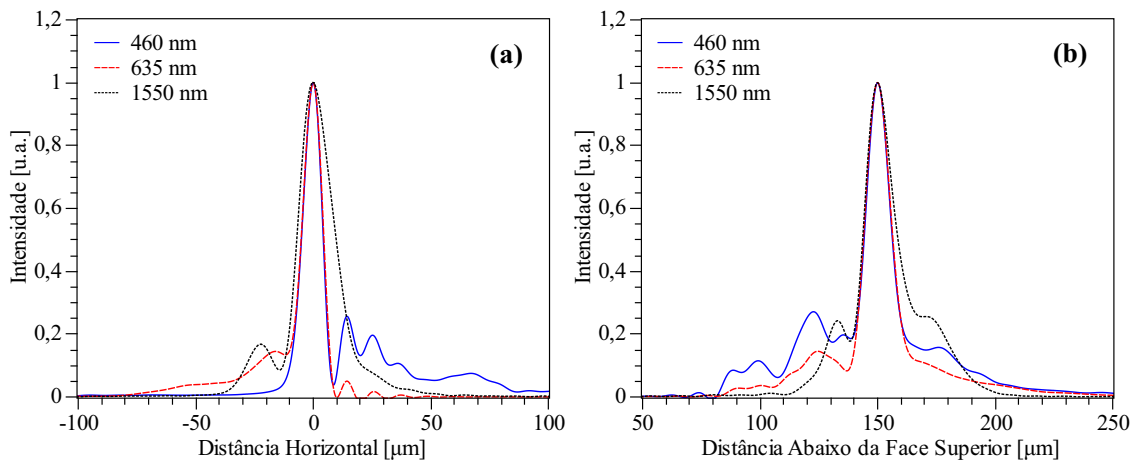
**Figura 36 – Perfil de campo próximo do guia de onda 5, Grupo O, acoplado com diferentes fontes de luz com em emissão centrada em: (a) 457,9 nm. (b) 514 nm e (c) 632,8 nm.**

Os perfis de campo próximos mostrados na Figura 35 foram medidos no LOOP-UTFPR, enquanto os mostrados na Figura 36 foram medidos no ENEA C. R. Frascati, sendo em cada experimento utilizado um medidor de perfil de campo distinto, o que explica as diferenças na forma de apresentação dos perfis das Figuras 35 e 36

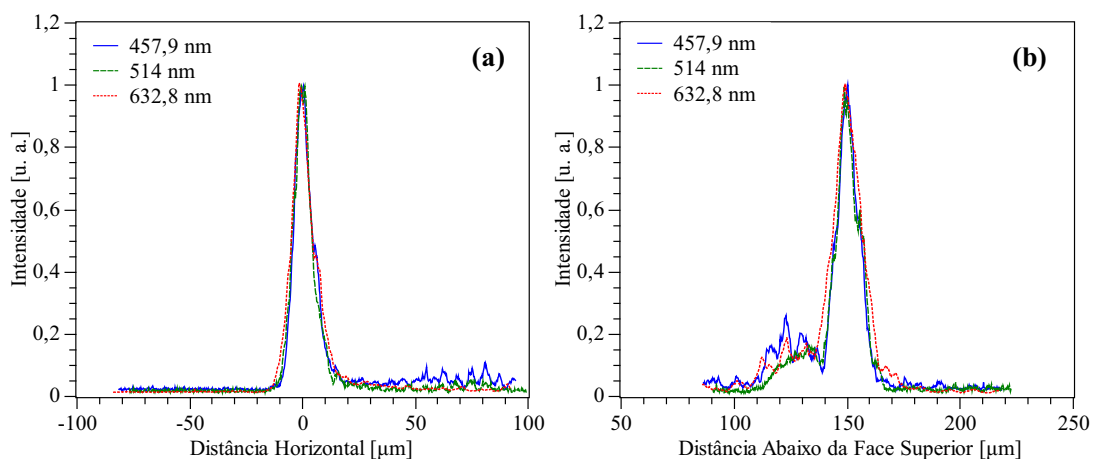
O gráfico mostrado na Figura 37 mostra o perfil do feixe do laser de 635 nm passando pelas objetivas de microscópio e pelo cristal de LiF numa região distante dos guias de onda. Os perfis horizontais e verticais em função das distâncias centradas no ponto máximo do perfil e da profundidade a partir da face superior do cristal, respectivamente, para o guia de onda 4 do Grupo O são apresentados em detalhe nas Figuras 38 e 39, conforme as medidas realizadas no LOOP-UTFPR e ENEA C. R. Frascati, respectivamente. Os perfis mostrados foram obtidos por acoplamento a partir da face 1 do cristal. Nos perfis de campo próximo mostrados verifica-se uma região intensa concentrada ao longo de aproximadamente  $20 \mu\text{m}$  em torno da distância horizontal central e da distância abaixo da face superior de  $150 \mu\text{m}$ , para os perfis horizontal e vertical, respectivamente.



**Figura 37 – Perfil do feixe do laser de 635 nm passando pelo cristal de LiF.**



**Figura 38 – Perfis obtidos a partir de diferentes comprimentos de ondas, para o guia de onda número 4 do Grupo O (UTFPR-LOOP), ao longo da direção (a) horizontal e (b) vertical.**

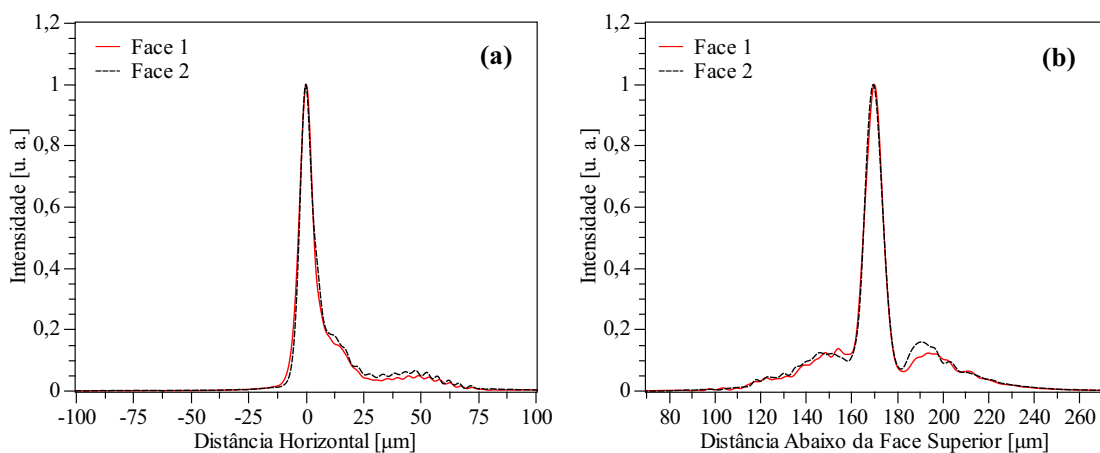


**Figura 39 – Perfis obtidos a partir de diferentes comprimentos de ondas, para o guia de onda número 4 do Grupo O (ENEA C. R. Frascati), ao longo da direção (a) horizontal e (b) vertical.**

O pico de intensidade observado nos perfis de campo próximo indica o confinamento da luz devido à capacidade de guiamento das estruturas produzidas no interior do cristal de

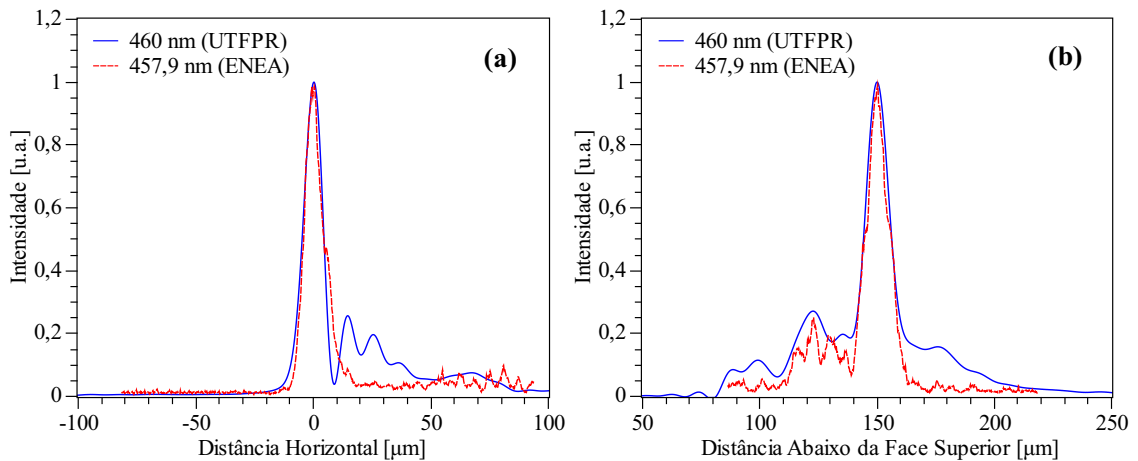
LiF. Fora destas regiões, as variações observadas do perfil de intensidade se devem a reflexões inerentes do sistema de acoplamento e a padrões de interferência formados por elas. Além disso, há distorções devido à ablação de material nas extremidades dos guias causada pela passagem do feixe focalizado entre as interfaces ar-cristal durante o processo de gravação destes. Foi verificada a possibilidade de acoplamento posicionando o foco da objetiva de microscópio em diferentes posições na entrada dos guias porém, devido à baixa intensidade destes perfis, eles não puderam ser registrados. Tal comportamento pode ser atribuído à ablação de material que causa um dano na região central do guia e densificação nos seus arredores, resultando em incremento do índice de refração, sendo a luz acoplada por estas regiões e não pela central.

A Figura 40 compara os perfis de campo próximo medidos, com acoplamento da fonte de luz com banda de emissão centrada em 635 nm, a partir das faces 1 e 2 do cristal para o guia de onda 6, Grupo O. Os perfis são coerentes entre si e a assimetria observada nos perfis mostrados na Figura 40 (a) se deve ao difícil alinhamento do cristal com o sistema ótico e não está relacionada com a condição de guiamento, o que implicaria em uma inversão da assimetria para os acoplamentos realizados a partir das faces 1 e 2. No apêndice C são mostrados os gráficos para os demais guias de onda do Grupo O.

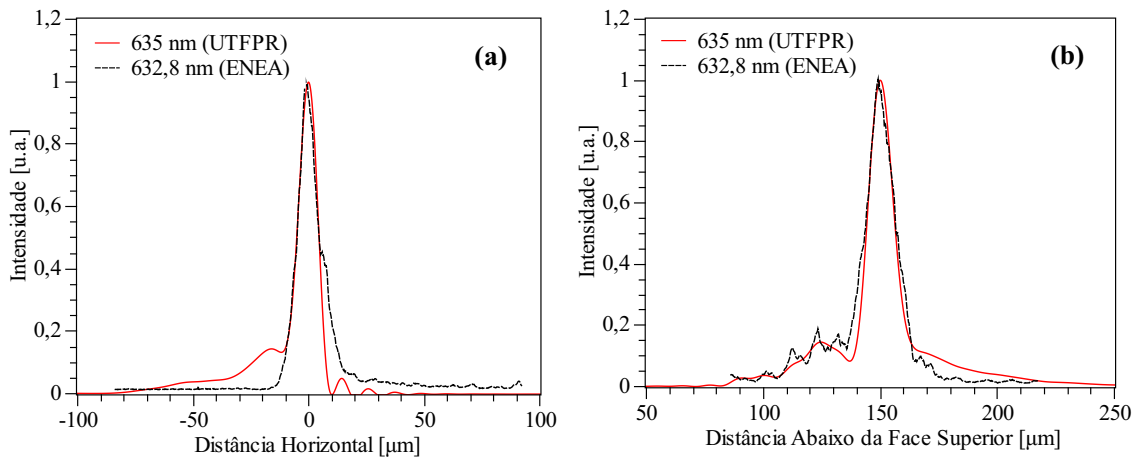


**Figura 40 – Comparação dos perfis de campo próximo para acoplamento via faces 1 e 2 para as direções (a) horizontal e (b) vertical para o guia de onda 6 do Grupo O.**

As Figuras 41 e 42 apresentam, para fins de comparação, os perfis de campo próximos agrupados conforme as fontes de luz utilizadas com comprimentos de onda semelhantes, 457,9 nm e 460 nm e também 632,8 nm e 635 nm, respectivamente. Assim, a capacidade de guiamento das estruturas produzidas pôde ser comprovada por meio de dois sistemas óticos de acoplamento, e de diferentes objetivas de microscópio, fontes de luz e sistema de medição do perfil de campo próximo, conforme detalhado no capítulo sobre a metodologia aplicada no desenvolvimento desta tese.



**Figura 41 – Comparação dos perfis de campo próximo medidos utilizando fontes de luz com comprimentos de onda de 457,9 nm e 460 nm, para a direção (a) horizontal e (b) vertical.**



**Figura 42 – Comparação dos perfis de campo próximo medidos utilizando fontes de luz com comprimentos de onda de 635 nm e 632,8 nm, para a direção (a) horizontal e (b) vertical.**

A Tabela 8 mostra as larguras na meia altura dos perfis de campo próximo. Os guias de onda 2 e 3, do Grupo O, não apresentaram repetibilidade consistente da condição de acoplamento durante os experimentos desenvolvidos e não foram avaliados quanto às medidas da largura na meia altura dos perfis de intensidade dos campos próximos.

As diferenças, entre as larguras na meia altura medidas com fontes de luz com comprimentos de onda próximos entre si devem-se às diferenças dos equipamentos utilizados nos dois laboratórios onde as medidas foram realizadas. Na banda do azul, foi utilizado um laser semiconductor, no LOOP–UTFPR, enquanto que no ENEA C. R. Frascati foi usado um laser de argônio, sintonizado em 457,9 nm e 514 nm. Na banda do vermelho foi, novamente, utilizado um laser semiconductor no LOOP–UTFPR e um laser de hélio neônio no ENEA C. R. Frascati. Além das diferentes fontes de luz, na UTFPR foram utilizadas objetivas de microscópio de 10X e no ENEA C. R. Frascati de 20X; o medidor de perfil de feixe usado no LOOP–UTFPR

utiliza um sistema de fendas rotatórias e detector de potência para obtenção dos perfis de feixe, enquanto o medidor utilizado no ENEA C. R. Frascati é baseado em uma CCD (*charge-coupled device*). A parte das observações citadas sobre a variação nas larguras medidas, existe uma tendência de alargamento do perfil de intensidade do campo próximo em função do aumento do comprimento de onda das fontes de luz utilizadas. Tal comportamento está de acordo com as funções que descrevem o campo eletromagnético em guias de onda óticos (OKAMOTO, 2006, p. 29 e 62)(DYOTT, 1995, p. 37).

**Tabela 8 – Largura na meia altura dos perfis de campo próximo.**

Guia	CDO [nm] <sup>1</sup>	Largura na Meia Altura do Perfil de Campo Próximo [ $\mu\text{m}$ ]	
		Horizontal	Vertical
4	457,9	8,7	11,9
	460	9,3	12,1
	514	9,3	12,1
	632,8	9,6	13,7
	635	9,7	12,6
	1550	16,8	15,5
5	457,9	8,8	8,4
	460	9,5	10,1
	514	8,2	8,1
	632,8	10,6	13,1
	635	10,6	12,8
	1550	18,7	14,9
6	457,9	9,2	12,3
	460	9,5	9,8
	514	8,3	12,3
	632,8	10,8	13,1
	635	10,6	12,5
	1550	17,7	17,0
7	457,9	8,0	12,9
	460	9,6	11,3
	514	9,7	14,3
	632,8	9,6	13,2
	635	9,8	12,0
	1550	16,7	16,7

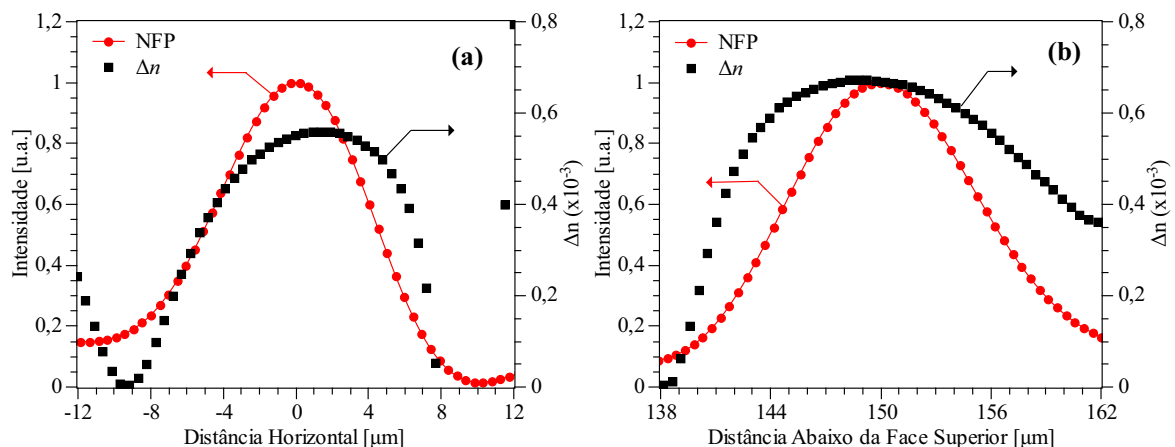
<sup>1</sup>457,9, 514 e 632,8 nm medidas realizadas no ENEA C. R. Frascati e 460, 635, 1550 nm no LOOP-UTFPR.

Observa-se que a largura dos perfis de campo próximo possui dimensões menores ao longo do eixo x do que ao longo do eixo y, direção horizontal e vertical, respectivamente.

Tal diferença era esperada uma vez que as dimensões das modificações estruturais produzidas no interior do cristal de LiF apresentam seções retas transversais com largura horizontal mais estreita que a vertical.

#### 4.4.1 Estimativa do Incremento do Índice de Refração do Núcleo dos Guias

A estimativa do incremento do índice de refração do guia de onda 4 do Grupo O, conforme procedimento descrito na seção 3.4, e seus perfis de campos próximos experimentais nas direções horizontal e vertical utilizados para tal são apresentados na Figura 43. Devido à derivada segunda envolvida no processo de estimativa do incremento do índice de refração do núcleo - ver equação 5; foram usados, devido à melhor relação sinal ruído, somente os perfis de campo próximo medidos com a fonte de luz de 635 nm. Somente as regiões centrais dos perfis de intensidade dos campos próximos experimentais puderam ser consideradas, porque fora destas regiões existem variações da intensidade do perfil devido aos danos causados pela ablação de material no processo de gravação dos guias e também por padrões interferométricos gerados por reflexões do feixe de laser entre as objetivas e o cristal de LiF. Além disso, há distorções devido a ablação de material nas extremidades dos guias que degradam a relação sinal ruído.



**Figura 43 – Perfil de campo próximo, na direção horizontal, medido experimentalmente e mapeamento do incremento do índice de refração na região do núcleo do guia 4, Grupo O.**

Os valores máximos estimados para o incremento do índice de refração dos guias de onda 4 a 7, do Grupo O, são mostrados na Tabela 9. As estimativas são separadas em dois grupos: estimativas a partir do perfil de campo próximo medido na horizontal e na vertical.

Os valores estimados do incremento do índice de refração nas direções horizontal e vertical foram considerados, para cada guia de onda, como uma faixa de valores possíveis para o

incremento do índice de refração, sendo, a partir destas, realizado um refinamento da estimativa através de simulação numérica, conforme apresentado nas próximas seções.

**Tabela 9 – Estimativa do Incremento do Índice de Refração a partir dos Respectivos NFP.**

Guia	Máximo Incremento do Índice de Refração	
	$\Delta n (\times 10^{-4})$	
	Horizontal	Vertical
4	6,7	5,6
5	5,6	3,8
6	5,6	4,0
7	3,2	6,1

#### 4.4.2 Dimensões da Seção Transversal e do Incremento do Índice de Refração dos Guias

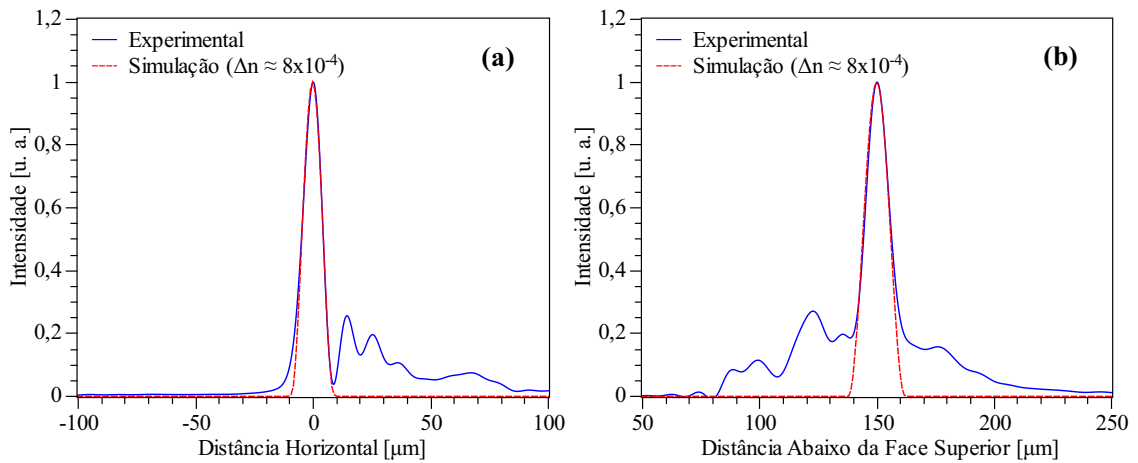
A partir dos valores estimados do incremento dos índices de refração, mostrados na Tabela 28, foram estimadas as dimensões da seção reta transversal dos guias de onda gravados em cristal de LiF, bem como do incremento do índice de refração para acoplamentos utilizando fontes com bandas de emissão centradas em 460 nm, 635 nm e 1550 nm, conforme procedimento descrito na seção 3.4. A Tabela 10 apresenta os valores obtidos a partir do procedimento de simulação dos perfis de campo próximo das dimensões e dos incrementos do índice de refração dos guias de onda analisados. Estes valores foram determinados ajustando-se o perfil de campo próximo experimental ao simulado para os três comprimentos de ondas considerados.

**Tabela 10 – Estimativa da Dimensão e do Incremento do Índice de Refração do Núcleo dos Guias de Onda.**

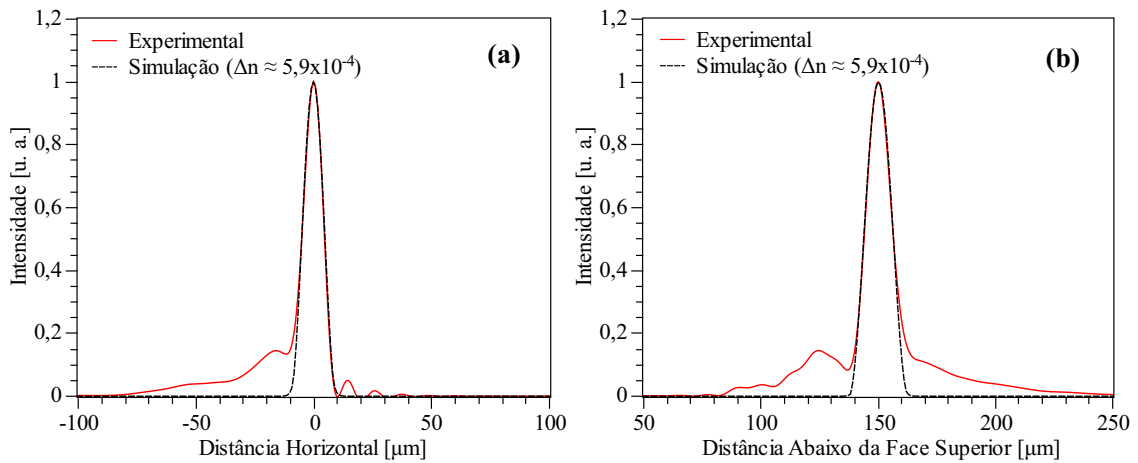
Guia	Dimensão da Seção Reta		Incremento do Índice de Refração		
	[ $\mu\text{m}$ ]		$\Delta n (\times 10^{-4})$		
	Horizontal	Vertical	460 [nm]	635 [nm]	1550 [nm]
4	8,1	10,9	8	5,9	3,0
5	8,2	10,0	9	3,8	2,2
6	8,3	9,6	8	4,0	2,3
7	8,3	10,2	10	6,1	2,8

As Figuras 44, 45 e 46 apresentam os perfis de campo próximo medidos experimentalmente e simulados a partir dos dados da Tabela 10 para os comprimentos de ondas de 460 nm, 635 nm e 1550 nm, respectivamente, todos para o guia de onda 4 do Grupo O.

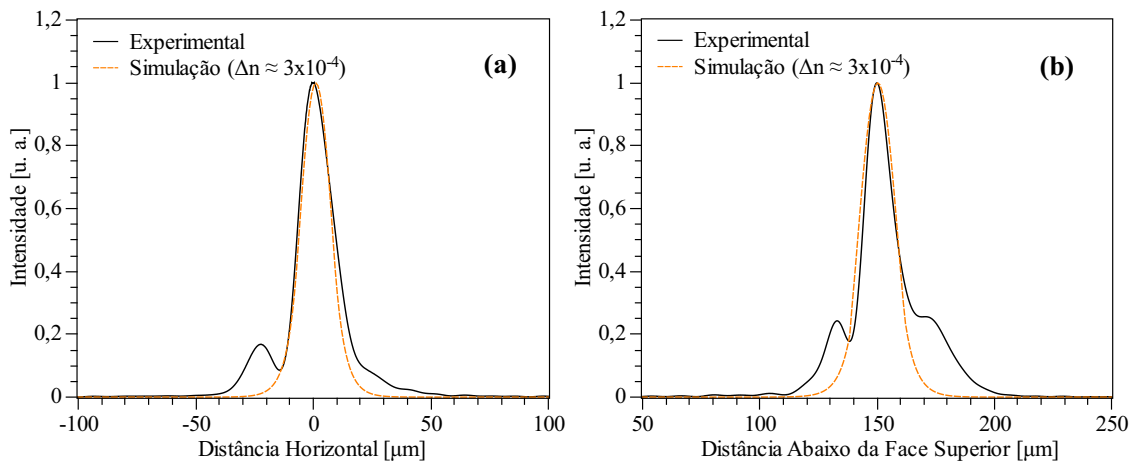




**Figura 44 – Perfis de campo próximo medidos experimentalmente e simulados para comprimento de onda de 460 nm, nas direções (a) horizontal e (b) vertical.**



**Figura 45 – Perfis de campo próximo medidos experimentalmente e simulados para comprimento de onda de 635 nm, nas direções (a) horizontal e (b) vertical.**



**Figura 46 – Perfis de campo próximo medidos experimentalmente e simulados para comprimento de onda de 1550 nm, nas direções (a) horizontal e (b) vertical.**

Como verificado na validação do método de simulação dos perfis de campo próximo, a região de melhor confiabilidade para a realização de comparações é do ponto máximo até aproximadamente 35% da intensidade do perfil. Observando-se isso, tem-se uma coerência entre as simulações dos perfis de campos próximos e os medidos experimentalmente para os comprimentos de onda de 460 nm e 635 nm. As simulações realizadas em 1550 nm mostram uma diferença maior entre o perfil simulado e o medido experimentalmente do que as diferenças observados para os comprimentos de ondas de 460 nm e 635 nm. Isso se deve, principalmente, à fonte de luz utilizada que possui banda larga, aproximadamente 41 nm, o que implica em um perfil medido experimentalmente composto por todos os comprimentos de ondas da banda, em contraste com o perfil simulado que contempla somente um único comprimento de onda. A Tabela 11 apresenta as medidas na meia altura dos perfis de campos próximos simulados e os medidos experimentalmente.

**Tabela 11 – Largura na meia altura dos perfis de campo próximos simulados e medidos.**

G u i a	N F P	Comprimento de Onda					
		460 [nm]		635 [nm]		1550 [nm]	
		Largura na Meia Altura [ $\mu\text{m}$ ]					
		Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
4	Exp.	9,3	12,1	9,7	12,6	16,8	15,5
	Sim.	9,0	11,9	9,8	12,5	14,5	17,0
5	Exp.	9,5	10,1	10,6	12,8	18,7	14,9
	Sim.	9,1	10,9	10,3	12,1	16,4	17,9
6	Exp.	9,5	9,8	10,6	12,5	17,7	17,0
	Sim.	9,2	10,5	10,4	12,0	15,7	17,1
7	Exp.	9,6	11,3	9,8	12,0	16,7	16,7
	Sim.	9,2	11,1	9,9	11,8	15,0	16,6

Com as estimativas obtidas da dimensão e do incremento do índice de refração do núcleo dos guias de onda foram investigados os possíveis modos propagantes suportados pelos guias de onda nos comprimentos de ondas analisados (460 nm, 635 nm e 1550 nm).

#### 4.5 MODOS PROPAGANTES

Não foi possível determinar, de forma inequívoca, a morfologia da seção reta transversal dos núcleos ao longo dos guias de onda estudados. Assim, na análise dos modos propagantes suportados pelos guias, foram comparados os valores estimados das suas frequências normalizadas, calculados substituindo os valores de “d” na equação 6, pelas dimensões estimadas nas direções horizontais e verticais, considerando os valores dos índices

de refração apresentados na Tabela 10, com os valores das frequências de normalizadas de corte para a condição monomodal, avaliando a seção reta transversal como retangular, elíptica ou circular para os núcleos dos guias de onda. A Tabela 12 mostra os valores obtidos. Na tabela, a/b representa a relação entre as dimensões horizontal e vertical do guia de onda.

**Tabela 12 – Frequências normalizadas em função dos comprimentos de ondas.**

G u i a	a/b	CDO [nm]	Direção	Frequência Normalizada Estimada	Frequência Normalizada de Corte para Condição Monomodal versus Seção Transversal		
					Retangular <sup>1</sup>	Elíptica <sup>2</sup>	Circular <sup>2</sup>
4	0,74	460	H	2,6	1,13	2,05	
			V	3,5			
		635	H	1,6			
			V	2,2			
		1550	H	0,5			
			V	0,6			
5	0,82	460	H	2,8	1,22	2,15	
			V	3,4			
		635	H	1,3			
			V	1,6			
		1550	H	0,4			
			V	0,5			
6	0,86	460	H	2,6	1,30	2,35	2,4
			V	3,1			
		635	H	1,4			
			V	1,6			
		1550	H	0,4			
			V	0,5			
7	0,82	460	H	3,0	1,22	2,15	
			V	3,7			
		635	H	1,7			
			V	2,1			
		1550	H	0,5			
			V	0,6			

<sup>1</sup>Obtidas a partir da simulação validada na seção 3.5.1.

<sup>2</sup>(DYOTT, 1995, p. 79)

A partir da comparação dos valores da Tabela 12, verificam-se diferentes condições dos modos suportados em função dos perfis considerados. Assim, assumindo que os guias óticos produzidos tenham núcleo com seção reta circular, os guias são monomodais em 635 nm e 1550 nm. Para um perfil transversal do núcleo na forma elíptica, os guias 5, 6 e 7 apresentam condição de propagação monomodal em 635 nm e 1550 nm. Por fim, adotando uma seção

reta transversal retangular dos guias, estes seriam monomodais somente para o comprimento de onda de 1550 nm. A análise anterior é de caráter qualitativo, sendo necessárias informações mais robustas sobre a morfologia da seção reta transversal dos guias de onda produzidos para uma estimativa mais exata dos modos suportados pelos guias em função dos diferentes comprimentos de ondas analisados.

#### 4.6 PERDAS NA PROPAGAÇÃO

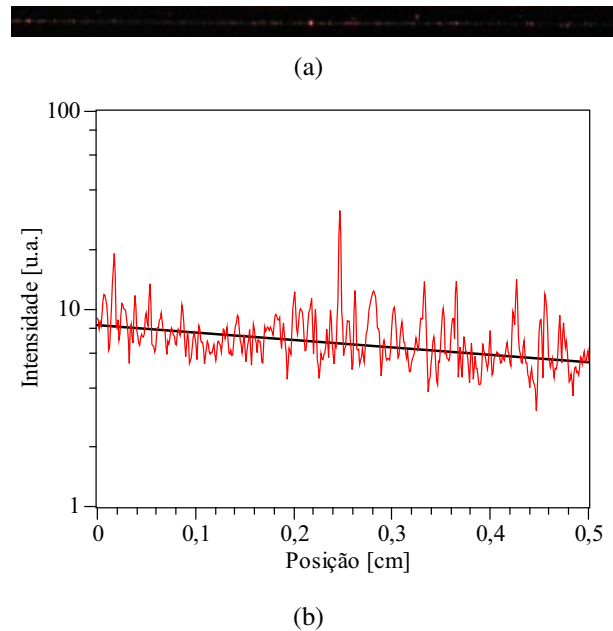
As perdas na propagação foram estimadas a partir do perfil de decaimento da intensidade da luz espalhada ao longo de cada guia de onda, utilizando diferentes fontes de luz acopladas neles (457,9 nm, 514 nm e 632,8 nm). Diferentes mecanismos contribuem para as perdas na propagação em uma guia de onda ótica, sendo os principais as perdas por absorção e por espalhamento (MARCUSE, 1981, p. 39). Distintos modos propagantes nos guias possuem diferentes perdas na propagação (MARCUSE, 1981, p. 244), isto significa que para um dado guia de onda, no qual são acopladas fontes de luz que possuem diferentes comprimentos de ondas, pode haver um número desigual de modos propagantes para cada fonte utilizada resultando, assim, em uma variação das perdas na propagação dependente do número de modos confinados no guia de onda que, por sua vez, é dependente do comprimento de onda da fonte de luz utilizada. A Figura 47 mostra, para o guia de onda 6 do Grupo O, (a) a imagem obtida da luz espalhada ao longo do guia e (b) o perfil de decaimento da intensidade com a reta ajustada a ele, quando acoplado ao guia um fonte com banda de emissão centrada em 632,8 nm. A Tabela 13 mostra os valores estimados das perdas na propagação em dB/cm.

**Tabela 13 – Estimativa das perdas na propagação.**

Guia	Perdas na Propagação [dB/cm] nos CDOs		
	457,9 [nm]	514 [nm]	632,8 [nm]
4	5,6	5,6	7,8
5	4,7	5,7	4,9
6	2,1	4,8	5,8
7	4,5	4,5	9,2

No caso dos guias de onda gravados em cristal de LiF, além dos mecanismos de perdas citados, há diferentes centros de cor, cada tipo possuindo uma banda de absorção que pode ou não se sobrepor à banda de emissão de outros CC (ver seção 2.3.2). No caso dos valores estimados para as perdas na propagação, em função dos comprimentos de ondas, mostrados na Tabela 13, pode haver contribuição das bandas de absorção relacionadas aos CC dos tipos F<sub>2</sub>,

$F_3^+$ ,  $F_2^+$ ,  $F_3^-(R_1')$ ,  $F_44(N_1)$  e  $F_4$ -like (VINCENTI et al., 2010, p. 10).

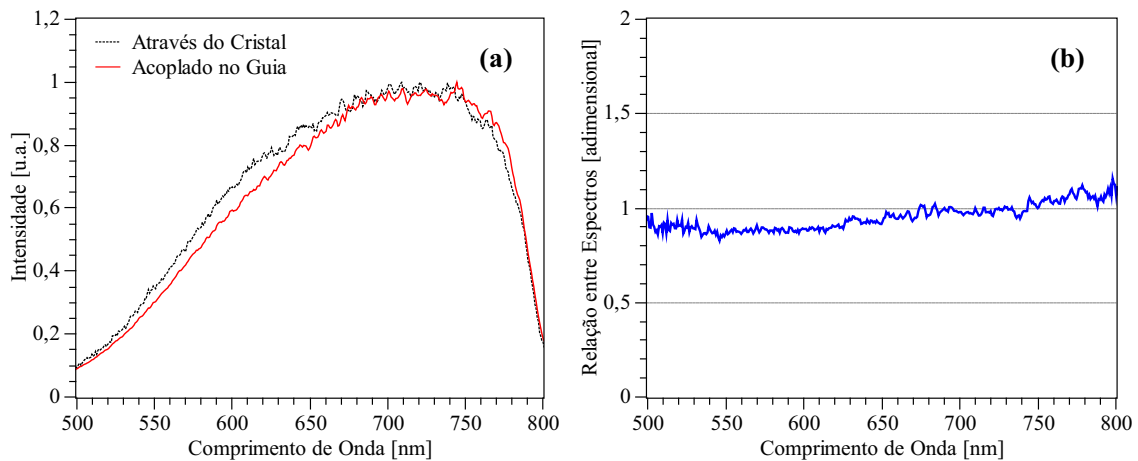


**Figura 47 – (a) Imagem ao longo do guia de onda 6, Grupo O e (b) o gráfico do perfil de intensidade.**

Os centros  $F_2$  e  $F_3^+$  possuem banda de absorção em torno de 450 nm, contribuindo, dessa forma, para as perdas na propagação quando é acoplada aos guias de onda uma fonte de luz com emissão centrada em 457,9 nm. Quando a fonte usada tem banda centrada em 514 nm o CC do tipo  $F_44(N_1)$ , que possui banda de absorção centrada em 517 nm, pode contribuir para as perdas na propagação. Por fim, os CC dos tipos  $F_2^+$ ,  $F_3^-(R_1')$  e  $F_4$ -like absorvem nos comprimentos de onda na banda do vermelho, com a possibilidade de contribuírem para as perdas na propagação quando a fonte de luz com emissão centrada em 632,8 nm é acoplada nos guias de onda. Até o momento da redação desta tese, não foi possível verificar, nos guias de onda produzidos no cristal de LiF, a presença ou não de todos os CC acima citados. Sabe-se, entretanto, que eles podem existir em cristais de LiF submetido a radiação por diferentes agentes.

#### 4.7 GUIAS DE ONDA DE BRAGG

A análise sobre a presença de modulação no índice de refração do núcleo ao longo dos guias de onda é composta por uma relação entre o espectro medido na saída do guia, de um feixe de luz de banda larga acoplado nele e o espectro passando pelo cristal de LiF em uma região afastada dos guias de onda. A Figura 48 mostra (a) os espectros medidos e (b) a relação entre tais espectros para o guia de onda 5 do Grupo O, que possui, teoricamente, um comprimento de onda de Bragg de 659 nm.



**Figura 48 – (a) Espectros da fonte de luz medido quando acoplado no guia 5 e quando passando somente pelo cristal de LiF e (b) relação entre espectro medido no guia e no cristal.**

A relação entre os espectros apresentada não indica nenhum vale que caracterize o efeito de uma rede de Bragg atuando sobre o sinal luminoso propagante no guia de onda. O mesmo experimento foi realizado para todos os guias de onda e nenhum mostrou indícios na relação de espectros que confirmassem a produção de um guia de onda de Bragg.

Todavia, não se pode afirmar nada sobre produção ou não de um guia de onda de Bragg porque recentemente fomos informados de um possível erro entre a velocidade programada e a velocidade do posicionador sobre o qual o cristal de LiF foi alocado no processo de gravação dos guias de onda na UFPE. Até a redação desta tese a velocidade efetiva de deslocamento não havia sido elucidada.

## 5 CONCLUSÕES

A inspeção visual comprovou que a interação dos pulsos do laser de fs, com energia de unidades de micro joules, com o cristal de LiF, produziu alterações estruturais delimitadas nas proximidades do ponto focal do feixe do laser. As diferentes profundidades na qual foram produzidas indicam a flexibilidade do método para gravações de sistemas óticos tridimensionais. As medidas do perfil de campo próximo demonstraram a capacidade de guiamento ótico das estruturas produzidas por técnica de gravação ponto a ponto de guias de ondas em cristal de LiF.

O incremento do índice de refração induzido pelo laser focalizado foi da ordem de  $10^{-4}$  e mostrou-se suficiente para o confinamento ótico. Os guias produzidos apresentaram capacidade de guiamento em condições tanto monomodais quanto multimodais, quando operando em diferentes comprimentos de onda. Os perfis de campo próximo e as dimensões estimadas dos guias de ondas óticos produzidos demonstram que é possível configurar o sistema de gravação para obtenção de guias de ondas óticos monomodais. Os valores de  $\Delta n$  demonstram a possibilidade de escrever guias de onda em LiF com baixo contraste de índice utilizando essa técnica.

Os danos nas superfícies de entrada/saída do cristal, na região das estruturas dos Grupos A e, principalmente a inclinação das estruturas dos Grupos A, B e C em relação à face superior do cristal impossibilitaram o acoplamento ótico nestes grupos.

Utilizando técnica de visualização por microscopia confocal foi comprovado que centros de cor foram produzidos na amostra de cristal de LiF, que previamente não os continha em sua rede atômica, somente nas regiões expostas ao laser pulsado com duração na ordem de 100 femtosegundos. A região de formação dos centros de cor também foi confirmada quando os guias de ondas no cristal de LiF foram iluminados por fontes de luz com banda em torno de 460 nm, sendo que o espectro de emissão medido demonstrou bandas características dos centros de cor  $F_2$  e  $F_3^+$ , sendo estas observadas somente ao iluminar os guias.

Até o momento, nenhuma periodicidade no incremento do índice de refração dos

guias de ondas produzidos foi detectada, nem por análise espectral nem por observação através de microscopia convencional ou microscopia confocal. Porém, devido à inexatidão quanto a real velocidade de deslocamento do cristal nos processos de gravação realizados, não se pode avaliar os procedimentos e resultados sobre a produção de guias de ondas de Bragg de forma consistente.

As medidas e resultados observados demonstram a produção de guias de ondas óticamente ativos e são promissores para o desenvolvimento de lasers de centros de cor em guias de ondas gravados em cristal de LiF.

São indicados os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- Aplicar fendas ou lentes para obtenção de guias com perfil transversal aproximadamente circular;
- Estudar efeitos de polarização do feixe do laser de gravação;
- Investigar procedimentos para polimento das faces do cristal de LiF;
- Investigar obtenção de modulação do incremento do índice de refração ao longo do guia – formação de BGW e;
- Investigar a capacidade de amplificação ótica dos guias de ondas produzidos. (No desenvolvimento desta tese foi investigada tal capacidade, mas, devido a uma distorção não linear do espectrômetro na banda de interesse, os dados obtidos não puderam ser analisados de forma inequívoca).



## REFERÊNCIAS

- ADAMS, M. **Introduction to Optical Waveguide**. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd., 1981.
- AKIN, O.; DINLEYICI, M. S. An all-optical switching based on resonance breaking with a transient grating. **Journal of Lightwave Technology**, v. 28, n. 23, p. 3470–3477, 2010.
- ALWAN, J. **Eye safety and wireless networks (WONs)**. Disonível em: [http://oed-pc75.tte.ele.tue.nl/OO8/uploads/WP\\_laser\\_eye\\_safety.pdf](http://oed-pc75.tte.ele.tue.nl/OO8/uploads/WP_laser_eye_safety.pdf): [s.n.], dez 2001. Acesso em: 15 dez. 2010.
- AMS, M. et al. Monolithic 100 mw yb waveguide laser fabricated using the femtosecond–laser direct–write technique. **Optics Letters**, v. 34, n. 3, p. 247–249, 2009.
- AMS, M. et al. Slit beam shaping method for femtosecond laser direct–write fabrication of symmetric waveguides in bulk glasses. **Optics Express**, v. 13, n. 15, p. 5675–5681, July 2005.
- ARKHANGEL'SKAYA, V. A.; FEOFILOV, P. P. Tunable lasers utilizing color centers in ionic crystals (review). **Soviet Journal of Quantum Electronics**, v. 10, n. 6, p. 657–667, 1980.
- BALDACCHINI, G. Colored lif: an optical material for all seasons. **Journal of Luminescence**, v. 100, p. 333–343, 2002.
- BALDACCHINI, G.; BIGOTTA, S.; MONTEREALI, R. M. Emission decay times of f2 color centers in heavily irradiated lif crystals. **Journal of Luminescence**, v. 94-95, p. 299–303, 2001.
- BASIEV, T. T.; MIROV, S. B.; OSIKO, V. V. Room-temperature color center lasers. **IEEE - Journal of Quantum Electronics**, v. 24, n. 6, p. 1052–1069, 1988.
- BIBRA, M. L.; ROBERTS, A. Refractive index reconstruction of graded-index buried channel waveguides from their mode intensities. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, p. 1695–1699, 1997.
- BJORKLUND, G. C.; MOLLENAUER, L. F.; TOMLINSON, W. J. Distributed-feedback color center lasers in the 2.5-3.0  $\mu\text{m}$  region. **Applied Physics Letters**, v. 29, n. 2, p. 116–118, 1976.
- BLOEMBERGEN, N. Laser-induced electric breakdown in solids. **IEEE - Journal of Quantum Electronics**, QE-10, n. 3, p. 375–386, 1974.
- BORCA, C. N. et al. Buried channel waveguides in yb-doped ky(wo4)2 crystals fabricated by femtosecond laser irradiation. **Applied Surface Science**, v. 253, n. 31, p. 8300–8303, 2007.
- BORRELLI, N. F. et al. Densification of fused silica under 193-nm excitation. **Journal of the Optical Society of America B**, 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.

- CERULLO, G. et al. Femtosecond micromachining of symmetric waveguides at 1.5 **Optics Letters**, v. 27, n. 21, p. 1938–1940, 2002.
- CHAN, J. W. Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses. **Optics Letters**, v. 26, n. 21, p. 1726–1728, 2001.
- CMOSS-ELECTRONIC. **FTTH (Fiber to the Home) POF (Plastic Optical Fiber) Network Solution. 2008**. Disponível em: <http://www.ofweek.com/Upload/Coaic/2009-4/200941011565185.pdf>: [s.n.], 2008. Acesso em: 23 out. 2010.
- COURROL, L. C. et al. Study of color centers created by high-intensity ultra short pulse laser interaction in solids. In: **In: ENFMC, XXIX. ENFMC, 2006. Annals**. [S.l.: s.n.], 2006.
- COURROL, L. C. et al. Color center production by femtosecond pulse laser irradiation in lif crystals. **Optics Express**, v. 12, n. 2, p. 288–293, 2004.
- DAVIS, K. M. et al. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser. **Optics Letters**, v. 21, n. 21, p. 1729–1731, 1996.
- DUBOV, M. et al. Point-by-point inscription of 250 nm period structure in bulk fused silica by tightly focused femtosecond uv pulses. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 10, p. 1–6, 2008.
- DUBOV, M. et al. Uv femtosecond laser inscribes a 300 nm period nanostructure in a pure fused silica. **Measurement Science and Technology**, v. 18, p. L15–L17, 2007.
- DYOTT, R. B. **Elliptical Fiber Waveguides**. [S.l.]: Artech House, 1995.
- EATON, S. M. et al. Telecom-band directional coupler written with femtosecond fiber laser. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 18, n. 20, p. 2174–2176, 2006.
- FALMOUTH, M. **An undersea optical communications system, complemented by acoustics, is enabling a virtual revolution in high-speed undersea data collection and transmission**. Disponível em: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=41211>: [s.n.], 2010. Acesso em: 06 ago. 2010.
- FERNANDEZ, T. T. et al. Femtosecond laser written optical waveguide amplifier in phospho-tellurite glass. **Optics Express**, v. 18, n. 19, p. 20289–20297, 2010.
- FOWLER, W. B. **Physics of Color Centers**. [S.l.]: New York: Academic Press, 1968.
- FRITZ, B.; MENKE, E. Laser effect in kcl with fa(li) centers. **Solid State Communications**, v. 3, n. 3, p. 61–63, 1965.
- FUERBACH, A. et al. Direct writing of photonic devices using femtosecond laser pulses. In: **IEEE- ICTON, Th-A4-2**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–4.
- GEORGE, J. E. Optical system design considerations for ftp networks. In: **FTTH Conference 2003 - OFS**. [S.l.: s.n.], 2003.
- GRICEITE jPOWD. **jPOWD: Mineral Structures**. Disponível em: [http://webmineral.com/jpowd/JPX/jpowd.php?target\\_file=Griceite.jpj](http://webmineral.com/jpowd/JPX/jpowd.php?target_file=Griceite.jpj): [s.n.], 2009. Acesso em: 06 fev. 2009.

GUSEV, Y. L. et al. Tunable (0.86-1  $\mu\text{m}$ ) cw room-temperature laser utilizing  $\text{f}^{2+}$  color centers in an  $\text{LiF}$  crystal. **Sov. J. Quantum Electron**, v. 10, n. 5, p. 648–649, 1980.

GUSEV, Y. L.; MARENNIKOV, S. I.; NOVOZHILOV, S. Y. Generation of coherent frequency-tunable radiation in  $\text{f}$  centers. **Sov. J. Quantum Electron**, v. 8, n. 8, p. 960–961, 1978.

HILL, K. O.; MELTZ, G. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1263–1276, 1997.

HIRAO, K.; MIURA, K. Writing waveguides and gratings in silica and related materials by a femtosecond laser. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 239, p. 91–95, 1998.

ITO, Y.; HARUYAMA, S. **Short-Range Underwater Wireless Communication Using Visible LEDs**. Disponível em: <http://www.slideshare.net/guestcd295/short-range-underwater-communication-using-visible-led-presentation>: [s.n.], 2006. Acesso em: 06 ago. 2010.

KAISER, A.; VICANEK, R. M.; SIMON, G. Microscopic processes in dielectrics under irradiation by subpicosecond laser pulses. **Physical Review B**, v. 61, n. 17, p. 11437–11450, 2000.

KALINOWSKI, H. J. et al. Visible photoluminescence in coloured lithium fluoride under ultraviolet continuous wave excitation. In: **International Conference on Defects in Insulating Materials, Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 249.

KAWAMURA, K. et al. Femtosecond-laser-encoded distributed-feedback color center laser in lithium fluoride single crystal. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 352, p. 2347–2350, 2006.

KAWAMURA, K. et al. Nano-fabrication of optical devices in transparent dielectrics: volume gratings in  $\text{SiO}_2$  and dfb color center laser in  $\text{LiF}$ . **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 218, p. 332–336, 2004a.

KAWAMURA, K. et al. Femtosecond-laser-encoded distributed-feedback color center laser in lithium fluoride single crystals. **Applied Physics Letters**, v. 84, n. 3, p. 311–313, 2004b.

KAWANO, K.; KITO, T. **Introduction to optical waveguide analysis solving Maxwells equations and the Schrodinger equation**. [S.l.]: New York: John Wiley and Sons, 2001.

KOGELNIK, H.; SHANK, C. V. Stimulated emission in a periodic structure. **Applied Physics Letters**, v. 18, n. 4, p. 152–154, 1971.

KOWALEVICZ, A. M. et al. Three-dimensional photonic devices fabricated in glass by use of a femtosecond laser oscillator. **Optical Letters**, v. 30, n. 9, p. 1060–1062, 2005.

KUDRIASOV, V. et al. Comparative study of uv absorption changes induced in germanosilicate glass by high-intensity femtosecond pulses at 267, 400 and 800 nm. **Optics Communications**, v. 271, p. 408–412, 2007.

KUMAR, A.; THYAGARAJAN, K.; GHATAK, A. K. Analysis of rectangular-core dielectric waveguides—an accurate perturbation approach. **Optical Letters**, v. 8, p. 63–65, 1983.

KUROBORI, T. et al. Distributed-feedback color center lasers in wide-band gap materials fabricated by a pair of chirped femtosecond pulses. **Physica Status Solidi**, v. 2, n. 1, p. 637–640, 2005.

KUROBORI, T.; INABE, K.; TAKEUCHI, N. Room temperature visible distributed-feedback colour centre laser. **Appl. Phys.**, v. 16, p. L121–L123, 1983.

KUROBORI, T. et al. Simultaneous fabrication of laser-active colour centres and permanent microgratings in lithium fluoride by a single femtosecond pulse. **Journal of Physics: Condensed Matter**, v. 15, n. 25, p. L399–L405, 2003.

KUROBORI, T. et al. Laser-active colour centres with functional periodic structures in lif fabricated by two interfering femtosecond laser pulses. **Radiation Measurements**, v. 38, p. 759–662, 2004.

KUROBORI, T. et al. An optoelectronic device in bulk lif with sub-micron periodic gratings fabricated by interference of 400 nm femtosecond laser pulses. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 266, p. 2762–2765, 2008.

KUROBORI, T. et al. Fabrication of optoelectronics devices in lithium fluoride crystals by interfering femtosecond laser pulses. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 47, n. 1, p. 685–688, 2008.

KUROBORI, T.; SAKAI, T.; AOSHIMA, S. A narrow band, green-red colour centre laser in lif fabricated by femtosecond laser pulses. **Phys. Stat. Sol.**, v. 204a, n. 3, p. 699–705, 2007.

LEMOPTIX. **MEMS Projection Principle**. Disponível em: <http://www.lemoptix.com/technology/micro-projector>: [s.n.], 2009. Acesso em: 10 jan. 2011.

LI, G. et al. Waveguide electro-optic modulator in fused sílica fabricated by femtosecond laser direct writing and thermal poling. **Optical Letters**, v. 31, n. 6, p. 739–741, 2006.

LIU, J. et al. Directly writing of 1-to-n optical waveguide power splitters in fused silica glass using a femtosecond laser. **Optics Communications**, v. 253, p. 315–319, 2005.

LOWER, S. **Chemical virtual textbook: a reference text for General Chemistry. Simon Fraser University - Cap. 7**. Disponível em: <http://www.chem1.com/acad/webtext/states/crystals-ionic.htmlSEC2>: [s.n.], 2008. Acesso em: 05 mar. 2010.

MARCUSE, D. **Principle of Optical Fiber Measurements**. [S.l.]: Academic Press Inc., 1981.

MARSHALL, G. D.; AMS, M.; WITHFORD, M. J. Direct laser written waveguide-bragg gratings in bulk fused sílica. **Optical Letters**, v. 31, n. 18, p. 2690–2691, 2006.

MARSHALL, G. D. et al. Directly written monolithic waveguide laser incorporating a distributed feedback waveguide-bragg grating. **Optics Letters**, v. 33, n. 9, p. 956–958, 2008.

MARTINEZ, A. et al. Direct writing of fibre bragg gratings by femtosecond laser. **Electronics Letters**, v. 40, n. 19, p. 1–2, 2004.

MARTYSHKIN, D. V. et al. Tunable distributed feedback color center laser using stabilized  $f_{2+}^{**}$  color centers in lif crystal. **Applied Physics Letters**, v. 84, n. 16, p. 3022–3024, 2004.

MIROV, S. B.; BASIEV, T. Progress in color center lasers. **IEEE - Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, I, n. I, p. 22–30, 1995.

- MIURA, K. et al. Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser. **Appl. Phys. Lett.**, v. 71, n. 23, p. 3329–3331, 1997.
- MOLLENAUER, L. F.; BLOOM, D. M.; GUGGENHEIM, H. Simple two-step photoionization yields high densities of laser-active  $f_2^+$  centers. **Appl. Phys. Lett.**, v. 33, n. 6, p. 506–509, 1978.
- MOLLENAUER, L. F.; OLSON, D. H. A broadly tunable cw laser using color centers. **Applied Physics Letters**, v. 24, n. 8, p. 386–388, 1974.
- MOLLENAUER, L. F.; OLSON, D. H. Broadly tunable lasers using color centers. **Journal of Applied Physics**, v. 46, n. 7, p. 3109–3118, 1975.
- MONTEREALI, R. M.; PICCININI, M. Optical gain of  $f_2$  colour centres in lif confining structures realised by electron-beam lithography. **Optics Communications**, v. 209, p. 201–208, 2002.
- MONTEREALI, R. M.; PICCININI, M.; BURATTINI, E. Amplified spontaneous emission in active channel waveguides produced by electron beam lithography in lif crystals. **Appl. Phys. Lett.**, v. 78, n. 26, p. 4082–4084, 2001.
- MUSSI, V. et al. Active waveguides produced in lithium fluoride by  $he^+$  implantation. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 230, p. 257–261, 2005.
- MYSLEWSKI, R. **Green-laser micro-projectors green-lighted.** Disponível em: [http://www.theregister.co.uk/2009/05/06/green\\_lasers/](http://www.theregister.co.uk/2009/05/06/green_lasers/): [s.n.], 2009. Acesso em: 09 jan. 2011.
- NAHUM, J. Optical properties and mechanism of formation of some f-aggregate centers in lif. **Physical Review**, v. 158, n. 3, p. 814–825, 1967.
- NAHUM, J.; WIEGAND, D. Optical properties of some f-aggregate centers in lif. **Physical Review**, v. 154, n. 3, p. 817–830, 1967.
- NOLTE, S. et al. Femtosecond waveguide writing: a new avenue to three-dimensional integrated optics. **Applied Physics A Materials Science & Processing**, v. 77, n. 1, p. 109–111, 2003.
- OBAYASHI, Y. et al. Red and green distributed-feedback lif color center lasers fabricated by interference of femtosecond laser pulses. **The Review of Laser Engineering**, v. 36, p. 1226–1229, 2008.
- OKAMOTO, K. **Fundamentals of Optical Waveguides.** [S.l.]: 2 ed. Amsterdam: Elsevier Inc., 2006.
- OSELLAME R. ANDTACCHEO, S. et al. Femtosecond writing of active waveguides with astigmatically shaped beams. **Opt. Soc. Am. B.**, v. 20, p. 1559–1567, 2003.
- OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing.** [S.l.]: Boston-London: Artech House, 1999.
- PEREIRA, J. A. M. et al. Production of waveguides in lif by mev ion bombardment. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 240, p. 234–238, 2005.

- POF-ALL. **Plastic optical fiber targets FTTH: EUs 6th Framework Programme**. Disponível em: [http://www.opera2015.org/partners/collaborating\\_partners\\_pdf /POFALL.pdf](http://www.opera2015.org/partners/collaborating_partners_pdf /POFALL.pdf): [s.n.], 2008. Acesso em: 22 out. 2010.
- PRASAD, P. N. **Introduction to Biophotonics**. [S.l.]: New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- ROSENBERG, P. **Wireless Optical Networks: A New Alternative to Fiber**. Disponível em: [http://ecmweb.com/mag/electric\\_wireless\\_optical\\_networks/](http://ecmweb.com/mag/electric_wireless_optical_networks/): [s.n.], 2000. Acesso em: 15 dez. 2010.
- SCHAFFER, C. B.; BRODEUR, A.; MAZUR, E. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses. **Meas. Sci. Technol.**, v. 12, p. 1784–1794, 2001.
- SCHNEIDER, I.; C., M. S. Color-center laser continuously tunable from 1.67 to 2.46  $\mu\text{m}$ . **Optics Letters**, v. 8, n. 1, p. 7–8, 1983.
- SCHNEIDER, I.; RABIN, H. Ionized f-aggregate color center in kcl. **Physical Review Letters**, v. 13, n. 23, p. 690–692, 1964.
- SEITZ, F. Color centers in alkali halide crystals. **Review of Modern Physics**, v. 26, n. 1, p. 7–94, 1954.
- STRELTSOV, A. M.; BORRELLI, N. F. Fabrication and analysis of a directional coupler written in glass by nanojoule femtosecond laser pulses. **Optics Letters**, v. 26, n. 1, p. 42–43, 2001.
- STRELTSOV, A. M.; BORRELLI, N. F. Study of femtosecond-laser-written waveguides in glasses. **J. Opt. Soc. Am. B**, v. 19, n. 10, p. 2496–2504, 2002.
- TER-MIKIRTYCHEV, V. V. Stable room-temperature lif:f<sup>2+</sup>\* tunable color-center laser for the 830–1060-nm spectral range pumped by second-harmonic radiation from a neodymium laser. **Applied Optics**, v. 34, n. 27, p. 6114–6117, 1995.
- TER-MIKIRTYCHEV, V. V.; TSUBOI, T. Stable room-temperature tunable color center lasers and passive q-switchers. **Prog Qumnr. Electr**, v. 20, n. 3, p. 219–268, 1996.
- TIEN, P. K.; MRICH, R.; MARTIN, R. J. Modes of propagating light wa yes in thin deposited semiconductor films. **Applied Physics Letters**, v. 14, n. 9, p. 291–294, 1969.
- TSUBOI, T.; GU, H. E. Room-temperature-stable lif:f<sup>3+</sup> color-center laser with a two-mirror cavity. **Applied Optics**, v. 33, n. 6, p. 982–984, 1994.
- TSUBOI, T.; TER-MIKIRTYCHEV, V. V. Photochemical process during lif:f<sup>3+</sup> color center lasing. **Applied Surface Science**, v. 106, p. 447–450, 1996.
- VALLÉS, J. A. et al. Study of an optimised bidirectional pump scheme for fs-laser written yb/er-codoped integrated waveguides. **Optical Materials**, v. 33, p. 231–235, 2010.
- VINCENTI, M. A. et al. Permanent luminescent micropatterns photoinduced by low-power ultraviolet irradiation in lithium fluoride. **Applied Physics Letters**, v. 89, n. 241125, p. 1–3, 2006.

- VINCENTI, M. A. et al. **Optical Spectroscopy of F2 and F3+ Color Centers in Gamma Irradiated Lithium Fluoride Crystals**. [S.l.]: ENEA RT/2009/39/FM, 2010. ISSN/0393-3016.
- WATANABE, W.; NOTE, Y.; ITOH, K. Fabrication of multimode interference waveguides in glass by use of a femtosecond laser. **Optics Letters**, v. 30, n. 21, p. 2888–2890, 2005.
- WEHRMANN, F. et al. Integrated optical, wavelength selective, acoustically tunable 2x2 switches (add-drop multiplexers) in linbo3. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 2, n. 2, p. 263–269, 1996.
- WILL, M. et al. Optical properties of waveguides fabricated in fused silica by femtosecond laser pulses. **Applied Optics**, v. 41, n. 21, p. 4360–4364, 2002.
- WONG, W. H.; PUN, E. Y. B.; CHAN, K. S. Electron beam direct-write tunable polymeric waveguide grating filter. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 15, n. 12, p. 1731–1733, 2003.
- YAMADA, K. et al. In situ observation of photoinduced refractive-index changes in filaments formed in glasses by femtosecond laser pulses. **Optics Letters**, v. 26, n. 1, p. 19–21, 2001.
- YLINIEMI, S. et al. Uv-exposed bragg gratings for laser applications in silver-sodium ion-exchanged phosphate glass waveguides. **Optics Express**, v. 14, n. 7, p. 2898–2903, 2006.
- ZHANG, H.; EATON, S. M.; HERMAN, P. R. Low-loss type ii waveguide writing in fused silica with single picosecond laser pulses. **Optics Express**, v. 14, n. 11, p. 4826–4834, 2006.
- ZHANG, H.; EATON, S. M.; HERMAN, P. R. Single-step writing of bragg grating waveguides in fused silica with an externally modulated femtosecond fiber laser. **Optics Letters**, v. 32, n. 17, p. 2559–2561, 2007.
- ZHANG, H. et al. Type ii femtosecond laser writing of bragg grating waveguides in bulk glass. **Electronics Letters**, v. 42, n. 21, p. 1–2, 2006a.
- ZHANG, H. et al. Femtosecond laser direct writing of multiwavelength bragg grating waveguides in glass. **Optics Letters**, v. 31, n. 21, p. 3495–3497, 2006b.
- ZHONG, Z. Q. et al. Fabrication of microstructures in lif crystals by femtosecond laser. **Chin. Phys. Lett.**, v. 20, n. 10, p. 1858–1860, 2003.
- ZIEMANN, O. **Optical data communication over short distances**. Disponível em: [http://www.pofac.de/atlas/downloads/opt\\_datatrans\\_en.pdf](http://www.pofac.de/atlas/downloads/opt_datatrans_en.pdf): [s.n.], 2005. Acesso em: 23 out. 2010.

## APÊNDICE A – ESTIMATIVA DO ÍNDICE, MÉTODO DO ÍNDICE EFETIVO E NFP

### A.1 INVERSÃO DA EQUAÇÃO ESCALAR DA ONDA

A equação escalar da onda pode ser expressa por (BIBRA; ROBERTS, 1997)

$$\nabla_T^2 \psi(x,y) + [k_o^2 n^2(x,y) - \beta^2] \psi(x,y) = 0. \quad (7)$$

Isolando o termo do índice de refração ao quadrado

$$n^2(x,y) = \frac{\beta^2}{k_o^2} - \frac{\nabla_T^2 \psi(x,y)}{k_o^2 \psi(x,y)}. \quad (8)$$

Considerando um incremento do índice de refração em uma região limitada de um substrato com índice de refração  $n_B$ , escreve-se

$$n^2(x,y) = [n_B + \Delta n(x,y)]^2 \quad (9)$$

Substituindo a equação (9) na equação (8)

$$n_B^2 + 2n_B \Delta n(x,y) + \Delta n^2(x,y) = \frac{\beta^2}{k_o^2} - \frac{\nabla_T^2 \psi(x,y)}{k_o^2 \psi(x,y)}. \quad (10)$$

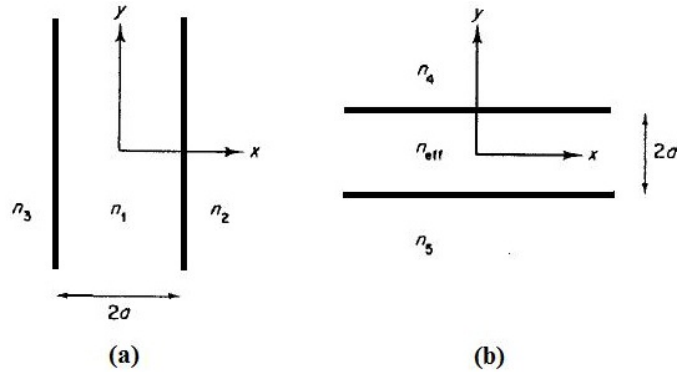
Considerando um pequeno incremento do índice de refração é possível considerar que  $\Delta n^2(x,y) \rightarrow 0$  e sendo a intensidade do campo dada pela sua amplitude ao quadrado, chega-se a expressão que relaciona o incremento do índice de refração com o perfil de campo próximo,  $I(x,y)$ , descrita por

$$\Delta n(x,y) = \frac{\beta^2}{k_o^2 2n_B} - \frac{n_B^2}{2} - \frac{\nabla_T^2 \sqrt{I(x,y)}}{k_o^2 2n_B \sqrt{I(x,y)}}. \quad (11)$$



## A.2 MÉTODO DO ÍNDICE EFETIVO

O método do índice efetivo considera a combinação de dois guias planares na obtenção das equações de dispersão para um guia com seção transversal retangular do núcleo (ADAMS, 1981, p. 188). A Figura 49 mostra os detalhes dos guias considerados.



**Figura 49 – Esquema do Método do Índice Efetivo com (a) guia na direção x e (b) guia na direção y**

Para o modo  $E_{pq}^x$ , correspondente ao modo TM em um guia planar tem-se para o guia da Figura 49 (a)

$$k_x a = (p - 1) \frac{\pi}{2} + \text{atan} \left( \frac{n_1^2 k_x 2 n_0^2 \gamma_0}{n_0^4 k_x^2 - n_1^4 \gamma_0^2} \right) \quad (12)$$

Com

$$\gamma_j^2 = (n_1^2 - n_j^2) k^2 - k_x^2, (j = 0, 2, 3) \quad (13)$$

Com o índice  $n_{eff}$  para o guia da Figura 49 (b) expresso por

$$n_{eff}^2 = n_1^2 - \left( \frac{k_x}{k} \right)^2 \quad (14)$$

Para o guia de onda da Figura 49 (b) tem-se então

$$k_y d = (q - 1) \frac{\pi}{2} + \text{atan} \left( \frac{k_y 2 \gamma_{0e}}{k_y^2 - \gamma_{0e}^2} \right) \quad (15)$$

Com

$$\gamma_{je}^2 = (n_{eff}^2 - n_j^2) k^2 - k_y^2, (j = 0, 4, 5) \quad (16)$$

Calculando-se a constante de propagação por

$$\beta^2 = k^2 n_{eff}^2 - k_y^2 \quad (17)$$

De forma semelhante, para o modo  $E_{pq}^y$  escrevem-se as seguintes equações de dispersão

$$k_x a = (p - 1) \frac{\pi}{2} + \text{atan} \left( \frac{k_x (\gamma_2 + \gamma_3)}{k_x^2 - \gamma_2 \gamma_3} \right) \quad (18)$$

$$k_y d = (q - 1) \frac{\pi}{2} + \text{atan} \left( \frac{n_{eff}^2 k_y (\gamma_4 n_5^2 + \gamma_5 n_4^2)}{n_4^2 n_5^2 k_y^2 - n_{eff}^4 \gamma_4 \gamma_5} \right) \quad (19)$$

A solução por método gráfico das equações de dispersão consiste em dividir os termos de uma dada equação, por exemplo a equação (12), em duas equações distintas como (OKAMOTO, 2006, p. 29)

$$f_1 = k_x a \quad (20)$$

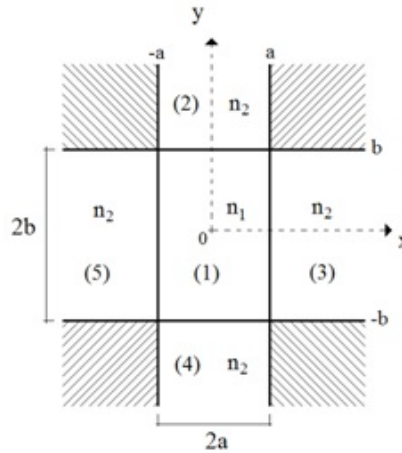
$$f_2 = (p - 1) \frac{\pi}{2} + \text{atan} \left( \frac{n_1^2 k_x 2n_0^2 \gamma_0}{n_0^4 k_x^2 - n_1^4 \gamma_0^2} \right), (p = 1, 2, 3 \dots) \quad (21)$$

Para solucionar a equação varia-se o valor de  $k_x$  de tal forma a encontrar a igualdade entre  $f_1$  e  $f_2$ .

### A.3 DISTRIBUIÇÃO DO CAMPO PRÓXIMO

A distribuição do perfil de campo próximo na saída do guia de onda foi simulada considerando uma distribuição espacial descrita pelo Método de Marcatili que adota a seguinte distribuição para um guia com seção transversal retangular (KAWANO; KITO, 2001, p. 23). Na Figura 50 o núcleo do guia de onda é representado pela região (1), com largura de  $2a$  e altura

de  $2b$ , com índice de refração  $n_1$  maior que o índice  $n_2$  presente nas regiões vizinhas ao núcleo (2-5).



**Figura 50 – Perfil da seção transversal de uma guia de onda óptico.**

O seguinte conjunto de equações descreve o componente  $E_x$  nas regiões 1 a 5, respectivamente, do guia de onda considerado

$$E_{x1} = C_1 \cos(k_x x + \alpha_1) \cos(k_y y + \alpha_2) \quad (22)$$

$$E_{x2} = C_2 \cos(k_x x + \alpha_1) \exp[-\gamma_y (y - b)] \quad (23)$$

$$E_{x3} = C_3 \cos(k_y y + \alpha_2) \exp[-\gamma_x (x - a)] \quad (24)$$

$$E_{x4} = C_4 \cos(k_x x + \alpha_1) \exp[\gamma_y (y + b)] \quad (25)$$

$$E_{x5} = C_5 \cos(k_y y + \alpha_2) \exp[\gamma_x (x + a)] \quad (26)$$

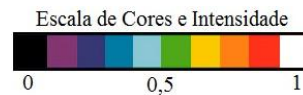
Com

$$\alpha_1 = (p - 1) \frac{\pi}{2}, (p = 1, 2, 3 \dots) \quad (27)$$

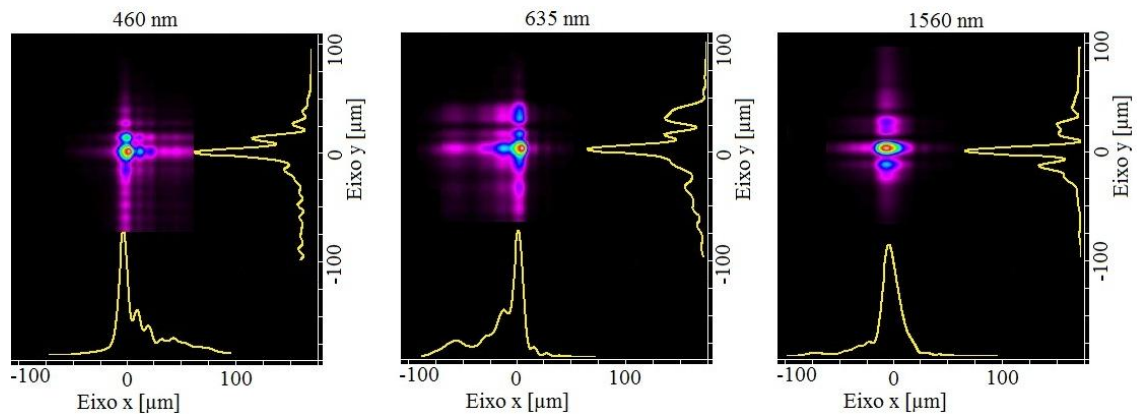
$$\alpha_2 = (q - 1) \frac{\pi}{2}, (q = 1, 2, 3 \dots) \quad (28)$$

## APÊNDICE B – PERFIS DE CAMPO PRÓXIMO PARA OS GUIAS DO GRUPO O

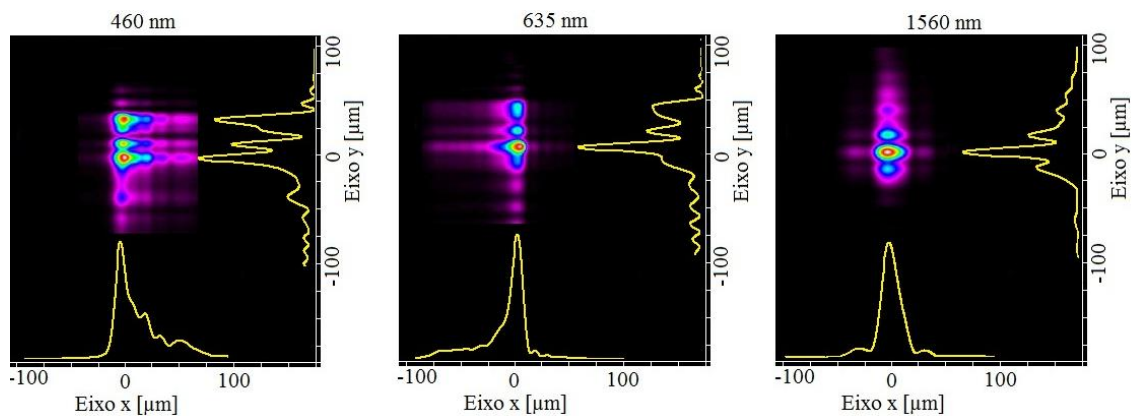
Nos experimentos no LOOP-UTFPR foram usadas fontes de luz com bandas de emissão centradas em torno de 460 nm, 635 nm e 1550 nm, sendo registrados os perfis de campo próximo para os guias de onda 2 a 7 do Grupo O e mostrados nas Figuras 52 a 57.



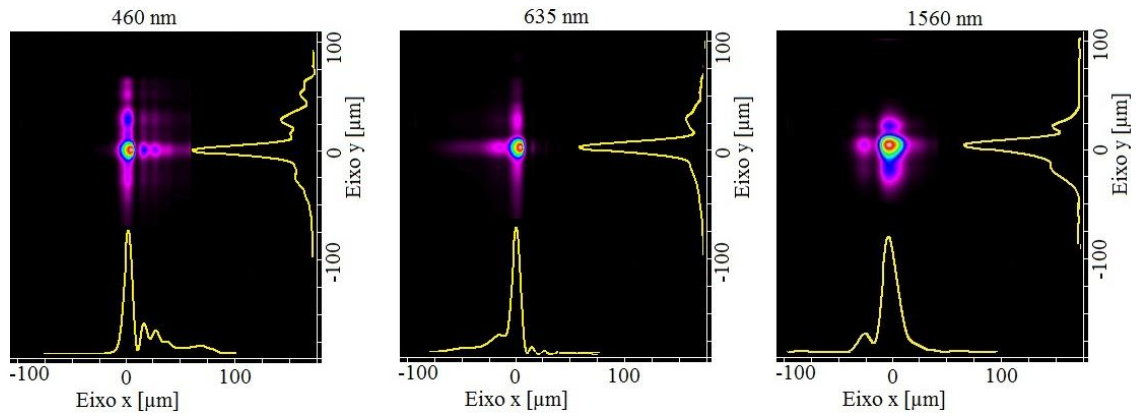
**Figura 51 – Escala de Intensidade.**



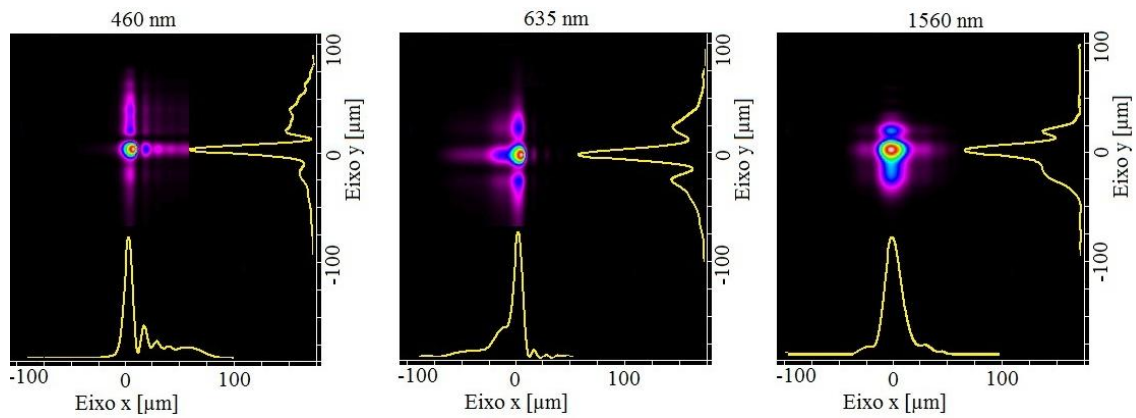
**Figura 52 – Guia de onda 2, acoplamento via face 1 Grupo O, UTFPR-LOOP.**



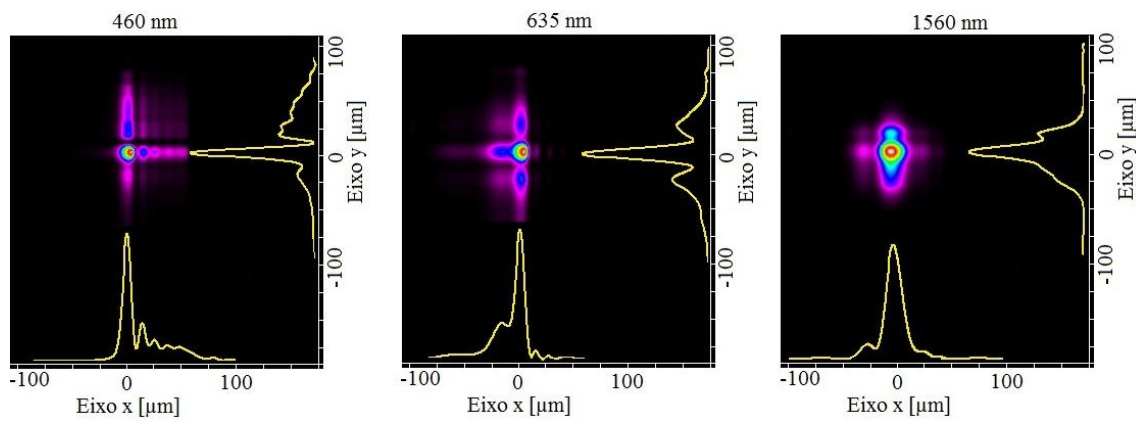
**Figura 53 – Guia de onda 3, acoplamento via face 1 Grupo O, UTFPR-LOOP.**



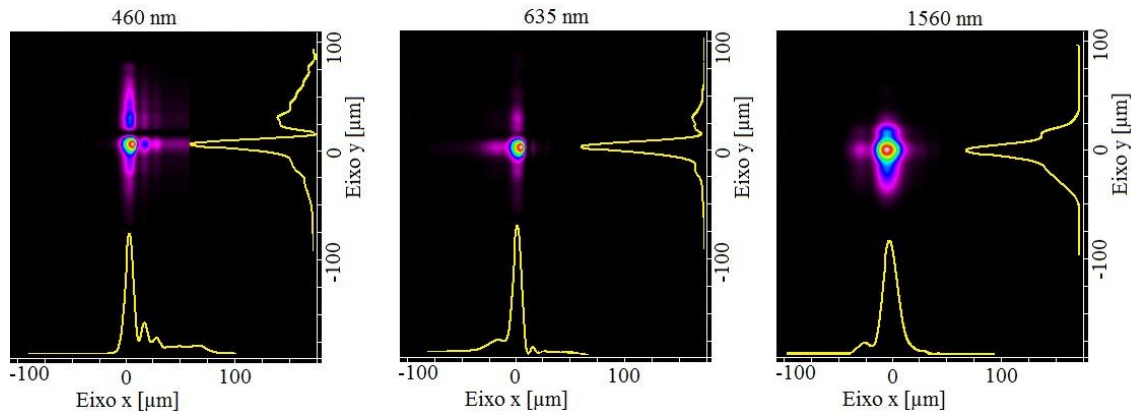
**Figura 54 – Guia de onda 4, acoplamento via face 1 Grupo O, UTFPR-LOOP.**



**Figura 55 – Guia de onda 5, acoplamento via face 1 Grupo O, UTFPR-LOOP.**

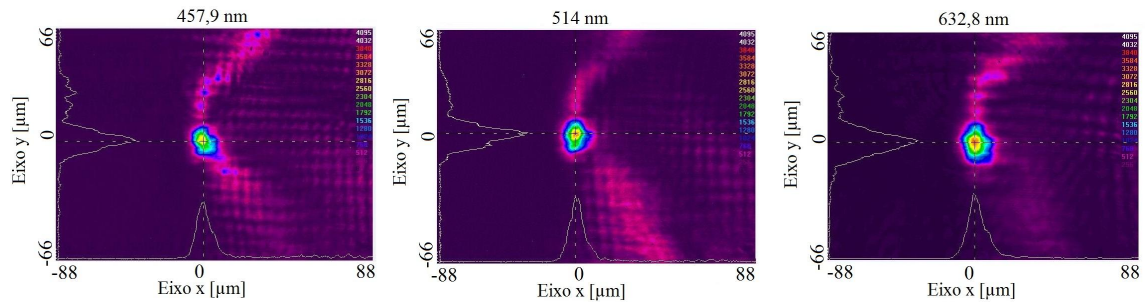


**Figura 56 – Guia de onda 6, acoplamento via face 1 Grupo O, UTFPR-LOOP.**

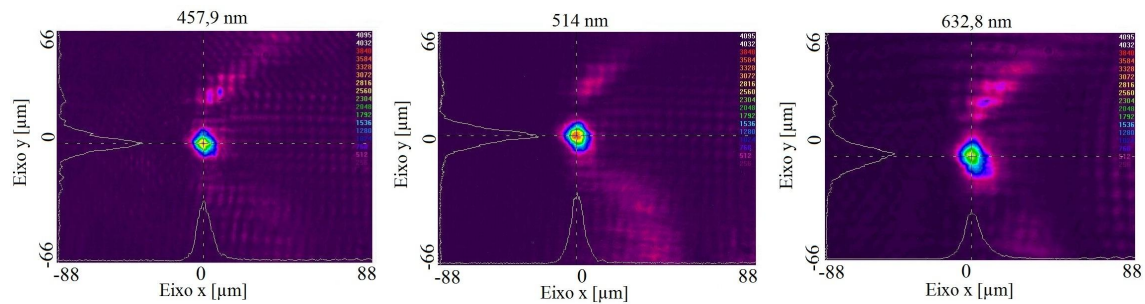


**Figura 57 – Guia de onda 7, acoplamento via face 1 Grupo O, UTFPR-LOOP.**

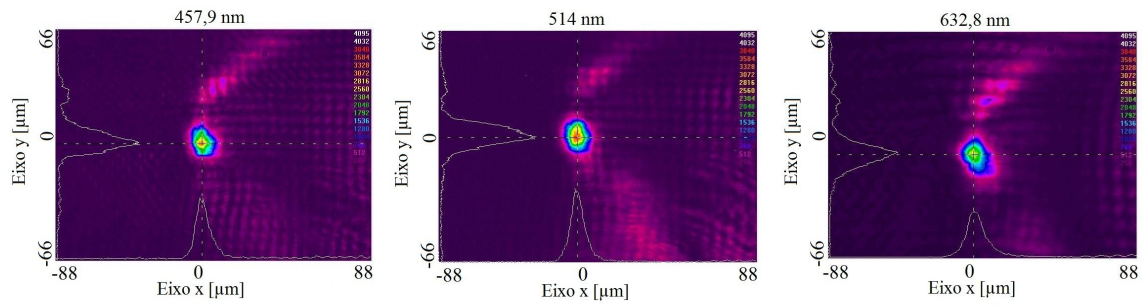
Nos experimentos realizados no ENEA C. R. Frascati foi utilizado um laser de argônio para os comprimentos de onda de 457,9 nm e 514 nm e um laser de hélio neônio (632,8 nm). Os perfis medidos para os guias de ondas 4 a 7, do Grupo O, são mostrados nas Figuras 58 a 61.



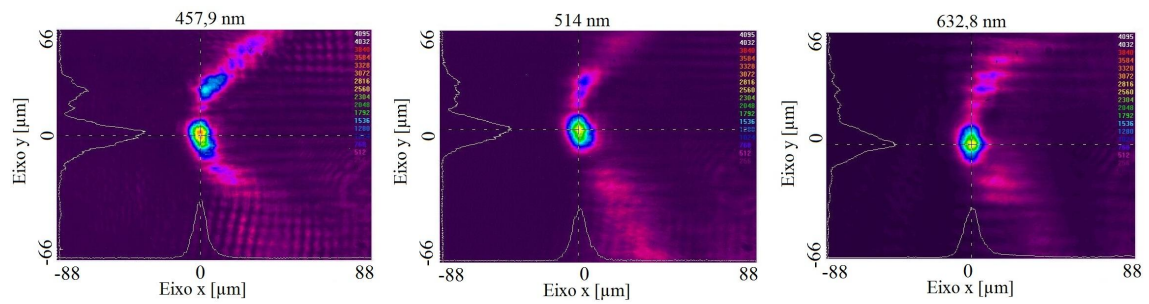
**Figura 58 – Guia de onda 4, acoplamento via face 1, Grupo O, ENEA C. R. Frascati.**



**Figura 59 – Guia de onda 5, acoplamento via face 1, Grupo O, ENEA C. R. Frascati.**



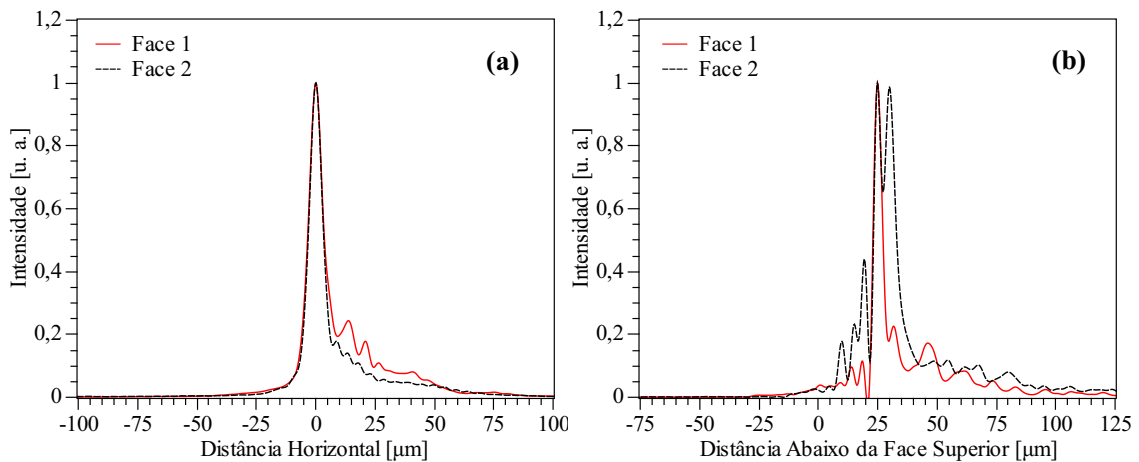
**Figura 60 – Guia de onda 6, acoplamento via face 1, Grupo O, ENEA C. R. Frascati.**



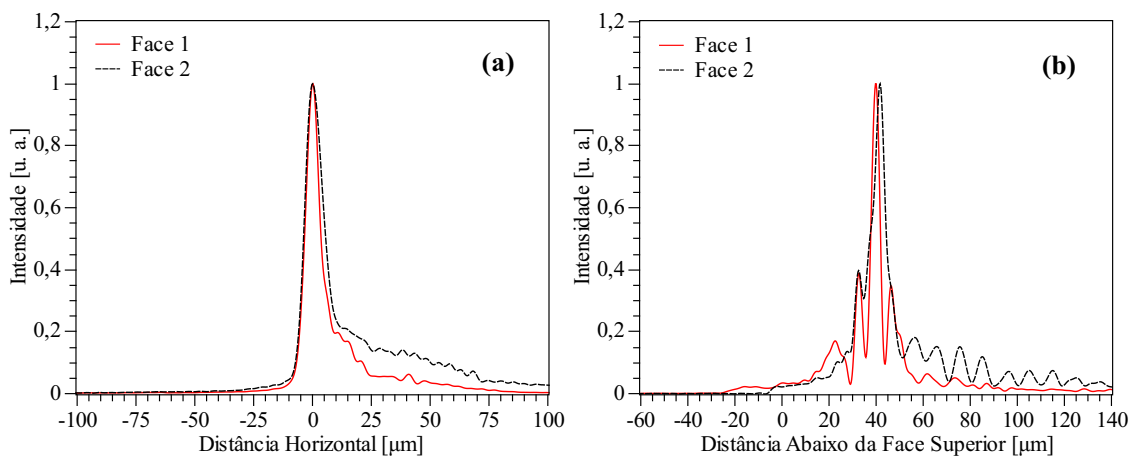
**Figura 61 – Guia de onda 7, acoplamento via face 1, Grupo O, ENEA C. R. Frascati.**

## APÊNDICE C – ACOPLAMENTO VIA FACE 1 E VIA FACE 2

As Figuras 62 a 67 mostram os gráficos dos perfis de campo próximo, para os guias de ondas 2 a 7, Grupo O, ao longo das direções horizontal e vertical. Os perfis foram medidos no LOOP–UTFPR utilizando um laser semiconductor com banda de emissão centrada em 635 nm, acoplado através de uma objetiva de microscópio 10X a partir das faces laterais 1 e 2 do cristal.

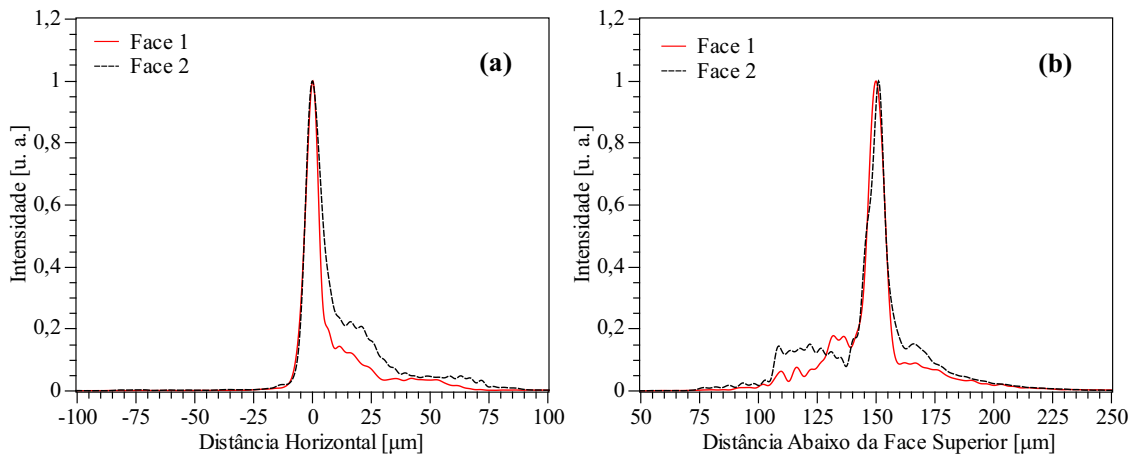


**Figura 62 – Perfis de campo próximo do guia de onda 2 ao longo dos eixos (a) horizontal e (b) vertical.**

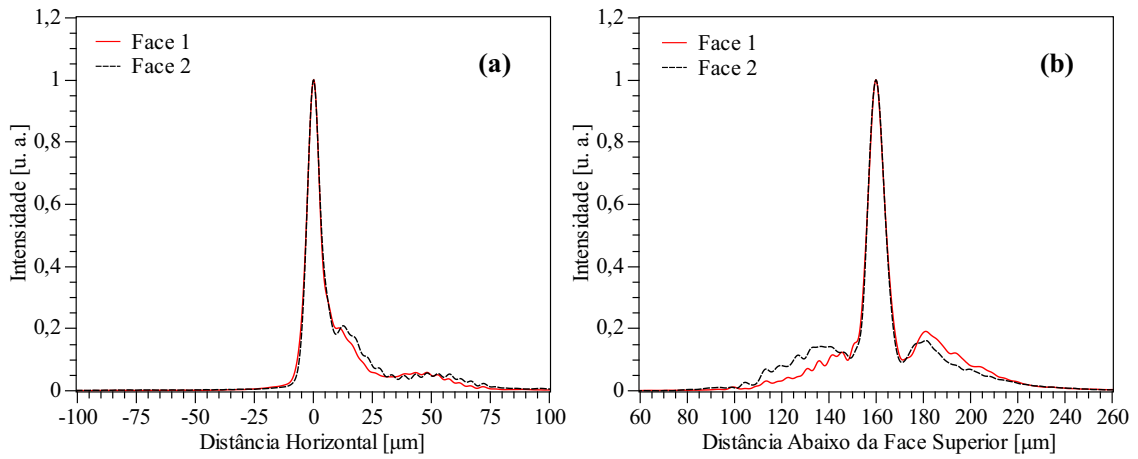


**Figura 63 – Perfis de campo próximo do guia de onda 3 ao longo dos eixos (a) horizontal e (b) vertical.**

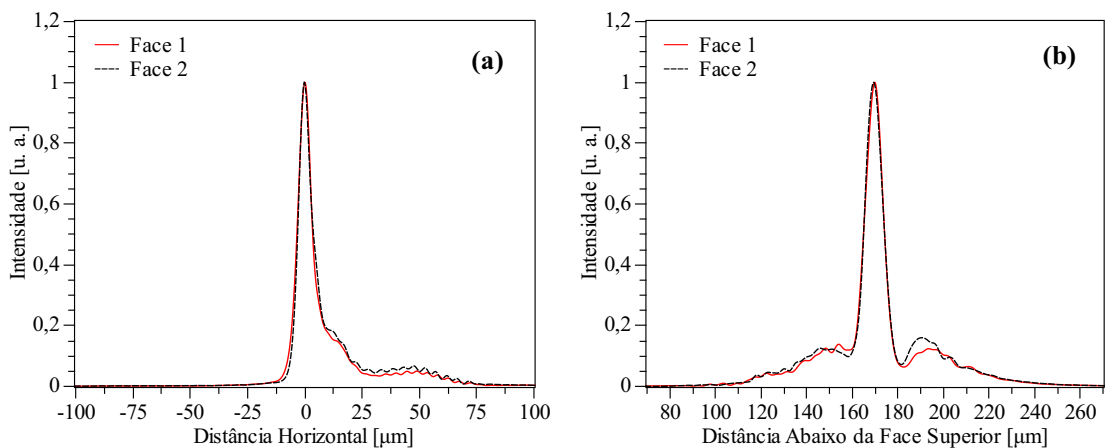




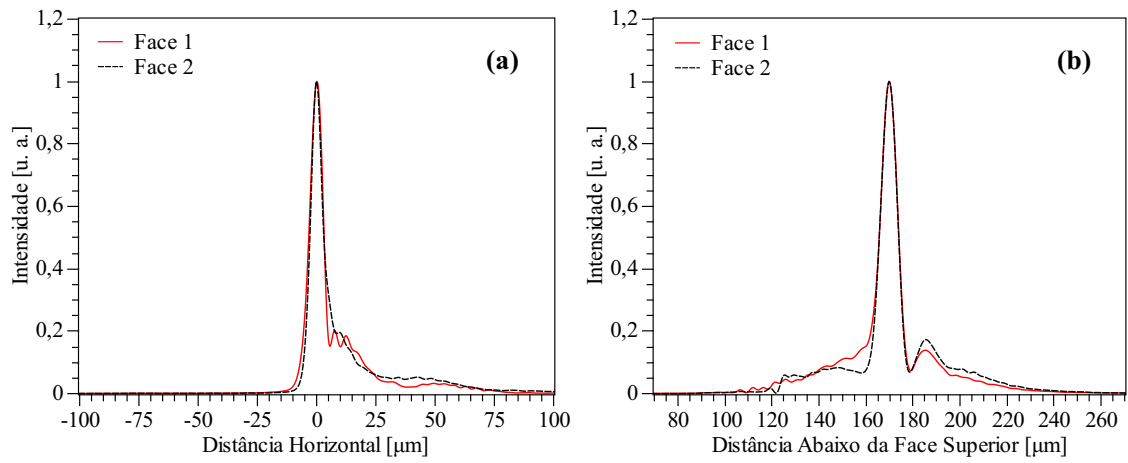
**Figura 64 – Perfis de campo próximo do guia de onda 4 ao longo dos eixos (a) horizontal e (b) vertical.**



**Figura 65 – Perfis de campo próximo do guia de onda 5 ao longo dos eixos (a) horizontal e (b) vertical.**



**Figura 66 – Perfis de campo próximo do guia de onda 6 ao longo dos eixos (a) horizontal e (b) vertical.**



**Figura 67 – Perfis de campo próximo do guia de onda 7 ao longo dos eixos (a) horizontal e (b) vertical.**