

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

MARCELO LOYOLA DA SILVA

**DIFRAÇÃO EM FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO COMO
METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2019

MARCELO LOYOLA DA SILVA

**DIFRAÇÃO EM FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO COMO
METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO**

Projeto de Dissertação (Dissertação de mestrado) 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 “Mestre em Engenharia Elétrica” – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Cícero Martelli

CURITIBA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Silva, Marcelo Loyola da

Difração em fibra de cristal fotônico como metodologia para medição de índice de refração [recurso eletrônico] / Marcelo Loyola da Silva.-- 2019.

1 recurso eletrônico (92 f.): PDF; 3,30 MB.

Modo de acesso: World Wide Web

Título extraído da tela de título (visualizado em 30 abr. 2019)

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2019

Bibliografia: f. 86-92

1. Engenharia elétrica - Dissertações. 2. Difração. 3. Óptica. 4. Espectrografia. 5. Fotônica. 6. Óptica de cristais. 7. Refração. 8. Cristais fotônicos. I. Martelli, Cicero. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Bibliotecário: Adriano Lopes CRB-9/1429

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 818

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Difração em Fibra de Cristal Fotônico como Metodologia para Medição de Índice de Refração**” defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Marcelo Loyola da Silva**, no dia **06 de fevereiro de 2019**, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, **área de concentração automação e sistemas**, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). Cícero Martelli - Presidente – (UTFPR)

Prof(a). Dr(a). Aleksander Sade Paterno - (UDESC)

Prof(a). Dr(a). Jean Carlos Cardozo da Silva - (UTFPR)

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 06 de fevereiro de 2019.

DEDICATÓRIA

“O Corpo Humano emite, se comunica e é feito de luz”

(Dr.Fritz Albert Popp, biofísico e cientista alemão)

*Dedico este trabalho à meus pais, professores e
amigos que me apoiaram nesta empreitada.*

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a meus pais, José e Circe, que sempre acreditaram em minhas buscas, e a minha esposa Camila, pela paciência.

Aos professores, Cícero Martelli, Dr., Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr. e Marco José da Silva, Dr., pela orientação e apoio durante todo o trabalho.

A todos os colegas e amigos da UTFPR pelo companheirismo e compartilhamento de aprendizados e informações.

À UTFPR, pela cessão dos espaços, laboratórios e uso dos equipamentos; e à Petrobrás pela disponibilidade de material.

RESUMO

DA SILVA, Marcelo Loyola. Difração em Fibra de Cristal Fotônico como Metodologia para Medição de Índice de Refração. Dissertação – Programa de Pós Graduação Em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O presente documento descreve o desenvolvimento, resultados e aplicação de técnica para avaliação de processos de mudança de fase em fluido de interesse, por análise espectrográfica, utilizando *PCF* monomodo, de 5 μ m de núcleo, com área de modo largo e polarização constante, preenchida com água onde, alterando-se o seu estado físico de líquido para sólido, torna-se possível medir-se a variação do espectro da parcela absorvida da luz que a atravessa. A motivação desta pesquisa foi avaliar um novo método para inferir o índice de refração de substâncias quando ocorre a mudança de fase onde, através de análise espectrográfica, sensíveis variações da transmitância na substância de teste podem ser observadas pela variação da difração na *PCF* em determinadas faixas de comprimento de onda e, cuja propriedade esta, pode ser aproveitada para o desenvolvimento de sensores de detecção de mudança de fase. Esta metodologia de medição, bem como os resultados obtidos, auxiliarão, num próximo momento, no levantamento das formas congeladas de substâncias e seus processos de formação, com o objetivo de monitorar suas condições de aparecimento e, então, ser possível acionar dispositivos de dissolução das mesmas. Os testes realizados deixaram bastante evidente a existência de uma faixa de comprimento de onda eficaz para medição e as condições de ocorrência do fenômeno de congelamento e demais associados, tais como aumento da transmitância e variação do comprimento de onda do "*cut-off*" na substância preenchida nos furos.

Palavras-chave: Difração; Cristais Fotônicos; Fibra Óptica.

ABSTRACT

DA SILVA, Marcelo Loyola. Photonic Crystal Fiber Diffraction as a Method for Measuring Refractive Index. Dissertation - Electrical Engineering and Industrial Computing Post-Graduate Program, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2018.

This work describes the development, results and application of a technique for the evaluation of phase change processes in a fluid of interest, by spectrographic analysis, using single-mode 5 μ m core wide area mode and polarization-maintaining *PCF*, filled with water. Changes in the physical state of the liquid from liquid to solid, it becomes possible to measure the spectrum changing of the transmitted portion of the light that crosses the fiber.

The motivation of this research was to evaluate a new method to infer the refractive index of substances when phase changes occur through spectrographic analysis. Variations on the physical state of the substance change the transmittance by the variation of diffraction in the *PCF* at certain wavelength ranges and, whose property, can be harnessed for the development of sensors for phase shift detection.

This measurement methodology, as well as the results obtained, will assist the investigation of substances in frozen forms and their formation processes, in order to monitor their appearance conditions and, then, it could be possible to activate dissolution devices for them. The tests performed made it quite clear that there is an effective wavelength range for measurement and the conditions for the freezing phenomenon occurrence and others associated, such as transmittance increasing and "cut-off" wavelength variation of the substance filled in the holes.

Keywords: Diffraction; Photonic Crystals, Optical Fiber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das <i>MOF</i> 's: (a) Fibras Microestruturadas, (b) Fibras microestruturadas não periódicas, (c) Fibras de Cristal Fotônico (microestruturadas periódicas).	17
Figura 2 - (a) um guia de índice TIR- <i>PCF</i> . Os furos/hastes nas camadas abaixam o índice efetivo do revestimento de tal forma que a fibra atua como uma fibra de guiamento por índice. (b) uma fibra de <i>gap</i> de banda fotônica PBG- <i>PCF</i> com núcleo oco. O arranjo periódico dos furos nas camadas cria uma energia de <i>gap</i> de banda fotônica que previne a luz no núcleo de penetrar a camada. (c) uma fibra de Bragg (" <i>Bragg Fiber</i> "). É uma fibra de <i>gap</i> de banda fotônica formada por anéis concêntricos de filme multicamadas.	22
Figura 3 - Fibra de núcleo sólido (sílica).	26
Figura 4 - Fibra de núcleo oco.	27
Figura 5 - (a) foto do detalhamento do núcleo da <i>PCF</i> PM-1550-01 utilizada, (b) foto da seção transversal desta <i>PCF</i> mostrando a distribuição e quantidade dos furos de seu núcleo e a largura do núcleo sólido ao redor e (c) foto da bobina em que a <i>PCF</i> é comercializada.	31
Figura 6 - Exemplo de refração da luz e reflexão interna total da luz: (a) luz refratada na maior parte e pouco refletida, (b) luz refratada e refletida em intensidades equânimes, aproximando-se do ângulo crítico e (c) luz totalmente refletida - TIR na interface dos meios.	32
Figura 7 - Campo evanescente que ocorre dentro dos microtubulos da matriz. (a) Imagem do campo evanescente formado no núcleo da fibra PM-1550-01 utilizada. (b) Esquemático do fenômeno.	33
Figura 8 - (a) representação de ocorrência de uma frente de onda refratada numa interface, (b) representação de ocorrência de uma frente de onda evanescente numa interface.	35
Figura 9 - Representação dos processos de guiamento da luz que ocorrem no interior da fibra de cristal fotônico, em corte transversal: Reflexão Interna Total (onda em vermelho) e Difração (onda em azul).	38
Figura 10 - Representação dos processos de guiamento da luz que ocorrem no interior da fibra de cristal fotônico, em corte longitudinal: Reflexão Interna Total (onda em vermelho) e Difração (onda em azul).	39
Figura 11 - Microestrutura da <i>PCF</i> PM-1550-01 utilizada. (a) Imagem de microscópio eletrônico da seção transversal da fibra <i>PCF</i> com os seguintes parâmetros: diâmetro de núcleo externo/interno ($6.6 / 4.3 \pm 0.5\mu\text{m}$), diâmetro do revestimento exterior ($125 \pm 5\mu\text{m}$), diâmetro do encapsulamento ($230 \pm 10\mu\text{m}$). (b) Detalhe do corte.	43

Figura 12 - Foto do vaso de pressão com béquer, � esquerda, e foto da montagem do vaso de pressão pressurizado com nitrogênio gasoso para preenchimento da fibra, � direita.	44
Figura 13 - Visualiza�o da extremidade desencapada (sem o acrilato) da fibra <i>PCF</i> preenchida com água, � esquerda, e da região da emenda apresentando o colapso dos microtubulos, gerado durante a fusão (� direita).	45
Figura 14 - Foto das vistas ortogonais do projeto do encapsulamento desenvolvido para imersão da <i>PCF</i> em meios de transmissão de calor.	46
Figura 15 - Foto das duas partes do conjunto do dispositivo para encapsulamento da <i>PCF</i> para imersão em meios de transmissão de calor, após manufaturadas.	46
Figura 16 - (a) Foto da <i>PCF</i> já preparada e configurada dentro do encapsulamento. (b) Foto da <i>PCF</i> dentro do encapsulamento e em contato com o meio de transferência de calor (gelo seco) durante o congelamento.	47
Figura 17 - (a) Foto da <i>PCF</i> dentro do encapsulamento e em contato com o meio de transferência de calor (gelo seco) durante o congelamento. (b) Foto da <i>PCF</i> dentro do encapsulamento durante o descongelamento.	47
Figura 18 - PT-100 (term�metro de resistência de platina) utilizado para medir a temperatura do encapsulamento onde ficou alojada a <i>PCF</i>	48
Figura 19 - Detalhe do furo ajustado no encapsulamento, com tolerância de interferência, que serviu para a introdu�o da ponta da sonda PT-100.	48
Figura 20 - Foto do equipamento de banho térmico controlado, marca LAUDA, modelo ECO RE 415.	49
Figura 21 - (a) Foto do equipamento Arc Fusion Splicer FSM-50S. (b) Foto do desalinhamento que ocorre na fibra antes da sua otimiza�o na jun�o. (XIAO <i>et al.</i> , 2007) .	49
Figura 22 - Microscópio Invertido Eclipse TE300, da Nikon.	50
Figura 23 - (a) Montagem da lente divergente para ampliar a proje�o do laser vermelho na extremidade de saída da <i>PCF</i> . (b) diodo laser vermelho utilizado para a otimiza�o do alinhamento.	51
Figura 24 - Proje�o do laser vermelho, que passa pela <i>PCF</i> , através da lente divergente, (a) formando imagem desfocada na extremidade de saída da <i>PCF</i> , (b) formando imagem desfocada na extremidade de saída da <i>PCF</i> e (c) formando imagem bem focada na extremidade de saída da <i>PCF</i>	52
Figura 25 - Fonte de Luz Branca Supercontínua, utilizada para fornecer o sinal óptico para a substância preenchida na <i>PCF</i>	53
Figura 26 - Imagem do Analisador de Espectro �ptico AQ6373.	54

Figura 27 - Lente de filtro passa-faixa modelo FB540-10, da Thorlabs. Possui centro de banda em 540nm, largura de banda de 10nm e erro de ± 2 nm.....	54
Figura 28 - Diagrama da Metodologia desenvolvida.....	55
Figura 29 - Foto do clivador de precisão, com disco diamantado, para fibras ópticas utilizado.	56
Figura 31 - Observação do campo evanescente, na fibra com ar, pela luz que passa pelos buracos da <i>PCF</i>	57
Figura 32 - Observação do campo evanescente, na fibra com água congelada com gelo seco enrolada num tarugo de diâmetro 6,4mm, pela luz que passa pelos buracos da <i>PCF</i> . (a) Na montagem completa. (b) No detalhe da fibra enrolada.....	58
Figura 33 - Montagem do filtro passa-faixa e utilizando lentes convergentes para aumentar a intensidade do sinal na entrada da fibra.	58
Figura 34 - Montagem do filtro passa-faixa utilizando lentes convergentes para aumentar a intensidade do sinal na entrada da fibra.	59
Figura 35 - Montagem experimental com a <i>PCF</i> conectada, utilizando fibras "pig-tail" de modo singelo, a fonte de luz branca, numa extremidade, e ao analisador de espectro óptico (OSA), na outra.....	59
Figura 36 - Caracterização espectroscópica, na faixa de luz visível, da transmitância do ar, na temperatura ambiente e congelado, preenchido na <i>PCF</i> , estando esta alinhada e com 1 volta no tarugo de diâmetro 6,4mm.....	62
Figura 37 - Comparativo da caracterização espectroscópica, na faixa de luz visível, da transmitância da água e do gelo, preenchido na <i>PCF</i> , com 1 volta no tarugo de diâmetro 6,4mm.....	63
Figura 38 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância do ar, da água e do gelo, preenchidos na <i>PCF</i> , na temperatura ambiente e congelada. A fibra está conformada linearmente e com 1 volta no tarugo de diâmetro 6,4mm.....	64
Figura 39 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância da água, na temperatura ambiente e congelada, preenchida na <i>PCF</i> . A fibra está conformada linearmente e com 1 volta no tarugo de diâmetro 6,4mm. A figura mostra a diferença no nível de sinal (dBm) quando da mudança de fase da água para gelo.....	66
Figura 41 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância da água, na temperatura ambiente e congelada, preenchida na <i>PCF</i> . A fibra está conformada linearmente e com 1 volta no tarugo de diâmetro 6,4mm.....	67

Figura 42 - Variação do nível de intensidade do sinal em função do número de voltas da fibra no tarugo, (a) 1 volta, (b) 2 voltas; e a visualização do "cut-off", mostrando uma progressiva degeneração do sinal.	68
Figura 43 - a) Medições de perda por curvatura na fibra <i>PCF</i> para cinco diferentes raios e b) alteração de Bragg da banda de ressonância em função do raio de curvatura.	69
Figura 44 - a) Perda por curvatura em fibra Fractal para cinco diferentes raios e b) perda por curvatura em 1550nm para vários comprimentos de curvatura.....	69
Figura 45 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância da água, na temperatura ambiente e congelada, preenchida na <i>PCF</i> . A fibra está conformada linearmente e utiliza o filtro passa-banda.	71
Figura 46 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância da água, na temperatura ambiente e congelada, preenchida na <i>PCF</i> . A fibra está conformada com 1 volta dentro do encapsulamento, num diâmetro de 6,4mm, e nas situações com e sem o uso do filtro passa-banda.	72
Figura 47 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância da água, na temperatura ambiente e congelada, preenchida na <i>PCF</i> . A fibra está conformada com 1 volta dentro do encapsulamento, num diâmetro de 6,4mm, sem o uso do filtro passa-banda e nas situações da fibra tensionada e não tensionada.	73
Figura 48 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância da água, na temperatura ambiente e congelada, preenchida na <i>PCF</i> . A fibra está conformada com 1, 2, 3 e 4 voltas dentro do encapsulamento, num diâmetro de 6,4mm, e nas situações com e sem o uso do filtro passa-banda.....	74
Figura 49 - Gráfico dos valores dos comprimentos de onda dos "cut-off", em função da temperatura da água preenchida na <i>PCF</i> durante a mudança de fase, tendo a fibra conformada com 1 volta de diâmetro 6,4mm dentro da matriz de encapsulamento e utilizando o filtro passa-faixa de centro em 540nm.....	77
Figura 50 - Gráfico da média e desvio padrão associado (incerteza) dos valores dos comprimentos de onda dos "cut-off", em função da variação da temperatura da água preenchida na <i>PCF</i> durante a mudança de fase, tendo a fibra conformada com 1 volta de diâmetro 6,4mm dentro da matriz de encapsulamento e utilizando o filtro passa-faixa de centro em 540nm..Ocorre um "salto" no comprimento de onda na mudança de fase.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dos comprimentos de onda dos "cut-off", em função da variação da temperatura da água preenchida na <i>PCF</i> durante a mudança de fase, tendo a fibra conformada com 1 volta de diâmetro 6,4mm dentro da matriz de encapsulamento e utilizando o filtro passa-faixa de centro em 540nm.....	78
Tabela 2 – Valores médio, variância e desvio padrão, do comprimento de onda no "cut-off", calculados para a água e gelo.	80
Tabela 3 – Propriedades físicas da fibra PM-1550-01, retiradas do <i>data sheet</i>	81
Tabela 4 – Valores atribuídos às variáveis e calculados na Eq. (6).....	81

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>PCF</i>	<i>Photonic Crystal Fiber</i>
<i>MOF</i>	<i>Microstructured Optical Fiber</i>
<i>PER</i>	<i>Polarization Extinction Ray</i>
<i>PM</i>	<i>Polarization Maintenance</i>
EVA	Espuma Vinílica Acetinada
<i>OSA</i>	<i>Optical Spectrum Analyser</i>
FPF	Filtro Passa-Faixa

LISTA DE SÍMBOLOS

BW	<i>Band Width</i>
$E_{ }$	campo elétrico (intensidade de campo elétrico)
$H_{ }$	campo magnetizante (campo magnético auxiliar)
$D_y,$	campo de deslocamento elétrico (indução elétrica) na direção y
$B_y.$	campo magnético (indução magnética) na direção y
d	diâmetro
f	frequência
n_h	índice de refração do material nos furos
λ	comprimento de onda
m	ordem de difração
n	índice de refração
Λ	espaçamento entre os furos do mesmo anel de furos ao redor do núcleo
n_{SiO2}	índice de refração da sílica
x_{SiO2}	fração de sílica que compõe o encapsulamento
x_h	fração de furos que compõe o encapsulamento
n_{cl}	índice de refração efetivo médio do encapsulamento
n_{core}	índice de refração efetivo médio do núcleo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	20
2.1	FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO (<i>PCF</i>)	20
2.1.1	Funcionamento das Fibras de Cristal Fotônico	25
2.1.2	Tipos de Fibras de Cristal Fotônico.....	26
2.1.3	Utilização das Fibras de Cristal Fotônico	29
2.1.4	Vantagens das Fibras de Cristal Fotônico.....	30
2.1.5	Desvantagens das Fibras de Cristal Fotônico.....	30
2.1.6	Escolha da Fibra de Cristal Fotônico.....	31
2.2	REFLEXÃO INTERNA TOTAL DA LUZ (TIR).....	32
2.3	CAMPO EVANESCENTE e onda evanescente	33
2.4	ÍNDICE DE REFRAÇÃO	35
2.5	CURVATURA EM FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO	36
2.6	RESSONÂNCIA ÓPTICA	36
2.7	DIFRAÇÃO	37
2.8	ÁGUA E GELO - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E ÓPTICAS	39
3	DESENVOLVIMENTO E METODOLOGIA	42
3.1	ESCOLHA DA FIBRA PM-1550-01.....	42
3.2	DISPOSITIVOS AUXILIARES DESENVOLVIDOS	43
3.2.1	Projeto do Dispositivo de Preenchimento da <i>PCF</i> Microestruturada.....	43
3.2.1.1	Procedimento de preenchimento da <i>PCF</i> com o uso do dispositivo.....	43
3.2.2	Projeto do Dispositivo de Encapsulamento da <i>PCF</i> Microestruturada para Imersão no Meio de Transferência de Calor.....	45
3.2.2.1	Projeto do dispositivo de encapsulamento.....	45
3.2.2.2	Utilização do dispositivo de encapsulamento com a <i>PCF</i>	46
3.3	CARACTERÍSTICAS DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS.....	49
3.3.1	Arc Fusion Splicer FSM-50S	49
3.3.2	Microscópio Invertido Eclipse TE300 (Nikon).....	50
3.3.3	Controlador OEM de Diodo Laser e Temperatura	50

3.3.4	Fonte de Luz Branca Supercontínua (" <i>Super K Compact Single Mode White Light Source</i> ").....	52
3.3.5	Analisador de Espectro Óptico AQ6373.....	53
3.3.6	Lente de Filtro Passa-Faixa Modelo FB540-10	54
3.4	METODOLOGIA.....	55
3.5	MONTAGEM DO EXPERIMENTO.....	59
3.6	TECNICA DE CURVATURA PARA FORMAÇÃO DO CAMPO EVANESCENTE.....	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
4.1	FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO PREENCHIDA COM AR.....	62
4.2	FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO PREENCHIDA COM ÁGUA DESTILADA E GELO....	63
4.3	COMPARATIVO ENTRE AS CARACTERIZAÇÕES ESPECTROSCÓPICAS DA FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO PREENCHIDA COM AR, ÁGUA DESTILADA E GELO.....	64
4.4	CARACTERIZAÇÕES ESPECTROSCÓPICAS DA FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO PREENCHIDA, COM FILTRO PASSA-BANDA E ENCAPSULADA	71
4.5	DISCUSSÃO - ANÁLISE DA FENOMENOLOGIA DO PROCESSO	75
5	CONCLUSÕES.....	82
5.1	PERSPECTIVAS DE APLICAÇÕES E DE AVANÇO DA TECNOLOGIA.....	83
6	REFERÊNCIAS.....	86

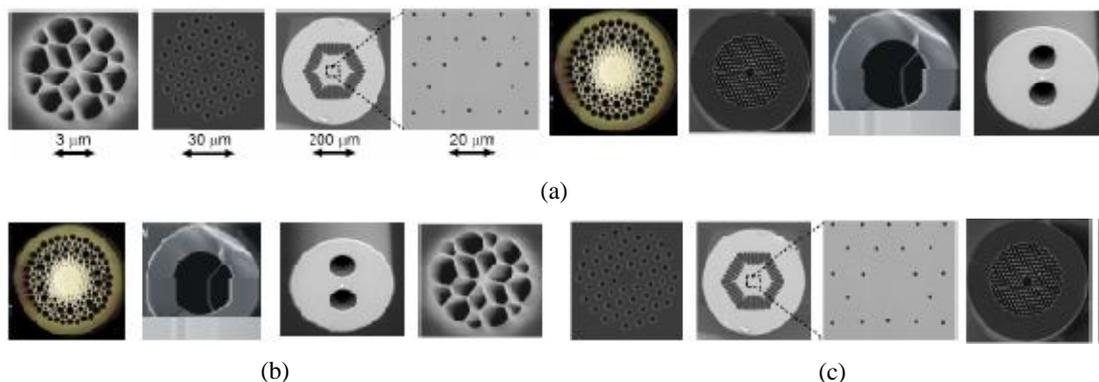
1 INTRODUÇÃO

A motivação desta pesquisa foi avaliar um novo método para inferir o valor do índice de refração de substâncias e sua variação com o congelamento. Através da alteração da difração na *PCF*, quando da mudança de fase na substância preenchida em seus furos, pode-se observar sensíveis variações no nível de transmitância em determinadas faixas de comprimento de onda. Esta propriedade pode ser aproveitada para o desenvolvimento de sensores de detecção de mudança de fase.

Foi utilizada, neste desenvolvimento, uma Fibra Óptica de Cristal Fotônico (*PCF*), que é uma subclassificação das Fibras Ópticas Microestruturadas (*MOF's*), o grupo mais abrangente, que inclui as fibras periódicas (*PCF's*) e não periódicas. Este tipo de fibra óptica atrai muito interesse científico devido às suas propriedades únicas como guias de onda, que são amplamente diferenciadas daquelas das fibras de índice gradual, como no caso das fibras sólidas convencionais. Tais fibras possuem uma matriz de furos de ar que, percorrendo o comprimento da fibra, criam uma matriz de cilindros de ar na sílica (KNIGHT, 2003), possibilitando sua utilização em campos específicos de aplicação tais como física, química, biologia e engenharia.

As Fibras de Cristal Fotônico (*PCF's*), também conhecidas como Fibras Ópticas Microestruturadas Periódicas, são aquelas *MOF's* que possuem uma homogeneidade periódica de distribuição na sua matriz de cilindros de ar num corte transversal ao eixo da fibra (Fig.1).

Figura 1 - Classificação das *MOF's*: (a) Fibras Microestruturadas, (b) Fibras microestruturadas não periódicas, (c) Fibras de Cristal Fotônico (microestruturadas periódicas).



Fonte: Adaptado de U.MACKENZIE (2008).(MACKENZIE, 2008)

Tais propriedades permitem, por exemplo, através do sensoriamento de propriedades físicas, como temperatura e pressão, bem como de contaminações químicas, a realização de medições físicas e químicas (PINTO; LOPEZ-AMO, 2012).

Além disso, a natureza periódica na microestrutura *PCF* ("*photonic crystal fiber*") pode ser explorada, também, na sua geometria transversa, se tornando uma nova plataforma para cristais fotônicos planares bidimensionais, tendo uma fabricação simples e paredes lisas (JIN; XUAN; HO, 2010).

Outra dimensão que ainda é única para *MOF*'s é o ajuste dinâmico das propriedades de guiamento de onda utilizando fluidos (NIELSEN *et al.*, 2005) (PIRES, 2013) e que, no caso das *PCF*'s, se torna um ajuste bastante coerente e homogêneo. Para tal, amostras de fluidos de diversos índices de refração podem ser, seletivamente, inseridas nos furos e a temperatura ajustada para modificar-se as características de transmissão de uma *MOF* (WEI; ZHU; KRISHNASWAMY, 2016). Além disso, *PCF*'s preenchidas com fluidos (LARSEN *et al.*, 2003) aparecem, também, como uma nova plataforma para espectroscopia de campo evanescente (MARTELLI *et al.*, 2009)(CORDEIRO *et al.*, 2006), promovendo grandes comprimentos de interação efetiva entre o fluido e o meio enquanto são requeridos, somente, microlitros de volume de amostra (MARTELLI *et al.*, 2009)(YU *et al.*, 2008).

Desta forma, torna-se possível implementar diversos tipos de dispositivos, que podem ser controlados externamente, a fim de tornar tais modificações nas características de transmissão do sinal que passa pela *PCF* em um sinal mensurável aplicado a sensoriamento. Por exemplo, estendendo-se as propriedades da fibra para quando, além do núcleo e da microestrutura, ou do preenchimento por fluido, eletrodos metálicos estão perpassados pelos canais da fibra; permite-se que uma corrente elétrica seja transmitida, ao mesmo tempo que o sinal luminoso. Com o aquecimento dos fios induzido pela corrente elétrica, uma expansão daqueles comprime a estrutura do núcleo da fibra, sendo responsável pela alteração da propriedade da luz passante (JR, 2010).

Além disso, métodos refratométricos para medições de variações no estado físico de substâncias têm contribuído enormemente para o desenvolvimento de técnicas de análise em diversas áreas econômicas, especialmente em aplicações industriais. Nesse caso, torna-se imperativo, também, procurar-se formas mais econômicas, eficientes e eficazes para realizar tais medições.

A utilização de fibras preenchidas para avaliação espectrográfica de materiais diversos já é uma técnica em uso. No entanto, esta mesma utilização, valendo-se das Fibras de Cristal

Fotônico preenchidas para realizar o levantamento de variações nos índices de refração e avaliar mudanças de fase em substâncias, é algo novo e é o que se busca alcançar com o desenvolvimento desta pesquisa. Finalmente, através da pontuação destas transformações de fase, pode-se conseguir uma melhor forma de controlar suas ocorrências.

1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 faz uma revisão dos principais conceitos teóricos envolvidos no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, quais sejam: caracterização das fibras de cristal fotônico, reflexão interna total, campo evanescente, índice de refração, curvatura em fibras, ressonância óptica, difração, características físico-químicas e ópticas da água (substância de interesse nesta pesquisa) e mudança de fase em substâncias.

O capítulo 3 descreve, com detalhes, os materiais, métodos e equipamentos utilizados no desenvolvimento da pesquisa. Além disso, descreve o desenvolvimento dos trabalhos práticos executados para o levantamento dos dados e análises na avaliação do processo de mudança de fase da substância com posterior medição do seu índice de refração. Ao final, é apresentada uma descrição da metodologia do experimento e seu esquemático de montagem.

O capítulo 4 apresenta os dados resultantes das medições realizadas na caracterização da mudança de fase da substância no interior da fibra, bem como os resultados calculados e a discussão do fenômeno.

O capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho de pesquisa, com a indicação de aplicações, possíveis melhorias e novos desenvolvimentos previstos.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo são descritos alguns conceitos teóricos envolvidos no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, os quais sejam: caracterização das fibras de cristal fotônico, reflexão interna total, campo evanescente, índice de refração, curvatura em fibras, ressonância óptica, difração, características físico-químicas e ópticas da água (substância de interesse da pesquisa) e mudança de fase em substâncias.

Esses conceitos são de fundamental importância para uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos nos processos que ocorrem e da metodologia desenvolvida.

2.1 FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO (*PCF*)

O termo “fibra de cristal fotônico” foi cunhado pelo físico irlandês Philip Russel em 1995-1997. Em 1996, ele fez a primeira demonstração prática desta nova classe de fibras ópticas (*PCF*, na sigla em inglês) (RUSSELL, 2006).

Contrariamente às fibras ópticas convencionais, que são feitas a partir de óxido de silício ultra puro utilizando dopagem para alterar suas características, as fibras ópticas fotônicas apresentam suas características definidas por microestruturas construídas em seu interior (JR, 2010).

Os canais de ar da microestrutura existente nas *MOF's* podem ser arranjados para adaptarem-se às dispersões e a não-linearidades existentes e, também, numa forma periódica para criar as fibras de cristal fotônico (*PCF's*), que possuem propriedades únicas de guiamento de onda (JACOBS *et al.*, 2007).

A fibra de cristal fotônico (*PCF*) pode ser, então, considerada um subgrupo de uma classe mais geral de fibras ópticas multiestruturadas, com matriz periódica, onde a luz é guiada por modificações estruturais, e não somente por diferenças de índices de refração.

Sendo uma variante das fibras microestruturadas mencionadas por Kaiser *et al* (KAISER; ASTLE, 1974), as fibras de cristal fotônico são uma tentativa de incorporar as idéias de banda de lacunas de Yeh *et al* (YEH; YARIV; HONG, 1977), de forma simples, pelo empilhamento periódico de uma matriz regular de canais e moldagem em forma de fibra (MACCHESNEY; BISE; MÉNDEZ, 2007). As primeiras de tais fibras não propagavam por bandas de lacuna mas, sim, por um índice gradual efetivo. No entanto, o nome, por razões históricas, permaneceu inalterado apesar de alguns pesquisadores preferirem chamar essas fibras de "fibras de furos" ou fibras ópticas "microestruturadas" em referência a obra pré-

existente do Bell Labs (JACOBS *et al.*, 2007). O salto para a escala nanométrica foi garantido pelas fibras, mais recentemente, denominadas "estruturadas". Uma variante extremamente importante foi a fibra revestida a ar, projetada por DiGiovanni no Bell Labs em 1986/87 (DAVID JOHN DIGIOVANNI; ROBERT SCOTT WINDELER, CHATHAM; N., 1998), baseada no trabalho de Marcatili *et al.* (ALFERNESS; KOROTKY; MARCATILI, 1984), em 1984. Este é o único projeto de fibra mais bem sucedido, até aquela data, baseada na estruturação da fibra utilizando buracos de ar e tem aplicações importantes em relação a abertura numérica elevada e confinamento de luz, especialmente quando implementada no uso com laser, com grandes promessas em áreas tão diversas quanto biofotônica e astrofotônica.

PCF's são consideradas, desta forma, como uma nova classe de fibras ópticas baseada nas propriedades dos cristais fotônicos que, constituídos numa microestrutura morfológica regular na escala do comprimento de onda óptico (uma fração de um micrometro ou menos) e incorporados, na confecção, à fibra, alteram, radicalmente, suas propriedades ópticas (VERMA *et al.*, 2018).

PCF's podem guiar luz por reflexão interna total modificada, onde a fibra pode ser monomodo sobre uma larga faixa de comprimento de onda, ou por guiamento fotônico de *gap* de banda (SMITH *et al.*, 2003), no qual a luz pode ser guiada no ar.

Um *gap* de banda fotônico é uma faixa de frequências proibida na direção de propagação e onde os fótons, ao longo desta, são completamente proibidos de se propagarem. Na direção em que ocorre um "*band gap*", o cristal fotônico age como um espelho que reflete, perfeitamente, todas as ondas com frequências dentro do "*band gap*". Em muitas das aplicações práticas, o objetivo é criar um "*band gap*" tão largo quanto possível.

No guiamento de *gap* de banda fotônico existem regiões nas quais a propagação de fótons é proibida e a densidade de estados eletromagnéticos é nula. Estas regiões podem ser projetadas para existir em uma, duas ou três dimensões, dependendo se a constante dielétrica é:

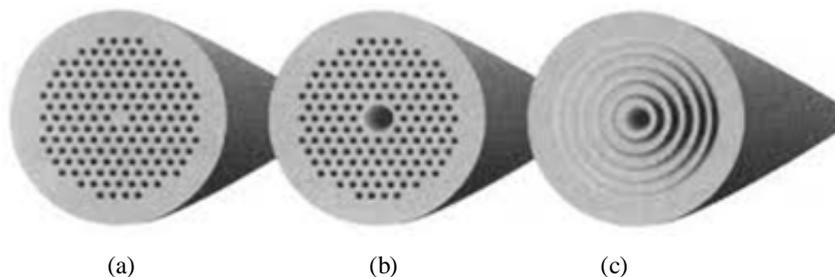
- periódica ao longo de uma direção e homogênea nas demais (cristais fotônicos unidimensionais)
- periódica em um plano e homogênea na terceira direção (cristais fotônicos bidimensionais)
- periódica em todas as três direções (cristais fotônicos tridimensionais)

No entanto, em um material periódico, a relação de dispersão da frequência em função do vetor de onda apresenta intervalos sem solução, os "*band gaps*".

Devido às suas capacidades de confinamento da luz em núcleos ocos ou às suas características de confinamento impossíveis nas fibras ópticas convencionais, as *PCF*'s estão, agora, encontrando aplicações bem além daquelas das comunicações por fibras óptica convencionais, tais como: lasers em fibra, dispositivos não-lineares, transmissão de alta potência, sensores de gás de altíssima sensibilidade, além de outras áreas na física, química, biologia e engenharia; devido a presença da matriz de cilindros de ar em seu corpo (LOPEZ, 2004)(JR, 2010)(BEGUM; NAMIHIR, 2012).

Em geral, as fibras regularmente estruturadas, tais como as fibras de cristal fotônico, têm uma seção transversal (normalmente uniforme ao longo do comprimento da fibra) microestruturada de um, dois ou mais materiais, usualmente disposta de forma periódica sobre a maior parte da seção transversal e, quase sempre, como um encapsulamento em volta de um núcleo (ou muitos núcleos) onde a luz é confinada. Por exemplo, as primeiras fibras demonstradas por Russel consistiam de uma matriz hexagonal de buracos de ar em uma fibra de sílica e com um núcleo sólido (1996) (RUSSELL; BIRKS; KNIGHT, 2005), ou vazio, (1998) (RUSSELL, 2006) ao centro onde a luz era guiada. Outros arranjos consistem de anéis concêntricos, de dois ou mais materiais, inicialmente propostas como "fibras de Bragg", por Yeh e Yariv (1978) (YEH; YARIV; MAROM, 1978) (Fig.2).

Figura 2 - (a) um guia de índice TIR-*PCF*. Os furos/hastes nas camadas abaixam o índice efetivo do revestimento de tal forma que a fibra atua como uma fibra de guiamento por índice. (b) uma fibra de *gap* de banda fotônica PBG-*PCF* com núcleo oco. O arranjo periódico dos furos nas camadas cria uma energia de *gap* de banda fotônica que previne a luz no núcleo de penetrar a camada. (c) uma fibra de Bragg ("Bragg Fiber"). É uma fibra de *gap* de banda fotônica formada por anéis concêntricos de filme multicamadas.



Fonte: Adaptado de L. Carlos e C. Pires (2010).(PIRES, 2013)

Destaca-se que as *PCF*'s e, em particular, as "fibras de Bragg" (YEH; YARIV; MAROM, 1978), não devem ser confundidas com redes de Bragg em fibra óptica, as quais consistem de uma variação periódica do índice de refração ou variação estrutural ao longo do

eixo da fibra, em oposição às variações nas direções transversais como na *PCF*. Ambas, *PCF* e redes de Bragg em fibra óptica, empregam o fenômeno de difração de Bragg, embora em diferentes direções (DONG *et al.*, 2011).

A presença dos buracos na *PCF* cria novos graus de liberdade para controlar as propriedades e a sensibilidade da fibra ao parâmetro desejado. Por exemplo, numa fibra convencional, por definição, esta é feita propositalmente insensível ao ambiente externo. Porém, se a idéia é utilizar a fibra para monitorar ambientes com gases tóxicos, condições de temperatura e pressão, até mesmo líquidos contaminados por bactérias, é preciso tornar a fibra sensível ao ambiente externo, completamente o oposto da técnica convencional (ADEMGIL; HAXHA, 2015; AZZAM *et al.*, 2014; EUSER *et al.*, 2008; NAEEM *et al.*, 2015).

Na área biológica, por exemplo, usando a *PCF* como referência, a amostra que será medida e analisada deve ser colocada no interior da fibra, cuja dimensão típica é da ordem de um micrômetro de diâmetro, para que a bactéria tenha contato direto com o núcleo, local por onde a luz será guiada (AZZAM *et al.*, 2014). Essa redução do núcleo deixa a fibra com maior sensibilidade e, portanto, mais adequada para sensoriamento biológico ou químico. Isso ocorre por conta da difração de luz que se estende para fora do núcleo. Ainda que essa dispersão seja prejudicial em termos de transmissão de dados, torna-se perfeito para questões de sensoriamento. Dessa maneira, se os canais de ar forem corretamente sensibilizados podem se tornar sensíveis a apenas uma amostra biológica específica (HAMEED; ALRAYK; OBAYYA, 2016). E, ainda, complementando, com o uso de um volume de amostras extremamente reduzido, da ordem dos nanolitros.

Também interessante é o reconhecimento de que a estrutura periódica, na verdade, não é a melhor solução para muitas aplicações. Fibras que vão bem além de moldar o campo próximo podem, agora, pela primeira vez, ser, deliberadamente, projetadas para moldar o campo distante, inclusive focando a luz para além da extremidade da fibra. São, no caso, as fibras de Fresnel que utilizam a óptica de Fresnel que há muito tem sido aplicada ao projeto de lentes, incluindo as mais avançadas formas usadas em ópticas adaptativas aperiódicas, fractais e irregulares ou zonas de Fresnel/fractais (MARTELLI *et al.*, 2005).

Normalmente, a luz emergente da difração na fibra se exterioriza expandindo por espalhamento. Mas graças a este novo *design*, a fibra de Fresnel foca a luz sem a necessidade de lentes na extremidade da fibra. John Canning diz que "esta fibra é uma alternativa às fibras de cristal fotônico e transmite em faixas de comprimento de onda até 1550nm" (CANNING, 2008).

A fibra de Fresnel é constituída de um canal central rodeado de anéis concêntricos de furos. Os furos concêntricos têm um índice de refração efetivo mais alto do que o do canal do meio. Se um laser é disparado em sua estrutura, ocorre superposição e o feixe é concentrado no canal central. A saída da fibra tem um perfil Gaussiano.

John Canning explica que "é possível obter a intensidade de pico da luz guiada pela dispersão de um anel de furos para gerar um modo com intensidade de pico no centro do furo do meio. Este princípio de superposição também significa que é possível obter foco no campo distante, sendo esta a primeira vez em que isto foi demonstrado. Isto é o que descrevo como supermodo" (CANNING, 2008).

Martelli e Canning também perceberam que as estruturas de cristal que possuem regiões intersticiais idênticas não são as estruturas mais ideais para aplicações práticas e apontaram as fibras estruturadas aperiódicas, tais como as fibras Fractais, como sendo uma melhor opção para baixas perdas em curvaturas (MARTELLI *et al.*, 2007a). Fibras aperiódicas são uma subclasse das fibras de Fresnel, que descrevem a propagação óptica em termos análogos aos feixes livres de difração (CANNING, 2008)(MARTELLI; CANNING, 2007). Estas mesmas também podem ser feitas por meio de canais de ar adequadamente posicionados nas zonas virtuais da fibra óptica (CANNING *et al.*, 2002).

Muitos outros benefícios práticos de projeto incluem bandas mais amplas de lacunas fotônicas em guias de ondas de propagação baseadas em difração (CANNING, 2002) e reduzidas perdas em curvatura, importante para conseguir fibras ópticas estruturadas com perdas de propagação abaixo daquelas das fibras de índice gradual.

No projeto de uma fibra de cristal fotônico (JOANNOPOULOS *et al.*, 2008)(WAGHMARE; REDDY, 2016), as propriedades desta dependerão do tamanho dos buracos, do formato (se é circular ou elíptico), e da posição geométrica deles na matriz de vidro (WAGHMARE; REDDY, 2016)(VERMA *et al.*, 2018). Após esta etapa, o processo segue para simulação numérica por computador com softwares específicos (WOODS; NAUGHTON, 2009)(MILLER, 1990)(WATRASIEWICZ, 1975). Desenvolvido o modelo da fibra ideal, o próximo passo é a fabricação, modelagem e posterior aplicação (SIBILIA *et al.*, 2008).

2.1.1 Funcionamento das Fibras de Cristal Fotônico

Em fibras ópticas convencionais, a luz é guiada através do efeito de reflexão interna total (CARNEGIE MELLON UNIVERSITY, 2014). O guiamento ocorre dentro de um núcleo com índice de refração maior do que o índice de refração do material circundante (casca). A mudança de índice é obtida através de diferentes dopagens do núcleo e da casca ou através da utilização de diferentes materiais (MÉNDEZ *et al.*, 2007).

Já as fibras ópticas microestruturadas (*MOF's*) são guias de onda de fibra óptica onde o guiamento é obtido através da manipulação da estrutura de guia de ondas ao invés de seu índice de refração.

Em fibras microestruturadas, uma abordagem completamente diferente é aplicada. A fibra é construída em um material (geralmente sílica) e o guiamento da luz é obtido através da presença de buracos de ar na região ao redor do núcleo, sólido ou oco. Os buracos, freqüentemente, são organizados no padrão regular em duas matrizes dimensionais, no entanto, existem outros padrões de furos, incluindo os não-periódicos. Mesmo que o arranjo periódico dos furos justifique o uso do termo "fibra de cristal fotônico" (*PCF*), o termo, ainda assim, é reservado para aquelas fibras onde a propagação ocorre dentro de um defeito fotônico ou devido ao efeito de banda de lacuna fotônica (YABLONOVITCH; GMITTER; LEUNG, 1991). Como tal, as fibras de cristal fotônico podem ser consideradas um subgrupo das fibras ópticas microestruturadas.

Existem duas classes principais de fibras ópticas microestruturadas (*MOF's*):

- Fibras de guiamento por índice, onde o guiamento é obtido através do efeito de reflexão interna total,

- Fibras de banda de lacuna fotônica, ou "*band gap*" fotônico, onde o guiamento é obtido através da interferência construtiva (ou destrutiva) da luz espalhada (incluindo o efeito de banda de lacuna fotônica).

Semelhantemente à ressonância acústica, dentro de uma fibra de cristal fotônico ocorre o fenômeno de ressonância óptica quando, dependendo do ângulo de incidência do feixe de luz sobre as interfaces dos furos no interior da fibra, estas frentes de frequências refletem e refratam, causando uma interferência entre si que podem amplificar ou apagar o sinal (SILVA; RORIZ; FRAZÃO, 2014). Este fenômeno de interferência luminosa no interior da

fibra recebe o nome de difração que é, então, uma ressonância construtiva ou anti-ressonância destrutiva dos feixes de luz no interior da fibra (OHTAKA, 1979).

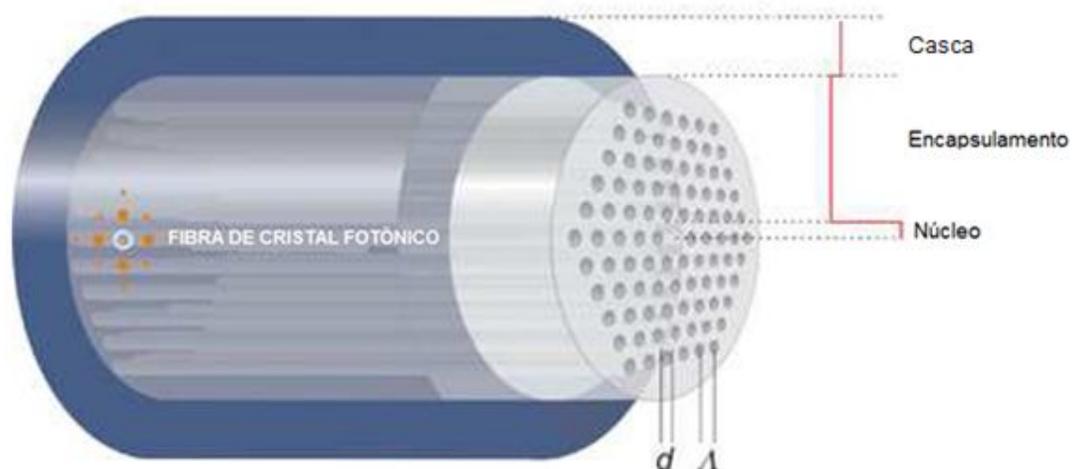
Comprimentos de onda maiores (acima da distância, da ordem de nanômetros até micrometros, entre os furos periodicamente dispostos) ficam confinados dentro do núcleo e se propagam por efeito de reflexão interna total. Os efeitos anti-ressonantes que a estrutura dos microtubulos cria ao redor do guiamento impedem o escape da luz do núcleo (AXELROD, 2001).

Comprimentos de onda menores (abaixo da distância entre os furos periodicamente dispostos) ultrapassam a barreira de microtubulos ao redor do núcleo e, caso possuam valores próximos à distância entre os furos, interagem, em parte, com as interfaces destes microtubulos. Assim, geram os efeitos da difração, que é quando estas ondas refletem entre si construtiva ou destrutivamente, criando novas componentes de frequências que se propagam (ZHAO; LI; DI, 2005). Outra parte destes comprimento de ondas menores, que possui valores bem abaixo da distância entre os furos, escapa da região dos microtubulos e "vaza" da fibra (MARTELLI *et al.*, 2009).

2.1.2 Tipos de Fibras de Cristal Fotônico

Existem dois tipos básicos de fibras de cristal fotônico: fibras de núcleo sólido (Fig.3), onde a luz é predominantemente confinada em vidro e é guiada por reflexão interna total, e fibras de núcleo oco (Fig.4), onde a maior parte da luz se propaga em um núcleo vazio, guiado por fenômenos ressonantes (ZHAO; LI; DI, 2005).

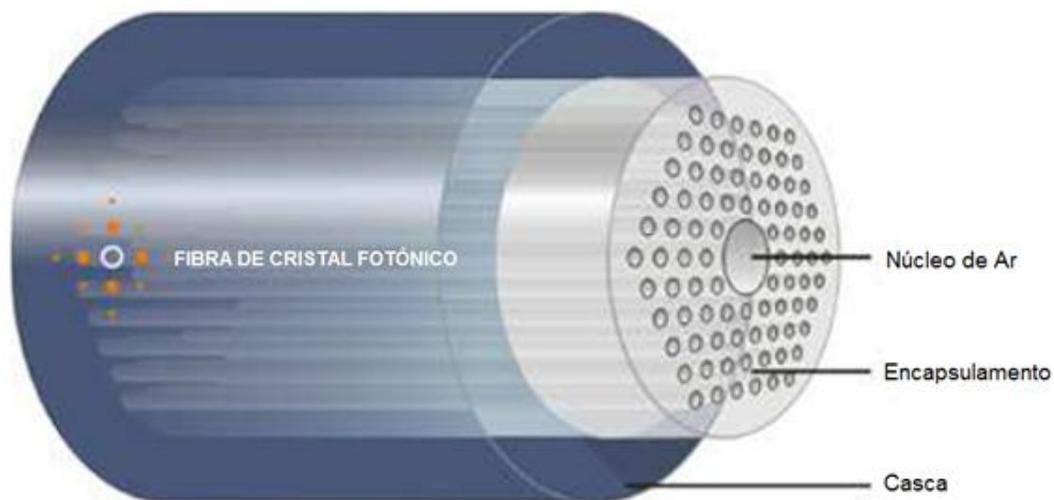
Figura 3 - Fibra de núcleo sólido (sílica).



Fonte: Adaptado de U.MACKENZIE (2008),(MACKENZIE, 2008)

As fibras de núcleo oco (Fig.4) podem ser preenchidas com gases ou líquidos. O comprimento de interação, praticamente ilimitado entre o campo óptico e esses fluidos, torna possível explorar efeitos não-lineares que geralmente são fracos demais para serem utilizáveis (SIBILIA *et al.*, 2008). Os efeitos não-lineares ocorrem quando a resposta da polarização do material ao campo elétrico da luz não é mais proporcional ao campo elétrico da luz. Isso ocorre quando a intensidade (potência por unidade de área) da luz é tal que o campo elétrico desta torna-se uma fração não desprezível dos campos atômicos que confinam os elétrons .

Figura 4 - Fibra de núcleo oco.



Fonte: Adaptado de U.MACKENZIE (2008).(MACKENZIE, 2008)

As fibras de cristal fotônico podem ser divididas em dois modos de operação, de acordo com seus mecanismos de confinamento, os quais são:

- Guiamento por RIT (Reflexão Interna Total) (SCHNECKENBURGER, 2005), onde as fibras possuem um núcleo sólido ou um índice médio de refração do núcleo maior que o índice de refração médio do revestimento microestruturado. O princípio para o guiamento da luz pelo núcleo é tal como nas fibras ópticas convencionais. Entretanto, essas PCF's podem ser projetadas e configuradas a fim de apresentar características que não podem ser obtidas em fibras convencionais como, por exemplo, alto contraste de índice de refração entre núcleo e casca e, assim, apresentar um confinamento muito mais forte para aplicações em dispositivos ópticos não-lineares, alta não linearidade (decorrente do alto confinamento em núcleos da ordem de 1 μm de diâmetro) e deslocamento do zero de dispersão para o visível.

Há muita flexibilidade para o projeto dessas fibras, podendo-se alterar o tamanho e a distância entre os buracos da casca, tamanho do núcleo e, até mesmo, sua simetria (CÂMARA, 2014).

- Guiamento por “banda de lacuna fotônica” (ZOLLA *et al.*, 2005) ou por “*band gap*” fotônico (BENABID, 2006), na qual a luz está confinada por uma banda de lacuna fotônica construída na camada microestruturada das fibras que forma o núcleo da *PCF*, criando-se uma região de defeito no cristal, onde a luz será confinada. Tal banda de lacuna, projetada corretamente, pode confinar a luz em um núcleo de menor índice (PRAVDIN; PETERSBURG, 2014) e, até mesmo, num núcleo oco (ar). Esse defeito é conseguido, por exemplo, criando-se um buraco de ar maior, com diâmetro de, aproximadamente, três vezes o diâmetro dos buracos regulares. O guiamento pelo núcleo se restringirá à faixa de frequências na qual existe o *bandgap*. Uma maneira mais simples de entender o guiamento por *bandgap* fotônico em uma fibra é através da óptica geométrica, considerando as múltiplas reflexões parciais nas interfaces das camadas que compõem o cristal fotônico da casca formada pelas regiões com índice de refração n_1 e n_2 , com $n_1 < n_2$. A luz acoplada ao núcleo da fibra (região com índice de refração n_1) será parcialmente refletida em cada interface da estrutura sendo, dessa maneira, confinada nele (CÂMARA, 2014). Fibras de banda de lacuna com núcleos ocos podem, potencialmente, contornar limitações impostas pelos materiais disponíveis, por exemplo, para criar fibras que guiam luz em comprimentos de onda para os quais materiais transparentes não estão disponíveis (porque a luz está principalmente no ar e, não, nos materiais sólidos).

Categorias mais específicas de *PCF*'s incluem: fibras de banda de lacuna fotônica (“*photonic-bandgap fiber*” - *PCF*'s que confinam luz através de efeitos de banda de lacuna) (ZOLLA *et al.*, 2005), fibras com furos (“*holey fiber*” - *PCF*'s que utilizam furos de ar em suas seções transversais) (WEI; ZHU; KRISHNASWAMY, 2016), fibras assistidas por furos (“*hole-assisted fiber*” – *PCF*'s que guiam luz por um núcleo de mais alto índice convencional modificado pela presença de furos com ar) (NIELSEN *et al.*, 2005) e fibras de Bragg (“*Bragg fiber*” – fibra de banda de lacuna fotônica formada por anéis concêntricos de filme multicamadas) (HINCKLEY; WILD, 2011).

2.1.3 Utilização das Fibras de Cristal Fotônico

Fibras de cristal fotônico possuem propriedades singulares e úteis em diversas aplicações. A estrutura das fibras pode ser escolhida de acordo com a necessidade e aplicação. A inserção de material nos canais possibilita sua utilização como sensores e dispositivos fotônicos (HUI; O'SULLIVAN, 2009a). Vale mencionar que o desenvolvimento das fibras de cristal fotônico permitiu explorar novas propriedades na condução da luz que não eram possíveis nas fibras ópticas convencionais até então.

Conforme a necessidade da aplicação, é possível variar a composição química do vidro do qual a fibra é feita e/ou o material inserido nos canais da *PCF*, adaptando as propriedades desta de acordo com o objetivo da utilização (ZHAO; DENG; WANG, 2014).

Na medicina, por exemplo, as fibras de cristal fotônico são utilizadas em procedimentos cirúrgicos bem como nos imageamentos de organismos, tal como na tomografia computadorizada (BEGUM; NAMIHIR, 2012). A mesma tomografia pode ser utilizada para realizar imageamentos da matéria interna em corpos metálicos, como no caso da metalografia interior.

Como os comprimentos de onda que propagam pela *PCF* podem ser selecionados em função da substância ou material preenchido nos canais da fibra, estas fibras podem, também, ser utilizadas como sensores químicos ou biológicos (PINTO; LOPEZ-AMO, 2012) e na detecção da variação composicional de materiais sendo, química e biologicamente, inertes e sem riscos de faíscas elétricas, que poderiam causar explosões em alguns processos.

A temperatura e a pressão afetam, também, os materiais nos níveis eletrônicos e moleculares e, conseqüentemente, na maneira como o meio responde ao campo elétrico da luz. Na sílica, o aumento da temperatura, bem como o aumento da pressão, aumentam o índice de refração (PIRES, 2013), tornando-se outra possibilidade de uso para sensoriamento.

Desta forma, uma nova direção que está ganhando terreno está na questão das propriedades mecânicas da fibra de cristal fotônico. Colocada sob uma pressão hidrostática (que vem de todas as direções) a uma pressão de 500 atmosferas, como se estivesse a cinco mil metros de profundidade do oceano, por exemplo, é possível observar como as propriedades mecânicas sofrem alteração, como o estresse se distribui na fibra e de que maneira as propriedades ópticas são alteradas (LIN *et al.*, 2013). Um dos grandes diferenciais dessa fibra é a capacidade de, além do ajuste de suas propriedades ópticas, também o ajuste das mecânicas (BARBIERI, 2010), sendo úteis, desta forma, em trabalhos destinados a

verificação do estresse mecânico de estruturas civis (barragens, túneis), vazamentos (oleodutos, gasodutos) e de temperatura, evitando desastres e reduzindo prejuízos.

Como a luz sofre os efeitos de campos eletromagnéticos, tal propriedade pode ser utilizada, por exemplo, para rotacionar feixes de luz, criando um componente totalmente óptico mas que, funcionalmente, equivale ao transistor eletrônico e que, no caso, é um transistor de luz (FENG *et al.*, 2017).

2.1.4 Vantagens das Fibras de Cristal Fotônico

A presença dos buracos cria novos graus de liberdade para controlar, muito mais do que na fibra convencional, as propriedades e a sensibilidade da fibra ao parâmetro desejado.

Com relação às vantagens globais, as fibras microestruturadas possuem duas. A primeira delas está nas suas novas funcionalidades, ou seja, é possível dar à fibra funções que não se imaginava antes. A segunda está em permitir o controle de suas propriedades, tais como índice de refração efetivo (birrefringência de fase), fator de atenuação, dispersão e susceptibilidade não linear, o que também não acontecia anteriormente (ZOLLA *et al.*, 2005).

Outra vantagem potencial de um núcleo oco é que pode-se, dinamicamente, introduzir materiais no núcleo, tal como um gás que se quer analisar para a presença de alguma substância. A *PCF* também pode ser modificada pelo revestimento dos furos com “sol-géis” (géis solúveis), de material de índice similar ou diferente, para melhorar sua transmissibilidade da luz.

2.1.5 Desvantagens das Fibras de Cristal Fotônico

A dispersão da propagação da luz, tão útil nos dispositivos fotônicos tais como sensores e dispositivos como controladores fotônicos, torna-se bastante prejudicial no caso da utilização das mesmas para transmissões entre as extremidades da fibra onde se busca baixa atenuação de sinal.

A elevada dispersão, por exemplo, é um fator chave na limitação do desenvolvimento de taxas rápidas de transmissão no campo da comunicação com fibra óptica (ZOLLA *et al.*, 2005).

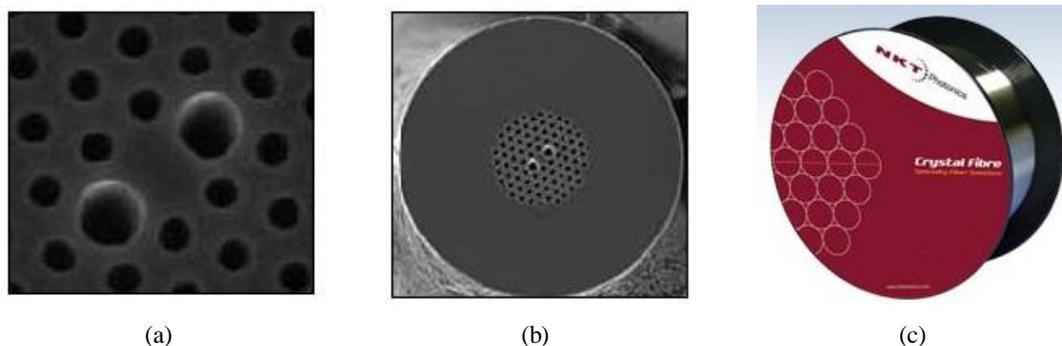
2.1.6 Escolha da Fibra de Cristal Fotônico

A escolha pela fibra de cristal fotônico microestruturada iniciou devido à vantagem potencial do núcleo oco onde seria possível, dinamicamente, introduzir os materiais para análise em seu núcleo; no caso, a água destilada (CANNING *et al.*, 2008).

Outro motivo foi o fato de que, aplicando a curvatura e o número de voltas adequados nesta fibra preenchida com a água, seria criado o campo evanescente para fora do material sólido da fibra e para dentro dos furos, onde estaria a substância a ser monitorada; gerando, assim, um sinal óptico de transmitância característico deste material e medido na saída da fibra.

Desta forma, foi feita a opção pela *PCF* PM-1550-01, da Thorlabs, Inc (Fig.5).

Figura 5 - (a) foto do detalhamento do núcleo da *PCF* PM-1550-01 utilizada, (b) foto da seção transversal desta *PCF* mostrando a distribuição e quantidade dos furos de seu núcleo e a largura do núcleo sólido ao redor e (c) foto da bobina em que a *PCF* é comercializada.



Fonte: Adaptado de THORLABS (2018) (THORLABS INC, 2018).

Esta fibra possui as seguintes características:

- Composição de núcleo e casca em sílica pura
- Raio de extinção da polarização (*PER*) > 18dB acima de 100m
- Diâmetro de núcleo de 15 μ m disponível
- Manutenção da polarização (*PM*) em 1550nm
- Diâmetro do modo de campo independente do comprimento de onda
- Monomodo de área efetiva larga

Estas características conferem estabilidade do sinal medido na substância a ser monitorada (água destilada) na faixa do infra-vermelho, além de possuir características facilitadoras para o preenchimento da fibra, melhoria na caracterização e nível do sinal medido na substância e menor perda de sinal por campo evanescente na casca.

2.2 REFLEXÃO INTERNA TOTAL DA LUZ (TIR)

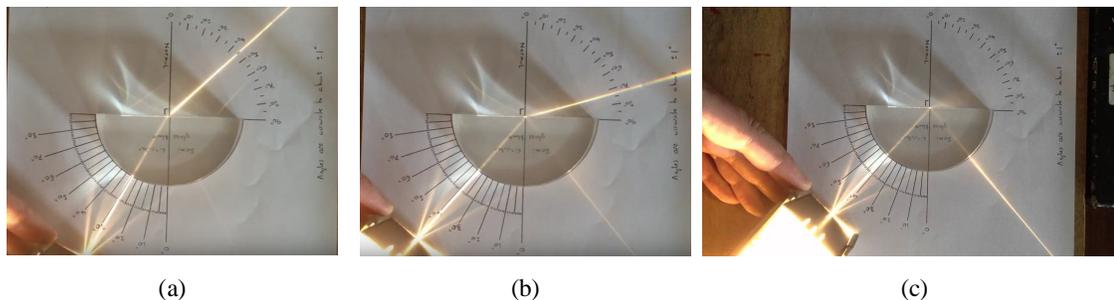
A reflexão interna total refere-se à reflexão completa de um raio de luz dentro de um dado meio da superfície circundante (CARNEGIE MELLON UNIVERSITY, 2014). Nesta, o raio de luz continua a ser refletido no meio considerado sem ser refratado.

Aumentando o ângulo de incidência de um raio sobre uma superfície, o ângulo refratado também é aumentado. À medida que o ângulo de incidência continua a aumentar, chega-se a um ponto em que o ângulo refratado forma um ângulo de 90 graus com a linha normal à superfície (onde o raio refratado é paralelo à superfície entre os dois meios). Isso é chamado de ângulo crítico (ângulo de incidência limite além do qual o raio de luz deixa de passar do meio mais denso para o meio menos denso e não é mais refratado, mas totalmente refletido). Neste ponto, o raio refratado não é transmitido para o segundo meio mas, sim, percorre a interface entre os dois meios.

Se o ângulo de incidência for aumentando ainda mais neste ponto, então o ângulo refratado se move da superfície e retorna para o primeiro meio, dado que agora é refletido. Aqui, não é mais o raio refratado, mas um raio de luz refletido. Como resultado, a reflexão interna total ocorre (Fig.6).

É importante saber a diferença entre o raio refratado e um raio refletido. Enquanto um raio refratado de luz é transmitido de um meio para outro (de um meio mais denso para um meio menos denso, comparativamente falando), um raio de luz refletido não é transmitido para o segundo meio mas sim, pelo contrário, é refletido de volta para o mesmo meio.

Figura 6 - Exemplo de refração da luz e reflexão interna total da luz: (a) luz refratada na maior parte e pouco refletida, (b) luz refratada e refletida em intensidades equânimes, aproximando-se do ângulo crítico e (c) luz totalmente refletida - TIR na interface dos meios.



Fonte: Adaptado de QUANTUM BOFFIN. (2009) (QUANTUM BOFFIN, 2009).

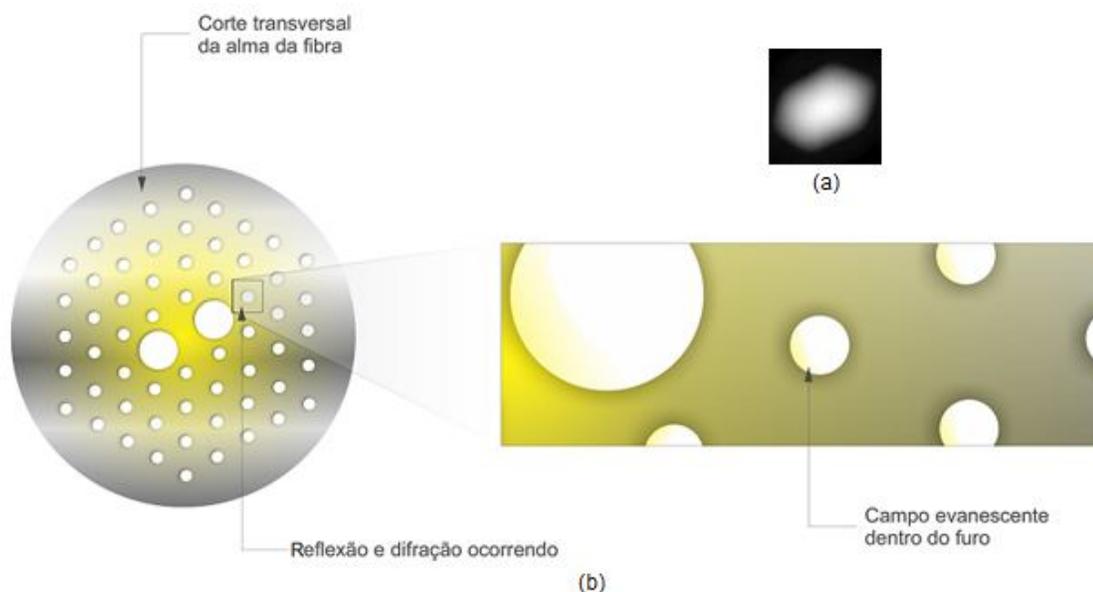
2.3 CAMPO EVANESCENTE E ONDA EVANESCENTE

Campo evanescente¹ é um campo com uma intensidade que mostra um decaimento exponencial com a distância desde o limite no qual o campo teve origem (CARNEGIE MELLON UNIVERSITY, 2014). Ele é formado no limite de um meio com diferentes propriedades de movimento (graus de liberdade).

Em princípio o campo evanescente pode ocorrer não só em processos ópticos mas, também, em outras formas como radiação eletromagnética, acústica, mecânica quântica,...

Em óptica, o agrupamento das ondas evanescentes é um processo no qual as frequências das ondas são transmitidas de um meio para outro, o que resulta em um campo de propagação evanescente, ou em decaimento exponencial, onde este se propaga radialmente (Fig.7).

Figura 7 - Campo evanescente que ocorre dentro dos microtubulos da matriz. (a) Imagem do campo evanescente formado no núcleo da fibra PM-1550-01 utilizada. (b) Esquemático do fenômeno.



Fonte: (a) **Autoria própria.** (b) www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=PM-1550-01 em 24/04/2018 (THORLABS INC, 2018)

A explicação física para a existência de ondas evanescentes é que campos elétricos e magnéticos não podem ser descontínuos em um limite, como deveria ser a situação se não houvesse um campo de ondas evanescentes.

¹Evanescente significa “tendendo à extinção”

As equações de Maxwell em um meio dielétrico impõem uma condição de contorno de continuidade para os componentes dos campos $E_{//}$, $H_{//}$, D_y , e B_y . Na reflexão interna total em duas dimensões, com a interface entre os meios estando no eixo x , a normal ao longo de y e a polarização ao longo de z ; para a polarização considerada nesta situação, as condições em $E_{//}$ e B_y ficam satisfeitas se a onda refletida tiver a mesma amplitude que a incidente, porque essas componentes das ondas incidentes e refletidas sobrepõe-se destrutivamente. Suas componentes H_x , no entanto, sobrepõe-se construtivamente, de forma que não possa haver solução sem que haja uma onda não-evanescente transmitida. A onda transmitida não pode, no entanto, ser uma onda sinusoidal, sendo que ela deveria, a partir de então, transportar energia além do limite, mas, no entanto, desde que as ondas incidentes e refletidas possuem igual energia, isso violaria a lei de conservação de energia. Portanto, a onda transmitida deve ser uma solução não-evanescente para as equações de Maxwell, não sendo uma onda de propagação, e as únicas soluções em um dielétrico são aquelas que decaem exponencialmente, ou seja, as ondas evanescentes (UNIVERSITY, 2014).

As aplicações práticas das ondas evanescentes podem ser classificadas da seguinte forma:

- a. Aquelas em que a energia associada com a onda é usada para excitar outros fenômenos dentro da região do espaço onde a onda original torna-se evanescente. Um exemplo disto é como ocorre no microscópio de fluorescência de reflexão interna total (SCHNECKENBURGER, 2005).
- b. Aquelas em que as ondas evanescentes combinam dois meios nos quais as ondas podem viajar e, portanto, permitem a transferência de energia, ou de uma partícula, entre os dois meios (dependendo da equação de onda utilizada). Um exemplo disto é o efeito de túnel de uma onda mecânica, que também é conhecido como agrupamento de ondas evanescentes (CANNING *et al.*, 2011).

Os campos evanescentes eletromagnéticos têm sido utilizados para exercer pressão de radiação óptica em pequenas partículas, a fim de apanhá-las para experimentação, ou para diminuir a sua temperatura para um nível muito baixo (CORDEIRO *et al.*, 2006). Também para iluminar objetos muito pequenos, tais como as células para microscopia (como no microscópio de fluorescência de reflexão interna total) (AXELROD, 2001). As ondas evanescentes de uma fibra óptica também podem ser utilizadas em um analisador de gás e as imagens de ondas evanescentes representam, na espectroscopia de infravermelho, uma técnica conhecida como reflectância total atenuada (MARTELLI *et al.*, 2009).

2.4 ÍNDICE DE REFRAÇÃO

Teoricamente, o índice de refração de um material preenchido nos furos da fibra pode ser determinado pela medição do "cut-off" difrativo que surge no espectro de transmissão de uma fibra óptica de cristal fotônico, sendo esse fenômeno governado pela seguinte equação (MARTELLI *et al.*, 2007b):

$$n_h = \frac{n_{core} \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\lambda m}{2n\Lambda} \right) \right] - (x_{SiO_2} n_{SiO_2})}{x_h} \quad (1)$$

onde: n_h = índice de refração do material nos furos; λ = comprimento de onda com fase acoplada; m = ordem de difração; n = índice de refração (aproximadamente, o índice de refração médio efetivo do núcleo de sílica (n_{core})); Λ = espaçamento entre os furos do mesmo anel de furos ao redor do núcleo; n_{SiO_2} = índice de refração da sílica; x_{SiO_2} = fração de sílica que compõe o encapsulamento e x_h = a fração de furos que compõe o encapsulamento (pode ser estimada medindo-se o tamanho dos furos e a quantidade de furos).

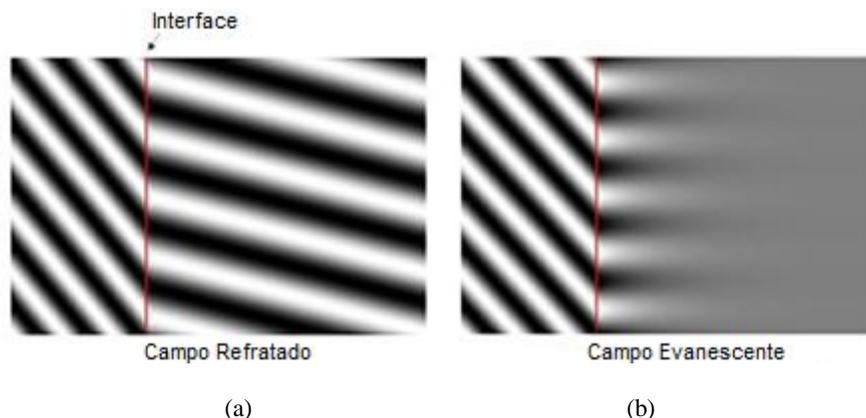
O índice médio de encapsulamento, n_{cl} , é composto pelo índice do meio dentro dos orifícios, n_h , e o índice de SiO₂, n_{SiO_2} :

$$n_{cl} = x_h n_h + x_{SiO_2} n_{SiO_2} \quad (2)$$

onde: n_{cl} = índice de refração efetivo médio do encapsulamento, n_{core} = índice de refração efetivo médio do núcleo.

Abaixo, mostra-se um comparativo do aspecto morfológico entre um campo refratado e um evanescente (Fig.8).

Figura 8 - (a) representação de ocorrência de uma frente de onda refratada numa interface, (b) representação de ocorrência de uma frente de onda evanescente numa interface.



2.5 CURVATURA EM FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO

A literatura a respeito de perda por curvatura em fibras estruturadas tem focado na matriz regular periódica da *PCF*, sendo que estas são muito mais sensíveis às perdas por curvatura que as não regulares. As fibras estruturadas de matriz periódica apresentam sensibilidade ao comprimento de onda e efeitos difrativos notáveis nos comprimentos curtos.

A energia luminosa que transita pela fibra o faz pela parte sólida, a sílica. Quando se imprime certa curvatura à fibra, esta energia tende a evanescer (dispersar), em parte, pelos furos da fibra e através de sua casca (MARTELLI *et al.*, 2007a).

Desta forma, com a curvatura, acopla-se mais luz à região da casca com a estrutura periódica, obtendo-se a intensificação do campo evanescente nos furos da fibra onde encontra-se o material de interesse da medição, no caso, a água, o que fornece medidas do espectro óptico de transmissão resultantes deste material preenchido na fibra óptica.

Conforme literatura, comprimentos de onda menores vazam para a região da casca de forma mais eficaz com a curvatura (MARTELLI *et al.*, 2007a) e a fibra empregada nos ensaios apresentou maior sensibilidade à curvatura para um diâmetro de 6.4mm.

As amostras de fibra são enroladas ao redor do tubo metálico e mantidas sob constante e igual tensão durante todas as medições. É importante notar que a fibra começa e termina uma volta em torno do tarugo metálico sempre no mesmo ponto tangencial, tal que os ângulos de entrada e saída sejam mantidos constantes através das medições (MARTELLI *et al.*, 2007b). A dependência da sensibilidade do sinal no comprimento de curvatura imposto foi avaliada pelo incremento no número de voltas da *PCF* em torno do tarugo, que foi de uma a cinco voltas. Desta forma, no experimento, foi estipulada uma condição otimizada de (perda de potência na transmissão) *versus* (potência no campo evanescente) de 3 voltas para a fibra preenchida com ar e de 1 volta para a fibra preenchida com água.

2.6 RESSONÂNCIA ÓPTICA

Ressonância é um fenômeno que acontece quando uma energia é aplicada a um sistema físico com frequência igual ou muito próxima da frequência natural, ou fundamental, desse sistema.

Cada sistema físico capaz de vibrar possui uma ou mais frequências naturais, isto é, que são características do sistema, mais precisamente da maneira como este é construído.

A ressonância ocasiona um aumento na amplitude de oscilação maior do que aquele ocasionado por outras frequências.

Quando ocorrem excitações periódicas sobre o sistema acontece um fenômeno de superposição de ondas que alteram a energia do sistema, modificando sua amplitude. Se a frequência natural de oscilação do sistema e as excitações constantes sobre ele estiverem sob a mesma frequência ou múltiplos desta, a energia do sistema será aumentada, fazendo com que vibre com amplitudes cada vez maiores.

Existem diversos tipos de ressonância: mecânica, sonora, elétrica, magnética, óptica.

No caso da ressonância óptica, o caso mais característico é a formação do laser, que surge em cavidades refletoras, que podem ser utilizadas para aumentar a amplitude da luz, produzindo feixes luminosos de alta intensidade.

O fenômeno de ressonância óptica, internamente à fibra, surge quando da interação de feixes luminosos, com mesma polarização e igual (ou múltiplos dos mesmos) valores de frequências, que são refletidos nas interfaces internas da fibra (limites dos furos) e se combinam entre si amplificando seu sinal. Tal amplificação do sinal é a ressonância óptica.

2.7 DIFRAÇÃO

O fenômeno da difração pode ser caracterizado pela interferência das ondas (luminosa, sonora ou de qualquer outro tipo) que se propagam numa frente de onda composta de várias frequências (ZHAO; LI; DI, 2005).

Quando a interferência ocorre sobre uma única frequência, o fenômeno é chamado de interferência simples.

Quando o fenômeno ocorre sobre um feixe de várias frequências que se propagam juntas numa mesma direção, o fenômeno é chamado de difração.

Este fenômeno ocorre quando uma parte do feixe de frequências, que se propaga pelo núcleo da fibra, consegue contornar a barreira criada pelos microtubulos ao redor deste e ocorre um novo "espalhamento" desta parte do feixe de frequências após contornar cada barreira (cada vão entre os microtubulos forma uma barreira ao espalhamento natural) (Fig.9).

Quando acontece um somatório dos feixes de frequência espalhados pela difração, ocorre um efeito de ressonância óptica amplificando o sinal (MARTELLI *et al.*, 2006) (LIU, 2016).

Quando acontece uma subtração dos feixes de frequência espalhados pela difração, ocorre um efeito de anti-ressonância óptica reduzindo o sinal ou, até mesmo, extinguindo-o.

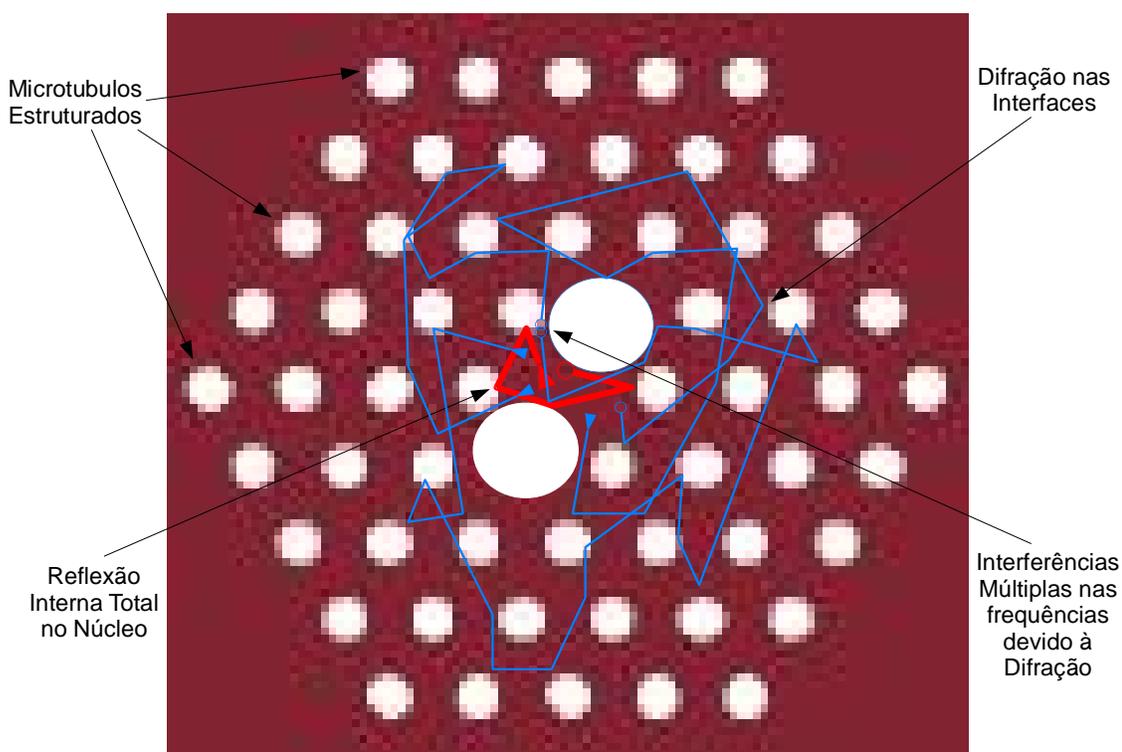
Importante ressaltar que a difração não modifica o comprimento de onda (frequência) original nas novas frentes de onda geradas (OHTAKA, 1979). O que a difração modifica, sim, é a forma da frente de onda, distorcendo a mesma em função do tamanho do obstáculo (espaçamento entre os microtubulos).

O que altera os comprimentos de onda nestas novas frentes é o somatório ou subtração entre as novas frentes não polarizadas que interagem entre si.

A decorrência prática, em termos de observação do fenômeno com o uso do Analisador de Espectro Óptico, é a formação de um vale ("cut-off") no gráfico de transmissão do sinal luminoso pela fibra (CANNING *et al.*, 2007). Vale este que pode ter sua formação intensificada pelo emprego de curvaturas à fibra.

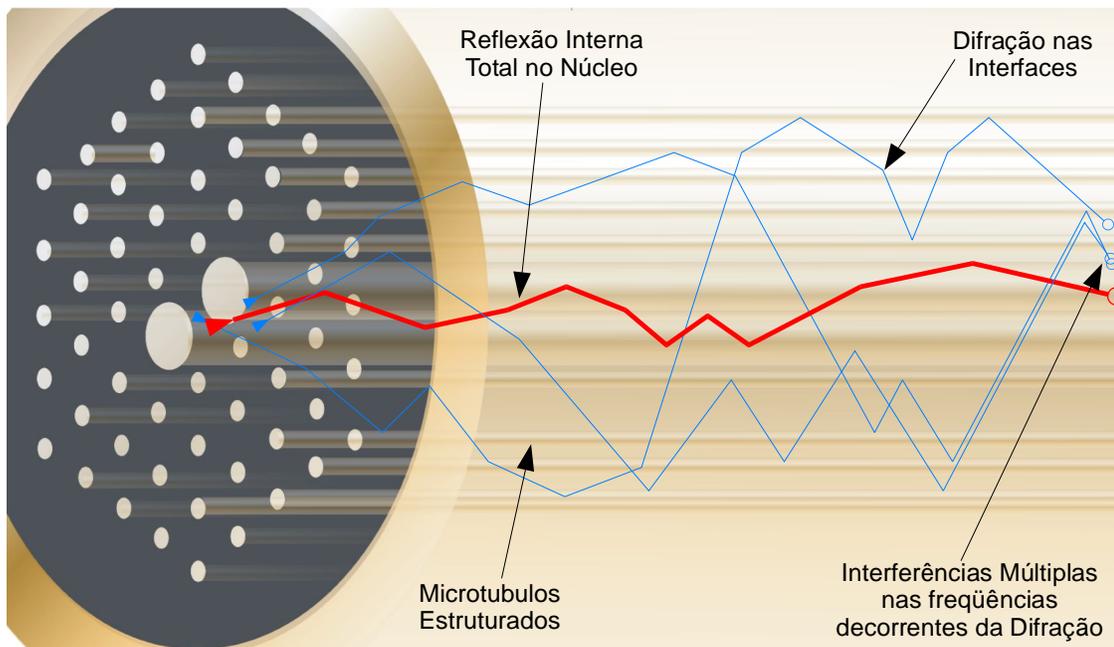
Este fenômeno da difração é a condição principal para ocorrência dos efeitos físicos que caracterizam a metodologia desenvolvida nos experimentos deste trabalho, os quais permitem o desenvolvimento de situações passíveis de sensoriamento (Fig.10).

Figura 9 - Representação dos processos de guiamento da luz que ocorrem no interior da fibra de cristal fotônico, em corte transversal: Reflexão Interna Total (onda em vermelho) e Difração (onda em azul).



Fonte: **Autoria própria.**

Figura 10 - Representação dos processos de guiamento da luz que ocorrem no interior da fibra de cristal fotônico, em corte longitudinal: Reflexão Interna Total (onda em vermelho) e Difração (onda em azul).



Fonte: **Autoria própria.**

2.8 ÁGUA E GELO - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E ÓPTICAS

PONTO DE FUSÃO - A água pura, à pressão de 1atm, congela em 0°C (273K); podendo ser superfundida¹ até sua nucleação cristalina homogênea² próximo de -42°C (231K). Esta propriedade torna-se importante na formação da estrutura cristalina da água, bem como dos hidratos, pois estas vão depender da velocidade do resfriamento e da temperatura que é alcançada, variando de um sólido fluido até um cristalino homogêneo.

DENSIDADE - Nas condições normais de pressão, a 3,98°C, imediatamente antes de congelar, a água atinge sua máxima densidade (1000 kg/m³) e, ao aproximar-se mais do ponto de fusão, em 0°C, a água expande-se e torna-se *menos* densa, devido, isso, à estrutura cristalina do gelo, conhecido como gelo I_h hexagonal, que é uma conformação cristalina particular de baixa energia. Ou seja, ao resfriar-se, a água busca organizar-se numa rede cristalina que alonga as componentes rotacionais e vibracionais das ligações, fazendo com que cada molécula de água seja afastada das vizinhas.

CAPILARIDADE - É o processo de a água subir por um tubo estreito, tal como os furos da fibra óptica, contrariamente à força da gravidade, devido à aderência da água às paredes do tubo. O processo continua até que, no tubo, haja água suficiente para que a força da gravidade seja contrabalançada com a força de adesão. No caso do nosso experimento, otimizamos este processo de capilaridade pela injeção de sobrepressão com gás nitrogênio (inerte) num dos lados da fibra. A água foi, então, forçada a injetar-se para dentro dos furos da fibra além do processo normal por capilaridade. Isso economizou tempo e tornou possível o completo preenchimento da fibra pela água.

CAPACIDADE TÉRMICA E TEMPERATURA DE FUSÃO - A entalpia específica de fusão da água é $333,55 \text{ kJ kg}^{-1}$ a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ e possui o segundo maior calor específico, atrás, apenas, da amônia. Sendo assim, estas propriedades conferem ao gelo uma grande resistência ao derretimento e tornaram o experimento bastante estável às medições.

NATUREZA BIPOLAR DA ÁGUA - A molécula de água tem uma forma angular, o que causa uma diferença de cargas em sua auto-estrutura chamada de dipolo.

Esta natureza bipolar é responsável por propriedades físicas da água tais como os pontos de fusão e de ebulição relativamente altos, onde mais calor é necessário para quebrar as ligações de hidrogênio entre as moléculas, e são responsáveis, também, pelo seu grande calor específico, o que faz dela um bom meio de armazenamento de calor.

As ligações de hidrogênio também são a causa do comportamento da água quando resfriada até próximo do ponto de fusão, onde a presença das ligações leva as moléculas a formarem a estrutura cristalina hexagonal do gelo, que tem uma densidade menor e, por isso, o gelo flutua na água. Em sendo assim, todos os materiais se contraem na solidificação, mas a água se expande ao congelar.

PROPRIEDADES ÓPTICAS - A água possui uma coloração levemente azulada e não transparente como costuma-se associar. Esta cor intrínseca se deve ao espectro seletivo de absorção da luz.

O pico de transmitância da água pura (mas mesmo com algum soluto dissolvido), ocorre próximo de 500nm e dentro do espectro da luz visível, já que a substância possui esta leve cor azulada.

O nível de percepção desta transmitância na recepção do sinal vai depender do nível de perda que o sinal injetado vai sofrer atravessando o meio, o que ocorre, principalmente, em

²Nucleação cristalina homogênea - processo de auto-organização, na solidificação da matéria, que ocorre à partir do interior e onde todos os cristais vão possuir a mesma forma.

função da distância percorrida através do meio e das perdas em conexões, no caso da fibra preparada para as medições.

Há uma grande semelhança entre a água e a sílica (material da *PCF* utilizada) em seu comportamento anômalo, apesar de a água ser um líquido que tem uma rede de ligações de hidrogênio e a sílica ter uma rede covalente com um ponto de fusão muito alto.

Todas estas propriedades da água poderiam, num primeiro momento, estar colaborando no grau de sensibilidade e no aproveitamento das características passíveis de sensoriamento e monitoração da substância incorporada à fibra, no caso a água, e nos seus efeitos ópticos associados.

3 DESENVOLVIMENTO E METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos: os detalhes técnicos da fibra utilizada, os motivos para a escolha da mesma, o dispositivo desenvolvido para efetuar o preenchimento da *PCF* e o procedimento para realizar este preenchimento.

O projeto do dispositivo auxiliar desenvolvido para a medição na fibra em curvatura de forma encapsulada e imersa em meio de transferência de calor de forma controlada, bem como sua utilização; encontra-se a seguir. Os equipamentos utilizados na experimentação e suas características também são descritos na seqüência, assim como os procedimentos executados na preparação da fibra para as medições.

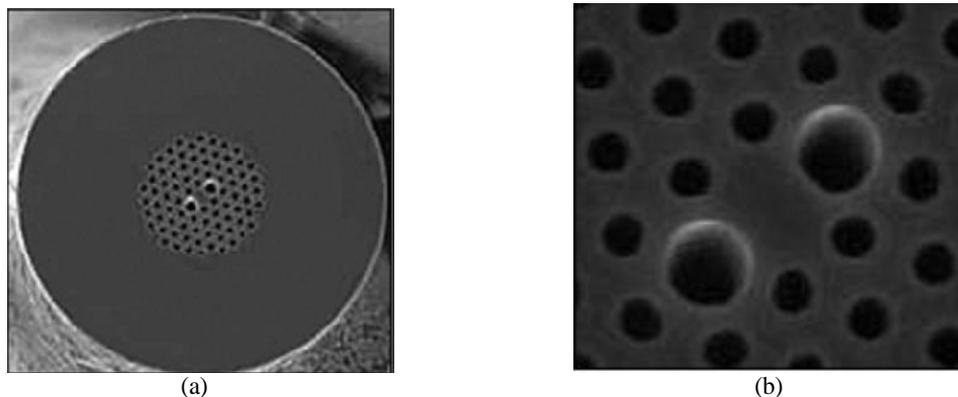
Por último, a descrição da montagem do experimento, da metodologia utilizada e utilização da técnica da curvatura para formação do campo evanescente.

3.1 ESCOLHA DA FIBRA PM-1550-01

A fibra escolhida é de cristal fotônico com manutenção da polarização, núcleo e casca de sílica pura não-dopada, diâmetro médio do núcleo $\varnothing = 5\mu\text{m}$ e monomodo infinito (Fig.11). O monomodo na fibra confere uma característica de que, na mesma, a luz (potência) transita apenas transversalmente (modo transversal), ou seja, diretamente na direção do eixo axial da fibra (THORLABS INC, 2018). Isso faz com que a fibra concentre potência de transmissão no seu eixo axial para uma larga faixa de comprimentos de onda (área de modo largo), gerando uma grande estabilidade e menores perda no sinal inserido. A característica de ser, verdadeiramente, monomodo para todos os comprimentos de onda confere, também, na prática, uma faixa de comprimento de onda operacional limitada, apenas, pelas perdas por curvatura. As perdas, então, podem ocorrer de forma bastante controlada, através dos mecanismos impostos à fibra durante o experimento, ou seja, pelas curvaturas empregadas.

Na difração que ocorre na fibra, o padrão de espalhamento não muda (coerente) conforme a amostra é girada sobre um eixo único (simetria uniaxial) onde, então, as reflexões são sombreadas e podem se somar.

Figura 11 - Microestrutura da *PCF* PM-1550-01 utilizada. (a) Imagem de microscópio eletrônico da seção transversal da fibra *PCF* com os seguintes parâmetros: diâmetro de núcleo externo/interno ($6.6 / 4.3 \pm 0.5\mu\text{m}$), diâmetro do revestimento exterior ($125 \pm 5\mu\text{m}$), diâmetro do encapsulamento ($230 \pm 10\mu\text{m}$). (b) Detalhe do corte



Fonte: Adaptado de THORLABS (2018) (THORLABS INC, 2018)

3.2 DISPOSITIVOS AUXILIARES DESENVOLVIDOS

3.2.1 Projeto do Dispositivo de Preenchimento da *PCF* Microestruturada

Foi confeccionado um vaso de pressão em alumínio, devido às características de mais fácil usinagem deste material (Fig.12), a fim de injetar o líquido no interior da fibra. O líquido foi injetado no interior da fibra sob pressão de gás de nitrogênio por este ser um gás considerado inerte em relação à água destilada (substância de preenchimento) e não ocorrer contaminação por este na amostra.

3.2.1.1 Procedimento de preenchimento da *PCF* com o uso do dispositivo

Para evitar maiores contaminações no líquido, foi utilizado um béquer dentro do vaso de pressão, que conteve a água destilada. Este béquer ficou cheio com o fluido de interesse e a fibra *PCF* com uma de suas extremidades submersa no líquido (HANSEN, 2005) e a outra do lado de fora do vaso de pressão, na pressão atmosférica. Na interface entre a tampa e o corpo do vaso de pressão, por onde passava a fibra, foi utilizado um revestimento de espuma vinílica acetinada (EVA) sintética, do tipo poliamida, para proteger a fibra dos contatos duros e aguçados diretos com o metal, o que poderia causar o risco de romper, cortar, a fibra (Fig.12).

Figura 12 - Foto do vaso de pressão com béquer,   esquerda, e foto da montagem do vaso de pressão pressurizado com nitrogênio gasoso para preenchimento da fibra,   direita.



Fonte: **Autoria própria.**

Após transcorrido o tempo de preenchimento da fibra, aproximadamente 02 (duas) horas, a fibra foi retirada do vaso de pressão e suas duas extremidades foram aquecidas pelo calor radiativo de um ferro incandescente. Este procedimento objetivou retirar a água das pontas destas extremidades por vaporiza o e, desta forma, evitar o colapso por forma o de bolha gasosa quando da fusão posterior destas com as fibras “*pig-tail*” de conexão (XIAO, L. *et al.*, 2007).

Após isto, foi observado, num microscópio de inversão modelo Eclipse TE300, da Nikon, a presença dos meniscos de água (interface água-ar em forma curva) nos canais do interior da fibra, próximos às suas duas extremidades. Isto foi necessário a fim de garantir a condi o de isen o de água nestas pontas para a realiza o das fusões das emendas com sucesso. Na figura abaixo (Fig.13) pode ser vista uma das extremidades da fibra preenchida com água (  esquerda) e a forma o do colapso na emenda durante a fusão (  direita).

Figura 13 - Visualização da extremidade desencapada (sem o acrilato) da fibra *PCF* preenchida com água, à esquerda, e da região da emenda apresentando o colapso dos microtubulos, gerado durante a fusão (à direita).



Fonte: **Autoria própria.**

3.2.2 Projeto do Dispositivo de Encapsulamento da *PCF* Microestruturada para Imersão no Meio de Transferência de Calor

Foi necessário realizar o desenvolvimento de um dispositivo para encapsular a *PCF* a ser monitorada a fim de mantê-la conformada na disposição exigida para o experimento. Além disso, para protegê-la de qualquer possível agressividade do meio externo, bem como manter uma distribuição mais uniforme do calor sobre a fibra.

Nesse caso, optou-se por um material de mais alta condutividade térmica dentre os disponíveis. No caso, uma liga de aço com prata ($K = 429$) (DAVIS; SEMIATIN; ASM, 1988)(HAYNES, 2017) foi utilizada a qual, além de garantir melhores propriedades de distribuição e condução do calor, ainda conferiu melhores propriedades nas características de menor propensão à corrosão do material.

3.2.2.1 Projeto do dispositivo de encapsulamento

O software *SOLIDWORKS*, para projeto e desenvolvimento em CAD 3D, foi utilizado para criar o projeto do dispositivo de encapsulamento da fibra para imersão em meio controlado de transferência de calor (Fig.14). Posteriormente, a peça foi usinada num centro de usinagem por comando numérico de precisão (Fig.15).

Figura 14 - Foto das vistas ortogonais do projeto do encapsulamento desenvolvido para imersão da *PCF* em meios de transmissão de calor.



Fonte: **Autoria própria.**

Figura 15 - Foto das duas partes do conjunto do dispositivo para encapsulamento da *PCF* para imersão em meios de transmissão de calor, após manufaturadas.



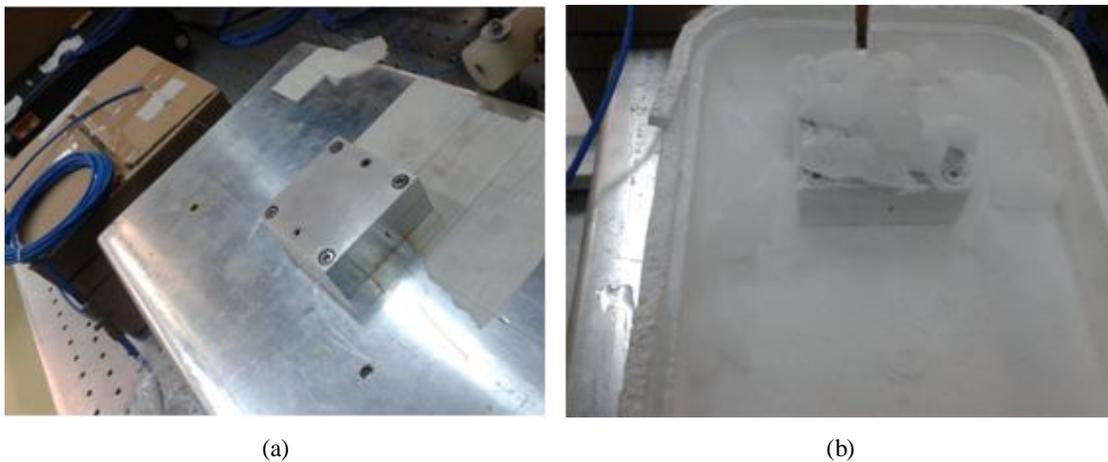
Fonte: **Autoria própria.**

3.2.2.2 Utilização do dispositivo de encapsulamento com a *PCF*

O encapsulamento foi utilizado, principalmente, para manter a fibra enrolada com o número de voltas especificado (1) e no diâmetro mais adequado (6,4mm) (MARTELLI *et al.*, 2007a), selecionados previamente (Fig.16), para fins de obtenção das melhores condições de formação de campo evanescente no sinal na *PCF*. Foi possível, assim, capturar o sinal da transmitância da luz que passava pela substância preenchida na fibra na sua melhor forma de fenômeno caracterizada e com o maior nível de variação do sinal encontrado.

Primeiramente, foi utilizado o gelo seco como elemento de transferência de calor para o encapsulamento da *PCF* devido a, com este, ser possível uma diminuição bastante rápida e intensa (até -86°C) na temperatura do conjunto. Por esta maneira, no entanto, não foi possível um controle muito eficiente da variação da temperatura (Fig.17).

Figura 16 - (a) Foto da *PCF* já preparada e configurada dentro do encapsulamento. (b) Foto da *PCF* dentro do encapsulamento e em contato com o meio de transferência de calor (gelo seco) durante o congelamento.



Fonte: **Autoria própria.**

Figura 17 - (a) Foto da *PCF* dentro do encapsulamento e em contato com o meio de transferência de calor (gelo seco) durante o congelamento. (b) Foto da *PCF* dentro do encapsulamento durante o descongelamento.



Fonte: **Autoria própria.**

Foi utilizada uma sonda PT-100 (termômetro de resistência de platina) (Fig.18) conectada a um termopar digital da Fluke, modelo 5608/5609, e inserida no interior do encapsulamento através de um furo ajustado, com tolerância de interferência, que foi

confeccionado na sua lateral (Fig.19). Este procedimento teve como objetivo obter, em tempo real, os valores de temperatura conforme esta variava.

Figura 18 - PT-100 (termômetro de resistência de platina) utilizado para medir a temperatura do encapsulamento onde ficou alojada a *PCF*.



Fonte: **Adaptado de OMEGA (2018)** (OMEGA A SPECTRIS COMPANY, 2018)

Figura 19 - Detalhe do furo ajustado no encapsulamento, com tolerância de interferência, que serviu para a introdução da ponta da sonda PT-100.



Fonte: **Autoria própria.**

Posteriormente, utilizando o termômetro de resistência de platina inserido no furo lateral do encapsulamento, um procedimento de banho térmico controlado foi executado no equipamento ECO RE 415, da marca LAUDA, (Fig.20) para obterem-se resultados com uma maior estabilidade e precisão da temperatura.

Figura 20 - Foto do equipamento de banho térmico controlado, marca LAUDA, modelo ECO RE 415.



Fonte: **Autoria própria.**

3.3 CARACTERÍSTICAS DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS

3.3.1 Arc Fusion Splicer FSM-50S

O alinhador de núcleos e fusor de emendas FSM-50S (Fig.21) foi projetado para realizar emendas em muitos tipos de fibras ópticas baseadas em sílica. Foi utilizado para realizar as fusões das extremidades desencapadas da *PCF* com as conexões "*pig-tail*" através de uma programação própria (com níveis de intensidade de arco e número de pulsos controlados) configurada no aparelho, a fim de obterem-se as melhores condições de fusão (THAPA, R. *et al.*, 2006).

Figura 21 - (a) Foto do equipamento Arc Fusion Splicer FSM-50S. (b) Foto do desalinhamento que ocorre na fibra antes da sua otimização na junção. (XIAO *et al.*, 2007)



(a)



(b)

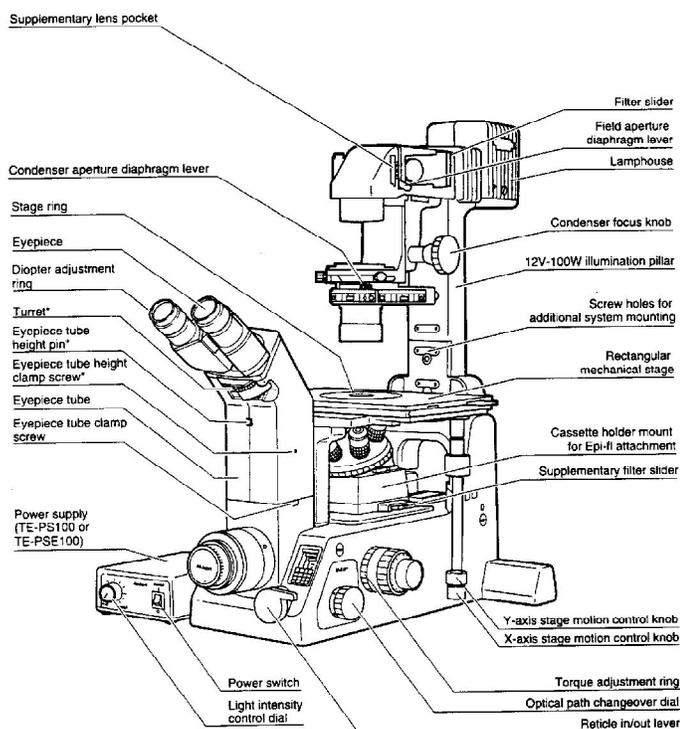
Fonte: **Autoria própria.**

3.3.2 Microscópio Invertido Eclipse TE300 (Nikon)

O microscópio TE300 (Fig.22) foi utilizado para verificar a presença do menisco de água nas extremidades da *PCF* após a vaporização do fluido de preenchimento (água destilada), nestas regiões, por irradiação. A finalidade deste processo foi assegurar que, na fusão destas extremidades com os “*pig-tails*”, não houve colapso dos canais da fibra por dilatação do fluido.

O TE300 possui saída de gravação de dados por porta “*usb*” (por onde foi feita a gravação das imagens) e, a este microscópio, foi acoplada uma objetiva com aumento de 40x. Foi utilizado em conjunto com a fonte TE-PS100 e um pilar de iluminação de lâmpada halógena de 30W com filtro ND16 de 6% de transmissividade (que reduz a quantidade da luz para 1/16).

Figura 22 - Microscópio Invertido Eclipse TE300, da Nikon.



Fonte: Adaptado de NIKON (1998) (NIKON, 2018).

3.3.3 Controlador OEM de Diodo Laser e Temperatura

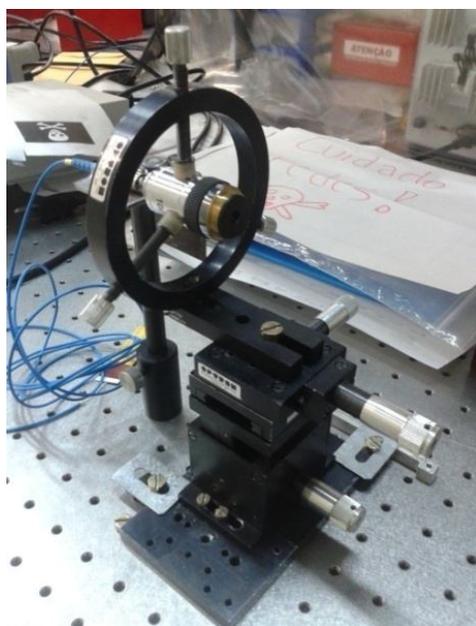
Esta fonte de diodo laser, ajustável em comprimento de onda e com temperatura controlada (Fig.23), foi utilizada para realizar o melhor alinhamento possível da segunda

ponta da *PCF* com o "*pig-tail*" antes da fusão desta emenda. Isto foi feito a fim de otimizar as menores perdas de sinal na fibra preenchida com água e obter os melhores níveis de sinal no Analisador de Espectro Óptico no momento das medições.

A menor perda de potência que ocorre na emenda da *PCF* com o "*pig-tail*" ficou caracterizada pela imagem projetada da luz do diodo laser vermelho com melhor nitidez e intensidade num anteparo na saída da outra extremidade da *PCF* (Fig.24). Para este fim, a fonte de luz do diodo laser vermelho foi acoplada na extremidade montada do terminal "*pig-tail*" e a outra extremidade "nua" (desencapada do acrilato) deste foi acomodada no "*arc fusion splicer*". A extremidade nua (desencapada do acrilato) da *PCF* também foi acomodada no "*arc fusion splicer*" sendo que a outra extremidade desta *PCF*, já montada com o "*pig-tail*", foi fixada num aparato que a manteve imóvel e direcionada, através de uma lente divergente, para um anteparo, colocado a certa distância deste.

Quando a projeção do laser vermelho, que transitava pela *PCF*, após atravessar a lente divergente, atingia o anteparo de forma bem nítida; era possível reconhecer que a condição ótima de alinhamento entre as duas extremidades que se juntavam no "*arc fusion splicer*" havia sido alcançada. A *PCF* e o "*pig-tail*" encontravam-se, então, prontos para a fusão de suas pontas.

Figura 23 - (a) Montagem da lente divergente para ampliar a projeção do laser vermelho na extremidade de saída da *PCF*. (b) diodo laser vermelho utilizado para a otimização do alinhamento.



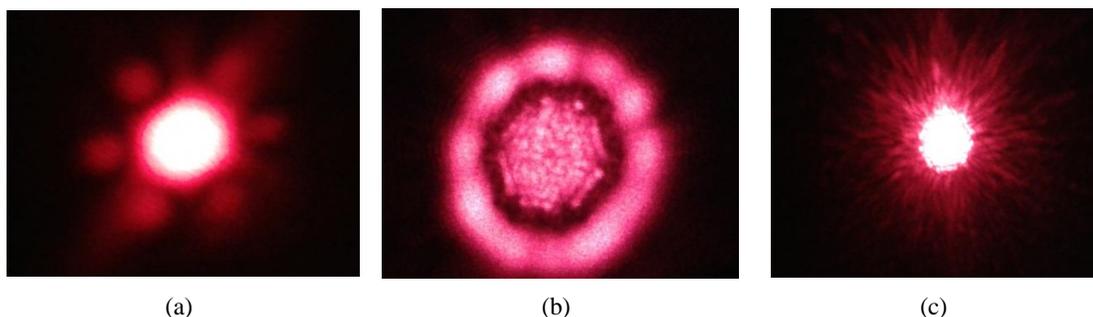
(a)



(b)

Fonte: **Autoria própria.**

Figura 24 - Projeção do laser vermelho, que passa pela *PCF*, através da lente divergente, (a) formando imagem desfocada na extremidade de saída da *PCF*, (b) formando imagem desfocada na extremidade de saída da *PCF* e (c) formando imagem bem focada na extremidade de saída da *PCF*.



Fonte: **Autoria própria.**

3.3.4 Fonte de Luz Branca Supercontínua ("*Super K Compact Single Mode White Light Source*")

A fonte de luz branca supercontínua (Fig.25) foi utilizada para fornecer o sinal a ser injetado na *PCF* devido a possuir um amplo espectro de saída que cobre, inteiramente, a região de 450 a 2200nm, com saída monomodo e brilho de muitas ordens de magnitude maior do que outras fontes de luz branca. Sua variação espectral é menor do que $\pm 0,2\text{dB}$.

A faixa de luz infravermelha (de interesse no experimento) foi totalmente coberta e a faixa de comprimento de onda onde ocorre o fenômeno no congelamento teve seu sinal de transmitância bem enquadrado e caracterizado, apresentando boa potência e variação de sinal (HUI; O'SULLIVAN, 2009b).

A saída desta fonte é através de uma fibra *PCF* de cristal não-linear com diâmetro de núcleo de $4,8\mu\text{m}$ colapsado na saída. Este cristal não-linear faz com que a luz na saída da fonte seja não-polarizada, ou seja, a polarização da fibra de teste acoplada não vai anular a propagação desta luz vinda da fonte.

Figura 25 - Fonte de Luz Branca Supercontínua, utilizada para fornecer o sinal óptico para a substância preenchida na *PCF*



Fonte: **Autoria própria.**

3.3.5 Analisador de Espectro Óptico AQ6373

O Analisador de Espectro Óptico (OSA) AQ6373 (Fig.26) opera de 350 a 1200nm e possui interface gráfica, é programável e possui saída de dados. Assim, por este operar na faixa do infravermelho de interesse do experimento, o mesmo foi utilizado (HUI; O'SULLIVAN, 2009c).

As características metrológicas do aparelho são:

- Faixa de comprimento de onda de medição: 350nm a 1200nm
- Precisão do comprimento de onda: $\pm 0,2$ nm
- Ajuste resolução comprimento de onda: 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0nm
- Resolução amostra do comprimento de onda: 0.001nm mínima
- Sensibilidade de nível: -80dBm (500/1000nm), resolução: 0.2nm ou >
-60dBm (400/500nm - 1000/1100nm), resolução: 0.2nm ou >
- Precisão de nível: ± 1.0 dB
- Condições ambientais: Faixa de temperatura de operação: +5 a +35°C
Umidade ambiente: 80% umidade relativa ou menor

Figura 26 - Imagem do Analisador de Espectro Óptico AQ6373.

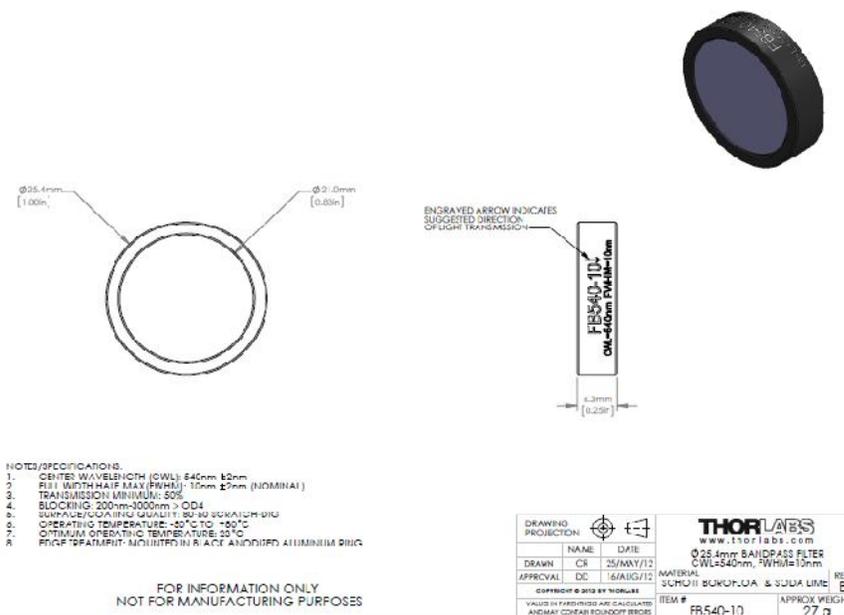


Fonte: **Autoria própria.**

3.3.6 Lente de Filtro Passa-Faixa Modelo FB540-10

Foi utilizado um filtro passa-faixa, com centro de banda em 540nm, largura de banda de 10nm e erro de $\pm 2\text{nm}$ (Fig.27), para realizar as medidas da transmitância na PCF onde se excluísse o sinal fora desta faixa. Isto foi feito com o sentido de verificar se a variação do nível do sinal seria suficientemente sensível para o aproveitamento em sensores.

Figura 27 - Lente de filtro passa-faixa modelo FB540-10, da Thorlabs. Possui centro de banda em 540nm, largura de banda de 10nm e erro de $\pm 2\text{nm}$.

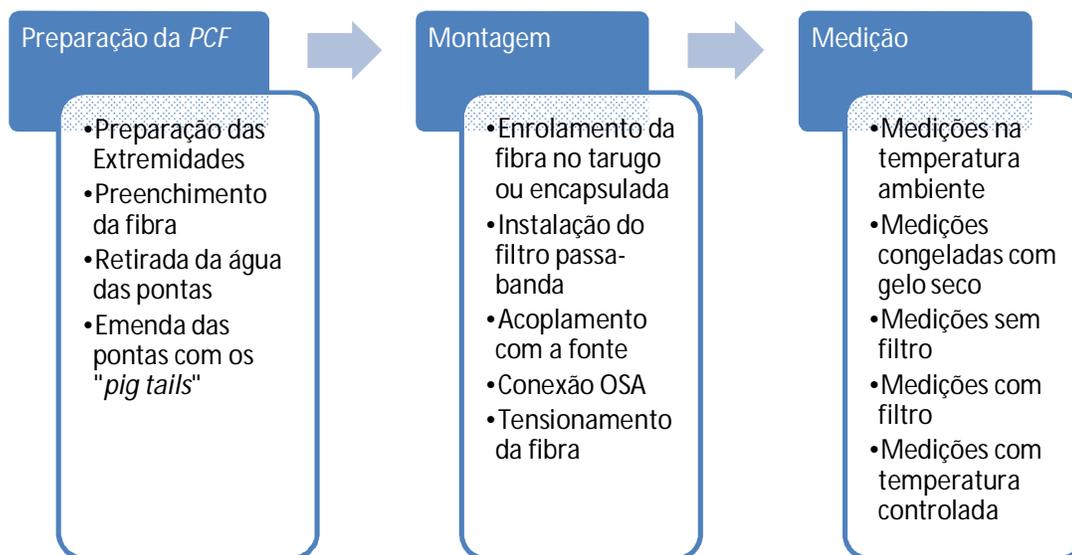


Fonte: **Adaptado de THORLABS (2003) (THORLABS INC, 2003)**

3.4 METODOLOGIA

Na Figura 28, a seguir, é mostrado um diagrama com a metodologia desenvolvida.

Figura 28 - Diagrama da Metodologia desenvolvida.



Fonte: **Autoria própria.**

A preparação da *PCF* multiestruturada foi executada da seguinte maneira:

a) Um alicate próprio foi utilizado para “descascar” fibras ópticas, retirar o acrilato de proteção nas duas extremidades da *PCF*,

b) As pontas das duas extremidades foram clivadas utilizando um clivador de precisão para fibras ópticas (Fig.29),

c) Uma das pontas clivadas da *PCF* foi colocada dentro de um Béquer preenchido com água destilada e ambos dentro do vaso de pressão desenvolvido. A outra extremidade clivada da *PCF* foi deixada para fora do vaso de pressão por entre duas juntas de EVA e o vaso foi fechado com a tampa aparafusada de forma estanque,

d) Foi injetada pressão de N₂ gasoso no vaso até 130psi por duas horas até que a água destilada fosse “empurrada” para dentro dos furos da *PCF* pela diferença de pressão criada entre as duas extremidades,

e) Posteriormente, a *PCF*, já preenchida com o fluido, foi retirada do vaso,

f) A água de ambas as extremidades da *PCF* foi vaporizada utilizando o calor de radiação de um ferro de solda, por aproximação, para evitar o colapso por dilatação gasosa das pontas no momento da fusão da emenda,

g) Uma nova limpeza e clivagem das pontas das extremidades da *PCF* foi realizada,

h) O Arc Fusion Splicer FSM-50S foi utilizado para emendar uma das pontas num conector “*pig-tail*” tipo FC-PC visando, também, o melhor alinhamento possível entre ambos (a fim de minimizar as perdas de potência de sinal devido às emendas),

i) O alinhamento, antes da fusão da emenda, foi conferido pela observação da melhor nitidez da projeção, ampliada por lente divergente, de um feixe de diodo laser vermelho, incidente através da *PCF* pela outra extremidade; num anteparo (WEI; ZHU; KRISHNASWAMY, 2016),

j) Foi realizada a fusão da emenda após a confirmação do melhor alinhamento,

k) Após a efetivação da primeira emenda, a posição da fibra foi invertida no Arc Fusion Splicer FSM-50S e a outra ponta da *PCF* foi emendada em outro “*pig-tail*” tipo FC-PC. O melhor alinhamento entre ambos foi obtido, então, através dos dispositivos do próprio Arc Fusion Splicer, para esta segunda emenda. Em ambas as fusões das emenda foi utilizada a pré-configuração própria, programada no aparelho, que fornecia as condições otimizadas de potência e número de pulsos para o arco de fusão (WEI; ZHU; KRISHNASWAMY, 2016).

Figura 29 - Foto do clivador de precisão, com disco diamantado, para fibras ópticas utilizado.



Fonte: **Autoria própria.**

As *PCF*'s foram montadas, uma preenchida com ar, primeiramente, e outra preenchida com água, posteriormente; acopladas aos “*pig-tails*”, sobre uma superfície metálica lisa, em cuja lateral, pode-se instalar uma haste giratória com regulagem de altura (Fig.30). Este conjunto foi fixado sobre uma mesa autonivelante com amortecedores pneumáticos. Na haste

giratória ficou inserido o tarugo metálico com diâmetro conhecido de 6,4mm (valor otimizado para uso na faixa de comprimento de onda – 550nm - definida, conforme C. Martelli, et.all. (MARTELLI *et al.*, 2007a) , para formação do melhor campo evanescente) onde as *PCF*'s foram enroladas, paulatinamente, em números de voltas variando de uma, duas até três voltas. Tal procedimento foi necessário a fim de descobrir-se a melhor configuração para formação do "cut-off" melhor caracterizado para as medições.

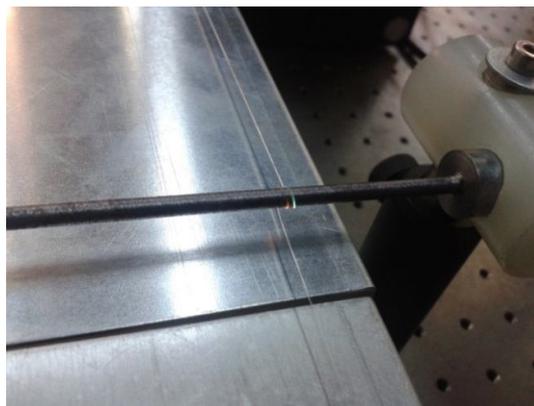
Figura 30 - Montagem da *PCF*, acoplada aos "pig-tails", para realização das medições.



Fonte: **Autoria própria.**(HANSEN, 2005)

Após isso, um dos conectores da fibra foi acoplado a fonte de luz branca supercontínua de largo espectro e o outro conector a um Analisador de Espectro Óptico ("*Optical Spectrum Analyser*" AQ6373) que opera na faixa da luz visível (350nm a 1200nm). Foram realizadas medições das curvas espectrais de transmitância, na *PCF* preenchida com ar, sem voltas no tarugo e, depois, com uma, duas e três voltas da *PCF* no tarugo (Fig.31).

Figura 30 - Observação do campo evanescente, na fibra com ar, pela luz que passa pelos buracos da *PCF*.



Fonte: **Autoria própria.**

Após finalizar estas medições, o mesmo procedimento foi executado, para a *PCF* preenchida com água e, posteriormente, congelada com o auxílio de gelo seco; sem dar qualquer volta no tarugo e, depois, com uma, duas e três voltas da *PCF* no tarugo (Fig.32).

Figura 31 - Observação do campo evanescente, na fibra com água congelada com gelo seco enrolada num tarugo de diâmetro 6,4mm, pela luz que passa pelos buracos da *PCF*. (a) Na montagem completa. (b) No detalhe da fibra enrolada.



Fonte: **Autoria própria.**

O próximo passo foi realizar as mesmas medições das curvas espectrais de transmitância, na *PCF* preenchida com água e com gelo, utilizando o encapsulamento e dando uma, duas e três voltas da *PCF* dentro deste.

Nesta mesma etapa, foram realizadas as mesmas medições, ainda outra vez, com a *PCF* preenchida com água e com gelo, utilizando o encapsulamento e dando uma, duas e três voltas na *PCF* dentro deste mas, agora, com a colocação do filtro passa-banda na entrada do sinal na fibra (Fig.33 e Fig.34).

Figura 32 - Montagem do filtro passa-faixa e utilizando lentes convergentes para aumentar a intensidade do sinal na entrada da fibra.



Fonte: **Autoria própria.**

Figura 33 - Montagem do filtro passa-faixa utilizando lentes convergentes para aumentar a intensidade do sinal na entrada da fibra.

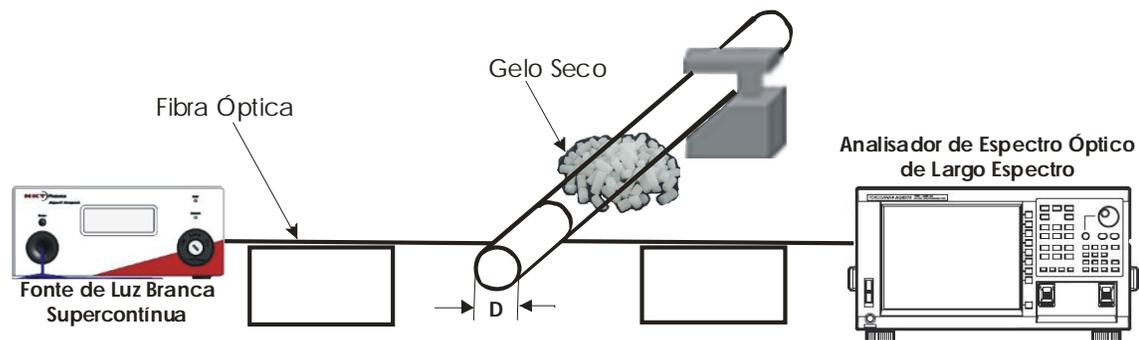


Fonte: **Autoria própria.**

3.5 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

A seguir, é mostrado um esquemático da montagem do experimento na Figura 35. Os índices de refração da água e do gelo são medidos na fibra preenchida com água, inicialmente, e sendo congelada a até, aproximadamente, -80°C .

Figura 34 - Montagem experimental com a PCF conectada, utilizando fibras "pig-tail" de modo singular, a fonte de luz branca, numa extremidade, e ao analisador de espectro óptico (OSA), na outra.



Fonte: **Autoria própria.**

3.6 TÉCNICA DE CURVATURA PARA FORMAÇÃO DO CAMPO EVANESCENTE

A literatura a respeito de perda por curvatura em fibras estruturadas tem focado na matriz regular de *PCF*, as quais são muito sensíveis às curvaturas.

A energia luminosa que transita pela fibra o faz pela parte sólida, a sílica. Quando certa curvatura é conferida à fibra, esta energia tende a evanescer, em parte, pelos furos da fibra e através de sua casca.

Neste trabalho, a curvatura controlada na fibra é utilizada para induzir o vazamento da luz e criar um "*cut-off*" na região do espectro óptico visível. As fibras estruturadas da matriz regular periódica apresentam uma maior sensibilidade à fuga, dada pela dobra, e ocorrem efeitos de difração notáveis nestes comprimentos de onda curtos.

Desta forma, utilizando a técnica da curvatura em fibras, foi possível obter a criação de um campo evanescente pelos canais da fibra, onde encontrava-se o material de interesse da medição, no caso, a água, o que forneceu resultados das medidas de transmitância deste material preenchido.

Para a fibra usada neste trabalho, comprimentos de onda mais curtos escapam para a região da casca de forma mais eficaz com a curvatura do que comprimentos de onda mais longos. De acordo com C.Martelli ... [*et al.*], "comprimentos de onda específicos escapam de forma mais eficaz em raios de curvatura específicos". No caso, com as informações deste artigo "*Bend loss in structured optical fibres*" (MARTELLI *et al.*, 2007a), foi avaliada, como melhor opção, utilizar um diâmetro de 6,4mm no tarugo metálico para conformar as curvaturas na *PCF*.

As amostras de fibra são "envoltas" ao redor de um tubo metálico e mantidas sob constante e igual tensão durante todas as medições. É importante notar que a fibra começa e termina uma volta em torno do tarugo metálico sempre no mesmo ponto tangencial tal que os ângulos de entrada e saída são mantidos constantes através das medições. O comprimento de curvatura pode ser ajustado pela variação do número de voltas em torno do tubo.

A dependência do comprimento de curvatura é analisada pelo incremento do número de voltas da *PCF* em torno do tarugo, de uma a cinco voltas. Empiricamente, perdas insignificantes são observadas para as primeiras duas voltas; uma queda de sinal de 15% é medida para três voltas e uma perda consideravelmente alta é observada para quatro e cinco voltas. Desta forma, ficou estipulada uma condição otimizada de perda de potência, para a relação transmissão *versus* intensidade do campo evanescente, de 3 voltas no experimento.

Em certos raios de curvatura, a luz é acoplada à região periódica dos microtubulos e a condição ressonante, atendida para certos comprimentos de onda, dá origem a uma borda de banda altamente sensível em comprimentos de onda curtos. Quaisquer mudanças no índice de refração da sílica ou no material dos furos alteram esta condição ressonante (MARTELLI *et al.*, 2006) (LIU, 2016). Como consequência da curvatura, mais luz é acoplada à região de revestimento com a estrutura periódica e a intensificação do campo evanescente nos orifícios de fibra, onde o material de interesse está presente, é obtida. Isso aumenta ainda mais a sensibilidade do método.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes experimentais para a caracterização do método de Medição do Índice de Refração através da Difração utilizando-se Fibra de Cristal Fotônico.

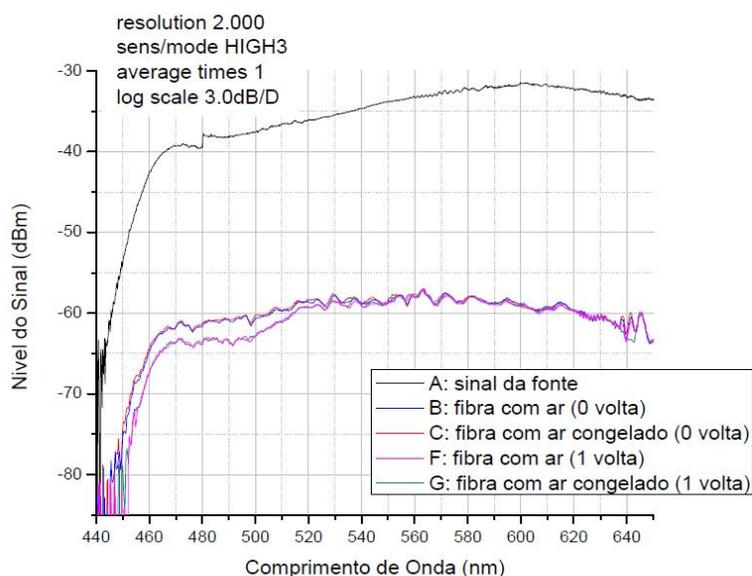
4.1 FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO PREENCHIDA COM AR

Os resultados da espectrometria gráfica da *PCF* preenchida com ar, tomada como referência, nas temperaturas ambiente e congelada com gelo seco, estão mostrados na Figura 36.

Estes resultados mostram que a variação de espectro, em função do congelamento, para a *PCF* preenchida com ar é insignificante em relação à variação no espectro da água para o gelo. Em sendo assim, este padrão de referência para o experimento foi considerado válido, já que interfere muito pouco na medição de interesse realizada.

Foi utilizada, primeiramente, a *PCF* preenchida com ar e o tarugo de 6,4mm de diâmetro.

Figura 35 - Caracterização espectroscópica, na faixa de luz visível, da transmitância do ar, na temperatura ambiente e congelado, preenchido na *PCF*, estando esta alinhada e com 1 volta no tarugo de diâmetro 6,4mm.



Fonte: **Autoria própria.**

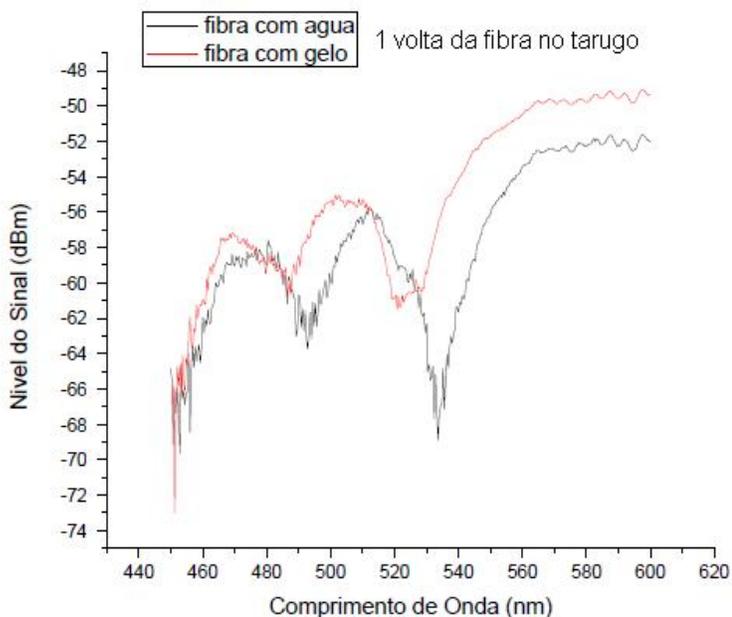
Para os resultados com a *PCF* preenchida com ar, o sinal mostrou quase nenhuma variação de intensidade no sinal ($< 0,2\text{dBm}$) em função do resfriamento da fibra, para o

mesmo número de voltas ao redor do tarugo metálico. Isto devido a não haver alteração na densidade e propriedades ópticas entre o ar a temperatura ambiente e congelado, sendo que este não solidifica. A pequena variação no sinal é devida à algum congelamento decorrente da condensação da pouca umidade relativa presente no próprio ar. A *PCF* foi testada com nenhuma volta ao redor do tarugo e com uma volta, mostrando, aí sim, devido à diferença na conformação, variação no nível de sinal.

4.2 FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO PREENCHIDA COM ÁGUA DESTILADA E GELO

Os resultados da espectrometria gráfica da *PCF* preenchida com água nas temperaturas ambiente e congelada com gelo seco, estão mostrados na Figura 37.

Figura 36 - Comparativo da caracterização espectroscópica, na faixa de luz visível, da transmitância da água e do gelo, preenchido na *PCF*, com 1 volta no tarugo de diâmetro 6,4mm.



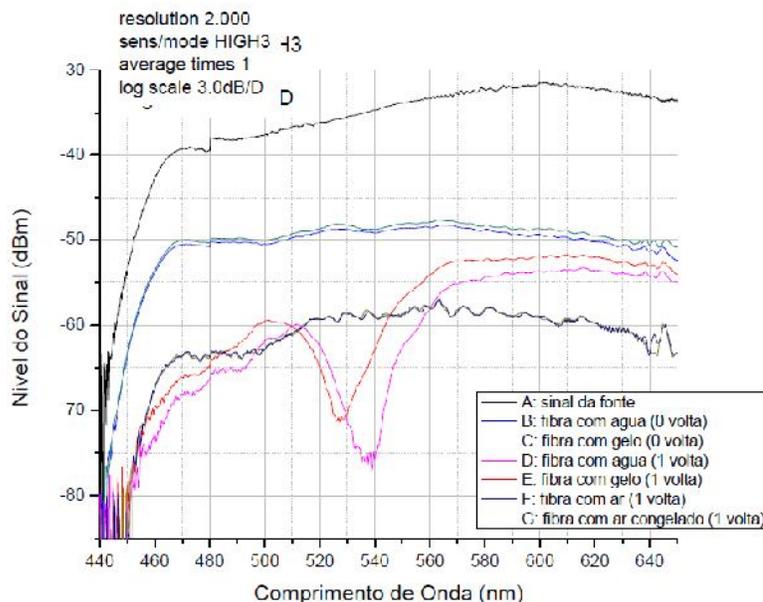
Fonte: **Autoria própria.**

Nos resultados da *PCF* preenchida com água destilada, o sinal mostrou razoável variação de intensidade (8dBm, aproximadamente) e ficou bem caracterizado ("*cut-off's*" bem definidos), durante o congelamento da fibra, na faixa de comprimento de onda entre 510nm e 550nm. Logo, esta faixa de medição mostrou-se adequada para o uso em sensores devido a exibir a variação do sinal de forma bastante clara e perceptível durante o congelamento.

4.3 COMPARATIVO ENTRE AS CARACTERIZAÇÕES ESPECTROSCÓPICAS DA FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO PREENCHIDA COM AR, ÁGUA DESTILADA E GELO

Para os resultados da *PCF*, envolta num tarugo metálico de 6,4mm de diâmetro e preenchida com ar, água destilada e gelo, observa-se que, comparativamente, a variação da intensidade do sinal no congelamento da substância, é muito pequena no ar ($< 0,2\text{dBm}$ que é a maior resolução do OSA) e razoavelmente acentuada da água para o gelo (5dBm, aproximadamente); sendo que, com 1 volta da fibra no tarugo, a caracterização do sinal (definição dos vales dos "cut-off" e sua variação) é bem melhor do que com a fibra conformada linearmente, conforme a Figura 38.

Figura 37 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância do ar, da água e do gelo, preenchidos na *PCF*, na temperatura ambiente e congelada. A fibra está conformada linearmente e com 1 volta no tarugo de diâmetro 6,4mm.



Fonte: **Autoria própria.**

Para a utilização da fibra *PCF* com 1 volta no tarugo, a região bem no início da curva, abaixo de 460nm, onde se percebe bastante ruído (em torno de 8dBm) e um nível de sinal muito baixo (abaixo de -75dBm) (Fig.38 e Fig.39), fica descartado o uso para as medições pela forte descaracterização dos sinais. Também porque a fonte quase não emite luz nesta região das frequências mais baixas do gráfico (abaixo de 450nm), sendo que estas acabam por

difratar de forma não-coerente sobre si mesmas gerando este tipo de ruído (sinal somado de forma não-coerente sobre si mesmo).

Considerando o primeiro trecho utilizável da curva ($460\text{nm} < \lambda < 510\text{nm}$), conforme o comprimento de onda aumenta os fenômenos difrativos que ocorrem entre as menores frequências do sinal da fonte amplificam este (Fig.38 e Fig.39). Ocorre uma reflexão das ondas de luz na interface da sílica com os furos, fazendo retorná-las por sobre o sinal original e causando uma “ressonância” óptica ao se somarem.

Na temperatura ambiente, na faixa de comprimento de onda entre 460nm e 510nm, a variação no nível do sinal conforme o número de voltas, da *PCF* com ar, ao redor do tarugo é aumentado; faz surgir uma região de "cut-off" onde se percebe, mais visivelmente, uma queda no sinal. No entanto, o deslocamento deste "cut-off" no comprimento de onda é irrelevante com o aumento do número de voltas (Fig.39).

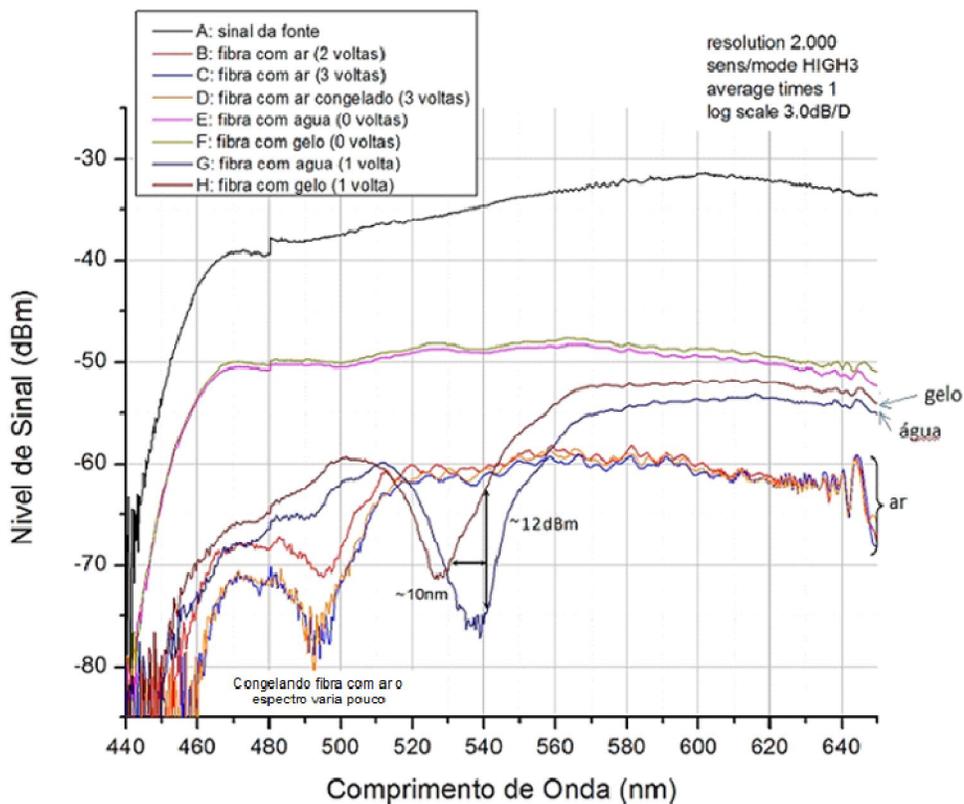
Quando, no entanto, mantendo o mesmo número de voltas ao redor do tarugo, esta fibra preenchida com ar é congelada, ocorre um deslocamento insignificante deste “cut-off” ($< 0,2\text{dBm}$) devido a alguma umidade relativa presente no ar e que condensa na superfície interna dos furos da fibra. Esta variação do "cut-off" está relacionada à variação do índice de refração nestas interfaces dos furos, o que interfere na difração das ondas (Fig.38 e Fig.39).

Devido às voltas que foram dadas, na fibra preenchida com água, ao redor do tarugo (no caso, uma volta), algumas frequências do sinal original escapam da fibra nesta faixa de comprimento de onda ($510\text{nm} < \lambda < 565\text{nm}$) e um prisma de cores amarelo-esverdeadas é formado na curvatura (Fig.40). O nível de sinal cai significativamente nesta região (18dBm, aproximadamente), caracterizando o "cut-off" de forma bem definida no gráfico (Fig.38 e Fig.39).

Na fibra preenchida com água é onde observa-se, de forma mais acentuada, a ocorrência da mudança no índice de refração na interface dos furos com a sílica (Fig.38 e Fig.39). Quando a *PCF* preenchida com água é congelada, o gelo formado muda o índice de refração nestas interfaces e ocorre uma variação na posição deste “cut-off” no OSA (10nm, no comprimento de onda, e 12dBm, na intensidade do sinal, aproximadamente) (Fig.39).

O gelo no interior dos furos da fibra causa um maior número de difrações da luz dentro desses furos, na estrutura cristalina do gelo, retendo uma parcela um pouco maior do sinal nestes pelo acoplamento de frequências, e, ainda, ocorre aumento da diferença do índice de refração na interface do gelo para a sílica; contribuindo, ambos, para a diminuição da perda de sinal. Isto transparece na elevação da curva do "cut-off" na transformação da água para gelo (12dBm, aproximadamente) (Fig.39).

Figura 38 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância da água, na temperatura ambiente e congelada, preenchida na PCF. A fibra está conformada linearmente e com 1 volta no tarugo de diâmetro 6,4mm. A figura mostra a diferença no nível de sinal (dBm) quando da mudança de fase da água para gelo.



Fonte: **Autoria própria.**

Figura 40 - Escape do campo evanescente pela casca da fibra, na faixa de frequências amarelo-esverdeadas, e que fica caracterizada nos gráficos.



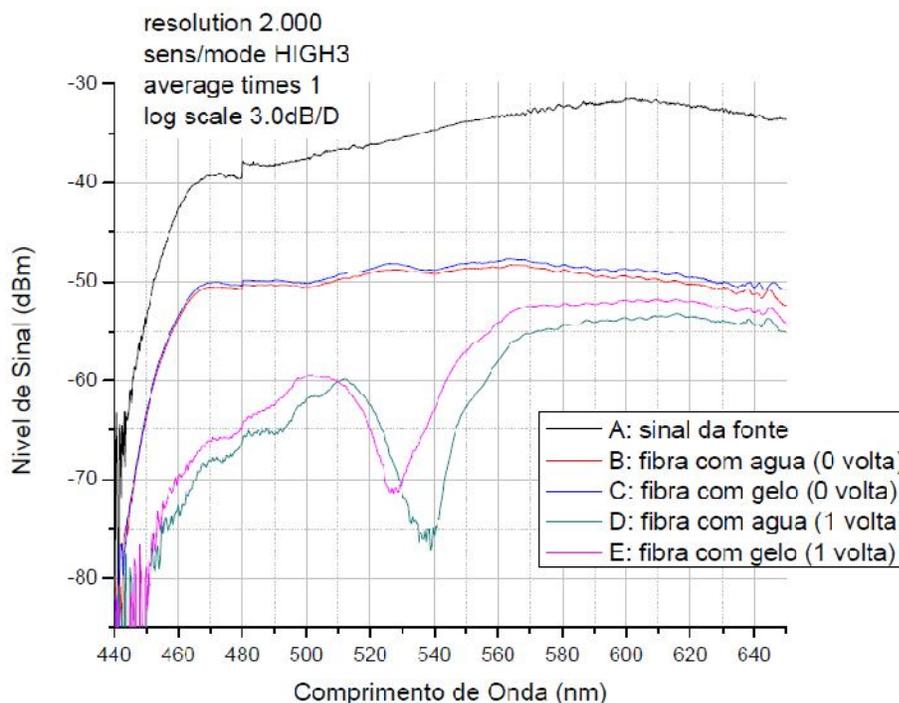
Fonte: **Autoria própria.**

Na rampa de subida do gráfico, aproximadamente de 460nm a 520nm (para a fibra preenchida com ar) e de 460nm a 570nm (para a fibra preenchida com água); ocorre um aumento gradual do fenômeno da difração da luz no interior da fibra, que gera uma

ressonância óptica entre as frequências nesta faixa as quais, sobrepondo-se, intensificam as frequências mais altas (menores comprimentos de onda) do sinal (Fig.39 e Fig.41).

Nos comprimentos de onda acima destas faixas mencionadas, a direita dos “cut-off” e onde começa a prevalecer um nível mais estável de sinal, o fenômeno óptico que ocorre mais intensamente é o da reflexão das ondas da luz que segue pelo interior da fibra, ou seja, ocorre menos "fuga" da luz pelas interfaces dos furos da fibra com a sílica. Desta forma, as ondas seguem com intensidade próxima ao nível do sinal injetado, sem criar oportunidade de superposição de ondas difratadas no interior da fibra. Isso fica caracterizado, no gráfico, pela forma semelhante, nesta faixa, entre o sinal medido e o sinal original injetado na fibra; aparecendo como queda no nível do sinal apenas a perda que o sinal sofre devido ao acoplamento da fonte com a fibra e às voltas que são dadas no tarugo (Fig.39 e Fig.41).

Figura 39 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância da água, na temperatura ambiente e congelada, preenchida na PCF. A fibra está conformada linearmente e com 1 volta no tarugo de diâmetro 6,4mm.



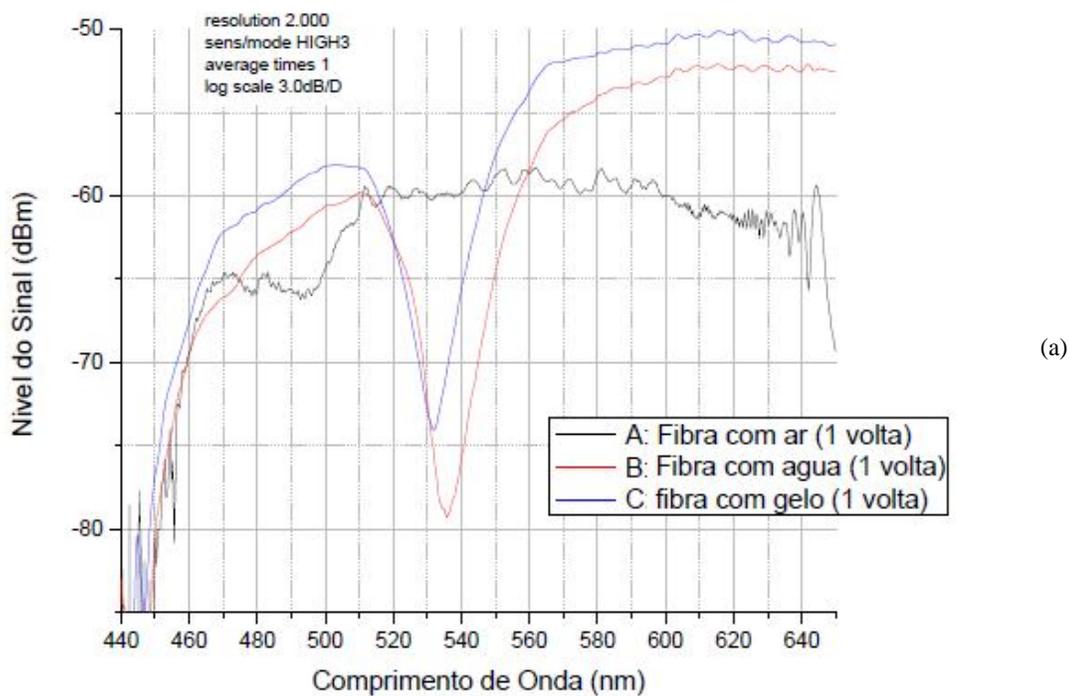
Fonte: **Autoria própria.**

Observa-se, nos gráficos da Figura 42, que, quanto maior o número de voltas em torno do tarugo, mais o nível de intensidade do sinal vai formando um vale (“cut-off”) bem caracterizado na região próxima a 540nm.

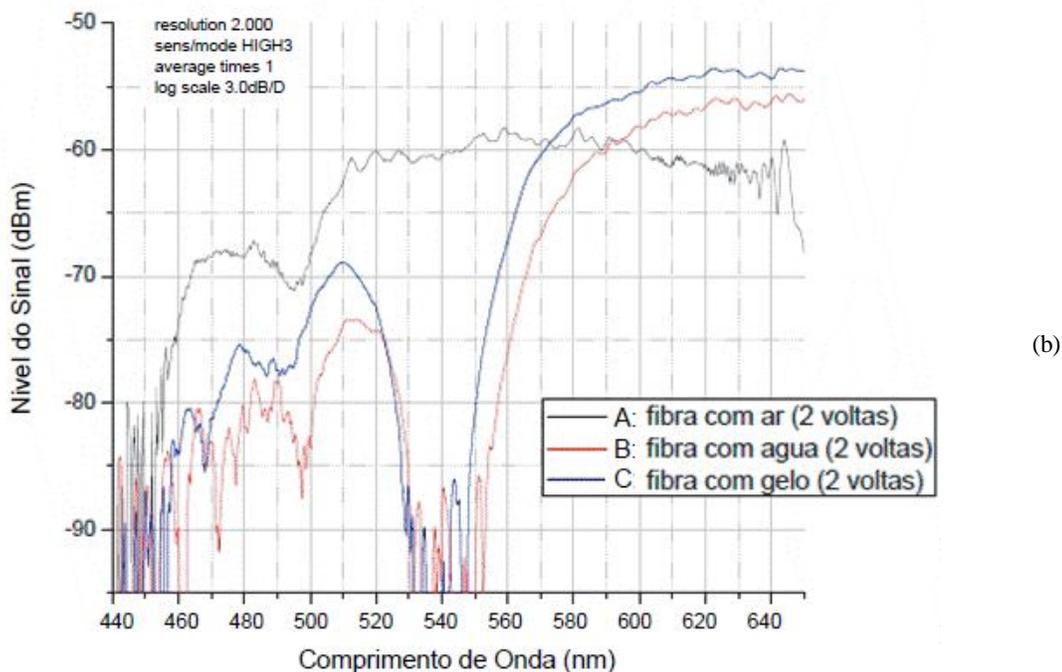
Nestes gráficos abaixo, pode-se perceber que o nível de intensidade do sinal no “cut-

off", na PCF preenchida com água e gelo, diminui tanto, em função do aumento do número de voltas da fibra no tarugo, que este chega a se descaracterizar confundindo-se ao ruído.

Figura 40 - Variação do nível de intensidade do sinal em função do número de voltas da fibra no tarugo, (a) 1 volta, (b) 2 voltas; e a visualização do "cut-off", mostrando uma progressiva degeneração do sinal.



(a)



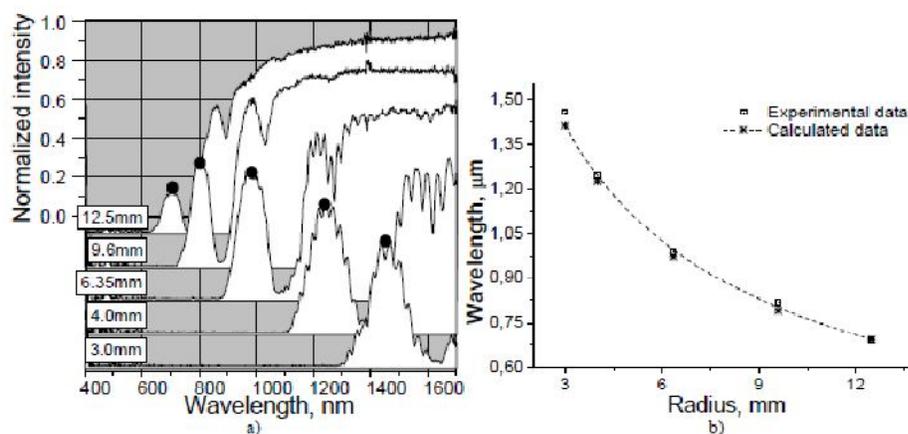
(b)

Cabe aqui, algumas observações quanto à escolha do diâmetro de 6,4mm do tarugo para enrolar a fibra e o número de voltas assumido.

Do artigo intitulado “*Bend Loss in Structured Optical Fibers*” (MARTELLI *et al.*, 2007a), através de procedimentos experimentais, são definidos pontos de correspondência entre o comprimento de onda considerado e o diâmetro ideal para bobinamento da *PCF* (Fig.43), a fim de intensificar o campo evanescente que sai do núcleo sólido para os furos, onde está a substância de interesse, e melhorar a caracterização aumentando o nível do sinal.

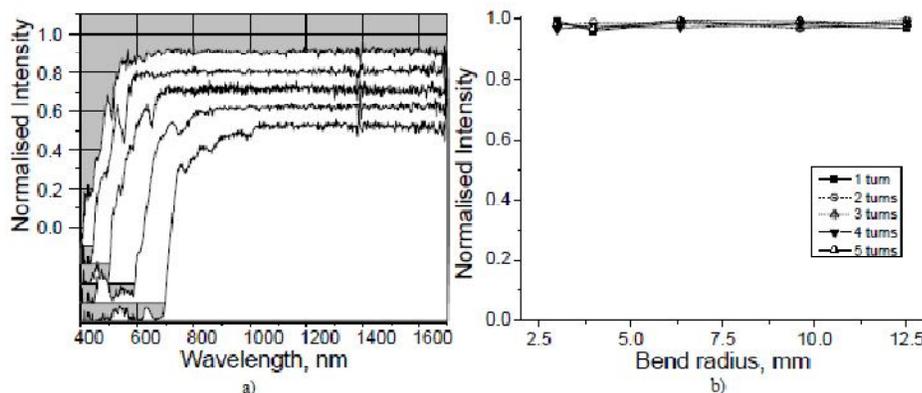
Foi caracterizado neste mesmo artigo, também, o número de voltas ideal da fibra, em determinado comprimento de onda considerado, com vistas à melhoria do sinal em função da intensificação do campo evanescente (Fig.44).

Figura 41 - a) Medições de perda por curvatura na fibra *PCF* para cinco diferentes raios e b) alteração de Bragg da banda de ressonância em função do raio de curvatura.



Fonte: Adaptado de C.Martelli and J Canning (2007) (MARTELLI *et al.*, 2007a)

Figura 42 - a) Perda por curvatura em fibra Fractal para cinco diferentes raios e b) perda por curvatura em 1550nm para vários comprimentos de curvatura.



Fonte: Adaptado de C.Martelli and J Canning (2007) (MARTELLI *et al.*, 2007a)

Foi observado no experimento, da mesma forma, que a variação na intensidade do sinal na região de "*cut-off*" da água, próximo a 540nm, se dá pelo aumento no nível do sinal quando da passagem da água para o gelo. Algumas causas que concorrem para esta situação são o fato do gelo ser menos denso que a água e, também, devido à rede cristalina hexagonal que se forma no gelo, em contraste com a estrutura amorfa da água, ser um meio mais coerente para a passagem da luz. Ou seja, a água retém menos potência óptica do sinal acoplada na sua estrutura, durante a transmissão da luz, que o gelo.

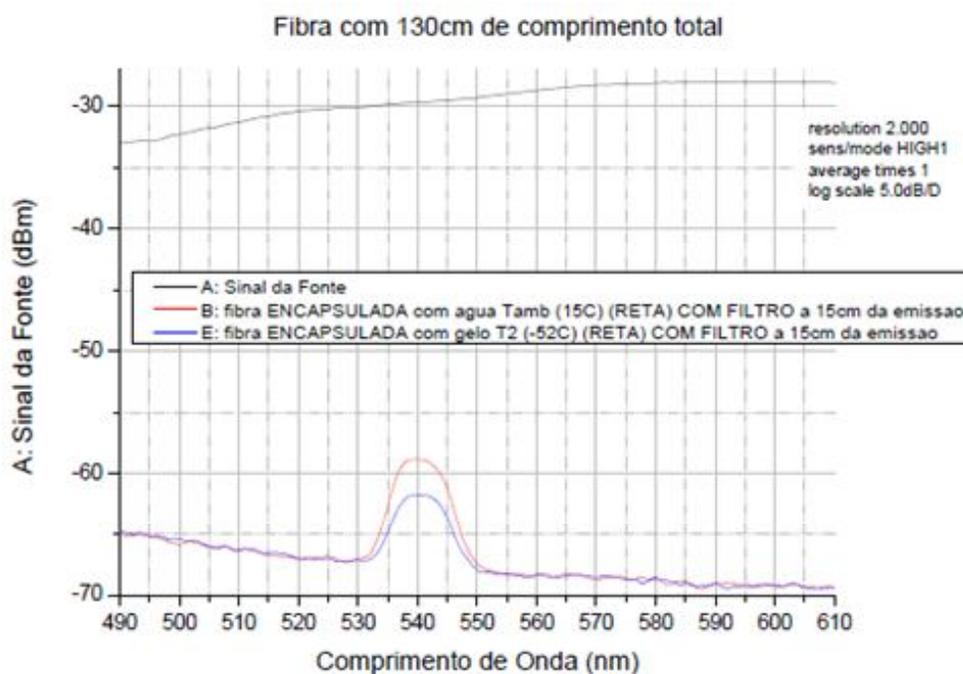
O ponto de fusão/solidificação de um líquido (solvente), por sofrer abaixamento quando outro composto é adicionado (significando que uma solução tem um ponto de solidificação mais baixo que um solvente puro), também é outra situação a considerar devido a água destilada utilizada dificilmente ser perfeitamente pura. Desta forma, o congelamento da água não se dá na temperatura de 0°C mas, sim, um pouco abaixo; sendo que a densidade máxima da substância se dá na temperatura de 4°C, diminuindo, a partir daí, durante o congelamento.

Dependendo da substância preenchida na fibra, diferentes sensibilidades dos pontos de "*cut-off*" são obtidas em relação ao número de voltas dadas na fibra sobre o tarugo. No caso, o ar possui uma sensibilidade ideal para formação do "*cut-off*" com a fibra enrolada em 03 (três) voltas sobre o tarugo e a água/gelo em apenas 01 (uma) volta. Além disso, dependendo, igualmente, da substância preenchida na fibra, ocorre variação nos pontos de mínimo destes "*cut-off*" ao longo do eixo do comprimento de onda. No caso, o ar apresentou um ponto mínimo para "*cut-off*" próximo a um comprimento de onda de 493nm, a água apresentou um ponto mínimo para "*cut-off*" próximo a um comprimento de onda de 538nm e o gelo apresentou um ponto mínimo para "*cut-off*" próximo a um comprimento de onda de 528nm.

4.4 CARACTERIZAÇÕES ESPECTROSCÓPICAS DA FIBRA DE CRISTAL FOTÔNICO PREENCHIDA, COM FILTRO PASSA-BANDA E ENCAPSULADA

O uso de um filtro passa-banda, na entrada do sinal na fibra, com centro em 540nm e variância de 10nm, com erro de ± 2 nm, forneceu a seguinte caracterização espectroscópica (Fig.45).

Figura 43 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância da água, na temperatura ambiente e congelada, preenchida na PCF. A fibra está conformada linearmente e utiliza o filtro passa-banda.



Fonte: **Autoria própria.**

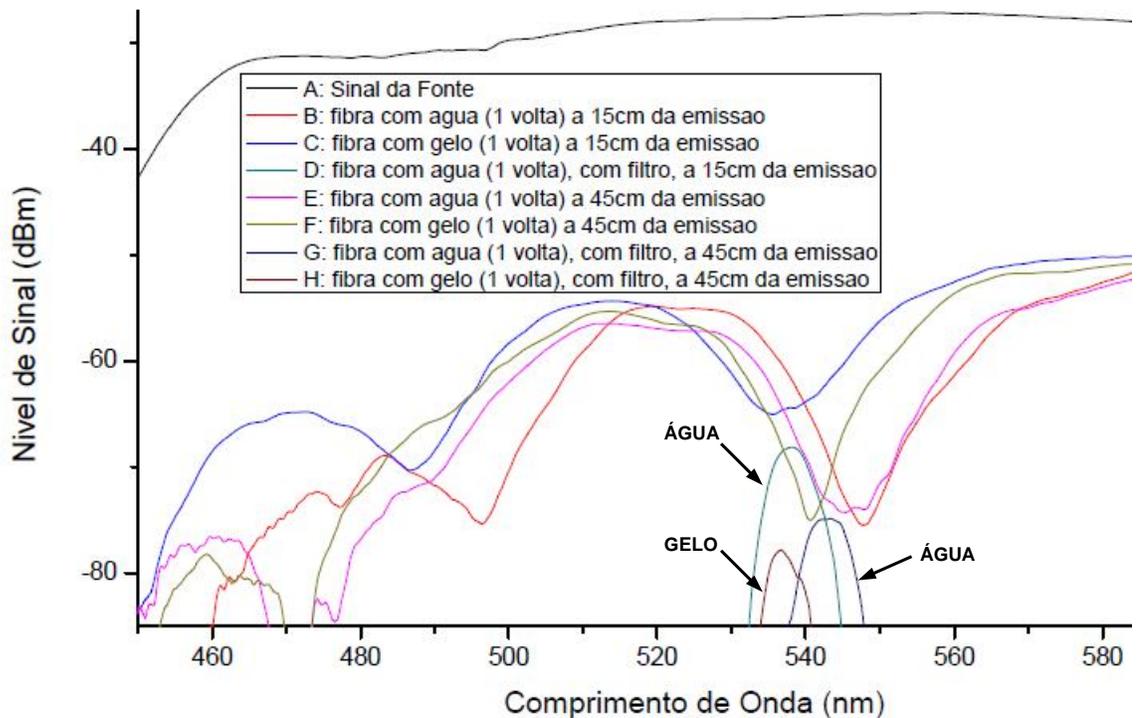
No gráfico da figura 45, é visível que a mudança de fase da água para o gelo gera um ganho perceptível na intensidade do sinal de transmitância (cerca de 5dBm) e que o uso do filtro passa-banda, que opera na faixa de 540nm (com variância de 10nm e erro de ± 2 nm), torna o sinal captado mais pontual e apto a ser utilizado como fonte de disparo para algum mecanismo de ação.

O gráfico da figura 46 mostra os sinais de transmitância da fibra encapsulada com 1 volta em duas situações: sem o uso do filtro passa-banda e com sua utilização. O gráfico ainda mostra os sinais com diferentes distâncias do enrolamento da fibra à fonte emissora de luz.

Nesta situação descrita, utilizando o filtro passa-banda operando com centro em 540nm e largura de banda de 10nm, a variação no nível no sinal durante a mudança de fase se mostrou bem perceptível.

Foram tomadas medidas com diferentes distâncias entre o ponto de enrolamento da fibra e a entrada do sinal da fonte na fibra. As diferenças das distâncias dos enrolamentos à fonte não causaram erros significativos nos níveis de intensidade do sinal ($\Delta\text{dBm} < 0,2\text{dBm}$ = resolução máxima do OSA) e no posicionamento do vale dos "cut-off" ($\Delta\lambda < 5\text{nm}$ = valor de meia-banda do filtro). Estas variações nos níveis de intensidade de sinal e posicionamento do vale do "cut-off" entre as medições foram decorrentes das pequenas diferenças nas remontagens do experimento para cada situação.

Figura 44 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância da água, na temperatura ambiente e congelada, preenchida na PCF. A fibra está conformada com 1 volta dentro do encapsulamento, num diâmetro de 6,4mm, e nas situações com e sem o uso do filtro passa-banda.

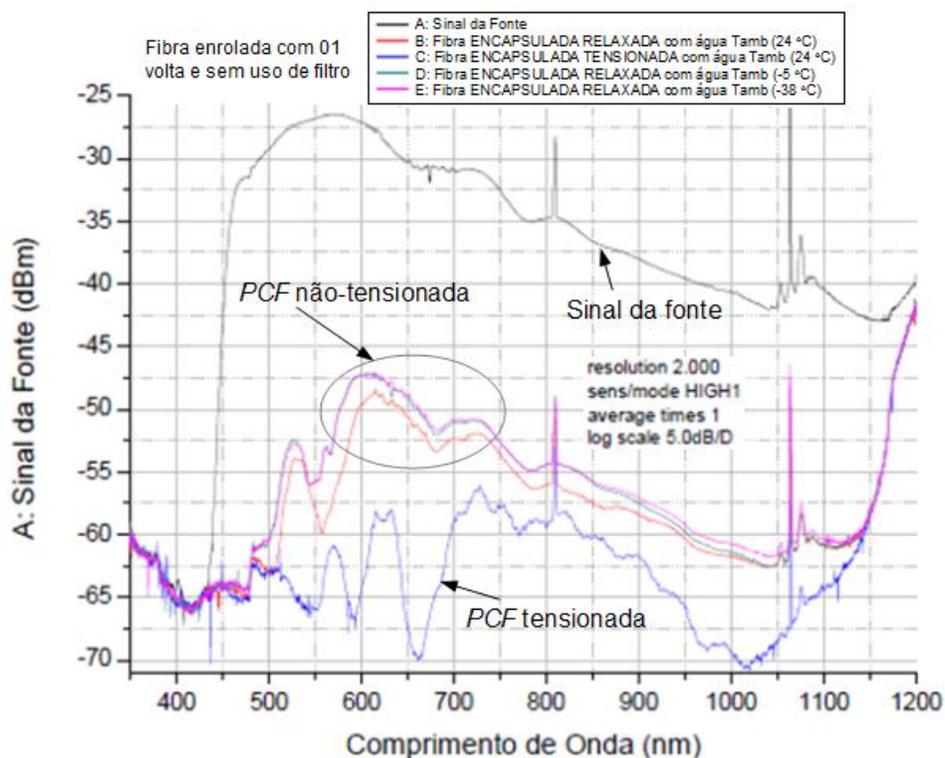


Fonte: **Autoria própria.**

O gráfico da figura 47 mostra os sinais de transmitância da fibra encapsulada com 1 volta em duas situações: com a fibra tensionada e com a fibra não-tensionada. O gráfico ainda mostra outras regiões de "cut-off" que surgem em comprimentos de onda maiores (acima de 540nm).

Observa-se que o sinal fica melhor definido na situação da fibra tensionada devido, principalmente, à melhor conformação do enrolamento ao redor do tarugo e à saída tangencial alinhada com a entrada no enrolamento que ocorrem na fibra tensionada, conforme condição descrita no artigo "*Bend loss in structured optical fibres*" (MARTELLI *et al.*, 2007a); que favorecem uma maior perda de sinal na curvatura.

Figura 45 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância da água, na temperatura ambiente e congelada, preenchida na PCF. A fibra está conformada com 1 volta dentro do encapsulamento, num diâmetro de 6,4mm, sem o uso do filtro passa-banda e nas situações da fibra tensionada e não tensionada.



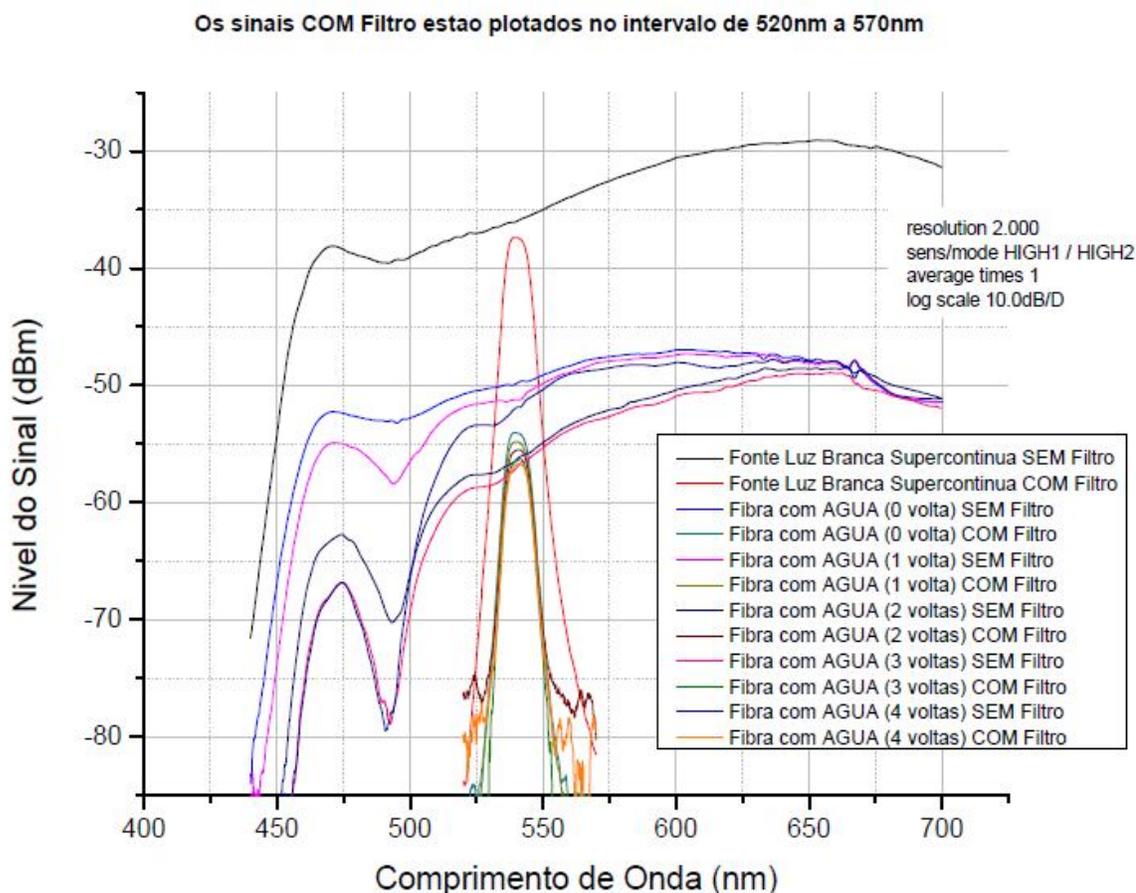
Fonte: **Autoria própria.**

Nota-se, também, que o abaixamento contínuo da temperatura, de -5°C até -38°C , após o congelamento (solidificação) ocorrer, exerce influência desprezível no nível do sinal ($< 0,2\text{dBm}$). Ou seja, após o congelamento, a influência da temperatura na transmitância da substância é irrisória para o experimento.

O gráfico da figura 48 mostra os sinais de transmitância da fibra preenchida com água e encapsulada, com e sem filtro, nas seguintes situações: fibra enrolada ao redor do tarugo com 1, 2, 3 e 4 voltas.

Observa-se que, conforme o número de voltas da fibra ao redor do tarugo aumenta, o nível do sinal diminui. Isto ocorre pelo aumento da fuga da luz pela casca da fibra, conforme o número de voltas é aumentado, gerando maior perda de sinal. Apesar disto, a alteração no nível do sinal quando da mudança de fase da substância continua perceptível, o que valida a utilização do filtro no desenvolvimento do sensor.

Figura 46 - Caracterização espectroscópica do sinal da transmitância da água, na temperatura ambiente e congelada, preenchida na *PCF*. A fibra está conformada com 1, 2, 3 e 4 voltas dentro do encapsulamento, num diâmetro de 6,4mm, e nas situações com e sem o uso do filtro passa-banda.



Fonte: **Autoria própria.**

4.5 DISCUSSÃO - ANÁLISE DA FENOMENOLOGIA DO PROCESSO

A luz detém-se confinada na parte sólida da fibra (sílica) por dois processos de guiamento: reflexão interna total, onde a energia é refletida na interface com os furos no núcleo, e difração, na forma de reflexões nas interfaces dos microtubulos e que sofrem interferências múltiplas entre si, conforme mostrado, anteriormente, nas Figuras 09 e 10 do subitem 2.7. DIFRAÇÃO, na seção dos FUNDAMENTOS TEÓRICOS, nas páginas 38 e 39 deste trabalho.

A variação do sinal em baixos comprimentos de onda ($460\text{nm} < \lambda < 570\text{nm}$), dentro da região da luz visível, é o chamado “*cut-off* difrativo”, onde ocorre uma variação do sinal proporcional à mudança de fase. Nesta, além da variação no nível de intensidade do sinal no “*cut-off*”, ocorre uma variação deste no eixo do comprimento de onda, também, devidos a uma diminuição da perda do sinal na curvatura da fibra pelo congelamento da água. Esta diminuição da perda do sinal na curvatura, devido ao congelamento, está associada ao aumento do fenômeno difrativo, onde ocorre maior dissociação do sinal com posterior somatório das componentes de frequências (superposição entre as ondas difratadas); o que gera, igualmente, um aumento da ressonância óptica no sinal.

Como a luz interage com o material dos furos através do campo evanescente, que se forma a partir das reflexões nestas interfaces, e este campo propaga-se com decaimento exponencial para o interior dos furos, então, dependendo da intensidade do campo na interface, este vai se propagar, ainda, por algumas dezenas de nanômetros no interior dos furos, podendo haver acoplamento de energia ou não para o determinado material que estiver dentro dos furos.

Nesse processo, o efeito difrativo, também, está sendo aumentado em relação ao da reflexão interna total, porque mais luz está sendo acoplada no interior da estrutura periódica dos microtubulos na fibra. Logo, aumentando a interação de luz com os furos, estando estes posicionados periodicamente ao redor do núcleo, o processo difrativo também é aumentado.

Assim, quanto mais luz for retirada do núcleo sólido para a região da interface com os furos, promovendo maior interação com a microestrutura, mais o guiamento da luz na fibra ficará sensível ao material dos furos.

E, conseqüentemente, a sensibilidade ao material preenchido nos furos fica aumentada porque ocorre mais campo evanescente no interior dos microtubulos, além de um processo difrativo mais intenso, ao ser transferida uma parcela maior da luz no núcleo para esta região.

Isto fica evidente na variação do espectro no "cut-off" na região dos menores comprimentos de onda da faixa do visível ($460\text{nm} < \lambda < 570\text{nm}$).

Após a região do "cut-off", a faixa de frequências sofre menos efeitos refrativos e difrativos no interior da fibra, diminuindo as perdas do sinal por fuga pela casca e fazendo o sinal se aproximar, cada vez mais, do original emitido pela fonte.

Os índices de refração das substâncias preenchidas na fibra (ar, água e gelo) seguem esta ordem:

$$\eta_{\text{Ar}} = 1.0003 < \eta_{\text{Gelo}} = 1.3100 < \eta_{\text{Água}} = 1.3321 < \eta_{\text{Sílica}} = 1.4450 \text{ (puros, aprox. } 20^{\circ}\text{C, } \lambda = 500\text{nm)}$$

Observa-se que a faixa de frequências, do sinal original, que escapa pela curvatura imposta à fibra varia desta mesma forma, deslocando a região do "cut-off" no gráfico da seguinte forma:

$$\lambda \text{ ("cut-off" ar)} < \lambda \text{ ("cut-off" gelo)} < \lambda \text{ ("cut-off" água)}$$

O "cut-off" do álcool, por exemplo, caso a fibra fosse preenchida com este material, apareceria à direita do "cut-off" da água, pois seu índice de refração é superior ao da água.

Quando as características do material no interior dos furos são alteradas, o processo difrativo também é alterado porque mudando o índice de refração, conseqüentemente, muda também a forma como a luz reflete e isto muda o grau das múltiplas interferências entre as frequências na difração.

Nos comprimentos de onda menores, o ângulo de incidência sobre a interface dos furos é menor e a luz tem uma tendência maior a escapar da região dos microtubulos. Em termos dimensionais, os comprimentos de onda maiores apresentam uma menor tendência a escapar para a microestrutura pois estes não conseguem passar facilmente pelos espaços estreitos entre os furos. A distância entre os furos é da ordem de $1\mu\text{m}$ a $1,2\mu\text{m}$, então fica muito mais fácil um comprimento de onda menor que esta distância passar por entre os furos do que um comprimento de onda maior. Isso explica o fato do gráfico apresentar maior perda de intensidade de sinal nos menores comprimentos de onda.

Contrariamente ao que acontece na fibra microestruturada periódica, numa fibra sem furos, monomodo padrão, onde toda a fibra é sólida e o processo de guiamento é governado pela reflexão interna total, unicamente, são os comprimentos de onda maiores que começam a apresentar fuga com a imposição de curvatura à fibra.

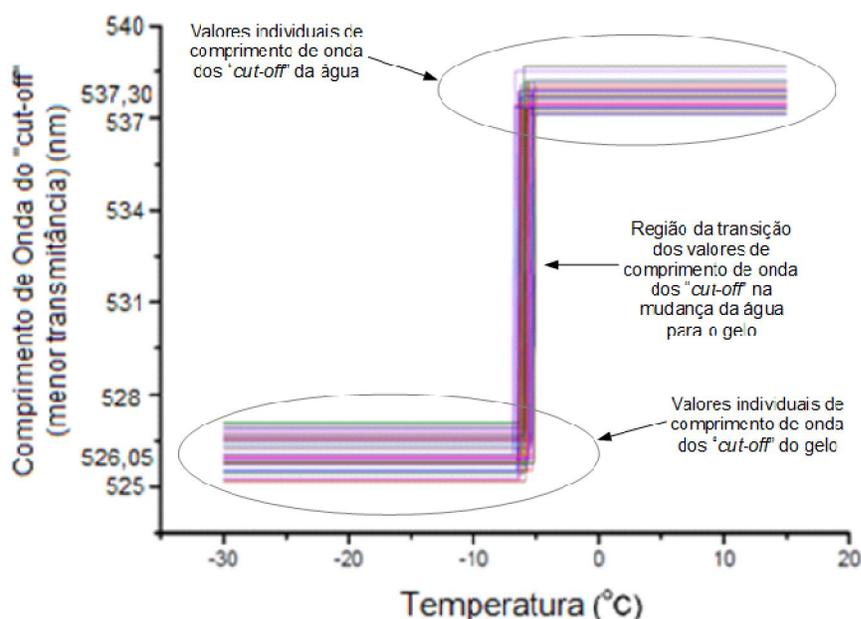
Não foi observado nenhum efeito significativo relacionado às características de birrefringência nas medições.

A variação do "cut-off", que surge em função do abaixamento da temperatura da fibra com água até o seu congelamento, fica evidenciada nos valores das medições realizadas (08 medições) da Tabela 1, apresentando esta, também, uma faixa de incerteza nas temperaturas em que ocorre o fenômeno da mudança de fase da substância (Figuras 49 e 50).

É mostrado que, durante o congelamento, a variação do sinal ocorre, não só, a nível da intensidade (ganho de potência óptica na transmissão pela menor fuga de sinal na curvatura) mas, também, no comprimento de onda associado à mínima transmitância (vale) do "cut-off".

A variação no comprimento de onda no "cut-off" da substância, quando da mudança de fase, apresenta uma incerteza em torno do valor médio desta variação de comprimento de onda. Estas incertezas nas alterações de faixa de comprimento de onda e intensidade do sinal no "cut-off" ocorrem devido às incertezas associadas ao equipamento de medição (incertezas do OSA, na página 53) e, também, devido à utilização de um único sensor de temperatura o que, considerando a dimensão do sistema do experimento e a este não poder estar localizado exatamente no ponto onde ocorre o fenômeno de interesse na fibra, faz com que as medições sofram interferências em seus resultados. Algum grau de incerteza nos resultados das medições surge, também, em função das diferentes microestruturas cristalinas de congelamento da água formadas após a solidificação.

Figura 47 - Gráfico dos valores dos comprimentos de onda dos "cut-off", em função da temperatura da água preenchida na PCF durante a mudança de fase, tendo a fibra conformada com 1 volta de diâmetro 6,4mm dentro da matriz de encapsulamento e utilizando o filtro passa-faixa de centro em 540nm.



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 1, existe uma flutuação no valor da diferença de comprimento de onda do “*cut-off*” (mínimo de transmitância), que ocorre durante a mudança de estado, para as medições realizadas no congelamento da água preenchida na fibra. Ou seja, sendo que o valor de comprimento de onda do “*cut-off*” (mínimo de transmitância), na fibra preenchida com água, varia quando da mudança de fase desta substância no congelamento; é possível detectar que existe uma flutuação no valor desta variação do “*cut-off*”, ao redor de um valor médio das várias medições, independentemente da variação de temperatura que a substância sofreu.

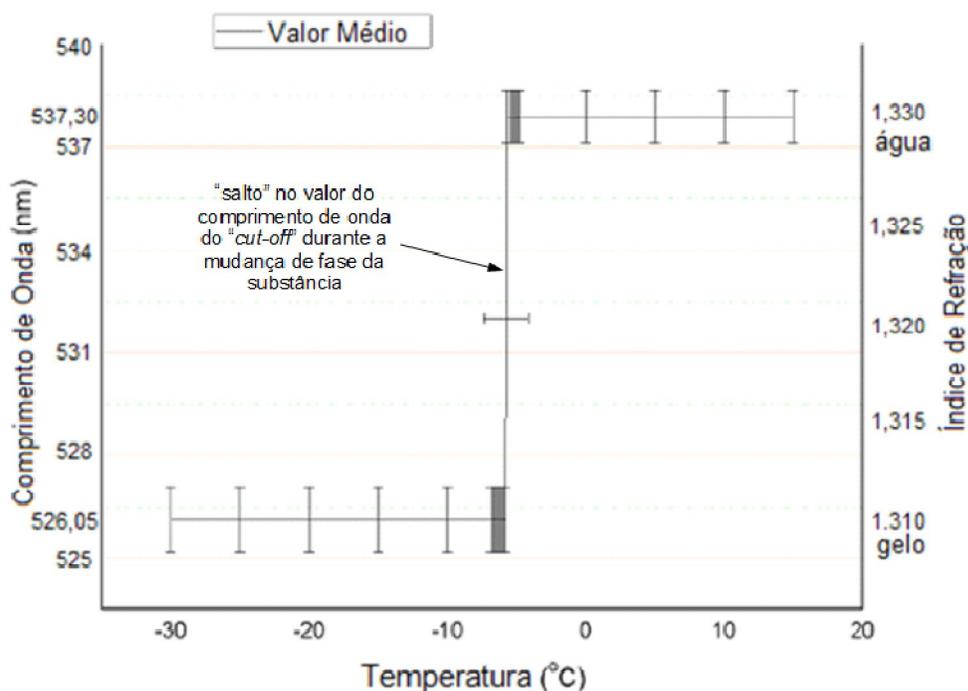
Tabela 1 – Valores dos comprimentos de onda dos “*cut-off*”, em função da variação da temperatura da água preenchida na *PCF* durante a mudança de fase, tendo a fibra conformada com 1 volta de diâmetro 6,4mm dentro da matriz de encapsulamento e utilizando o filtro passa-faixa de centro em 540nm.

RESULTADOS		DADOS	
ΔT (°C)	$\Delta \lambda$ (nm)	Temperatura (°C)	Comprimento de Onda (nm)
49	11,58	4	537,30
		-45	525,72
30	11,22	5	537,32
		-25	526,10
33	10,83	5	536,92
		-28	526,09
33	10,93	5	537,68
		-28	526,75
37	11,14	6	536,85
		-31	525,71
30	12,00	4	537,32
		-26	525,32
49	10,82	6	537,31
		-43	526,49
43	11,50	8	537,70
		-35	526,20

Fonte: **Autoria própria.**

O valor médio do deslocamento do comprimento de onda no "cut-off", associado à mudança de fase da água, ficou em $\Delta\lambda_{\text{médio}} = 11,25\text{nm}$; sendo que o desvio padrão associado a estas medidas foi de $0,416\text{nm}$. Assim, o valor médio final do deslocamento do "cut-off" pode ser expresso por $\Delta\lambda = 11,25 \pm 0,416\text{nm}$, sendo que o erro desta medida foi de $e = 3,7\%$.

Figura 48 - Gráfico da média e desvio padrão associado (incerteza) dos valores dos comprimentos de onda dos "cut-off", em função da variação da temperatura da água preenchida na PCF durante a mudança de fase, tendo a fibra conformada com 1 volta de diâmetro 6,4mm dentro da matriz de encapsulamento e utilizando o filtro passa-faixa de centro em 540nm..Ocorre um "salto" no comprimento de onda na mudança de fase.



Fonte: **Autoria própria.**

A temperatura média de mudança de fase da água destilada preenchida na fibra ficou em torno de -5°C (abaixo do 0°C) devido a ainda haver algum soluto (sais) dissolvidos na água, o que causa este abaixamento no ponto de fusão da água. Existe, também, uma variação de, aproximadamente, 3°C ao redor desta temperatura média de transformação de estado.

Sendo o valor médio calculado por:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3)$$

a variância calculada por:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)^2 - n\bar{x}^2}{(n-1)} \quad (4)$$

e o desvio padrão calculado por:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (5)$$

Os seguintes valores são obtidos, para a água e gelo, conforme a tabela 2:

Tabela 2 – Valores médio, variância e desvio padrão, do comprimento de onda no "cut-off", calculados para a água e gelo.

ÁGUA	GELO
$\lambda_{\text{médio}} = 537,30\text{nm}$	$\lambda_{\text{médio}} = 526,05\text{nm}$
$s^2 = 0,093$	$s^2 = 0,210$
$s = 0,305$	$s = 0,458$

Fonte: **Autoria própria.**

Estes dados fazem inferir que tal variação no comprimento de onda do "cut-off" do gelo surge devido às redes cristalinas formadas no gelo, após a solidificação da água, não possuírem a mesma estrutura ou processo de formação durante a solidificação, uma das outras. Tal situação, na formação dos hidratos, deve fornecer subsídios para o entendimento das diferentes estruturas cristalinas formadas.

Em relação ao índice de refração da substância preenchida nos furos, tomando-se a equação (1):

$$n_h = \frac{n_{\text{core}} \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\lambda m}{2n\lambda} \right) \right] - (x_{\text{SiO}_2} n_{\text{SiO}_2})}{x_h} \quad (6)$$

E utilizando as propriedades físicas da fibra utilizada, extraídas do seu *data sheet*, na Tabela 3:

Tabela 3 – Propriedades físicas da fibra PM-1550-01, retiradas do *data sheet* do produto.

Diâmetro do núcleo (externo / interno)	6.6 / 4.3 ± 0.5µm
Diâmetro do revestimento exterior	125 ± 5µm
Diâmetro do encapsulamento	230 ± 10µm

Fonte: **Autoria própria.**

Na Tabela 4, são apresentados os valores atribuídos às variáveis da Equação 6 e os resultados calculados, pela mesma, para os índices de refração das substâncias inseridas nos canais da fibra *PCF* (n_h).

O índice m foi inferido por interações sucessivas na equação.

Tabela 4 – Valores atribuídos às variáveis e calculados na Eq. (6)

ÁGUA	GELO
$\lambda = 537,3\text{nm}$	$\lambda = 526,05\text{nm}$
$m = 7$	$m = 8$
$n = n_{core} = n_{SiO_2} = 1.445$	$n = n_{core} = n_{SiO_2} = 1.445$
$\Delta = 5.3 \mu\text{m} = 5300 \text{ nm}$	$\Delta = 5.3 \mu\text{m} = 5300 \text{ nm}$
$x_{SiO_2} = 60\% = 0.6$	$x_{SiO_2} = 60\% = 0.6$
$x_h = 40\% = 0.4$	$x_h = 40\% = 0.4$
$n_h = 1.334$	$n_h = 1.306$

Fonte: **Autoria própria.**

5 CONCLUSÕES

Utilizando as medidas obtidas pelo método proposto é possível calcular o índice de refração da substância presente nos furos da *PCF*, no caso, a água. Considerando os valores teóricos dos índices de refração da água ($n=1,333$) e do gelo ($n=1,310$), o erro estimado, com o uso desta metodologia, é desprezível ($< 0,5\%$) e a sensibilidade é alta o suficiente para permitir a percepção da mudança física nos materiais nos furos de fibra. Conclui-se, então, que é possível estimar o índice de refração da água e do gelo, preenchidos dentro dos furos de uma fibra de cristal fotônico, e sua variação devido à mudança de fase, em função dos fenômenos difrativos que ocorrem nos comprimentos de onda mais baixos ($< 570\text{nm}$) da banda de transmissão na *PCF*. Os furos das fibras ópticas foram utilizados para inserção da substância de interesse, água, e foi observado que a difração que ocorre depende do índice de refração da substância nos furos, dos materiais do núcleo, no caso, a sílica, e da geometria da fibra.

As medições mostraram, também, que há uma variação no espectro de transmissão do sinal, mais acentuado no intervalo de, aproximadamente, 520nm a 560nm, e onde a maior diferença no nível de intensidade da potência transmitida pela fibra foi de 12dBm, quando da mudança de fase da água inserida nos furos, sendo considerada esta, portanto, um melhor intervalo de comprimento de onda para visualização do fenômeno da variação do índice de refração que acompanha a mudança de fase. O fenômeno da difração envolvido, tendo sido amplificado por uma curvatura controlada na fibra óptica, ficou caracterizado, no espectro de frequências da transmissão, pela faixa de "*cut-off*", que é dominada por este fenômeno, sendo esta, também, a característica que foi usada para inferir o índice de refração da substância nos furos.

Sendo que o comportamento do índice de refração de uma substância varia conforme o comprimento da onda incidente sofre variação, pode ser esperado, igualmente, que a curva de variação da perda na intensidade do sinal na fibra, também varie ciclicamente, apresentando novos "*cut-off*", ao longo do eixo do comprimento de onda.

A fibra *PCF* é utilizada como micro reator e o estado físico da matéria nos furos é monitorado utilizando uma técnica de sensoriamento interferométrico bastante sensível. A metodologia proposta permite a medição do índice de refração da água e do gelo dentro dos furos da fibra de cristal fotônico. Além disso, permite o monitoramento, em tempo real, da mudança de estado físico da substância durante o congelamento. Isso mostra o excelente potencial dos fenômenos de difração que ocorrem no revestimento das fibras de cristal

fotônico para sensoriamento de fenômenos físicos, assim como, também, para fenômenos bioquímicos. A utilização da curvatura controlada para a melhoria na sensibilidade do sistema, pelo ajuste da quantidade de luz que escapa para a casca, também é muito importante nesta metodologia, pois é uma forma bastante eficaz e precisa de promover tal efeito.

Outra conclusão é de que a metodologia de medição desenvolvida, utilizando-se do filtro passa banda, pode ser aproveitada no desenvolvimento de sensores, independentemente da distância deste sensor (posição do enrolamento) à fonte emissora de luz.

Dado o baixo custo dos lasers visíveis e fotodetectores, também tornar-se-ia vantajosa a utilização desta metodologia na elaboração de sistemas sensores físico-químicos. É expectativa deste trabalho, então, que tal metodologia evolua para o desenvolvimento de reatores físico-químicos, de pequenas dimensões e bastante eficazes, que poderiam ser portáteis e utilizados em várias aplicações distintas, desde industriais, tais como na indústria do petróleo, até na agricultura e na detecção de vírus e bactérias no monitoramento da saúde humana.

A melhor contribuição científica no desenvolvimento desta metodologia, então, encontra-se na possibilidade de utilizá-la para estipular e avaliar parâmetros físicos e ópticos, tais como determinação das faixas de comprimento de onda de ocorrência da mudança de fase (formação do "*cut-off*", útil na determinação do filtro passa-banda, por exemplo); a fim de subsidiar o desenvolvimento de sensores de mudança de fase em substâncias.

5.1 PERSPECTIVAS DE APLICAÇÕES E DE AVANÇO DA TECNOLOGIA

Na indústria, em particular na do petróleo, a aplicação desta metodologia na detecção de mudança de fase de compostos hidrocarbonetos (óleo com gás e gás liquefeito de petróleo) em dutos e tubulações se sobressai como uma importante aplicação a curto prazo. A formação dos compostos sólidos (hidratos) causa riscos de entupimento das tubulações, elevação das pressões de bombeamento, de rompimento da armadura de revestimento e de explosões. Utilizando um sensor com o tipo de princípio físico objeto desta dissertação, o problema da formação dos hidratos dentro das tubulações pode ser monitorado para que contra-ações efetivas sejam tomadas a fim de dirimir tais conseqüências. E tais contra-ações poderiam ocorrer através, por exemplo, do uso de aquecimento indutivo, automático, do revestimento nos pontos de formação de hidratos.

Na indústria alimentícia, igualmente, a aplicação de técnicas refratométricas adaptadas à utilização por sensor de detecção de mudança de fase também é de grande valia, como no

caso da detecção da maturação das frutas pela medição, por refração, dos sólidos solúveis presentes nas suas composições (açúcares, ácidos, sais, proteínas, ...). Na maturação da fruta ocorre perda de água e a concentração de tais solutos pode aumentar, podendo ocorrer, até mesmo, a solidificação/cristalização parcial do conteúdo de amostra analisada. Tendo-se uma indicação prévia da gradação dos níveis destas concentrações (referência), pode-se inferir o melhor momento para execução da colheita, por exemplo, ou o prazo de validade dos alimentos. Uma técnica como a desta dissertação, adaptada a um sistema de sensoriamento eficiente, pode realizar o monitoramento de uma lavoura frutífera definindo, por exemplo, o melhor momento da colheita e otimizando o maior tempo de sobrevida do produto junto ao consumidor final. Isso pouparia desperdícios.

Devido à robustez física da fibra óptica, em diversos sentidos, e a capacidade de ser inerte ao meio em que esteja inserida, tal técnica pode ser aplicada, também, a sistemas de sensoriamento para detecção de mudanças de fase em condições críticas de risco. Podem ser utilizadas, por exemplo, no monitoramento do estado físico de fluidos refrigerantes em reatores nucleares. Devido ao alto grau de exposição à degradação e agressividade do meio que ocorre dentro do sistema de refrigeração líquida de um reator nuclear, o uso desta técnica, na forma de sensor, pode ser de grande valia neste monitoramento do fluido refrigerante em líquido ou gás. O principal interesse nesta aplicação está em manter o fluxo adequado do fluido a fim de que o mesmo não vaporize, sendo que, assim, o elemento perderia sua capacidade refrigerante e poderia causar sobreaquecimento no reator.

Na indústria de transformação, haja vista a de papel e celulose onde se faz a análise do chamado licor negro (solução aquosa altamente corrosiva), a técnica também se faria presente para que não ocorressem sérios danos ao processo ou mesmo explosões. O vapor gerado pela incineração do licor deve estar dentro de uma faixa de teor de sólidos aceitável durante a queima na caldeira de recuperação, condição esta mensurável, com o uso da técnica desta dissertação, por avaliação do índice de refração da substância.

Há, no entanto, outro vastíssimo campo de aplicações a mais caso esta mesma metodologia desenvolvida com análise por difração seja utilizada para o monitoramento da variação do índice de refração considerando alterações nas propriedades químicas da amostra, além das físicas.

Neste caso, o sensor será um reator misto físico-químico que poderá monitorar, por exemplo, desde alterações em indícios na criminologia, por análises materiais forenses a, até mesmo, alterações bio-químicas em amostras na área da saúde, detectando, desta forma, a presença e concentração de bactérias e/ou vírus em amostras.

A técnica desenvolvida neste trabalho possui enorme potencial de aplicações, devendo ainda, numa próxima etapa, ocorrer o desenvolvimento de dispositivo que promova a portabilidade e facilidade de instalação do sistema nos ambientes a serem monitorados.

6 REFERÊNCIAS

ADEMGIL, H.; HAXHA, S. PCF Based Sensor with High Sensitivity, High Birefringence and Low Confinement Losses for Liquid Analyte Sensing Applications. **Sensors**, v. 15, n. 12, p. 31833–31842, 2015.

ALFERNESS, R.; KOROTKY, S.; MARCATILI, E. Velocity-matching techniques for integrated optic traveling wave switch/modulators. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 20, n. 3, p. 301–309, 1984.

AXELROD, D. Total Internal Reflection Fluorescence Microscopy in Cell Biology. In: **Encyclopedia of Cell Biology**. Academic P ed. Waltham: Munksgaard International Publishers, 2001. p. 764–774.

AZZAM, S. I. H. *et al.* Highly Sensitive Biological Sensor Based on Photonic Crystal Fiber. **Proceedings of the SPIE**, v. 9141, p. 1–6, 2014.

BARBIERI, J. A hora e a vez da fibra de cristal fotônico. **Jornal da Unicamp**, n. 463, 2010.

BEGUM, F.; NAMIHIR, Y. Photonic Crystal Fiber for Medical Applications. In: YASIN, M. (Ed.). **Recent Progress in Optical Fiber Research**. Rijeka: InTech, 2012. p. 229–246.

BENABID, F. Hollow-core photonic bandgap fibre: new light guidance for new science and technology. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A**, v. 364, p. 3439–3462, 2006.

CÂMARA, J. M. **Análise de fibras ópticas baseadas em quase cristais fotônicos**. [s.l.] 67f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2014.

CANNING, J. Diffraction-free mode generation and propagation in optical waveguides. **Optics Communications**, v. 207, n. 1–6, p. 35–39, 2002.

CANNING, J. *et al.* Wavelength dependent leakage in a Fresnel-based air–silica structured optical fibre. **Optics Communications**, v. 205, n. 1–3, p. 95–99, 2002.

CANNING, J. *et al.* Mapping the broadband polarization properties of linear 2D SOI photonic crystal waveguides. **Optics express**, v. 15, n. 23, p. 15603–15614, 2007.

CANNING, J. Fresnel Optics Inside Optical Fibres. In: NILSSON, V. P. (Ed.). . **Photonics Research Developments**. Hauppauge: Nova Science Publishers, 2008. p. 81–121.

CANNING, J. *et al.* **New functionality within structured optical fibres by selective filling**. OECC/ACOFT 2008 - Joint Conference of the Opto-Electronics and Communications Conference and the Australian Conference on Optical Fibre Technology. **Anais...2008**

CANNING, J. *et al.* Manipulating and controlling the evanescent field within optical waveguides using high index nanolayers [Invited]. **Optical Materials Express**, v. 1, n. 2, p. 192–200, 2011.

CARNEGIE MELLON UNIVERSITY. **Total Internal Reflection Microscopy**. Disponível em: <<http://www.andrew.cmu.edu/user/dcprieve/TIRM.htm>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

CARNEGIE MELLON UNIVERSITY. **Evanescant Waves**. Disponível em: <[http://www.andrew.cmu.edu/user/dcprieve/Evanescant waves.htm](http://www.andrew.cmu.edu/user/dcprieve/Evanescant_waves.htm)>. Acesso em: 28 jan. 2018.

CORDEIRO, C. M. B. *et al.* Microstructured-core optical fibre for evanescent sensing applications. **Optics Express**, v. 14, n. 26, p. 13056–13066, 2006.

DAVID JOHN DIGIOVANNI, M.; ROBERT SCOTT WINDELER, CHATHAM, B.; N., O. **ARTICLE COMPRISING AN AIR-CLAD OPTICAL FIBER** United States of America, 1998. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/82/0b/4a/1923c412dcd98e/US5907652.pdf>>

DAVIS, J. R.; SEMIATIN, S.; ASM, A. S. FOR M. Metals Handbook: Forming and Forging. In: **Metals Handbook, 9a ed.** 9. ed. [s.l.] Asm Intl, 1988. p. 978.

DONG, X. *et al.* Tilted fiber Bragg gratings: Principle and sensing applications. **Photonic Sensors**, v. 1, n. 1, p. 6–30, 2011.

EUSER, T. G. *et al.* Quantitative broadband chemical sensing in air-suspended solid-core fibers. **Journal of Applied Physics**, v. 103, p. 103108, 2008.

FENG, M. *et al.* Electro-optical hysteresis and bistability in the ring-cavity tunneling-collector transistor laser. **Journal of Applied Physics**, v. 121, n. 15, p. 153103, 2017.

HAMEED, M. F. O.; ALRAYK, Y. K. A.; OBAYYA, S. S. A. Self-Calibration Highly Sensitive Photonic Crystal Fiber Biosensor. **IEEE Photonics Journal**, v. 8, n. 3, 2016.

HANSEN, K. N. AND D. N. AND T. S. AND A. B. AND T. P. Selective filling of photonic crystal fibres. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 7, n. 8, p. L13, 2005.

HAYNES, W. M. **Handbook of Chemistry and Physics**. 97. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

HINCKLEY, S.; WILD, G. **Secondary student research projects in engineering : optical fibre Bragg grating sensor applications**. Australasian Association for Engineering Education Conference 2011: Developing engineers for social justice: Community involvement, ethics & sustainability. **Anais...Australian Capital Territory: Engineers Australia**, 2011

HUI, R.; O'SULLIVAN, M. Fundamentals of Optical Devices. In: **Fiber Optic Measurement Techniques**. Boston: Academic Press, 2009a. p. 1–128.

HUI, R.; O'SULLIVAN, M. Basic Instrumentation for Optical Measurement. In: **Fiber Optic Measurement Techniques**. Boston: Academic Press, 2009b. p. 129–258.

HUI, R.; O'SULLIVAN, M. Optical Fiber Measurement. In: **Fiber Optic Measurement Techniques**. Boston: Academic Press, 2009c. p. 365–479.

JACOBS, S. A. *et al.* Hollow-Core Fibers. In: MÉNDEZ, A.; MORSE, T. F. (Eds.). . **Specialty optical fibers handbook**. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2007. p. 315–360.

JIN, W.; XUAN, H. F.; HO, H. L. Sensing with hollow-core photonic bandgap fibers. **Measurement Science and Technology**, v. 21, n. 9, p. 094014, 2010.

JOANNOPOULOS, J. J. D. *et al.* **Photonic crystals: molding the flow of light**. 2. ed. Princeton: Princeton University Press, 2008.

JR, S. A. C. Recent progress and novel applications of photonic crystal fibers. **Reports on Progress in Physics**, v. 73, n. 2, p. 24401, 2010.

KAISER, P.; ASTLE, H. W. Low-loss single-material fibers made from pure fused silica. **The Bell System Technical Journal**, v. 53, n. 6, p. 1021–1039, 1974.

KNIGHT, J. Photonic crystal fibres. **Nature**, v. 424, n. 6950, p. 847–851, 2003.

LARSEN, T. T. *et al.* Optical devices based on liquid crystal photonic bandgap fibres. **Optics Express**, v. 11, n. 20, p. 2589–2596, 2003.

LIN, M. *et al.* Highly sensitive hydrostatic pressure sensor based on a selectively filled photonic crystal fiber. **Proceedings of SPIE**, v. 8924, p. 89242O, 2013.

LIU, J.-M. (ED.). Optical Resonance. In: **Principles of Photonics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. p. 204–223.

LOPEZ, C. **Photonic crystals: Fundamentals and applications**. Electron Devices Meeting, 2004. IEDM Technical Digest. IEEE International. **Anais...IEEE**, 2004Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1419156>>

MACCHESNEY, J. B.; BISE, R.; MÉNDEZ, A. Overview of Materials and Fabrication Technologies. In: MÉNDEZ, A.; MORSE, T. F. (Eds.). . **Specialty Optical Fibers Handbook**. Burlington: Academic Press, 2007. p. 69–94.

MACKENZIE, U. P. **Fibras de cristal fotônico: novas plataformas para estudos de óptica não-linear, sensoriamento e dispositivos fotônicos**. 1st Workshop on specialty optical fibers and their application. **Anais...São Pedro/SP**: 2008

MARTELLI, C. *et al.* Water-core Fresnel fiber. **Optics Express**, v. 13, n. 10, p. 3890–3895, 2005.

MARTELLI, C. *et al.* Impact of water and ice 1h formation in a photonic crystal fiber grating. **Optics letters**, v. 31, p. 706–708, 2006.

MARTELLI, C. *et al.* Bend loss in structured optical fibres. **Optics express**, v. 15, n. 26, p. 17639–44, 2007a.

MARTELLI, C. *et al.* Refractive Index Measurement within a Photonic Crystal Fibre Based on Short Wavelength Diffraction. **Sensors**, v. 7, n. 11, p. 2492–2498, 2007b.

MARTELLI, C. *et al.* Evanescent-Field Spectroscopy using Structured Optical Fibers: Detection of Charge-Transfer at the Porphyrin-Silica Interface. **Journal of the American Chemical Society**, v. 131, n. 8, p. 2925–2933, 2009.

MARTELLI, C.; CANNING, J. Fresnel fibres with omnidirectional zone cross-sections. **Optics express**, v. 15, n. 7, p. 1499–1501, 2007.

MÉNDEZ, A. *et al.* Specialty Optical Fibers Handbook. In: **Specialty Optical Fibers Handbook**. [s.l: s.n.]. p. 315–360.

MILLER, D. A. B. Developments in optical computers. **Euro III-Vs Review**, v. 3, n. 3, p. 34–37, 1990.

NAEEM, K. *et al.* High-sensitivity temperature sensor based on a selectively-polymer-filled two-core photonic crystal fiber in-line interferometer. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 7, p. 3998–4003, 2015.

NIELSEN, K. *et al.* Selective filling of photonic crystal fibres. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 7, n. 8, p. L13–L20, 2005.

NIKON. **Eclipse Ti-E (Sistema Microscópio Invertido)**. Disponível em: <https://www.nikoninstruments.com/pr_BR/Produtos/Microscopios-Invertidos/Eclipse-Ti-E>.

OHTAKA, K. Energy band of photons and low-energy photon diffraction. **Physical Review B**, v. 19, n. 10, p. 5057–5067, 15 maio 1979.

OMEGA A SPECTRIS COMPANY. **Sensores Pt-100 Introdução às Termoresistências**. Disponível em: <<https://br.omega.com/prodinfo/pt100.html>>.

PINTO, A. M. R.; LOPEZ-AMO, M. Photonic Crystal Fibers for Sensing Applications. **Journal of Sensors**, v. 2012, p. 1–21, 2012.

PIRES, L. C. C. **Caracterização das propriedades ópticas de fibras microestruturadas contendo cristais líquidos**. [s.l.] Universidade do Porto, 2013.

PRAVDIN, K. V; PETERSBURG, S. PHOTONIC CRYSTAL WITH NEGATIVE INDEX MATERIAL LAYERS. v. 5, n. 5, p. 626–643, 2014.

QUANTUM BOFFIN. **Snell's Law**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=NAaHPRsveJk>>.

RUSSELL, P. S. J. Photonic-Crystal Fibers. **Journal of Lightwave Technology**, v. 24, n. 12, p. 4729–4749, 2006.

RUSSELL, P. S. J.; BIRKS, T. A.; KNIGHT, J. C. **Photonic crystal fibres** Google Patents, , 2005. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US6954574>>

SCHNECKENBURGER, H. Total internal reflection fluorescence microscopy: technical innovations and novel applications. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 16, n. 1, p. 13–18, fev. 2005.

SIBILIA, C. *et al.* **Photonic Crystals: Physics and Technology**. 1. ed. Milano: Springer, 2008.

SILVA, S.; RORIZ, P.; FRAZÃO, O. Refractive Index Measurement of Liquids Based on Microstructured Optical Fibers. **Photonics**, v. 1, n. 4, p. 516–529, 2014.

SMITH, C. M. *et al.* Low-loss hollow-core silica/air photonic bandgap fibre. **Nature**, v. 424, n. 6949, p. 657–659, 7 ago. 2003.

THAPA, R. *et al.* Arc fusion splicing of hollow-core photonic bandgap fibers for gas-filled fiber cells. **Optics Express**, v. 14, n. 21, p. 9576–9583, 2006.

THORLABS INC. **FB540-10 - Filtro Passa Banda, CWL = 540, FWHM = 10**. Disponível em: <<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FB540-10>>.

THORLABS INC. **Fibras de Cristal Fotônicas de Mantimento da Polarização**. Disponível em: <https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=910&pn=PM-1550-01>. Acesso em: 16 ago. 2018.

VERMA, R. *et al.* Photonic crystals: role of architecture and disorder on spectral properties. **Journal of the Optical Society of America A**, v. 35, n. 3, p. 370–376, mar. 2018.

WAGHMARE, M.; REDDY, K. T. V. Design and Modal Analysis of Photonic Crystal Fiber for Dispersion Compensation over Broadband Range. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 15, n. 4, p. 365–379, 2016.

WATRASIEWICZ, B. M. Optical digital computers. **Optics & Laser Technology**, v. 7, n. 5, p. 213–215, 1975.

WEI, H.; ZHU, Y.; KRISHNASWAMY, S. Optofluidic Photonic Crystal Fiber Coupler for Measuring the Refractive Index of Liquids. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 28, n. 1,

p. 103–106, 2016.

WOODS, D.; NAUGHTON, T. J. Optical computing. **Applied Mathematics and Computation**, v. 215, n. 4, p. 1417–1430, 15 out. 2009.

XIAO, L. *et al.* Fusion Splicing Photonic Crystal Fibers and Conventional Single-Mode Fibers: Microhole Collapse Effect. **Journal of Lightwave Technology**, v. 25, n. 11, p. 3563–3574, 2007.

YABLONOVITCH, E.; GMITTER, T. J.; LEUNG, K. M. Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms. **Physical Review Letters**, v. 67, n. 17, p. 2295–2298, 1991.

YEH, P.; YARIV, A.; HONG, C.-S. Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory*. **Journal of the Optical Society of America**, v. 67, n. 4, p. 423–438, 1977.

YEH, P.; YARIV, A.; MAROM, E. Theory of Bragg fiber*. **Journal of the Optical Society of America**, v. 68, n. 9, p. 1196–1201, 1978.

YU, X. *et al.* Evanescent Field Absorption Sensor Using a Pure-Silica Defected-Core Photonic Crystal Fiber. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 20, n. 5, p. 336–338, 2008.

ZHAO, J.; LI, J.; DI, J. **The diffraction properties and applications of photorefractive volume holographic gratings.** (Optical Society of America, Ed.)Photorefractive Effects, Materials, and Devices. **Anais...**Optical Society of America, 2005Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=PEMD-2005-788>>

ZHAO, Y.; DENG, Z.; WANG, Q. Fiber optic SPR sensor for liquid concentration measurement. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 192, p. 229–233, 2014.

ZOLLA, F. *et al.* **Foundations of Photonic Crystal Fibres.** 2. ed. London: Imperial College Press, 2005.