

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Instituto de Física "Gleb Wataghin"

Dissertação de Mestrado

*Processos Relacionados à Inserção de Fluidos para
Sensoriamento com Fibras de Cristal Fotônico*

Eliane Moura dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Barbosa.

Co-orientador: Dr. Cristiano M. B. Cordeiro.

*ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À REDAÇÃO FINAL DA TESE DE MESTRADO
REFERIDA PELO ALUNO (ELIANE MOURA DOS SANTOS) E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA*

09/10/08

L. Carlos Barbosa

Dissertação apresentada ao Instituto de
Física "Gleb Wataghin" para obtenção
do título de Mestre em Física.

Campinas
2007.

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IFGW - UNICAMP**

Sa59p Santos, Eliane Moura dos
Processos relacionados à inserção de fibras para
sensoriamento com fibras de cristal fotônico / Eliane Moura dos
Santos. -- Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientadores: Luiz Carlos Barbosa e Cristiano Monteiro de
Barros Cordeiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Instituto de Física "Gleb Wataghin".

1. Fibras óticas. 2. Fibras óticas microestruturadas.
3. Fibra de cristal fotônico. I. Barbosa, Luiz Carlos.
II. Cordeiro, Cristiano Monteiro de Barros. III. Universidade
Estadual de Campinas. Instituto de Física "Gleb Wataghin".
IV. Título.

- **Título em inglês:** Fluid insertion related processes for sensing using photonic crystal fibers
- **Palavras-chave em inglês (Keywords):**
 - 1. Optical fibers
 - 2. Microstructures optical fibers
 - 3. Photonic crystal fiber
- **Área de Concentração:** Física Geral
- **Titulação:** Mestre em Física
- **Banca examinadora:**
 - Prof. Luiz Carlos Barbosa
 - Prof. Marcelo Martins Werneck
 - Prof. José Joaquim Lunazzi
- **Data da Defesa:** 30/07/2007
- **Programa de Pós-Graduação em:** Física



MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA TESE DE MESTRADO DE **ELIANE MOURA DOS SANTOS – RA 038447** APRESENTADA E APROVADA AO INSTITUTO DE FÍSICA “GLEB WATAGHIN”, DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, EM 30 / 07 / 2007.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Luiz Carlos Barbosa (Orientador da Candidata) –
DEQ/IFGW/UNICAMP

Prof. Dr. Marcelo Martins Werneck – Centro de Tecnologia - UFRJ

Prof. Dr. José Joaquin Lunazzi – DFMC/IFGW/UNICAMP

DEDICO:

Aos meus pais Carlos Evandro e Ivone Maria.
Adriana e Ulisses, pelo amor e apoio. E ao meu
marido Rodrigo por esta sempre comigo.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha existência! Aos meus pais por sempre acreditarem mim e pelo esforço para eu está aqui!

Agradeço especialmente ao Prof. Dr. Cristiano M. B. Cordeiro pela orientação fundamental, paciência e grande auxílio na minha formação. Agradeço, também, pelo incentivo, discussões dos resultados, sugestões no decorrer deste trabalho, pela confiança depositada e pela amizade.

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Barbosa por ser meu orientador compreensivo e pela total liberdade de trabalho que pude ter no decorrer do mestrado, pela confiança depositada em meu trabalho e também por sua amizade.

Aos amigos e companheiros do Laboratório de Fenômenos Ultra-rápidos do Instituto de Física Gleb Wataghin da UNICAMP, Lázaro, Renata, Priscila, Juliano e especialmente ao Giancarlo e Elita pela amizade, discussões e apoio durante a elaboração deste trabalho.

Ao técnico José Aparecido, pela incansável e constante ajuda, pois sem ele não teríamos as nossas preciosas peças de trabalho!!!

A todos meus amigos da pós-graduação, especialmente ao Marcos, Silvânia (Sil), Luciano, Sabrina (Sá) e Adriana Lopes (Drica) pela amizade e apoio.

As minhas amigas de pensionato Ana Cecília (Ana), Cris (Bicha Doida) e Cassiana pela ajuda e apoio enquanto morava em Campinas. Também as minhas amigas de república, penúltima morada em Campinas, Fernanda, Carolina, Marília e em especial a Elita (trabalhar com música mudou a minha vida!!!).

Agradeço a Janne pela morada final em Campinas, onde pude escrever este trabalho com tranquilidade e especialmente ao Rodrigo que é o marido, o amigo, enfim meu porto seguro!

Agradeço também ao pessoal da secretária da pós-graduação (Maria Ignez, Armando, Cássia e estagiários) pela amizade e eficiência em tudo e também a secretária do DEQ (Marta, Cláudia) por me ajudarem enquanto estive trabalhando no departamento. Também a Simone (CePOF) e Eliane Valente (CePOF) por tudo e finalmente ao técnico Júlio Guedes por ser como um pai para mim em Campinas.

A CAPES e CEPOF pelo apoio financeiro.

RESUMO

Este trabalho apresenta estudos de como inserir fluidos (líquidos e gases) em fibras ópticas microestruturadas, especialmente fibras de cristal fotônico, também conhecidas como *PCF's* (do inglês *Photonic Crystal Fibers*). Estas fibras possuem buracos de ar que percorrem todo seu comprimento. Elas podem ser divididas em dois grandes grupos: as de núcleo sólido que guiam luz por reflexão interna total e as de núcleo oco que guiam luz por um mecanismo conhecido como *photonic bandgap*. Ambos os tipos de fibras permitem várias aplicações em áreas como óptica e fotônica e nos dedicamos aqui à área de sensoriamento a fibra. Nesta área, usamos os microburacos para inserir fluido e dessa maneira manipular as propriedades de guiamento (em fibras de núcleo líquido), deixar a fibra mais sensível a algum parâmetro externo ou para sensoriar o fluido em questão. Nos três casos, precisamos estudar os processos de preenchimentos de fibras microestruturadas.

Para este fim, estudamos e desenvolvemos maneiras de inserir fluidos em fibras de núcleos sólidos ou ocos. Usando preenchimento seletivo, produzimos fibras com núcleo líquido, criando uma região de alta interação entre luz e material. Neste trabalho, estudamos diferentes técnicas de preenchimento. A primeira, para fibras de núcleo líquido, é um preenchimento seletivo que pode ser feito usando uma máquina de emendas (*splicer*) ou um polímero para bloquear os microburacos. O outro consiste em manter as pontas das fibras livres (para medidas ópticas) enquanto o preenchimento é feito. Por fim, usamos o conhecimento desses processos em aplicações como sensoriamento de fluidos ou parâmetros externos e manipulação de propriedades de guiamento da luz.

ABSTRACT

This work presents studies of how to insert fluids (liquid and gas) into microstructured optical fibers, especially photonic crystal fibers, also known as *PCF*'s. These optical fibers possess air holes that run along its entire length. They can be divided into two major groups: solid core fibers that guide light by total internal reflection and hollow core fibers that guide light by photonic bandgap. Both types of fibers allow several applications in areas such as optics and photonics and we dedicated this work to the fiber-sensing field. In this area we use the micro holes to insert fluids and in this way to manipulate the guidance properties in liquid core fibers, to leave the fiber more sensitive to some external parameter or to sensing the fluid. In these three cases we need to study the filling procedures in microstructured fibers.

For this purpose, we studied and developed ways of inserting fluids in hollow and solid core fibers. We produced liquid core fibers, creating a high light-material overlap, using a selective filling technique. In this work we studied different filling techniques. The first one, for liquid core fibers, is a selective filling, which can be done by using a splicer machine or a polymer to block the fiber micro holes. The last one consists of keeping the fiber tips free (for optical measurements) while the filling is done. And finally we used the filling process knowledge in applications like sensing of fluids or external parameters and manipulation of guidance properties.

PUBLICAÇÕES

• PERIÓDICOS

1. Cristiano M.B.Cordeiro, Eliane M. Dos Santos, and C. H. Brito Cruz, "Lateral access to the holes of photonic crystal fibers - selective filling and sensing applications", Optics Express, vol.14, nº 18, 2006. **(Publicado)**
2. Christiano J. S. De Matos, Cristiano M.B.Cordeiro, Eliane M. Dos Santos, Jackson S. K. Ong, Alexandre Bozolan, and C. H. Brito Cruz, "Liquid-Core, Liquid-Cladding Photonic crystal Fibers", Optics Express. **(Submetido em 02.07.07)**
3. Cristiano M.B.Cordeiro, Christiano J. S. De Matos, Eliane M. Dos Santos, Alexandre Bozolan, Jackson S. K. Ong, Tilon Facincani, Giancarlo Chesini, Alfredo R. Vaz, and C. H. Brito Cruz, "Towards practical liquid and gas sensing with photonic crystal fibres", Measurement Science and Technology. **(Aceito)**

• CONGRESSOS INTERNACIONAIS

1. The joint International Conference on Plastic Optical Fiber & Microoptics 2006 (September 11~14, Seoul, Korea):

Cristiano M.B.Cordeiro, Giancarlo Chesini, Marcos A. R. Franco, Elaine C. S. Barretto, Eliane M. Dos Santos, Richard Lwin, C. H. Brito Cruz, and Maryanne C. J. Large, "PMMA Microstructured-Core Optical Fibre for Absorption Evanescent-Wave Sensing".

2. Conference on Lasers & Electro-Optics - CLEO 2007:

Christiano J. S. de Matos, Alexandre Bozolan, Jackson S. K. Ong, Cristiano M.B.Cordeiro, Eliane M. dos Santos, and C. H. Brito Cruz, "Index-Guiding, Single-Mode, Liquid-Core, Liquid-Cladding Photonic Crystal Fibers".

• CONGRESSOS NACIONAIS

1. XXVIII Encontro Nacional de Física da Matéria condensada – (2005):

Eliane M. dos Santos, E. F. Chilicce, E. S. Abreu, E. C. S. Barretto, M. A. R. Franco, L. C. Barbosa, L. C. Cesar, C. H. Brito Cruz, and Cristiano M. B. Cordeiro, "Applications of Photonic Crystal Fibers to Pulse Broadening and Evanescent Field based Sensors".

2. VI Encontro de Jovens Pesquisadores no IFGW - (2005):

Eliane M. dos Santos, Luiz C. Barbosa, C. H. Brito Cruz e Cristiano M. B. Cordeiro, "Fibras de Cristal Fotônico com Núcleo Líquido – Desenvolvimento e Aplicações".

3. 1ª Escola Avançada de Óptica e Fotônica (EAOF) - (2006):

Eliane M. dos Santos, Luiz C. Barbosa e Cristiano M. B. Cordeiro, "Fibra de Cristal Fotônico de Núcleo Líquido: Preparação (Processo de Preenchimento Seletivo) e Aplicações".

4. TIDIA 2006:

Christiano J. S. Matos, Cristiano M. B. Cordeiro, Eliane M. dos Santos, Daniel S. Ferreira, and C. H. Brito Cruz, "Toward Practical Liquid Sensing with Photonic Crystal Fibers".

Sumário

Capítulo 1-Introdução: Um novo tipo de Fibra Óptica.....	1
Capítulo 2-Fibra de Cristal Fotônico.....	3
2.1 Tipos de Guiamentos de Fibras Microestruturadas.....	3
2.1.1 Guiamento por Reflexão Interna Total (<i>RIT</i>).....	4
2.1.2 Guiamento por Efeito <i>Bandgap</i> Fotônico.....	6
2.2 Nomenclaturas para Fibras Ópticas Microestruturadas.....	10
2.3 Fabricação de Fibra Óptica Convencional e <i>PCF</i>	11
2.3.1 Fabricação de Fibra Óptica Convencional.....	12
2.3.2 Fabricação de <i>PCF</i>	14
2.4 Vantagens das Fibras Microestruturadas.....	19
2.5 Sensoriamento a Fibra Óptica Convencional.....	20
2.5.1 Classificação de Sensores a Fibra Óptica Convencional.....	21
2.5.2 Sensoriamento a Fibra Microestruturada.....	22
Capítulo 3-Processos de Preenchimento nas Fibras Microestruturadas.....	27
3.1 Processos de Preenchimentos para Fibras Microestruturadas.....	27
3.1.1 Processo de Preenchimento Seletivo para obter Fibras de Núcleo Líquido.....	29
3.2 Inserção de 2-Líquidos em Fibras Microestruturadas.....	46
Capítulo 4-Estudo de Fibras Microestruturadas para Aplicação na Área de Sensoriamento Óptico: Desenvolvimento e Resultados.....	51
4.1 <i>PCF</i> 's preenchidas como Sensores de Deslocamento/Pressão.....	52
4.1.1 Perda por Curvatura para Fibras Microestruturadas.....	54
4.1.2 Estudo da Perda por Curvatura Induzida na Fibra Microestruturada preenchida.....	60
4.1.3 Experimentos e Resultados.....	70
4.2 Princípio de Sensoriamento da temperatura via variação da Abertura Numérica.....	76
4.2.1 Estudo da variação da Abertura numérica com a Temperatura.....	77
4.3 Princípio de Sensoriamento a Fibra Microestruturada de Gás.....	82
4.3.1 Inserção de um Gás na Fibra Microestruturada.....	83

Capítulo 5-Conclusão e Perspectivas Futuras.....	87
Apêndice 1-Furo Lateral.....	90
Referências.....	93

Capítulo 1

Introdução: Um novo tipo de Fibra Óptica

Fibras de cristal fotônico ou *PCF's* (do inglês: **Photonic Crystal Fibres**) são fibras ópticas que apresentam um arranjo regular de furos de ar que correm paralelos ao núcleo da fibra e por todo seu comprimento. Estas fibras também são conhecidas como fibras ópticas microestruturadas ou *MOF* (do inglês: **Microstructured Optical Fibers**)^[1]. Enfatizamos que a necessidade da periodicidade e regularidade dos furos de ar é um fator essencial para as *PCF's*.

As *PCF's* têm dois grandes grupos: as fibras com núcleo sólido que guiam por **reflexão interna total (RIT)** e as de núcleo oco que guiam por *bandgap* fotônico. Por causa do novo design que contém furos de ar incorporados neste novo guia de onda, muitas possibilidades de aplicações surgem para estas fibras ópticas. Abaixo mostramos fotos com dois exemplos de *PCF's*, onde há uma fibra de núcleo sólido e de núcleo oco.

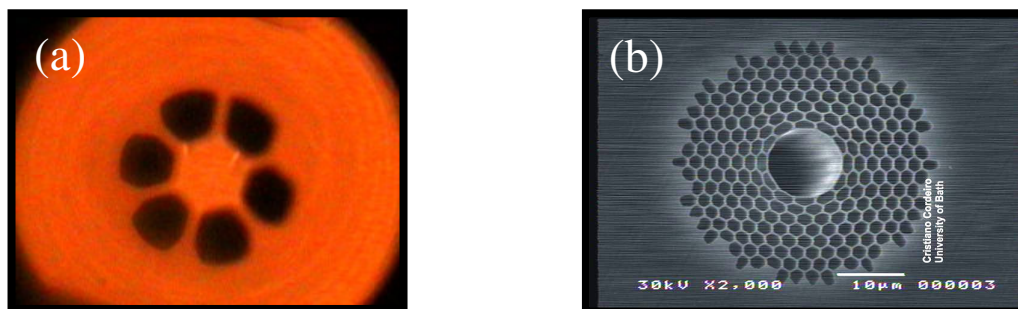


Figura 1.1 – Foto microscopia óptica e eletrônica, respectivamente de uma *PCF* de núcleo sólido em (a) com um período de furos na casca e com o núcleo grande e a outra de núcleo oco com 10µm (micrômetros) de diâmetro. A *PCF* em (a) foi fabricada na Unicamp e a fibra em (b) na Universidade de Bath, Inglaterra, e ambas feitas pelo Dr. Cristiano M. B. Cordeiro.

A fibra mostrada em (a) irá guiar a luz por **RIT**, pois a luz estará no meio de maior índice de refração já que os furos de ar abaixam o índice de refração da casca. Na outra foto, em (b), observamos que a luz estará no meio de menor índice de refração. A casca da fibra age como uma zona que proíbe a luz de escapar do núcleo, pois a microestrutura regular e periódica funciona como uma rede cristalina (como a rede de átomos de um semicondutor, por exemplo) na escala do comprimento de onda

da luz e assim temos o guiamento em certos comprimentos de onda permitido por causa da rede de microfuros da casca, que são os *bandgap* fotônicos da fibra. Estes tipos de guiamento serão apresentados em detalhes no **capítulo 2**.

O primeiro trabalho publicado sobre as fibras microestruturadas é de 1997 (tendo, portanto dez anos) ^[2], mas o grande interesse no momento era, por exemplo, o controle da dispersão cromática e óptica não-linear neste novo tipo de fibra óptica. Entre 2001 e 2003 ocorreu um grande aumento do número de publicações sobre estas fibras, mas ainda de caráter investigativo na área de óptica não-linear. A partir de 2005 surgiram trabalhos explorando a possibilidade de utilizar estas fibras para dispositivos ópticos e sensores, e assim novas possibilidades para várias aplicações tecnológicas na área de óptica, fotônica e outras áreas afins.

A aplicação de interesse deste trabalho concentra-se na área de sensoriamento a fibra, pois estas fibras oferecem a vantagem imediata de inserção do material dentro da fibra, por causa dos furos de ar na estrutura da fibra, onde podemos obter maior interação do material com a luz guiada na mesma.

Em relação à inserção de fluidos (líquido ou gás) na fibra para medir a natureza do fluido ou aumentar a sensibilidade da fibra para um parâmetro externo, que se queira medir, podemos ter três situações: na primeira, fibras de núcleo sólido com fluido na casca guiando por *RIT*, para sensoriar o fluido ou aumentar a sensibilidade da fibra para um parâmetro externo. Na segunda, fibras de núcleo oco com apenas o núcleo cheio, guiando por *RIT*, e fibra com núcleo líquido podem ser utilizadas para sensoriamento, estudos de óptica não-linear e etc. E por fim, a terceira, fibras de núcleo oco com fluido em todos os furos (casca e núcleo) guiando por *bandgap* fotônico.

Desta forma, esta dissertação está dividida: no **capítulo 2** são introduzidos os conceitos básicos sobre estas novas fibras que são utilizadas no decorrer do trabalho; o **capítulo 3** trata das formas de preenchimento destas fibras e a primeira discussão de resultado obtido da aplicação direta dos processos de preenchimento, enquanto no **capítulo 4** tratamos de aplicação em sensoriamento à fibra, pois desenvolvemos experimentos para este fim e as outras discussões de resultados obtidos. As conclusões são apresentadas no **capítulo 5** seguido pelo **Apêndice 1** que descreverá um processo desenvolvido neste trabalho.

Capítulo 2

Fibras de Cristal Fotônico

A principal aplicação das fibras ópticas é em telecomunicações, mas em outras áreas, elas encontram grande potencial. Elas operam pelo guiamento da luz no mecanismo físico conhecido como **Reflexão Interna Total (RIT)**. Para atingir o **RIT** estes guias de ondas precisam de um alto índice de refração do núcleo comparado à média ao redor, a casca.

No final dos anos 90 tivemos, entretanto, uma evolução nos projetos de fibras ópticas que tem aberto a possibilidade de controlar o guiamento da luz por um novo mecanismo físico, o efeito de *bandgap* fotônico. Este novo tipo de fibra óptica é chamado de Fibra de Cristal Fotônico (PCF's) ^[3].

A presença de microfuros de ar na estrutura da fibra abre várias aplicações com elas, tanto no caso de fibra de núcleo sólido quanto na de núcleo oco, como por exemplo, aplicações na área de sensoriamento, que é o tema central desta dissertação.

Mostraremos neste capítulo conceitos básicos deste novo tipo de fibra óptica, como as forma de guiamento, as novas nomenclaturas para fibras ópticas microestruturadas, a fabricação, as vantagens dessas fibras em relação às fibras convencionais. No caso de sensoriamento à fibra óptica mostraremos como isto é feito em *PCF's* e os processos que vamos utilizar no decorrer deste trabalho.

2.1 Tipos de guiamentos de Fibras Microestruturadas:

Mostraremos nesta seção as formas de guiamento nas fibras ópticas microestruturadas ^[4]. O guiamento da luz nestas fibras está dividido em reflexão interna total, para fibras de núcleo sólido e por efeito *bandgap* fotônico, para fibras de núcleo oco.

2.1.1 Guiamento por Reflexão Interna Total (RIT):

Quando uma luz emitida por uma fonte, que se propaga num meio de índice de refração n_1 encontra outro meio, cujo índice de refração é n_2 , ela pode sofrer uma refração, uma reflexão ou ambas. Isto pode ser descrito pela lei de Snell:

$$n_1 \sin \theta_{inc} = n_2 \sin \theta_{refr}, \quad (2.1)$$

onde θ_{inc} e θ_{refr} são os ângulos de incidência e de refração, respectivamente, tomados a partir da normal a interface mostrada na **figura 2.1**. Observamos neste esquema, que a reflexão ocorre quando a luz não muda o meio de propagação ($n_1 = n_2$), os ângulos de incidência e reflexão são os mesmos ($\theta_{inc} = \theta_{refl}$).

Existe, também, um ângulo conhecido como ângulo crítico θ_c , que a partir do qual a refração deixa de ocorrer. Na **figura 2.1** mostramos o esquema da propagação da luz na interface de dois meios de índice de refração diferentes, em que observamos o comportamento dos raios de luz ao encontrarem a interface dos meios com os seus respectivos ângulos para identificarmos os fenômenos de reflexão, refração ou ambos.

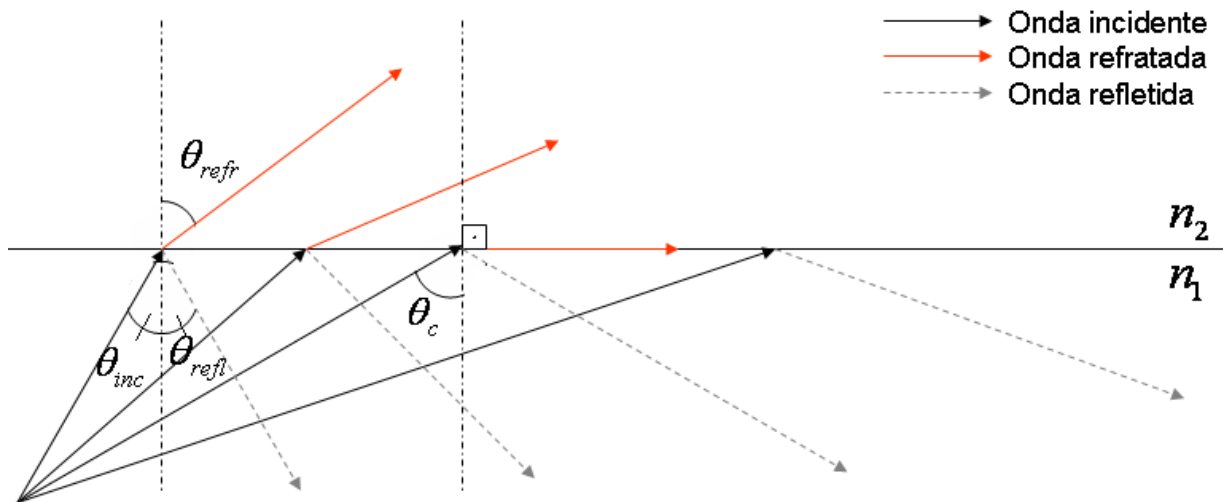


Figura 2.1 – Esquema da reflexão interna total.

Nessa situação, vemos que o ângulo de refração, tomado a partir da normal à interface é igual a 90° . A lei de Snell se reduz, então:

$$\text{sen}\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

Como a função seno só pode assumir valores no intervalo $[-1, 1]$, o ângulo crítico só existe se a luz estiver viajando no meio de maior índice de refração, ou seja, se $n_1 > n_2$. Assim, se o ângulo de incidência na interface for igual ou superior ao ângulo crítico, $\theta_i \geq \theta_c$, a onda não é refratada e sofre reflexão interna total.

Em fibras tradicionais a condição necessária para o guiamento por **RIT** (núcleo com índice de refração maior do que da casca) é alcançada dopando-se o núcleo com germânio. Já em fibras microestruturadas o contraste de índice de refração para **RIT** é atingido introduzindo-se os microfuros de ar na casca, pois de certa forma estaremos abaixando o índice da casca no seu valor médio (índice de refração do vidro ou material da fibra + o índice de refração do ar).

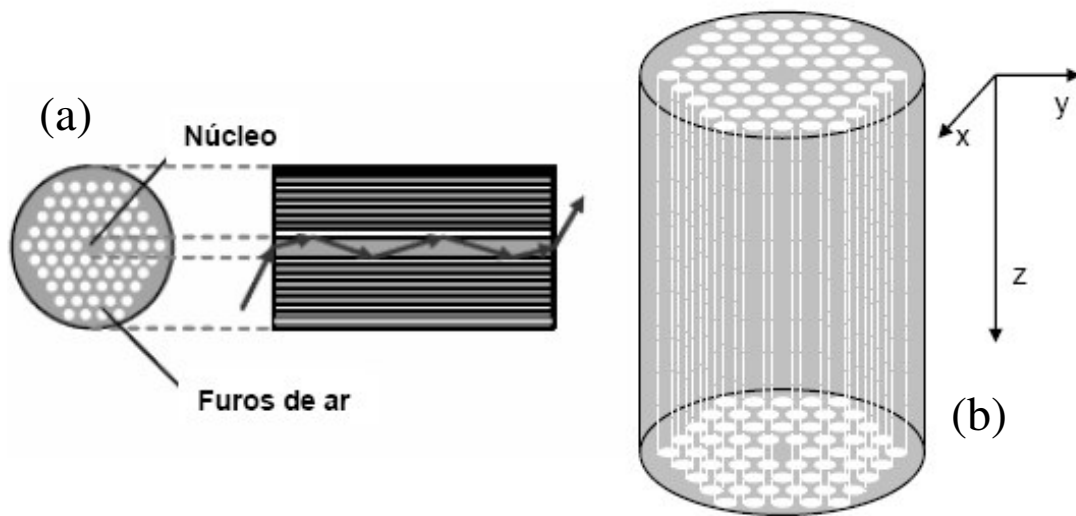


Figura 2.2 – Esquema da reflexão interna total em fibras microestruturadas.

Na **figura 2.2**, temos que em **(a)**, a face da fibra microestruturada de núcleo sólido, onde na cor cinza é vidro e em branco é o ar, e depois ao lado desta face temos a ilustração de um raio de luz sendo guiado na fibra com esta estrutura. Por fim, em **(b)**, o desenho de como a estrutura mostrada na face da fibra em **(a)**, que está no plano é mantida ao longo do comprimento da fibra.

Ao compararmos a **figura 2.1** com a **Figura 2.2 (a)**, em que temos a ilustração da luz guiada na estrutura da fibra seguindo a teoria do **RIT** da **figura 2.1**, onde observamos que a estrutura da fibra tem o contraste de índice de refração necessária para o guiamento por **RIT**, sem precisar fazer dopagem do núcleo como em fibras ópticas convencionais.

2.1.2 Guiamento por Efeito de *Bandgap* Fotônico:

O estudo do efeito de *bandgap* fotônico tridimensional foi primeiramente publicado em 1987 por *Yablonovitch* e *John*, com estudos independentes de controle e localização de emissão espontânea de luz em materiais periódicos originais ^[5, 6].

O nome cristal fotônico ou estrutura de *bandgap* fotônico foi criado para descrever estes materiais periódicos que exibiam intervalos de frequências proibidas para a propagação da luz nestes guias de onda, independentes da direção de propagação. Estes intervalos de frequência foram chamados de *bandgaps* fotônicos.

No caso de cristais unidimensionais, a luz incide no mesmo, de modo que cruze os planos formados pelas múltiplas camadas de material, com diferentes índices de refração n_1 e n_2 , ocorrendo refração no meio e uma reflexão parcial nas interfaces entre os dois materiais diferentes. A onda resultante é a superposição dos padrões de onda refletidos nas múltiplas interfaces com a onda incidente. Portanto, a onda resultante é uma onda estacionária que não se propaga através do material. Na **figura 2.3** mostramos uma ilustração sobre o que foi citado acima ^[7, 8, 9].

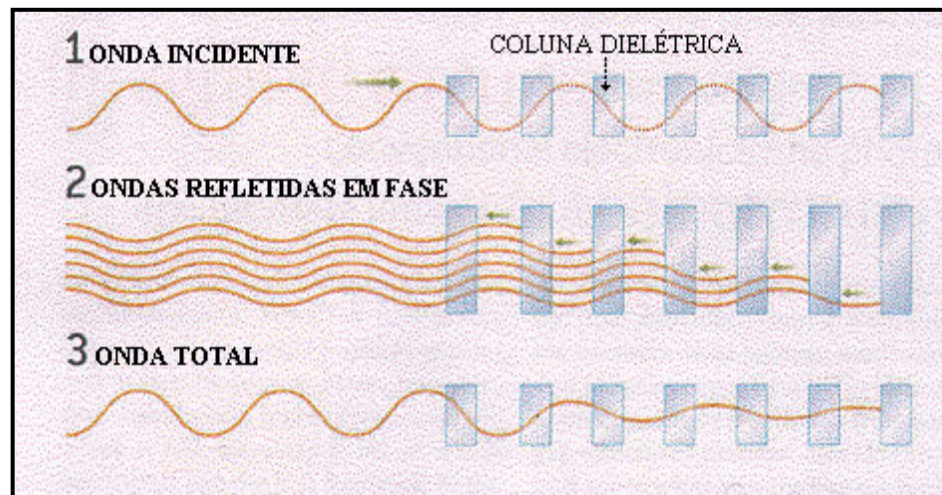


Figura 2.3 – Esquema em que mostramos luz incidente em um cristal unidimensional com comprimento de onda no *bandgap* fotônico da estrutura, para explicar o efeito de *bandgap* fotônico.

Na **figura 2.3**, temos que em **(1)** a onda incidente no cristal unidimensional com comprimento de onda no *bandgap* fotônico da estrutura. Em **(2)**, as ondas refletidas parcialmente em cada camada de material dielétrico estão em fase e reforçam umas às outras. E por fim **(3)**, a superposição do padrão das ondas refletidas com a onda incidente produz uma onda estacionária que não se propaga através do material. Como a energia deve ser conservada, e se não houver absorção da luz, a mesma deve então ser refletida, como se incidisse em um espelho.

Encontramos exemplos de estruturas que apresentam *bandgap* fotônico na natureza. Um dos mais clássicos e estudados exemplos, que é a mancha colorida em asas de certas borboletas, por exemplo, a borboleta chamada *Morpho* ^[10]. Quando observamos o movimento das asas da borboleta ou olhamos em outra posição, percebemos que as manchas mudam de cor, que vai do azul para o verde. A mudança de coloração nas asas destas borboletas pode ser conhecida também como o fenômeno de *iridescência*.

A *iridescência* da superfície superior da asa da borboleta *Morpho* se deve à interferência entre os raios luminosos refletidos por finos planos feitos de uma substância transparente. Estes planos estão dispostos paralelamente à superfície da asa, fixados a uma estrutura central perpendicular à asa.

Há outros exemplos do efeito de *bandgap* fotônico na natureza que são: o rato do mar, asas e abdômen de algumas espécies de besouros e opalas^[11, 12]. Na **figura 2.4** mostramos as fotos de exemplos do efeito de *bandgap* fotônico na natureza.

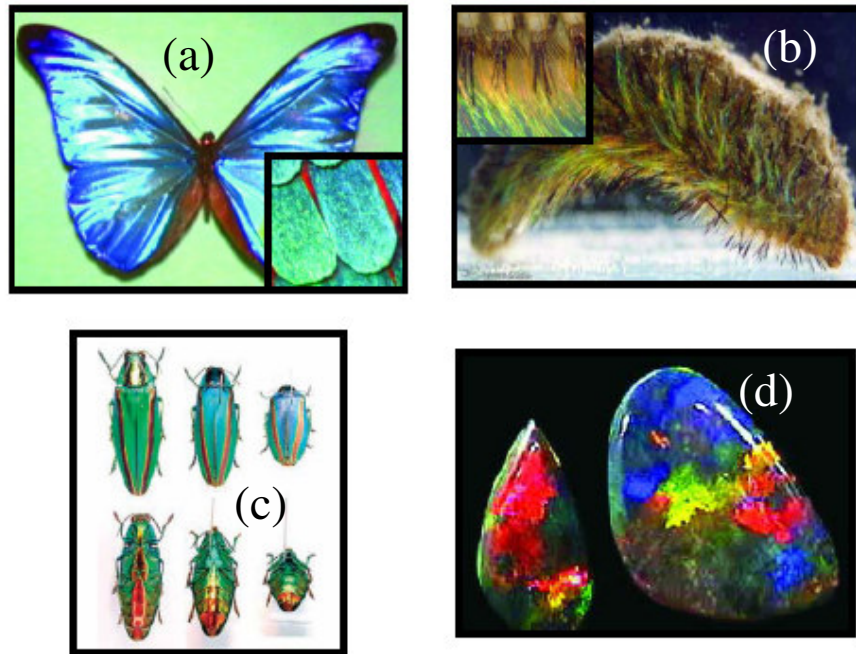


Figura 2.4 – Foto de exemplos estrutura que apresentam o efeito de *bandgap* fotônico na natureza. Em (a) a foto da borboleta *Morpho*, onde enfatizamos as estruturas responsáveis pelo o efeito da mudança de cor na asa. Em (b) um rato do mar e também enfatizamos os pêlos, onde há a mudança de cor. Em (c) e (d) exemplares de besouros e pedras opalas, que apresentam o efeito de *bandgap* fotônico também.

Em algumas estruturas dielétricas com periodicidade tridimensional não há modos de propagação em quaisquer direções para certo intervalo de frequências, dando origem a um *bandgap* fotônico completo. Estas estruturas consistem, por exemplo, de esferas dielétricas de alto índice de refração suspensas em um meio de baixo índice ou furos de ar em um meio dielétrico de alto índice de refração, com constantes de rede da ordem do comprimento da onda eletromagnética.

Mas, em geral, os *bandgaps* fotônicos tendem a aparecer em estruturas com alto contraste de índice de refração entre os materiais, do qual é feito o cristal fotônico. Quanto mais significativo o espalhamento da luz, maior a tendência de surgir um *gap*. No entanto, nem toda geometria de estrutura com alto contraste de índice de refração apresenta *bandgap* fotônico.

Em fibras microestruturadas de núcleo oco o guiamento por *bandgap* fotônico ocorre através de espalhamentos coerentes da luz nos pontos de alto índice de refração da casca, e assim há o confinamento da luz radialmente em uma região de baixo índice de refração ($n_1 < n_2$) incluindo o ar. Na **figura 2.5** mostramos fotos de uma fibra microestruturada de núcleo oco guiando por *bandgap* fotônico.

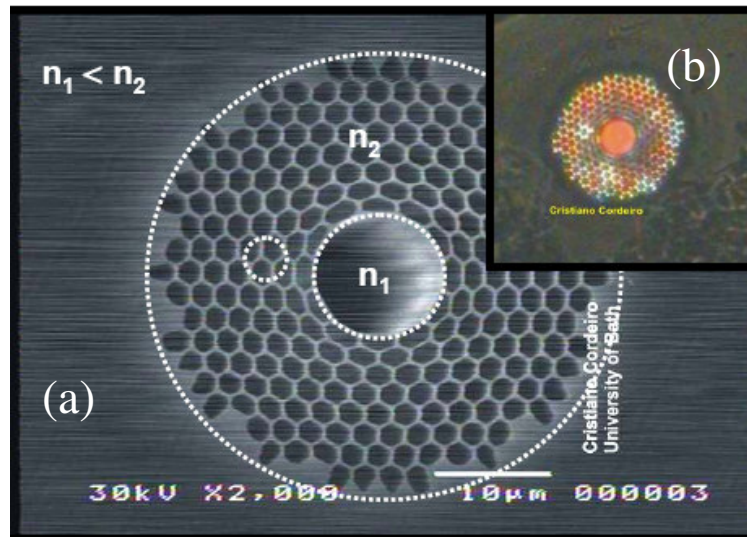


Figura 2.5 – Foto microscopia eletrônica em (a) é de uma PCF de núcleo oco e em (b), a foto de microscopia óptica com a fibra guiando no visível e no comprimento de onda da luz na cor vermelha.

Na **figura 2.5**, temos uma foto microscopia eletrônica em (a), que é uma PCF de núcleo oco, em que definimos n_1 e n_2 para designar respectivamente os índices de refração do núcleo e da casca, onde são o ar e o índice de refração médio (ar+sílica), respectivamente. E também nesta foto evidenciamos um dos vários pontos de alto índice de refração da casca onde ocorrerá o espalhamento coerente da luz incidente na estrutura periódica, para que haja o efeito de *bandgap* fotônico. Em (b), a foto de microscopia óptica com a mesma fibra guiando no comprimento de onda da luz visível na cor vermelha. Vemos também a microestrutura colorida, que seria a luz espalhada na estrutura da casca e os furos de ar na cor preta.

Portanto, ondas em meios com perturbações periódicas sofrem múltiplos espalhamentos quando seu comprimento de onda é comparável ao período destas perturbações. Em determinadas condições, as ondas espalhadas podem interferir construtivamente na direção oposta à direção de propagação da onda. Nesta situação,

a onda não pode se propagar através do cristal, resultando em frequências com propagação proibida. Na **figura 2.6** temos a estrutura de uma fibra de núcleo oco e o esquema de seu guiamento.

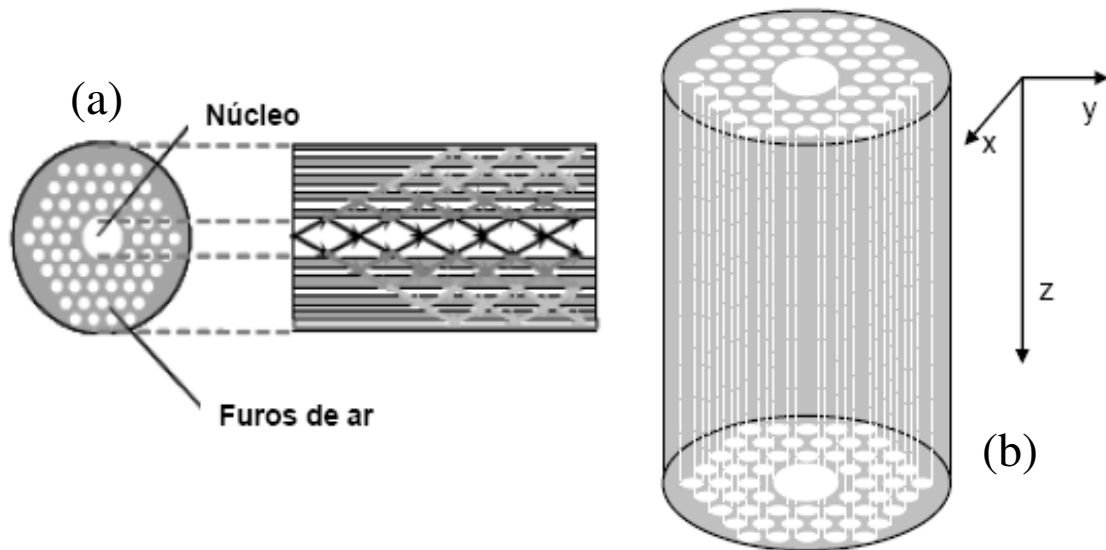


Figura 2.6 – Esquema do guiamento por *bandgap* fotônico.

Ao compararmos a **figura 2.3** com a **Figura 2.6 (a)**, onde temos a ilustração da luz guiada, podemos perceber o espalhamento da luz na estrutura da fibra, em que o tom de cinza vai ficando mais claro e em preto o comprimento de onda guiado no núcleo da fibra por *bandgap* fotônico, isto foi visto na **figura 2.5 (b)**, foto da fibra de núcleo oco guiando na luz visível (comprimento de onda da cor vermelha). E por fim, na **figura 2.6 (b)**, observamos a microestrutura da face da fibra da **figura 2.6 (a)** sendo reproduzida ao longo do comprimento da fibra óptica.

2.2 Nomenclaturas para Fibras Ópticas Microestruturadas:

Com a evolução nos projetos de fibras ópticas tivemos também a introdução de nomes e termos novos, que são comumente usados na área para designar esta nova geração de fibras ópticas. Assim, devemos observar o emprego correto para que não haja equívoco ao classificarmos as fibras microestruturadas ^[1].

Em geral, os termos mais usados para designar este novo tipo de fibras ópticas são: Fibras de Cristal Fotônico (**PCF** - **Photonic Crystal Fibers**), Fibras Microestruturadas (**MSF** - **MicroStructured Fibers**), ou Fibras Ópticas Microestruturadas (**MOF** - **Microstructured Optical Fibers**) ou ainda **Holey Fibers** (**HF** - sem termo específico em português).

Idealmente utiliza-se o termo “fibra de cristal fotônico” para as fibras com distribuição altamente periódica de furos de ar na casca. Já para o caso de “fibra microestruturadas” entende-se que a fibras possui furos micrométricos, mas não necessariamente em um arranjo regular.

Em outra classificação as fibras podem ser divididas em relação a sua forma de guiamento: por **RIT** (como em fibras ópticas convencionais) ou por efeito de *bandgap* fotônico. Entre os diversos tipos de fibras microestruturadas, temos aquelas altamente não-lineares com núcleo de poucos micrômetros, aquelas com área do núcleo grande ou área modal grande, aquelas com alta abertura numérica, e *hollow-core* que guiam por *bandgap* fotônico e etc.

2.3 Fabricação de Fibra Óptica Convencional e PCF:

Nesta seção iremos mostrar a fabricação de fibras convencionais, pois devemos primeiramente entender este processo de fabricação para depois fazermos as modificações necessárias para fabricar as *PCF*'s.

O material dielétrico usado na fabricação de fibras ópticas convencionais deve atender os seguintes requisitos básicos:

- Excelente transparência nas frequências ópticas de interesse;
- Materiais da casca e do núcleo com propriedades térmicas e mecânicas compatíveis e índices de refração ligeiramente diferentes;
- Possibilidade de realização de fibras longas, finas e flexíveis.

Atendem a estas exigências duas classes de materiais: vidros e plásticos. O plástico pode ser utilizado na realização da casca e do núcleo, ou apenas da casca, com vantagens em termos de custos e em aplicações em ambientes hostis, onde sua resistência mecânica é maior. Todavia, é a classe dos vidros a mais interessante para

construção de fibras ópticas aplicadas ao sistema de telecomunicações, em razão das características de atenuação mais favoráveis.

Na classe dos vidros, consideram-se dois tipos fundamentais:

- Vidros de sílica pura ou dopadas;
- Vidros multicompostos.

Portanto, os materiais básicos usados na fabricação de fibras ópticas convencionais são de sílica pura ou dopada, vidros compostos e plásticos. As fibras fabricadas de sílica pura ou dopadas são melhores, em relação à perda óptica, porém, todos seus processos de fabricação são complexos e caros. Nas fibras de vidros compostos e plásticos os processos são mais simples e baratos, comparados aos de sílica. Nas fibras de vidros compostos, são utilizados os métodos: *Rod-In-Tube* e *Double Crucible* (Duplo Cadinho). Nas fibras de plástico, a fabricação da pré-forma é feita por extrusão.

2.3.1 Fabricação de Fibra Óptica Convencional:

Uma vez obtida a pré-forma, por qualquer um dos métodos descritos abaixo, esta é levada a uma estrutura vertical chamada torre de puxamento e é fixada num alimentador que a introduz num forno (normalmente de grafite, que utiliza maçaricos especiais) com temperatura de aproximadamente 2000 °C que efetuarão o amolecimento do material formando um capilar de vidro, a Fibra Óptica. O diâmetro da fibra depende da velocidade de alimentação da pré-forma no forno e da velocidade de puxamento da fibra, ambas controladas por computador. O controle desse processo é feito através de um medidor óptico de diâmetro (que funciona a laser).

- **Processo MCVD (Modified Chemical Vapour Deposition):**

Este processo consiste na deposição de camadas de materiais (vidros especiais) no interior de um tubo de sílica pura. O tubo de sílica é o que fará o papel de casca da fibra óptica, enquanto que os materiais que são depositados no seu interior que farão o papel do núcleo da fibra. O tubo de sílica é colocado em um torno óptico que o mantém girando em torno de seu eixo. No interior do tubo são injetados gases (tetra cloreto de silício, germânio e hidrogênio), com concentrações controladas.

- **Processo PCVD (Plasma Activated Chemical Vapour Deposition):**

A diferença básica deste método, em relação ao MCVD é que ao invés de usar um maçarico de oxigênio, usa-se um plasma para a estimulação dos gases no interior do tubo de sílica. Neste processo, não é necessária a rotação do torno de seu eixo, pois a deposição uniforme é obtida devido à simetria circular da excitação dos gases. A temperatura para deposição é em torno de 1100 °C. As propriedades das fibras fabricadas por este método são idênticas ao MCVD.

- **Processo OVD (Outside Vapour Deposition):**

Este processo baseia-se no crescimento da pré-forma a partir de uma semente, que é feita de cerâmica ou grafite, também chamada de mandril. Este mandril é colocado num torno e permanece girando durante o processo de deposição que ocorre sobre o mandril e os cristais de vidro são depositados no mesmo através de camadas sucessivas. Nesse processo ocorre a deposição do núcleo e também da casca, e obtém-se pré-formas de diâmetro relativamente grande. Para a retirada do mandril coloca-se a pré-forma num forno aquecido a 1500 °C que provoca a dilatação dos materiais.

- **Processo VAD (Vapour-phase Axial Deposition):**

Neste processo, a casca e o núcleo são depositados mais no sentido do eixo da fibra (sentido axial). Neste processo utilizam-se dois queimadores que criam a distribuição de temperatura desejada e também injetam os gases (reagentes). Obtém-se assim uma pré-forma porosa que é cristalizada num forno elétrico à temperatura de 1500 °C. Este processo obtém pré-formas com grande diâmetro e grande comprimento, tornando-o extremamente produtivo.

- **Método Rod-In-Tube (Puxamento de fibra óptica sem Pré-Forma):**

Este método consiste na inserção de vidros na forma de bastão e tubo simultaneamente no forno de puxamento, o qual efetua o amolecimento dos materiais ao mesmo tempo.

- **Double Crucible - Duplo Cadinho (Puxamento de fibra óptica sem Pré-Forma):**

Este processo é semelhante ao anterior, mas os vidros que serão introduzidos no forno da torre de puxamento, que contém dois cadinhos concêntricos, em que o vidro que formará o núcleo da fibra encontra-se (fundido) no cadinho interno, enquanto o vidro que formará a casca da fibra encontra-se (fundido) no cadinho externo. E os dois vidros juntam-se na base dos cadinhos e a fibra é então puxada.

Portanto, acima foi descrito o processo de fabricação de fibras ópticas convencionais, onde temos alguns estágios acrescidos ao mesmo, para fabricarmos as *PCF's*. Mas a maior diferença na fabricação das *PCF's* é o procedimento para obter a pré-forma, os quais serão descritos a seguir.

2.3.2 Fabricação de *PCF*:

Nesta seção iremos descrever os procedimentos usados para obtenção das pré-formas das *PCF's*, que são: Furação, Extrusão e Empilhamento de capilares.

- **Furação da pré-forma:**

A pré-forma por furação consiste na perfuração sistemática e controlada dos furos que formarão a estrutura da casca da fibra em um material cilíndrico, por exemplo, o plástico, mas em tamanho macroscópico.

O processo é todo controlado por computador, onde ligado a este temos uma furadeira que fará os furos com precisão no cilindro, sendo que a furação será feita com um fluido resfriador para que não haja o derretimento do material durante o processo, por causa do aquecimento pelo atrito local entre a broca e o material, tudo fixado em torno industrial para que não haja erros de furação. Na **figura 2.7** mostramos uma foto do processo descrito e o resultado final, a pré-forma, e um exemplo de pré-forma após puxamento ^[13].

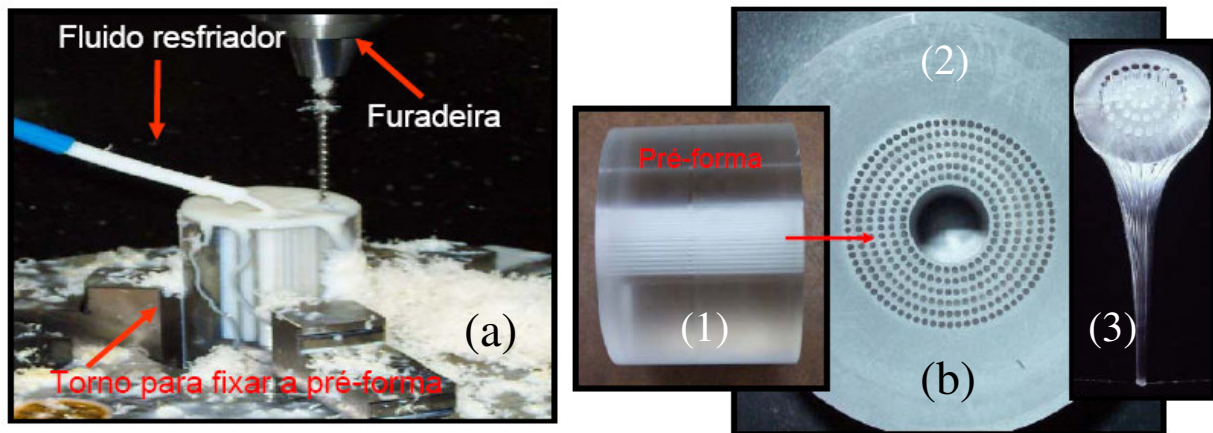


Figura 2.7 – Em (a) temos a foto do processo de furação de uma pré-forma em cilindro plástico ou polímero, em (b) a pré-forma na sua vista lateral com os furos passantes no cilindro (1), depois vemos a foto de uma das faces com a estrutura da fibra (2) e em (3) uma pré-forma após puxamento na torre.

Após término do processo, obtemos um cilindro com furos passantes nas duas faces do mesmo, como mostrado na **figura 2.7 (b-1 e b-2)**. Portanto a pré-forma já estará pronta para ser levada para a torre de puxamento, sendo que só faltaria introduzir esta pré-forma em um tubo também do mesmo material com espessura das paredes pré-definida, que será a casca mais externa à microestrutura da fibra no formato final.

Este processo é indicado para fibras microestruturadas feitas de plástico, pois tem a vantagem de ser muito mais versátil do que o método de extrusão em relação aos desenhos das geometrias das fibras obtidas desta forma. Este processo é válido também para vidro, mas é muito difícil de ser realizado.

- **Extrusão da pré-forma:**

Neste processo por extrusão obtemos a pré-forma usando uma pequena quantidade de material, podendo usar vidro ou plástico, que é aquecido até o ponto de amolecimento do material e então aplicamos pressão ao mesmo, e com isto empurramos este material sobre uma máscara, onde está feita a geometria da fibra. O resultado é a pré-forma moldada na máscara.

A desvantagem deste processo é que máscara fornece poucas opções de geometria para a estrutura da fibra. Mostramos abaixo o desenho do corpo de uma extrusora, onde identificamos o local para colocar o material para ser aquecido, a

máscara e por fim a foto da face ou a seção transversal da pré-forma. E abaixo deste desenho observamos a foto da pré-forma, onde indicamos o comprimento conseguido e o diâmetro da mesma ^[13].

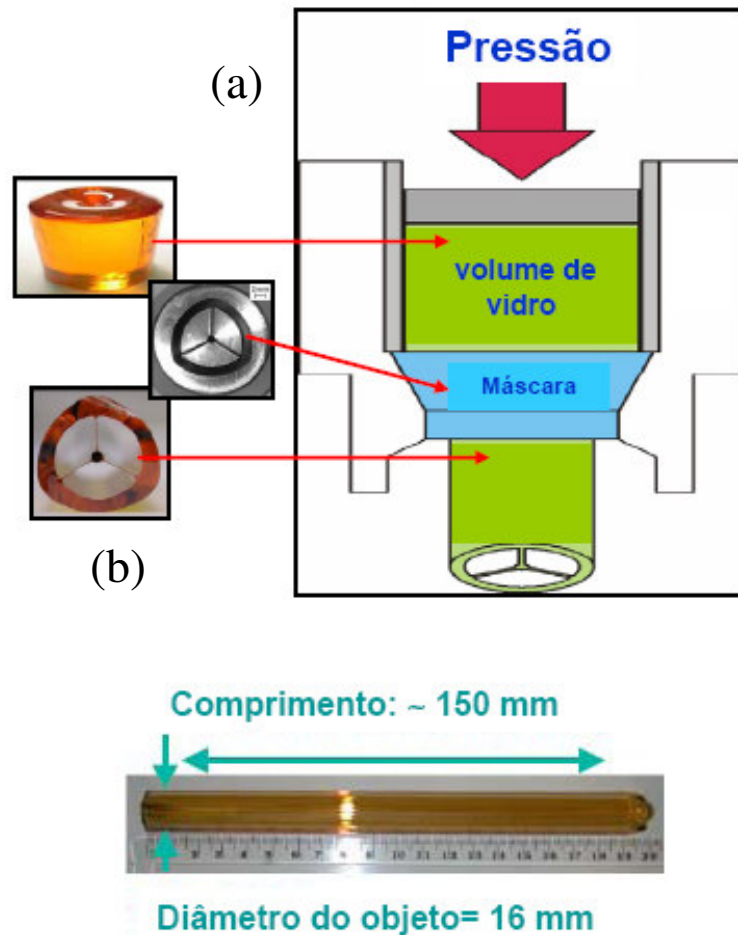


Figura 2.8 – Desenho de uma extrusora em (a) e em (b) a pré-forma feita por este processo.

- **Empilhamento da pré-forma:**

Este processo se inicia na escolha do vidro ou fabricação do mesmo, e então temos tubos ou bastões de vidro limpos para ser levados para a torre de puxamento e assim realizar o puxamento de capilares dos mesmos, afim de que fiquem com o diâmetro de poucos milímetros.

Neste processo podemos observar toda a criatividade, habilidade e paciência dos pesquisadores para a montagem da estrutura, pois consiste em um empilhamento minucioso de capilar por capilar de vidro, em um tubo de vidro de alguns centímetros de diâmetro e assim formando o desenho da estrutura da fibra.

A vantagem deste procedimento é que podemos manipular a geometria de tal forma que, por exemplo, podemos ter fibras com múltiplos núcleos, basta que coloquemos vários capilares sólidos em vez dos ocos na hora de forma a estrutura, fibras com núcleo dopado, sendo que é só inserir um capilar de vidro dopado, enfim muitas opções.

Mostraremos agora o esquema de uma torre de puxamento usada para fabricação de fibras ópticas convencionais e de *PCF's*, e também as fotos da Torre da Unicamp-IFGW. Depois teremos um desenho da montagem da pré-forma já descrita acima, fotos de um tubo e capilares de vidro telurito fabricados na Unicamp-IFGW e a fibra fabricada a partir destes capilares.

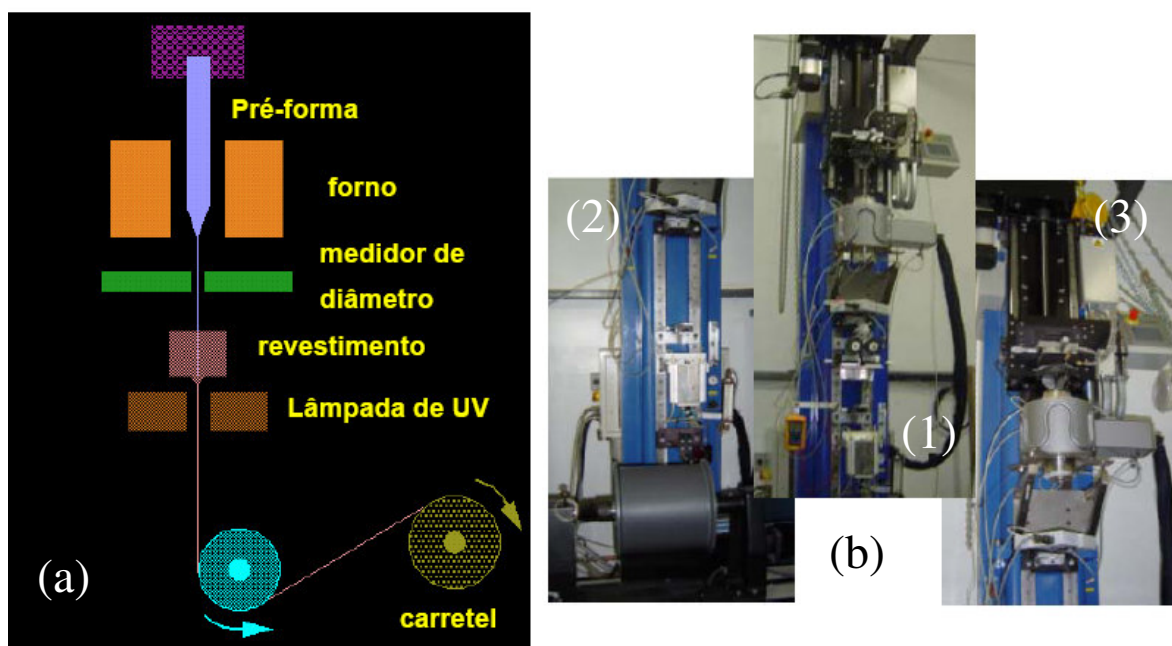


Figura 2.9 – Em (a) temos o desenho das partes principais de uma torre de puxamento de fibra óptica convencional e em (b), colocamos três fotos da torre de puxamento instalada na Unicamp-IFGW, no Laboratório de Materiais Vítreos do Prof. Dr. Luiz Carlos Barbosa.

Na **figura 2.9**, em **(a)** observamos o desenho de uma torre de puxamento de fibra óptica convencional e os nomes das principais partes da torre de puxamento. Em **(b)**, temos três fotos da torre de puxamento instalada na Unicamp-IFGW. A foto **(b-1)** é uma visão geral da torre, em **(b-2)** enfatizamos as partes do revestimento da fibra, a lâmpada de UV para a secagem do revestimento e o carretel onde a fibra será enrolada e em **(b-3)**, as partes onde prendemos a pré-forma, o forno e o medidor de diâmetro da fibra.

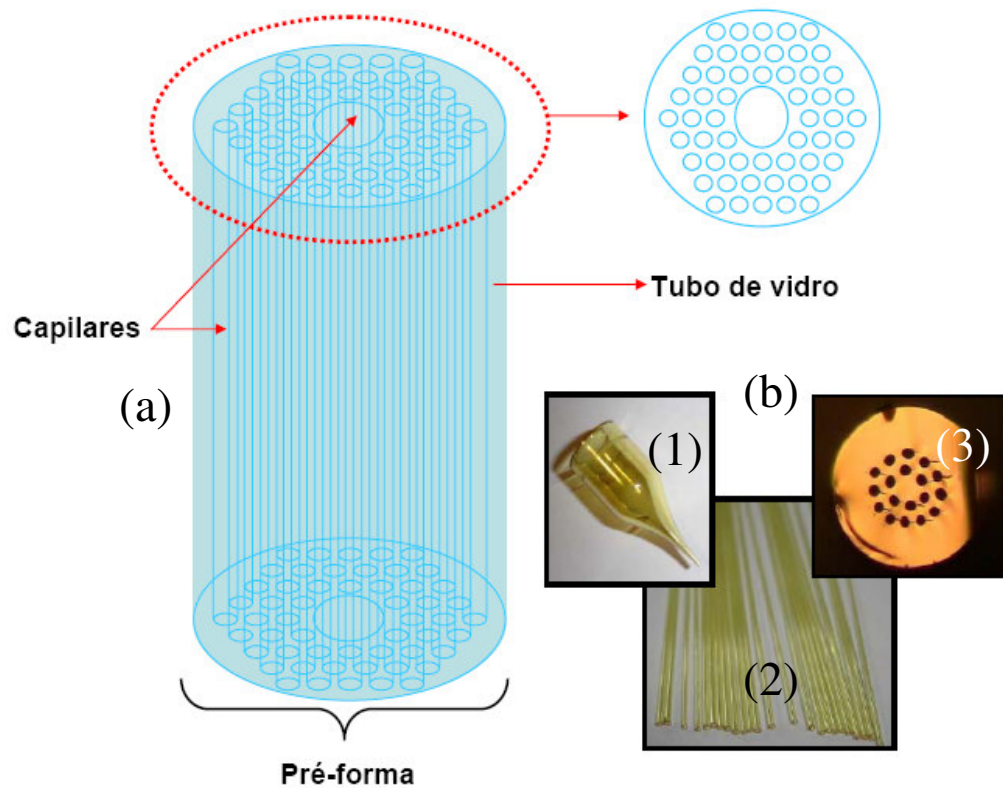


Figura 2.10 – Desenho do processo de empilhamento de capilares (a), onde visualizamos o desenho da face com os furos. Em (b), temos o tudo de vidro para fazer os capilares (1), depois os capilares (2), e por fim a face da fibra pronta (3).

Após evidenciarmos as diferenças entre fibras convencionais e micro estruturadas em relação às formas de guiamento e fabricação, vamos agora mencionar as vantagens e desvantagens dessas novas fibras em relação às fibras convencionais, o que existe de atraente nestas para a evolução em fibras ópticas, o que será descrito a seguir.

2.4 Vantagens das Fibras Microestruturadas:

Podemos observar que este novo tipo de fibra óptica trouxe muitas novidades e avanços na tecnologia de fibras ópticas, como na forma de fazer a pré-forma, e a própria presença de furos de ar. Temos exemplos específicos destes avanços que inclui o guiamento monomodo sobre uma larga escala de comprimento de onda; fibras de baixa perda por curvatura; fibras de grande área modal; fibras com alta não-linearidade; guiamento em região de baixo índice de refração pelo efeito de *bandgap* fotônico, e geração de dispositivos à fibra por inserção de materiais dentro das fibras ^[14]. Na **figura 2.11** temos exemplos de fibras microestruturadas para algumas destas aplicações citadas.

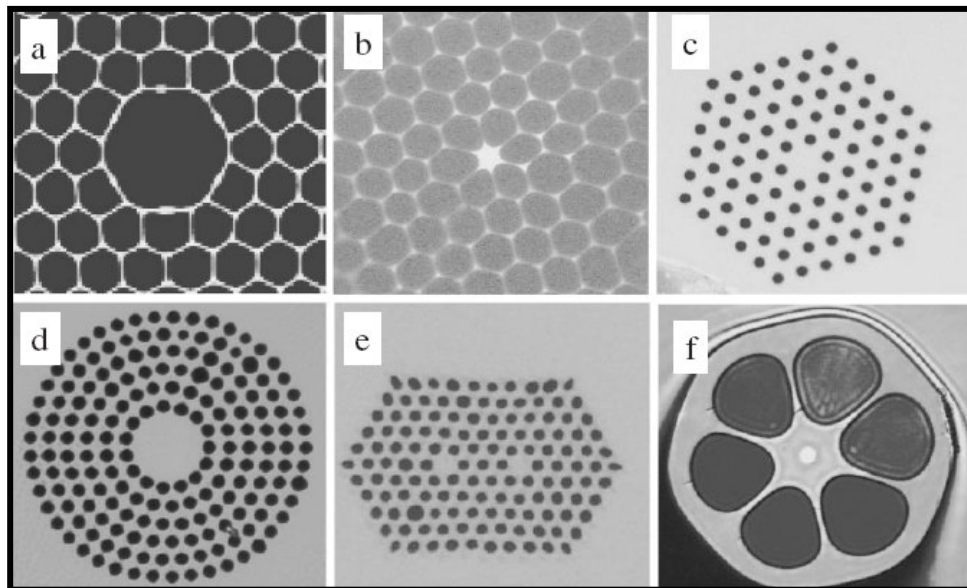


Figura 2.11 – Fotos das seções de transversais ou face de vários tipos de fibras micro-estruturadas ^[14]. As partes em branco nas fotos correspondem à sílica enquanto as regiões em pretos são os furos de ar.

Na **figura 2.11**, a foto **(a)** é uma fibra de núcleo oco que guia por *bandgap* fotônico, em **(b)** uma fibra de núcleo sólido pequeno com alta fração de ar, que podemos ter efeitos não-lineares e aplicações de sensor, em **(c)** fibra microestruturada monomodo, em **(d)** fibra com modelo circular de furos, em **(e)** fibra com dois núcleos e **(f)** fibra com grandes furos de ar. Ainda podemos ter vantagem no que diz respeito ao controle da dispersão cromática, a não-linearidade do guia, que permite o confinamento da luz em uma área muito pequena com alta intensidade. A única desvantagem é o

processo de fabricação mais difícil. Daqui por diante iremos enfatizar o sensoriamento a fibra óptica, pois realizamos estudos e experimentos nesta área no decorrer desta dissertação.

2.5 Sensoriamento a Fibra Óptica Convencional:

No estudo de sensores a fibra óptica, se uma grandeza física como, por exemplo, a temperatura, atua sobre as propriedades físicas da fibra óptica, as características da luz que se propaga na fibra são modificadas possibilitando, em princípio, e através de uma leitura adequada dessas alterações, a determinação dessa grandeza física. Dado que a luz é caracterizada por um conjunto de parâmetros independentes, como a intensidade, a frequência óptica, a fase e a polarização, todos potencialmente sensíveis às mais variadas grandezas físicas. Os primeiros sensores a fibra óptica que podemos considerar como os marcos do início desta nova área de estudo, foi o giroscópio e o sensor de corrente elétrica. Estas experiências demonstraram que as fibras ópticas possuíam um elevado potencial a ser explorado nas mais diversas aplicações de medição.

O caso do giroscópio demonstrou que se podiam construir interferômetros ópticos totalmente em fibra óptica; no caso do sensor de corrente elétrica, mostrou-se que um único cabo de fibra óptica poderia simultaneamente ser usado como sensor e como canal flexível de transmissão, permitindo assim, que as medições pudessem ser realizadas em ambientes hostis. Mostramos abaixo um resumo das características de sensores à fibra óptica convencional, mas destacamos, em azul, as principais características que demonstram as vantagens da mesma em relação a outros sensores convencionais e na seção seguinte partiremos para uma classificação geral de sensores a fibra óptica ^[15].

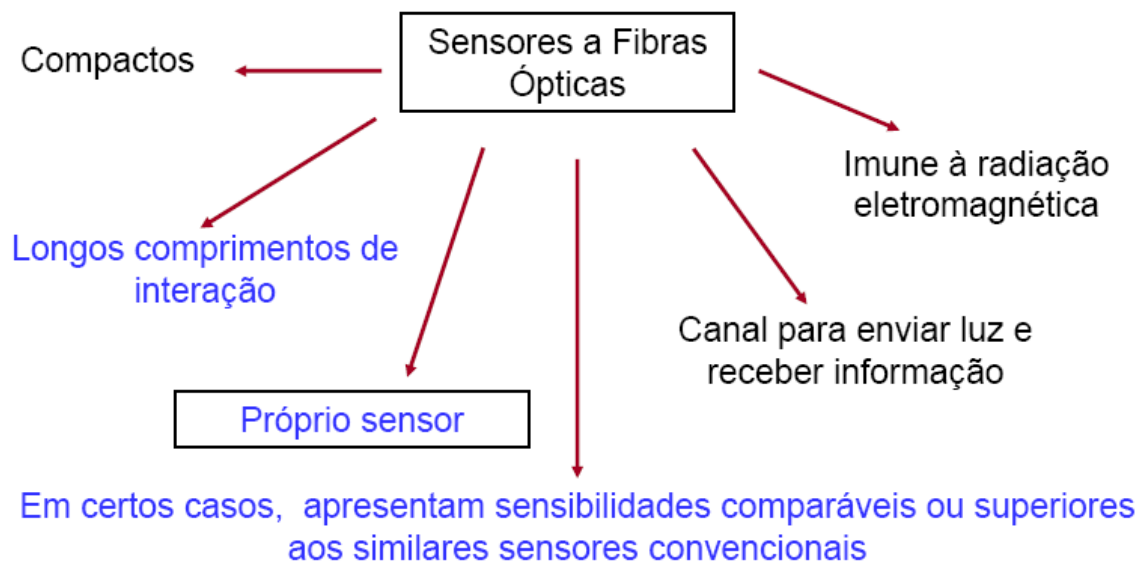


Figura 2.12 – Resumo das principais características de sensores a fibra óptica convencional.

2.5.1 Classificação de Sensores a Fibra Óptica Convencional:

Os sensores a fibra óptica podem ser classificados de várias maneiras. Podem ser agrupados, por exemplo, em duas categorias principais:

- **Sensores Extrínsecos e/ou Híbridos:**

Caracterizado pelo fato da medida ser feita numa região externa à fibra óptica, isto é, a fibra óptica é usada apenas como canal óptico de transporte da luz até ao local de monitorização. Como este tipo de sensor não é totalmente óptico, embora seja extrínseco é normalmente designado por sensor híbrido.

- **Sensores Intrínsecos:**

Nesta categoria de sensores a medida é feita diretamente na fibra, alterando uma ou mais propriedades ópticas da luz guiada. Em outras palavras, o elemento sensor é a própria fibra. Os sensores a fibra óptica, extrínsecos e intrínsecos, operam através da manipulação de uma ou mais das seguintes características da luz guiada: intensidade, comprimento de onda ou frequência, polarização e fase. Cada uma das quais potencialmente sensível à determinada grandeza física.

2.5.2 Sensoriamento a Fibra Microestruturada:

O sensoriamento à fibra microestruturada trás a vantagem imediata de inserção do material dentro da fibra, por causa da presença dos microfuros de ar na estrutura da fibra, onde podemos obter maior interação do material com a luz guiada na mesma. Isto permite maior sensibilidade do que colocar um material em uma cubeta, por exemplo, onde teremos alguns poucos centímetros de interação da luz com o material, mas com material dentro da fibra há um longo comprimento de interação ao longo de toda fibra.

As fibras microestruturadas como já foram mencionadas tem dois grandes grupos: fibras de núcleo sólido e de núcleo oco. Em relação à inserção de fluidos dentro da fibra a fim de medir a natureza do fluido ou aumentar a sensibilidade da fibra para um parâmetro externo, que se queira medir, podemos ter três situações:

- Fibra de núcleo sólido com fluido na casca microestruturadas guiando por **RIT**. Este tipo de preenchimento pode ser utilizado para sensoriamento de gás, por exemplo;
- Fibra de núcleo oco com apenas o núcleo cheio, também guiará por **RIT**, pois agora o núcleo terá maior índice que a casca. Este tipo de estrutura (fibra com núcleo líquido) pode ser utilizado para sensoriamento, estudos de óptica não-linear e etc;
- Fibra de núcleo oco com fluido em todos os furos (casca e núcleo) guiando por *bandgap* fotônico.

O sensoriamento à fibra microestruturada com o preenchimento do material a ser estudado, podemos ter três casos distintos:

- Fibra de núcleo sólido pelo campo evanescente;
- Fibra de núcleo líquido guiando por **RIT**;
- Fibra de núcleo oco toda preenchida com fluido guiando por *bandgap* fotônico.

Agora vamos descrever cada caso em relação ao seu guiamento após preenchimento e aplicação.

- **Sensoriamento via “Campo Evanescente”:**

As fibras microestruturadas com núcleo sólido guiam por **RIT**, sabemos que a luz guiada decai exponencialmente nas interfaces entre os dois meios, onde um pouco desta luz no índice maior penetra na casca microestruturada, e esta fração de energia luminosa é chamada de campo evanescente ^[16].

Contudo devemos nos lembrar que esta fração de energia que escapa do núcleo está relacionada com o confinamento da luz no núcleo. Então quando menor o núcleo maior será a fração de energia luminosa penetrando na casca, isto se deve a relação entre tamanho do núcleo e comprimento de onda.

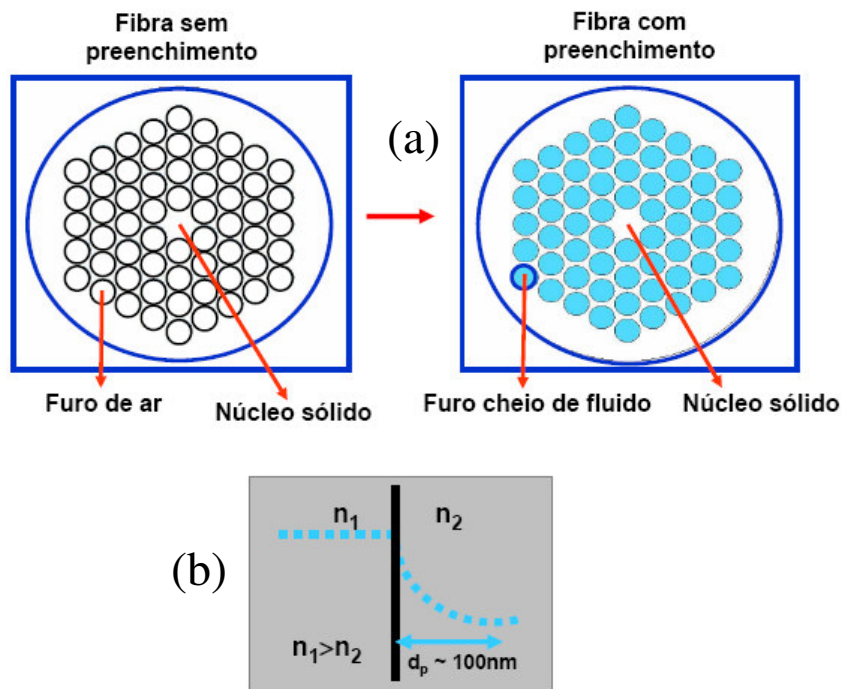


Figura 2.13-Esquema de uma fibra de núcleo sólido sem preenchimento e preenchida (a). Em (b) o desenho para demonstrar o campo evanescente na interface de dois meios de índice de refração diferentes e enfatizamos a pequena penetração do campo evanescente (d_p) no meio de menor índice de refração, que é aproximadamente de 100 nm.

Portanto podemos fazer estudos de sensoriamento ou espectroscopia de gases, por exemplo, e ao final da análise obteremos a assinatura do gás no equipamento adequado. Esse tipo de análise pode ser usada para detectar substâncias nocivas aos seres humanos ou animais em geral, mas também para verificar a contaminação, por exemplo, de água ou mesmo a qualidade do ar que respiramos.

Então, foi realizado neste trabalho o estudo do gás acetileno via campo evanescente, onde obtemos picos de absorção do mesmo, isto será bem mais explicado no capítulo 4, que é dedicado a sensoriamento a fibra microestruturada de núcleo sólido, onde foi feita a medida da natureza do fluido (gás acetileno) e também em outra aplicação via aumento da sensibilidade da fibra para dois parâmetros externos que queremos medir a perda por curvatura e a temperatura.

- **Sensoriamento a Fibra de Núcleo oco guiando por RIT:**

Antes das fibras microestruturadas as possibilidades de se produzir um guia de onda com núcleo líquido se resumia a usar líquidos com alto índice de refração ou guias de onda feita com material de baixo índice de refração, como o teflon. Estas opções claramente limitavam os materiais passíveis de serem usados, além das possíveis aplicações^[17, 18].

Nesta dissertação foram realizados estudos de como preencher estas fibras e assim conseguimos produzir fibras de núcleo líquido, por três processos de preenchimento diferentes, que são: o processo de preenchimento seletivo com polímero; o processo de preenchimento seletivo usando a máquina de emendar fibras (*Splicer*) e o processo de acesso lateral, que é um processo desenvolvido neste trabalho. Isto será bem mais explicado no **capítulo 3**, que é dedicado ao estudo dos processos de preenchimento, onde também foi feito um processo novo, em que inserimos dois líquidos simultaneamente na fibra, para o estudo da mudança dos modos guiados na fibra. Abaixo mostramos um desenho com o resultado, uma fibra de núcleo líquido, após uns dos processos mencionados acima.

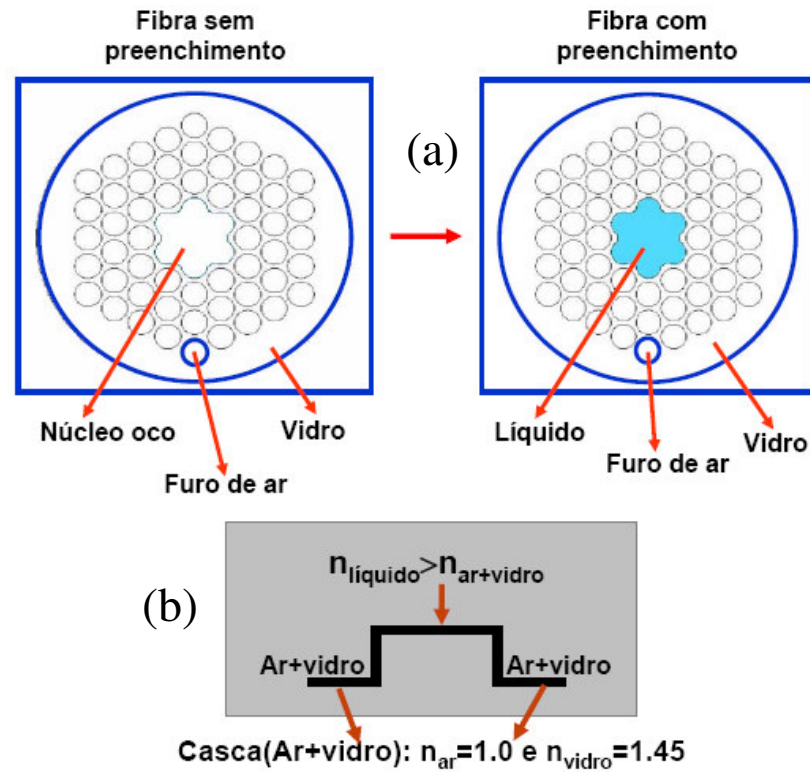


Figura 2.14—Esquema de uma fibra microestruturada de núcleo oco sem preenchimento e preenchida (a). Em (b) o desenho para demonstrar o perfil de índice, onde identificamos a casca (ar+vidro) e o aumento do índice de refração do núcleo com a presença do líquido no núcleo.

- **Sensoriamento a Fibra de Núcleo oco totalmente preenchido guiando por Bandgap Fotônico:**

Nesta seção mostraremos o sensoriamento à fibra microestruturada de núcleo oco sendo que se faz o preenchimento de todos os furos da fibra e assim manteremos a sua forma original de guiamento, o *bandgap* fotônico.

Neste caso o material estará em toda a estrutura da fibra, mas sabendo que ela guiará por *bandgap* fotônico, então obteremos faixas específicas de luz sendo guiada na fibra e por isso restringe o estudo para materiais. Este caso não faz parte do estudo da dissertação, mas é a forma mais trivial de preenchimento em relação a este tipo de fibra.

Temos por fim a ilustração da fibra preenchida e uma medida feita ^[19], onde é enfatizada a presença do material na fibra por causa do estreitamento das faixas de comprimento de onda em que a luz é guiada e a mudança de comprimento de onda para o guiamento da luz com a presença do material.

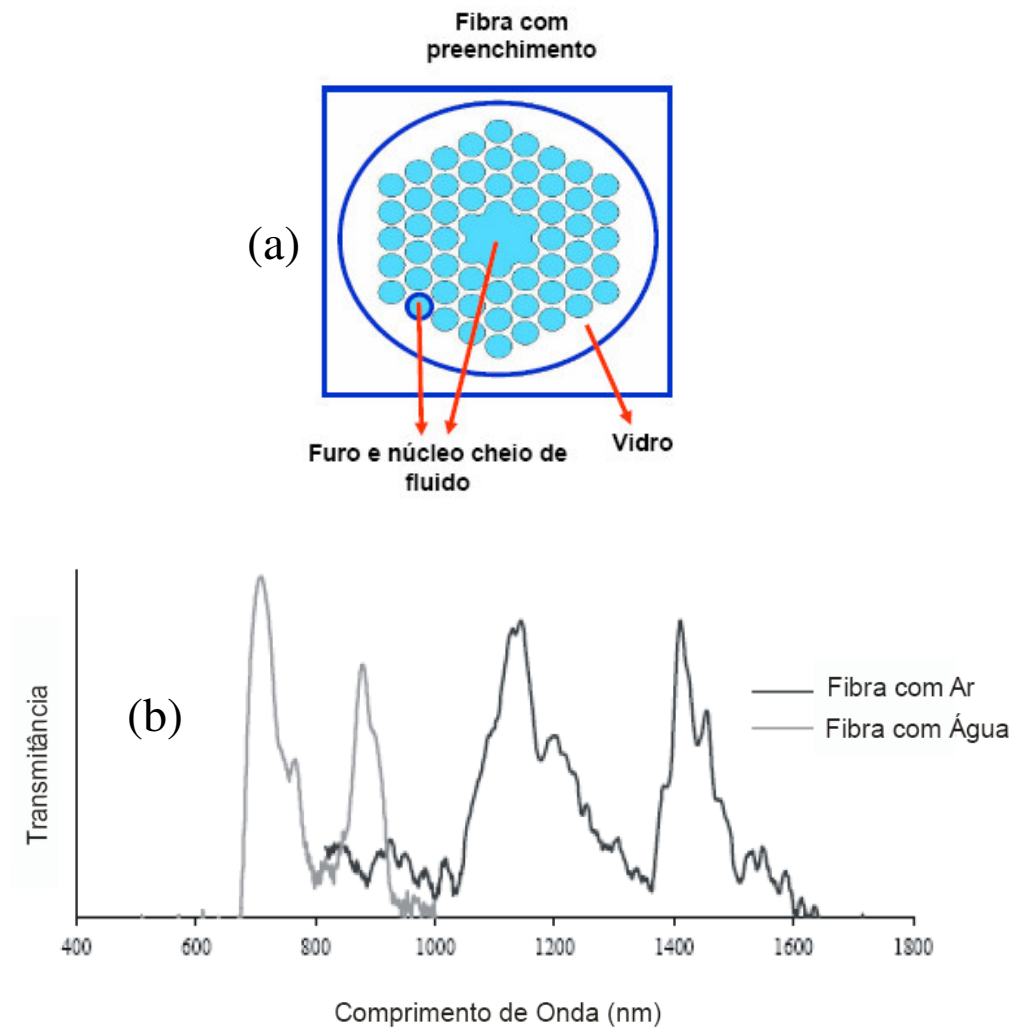


Figura 2.15–Esquema de uma fibra microestruturada de núcleo oco com preenchimento (a). Em (b), o gráfico da medida feita com ar (linha escura) e com água (linha cinza).

No **capítulo 3** mostraremos o estudo do processo de preenchimento nas fibras microestruturadas e preenchimento seletivo para obtermos fibras de núcleo líquido e mais aplicação direta destes, e também o processo de inserção de dois líquidos simultaneamente para o estudo da manipulação dos modos guiado na fibra após este preenchimento.

Capítulo 3

Processos de Preenchimento nas Fibras Microestruturadas

A microestrutura presente na fibra abre várias aplicações, tanto no caso de fibra de núcleo sólido quanto na de núcleo oco, mas vamos nos focalizar na área de sensoramento a fibra. No sensoramento usamos os microfuros para inserir líquido ou gás e desta maneira poder manipular o guiamento da fibra, em fibras de núcleo líquido, deixar a fibra mais sensível a certo parâmetro externo ou sensoriar o próprio fluido (líquido ou gás). Nos três casos precisamos estudar processos de preenchimentos em fibras microestruturadas.

Para este fim, foi feito à reprodução e também o desenvolvimento de maneiras de inserção de material (líquido ou gás) na casca, no caso de fibras de núcleo sólido. E em fibras de núcleo oco, estamos interessados em produzir fibras de núcleo líquido, onde temos uma alta sobreposição da luz guiada e com o material, neste caso precisamos fazer preenchimento seletivo na fibra, e desenvolver a partir disto outras aplicações em óptica e áreas afins.

Este capítulo está dividido em três processos de preenchimento usados nesta dissertação, que são: o processo de preenchimento seletivo para obter fibras de núcleo líquido que é subdividido: pelo uso da máquina de emendar fibras (*Splicer*) e pelo uso de polímero para bloquear os microfuros da fibra. Temos também o processo desenvolvido neste trabalho para preencher as fibras, que será bem mais explicado no **apêndice 1**. E por fim, a aplicação usando o conhecimento dos processos de preenchimento seletivo e o resultado.

3.1 Processos de Preenchimentos para Fibras Microestruturadas:

O processo de preenchimentos nestas fibras consiste de três formas: por capilaridade, por sucção e por pressão. Em todos os casos utilizamos uma das pontas da fibra para fazer o preenchimento. No primeiro utiliza-se a força de capilaridade em tubos circulares^[20], pois ao imergirmos um tubo capilar dentro de um líquido, o mesmo entra em contato com as paredes do tubo e assim preencherá o tubo capilar conforme descrito na equação abaixo.

$$F_{Capilaridade} = 2\pi a \sigma \cos(\theta), \quad (3.1)$$

onde (a) é o raio do tubo capilar, (σ) é tensão superficial e (θ) é o ângulo de contato do líquido com as paredes do tubo capilar.

Esta forma é usada para preencher uma porção pequena da fibra. A outra forma de preencher é sugar o material para dentro da fibra, onde a ponta livre está em contato com o líquido a ser sugado e na outra ponta é feito vácuo, por exemplo, com uma seringa conectada à fibra pela agulha, quando sugamos o ar para dentro da mesma.

No preenchimento via pressão, que é usado tanto para líquido ou gás, consiste no uso de um recipiente fechado com o fluido (líquido ou gás), onde a fibra está conectada. Para líquidos aplicamos uma pressão constante para que o líquido penetre nos microfuros da fibra. Para o gás, temos que o recipiente conectado a fibra é preenchido de gás controlando a pressão dele, em ambos podemos preencher qualquer comprimento de fibra.

Portanto, estas são as formas mais simples de se preencher uma fibra microestruturada e a partir disso podemos elaborar processos mais refinados para a inserção de fluido (líquido ou gás), onde há a possibilidade de escolher qual parte da fibra (núcleo ou casca) que iremos preencher. Então, podemos usar o preenchimento de fibras microestruturadas das seguintes formas:

- Usar a interação da luz guiada com o líquido, no caso de fibras de núcleo líquido, para o estudo do líquido inserido ou manipular o guiamento da fibra;
- Fazer o preenchimento da casca da fibra, no caso de fibras de núcleo sólido, para o estudo da interação da luz guiada com o fluido (líquido ou gás) via campo evanescente ou deixar a fibra mais sensível a um parâmetro externo.

Com a possibilidade de escolha da parte da fibra a ser preenchida, podemos ter aplicações tanto na área de sensoramento à fibra como óptica não-linear e outras áreas afins. Na seção seguinte vamos descrever os processos de preenchimentos mais elaborados, que foram citados no início deste capítulo e usados no trabalho. E mostraremos a aplicação imediata destes processos e a sua importância no estudo das fibras microestruturadas.

3.1.1 Processo de Preenchimento Seletivo para obter Fibras de Núcleo Líquido:

Este processo de preencher seletivamente a fibra nos proporciona liberdade de inserir fluido em lugares específicos da fibra microestruturada. Antes do advento da fibra microestruturada, os guias de onda líquidos eram obtidos através da utilização de líquidos com alto índice de refração ou guia de onda produzida com material de baixo índice de refração, como o teflon ^[17]. Portanto o estudo de como preencher uma fibra microestruturada seletivamente é muito importante para o desenvolvimento destes guias de onda líquidos e outras possíveis aplicações.

Como citamos, nós temos duas maneiras de se obter este preenchimento seletivo em fibras microestruturadas de núcleo oco, que serão tratados a seguir.

- **Processo pelo uso da Máquina de Emendar Fibras Ópticas:**

Neste processo nós utilizamos a máquina de emendar fibras ópticas para fechar exclusivamente a casca microestruturada da fibra de núcleo oco, pois pelo trabalho de *Bruno Bourliaguet et al* ^[21] vemos que isto é possível.

O processo consiste no uso de uma ponta da fibra, que estará descascada e clivada em alguns poucos milímetros para limpar a face da fibra. Depois fecharemos somente a casca da fibra na máquina de emendar fibras, em uma porção (poucos milímetros) da ponta escolhida.

O processo é feito com arcos curtos, pois não queremos colapsar toda a estrutura da fibra, só queremos obter o derretimento do vidro da casca e consequentemente sua obstrução local deixando o núcleo aberto. Nas **figuras 3.1 e 3.2** temos o esquema de como é feito o processo de fechar a casca com a máquina de emendar fibras ópticas.

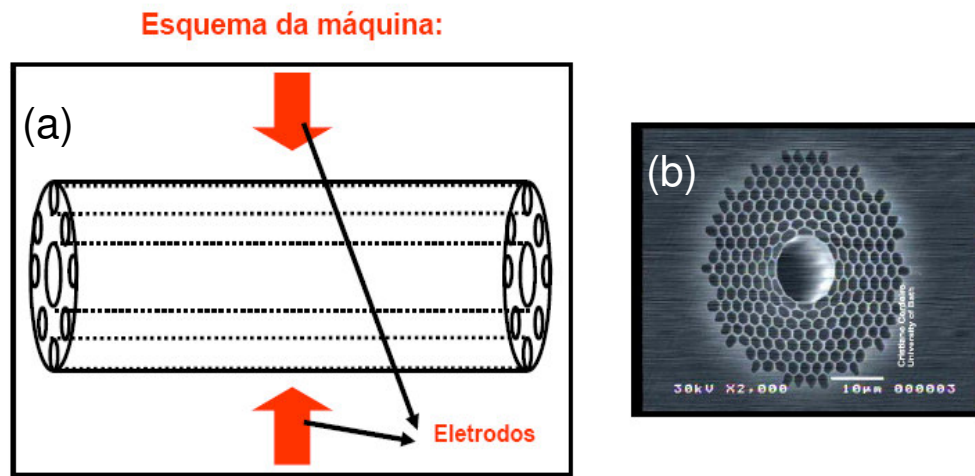


Figura 3.1 – Em (a) o desenho da fibra dentro da máquina de emendar fibra, onde indicamos os eletrodos do mesmo, já em (b) a foto de microscopia eletrônica da fibra de núcleo oco usada no experimento.

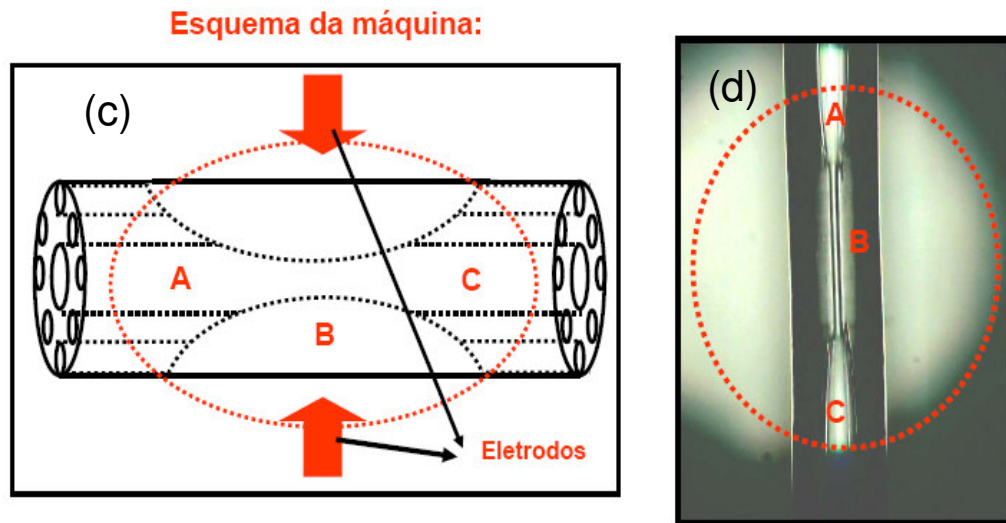


Figura 3.2 – Em (c), indicamos no desenho da fibra após arco elétrico, onde identificamos três pontos: A e C identificam as interfaces onde a casca está aberta de um lado e colapsada do outro e B mostra a parte onde a casca foi totalmente colapsada e enfatizando somente um tudo aberto, o núcleo, e estes pontos correspondem aos três pontos assinalados na foto de microscopia óptica, em (d), de uma fibra após este processo, respectivamente.

Após o colapso da casca em uma das pontas da fibra, nós iremos utilizá-la para fazer o preenchimento dela. Iremos introduzi-la, cerca de 1 centímetro ou um pouco mais dentro de uma agulha de seringa e colar a fibra, sem quebrar para não perder a porção da casca fechada. Depois de seca a cola, é só conectar a agulha na

seringa, enchê-la com o líquido que será inserido somente no núcleo da fibra e aplicar pressão constante no êmbolo da seringa para iniciar o preenchimento, e o final do processo é quando observamos uma gota na ponta livre da fibra, esta gota é observável em fibras que contenham furos relativamente grandes na sua estrutura. Na **figura 3.3** mostramos uma foto da fibra guiando com seu núcleo líquido, por reflexão interna total, pois agora temos o índice do núcleo (água: 1,333) maior do que da casca da fibra.

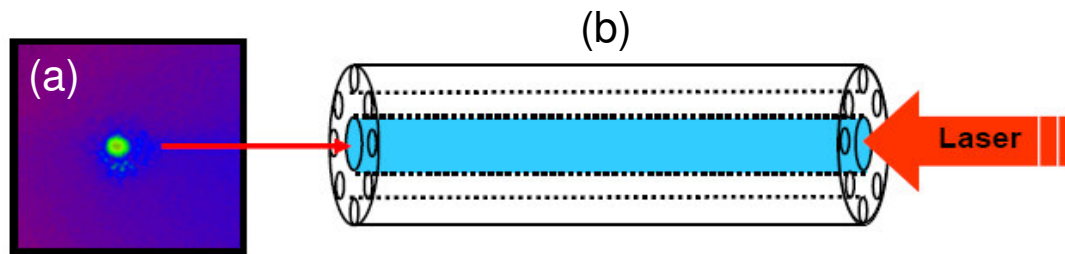


Figura 3.3 – Em (a), a foto de uma câmera CCD de uma fibra de núcleo líquido (água) guiando no mesmo por reflexão interna total, onde a fibra está colocada em um posicionador (xyz) alinhada através de dois espelhos a um laser de He-Ne com a saída da fibra voltada para a câmera CCD.

Portanto, este processo é prático e fácil mais não pode ser usado para todos os tipos de fibras, como por exemplo, fibras de núcleo muito pequeno, pois fica difícil ou impossível verificar no monitor da máquina de emendar fibras se colapsamos somente a casca dela; fibras plásticas ou de outro material que não seja sílica, pois o arco elétrico é para derreter sílica (aquece em torno de 2000°C) e com isso poderemos destruir a fibra localmente.

Logo, precisamos de um processo de preenchimento seletivo que possa ser utilizados em fibras de qualquer material. Então, iremos reproduzir um processo na seção seguinte, que utiliza polímero (adesivo óptico) para preencher os microfuros da estrutura da fibra, que tem secagem ou cura com radiação ultravioleta (UV) e assim bloquear os microfuros da fibra. Mas antes mostraremos o novo processo desenvolvido a partir do processo mencionado acima.

- **Processo de Acesso Lateral na Fibra Microestruturada:**

Nesta dissertação foi desenvolvido um processo de preenchimento que pode ser usado tanto em fibras de núcleo sólido ou oco ^[22]. Ele consiste em fazermos um furo na lateral da fibra, usando a máquina de emendar fibras, para o preenchimento da fibra. A vantagem deste processo em relação aos outros é que as pontas da fibra ficam livres para manuseio óptico em um experimento. Isto é uma importante evolução na forma de preencher as fibras microestruturadas. Este processo está detalhado no **Apêndice 1**.

- **Processo de Preenchimento Seletivo para Fibra Microestruturada com Polímero:**

Nesta seção iremos descrever a reprodução do trabalho teórico de inserção de líquido de *Kristian Nielsen et al* ^[23] e o processo de preenchimento seletivo com polímero do trabalho experimental de *Yanyi Huang et al* ^[24], que cita o teórico acima. No primeiro temos a previsão do comprimento preenchido de uma fibra por um fluido específico em relação a um intervalo de tempo nos diferentes diâmetros dos microfuros encontrados na estrutura da fibra.

O modelo teórico é baseado na diferença dos diâmetros dos microfuros (núcleo e casca) que formam a estrutura da fibra, pois há diferença de velocidade de preenchimento dentro deles e consequentemente comprimentos diferentes de preenchimentos na fibra em relação aos diâmetros dos microfuros, quando aplicamos alta pressão no fluido a ser inserido na fibra.

Esta teoria nos fornece uma simulação em função do tempo, da diferença entre os comprimentos preenchidos nos microfuros da fibra, da pressão aplicada e dos parâmetros do líquido necessários para descrevê-lo na equação usada na simulação. Para o caso das dimensões dos microfuros da fibra, o regime do fluxo de líquido dentro deles é laminar.

A simulação também está em função de quatro forças que atuam no líquido dentro dos microfuros da fibra para descrever o preenchimento da estrutura da mesma, as forças são descritas no trabalho de *Kristian Nielsen et al*, e foram usadas para obter a equação de preenchimento de líquidos em microfuros em função do tempo, dadas por:

$$L(t) = \left(\frac{A}{B^2} \exp(-Bt) + \frac{At}{B} - \frac{A}{B^2} \right)^{1/2}, \text{ com} \quad (3.2)$$

$$A = \frac{4\sigma \cos(\theta) + 2\Delta P a}{\rho a} \text{ e } B = \frac{8\mu}{\rho a^2}, \quad (3.3)$$

onde A está em função da Tensão superficial (σ), do raio do microfuro da fibra (a), do ângulo de contato do líquido com as paredes do microfuro (θ), da diferença de pressão entre o líquido na fibra com sua ponta livre (ΔP) e da densidade do líquido (ρ). E B em função da viscosidade dinâmica (μ), da densidade do líquido (ρ) e do raio do microfuro (a).

Para obtermos a **equação (3.2)** foi utilizada uma equação diferencial em função das quatro forças que atuam sobre o líquido dentro dos microfuros da fibra, descrito no trabalho teórico de referência ^[23], mas houve a necessidade de negligenciar a parte que continha a força gravitacional, pois foi feita uma aproximação em relação à orientação do microfuro (horizontal ou vertical), direção do fluxo do líquido com a força gravitacional e raio do microfuro, e com isso verificou-se que a atuação da força gravitacional era muito pequena com relação às outras forças atuantes.

Mas esta aproximação só é válida para microfuros de raio pequeno, no trabalho teórico isto foi demonstrado pelo preenchimento da fibra com água para três raios diferentes (1 μ m, 5 μ m e 10 μ m) e houve a confirmação experimental para água ^[20, 23], onde a força gravitacional é negligenciada para raios abaixo de 5 μ m, nossa fibra usada está nessa condição, pois o raio do núcleo é de aproximadamente 5,3 μ m e o raio dos microfuros da casca é de 0,8 μ m.

Na teoria também foi realizado medidas de viscosidade do polímero usado para o processo de preenchimento seletivo, polímero (**NOA 73**), que é o mesmo usado em nossos experimentos, por causa da apreciável variação com a temperatura. Então, foram obtidas as seguintes medidas de viscosidade no trabalho de referência: 280 cps para 35°C, 560 cps para 25°C (valor usado na referência, pois era a temperatura ambiente do laboratório) e 1190 cps para 15°C, e usando estes valores obtemos o gráfico da **figura 3.4**.

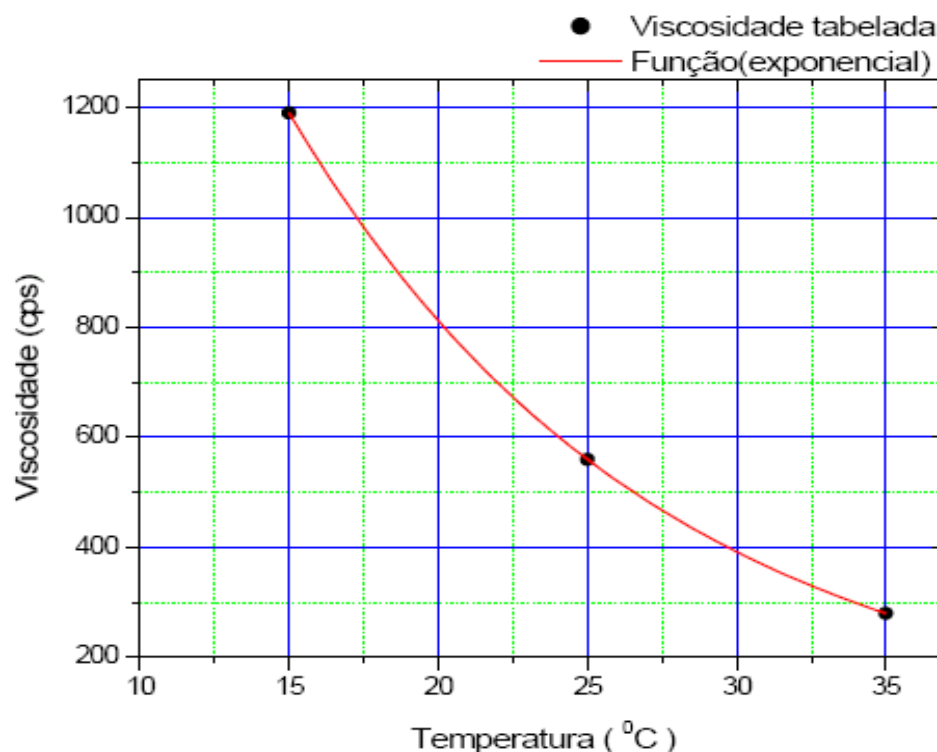


Figura 3.4 – Gráfico da viscosidade em função da temperatura.

Na **figura 3.4**, observamos a influência da temperatura na viscosidade do polímero, logo precisamos controlar a temperatura para que a viscosidade esteja em um valor apropriado ao preenchimento, pois o objetivo do processo é preencher uma ponta da fibra em alguns milímetros e assim fazer o preenchimento seletivo do núcleo da fibra. Portanto, o polímero não pode estar com viscosidade muito alta ou baixa e sim num valor médio, por exemplo, a viscosidade na temperatura de 25°C.

Mas a temperatura de nosso laboratório é abaixo de 25°C (entre 18°C - 20°C), logo precisamos aumentar e manter constante a temperatura do polímero que vai ser inserido na fibra para que não ocorra desacordo com a simulação, por causa da viscosidade. Então, fizemos para este fim uma caixa de acrílico para envolver o sistema para o preenchimento seletivo, onde colocamos uma lâmpada (60W) para aquecer o ambiente da caixa, por fora colamos folhas de isopor para reter o calor na caixa, e assim manter a caixa aquecida por volta de 25°C ou um pouco acima para realizarmos o processo. Esta caixa e o sistema para o preenchimento seletivo estão fixados na vertical numa parede do laboratório. Na **figura 3.5** mostramos uma foto do sistema para o preenchimento seletivo.

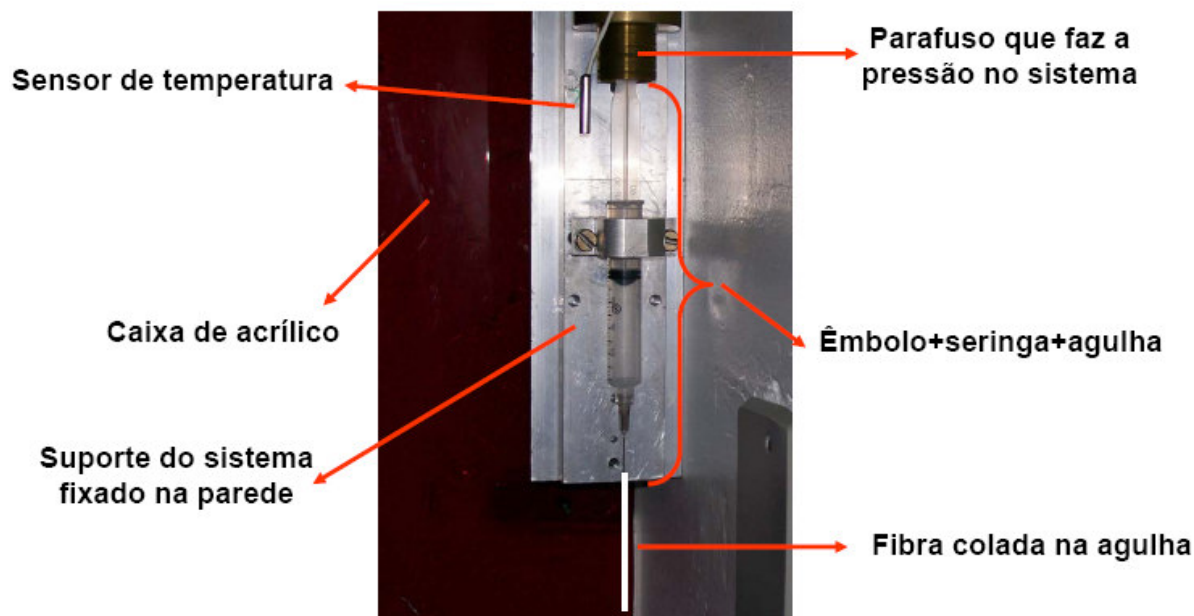


Figura 3.5 – Foto do sistema de preenchimento seletivo com polímero, onde indicamos as partes deste sistema, como a caixa de acrílico (em vermelho), o suporte fixado à parede e destacado por uma linha branca a fibra colada na agulha. E a lâmpada de 60W está na parte superior da caixa.

Após a descrição da teoria por trás do experimento, vamos descrever o experimento do trabalho de *Yanyi Huang et al*, que é a técnica propriamente dita do processo seletivo, que está dividida em quatro estágios distintos, sendo que o último estágio é o preenchimento seletivo do núcleo da fibra.

O processo de preenchimento seletivo consiste em introduzir o polímero com alta pressão nos microfuros da fibra, que esta na seringa do sistema de preenchimento e a sua agulha com a fibra microestruturada colada nela de comprimento L . No primeiro estágio enchemos todos os microfuros da fibra durante um intervalo de tempo não muito grande, mais que nos permita ter uma diferença de comprimento de preenchimento casca-núcleo apreciável, e depois é feita a secagem do polímero com UV. Em seguida deve-se fazer um corte ou uma clivagem na fibra onde a casca esteja vazia, usando a simulação, mas o núcleo ainda deverá estar cheio seguindo a previsão teórica.

No segundo estágio, preenchemos novamente a casca, que está vazia e o núcleo bloqueado com polímero seco, por alguns milímetros. Ao repetir o processo de preenchimento, é preciso que a casca seja preenchida num intervalo de tempo suficiente para que o comprimento de polímero nos microfuros da casca ultrapasse o que restou de polímero seco no núcleo após clivagem, e depois fazer novamente a secagem do polímero com *UV*. No terceiro estágio, é feita a clivagem em que o núcleo é desbloqueado e a casca fique cheia por com alguns milímetros de polímero seco.

Por fim o quarto estágio, a casca está bloqueada com polímero e núcleo vazio para ser inserido o fluido (líquido ou gás), mas estamos interessados em inserir somente líquido. E para preencher o núcleo com líquido precisamos colar a ponta da fibra, que tem a casca bloqueada numa agulha (1 centímetro de fibra aproximadamente ou mais um pouco dentro da agulha) que é conectada na seringa contendo o líquido a ser inserido na mesma por pressão. Abaixo mostramos um esquema dos estágios que devem ser realizados neste processo.

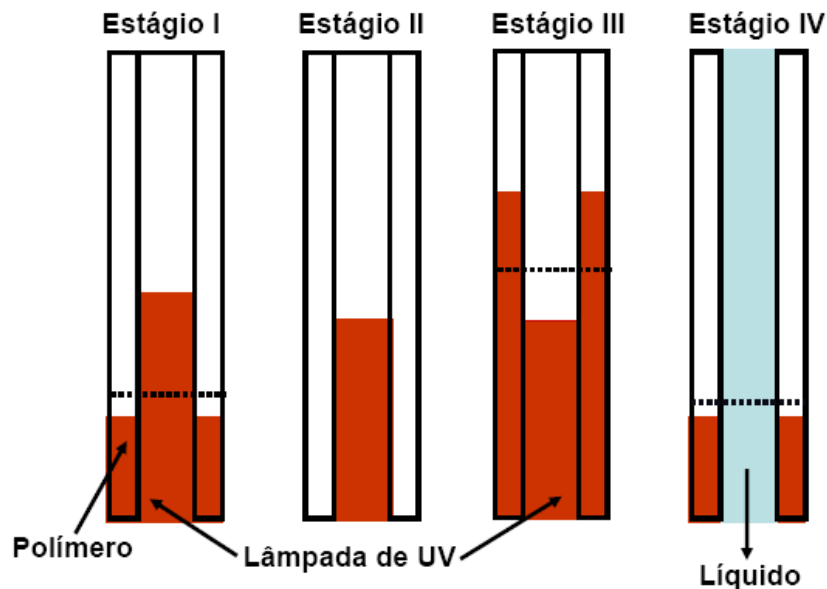


Figura 3.6 – Esquema dos estágios do processo de preenchimento seletivo com polímero que seca ou cura com *UV*.

Na **figura 3.6**, o polímero está indicado em vermelho no desenho do perfil dos microfuros da casca e do núcleo da fibra, as linhas pontilhadas pretas indicam a clivagem ou corte que ocorre entre cada estágio e haverá duas secagens do polímero com *UV* durante o processo. No último estágio (IV) teremos somente a casca bloqueada e o núcleo já preenchido com líquido e por fim só falta clivar o mesmo para termos a fibra de núcleo com líquido e casca com ar.

Agora que descrevemos a teoria e o experimento, podemos analisar a nossa reprodução feita. Abaixo mostraremos cada estágio reproduzido em um esquema do perfil dos microfuros da casca e do núcleo da fibra e com fotos tiradas durante o processo.

- **Estágio I e II:**

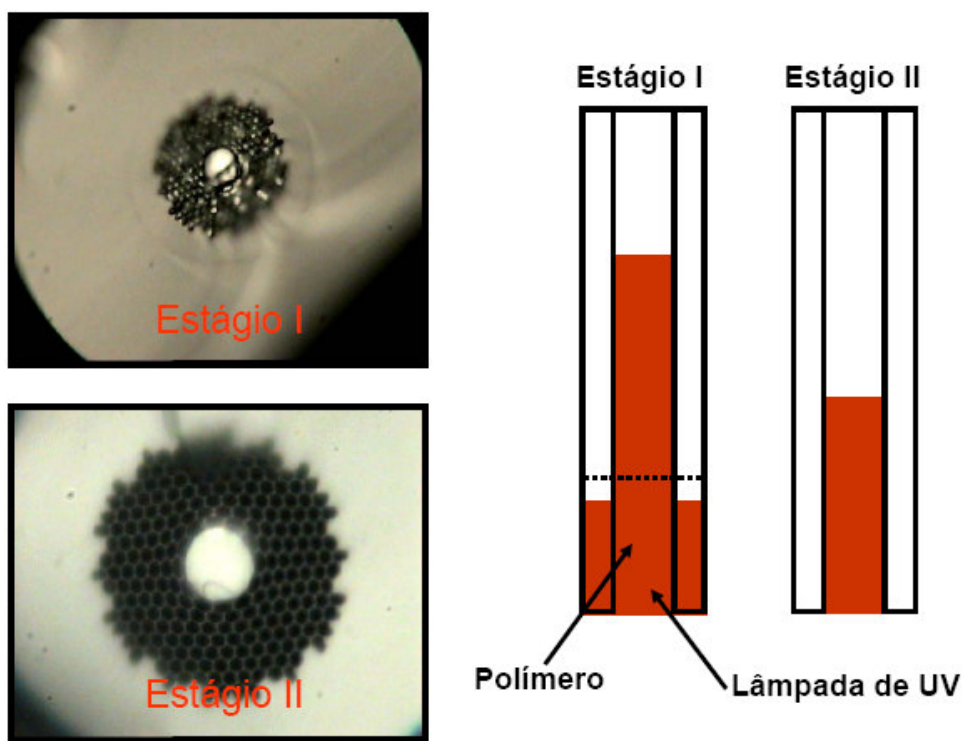


Figura 3.7 – Esquema dos estágios I e II do processo de preenchimento seletivo com polímero.

Na **figura 3.7**, observamos a foto de microscopia óptica do estágio I, observamos toda a estrutura da fibra (núcleo e casca) preenchida com polímero seco com *UV* (pontos brancos na região central da foto), que está indicado em vermelho no desenho do perfil da estrutura da fibra. Na foto de microscopia óptica do estágio II,

temos o núcleo bloqueado (ponto branco central na estrutura da fibra) com o polímero e a casca vazia (estrutura em preto), após clivagem ou corte indicado pela linha pontilhada preta no desenho.

- **Estágio III e IV:**

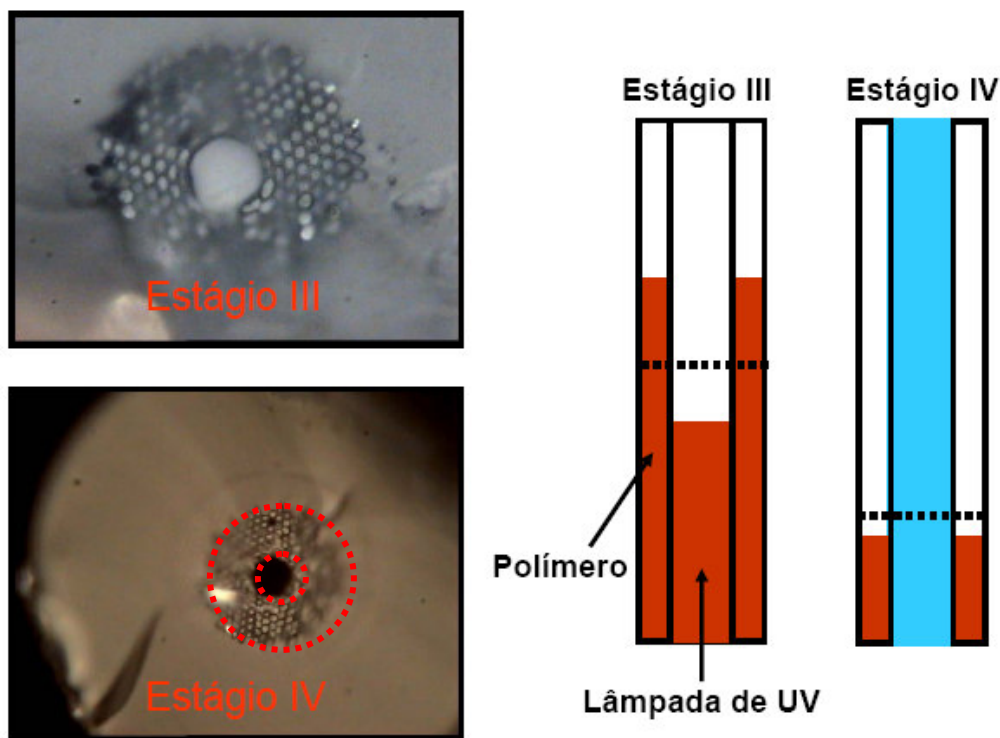


Figura 3.8 – Esquema dos estágios III e IV do processo seletivo com polímero. E as linhas pontilhadas em vermelho na foto são para destacar as regiões da casca e do núcleo

Na **figura 3.8** temos a foto de microscopia óptica do estágio III, observamos toda a estrutura da fibra (núcleo e casca) preenchida com polímero (pontos brancos na região central da foto) antes da clivagem ou corte que está indicado em vermelho no desenho do perfil da estrutura da fibra. Na foto de microscopia óptica do estágio IV, o núcleo vazio (ponto preto central na estrutura da fibra) e a casca bloqueada (estrutura em branco), após clivagem, indicada pela linha pontilhada preta no desenho. E com esta situação do estágio IV já poderemos fazer o preenchimento com líquido no núcleo, mostrado em azul no desenho.

- **Resultado:**

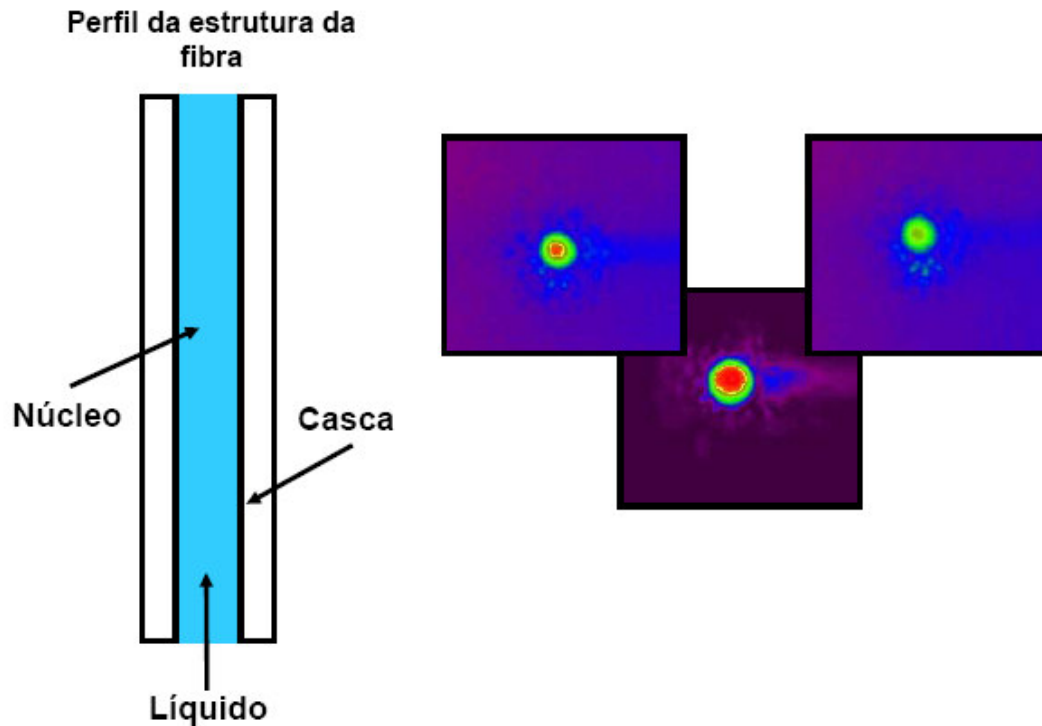


Figura 3.9 – Esquema do resultado final após preenchimento do núcleo com líquido. Ao lado do desenho do perfil da estrutura da fibra temos fotos de microscopia óptica do guiamento da fibra de núcleo líquido, por reflexão interna total.

Portanto, mostramos que foi feita a reprodução do processo experimental em acordo com a teoria, mas em algumas fibras em que foi realizado este processo tivemos dificuldades em realizar a clivagem nos comprimentos indicados pela teoria, por causa da não uniformidade de preenchimento na casca e no núcleo.

Percebemos que se tratava de bolhas de ar no polímero, que estava na seringa e então, resolvemos verificar os parâmetros que poderiam também interferir no processo, como o procedimento de colagem da fibra na agulha, a viscosidade do polímero variando com a temperatura, o preenchimento por capilaridade na fibra durante o processo e vazamento na colagem da fibra na agulha. Abaixo listamos os problemas encontrados ao realizamos o processo seletivo.

- **Problema 1: Bolhas de ar no polímero e dentro da agulha**

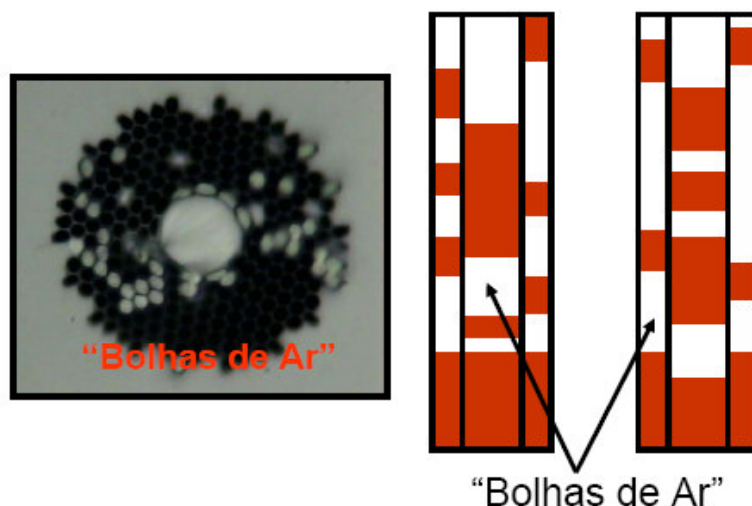


Figura 3.10 – Foto de microscopia óptica de uma fibra com bolhas de ar junto com o polímero (em branco na foto), que já foi seco com *UV*. E estas bolhas empurram quantidades de polímero nos microfuros de forma desigual, como mostramos no desenho ao lado da foto, em que o polímero está em vermelho e as bolhas os espaços em branco.

Com a presença destas bolhas de ar no polímero dentro da fibra, não foi possível realizarmos o processo com exatidão. Tentamos modificar a inserção do polímero na seringa, deixando-o em repouso num recipiente, para que as bolhas fossem se desfazendo aos poucos na superfície do mesmo, mas continuávamos tendo este problema em algumas fibras.

Portanto, partimos para a verificação da colagem da fibra na agulha, pois notamos que ao colarmos a fibra na agulha ficava aprisionada uma pequena quantidade de ar no resto da mesma. Em seguida conectamos a agulha na seringa, que está com polímero sem bolhas de ar, mas há ar na agulha que é pressurizado junto com o polímero, logo novamente temos bolhas de ar no processo.

Para resolver isto vamos realizar o preenchimento da agulha com polímero gelado, pois assim tiramos todo ar dentro da agulha e depois colamos a fibra na mesma. Também colocamos polímero gelado na seringa, que estava em repouso num recipiente na geladeira, para quando for conectada na agulha com polímero não contenha ar. Abaixo mostramos as fotos do processo com bolhas de ar em uma fibra e depois a simulação com os pontos experimentais.

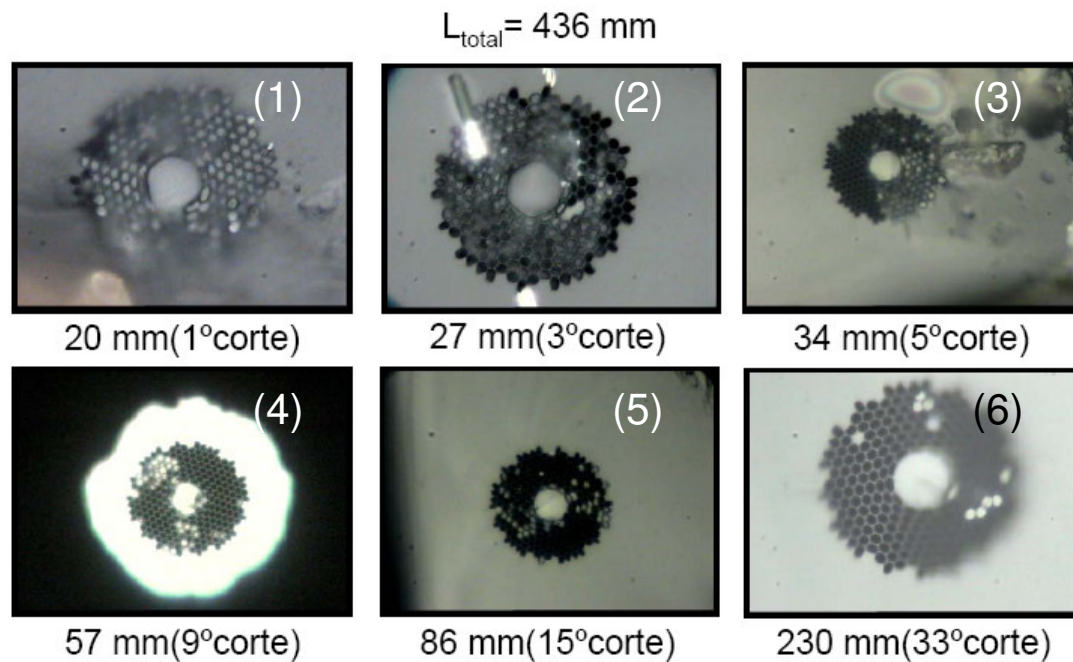


Figura 3.11 – Fotos de microscopia óptica de uma fibra com bolhas de ar no polímero (em branco nas fotos), que já foi seco com *UV*. A fibra tinha um comprimento de 436 milímetros. Na foto de microscopia óptica (6), temos que a casca ainda tem polímero em seus microfuros, mas não deveria mais ter, pois já estamos a 230 milímetros da ponta onde foi feito o processo e sabemos que na casca seria preenchido por poucos milímetros.

Observando na **figura 3.11** as fotos do processo com bolhas de ar e na **figura 3.12**, as curvas da simulação para o núcleo (em azul) e casca (em vermelho), com os respectivos pontos experimentais, temos a confirmação que as bolhas prejudicam o processo de preenchimento seletivo na fibra, pois não podemos usar a simulação para clivar exatamente na diferença entre os comprimentos preenchidos na estrutura da fibra (casca e núcleo) para o intervalo de tempo que foi realizado. Na **figura 3.12**, o experimento foi feito em 30 minutos e observamos os pontos experimentais das estruturas da fibra, que estão bem longe de seu valor teórico, por causa das bolhas de ar, que empurraram o polímero para além do comprimento simulado também para o intervalo de 30 minutos.

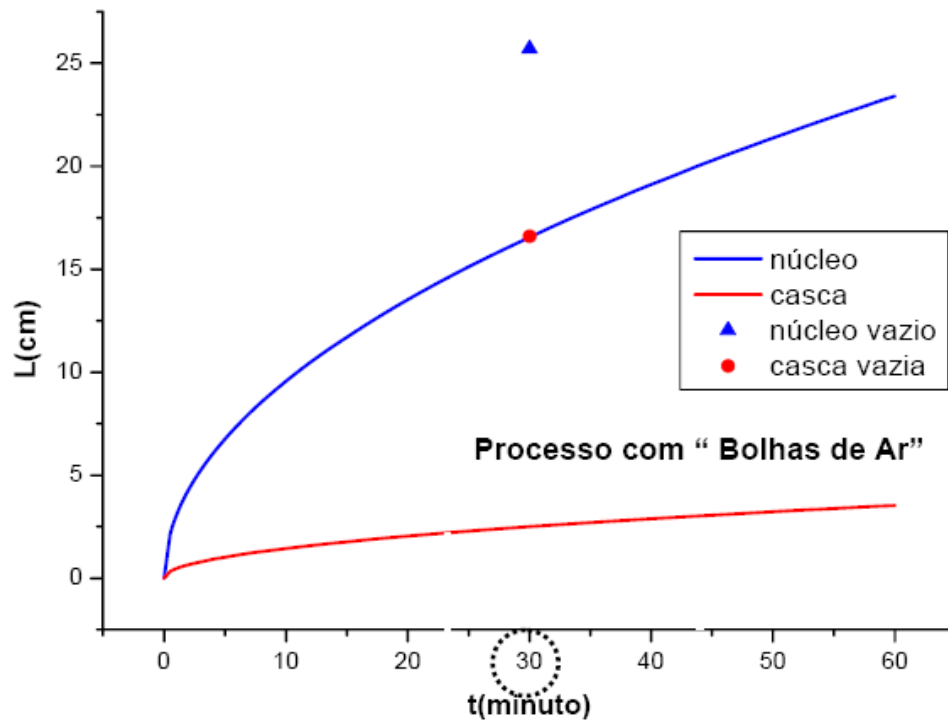


Figura 3.12 – Gráfico da simulação para a fibra da figura 3.11, onde percebemos o quando as bolhas empurram o polímero na estrutura da fibra, indicados pelos pontos experimentais para o núcleo e casca, para um intervalo de tempo de 30 minutos.

- **Problema 2: Viscosidade variando com a Temperatura**

A variação da viscosidade do polímero com a temperatura usada foi analisada no estudo da teoria do processo no início do capítulo, onde foram mencionadas as modificações realizadas no sistema para o preenchimento seletivo, na **figura 3.5**, para que a temperatura do mesmo seja mantida quase constante, e que o processo seja feito com menor tempo e com a viscosidade num valor conhecido para ser usada na simulação do preenchimento.

- **Problema 3: Preenchimento por capilaridade e vazamento**

Quando colamos a fibra na agulha com polímero gelado, nós expomos a estrutura da fibra ao polímero que entrará nos microfuros da fibra por capilaridade. Então, foram feitos testes para verificar o quanto de polímero entraria nos microfuros da fibra por capilaridade nas mesmas condições do experimento, mas sem pressão. Foram obtidos que o núcleo da fibra foi preenchido aproximadamente por 13 milímetros do

comprimento total (116 milímetros) e a casca preenchida aproximadamente por 20 milímetros. Então, temos a influência da capilaridade no comprimento final preenchido durante o processo.

E por fim, o problema de vazamento durante o processo, que ocorre por causa da alta pressão aplicada, aproximadamente 15 bar, na seringa quando realizamos o processo, e também foram feitos testes para verificar qual a pressão que devemos usar no processo para eliminar o vazamento e então, obtemos o valor de aproximadamente 3 bar de pressão para que não haja o vazamento, e consequentemente a perda da pressão no processo. Abaixo mostramos uma medida feita em que tivemos vazamento durante o processo.

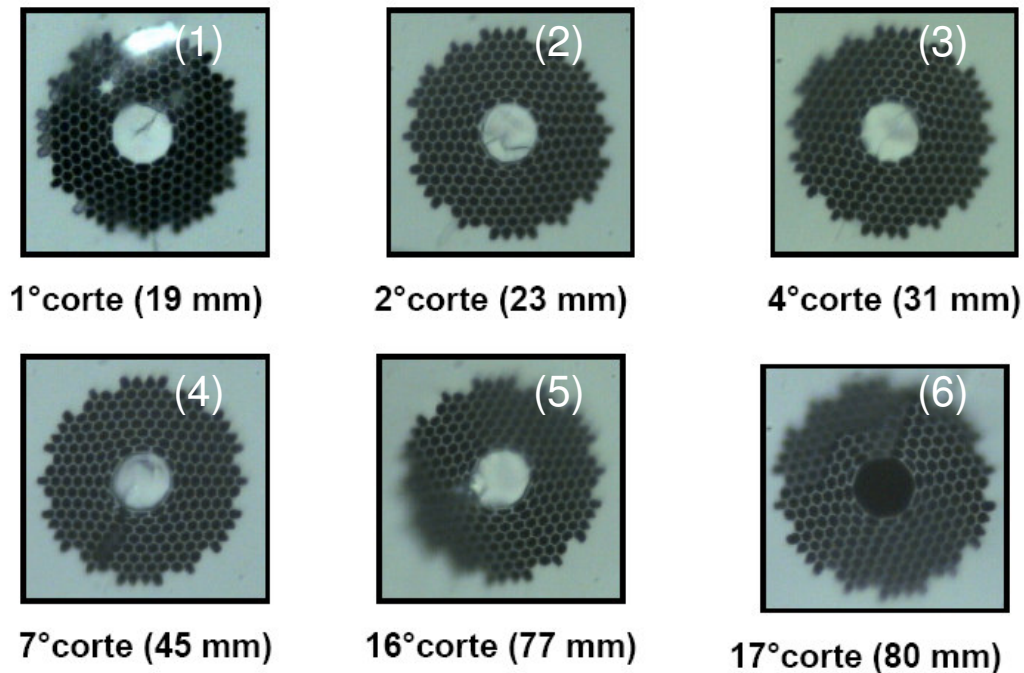


Figura 3.13 – Foto de microscopia óptica de uma fibra enfatizando somente a sua microestrutura (casca e núcleo), em que obtemos um processo sem bolhas de ar no polímero (em branco na foto), que já foi seco com UV. A fibra tinha um comprimento de 228 milímetros. Nas fotos de 1 a 6 podemos observar que o processo está conforme a teoria, mas tivemos vazamento, então haverá discordância do ponto experimental com a curva teórica em relação ao comprimento preenchido no processo.

Observando na **figura 3.13** as fotos do processo sem bolhas de ar e na **figura 3.14**, as curvas da simulação para o núcleo (em azul) e casca (em vermelho) para esta medida, com os respectivos pontos experimentais. Vemos a confirmação que o vazamento prejudicou o processo, pois o ponto experimental do comprimento preenchido do núcleo está muito abaixo da curva teórica, por causa da perda de pressão ocasionada pelo vazamento do polímero na colagem da fibra na agulha, como também o ponto experimental da casca que está um pouco abaixo do valor teórico da simulação mostrado na **figura 3.14**.

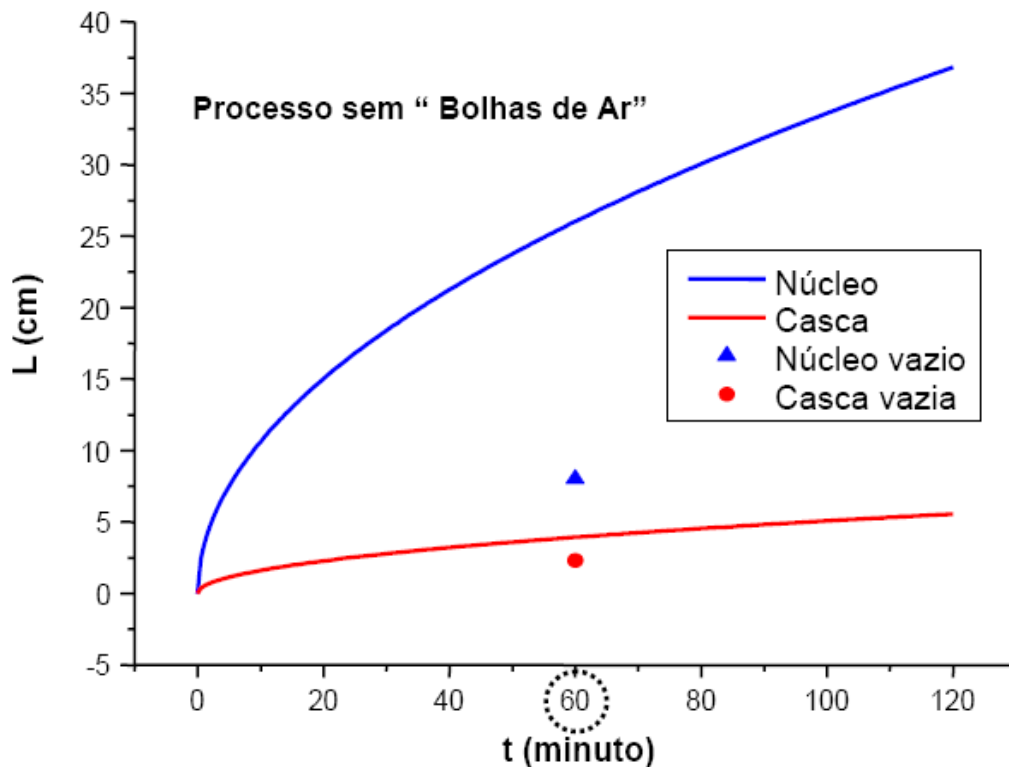


Figura 3.14 – Gráfico da simulação para a fibra da figura 3.13, onde temos o processo sem bolhas de ar, mas houve vazamento durante o processo, indicamos os pontos experimentais para o núcleo e casca, para um intervalo de tempo de 60 minutos.

Portanto, mostramos que conseguimos reproduzir os processos citados neste trabalho e bem como desenvolver um novo e também uma aplicação com que foi aprendido. Abaixo mostramos fotos de fibras em que foi feito o processo de preenchimento seletivo com o polímero, para evidenciar a sua importância, mesmo sendo trabalhoso, contudo pode ser aplicada em qualquer tipo de fibra microestruturada

e fabricada de qualquer material também e assim mostrou-se muito mais completo do que o processo pela máquina de emendar fibras, pois na máquina só podemos realizar o processo de fechar a casca em fibras de sílica, por causa do arco elétrico do aparelho.

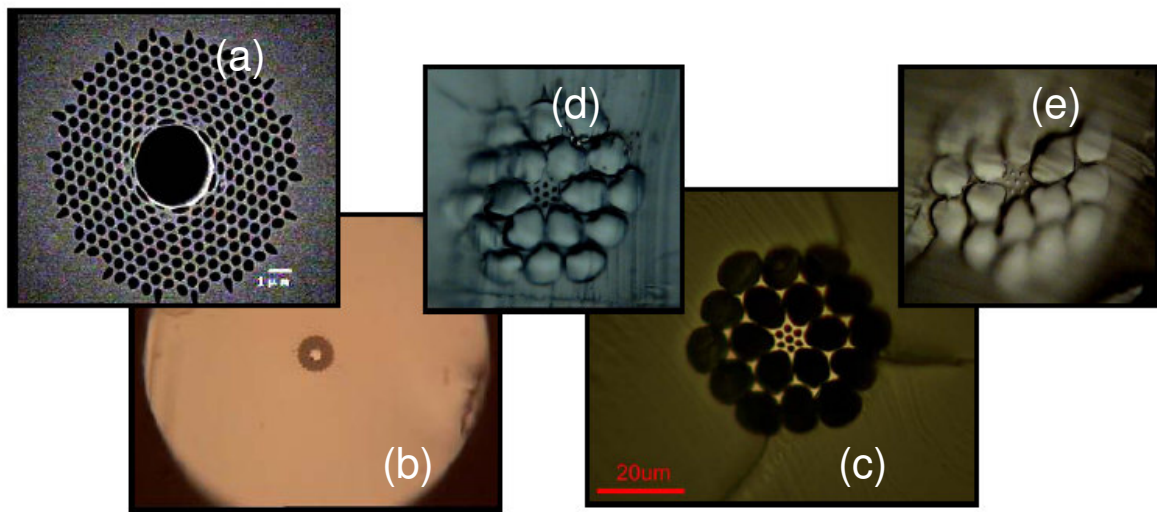


Figura 3.15 – Em (a) e (b) observamos duas fotos, uma de microscopia eletrônica, em (a), com uma fibra de núcleo oco feita de sílica ($\sim 3 \mu\text{m}$ de diâmetro de núcleo) e a outra foto de microscopia óptica da mesma fibra, em (b), mais com o núcleo bloqueado com polímero já curado ou seco com uma lâmpada de UV. Nas outras três fotos, (c), (d) e (e) temos a mesma fibra (plástica). Em (c) é a foto de microscopia eletrônica, em (d) e (e) fotos de microscopia óptica da mesma com a casca bloqueada com polímero curado ou seco e na outra com tudo bloqueado, respectivamente.

Após tratarmos dos processos de preenchimentos das fibras microestruturadas, nós iremos descrever a aplicação em que usamos os processos tratados neste capítulo para produzir fibras de núcleo líquido, e assim produzir outro processo em que podemos manipular o guiamento da fibra, quando inserimos um segundo líquido na casca da fibra e, portanto podemos controlar os modos guiados na fibra microestruturada.

3.2 Inserção de Dois-Líquidos em Fibras Microestruturadas:

Através dos processos de preenchimento demonstrados até aqui em fibra microestruturada, foi possível realizar guias de ondas de núcleo líquido com alta sobreposição do líquido inserido com a luz guiada e também longo comprimento de interação com pouquíssimo volume de líquido para o estudo (nanolitros, por exemplo), mas estes guias líquidos são altamente multimodo.

Então, foram feitos estudos de como manipular o guiamento da fibra de núcleo líquido ^[25], pois queremos agora diminuir os modos guiados nesta fibra, mas para isso precisamos analisar o parâmetro V , que nos diz o número de modos que são guiados, ou seja, nos dirá se uma fibra é multimodo ou monomodo. Este parâmetro está em função dos índices de refração da casca e do núcleo da fibra óptica. Mostramos abaixo o parâmetro V para as fibras microestruturada, que é demonstrada no capítulo 4 deste trabalho.

$$V_{PCF} = \frac{2\pi A}{\lambda} \sqrt{(n_{\text{núcleo}})^2 - (n_{\text{casca}})^2} \quad (3.4)$$

onde V_{PCF} está em função de A o período entre os furos da casca, λ o comprimento de onda e $n_{\text{núcleo}}$ e n_{casca} que são os índices de refração do núcleo e da casca, respectivamente. Destacado em vermelho na **equação 3.4** o valor da abertura numérica em função dos índices de refração das estruturas da fibra.

A partir da teoria de fibras ópticas, temos que o parâmetro V com valor menor do 2.405 à fibra é monomodo e valores acima deste valor são multimodo. E para uma fibra com A fixo e em comprimento de onda específico, o único parâmetro livre para mudar o valor do V_{PCF} , e por consequência o número de modos guiados, é a abertura numérica, que pode ser escrita em função dos índices de refração do núcleo e casca da fibra. Portanto, em fibras de núcleo líquido devemos alterar o valor do índice de refração da casca para manipular o número de modos guiados nas mesmas, e esta alteração é conseguida através da inserção de um segundo líquido de baixo índice de refração na casca da fibra de núcleo líquido, e assim aumentar o seu índice de refração médio. Abaixo mostramos um esquema ilustrativo de como é feito à redução dos modos guiados na fibra.

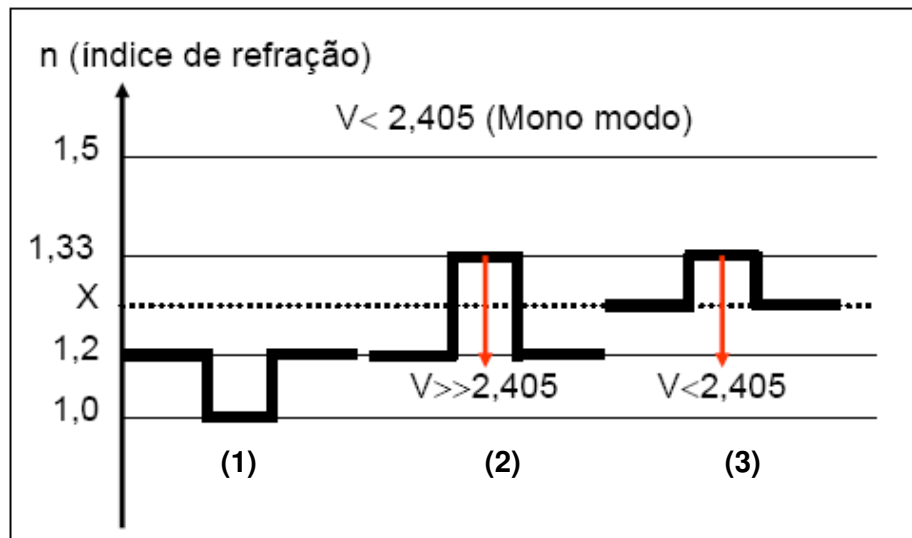


Figura 3.16 – O esquema ilustrativo com os perfis dos índices de refração da casca e do núcleo de uma fibra microestruturada mostrando como é feita a redução dos modos guiados com base na análise do parâmetro V e com a inserção de um segundo líquido, na casca.

Na **figura 3.16**, ilustramos três situações para explicar o processo de manipulação dos modos guiados em uma de núcleo líquido. Na situação **(1)** observamos o perfil de índice de refração original da fibra de núcleo oco que é usada para produzir as fibras de núcleo líquido. Em **(2)** observamos a inversão do perfil da fibra, após processo de preenchimento seletivo, onde o líquido somente está inserido no núcleo e conseqüentemente deixou a fibra altamente multimodo. E por fim, em **(3)** temos o perfil ilustrativo da fibra preenchida com dois líquidos para a manipulação do número de modos guiados nesta fibra.

Note que no decorrer deste processo a fibra óptica inicialmente guia por *bandgap* fotônico (**situação 1**), depois do preenchimento do núcleo com líquido passa a guiar por **RIT** (**situação 2**) e finalmente na **situação 3** ainda guiando por **RIT** mais com o segundo líquido na casca obtemos o controle dos modos guiados na fibra microestruturada.

Na literatura há trabalhos sobre fibras de núcleo líquido, como demonstrada no trabalho de *Fini et al* ^[26], onde é feita uma fibra microestruturada com estrutura específica para produzir um núcleo líquido com guiamento monomodo. A vantagem de nosso procedimento é que obtemos o controle dos números de modos guiados após a fibra fabricada.

Após a apresentação da teoria necessária para conseguir manipular os modos guiados na fibra vamos mostrar o procedimento e obtenção da fibra com dois líquidos. Para este fim é feita primeiramente a seleção dos índices de refração dos líquidos que serão inseridos na fibra, a observação do contraste de índice de refração núcleo-casca produzido por causa dos dois líquidos adequados ao parâmetro V da fibra. Então, partiremos agora para descrição de como fazer o preenchimento e bem como o resultado conseguido com este processo.

- **Procedimento do Experimento de 2-Líquidos:**

O procedimento para preencher seletivamente o núcleo e a casca da fibra microestruturada com dois diferentes líquidos simultaneamente, consiste de alguns passos descritos abaixo:

- I. Usamos as duas pontas da fibra que devem estar descascadas e clivadas em alguns centímetros para fazer a preparação do procedimento de inserção de dois líquidos e depois o preenchimento.
- II. Na primeira ponta é feito o colapso da casca, ponta **A-1** na **figura 3.17**, deixando o núcleo aberto, em seguida colamos esta ponta em uma agulha de seringa e a identificamos para sabermos o lado, onde será inserido o líquido no núcleo.
- III. Depois de seca a cola, devemos conectar esta agulha com a fibra colada, em uma seringa e com a outra ponta, que está livre, sugar o polímero por alguns segundos, ponta **B-1** na **figura 3.17**, para bloquear somente o núcleo nesta ponta. Depois de ter sugado o polímero, ele deve ser seco na lâmpada de *UV*, e devemos limpar qualquer resíduo de polímero na casca, pois é nesta que preenchemos a casca.
- IV. Após a limpeza desta ponta, ela deve ser colada também em uma agulha de seringa, e identificada para o líquido da casca.

Então, no final deste procedimento as duas pontas da fibra estão coladas em agulhas de seringa e devidamente identificadas para o preenchimento dos líquidos nas partes da fibra (núcleo e casca), logo colocamos cada agulha conectada a uma seringa fixada em um suporte na vertical, depois colocamos os líquidos correspondentes para o preenchimento da casca e do núcleo e depois se aplica pressão nas duas seringas.

Os cortes mostrados na **figura 3.17**, para tirar uma parte da fibra preenchida com os dois líquidos é feita sem conter ar que está comprimido na estrutura da fibra, pois o ar é mais compressível que os líquidos, logo o ar aprisionado dentro dos furos da fibra é comprimido e os líquidos movem-se dentro da fibra até que a pressão interna e externa entre em equilíbrio, e assim fazer os cortes para obter um comprimento da fibra completamente preenchida com os dois líquidos. Mostramos abaixo o esquema do procedimento para inserção de dois líquidos.

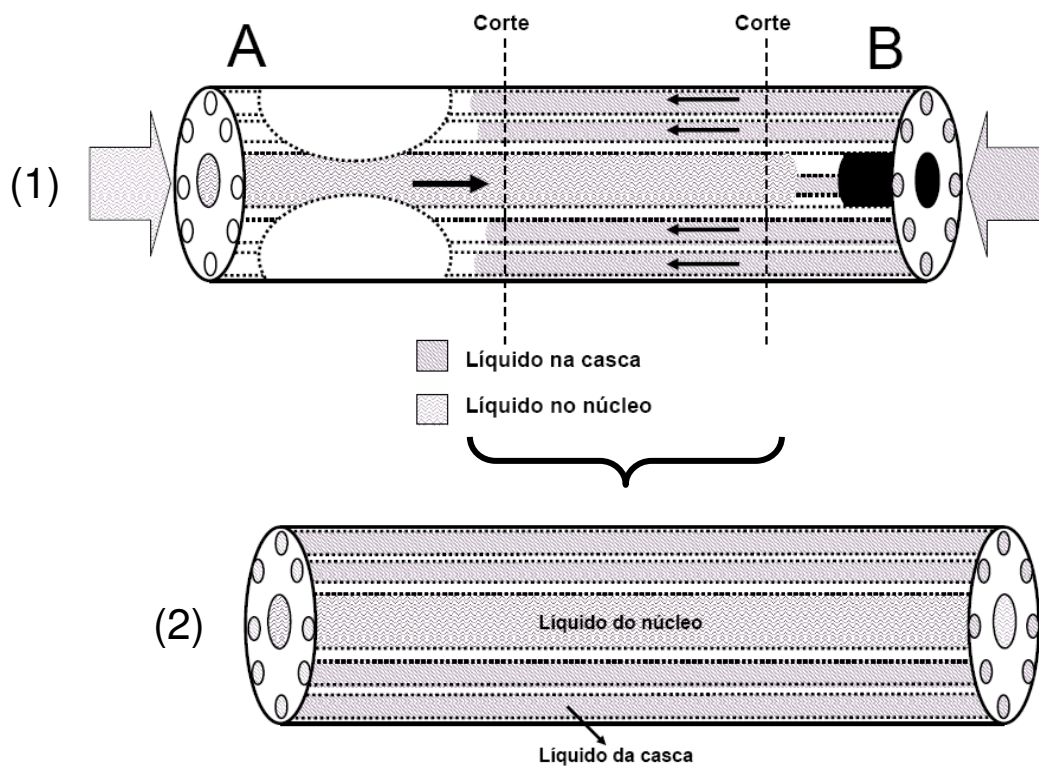


Figura 3.17 – Esquema do procedimento de preparação para o preenchimento de dois líquidos na fibra de núcleo oco com os furos da casca de $1.9\ \mu\text{m}$ de diâmetro e furo central com $10.7\ \mu\text{m}$ de diâmetro. Na figura (1) indicamos as etapas do procedimento e em (2) o comprimento da fibra preenchida com os dois líquidos após processo.

Depois de obtermos o comprimento da fibra com os líquidos, a mesma é usada na montagem experimental com um laser He-Ne alinhado a um suporte para fibra com sua saída volta para uma câmara CCD, onde capturamos as imagens do resultado. No nosso experimento, usamos água destilada, com índice de refração de 1.333 em 633 nm, inserido na casca da fibra, enquanto inserimos no núcleo uma

mistura de água com glicerina. Com esta mistura no núcleo observamos que a variação dos modos guiados depende da porcentagem de glicerina na mistura, que varia de 10% a 60% para este experimento, então temos o índice de refração variando entre os valores aproximados de 1.347 a 1.417 em 633 nm, observe que os índices da casca e núcleo estarão sempre muito próximos para que ocorra a diminuição dos modos guiados na fibra, ou seja, o contraste de índice é pequeno entre núcleo e casca, exemplo ilustrado na **figura 3.16**. Abaixo mostramos as imagens coletas na CCD em que observamos evolução da diminuição dos modos guiados nas fibras do experimento.

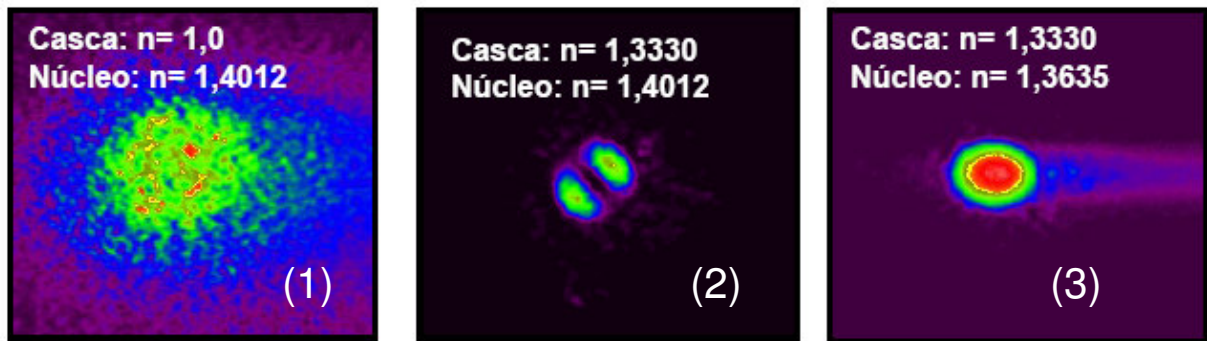


Figura 3.18 – Imagens de campo próximo da luz guiada na fibra com dois líquidos. Em (1), (2) e (3) temos os índices das estruturas para a obtenção dos modos mostrados nas imagens.

Na **figura 3.18**, a imagem **(1)** é de uma fibra com núcleo líquido de índice de refração de 1.4012 (mistura de glicerina 40%) e casca com ar, em **(2)** outra fibra com o mesmo índice de refração do núcleo da imagem **(1)**, mas com a casca preenchida com água e assim obtemos o modo de segunda ordem. E por fim, na imagem **(3)** uma fibra está com núcleo líquido de índice de refração de 1.3635 (mistura de glicerina 20%) e casca com água e nesta situação obtemos o modo fundamental.

Todos os resultados foram obtidos com fibras de comprimento de aproximadamente 50 milímetros, e neste experimento também observamos que o número adicional de modos guiados é consequência direta dos modos de *bandgap* fotônicos da fibra, que foram observados em comprimentos de fibras de aproximadamente 40 milímetros. Portanto, demonstramos que é possível o controle dos modos guiados na fibra após sua fabricação e assim abrimos novas possibilidades de aplicações com fibras preenchidas.

Capítulo 4

Estudo de Fibras Microestruturadas para Aplicação na Área de Sensoriamento Óptico: Desenvolvimento e Resultados

Nas fibras de núcleo oco foram produzidas fibras de núcleo líquido, onde temos a alta sobreposição da luz guiada com o material, outra possibilidade com estas fibras é inserir dois líquidos diferentes (no núcleo e na casca) e assim podemos ter várias aplicações em óptica e áreas fins.

Enfatizamos neste trabalho aplicações na área de sensoriamento a fibra destacando-se três estudos realizados e todas em fibras microestruturadas de núcleo sólido. No primeiro, observamos que ao inserimos um líquido dentro da fibra nós aumentamos a sensibilidade dela a um parâmetro externo, por exemplo, à curvatura.

Logo, podemos realizar estudos dessa perda por curvatura em fibras preenchidas para princípio de sensor de deslocamento/pressão, pois há o efeito da curva em uma porção da fibra que se reflete na quantidade de luz transmitida. Outro estudo é a inserção de líquidos com alta taxa de variação do índice de refração com a temperatura. Esta sensibilidade à temperatura introduzida na casca sem alterar a forma de guiamento da fibra, nos possibilita induzir uma alteração na abertura numérica da fibra, que nada mais é o cone de luz transmitida no núcleo da fibra.

E por fim, também podemos inserir gás na fibra e usar a fração de energia luminosa que escapa do núcleo e penetra nos microfuros da casca, chamada de campo evanescente. Portanto, quando temos os furos cheios de gás essa fração de luz interage com o gás e é absorvida, isto funciona como a assinatura dele, logo nós podemos sensoriá-lo via campo evanescente nos furos da fibra microestruturada.

Neste capítulo, iremos tratar destas três aplicações focalizando no estudo baseado na perda por curvatura. Mostraremos os conceitos básicos por trás do experimento, às montagens experimentais e os resultados obtidos.

4.1 PCF's preenchidas como Sensores de Deslocamento/Pressão:

Um parâmetro relevante em guias de onda é a medida da perda de potência do sinal óptico durante a propagação no guia. Se P_0 é a potência na entrada de uma fibra óptica, a potência transmitida P_T é dada por:

$$P_T = P_0 e^{-\alpha L}, \quad (4.1)$$

onde α é a constante de atenuação sendo referida como perda da fibra óptica e L é o comprimento da fibra óptica. A perda da fibra é expressa em unidade de dB/km pelo uso da relação:

$$\alpha_{dB} = -\frac{10}{L} \log \left(\frac{P_T}{P_0} \right), \quad (4.2)$$

onde a equação (4.1) foi utilizada para relacionar α_{dB} e α e L em km.

Atenuação ou perda de transmissão pode ser definida como a diminuição da intensidade de energia de um sinal luminoso ao propagar-se através de um meio. Os mecanismos básicos responsáveis pela atenuação em fibras ópticas são: absorção, espalhamento e deformações mecânicas.

- **Absorção:**

A absorção do material é o mecanismo de atenuação, que exprime a dissipação de parte da energia luminosa transmitida numa fibra óptica em forma de calor. Ela pode ser devido à estrutura atômica intrínseca do vidro, impureza de íons metálicos e de íons de hidroxilas (OH).

- **Espalhamento:**

É o mecanismo de atenuação que exprime o desvio de parte da energia luminosa guiada pelos vários modos de propagação em várias direções. Existem vários tipos de espalhamentos: Rayleigh, Raman, Brillouin estimulados e do guia de onda.

- **Deformações mecânicas:**

As perdas por deformação mecânica ou simplesmente perdas por curvatura são divididas em microcurvatura e macrocurvatura. A microcurvatura aparece quando a fibra é submetida à pressão transversal de maneira a comprimi-la contra uma superfície levemente rugosa ou uma leve deformidade da espessura do núcleo no momento de

sua fabricação, logo a perda por microcurvatura está relacionada a raios de curvatura proporcionais ao raio do núcleo da fibra. E a macrocurvatura é a perda pontual de luz por irradiação, ou seja, os modos de alta ordem (ângulo de incidência próximo ao ângulo crítico) não apresentam condições de reflexão interna total devido à curvatura de raio finito da fibra óptica, ou seja, o raio de curvatura muito maior do que o raio do núcleo. Neste trabalho vamos nos focalizar no estudo da perda macroscópica em *PCF's* [27]. Mostramos abaixo um esquema sobre a perda macroscópica.

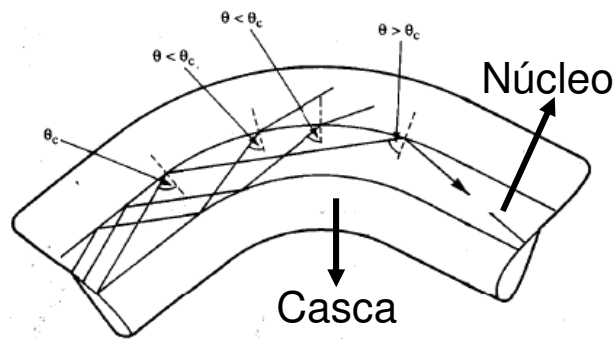


Figura 4.1 – Desenho da estrutura de uma fibra convencional indicando a perda macroscópica na porção curvada da mesma, evidenciando a relação dos valores do ângulo θ com o ângulo θ_c (ângulo crítico), quando há o escape da luz para a casca devido à curva.

Quando a luz encontra uma curva macroscópica em uma fibra óptica, a luz guiada distorce radialmente de fora para dentro no sentido da curva, isto é, a luz se espalha pela casca ocorrendo à perda por curvatura macroscópica. Depois de definido o que é perda por curvatura em fibras ópticas e seus mecanismos básicos, agora queremos escrevê-la em relação ao raio de curvatura, R , para obtermos a perda por curvatura em fibras ópticas convencionais, dada por:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{1}{A_{eff}} \frac{\rho}{W} \frac{\exp\left(-\frac{4}{3} \frac{R}{\rho} \frac{\Delta}{V^2} W^3\right)}{\sqrt{W \frac{R}{\rho} + \frac{V^2}{2\Delta W}}}, \quad (4.3)$$

onde a perda por curvatura (α) é expressa em função da diferença de índices de refração núcleo-casca (Δ), da área efetiva (A_{eff}) que é área do modo guiado no núcleo, do raio do núcleo (ρ), do raio de curvatura (R), de V que é diâmetro ou frequência normalizada (ou comumente, parâmetro V) e W é o parâmetro de decaimento normalizado da casca.

Esta é a fórmula geral para calcular a perda por curvatura em fibras ópticas convencionais que será de grande importância para o estudo da perda por curvatura nas fibras microestruturadas.

4.1.1 Perda por Curvatura para Fibras Microestruturadas:

A referência de Nielsen *et al* ^[28] trata do estudo feito para uma fibra microestruturada de área modal grande, denominada de *LMAF* (do inglês: *Large-mode-area fiber*), onde o resultado da teoria leva em conta os parâmetros da fibra para calcular a perda macroscópica por curvatura da mesma ^[29, 30, 31]. Abaixo mostramos uma figura com os parâmetros relevantes para o cálculo da perda por curvatura em fibras microestruturadas.

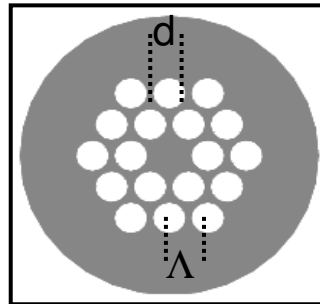


Figura 4.2 – Desenho esquemático da estrutura de uma fibra microestruturada, em que indicamos d sendo o diâmetro do furo da casca e Λ é o período entre os centros dos furos da casca.

O trabalho de Nielsen *et al* ^[28] baseia-se na adaptação da fórmula da perda por curvatura de fibras convencionais na **equação 4.3** para as fibras microestruturadas. Para isso usamos as equações listadas abaixo, que são os parâmetros de fibras ópticas convencionais:

$$\Delta = \frac{\sin^2 \theta_c}{2}, \quad (4.4)$$

$$V = \beta \rho \sin \theta_c, \quad (4.5)$$

onde Δ é a diferença de índices de refração núcleo-casca com θ_c , que é o ângulo crítico para a condição de reflexão interna total entre dois meios. V é diâmetro ou frequência normalizada (ou comumente, parâmetro V) com β sendo a componente do vetor de onda k que está no eixo da fibra e dada por: $\beta = \frac{2\pi n}{\lambda}$, que está em função do índice de refração do meio (n) e comprimento de onda (λ), e θ_c .

$$W = \rho \sqrt{\beta^2 - \beta_{cl}^2}, \quad (4.6)$$

e por fim W que é o parâmetro de decaimento normalizado da casca, que está em função das componentes do vetor de onda k para o núcleo (β) e casca (β_{cl}).

E fazendo as substituições das **equações 4.4, 4.5 e 4.6** na **equação 4.3**, para obter a fórmula da perda por curvatura adaptada para fibras microestruturadas:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{1}{A_{eff}} \frac{\rho}{\rho(\beta^2 - \beta_{cl}^2)^{1/2}} \frac{\exp\left(-\frac{4R}{3\rho\beta^2\rho^2\sin^2\theta_c} \rho^3(\beta^2 - \beta_{cl}^2)^{3/2}\right)}{\sqrt{\rho(\beta^2 - \beta_{cl}^2)^{1/2} \frac{R}{\rho} + \frac{\beta^2 \rho^2 \sin^2\theta_c}{2\left(\sin^2\theta_c/2\right)\left(\rho(\beta^2 - \beta_{cl}^2)^{1/2}\right)}}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{1}{A_{eff}} \frac{1}{(\beta^2 - \beta_{cl}^2)^{1/2}} \frac{\exp\left(-\frac{2}{3}R\frac{1}{\beta^2}(\beta^2 - \beta_{cl}^2)^{3/2}\right)}{\sqrt{(\beta^2 - \beta_{cl}^2)^{1/2} R + \frac{\beta^2 \rho}{(\beta^2 - \beta_{cl}^2)^{1/2}}}},$$

onde usamos a relação $\beta = \frac{2\pi n}{\lambda}$. Logo, temos:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{1}{A_{eff}} \frac{1}{(\beta^2 - \beta_{cl}^2)^{1/2}} \frac{\exp\left(-\frac{1}{6\pi^2} R \frac{\lambda^2}{n_s^2} \frac{\Lambda(\beta^2 - \beta_{cl}^2)^{1/2}}{\Lambda^3}\right)}{(\beta^2 - \beta_{cl}^2)^{1/4} R^{1/2} \left(1 + \frac{\rho}{R} \frac{\beta^2}{(\beta^2 - \beta_{cl}^2)}\right)^{1/2}},$$

nesta fórmula adaptada da perda por curvatura para fibras microestruturadas, temos a redefinição do “parâmetro V”, circulada em vermelho na equação, que é chamado agora de parâmetro V_{PCF} escrita como se segue abaixo:

$$V_{PCF} = \Lambda \sqrt{\beta^2 - \beta_{cl}^2}, \quad (4.7)$$

onde Λ (período) é a distância entre os centros de dois furos da casca na **figura 4.2**, e também utilizamos o fato que $R \gg \rho$, sabendo que R é o raio de curvatura e ρ o raio do núcleo. Portanto, temos que $1 \gg \frac{\rho}{R}$, logo podemos simplificar nossa equação. Então, temos:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{1}{A_{eff}} \frac{\exp\left(-\frac{1}{6\pi^2} \frac{1}{n_s^2} \frac{R}{\Lambda} \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2 V_{PCF}^3\right)}{(\beta^2 - \beta_{cl}^2)^{3/4} R^{1/2}} = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{1}{A_{eff}} \frac{\exp\left(-\frac{1}{6\pi^2} \frac{1}{n_s^2} \frac{R}{\Lambda} \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2 V_{PCF}^3\right)}{\left(\frac{\Lambda(\beta^2 - \beta_{cl}^2)^{1/2}}{\Lambda}\right)^{3/2} R^{1/2}}$$

$$\alpha = \frac{1}{8} \sqrt{\frac{2\pi}{3}} \frac{1}{A_{eff}} \frac{1}{\beta} \frac{\exp\left(-\frac{1}{6\pi^2} \frac{1}{n_s^2} \frac{R}{\Lambda} \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2 V_{PCF}^3\right)}{\left(\frac{2}{3} \frac{R}{\Lambda} \frac{V_{PCF}^3}{(\beta\Lambda)^2}\right)^{1/2}}, \text{ onde usamos novamente } \beta = \frac{2\pi n}{\lambda} \text{ e}$$

obtemos:

$$\alpha\Lambda \approx \frac{\frac{1}{8\sqrt{6\pi}} \frac{1}{n_s} \frac{\Lambda^2}{A_{eff}} \frac{\lambda}{\Lambda} \frac{\exp\left(-\frac{1}{6\pi^2} \frac{1}{n_s^2} \frac{R}{\Lambda} \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2 V_{PCF}^3\right)}{\left(\frac{1}{6\pi^2} \frac{1}{n_s^2} \frac{R}{\Lambda} \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2 V_{PCF}^3\right)^{1/2}}$$

e por fim teremos:

$$\alpha\Lambda \approx \frac{1}{8\sqrt{6\pi}} \frac{1}{n_s} \frac{\Lambda^2}{A_{eff}} \frac{\lambda}{\Lambda} F\left(\frac{1}{6\pi^2} \frac{1}{n_s^2} \frac{R}{\Lambda} \left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right)^2 V_{PCF}^3\right), \quad (4.8)$$

onde n_s é o índice de refração da sílica, pois o núcleo é grande e modo guiado fica bem confinado no mesmo e por isso o índice do núcleo fica sendo o da sílica.

A **equação 4.8** usada na teoria do trabalho de Nielsen *et al* tem uma função F destacada por uma elipse pontilhada em vermelho dada pela expressão: $F(x) = x^{-1/2} \exp(-x)$, para fibra microestruturada de área modal grande. Ela pode ser derivada da dependência paramétrica do raio crítico de curvatura, pois a função aumenta radicalmente quando o argumento é menor que a unidade e então nós poderíamos definir um raio crítico de curvatura de $x \sim 1$, onde $F \sim \frac{1}{e}$. Mas para reproduzir a teoria da referência de Nielsen *et al* [28] deve-se usar o V_{PCF} em função de sua dependência $(\frac{\lambda}{\Lambda}$ e $\frac{d}{\Lambda})$, que é uma forma analítica de se obter este parâmetro, como mostrado abaixo:

$$V_{PCF}\left(\frac{\lambda}{\Lambda}, \frac{d}{\Lambda}\right) = \frac{A\left(\frac{d}{\Lambda}\right)}{B\left(\frac{d}{\Lambda}\right) \exp\left[C\left(\frac{d}{\Lambda}\right) * \frac{\lambda}{\Lambda}\right] + 1}, \quad (4.9)$$

onde os parâmetros A , B e C estão relacionados somente com a dependência $\frac{d}{\Lambda}$ e através da **equação 4.9** temos a expressão empírica do V_{PCF} em relação à $\frac{\lambda}{\Lambda}$ e $\frac{d}{\Lambda}$ iniciando a simulação da teoria somente dos parâmetros de entrada [32, 33, 34].

Agora que demonstramos a fórmula para calcular a perda por curvatura para fibras microestruturadas da teoria usada de base, vamos reproduzir o resultado da mesma para depois usarmos para calcular a perda por curvatura do nosso trabalho. Abaixo temos a tabela com os dados da fibra de área modal grande que foi usada para teoria e também uma figura com o desenho da seção transversal ou de corte da mesma, para que seja observada a disposição dos microfuros de ar na casca.

	LMA-20
Diâmetro do núcleo (μm)	20.0
$\Lambda[\mu\text{m}]$	13.20
d/Λ	0.485

Tabela 4.1 - Dados da fibra de área modal grande (LMA-20) usada na simulação.

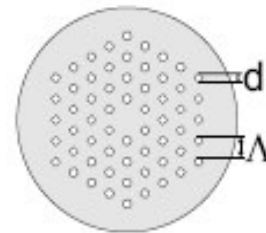


Figura 4.3 - Desenho da seção de corte, onde observamos os furos da casca, diâmetro dos furos (d) e o período entre os furos (Λ).

Agora podemos calcular a perda por curvatura através desta teoria com os dados da **tabela 4.1** da fibra de área modal grande, LMA-20 ^[35], e assim mostraremos o gráfico obtido na referência usada de base e a reprodução do mesmo para confirmar o bom funcionamento da teoria descrita a partir da fórmula da perda por curvatura adaptada para fibras microestruturadas na **equação 4.8**, que usa também a **equação 4.9** que contém as dependências ($\frac{\lambda}{\Lambda}$ e $\frac{d}{\Lambda}$).

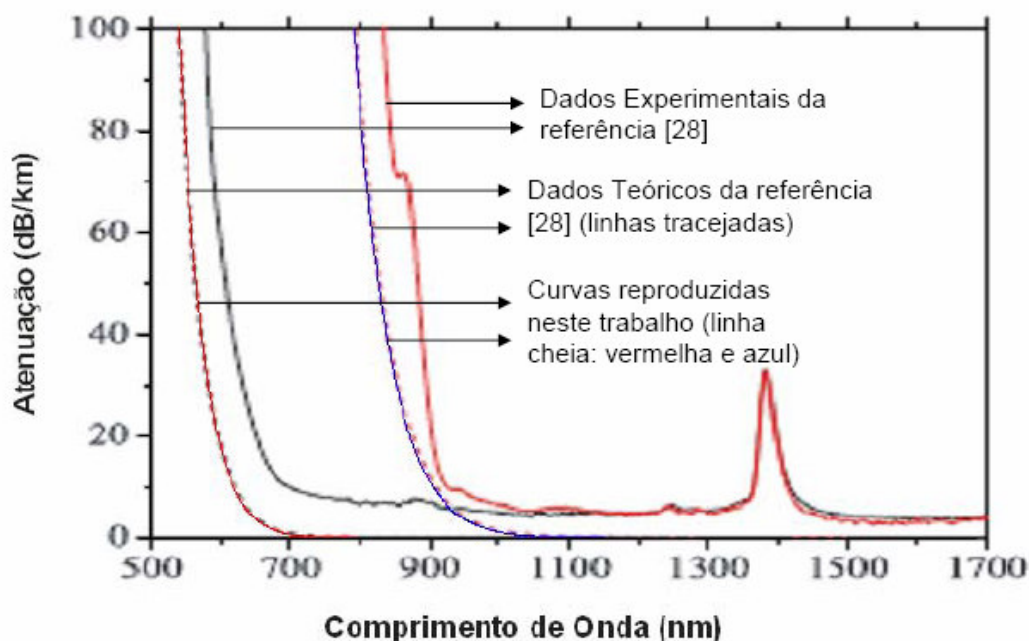


Figura 4.4 – Gráfico da teoria para raio de curvatura de 16 e 8 cm, linha pontilhada preta e vermelha respectivamente em comparação com as medidas experimentais para os respectivos raios, linha cheia preta e vermelha para os mesmos raios da teoria e sobrepondo o gráfico da reprodução do resultado da teoria usando os mesmos parâmetros, a curva vermelha é para o raio de 16 cm e a curva azul é para o raio de 8 cm, e vemos a concordância com a teoria em relação aos dados experimentais da fibra (LMA-20).

Portanto, na **figura 4.4** podemos observar a reprodução fiel do resultado da teoria, que foi usado como base para desenvolver a nossa teoria, mas ainda devemos fazer algumas adaptações, pois ela é para uma fibra de área modal grande. Logo, estamos interessados em estudar o efeito da curvatura na fibra levando em conta o preenchimento da mesma com líquido ou uma mistura de líquidos e assim sensoriar a diminuição da amplitude da luz guiada no núcleo, através desta curva feita na fibra, onde vamos observar a luz transmitida pela mesma e verificar a relação do aumento da sensibilidade à perda por curvatura, por causa da presença do líquido na microestrutura da fibra óptica. Na próxima seção estaremos explicando a forma de obtenção dessas adaptações da teoria para o nosso trabalho.

4.1.2 Estudo da Perda por Curvatura Induzida na Fibra Microestruturada preenchida:

No início do capítulo mostramos a fórmula para calcular a perda por curvatura em fibras convencionais na **equação 4.3**, e então reescrevemos esta fórmula para fibras microestruturadas usando a teoria de Nielsen *et al.* Contudo, precisamos de mais algumas adaptações, pois para nosso experimento usamos uma fibra microestruturada de núcleo sólido pequeno em relação à fibra (LMA-20) da teoria que tem o núcleo bem grande. Abaixo temos a foto da nossa fibra microestruturada usada.

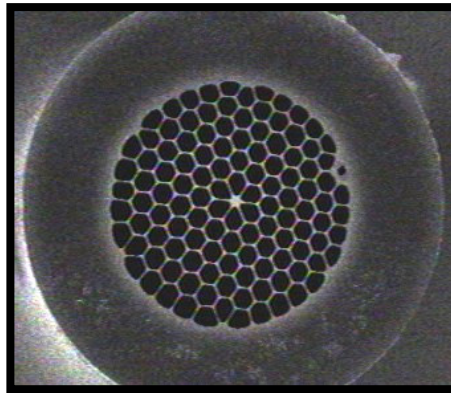


Figura 4.5 – Foto microscopia eletrônica de uma PCF de núcleo sólido com diâmetro de aproximadamente 2μm (*micrômetros*) fabricada na Universidade de Bath, Inglaterra (Dr. Cristiano M. B. Cordeiro) que será usada no experimento.

Nesta seção vamos à busca das adaptações para nosso caso. Iniciaremos pela procura de outra forma para escrever o V_{PCF} sem ajustes numéricos, pois temos um parâmetro novo, o preenchimento da fibra, que modificará o contraste de índice da fibra e além disto a fibra utilizada, **figura 4.5**, não é totalmente regular. Logo, precisamos relacionar o V_{PCF} com as novas entradas que são os índices de refração do núcleo ou efetivo e da casca.

Portanto, o novo V_{PCF} é reescrito a partir da **equação 4.7**, e assim obter a seguinte fórmula, dada por:

$$V_{PCF} = A \sqrt{\left(\frac{2\pi n_{\text{núcleo}}}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{2\pi n_{\text{casca}}}{\lambda}\right)^2}, \text{ onde } \beta = \frac{2\pi n}{\lambda} \quad (4.10)$$

$$V_{PCF} = A \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(n_{\text{núcleo}})^2 - (n_{\text{casca}})^2} \quad (4.11)$$

onde o V_{PCF} está em função dos índices de refração do núcleo e da casca que são calculados a partir da simulação da imagem da seção transversal da fibra que foi mostrada na **figura 4.5**.

A simulação da imagem é feita pelo aluno de doutorado Gustavo Wiederhercker do laboratório do Prof. Dr. Hugo Fragnito (Unicamp-IFGW). Ele precisa de uma boa imagem para realizar com sucesso a simulação, pois a mesma é muito sensível à qualidade da foto para que não tenhamos medidas do d e A da fibra com erro muito grande para obtermos os dados. Outra preocupação são as possíveis deformidades ou irregularidades da estrutura da fibra microestruturada após puxamento na torre, que também pode acarretar um erro muito grande nos dados. Nas fotos abaixo podemos observar.

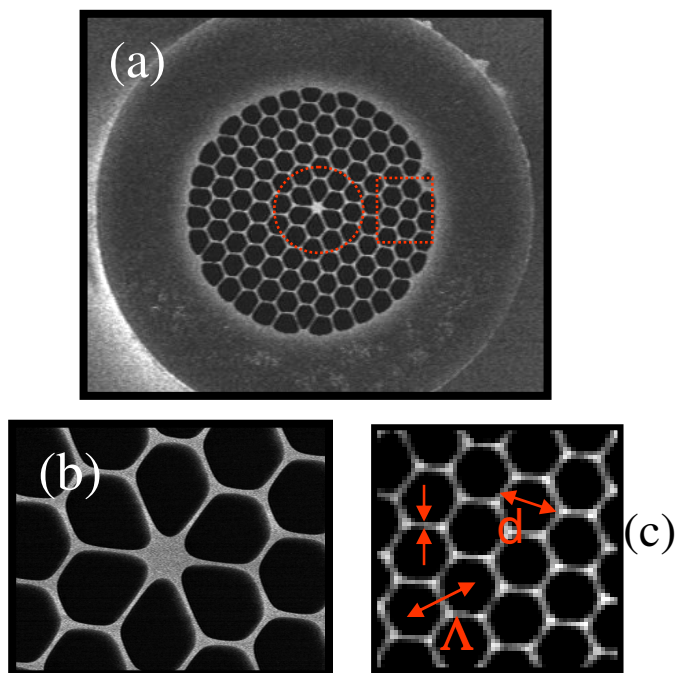


Figura 4.6 – Foto microscopia eletrônica da fibra microestruturada do trabalho (a), com duas partes da foto ampliada. Em (b), temos a ampliação da porção que contém o núcleo e os furos deformados ao redor do mesmo que prejudicam a simulação do índice do núcleo. E em (c) é ampliação de uma parte da casca, onde mostramos d e A e enfatizamos a espessura das pontes entre os furos.

Sabendo que a simulação da imagem nos dará uma tabela de dados contendo informações importantes para a teoria que será feita como, por exemplo, o índice de refração do núcleo ou efetivo, da casca e área efetiva do modo guiado, que poderá conter erros pelos motivos já mencionados. Mostramos abaixo a tabela de dados obtidos a partir da simulação da imagem da fibra, enfatizando os valores do índice de refração da casca em função da razão $\frac{d}{\Lambda}$ e variando índice de refração dos preenchimentos dos furos da casca e bem como o comprimento de onda utilizado na simulação e do índice de refração do material da fibra que é a sílica.

	$n_{\text{casca}} (\lambda=633 \text{ nm e } n_{\text{sílica}}= 1.457)$			
	1.0 (ar)	1.33 (água)	1.44 (água +glicerina)	1.448 (água +glicerina)
$d/\Lambda=0.90$	1.3145	1.38679	1.44398	1.44995
$d/\Lambda=0.92$	1.27764	1.37576	1.44319	1.44957
$d/\Lambda=0.94$	1.22713	1.36345	1.4424	1.4492

Tabela 4.2 – Dados do resultado da simulação feita a partir da imagem da fibra que mostra a variação do índice de refração da casca em função da razão d/Λ e para cada preenchimento dos microfuros da casca com fluidos de índices de refração indicado nas colunas.

Na **tabela 4.2** de dados fornecidos pela simulação da imagem, nós podemos observar que uma pequena variação no valor da razão $\frac{d}{\Lambda}$, nós temos uma variação expressiva nos valores do índice de refração da casca, por exemplo, temos a segunda coluna da tabela que contém os índices de refração da casca para cada razão $\frac{d}{\Lambda}$ especificada nas linhas da primeira coluna e levando em conta que os furos estão preenchidos de ar, podemos ver que os valores são bastante diferentes entre si para um mesmo preenchimento, logo a razão tem influência no cálculo do índice de refração da casca.

A razão $\frac{d}{\Lambda}$ traz a informação da relação da quantidade de ar e material que compõe a fibra terá na casca como também nos diz a espessura das pontes do material da fibra entre os furos, abaixo mostramos um cálculo simples da espessura das pontes

entres os microfuros da casca e depois o gráfico do índice de refração da casca em função do índice de refração do furo quando variamos da razão $\frac{d}{\Lambda}$.

$$\frac{d}{2} + Ponte + \frac{d}{2} = \Lambda \quad (4.12)$$

$$d + Ponte = \Lambda$$

$$\frac{Ponte}{\Lambda} + \frac{d}{\Lambda} = \frac{\Lambda}{\Lambda}$$

$$\frac{Ponte}{\Lambda} = 1 - \frac{d}{\Lambda} \quad (4.13)$$

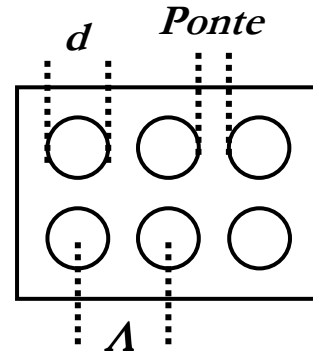


Figura 4.7 – Esquema da estrutura da casca da fibra microestruturada, onde temos o diâmetro do furo (d), o período entre os furos (Λ) e a ponte de vidro entre os furos.

$$\frac{d}{\Lambda} = 0,90 \quad \frac{Ponte}{\Lambda} = 1 - 0,90 = 0,1$$

$$\frac{d}{\Lambda} = 0,92 \quad \frac{Ponte}{\Lambda} = 1 - 0,92 = 0,08$$

$$\frac{d}{\Lambda} = 0,94 \quad \frac{Ponte}{\Lambda} = 1 - 0,94 = 0,06$$

- Considerando $\Lambda = 1 \mu\text{m}$, obtemos:

$$Ponte \left(\frac{d}{\Lambda} = 0,90 \right) = 0,1 \mu\text{m}$$

$$Ponte \left(\frac{d}{\Lambda} = 0,92 \right) = 0,08 \mu\text{m} \text{ (Razão da nossa fibra)}$$

$$Ponte \left(\frac{d}{\Lambda} = 0,94 \right) = 0,06 \mu\text{m}$$

Com este cálculo da ponte entre os furos, nós observamos que a razão $\frac{d}{\Lambda}$ tem uma importância enorme para a teoria das fibras microestruturadas, pois ela define o quanto de ar terá na casca e também a influência no cálculo do índice de refração da casca.

Então, para a simulação da imagem é preciso máxima qualidade da foto, pois os contornos têm que ser bem definidos para que o programa de captura de imagem não introduza erros nesta razão e como já mencionamos as próprias deformidades que podem ocorrer na estrutura da fibra ocasionada no decorrer do processo de fabricação da mesma que não podemos evitar que seja incluído na simulação.

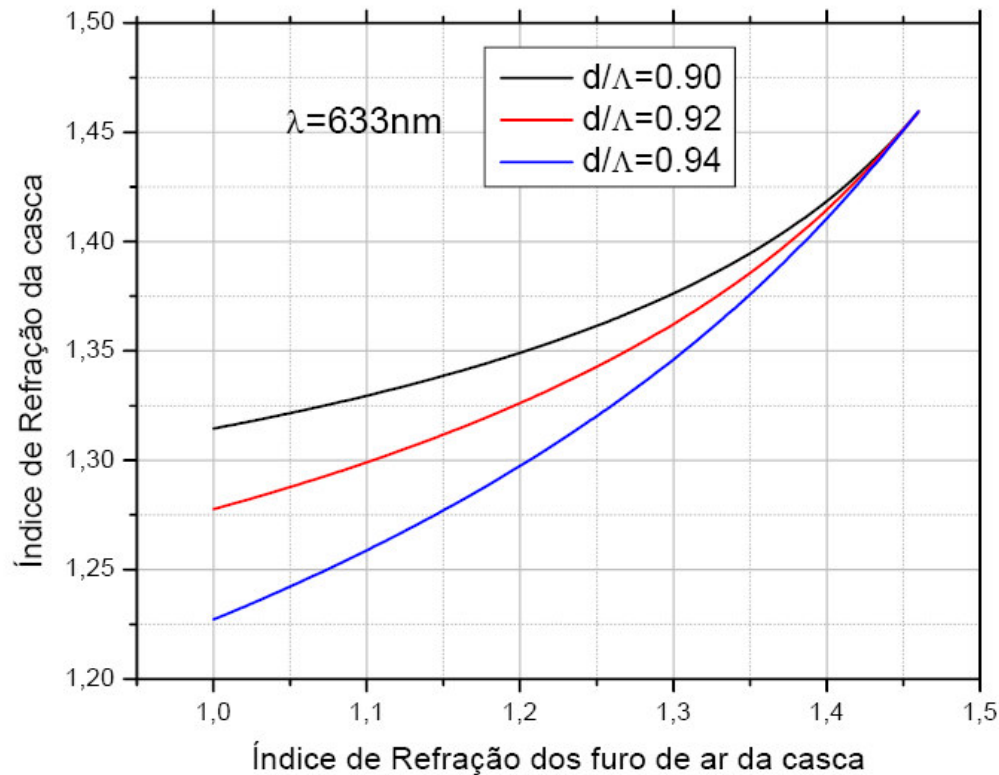


Figura 4.8 – Gráfico do valor do índice de refração da casca em função do índice de refração do preenchimento dos furos da casca para três valores da razão $\frac{d}{\Lambda}$, onde percebemos a enorme dependência do índice de refração da casca com esta razão.

Percebemos que a pequena variação na razão já mencionada tem uma grande variação no valor do índice da casca para um mesmo preenchimento dos furos. Notamos também que ao mudarmos o preenchimento dos furos para índices próximos da sílica, vemos que a variação fica menor, mas isso não indica que o erro seja pequeno. Então, para o cálculo da perda por curvatura do nosso trabalho com esta variação no índice de refração da casca e também com o erro do índice de refração do

núcleo por causa das deformidades ao seu redor já mostradas, nós teremos o comprometimento do resultado teórico.

Precisamos então quantificar esta variação no valor dos dados de entrada para a simulação do nosso trabalho, em que poderemos inferir o quanto isso poderá influenciar no cálculo da perda por curvatura, pois esta variação será propagada por todo o calculo da simulação. Então fizemos uma análise dessa variação no valor do índice de refração da casca fornecida pela simulação da imagem e usando a simulação do nosso trabalho para fazer esta análise, em que o índice de refração da casca vai ser variado por valores de Δ muito pequeno, como mostrado na **figura 4.9**.

```

neff = 1.444;
R = 16;
Aeff = 175;
Λ = 13.20;
(* Variação: Δ = 0; 1*10-6; 5*10-6; 1*10-5;
2*10-5; 3*10-5; 4*10-5; 5*10-5; 6*10-5;
7*10-5; 8*10-5; 9*10-5; 1*10-4; -1*10-6;
-5*10-6; -1*10-5; -2*10-5; -3*10-5; -4*10-5;
-5*10-5; -6*10-5; -7*10-5; -8*10-5; -9*10-5; -1*10-4*)

a = NAcl[λ_] = (5.38*10-5*λ - 1.53*10-3);

ncl[λ_] = √(neff2 - a2);
ncl[600] + Δ

NAfinal[λ_] = √(neff2 - (ncl[λ] + Δ)2);
NAfinal[600]

VRCF[λ_] = 13.2*1000*2*π*NAfinal[λ] / λ;

VRCF[600]

α[λ_] = (8.686)*107*((π/(8*√(6*π))) * (1/Aeff)*√(6*Λ3/(R*VRCF[λ]3)*Exp[-(10-2)*(R*λ2*VRCF[λ]3/(6*π2*neff2*Λ3)]);

α[600]
Plot[α[λ], {λ, 500, 1700}];
Null

```

Figura 4.9 – A simulação do cálculo da perda por curvatura da nossa teoria usando o V_{PCF} adaptado utilizado agora para analisarmos a variação do índice de refração da casca e a influência disso no valor da perda com os dados da ficha técnica da fibra LMA-20.

Com esta variação feita a partir da sexta casa decimal do valor do índice de refração da casca passando pelo valor sem variação, podemos verificar que ao crescer o valor do índice da casca, o valor da abertura numérica tem uma maior mudança, mas quando diminuimos essa variação, o valor da abertura numérica aumenta, mas com variação pequena. A partir desta análise fizemos um gráfico mostrado abaixo com os valores da perda calculada com esta variação pela variação do índice de refração da casca.

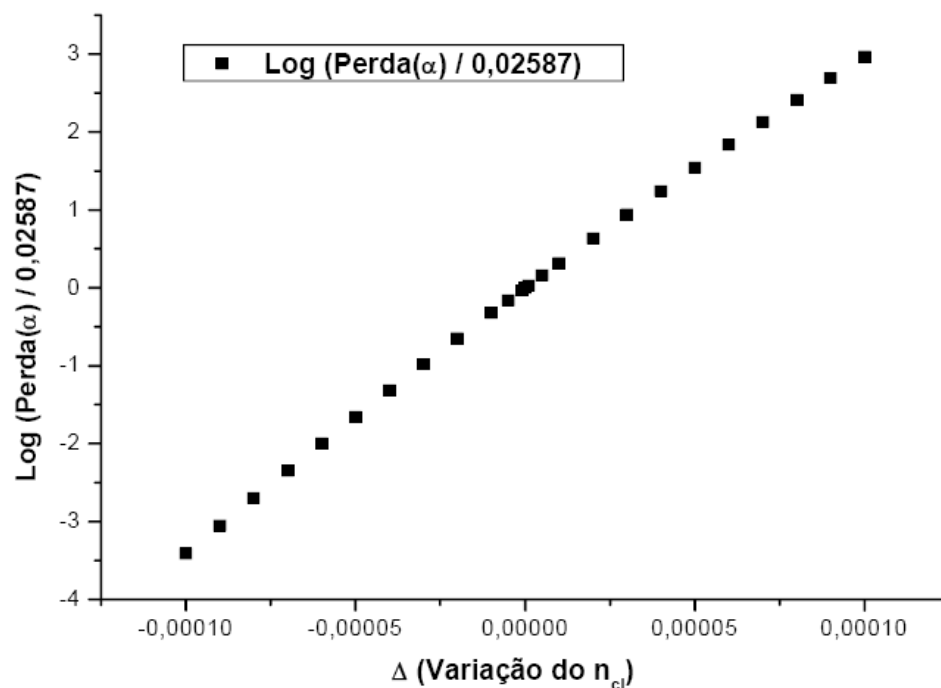


Figura 4.10 – Gráfico da variação do resultado da simulação, a perda por curvatura, para uma variação do índice de refração da casca. Onde podemos verificar a propagação de erro no cálculo da perda na fibra microestruturada.

Como observamos no gráfico da **figura 4.10**, uma pequena variação no valor calculado do índice de refração da casca, por exemplo, variando a quinta casa decimal do valor, nós podemos verificar que há uma variação de duas ordens de grandezas no valor da perda.

Portanto, este erro propagado se reflete no nosso resultado teórico final e assim confirmamos que não poderemos obter um valor apreciável para ser comparado

ao valor experimental, logo só poderemos prever o comportamento ou tendência da perda por curvatura em fibras microestruturadas através desta teoria desenvolvida neste trabalho.

Para concluirmos nossa análise sobre a teoria desenvolvida e o problema de propagação da variação dos valores dos parâmetros de entrada da simulação da perda por curvatura em fibras microestruturadas, iremos mostrar quatro situação em que poderemos observar a mudança do valor da perda quando mudamos o valor do índice de refração dos furos da casca mantendo em todos os gráficos o valor da razão $\frac{d}{\Lambda} = 0,90$.

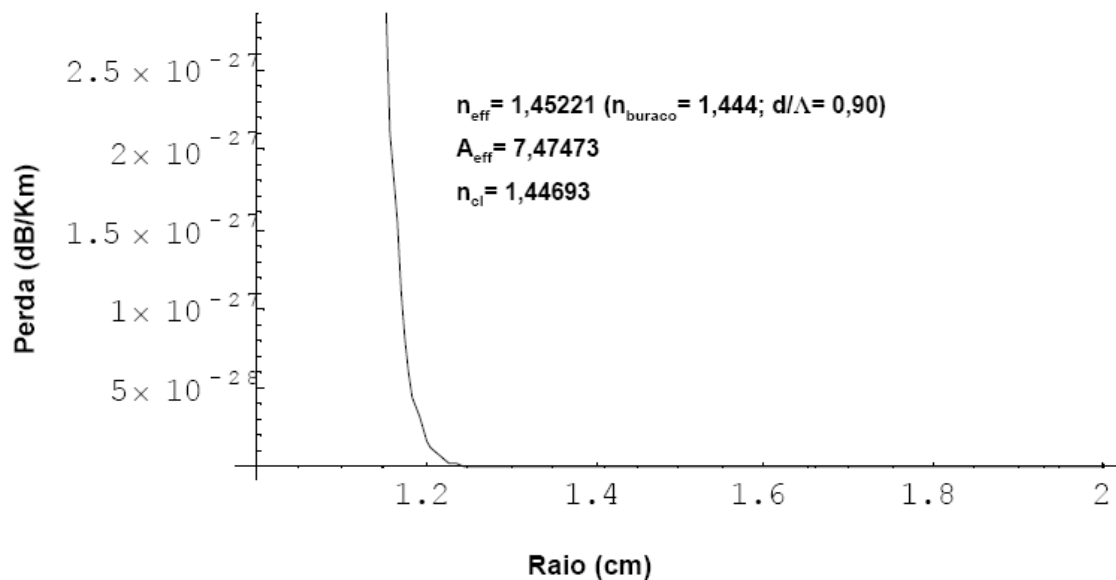


Figura 4.11 – Gráfico da perda por curvatura em que temos o índice de refração igual a 1,444 e índice de refração da casca igual a 1,44693, e também podemos observar a ordem de grandeza do valor da perda em 10^{-27} .

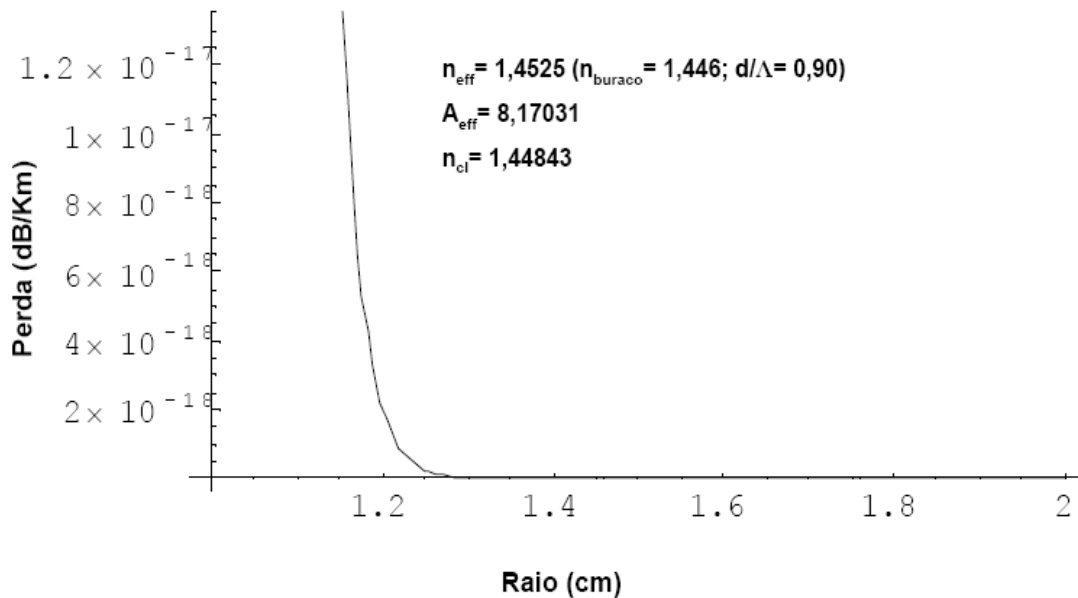


Figura 4.12 – Gráfico da perda por curvatura em que temos o índice de refração igual a 1,446 e índice de refração da casca igual a 1,44843, e também podemos observar a ordem de grandeza do valor da perda em 10^{-17} .

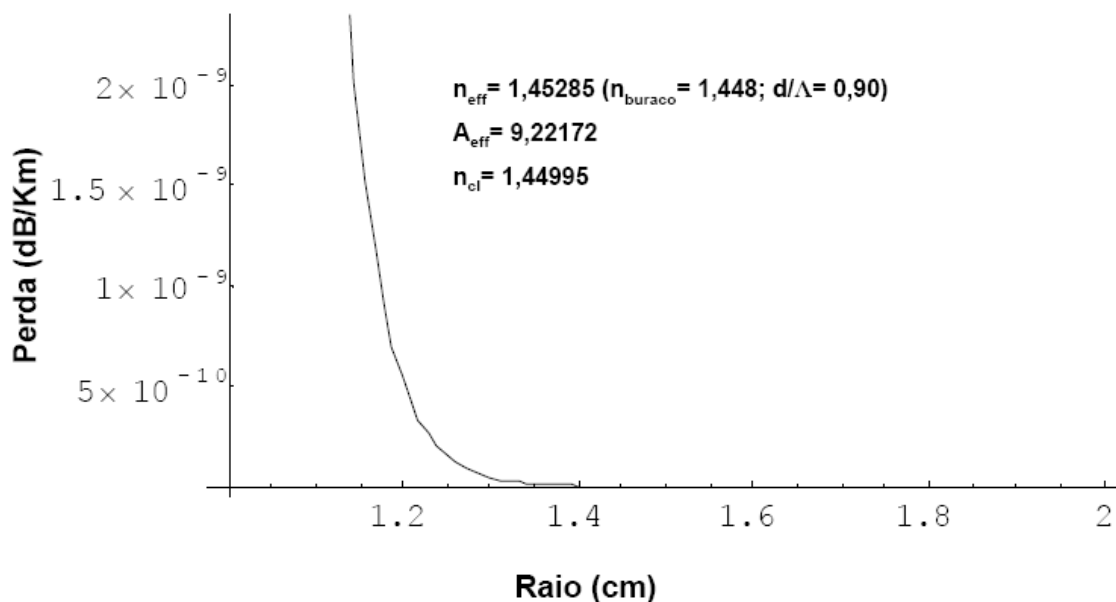


Figura 4.13 – Gráfico da perda por curvatura em que temos o índice de refração igual a 1,448 e índice de refração da casca igual a 1,44995, e também podemos observar a ordem de grandeza do valor da perda em 10^{-9} .

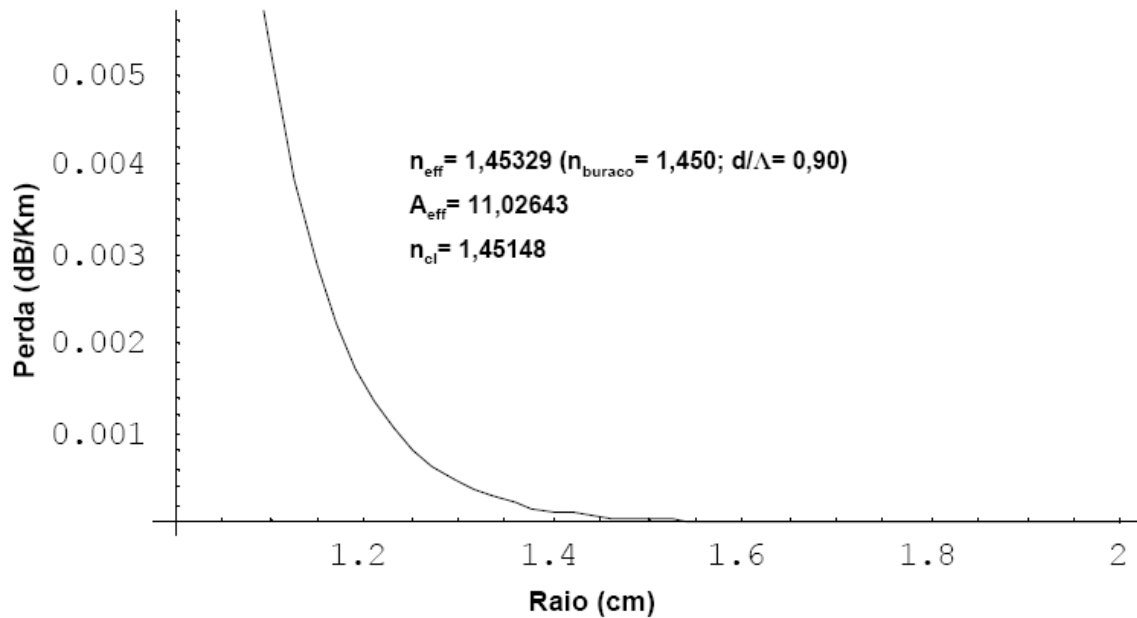


Figura 4.14 – Gráfico da perda por curvatura em que temos o índice de refração igual a 1,450 e índice de refração da casca igual a 1,45148, e também podemos observar a ordem de grandeza do valor da perda em 10^{-3} .

A nossa análise final sobre a teoria desenvolvida em relação ao problema de propagação de erro nos parâmetros de entrada da simulação e que podemos observar nestes gráficos acima, foi que ao variarmos o índice de refração dos furos da casca em valores próximos, variação na terceira casa decimal do valor, percebe-se que o valor do índice de refração vai ficando cada vez mais próximo do valor do índice de refração efetivo em cada gráfico e assim diminuindo as ordens de grandeza no resultado da perda, mas também verificamos que a tendência da perda é a mesma em todos os gráficos, e a curva vai suavizando com a diminuição das ordens de grandeza no resultado da perda.

Na próxima seção estaremos descrevendo as montagens dos dois experimentos desenvolvidos para este estudo da perda por curvatura e bem como os seus resultados.

4.1.3 Experimentos e Resultados:

Os experimentos para estudo da perda por curvatura estão montados em uma mesa óptica, em que temos um posicionador (xyz) alinhado ao um laser de He-Ne, que são a entrada para os dois experimentos. No posicionador (xyz) da entrada temos a fibra microestruturada preenchida com líquido, com a sua ponta descasada de seu revestimento de polímero e clivada em alguns milímetros para a limpeza da seção transversal ou face da fibra que estará recebendo o feixe do laser.

A fibra está fixada em um carrinho próprio para fibra que está fixo no posicionador (xyz) da entrada e alinhado a uma objetiva de microscópico que está neste posicionador, onde colimamos o feixe do laser da entrada. Descrevi a parte da entrada dos experimentos usados aqui, mas que também é o mesmo para as outras montagens experimentais desta dissertação.

Após este posicionador (xyz) da entrada, é que temos a diferença entre as duas montagens. Na primeira montagem há mesinha, onde colamos um desenho de vários arcos de circunferência que sabemos o raio e em há um suporte móvel, que é o nosso suporte da saída, que tem um carrinho fixo ao mesmo com a outra ponta da fibra também descascada e clivada, que é usada para coletar a luz transmitida num medidor de potência (*Power Meter*).

E a segunda montagem tem um suporte ou poste fixo, onde colamos a fibra preenchida com líquido deixando uma parte da fibra suspensa até ser colada na extremidade de outro suporte igual ao da entrada, mas sem a objetiva, que é o suporte de saída, que tem um carrinho fixo com a outra ponta da fibra também descascada e clivada, que é usada também para coletar a luz transmitida pelo medidor de potência.

O preenchimento usado dos furos da microestruturada da fibra nos testes iniciais era o ar, água e uma mistura de água + glicerina (solução de 85% de glicerina). Então, usando estes preenchimentos nos dois experimentos verificamos os que trazem maior sensibilidade à fibra em cada montagem.

Nas duas montagens com a fibra sem preenchimento (com ar) obtemos o esperado, a transmitância normal da fibra, mas com a água temos resultados diferentes nas montagens, pois na primeira há pouca mudança na transmitância na fibra com

água, mantendo certa regularidade e no segundo temos uma visível redução na transmitância.

Contudo é com a solução de glicerina 85%, que temos o efeito de redução de transmitância apreciável nas duas montagens. Esta solução é usada também no estudo para sensor de temperatura e tem o índice de refração (1,4439) próximo do índice do material do núcleo da fibra. O índice de refração foi medido no aparelho Abbe, na própria Unicamp (laboratório de Ensino de Física - Técnico Antônio Costa). Agora vamos mostrar os desenhos das montagens e seus resultados. Iniciaremos pela primeira montagem já descrita anteriormente.

- **Experimento 1:**

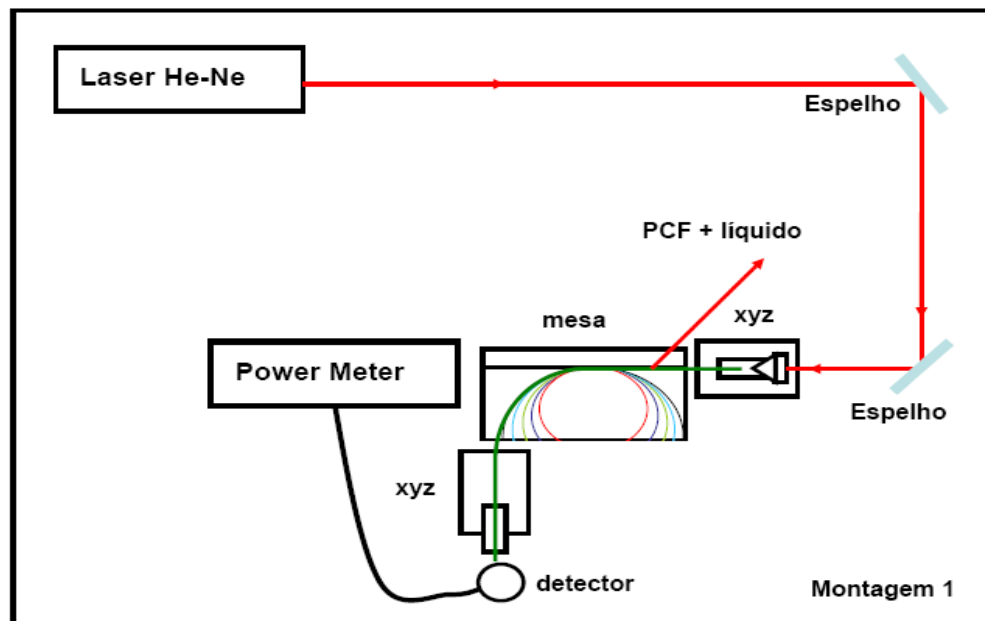


Figura 4.15 – Desenho da primeira montagem do experimento para perda por curvatura, que utiliza várias curvas de raios diferentes desenhados em uma pequena mesa onde a fibra é colocada e assim realizamos as medidas.

A medida experimental consiste primeiramente em medir a potência de entrada (antes da fibra) e a seguir a potência de saída da fibra reta, e depois fazemos sucessivas curvas de raios variados e no final fazemos mais uma medida da fibra reta e assim se encerra um ciclo de medidas deste experimento e obtemos uma tabela, onde analisamos a variação da medida e seu erro.

Partindo desta tabela de dados, nós vamos agora calcular pela fórmula da perda, descrita na **equação 4.2**, em que fizemos umas modificações para obter a perda por curvatura em dB/m, portanto temos a fórmula dada agora por:

$$\alpha(\text{dB}/\text{m}) = -868,6 \frac{\ln(T)}{2d} \quad (4.14)$$

onde T é a transmitância da luz guiada na fibra, d é comprimento do arco da curva em centímetros. A perda por curvatura (α) está em função da transmitância e do comprimento do arco da curva.

Agora que sabemos calcular o valor experimental da perda por curvatura na fibra microestruturada, podemos fazer os gráficos do resultado, que são mostrados abaixo. O primeiro gráfico, o da transmitância, é a medida propriamente dita e segundo será com as curvas da perda em função dos dados do gráfico da transmitância.

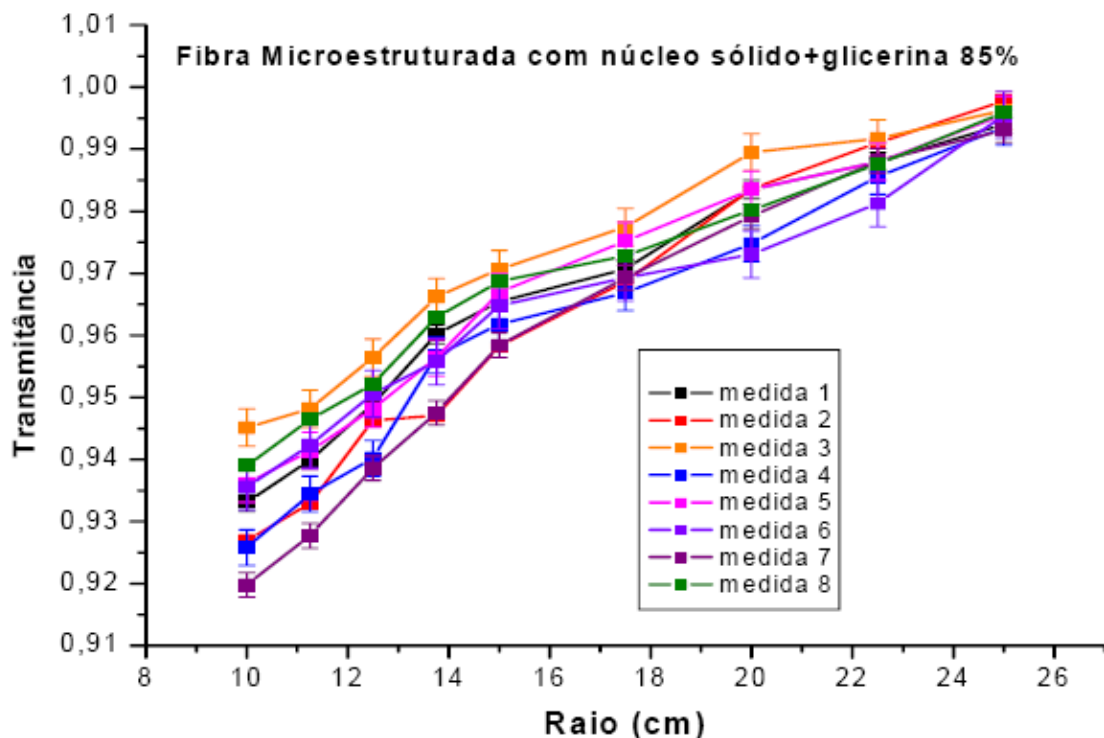


Figura 4.16 – Gráfico dos valores da Transmitância de oito tabelas de medidas experimentais realizadas.

Observamos no gráfico da **figura 4.16**, as curvas de transmitância, que seguem a tendência da teoria do início do capítulo. Há maior espalhamento da luz

transmitida nas curvas mais acentuadas, menor raio de curvatura, e por fim nos raios de curvatura maiores teremos espalhamento da luz menor, pois a curva feita na fibra é mais suave. Agora usaremos as curvas de transmitância para obter as curvas da perda por curvatura do experimento na fibra microestruturada com a **equação 4.14**, mostrada abaixo.

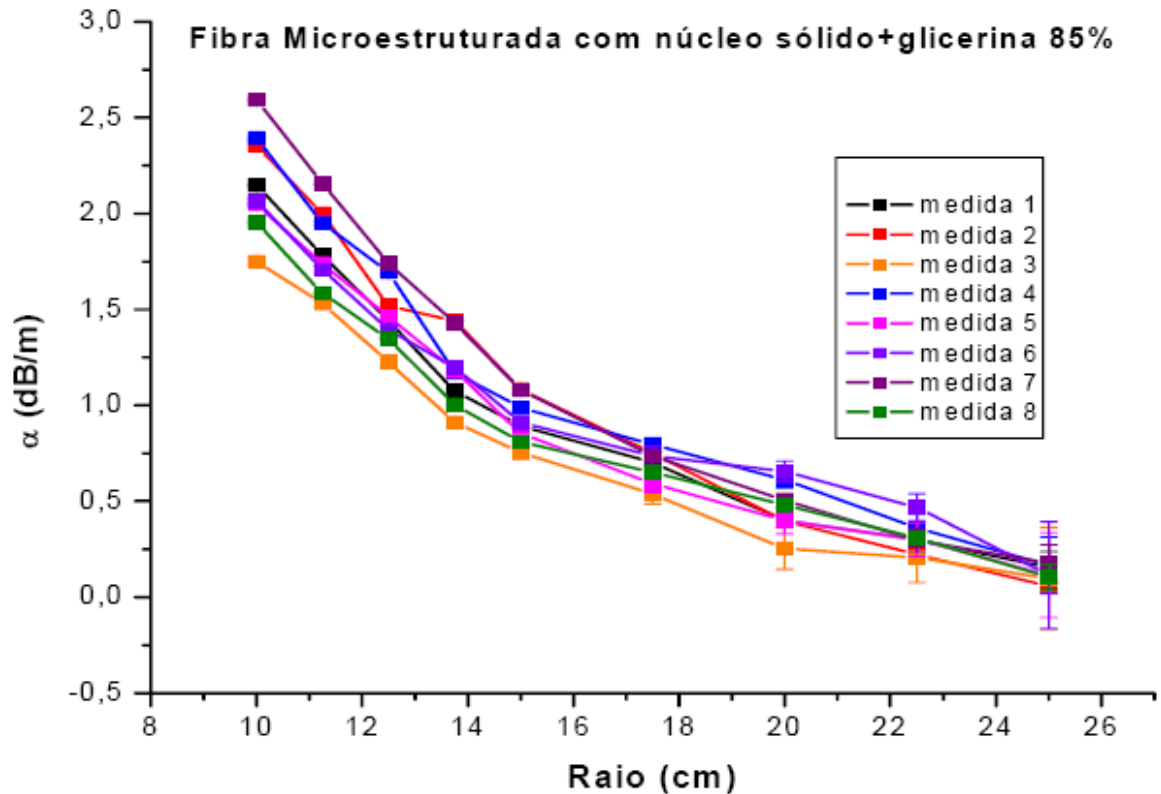


Figura 4.17 – Gráfico das curvas da perda por curvatura do experimento.

No gráfico da **figura 4.17**, temos o resultado final do primeiro experimento, em que observamos a tendência prevista na teoria feita para o estudo da perda por curvatura em fibras microestruturadas, pois não podemos avaliar quantitativamente por causa da variação do erro da simulação teórica. E há uma alta variação para valores pequenos de raios próximos, como por exemplo, no raio de 10 cm o valor da perda por curvatura é aproximadamente 2.25 dB/m e no raio de 14 cm a perda é aproximadamente 1.25 dB/m, logo, há queda de sinal de 1 dB/m em menos de 4 cm de diferença dos raios de curvatura feitos na fibra.

Portanto, se houver a diminuição do erro da simulação dos índices de refração da casca e do núcleo em nossa teoria, poderemos ter uma melhor análise dos dados experimentais. Agora vamos analisar a proposta feita na segunda montagem, que é outra maneira de se obter o efeito da perda por curvatura, mas via aplicação de pressão na fibra, com efeito de comprimir a fibra no sentido de seu comprimento e assim observar a diminuição da transmitância com maior intensidade na mesma por causa da pressão.

- **Experimento 2:**

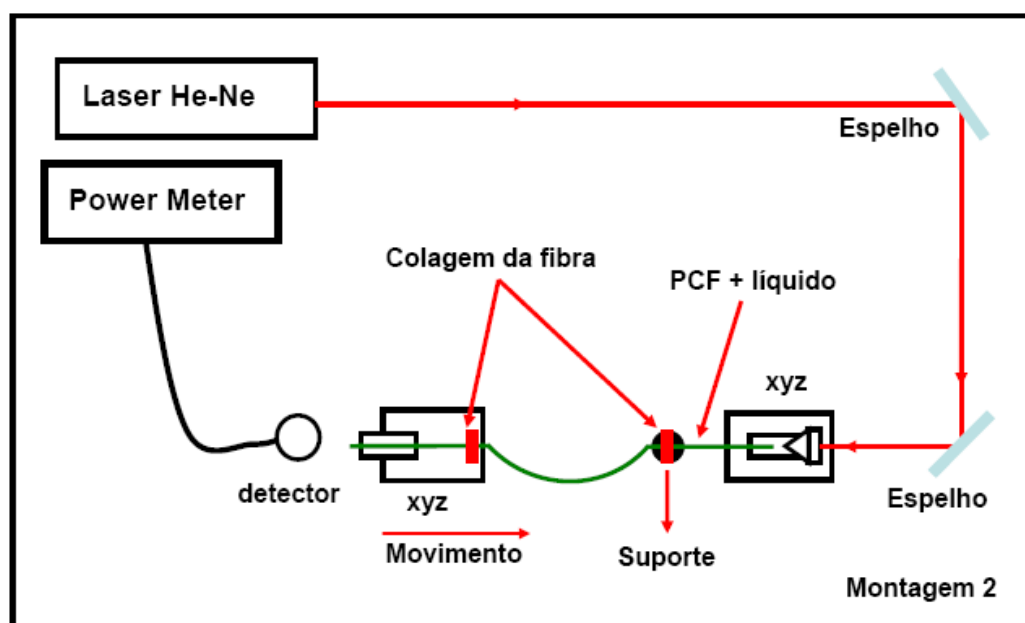


Figura 4.18 – Desenho da segunda montagem do experimento para perda por curvatura, em que se faz uma curva na fibra ao longo de seu comprimento pela aplicação de pressão na mesma e assim realizamos as medidas.

Neste experimento a medida parte a princípio como na primeira montagem, onde também há obtenção de uma tabela de dados. Mas precisamos de uma teoria mais específica, pois existem aqui três pontos de perda por curvatura na fibra, que seriam as extremidades coladas da fibra mostradas no desenho da montagem que definem o comprimento a ser comprimido e a própria curva feita no comprimento da fibra. Temos duas referências ^[36, 37] em particular que pode ser usada para dar início a busca das modificações da nossa teoria para descrever a proposta do segundo experimento. Agora mostramos as medidas realizadas com esta montagem.

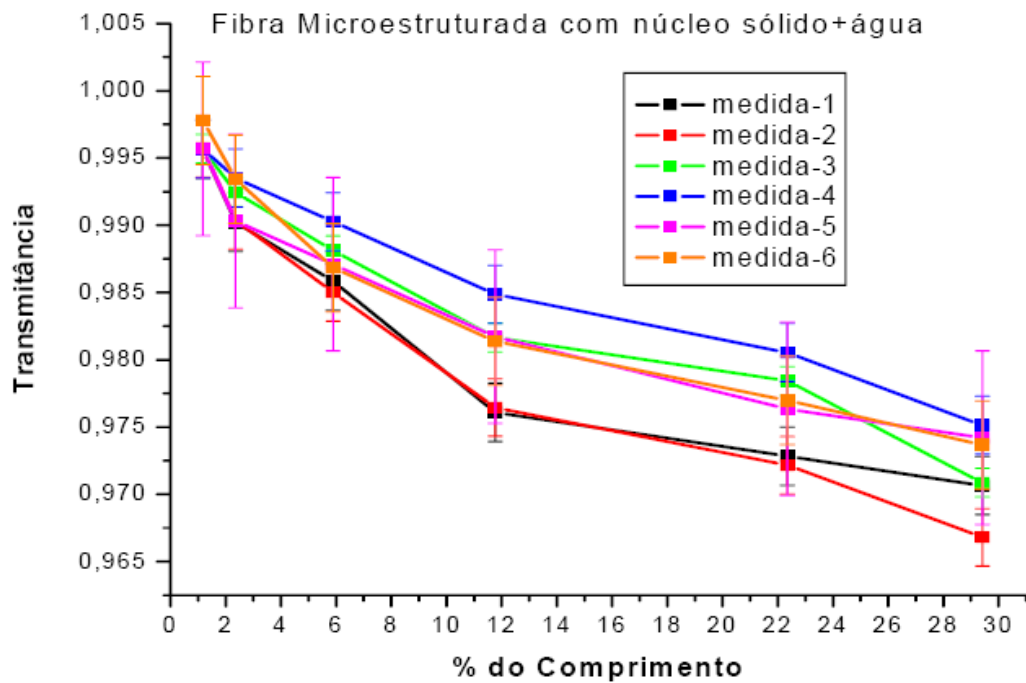


Figura 4.19 – Gráfico dos valores da Transmitância de algumas medidas feitas com fibra preenchida com água na montagem.

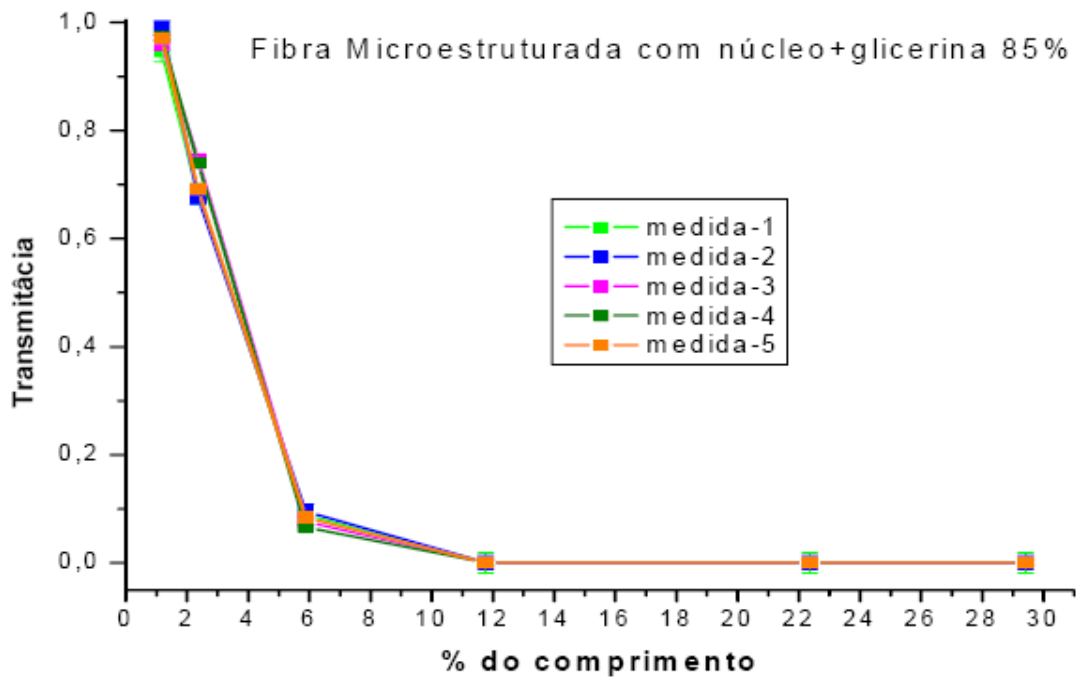


Figura 4.20 – Gráfico dos valores da Transmitância de algumas medidas feitas com fibra preenchida com a mistura com glicerina 85% na montagem.

No gráfico da **figura 4.19 e 4.20**, as curvas de transmitância deste experimento, também seguem a tendência da teoria desenvolvida no capítulo, mas com uma variação maior no valor da transmitância em relação à porcentagem do comprimento comprimido no sistema principalmente na mistura de líquidos (glicerina 85%). Logo, precisamos desenvolver a teoria que descreve o experimento para calcular a perda por curvatura via compressão da fibra.

Portanto, nós queremos mostrar com todos estes estudos teóricos, e experimentais a viabilidade de outras formas de analisar a perda por curvatura em fibras microestruturadas, mas que dependem de uma melhor simulação teórica para de fato compararmos a teoria com o experimento. Também verificamos o potencial deste estudo para a aplicação na área de sensoriamento à fibra óptica, por exemplo, sensor de pressão/deslocamento (segunda montagem) ou como mais uma opção de uso das fibras microestruturadas em geral.

Na próxima seção estamos descrevendo as outras montagens de dois experimentos desenvolvidos para o estudo de sensoriamento a fibra e bem como os seus resultados.

4.2 Princípio de Sensoriamento da temperatura via variação da Abertura Numérica:

Nesta seção iremos continuar realizando o estudo de sensoriamento a fibra micro estruturada, mas agora queremos fazer a monitoração da influência do líquido inserido na fibra quando há uma variação de um parâmetro externo, neste caso a temperatura, em que observamos uma maior sensibilidade de um parâmetro da fibra, como a abertura numérica na saída da mesma. A abertura numérica é o cone de luz formado na face de saída da fibra ^[38]. Abaixo temos um esquema de como seria a abertura numérica da fibra.

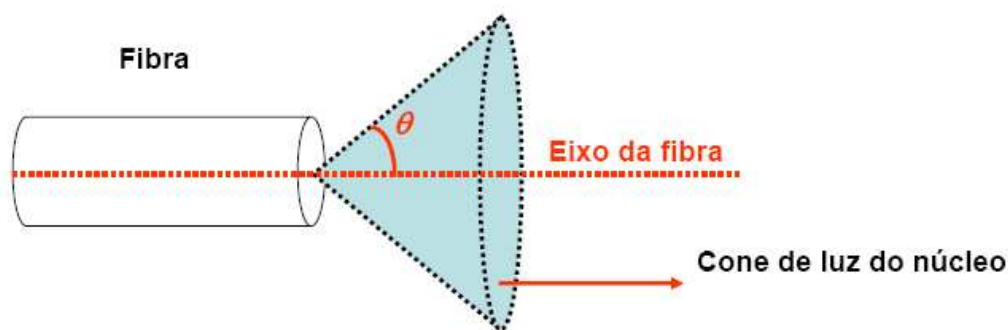


Figura 4.21 – Esquema da abertura numérica, onde enfatizamos o cone que sai do núcleo.

Então, a presença de líquido deixa a fibra mais sensível a temperatura, pois modificamos o índice de refração da casca de tal maneira que conseguimos manipular um parâmetro da fibra, como a abertura numérica, que está relacionado com o índice de refração do material do núcleo, que neste caso é de sílica pura que tem uma taxa de variação do índice de refração com a temperatura muito baixa com relação ao de líquidos.

Logo, podemos fazer o sensoriamento da temperatura a partir desta variação da abertura numérica induzida pela taxa de variação do índice de refração da casca preenchida com a temperatura. Na seção seguinte iremos introduzir este estudo e medidas testes feitas para evidenciar este efeito.

4.2.1 Estudo da variação da Abertura numérica com a Temperatura:

Sabendo que a abertura numérica está relacionada com o índice de refração do material da fibra, iniciaremos os estudos a partir da variação dos índices de refração dos materiais com a temperatura envolvidos no experimento.

A dependência do índice de refração dos materiais com a temperatura, chamada de coeficiente termo-óptico ou simplesmente dn/dT , tem sido estudado para uma ampla variedade de aplicações ópticas [39, 40]. Então, primeiramente pesquisamos os índices de refração e seus respectivos dn/dT dos seguintes materiais usados na teoria e experimento: ar, sílica, água e glicerina. Abaixo listamos os índices e seus respectivos dn/dT [41, 42].

	índice de refração (n)	$\frac{dn}{dT}$
ar	1.0	- 0.8 x 10 ⁻⁶ /°C
sílica	1.45	+ 1.3 x 10 ⁻⁶ /°C
água	1.33	- 1.44 x 10 ⁻⁴ /°C
glicerina	1.47	- 2.3 x 10 ⁻⁴ /°C

Tabela 4.3 – Dados sobre os materiais com seus índices de refração e coeficiente termo-óptico.

Na **tabela 4.3**, estão listados os índices de refração e seus respectivas coeficiente termo-óptico, que mostram a variação dos materiais com temperatura. Percebemos que o ar e a sílica têm uma variação muito baixa com a temperatura. Para nosso experimento precisamos preencher a casca microestruturada da fibra com líquido de alto coeficiente termo-óptico. Em relação ao líquidos listados temos que a água não varia tanto quanto a glicerina. Então vamos fazer a mistura dos líquidos para obter uma maior variação. Agora precisamos determinar o índice de refração da mistura dos líquidos e seu $\frac{dn}{dT}$.

- **Índice de Refração da Mistura de Líquidos:**

Para o cálculo do índice da mistura de líquidos, nós usamos os índices de refração originais na Fórmula de *Lorentz-Lorenz* ^[43]. Abaixo temos a demonstração da fórmula de *Lorentz-Lorenz* para este caso e assim obter o índice da mistura em função da temperatura.

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \sum p_i m_i, \quad (4.15)$$

onde n é o índice de refração da mistura que é igual ao somatório da proporção de cada líquido (p_i) multiplicado de sua porcentagem na mistura (m_i). Para o caso dos índices de refração originais que formam a mistura, são representados por: n_a (índice da água) e n_g (índice da glicerina), e suas respectivas porcentagens na mistura por x e $1-x$. Logo, teremos:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{n_a^2 - 1}{n_a^2 + 2} * X + \frac{n_g^2 - 1}{n_g^2 + 2} * (1 - X), \quad (4.16)$$

sabendo que o índice de refração varia com a temperatura, nós obtemos que:

$$n(T) = n_a(T) * X + n_g(T) * (1 - X) \quad (4.17)$$

Portanto, o índice de refração da mistura está em função da temperatura, do índice de refração da água e da glicerina. Após algumas manipulações matemáticas na **equação 4.17**, obtemos fórmula geral do índice de refração em função de $(T, \frac{dn}{dT})$ como mostramos abaixo:

$$n(T) = n_0(T) + \frac{dn}{dT} * T, \quad (4.18)$$

onde $n(T)$ é o índice de refração variando com a temperatura, que está escrita em função do índice da substância (n_0), do coeficiente termo-óptico e da temperatura (T). Abaixo mostramos o gráfico do índice de refração da mistura (água+glicerina), onde temos o índice de refração da mistura variando com a porcentagem de glicerina.

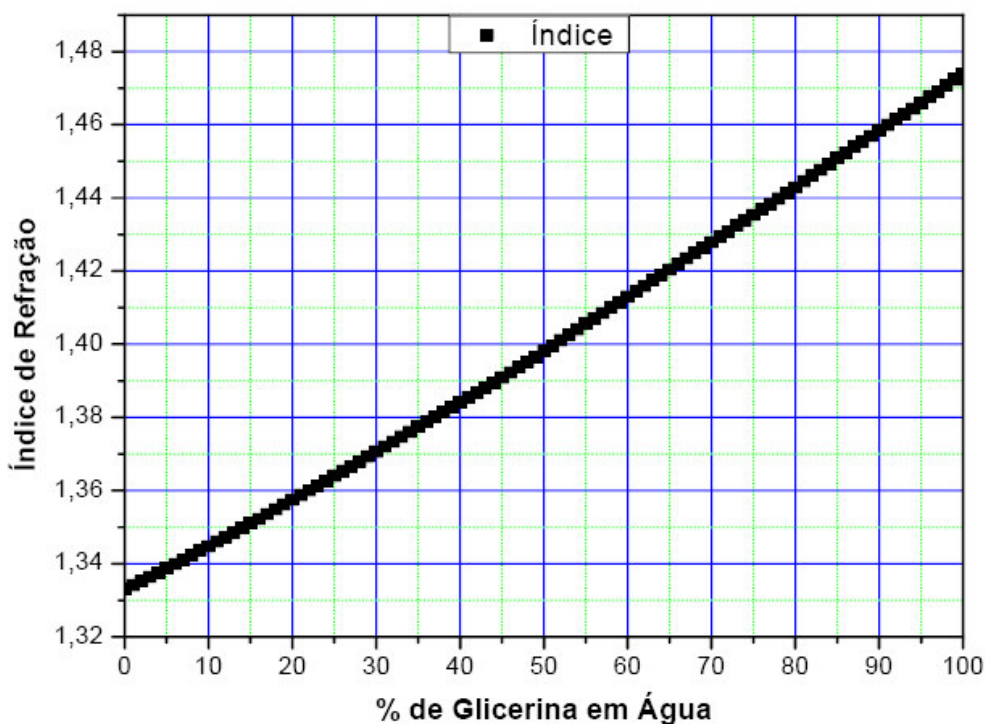


Figura 4.22 – Gráfico com os valores dos índices da mistura variando com a porcentagem de glicerina.

Após a obtenção dos índices possíveis da mistura dos líquidos com alta variação de $\frac{dn}{dT}$, foram feitos testes para escolher o índice de refração da mistura mostrado na **figura 4.22**, para ser usado no experimento. Contudo, precisamos que a mistura inserida não faça a fibra parar de guiar por causa do aumento do índice de refração médio da casca ou que haja espalhamento da luz guiada na casca com a presença da mistura. Então, escolhemos o índice de refração da mistura glicerina 85% e a partir disso vamos agora descrever o experimento e comentar o que foi feito para tentar obter o resultado experimental confiável.

- **Experimento:**

Para realização deste experimento foi feito inicialmente à tentativa de coletar imagens na CCD posicionada bem próximo da saída da fibra no sistema. Mas, isto não deu um resultado bom e que pudesse ser confiável, pois havia muitas variações nas imagens coletadas na câmara e sendo assim não sabemos se o aumento de tamanho ou diminuição nas imagens, ou ainda distorções nas imagens eram causadas pela variação da abertura numérica com a temperatura; e também se o líquido da fibra evaporou durante o processo por causa do aquecimento. Mostramos abaixo imagens tiradas de testes feitos com este sistema.

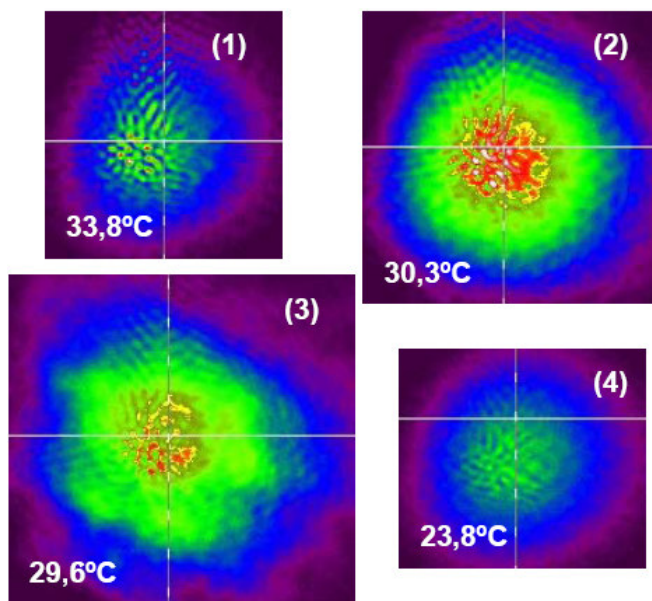


Figura 4.23 – Imagens coletadas na CCD feitas na medida teste no início do estudo do sensor de temperatura via abertura numérica.

Na **figura 4.23**, observamos as imagens da medida teste com o sistema em que tinha uma câmara CCD na saída. Em **(4)** é a imagem do cone de luz da saída da fibra com a CCD bem próxima e antes do aquecimento a 23,8°C. As imagens **(1)-(2)-(3)** nesta seqüência mostram a direção em que foram coletadas, pois o experimento é feito quando a fibra está sendo esfriada do aquecimento, neste caso aquecemos a fibra por 15 minutos e a temperatura chegou a 36°C, e vemos as mudanças nas imagens nesta seqüência, mas não podemos afirmar que estas mudanças são por causa da variação da abertura numérica com a temperatura e também verificamos que ao final do processo não conseguimos voltar à imagem mostrada em **(4)** e às vezes ocorre desalinhamento no sistema após aquecimento.

Portanto, mudamos o modo de realizar a coleta de informação na saída da fibra, que consiste no uso de uma fibra multimodo coletora conectada ao analisador espectro óptico (**OSA**), em que vamos observar a diminuição da intensidade coletada pela fibra quando aumentamos da temperatura. Depois do esfriamento do sistema verificamos o aumento da intensidade e a diminuição da abertura numérica, respectivamente. Na **figura 4.24** mostramos o esquema da montagem atual.

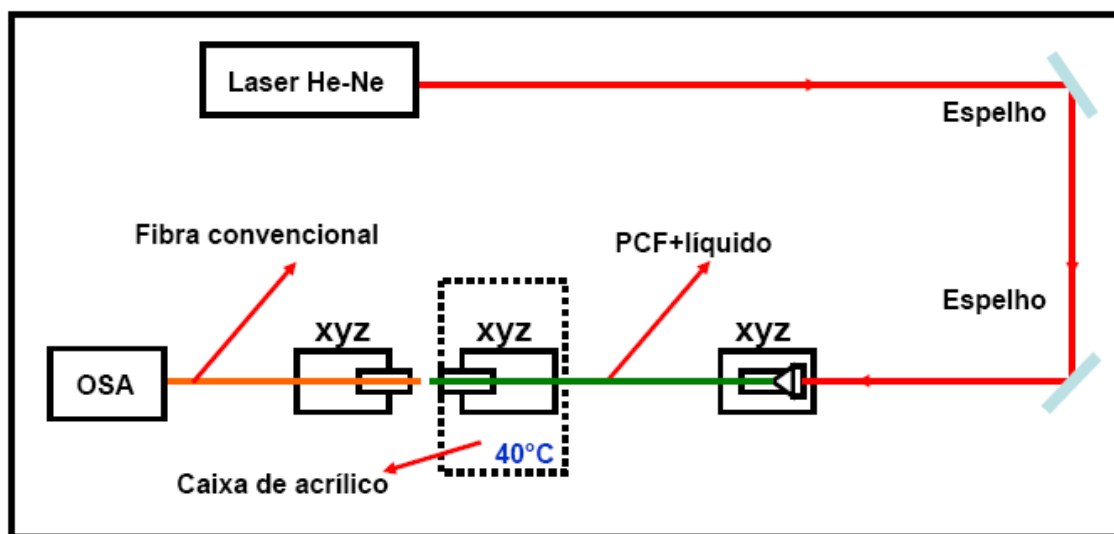


Figura 4.24 – Desenho da montagem do experimento para o sensor de temperatura via variação da abertura numérica.

Para este sistema descrito na **figura 4.24** foram feitas duas medidas. Na primeira, foi feita com a fibra sem preenchimento para obter uma medida de referência, mas observamos que há uma variação considerável no valor da intensidade coletada no sistema, que pela teoria deveria ser muito pequena. Por fim, a segunda medida foi feita com uma fibra preenchida por capilaridade com a mistura escolhida somente em alguns centímetros na parte da fibra voltada para a saída, pois queremos evitar a perda por curvatura nela. Observamos a diminuição acentuada na intensidade coletada do sistema e também tivemos problemas de desalinhamento, pois o sinal não retornou ao seu valor antes do aquecimento e quando verificamos o alinhamento, o sinal volta para o seu valor inicial. Portanto, estamos tendo ainda problemas para obter as medidas confiáveis e assim comparar com a teoria.

Na próxima seção estamos descrevendo o estudo do sensoriamento a fibra microestruturada com gás e o seu resultado.

4.3 Princípio de Sensoriamento a Fibra Microestruturada de Gás:

Até agora só tivemos preenchimentos com líquidos, contudo também podemos inserir gás nos furos da microestrutura da fibra. Nós iremos usar a fração de energia luminosa que escapa do núcleo e penetra na casca, esta luz que escapa na interface núcleo-casca é chamada de campo evanescente. Há estudos com fibras micro estruturadas com relação à inserção de gás na fibra ^[44, 45, 46, 47].

A vantagem de usar fibras microestruturadas para sensoriamento a fibra óptica é que podemos ter uma maior interação da amostra com a luz guiada, pois a amostra está dentro da fibra microestruturada e assim um longo comprimento de interação, sem precisar fragilizá-la por causa do *taper* ou afinamento do diâmetro da fibra para maximizar o campo evanescente para fora da fibra ou usar a fibra D, onde temos uma pequena parte da fibra óptica exposta para fazer a medida.

Então, quando temos os microfuros da estrutura da fibra cheios de gás, o campo evanescente interage com as moléculas do mesmo e é absorvido, por exemplo, com isso a luz transmitida na fibra diminui, por causa da absorção do gás que funciona como a assinatura do mesmo, pois cada gás absorve a luz de maneira diferente ou não absorve, logo podemos sensoriar gases via campo evanescente nos furos da fibra microestruturada.

Nesta seção seguinte iremos mostrar como foi feito o estudo do princípio de sensoriamento à fibra microestruturada de um gás usando o campo evanescente da fibra, montagem experimental e resultado.

4.3.1 Inserção de um Gás na Fibra Microestruturada:

Para mantermos um gás dentro dos furos da fibra devemos colocá-lo em um recipiente onde ele possa entrar em contato com a fibra microestruturada, na literatura encontramos a referência Y. L. Hoo *et al* ^[44] que faz este tipo de inserção, mas queremos que o gás fique dentro da fibra indefinidamente, pois no trabalho mencionado, a fibra microestruturada é desconectada deste recipiente e, portanto o gás escapará com o tempo de dentro da fibra e isto pode comprometer a qualidade da medida. Logo, optamos em desenvolver uma célula de pressão que nos permita inserir gás em qualquer fibra e com qualquer comprimento, e também que nos possibilite um fluxo contínuo de gás na fibra e também a incidência de luz no núcleo da fibra que estará dentro da célula.

Para este experimento, nós precisamos estudar e quantificar a fração de luz incidente que penetra na casca microestruturada, que é o campo evanescente. Para isto foram feitas simulações da fibra com relação ao campo evanescente, como também o projeto das fibras e métodos de análise. Neste trabalho usamos a simulação pelo método de elemento finito feita pelo Dr. Marcos Franco e colaboradores do IEAv-CTA ^[48].

A fibra microestruturada a ser simulada para este fim foi desenvolvida e fabricada pelo meu co-orientador Dr. Cristiano M. B. Cordeiro. Esta fibra microestruturada tem uma geometria simples para o desenvolvimento da inserção de material, pois possui três grandes furos de ar ao redor do núcleo e o diâmetro do núcleo é de aproximadamente $4\ \mu\text{m}$ e seu diâmetro externo de $130\ \mu\text{m}$. Na **figura 4.25** mostramos a foto da fibra microestruturada usada no experimento.

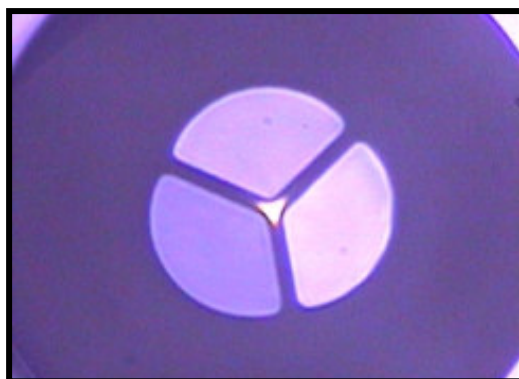


Figura 4.25 – Foto de microscopia óptica da fibra microestruturada de núcleo sólido com diâmetro de aproximadamente $4\mu\text{m}$ (*micrômetros*) fabricada pelo Dr. Cristiano M. B. Cordeiro.

Na simulação pelo método de elemento finito feita para a fibra da **figura 4.25**, foi usado um comprimento de onda, $\lambda = 1,55\ \mu\text{m}$, e assim obtemos a porcentagem de energia nos furos, que é de 0,27% (porcentagem de energia que escapa do núcleo para os furos). Logo, a fibra simulada tem as características mínimas para fazermos as medidas de inserção de gás usando as células de pressão fabricadas na Unicamp. O gás escolhido para o experimento foi o gás acetileno por causa dos vários e fortes picos de absorção na faixa de 1500 a 1530 nm (nanômetros), em uma região espectral fácil de ser coberta pela fonte de luz e por um analisador espectro óptico (OSA). No gráfico da **figura 4.26** temos as linhas de absorção do acetileno ^[49].

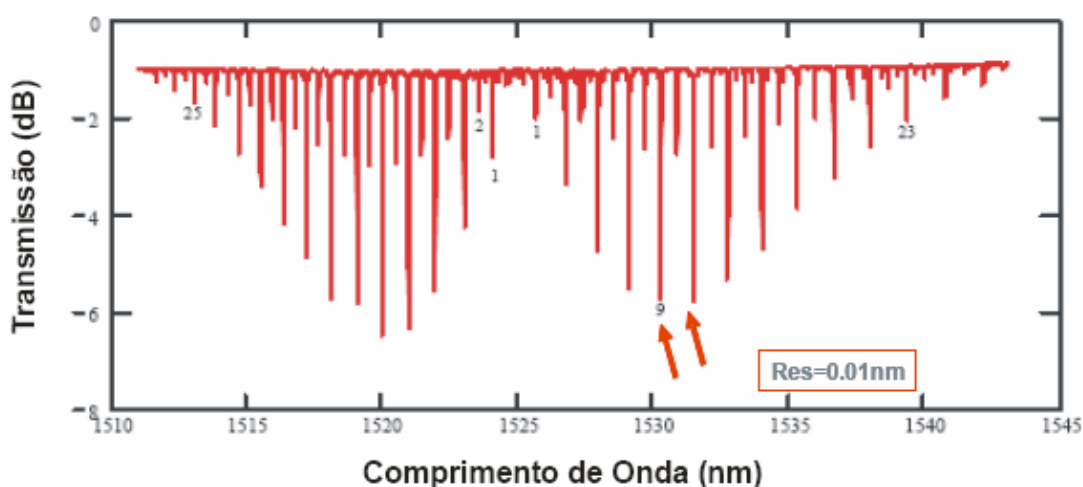


Figura 4.26 – Gráfico da Transmissão em dB em função do comprimento de onda na faixa de 1510 a 1545 nm, onde evidenciamos os vários picos de absorção do gás acetileno. Temos dois picos assinalados com setas, pois estes são os picos medidos no experimento.

Em comparação com estes picos de absorção do gráfico da transmissão do acetileno, **figura 4.26**, tem-se os espectros de referência (em vermelho) e da medida (em azul) do experimento, **figura 4.27**, onde evidenciamos claramente dois picos em 1532, 86 e 1532, 56 nm. Na curva em azul observamos os picos que coincidem com os picos destacados no gráfico do acetileno (**figura 4.26**). Na **figura 4.27** mostramos o gráfico do experimento com os dois picos marcados, que coincidem com os dois da **figura 4.26**.

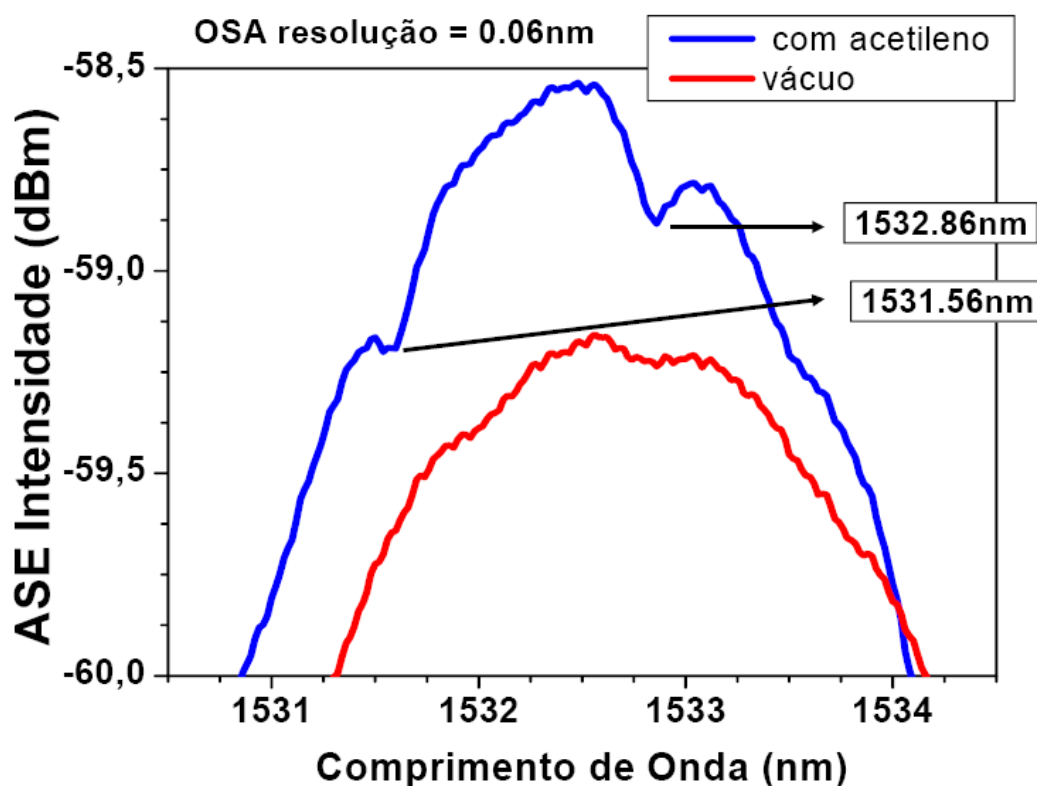


Figura 4.27 – Gráfico da Intensidade em função do comprimento de onda na faixa de 1530 a 1535 nm, onde evidenciamos os dois picos de absorção do gás acetileno medido no experimento. Onde temos a curva em vermelho à situação da célula sem gás.

Note que estes picos estão menos acentuados por causa da resolução do analisador espectro óptico (OSA) usado, que é diferente da resolução do gráfico do acetileno (**figura 4.26**) e também devido ao alinhamento um tanto difícil na montagem do experimento. Inicialmente usávamos duas células de pressão por causa do controle do fluxo de acetileno e também uma forma de manter a pressão do gás na fibra (gás com pressão maior que 100 psi) e fibra com comprimento máximo de um metro mais

poderíamos utilizar qualquer comprimento a princípio. A medida foi feita com uma só célula, por causa do alinhamento difícil já mencionado, e a outra extremidade da fibra livre para o alinhamento da saída. Contudo, a fibra ainda não tinha uma porcentagem tão expressiva de energia luminosa penetrando nos furos da casca. Na **figura 4.28** temos o esquema da montagem do experimento.

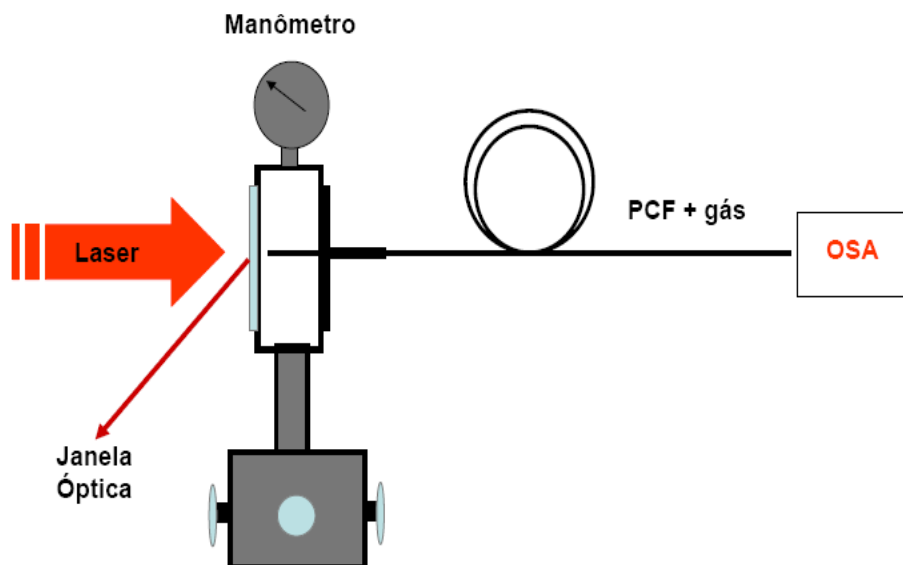


Figura 4.28 – Desenho da montagem do experimento para o estudo de princípio de sensor de gás, onde temos a célula de pressão com o manômetro para controlar a pressão, a janela óptica para o acesso de alinhamento com o laser e a fibra micro-estruturada dentro da mesma com a outra ponta livre para analisador espectro óptico.

Portanto, ainda conseguimos observar os picos de absorção do acetileno que concordam com os valores esperados no gráfico de transmitância dele. Logo, temos que o resultado é importante para o desenvolvimento de sensoriamento a fibra microestruturada via célula de pressão, mas com modificações que facilitem as medidas futuras com montagem semelhante. Então, com todos estes experimentos e estudos feitos neste trabalho, nós queríamos mostrar a versatilidade das fibras microestruturadas como um novo avanço em tecnologia de fibras ópticas e aplicações em áreas afins.

Capítulo 5

Conclusão

Neste trabalho, foi feito o estudo sobre as fibras microestruturadas, que tem dois grandes grupos: fibras de núcleo sólido e de núcleo oco, que guiam por reflexão interna total e por efeito *bandgap* fotônico, respectivamente. A presença de microfuros na estrutura da fibra abre várias aplicações com estas fibras, como por exemplo, aplicações na área de sensoriamento, que foi a aplicação de interesse deste trabalho, pois as fibras oferecem a vantagem de inserção do material dentro delas, por causa dos furos de ar na sua estrutura.

A inserção de fluidos (líquido ou gás) dentro da fibra nos permite sensoriar o fluido ou aumentar a sensibilidade da fibra para um parâmetro externo, que queremos medir. Também podemos manipular o guiamento da fibra, no caso de fibras de núcleo líquido, obtidas através de preenchimento seletivo das estruturas da fibra, e a manipulação é feita quando a casca dela é preenchida com um segundo líquido.

No trabalho foram reproduzidos processos de preenchimento seletivo de fibras, para produzir fibras de núcleo líquido e também para desenvolver outro processo de preenchimento seletivo, o furo lateral, que nos possibilita ter as pontas da fibra livre para que haja imediato alinhamento com o sistema óptico para fazer a medida, enquanto a preenchemos com o material, ele é descrito no **Apêndice 1** deste trabalho.

Os processos de preenchimento seletivo feitos neste trabalho são importantes, pois conseguimos produzir fibras de núcleo líquido, que nos possibilita alterar o guiamento da fibra e também caracterizar o próprio líquido.

No caso de alterar o guiamento da fibra, temos o processo de produção de fibras de núcleo líquido, elas são necessariamente multimodo, pois o guiamento da luz é feito no material de maior índice (o líquido). Para isto foi desenvolvido um processo para preencher simultaneamente dois líquidos diferentes na fibra, um na casca de índice baixo para aumentar o índice médio do mesmo e outro no núcleo, onde vemos a redução dos modos guiados até o modo fundamental de acordo com o estudo dos líquidos que deverão ser colocados.

Em outra linha usamos as fibras de núcleo sólido com a casca preenchida com fluido para deixar a fibra mais sensível ao parâmetro externo que se quer medir. Assim estudamos um caso que poderia ser utilizado como sensor de pressão ou deslocamento e outro como sensor de temperatura.

No primeiro caso mencionado foi reproduzido um estudo sobre perda por curvatura e adaptamos este estudo para nossas fibras preenchidas com líquidos diferentes e verificamos o aumento da perda por curvatura nas fibras.

Contudo ainda não conseguimos quantificar com exatidão a perda induzida nestas fibras usadas no experimento, por causa da adaptação feita na simulação dos índices de refração da casca e do núcleo via foto da seção transversal ou face da fibra.

Esta simulação trás erros, por causa da qualidade da foto e deformidades da estrutura da fibra, nos valores dos índices usados para o cálculo do valor da perda por curvatura mais a tendência da curva teórica concordando com a curva experimental.

Para o estudo de um parâmetro variando com a temperatura, fizemos estudo de líquidos com alta variação de índice de refração com a temperatura para inserir na casca e assim verificar a mudança da abertura numérica da fibra com a presença do líquido dentro da fibra quando a aquecemos.

Contudo, o sistema montado apresenta uma variação apreciável com a fibra sem preenchimento, que pela teoria não deveria haver. A sílica e o ar que constituem a fibra variam muito pouco com a temperatura mais com a fibra preenchida com uma mistura de líquidos (água + glicerina a 85%) obtemos uma variação grande em um curto aquecimento

As medidas não são conclusivas porque em ambas não conseguimos voltar à situação inicial do sistema sem aquecimento, isto pode ser desalinhamento em alguma parte do sistema por causa do aquecimento. Precisamos verificar e identificar o que está prejudicando a obtenção das medidas do experimento e assim comparar com a teoria apresentada no trabalho.

Ainda nesta linha de pesquisa, temos o estudo do princípio de sensoriamento à fibra pela interação do material com a luz guiada, em fibras de núcleo sólido, via campo evanescente.

Neste estudo realizado, foi usado gás acetileno para as medidas experimentais, pois ele apresenta vários e fortes picos de absorção em uma região espectral fácil de ser coberto pela fonte de luz e por um analisador espectro óptico (OSA), onde ele estava confinado em uma célula de pressão construída para este fim.

Através da análise de seu espectro de absorção obtemos dois picos de absorção característicos deste gás no experimento e assim provamos que podemos fazer este tipo de sensoriamento.

Perspectivas futuras

Existem várias possibilidades de trabalhos futuros como extensão deste trabalho realizado com as fibras microestruturadas e que serão examinados a partir de agora:

1. Pode-se pensar no sensoriamento a fibra de outros líquidos e gases, pois já possuímos os processos de preenchimento realizados no trabalho e equipamentos construídos para este fim e assim desenvolver novas frentes de pesquisa com fibras preenchidas com as possibilidades já mencionadas neste trabalho;
2. Outra idéia seria a pesquisa de princípios de sensores a fibra para agentes biológicos, como por exemplo, as bactérias e poluentes em geral.
3. Continuar os estudos nos princípios de sensor de temperatura e perda por curvatura, para o desenvolvermos melhor a teoria e experimento.

Apêndice 1 – Furo Lateral

Nesta dissertação, no **capítulo 3**, foi citado o processo de acesso lateral ou simplesmente furo lateral, que é um processo de preenchimento que pode ser usado tanto em fibras de núcleo sólido ou oco. No decorrer dos estudos de preenchimento seletivo das fibras desenvolvemos o processo do furo lateral que consiste em preenchimento lateralmente a fibra e conseqüentemente as pontas ficarem livres para ser manuseada opticamente em um sistema, onde será feita a medida.

Para obtermos este processo foram realizados estudos com base no trabalho de *Limin Xiao et al* ^[50], que usa uma máquina de emendar fibras (*Splicer*), para fechar a casca da fibra de núcleo oco e assim preencher seletivamente o núcleo, este processo foi reproduzido neste trabalho no **capítulo 3**. O *Splicer* consiste basicamente de dois eletrodos alinhados em linha, um de frente para o outro, dois posicionadores, onde são colocadas as fibras que serão emendadas com um arco elétrico que derrete o vidro localmente.

Em nossas aplicações utilizamos esta máquina em “modo de manutenção”, pois assim podemos manipular manualmente os posicionadores, onde estará somente uma fibra, e bem como o arco elétrico dos eletrodos. Então, com este aparelho nós fazemos o furo na lateral da fibra.

O método do furo lateral consiste em usar o arco elétrico da máquina para abrir um furo na fibra, ou seja, vamos “estourar” a fibra localmente. A parte da fibra, onde é feito o furo lateral deve está descascada do polímero de proteção.

O primeiro passo é expor esta parte da fibra a um arco elétrico, que aquece a fibra e induz o colapso de todos os furos na região, onde o arco foi aplicado. Este passo é comum para os dois tipos de fibras usadas (núcleo sólido e oco).

Para as fibras de núcleo sólido, o segundo passo seria afastar esta região dos eletrodos, e pressurizar a fibra com ar, pois a outra ponta da fibra estará colada em uma agulha conectada a uma seringa. Depois aplicar o arco elétrico nesta região, onde a estrutura da fibra encontra-se intacta e cheia de ar pressurizado. Logo, o furo é formado na lateral da fibra. Na **figura 1** mostramos a foto do furo em fibras de núcleo sólido.

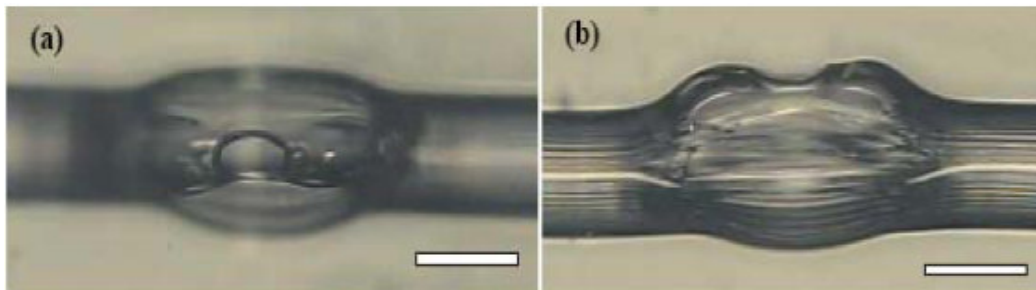


Figura 1 – Em (a) a foto de microscopia óptica de uma fibra de núcleo sólido, onde foi feito o acesso lateral e é vista de frente. Em (b) a foto de microscopia óptica da mesma em (a) e com a vista lateral do furo. Com a barra branca de 100 μm de comprimento.

Para o caso das fibras de núcleo oco, após o primeiro passo, em que fechamos todos os furos da fibra. Devemos fazer o afastamento desta parte toda colapsada para longe dos eletrodos e realizar o fechamento somente da casca da fibra, e assim deixaremos uma pequena região com somente o núcleo aberto, pois na casca os furos são menores que o núcleo, logo o fechamento da casca ocorre antes que o núcleo, por isso pode-se fazer preenchimento seletivo.

O passo seguinte seria tirar esta parte da fibra para longe dos eletrodos, mas agora devemos deixar a região entre tudo colapsado e somente casca colapsada na região dos eletrodos, para que possamos aplicar uma alta pressão dentro da fibra via ponta colada a uma agulha conectada a uma seringa e depois aplicar o arco nesta região, e fazer o furo lateral. Na **figura 2** mostramos o resultado final do processo em fibras de núcleo oco.

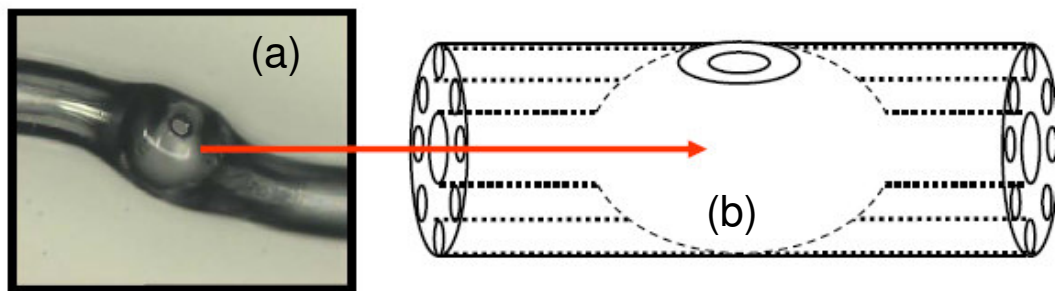


Figura 2 – Em (a) observamos a foto de microscopia óptica de uma fibra de núcleo oco, onde foi feito o acesso lateral para fazermos o preenchimento da mesma. Em (b) o desenho da estrutura da fibra com a ilustração do furo lateral.

Até agora só descrevemos o processo de fabricação do furo lateral que é relativamente simples. Vamos agora mostrar como é feito o preenchimento da fibra

após furo lateral. Temos duas maneiras de fazer isso: em uma câmara de pressão e por sucção do material para dentro da fibra. Na **figura 3** temos o desenho da câmara de pressão e de uma fibra fazendo sucção do material.

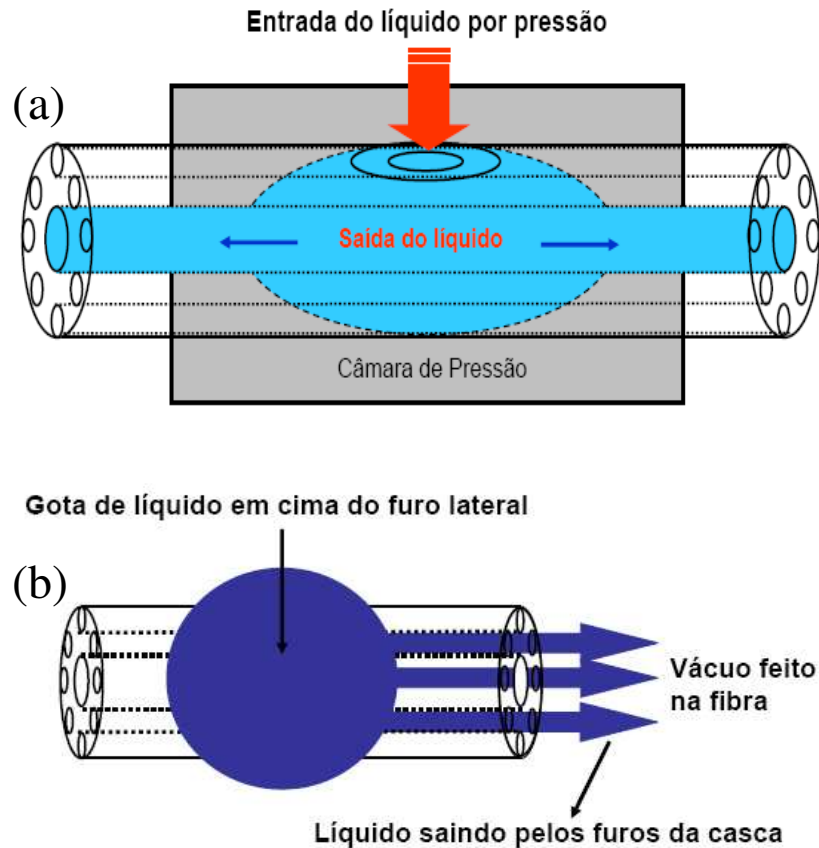


Figura 3 – Desenhos das formas de inserir o líquido através do furo lateral. Em (a) observamos a câmara de pressão, onde usamos uma seringa encaixada na câmara na vertical, que irá colocar o líquido via pressão constante para dentro da câmara. Em (b) temos a forma de sucção para inserir o líquido na parte onde fazemos o vácuo na fibra.

Portanto, mostramos que nosso processo é válido tanto para fibra de núcleo oco como sólido, e também uma maneira simples de obter uma fibra preenchida, e bem como o possível alinhamento óptico ao sistema para realizar medidas com fluxo contínuo do material na fibra.

Maiores detalhes de como foram feitos os testes para verificação do processo e da análise teórica e experimental utilizada está na referência ^[22], que é o nosso artigo publicado.

Referências

- [1] A. Bjarklev, J. Broeng and A. S. Bjarklev, "Photonic Crystal Fibres", Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 2003.
- [2] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell and D. M. Atkin, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding", *Optics Letters* 21 (19), 157-1549 (1996); Errata: *Optics Letters* 22, 484-485 (1997).
- [3] J. C. Knight, "Photonic Crystal Fibres", *Nature* vol. 424, 847-851 (2003).
- [4] P. St. J. Russell, "Photonic Crystal Fibers", *Science* vol. 299, 358-362 (2003).
- [5] E. Yablonovitch, "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics", *Physical Review Letters* vol. 58 nº 20, 2059-2062 (1987).
- [6] J. Sajeev, "Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices", *Physical Review Letters* vol. 58 nº 23, 2486-2489 (1987).
- [7] E. Yablonovitch, "Photonic Crystals: Semiconductors of Light", *Scientific American* vol. 285 nº 6, 48-55 (2001).
- [8] E. Yablonovitch, "Photonic band-gap structures", *J. Opt. Soc. Am. B* vol. 10 nº 02, 283-295 (1993).
- [9] F. Quiñónez, "Cristais Fotônicos 2D: Projeto e Fabricação", Tese de mestrado, IFGW/Unicamp, Campinas (2006).
- [10] P. Vukusic and R. Sambles, "Photonic structures in biology", *Nature* vol. 424, 852-855 (2003).
- [11] G. Tayeb, B. Gralak and S. Enoch, "Structural Colors in Nature and Butterfly-wing Modeling", *Optics & Photonics News*, 40-43(49) (2003).
- [12] S. Kinoshita and S. Yoshioka, "Structural Colors in Nature: The Role of Regularity and Irregularity in the Structure", *ChemPhysChem* vol. 6, 1442-1459 (2005).
- [13] M. Large, Overview of mPOF fabrication (WorkPof 2006).
- [14] J. Fini and R. Bise, "Progress in Fabrication and Modeling of Microstructures Optical Fibers", *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 43 nº 8B, 5717-5730 (2004).
- [15] D. J. Webb, "Optical-Fiber Sensors: An Overview", *MRS Bulletin*, 365-369 (2002).
- [16] T. M. Monro, W. Belardi, K. Furusawa, J. C. Baggett, N. G. R. Broderick and D. J. Richardson, "Sensing with microstructured optical fibres", *Meas. Sci. Technol.* Vol.12, 854-858 (2001).

- [17] P. Dress, and H. Franke, "A cylindrical liquid-core waveguide", Appl. Phys. B vol.63, 12-19 (1996).
- [18] B. J. Eggleton, C. Kerbage, P. S. Westbrook, R. S. Windeler, and A. Hale, "Microstructured optical fiber devices", Optics Express vol. 9 nº13, 698-713 (2001).
- [19] F. Cox, Liquid-filled hollow core microstructured polymer optical fibre (WorkPof 2006).
- [20] T. Sorensen, D. Noordegraaf, K. Nielsen, and A. Bjarklev, "Modeling and experimental verification of infusion speed of liquids in photonic crystal fibers", OME3 (2005).
- [21] B. Bourliaguet, C. Paré, F. Émond, A. Croteau, A. Proulx, and R. Vallée, "Microstructured fiber splicing", Optics Express vol. 17 nº 25, 3412-3417 (2003).
- [22] C. M. B. Cordeiro, C. J. S. de Matos, D. S. Ferreira, E. M. dos Santos, and C. H. Brito Cruz, "Lateral access to the holes of photonic crystal fibers-selective filling and sensing applications", Optics Express vol. 14 nº 18, 8403-8412 (2006).
- [23] K. Nielsen, D. Noordegraaf, T. Sorensen, A. Bjarklev, and T. P. Hansen, "Selective filling of photonic crystal fibres", J. Opt. A: Pure Appl. Opt. vol. 7, 13-20 (2005).
- [24] Y. Huang, Y. Xu, and A. Yariv, "Fabrication of functional microstructured optical fibers through a selective-filling technique", Applied Physics Letters vol. 85 nº 22, 5182-5184 (2004).
- [25] C. M. B. Cordeiro, C. J. S. de Matos, E. M. dos Santos, A. Bozolan, J. S. K. Ong, T. Facincani, G. Chesini, A. R. Vaz, and C. H. Brito Cruz, "Towards practical liquid and gas sensing with photonic crystal fibres: side access to the fibre microstructured and single-mode liquid-core fibre", Meas. Sci. Technol. (aceito).
- [26] J. M. Fini, "Microstructure fibres for optical sensing in gases and liquids", Meas. Sci. Technol. vol. 15, 1120-1128 (2004).
- [27] School of Electronic and Communications Engineering, "Bending Loss and Reliability in Optical Fibres", (2002).
- [28] M. D. Nielsen, N. A. Mortensen, M. Albertsen, J. R. Folkenberg, A. Bjarklev, and D. Bonacinni, "Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers", Optics Express vol. 12 nº8, 1775-1779 (2004).
- [29] J. C. Baggett, T. M. Monro, K. Furusawa, V. Finazzi, D. J. Richardson, "Understanding bending losses in holey optical fibers", Optics Communications vol. 227, 317-335 (2003).

- [30] T. Sorensen, J. Broeng, A. Bjarklev, E. Knudsen, and S. E. B. Libori, "Macro-bending loss properties of photonic crystal fibre", *Electronics Letters* vol. 37 n° 5, 287-289 (2001).
- [31] V. P. Minkovich, A. V. Kir'yanov, A. B. Sotsky, and L. I. B.Sotskaya, "Large-mode-area holey fibers with a few air channels in cladding: modeling and experimental investigation of the modal properties", *J. Opt. Soc. Am B* vol. 21 n° 6, 1161-1169 (2004).
- [32] M. D. Nielsen, and N. A. Mortensen, "Photonic crystal fiber design based on the V-parameter", *Optics Express* vol. 11 n° 21, 2762-2768 (2003).
- [33] M. D. Nielsen, N. A. Mortensen, J. R. Folkenberg, and A. Bjarklev, "Mode-field radius of photonic crystal fibers expressed by the V parameter", *Optics Letters* vol. 28 n° 23, 2309-2311 (2003).
- [34] <http://www.crystal-fibre.com/datasheets/LMA-20.pdf>
- [35] N. A. Mortensen, J. R. Folkenberg, M. D. Nielsen, and K. P. Hansen, "Modal cutoff the V parameter in photonic crystal fibers", *Optics Letters* vol. 28 n° 20, 1879-1881 (2003).
- [36] B. Bhola, H-C Song, H. Tazawa, and W. H. Steier, "Polymer Microresonator Strain Sensors", *IEEE Photonics Technology Letters* vol. 17 n° 4, 867-869 (2005).
- [37] S. Tomita, H. Tachino, and N. Kasahara, "Water Sensor with Optical Fiber", *Journal of lightwave Technology* vol. 8 n°12, 1829-1832 (1999).
- [38] N. A. Mortensen, J. R. Folken, P. M. W. Skovgaard, and J. Broeng, "Numerical Aperture of Single-Mode Photonic Crystal Fibers", *IEEE Photonics Technology Letters* vol. 14 n° 8, 1094-1096 (2002).
- [39] T. Toyoda, and M. Yabe, "The temperature dependence of the refractive indices of fused silica and crystal quartz", *J. Phys.* Vol. 16, 97-100 (1983).
- [40] P. R. Cooper, "Refractive-Index measurements of liquids used in conjunction optical fibers", *Applied Optics* vol. 22 n° 19, 3070-3072 (1983).
- [41] J. Sun, J. P. Longtin, T. F. Irvine Jr., "Laser-based thermal pulse measurement of liquid thermophysical properties", *Int. Heat. Mass. Transfer* vol. 44, 645-657 (2001).
- [42] A. N. Bashkatov, E. A. Genina "Water refractive index in dependence on temperature and wavelength: a simple approximation", *SPIE* vol. 5068, (2003).
- [43] M. E. Lusty, and M. H. Dunn, "Refractive Indices and Thermo-Optical Properties of Dye Laser Solvents", *Applied Physics B* vol. 44, 193-198 (1987).
- [44] Y. L. Hoo, W. Jin, H. L. Ho, and D. N. Wang, "Evanescent-wave gas sensing using microstructure fiber", *Opt. Eng.* Vol. 41 n°1, 8-9 (2002).

- [45] Y. L. Hoo, W. Jin, C. Shi, H. L. Ho, D. N. Wang, and S. C. Ruan, "Design and modeling of a photonic crystal fiber gas sensor", *Applied Optics* vol. 42 nº18, 3509-3515 (2003).
- [46] J. B. Jensen, L. H. Pedersen, P. E. Hoiby, L. B. Nielsen, T. P. Folkenberg, J. Riishede, D. Noordegraaf, K. Nielsen, A. Carlsen, and A. Bjarklev, "Photonic crystal fiber based evanescent-wave sensor for detection of biomolecules in aqueous solutions", *Optics Letters* vol. 29 nº17, 1974-1976 (2004).
- [47] G. Pickrell, W. Peng, and A. Wang, "Random-hole optical fiber evanescent-wave gas sensing", *Optics Letters* vol. 29 nº13, 1974-1976 (2004)
- [48] M. A. R. Franco, M. T. Ruggieri, V. A. Serrão, F. Sircilli and N. M. Abe, "Photonic crystal fiber for chromatic dispersion compensation", *Proc. of SPIE* vol. 5622 (5th Iberoamerican Meeting on Optics and 8th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Their Applications), pp.955-960 (2003).
- [49] <http://images.wolfpk.com/wavelengthreferences/pdf/acetylene.pdf>
- [50] L. Xiao, W. Jin, M. S. Demokan, H. L. Ho, Y. L. Hoo, and C. Zhao, "Fabrication of selective injection microstructured optical fibers with a convencional fusion splicer", *Optics Express* vol. 13 nº 22, 9014-9022 (2005).