

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FELIPE ARGEMI DOS SANTOS

Detecção e Estudo da Microvazão de Líquidos em Fibras de  
Cristal Fotônico Usando Difração na Microestrutura

São Paulo  
2010

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FELIPE ARGEMI DOS SANTOS

## Detecção e Estudo da Microvazão de Líquidos em Fibras de Cristal Fotônico Usando Difração na Microestrutura

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Presbiteriana Mackenzie como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: PROF. DOUTOR CHRISTIANO J. S. DE MATOS

São Paulo  
2010

S237d Santos, Felipe Argemi dos.

Detecção e estudo da microvazão de líquidos em fibras de cristal fotônico usando difração na microestrutura/ Felipe Argemi dos Santos – 2010.

75 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2010.

Bibliografia: f. 71-75.

1. Fibra de cristal fotônico. 2. Microvazão. 3. Difração. 4. Microestrutura . 5. Processamento de imagem. I. Título.

CDD 621.3692

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Harry e Neiva, por todo apoio e por toda paciência que tem tido comigo e ao meu irmão, Flávio, que apesar de estar do outro lado do mundo sempre me apoiou e acompanhou meu desenvolvimento.

Aos meus amigos que me apoiaram nessa etapa, aos professores e aos colegas de laboratório por todo apoio e transferência de conhecimento.

Ao meu orientador professor Christiano J. S. de Matos que foi persistente em me orientar, pela forma clara como sempre me explicou as coisas, por ser participativo, pelas idéias brilhantes, pela paciência, compreensão e por entender que passei anos turbulentos durante minha orientação devido a questões profissionais.

Ao professor Maurício Marengoni, pela participação fundamental que teve neste trabalho, por ter dedicado horas em análises dos resultados e pelo rico conhecimento transferido.

## RESUMO

Apresentamos neste trabalho as fibras de cristal fotônico e o estudo da vazão de líquidos no interior destas, pela observação da alteração no padrão de difração gerado pela incidência de um feixe laser pela lateral, a  $90^\circ$  da fibra. A incidência com estas características gera um padrão difrativo característico, graças à microestrutura periódica da casca, consistindo de uma matriz de buracos que percorre toda a fibra longitudinalmente. Quando a fibra é preenchida com um líquido de índice de refração próximo ao da sílica, o padrão difrativo é reduzido, já que a microestrutura se torna praticamente invisível ao laser. A transição da fibra vazia até seu completo preenchimento não ocorre de forma abrupta, mas sim durante alguns segundos. Isso ocorre, pois nem todos os buracos da microestrutura são preenchidos ao mesmo tempo, pois não têm exatamente o mesmo raio, e o deslocamento do líquido depende, além de outros fatores, do raio do estrutura pela qual se desloca. Observando o padrão difrativo, é possível determinar o instante de início do preenchimento da fibra, graças a alterações que este sofre, até seu completo preenchimento, correspondendo ao momento em que o padrão difrativo é completamente alterado. Para determinar os instantes iniciais e finais de preenchimento com mais precisão e não depender de uma análise subjetiva do observador, técnicas de processamento de imagem foram utilizadas. Através dos tempos obtidos é possível determinar o maior e o menor raio dos buracos da microestrutura. Os resultados do tamanho dos buracos obtidos pelos tempos do preenchimento, assim como o erro em relação ao tamanho real observado serão apresentados. Por fim, trabalhos futuros para aperfeiçoamento da técnica são sugeridos.

## ABSTRACT

In this work, we introduce photonic crystal fibers and the study of liquid flow within those, by observing changes in the diffraction pattern generated in a laser beam laterally incident in the fiber. By launching the laser beam perpendicularly onto the side of the photonic crystal fiber, a characteristic diffractive pattern is created by the cladding microstructure, which consists of a matrix of holes that run along the fiber. When the fiber is filled with a liquid with a refractive index close to that of silica, the diffractive pattern is reduced because the microstructure becomes virtually invisible to the laser. The diffraction pattern transition from an empty fiber to a completely filled one is not abrupt, taking place during several seconds. This is because not all the holes of the microstructure are filled at the same time, because they do not have exactly the same radii, and the displacement of the liquid depends on, among other factors, the radius of the structure along which it travels. By observing the diffractive pattern, one can, thus, determine the moment at which the fiber starts to be filled, via the beginning of the pattern change, until filling is complete, corresponding to the moment at which the diffractive pattern is completely changed. To determine the initial and final filling times accurately, and not influenced by the observer's subjective analysis, image processing techniques were used to evaluate the results. Through the times obtained it is possible to determine the largest and the shortest radius. The results of the size of the holes obtained by the time of filling, and the error in relation to the size observed by microscopy, will be presented. Finally, future work for improving the technique will be suggested.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1. DIFRAÇÃO.....	9
1.2. FOCALIZAÇÃO DA LUZ E COMPRIMENTO DE RAYLEIGH.....	14
2.1. FIBRAS ÓPTICAS .....	19
2.1. FIBRAS ÓPTICAS CONVENCIONAIS.....	20
2.2. FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO .....	23
2.2.1. Métodos de Fabricação.....	24
2.2.2. PCF de núcleo sólido.....	27
2.2.3. PCF de núcleo oco.....	27
2.2.4. PCFs preenchidas por líquidos .....	29
3. ESTUDO DE MICROVAZÃO EM FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO.....	31
3.1. DIFRAÇÃO NA LATERAL DE UMA PCF.....	35
3.2. EXPERIMENTO PROPOSTO.....	36
3.3. RESULTADOS .....	41
4. PROCESSAMENTO DE IMAGENS E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS: DETERMINAÇÃO DO PREENCHIMENTO DE UMA PCF....	49
4.1. PROGRAMA PARA PROCESSAMENTO DE IMAGEM E MÉTODO PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	50
4.2. RESULTADO DAS ANÁLISES E DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DOS BURACOS DA PCF .....	61
<b>5. CONCLUSÃO E PRÓXIMOS PASSOS.....</b>	<b>68</b>
5.1 CONCLUSÃO .....	68
5.2 TRABALHOS FUTUROS .....	69
REFERENCIAS .....	71

## 1. INTRODUÇÃO

O objeto de estudo deste trabalho é em um tipo especial de fibra óptica conhecida como Fibra de Cristal Fotônico (*Photonic Crystal Fiber – PCF*), que possui uma matriz periódica de micro-buracos em sua seção reta que percorre todo seu comprimento. O trabalho investiga o padrão difrativo obtido ao incidir-se um feixe de laser perpendicularmente a essa fibra, assim como as alterações neste padrão quando a fibra é preenchida com líquidos. A alteração do padrão difrativo devido ao preenchimento da microestrutura sugere aplicações para estudos de microvazão de líquidos, que também são aqui exploradas.

No ponto onde o laser atinge a lateral da PCF, atravessando toda a sua seção transversal, os atrasos de fase e refrações sofridas pelo feixe resultam num complexo padrão difrativo observado em um anteparo colocado a uma certa distância. O preenchimento dos buracos com líquido reduz este padrão por reduzir o contraste de índice de refração da estrutura. Entretanto, o padrão difrativo não sofre uma alteração abrupta devido ao preenchimento, porque nem todos os buracos são preenchidos ao mesmo tempo, devido a variações em seus raios e formas. O tempo de alteração do padrão difrativo observado, da ordem de dezenas de segundos para pontos investigados a poucos centímetros da entrada da fibra, sugere um método para identificação do diâmetro médio dos buracos e da faixa de variação destes, abordagem inédita e vantajosa pela simplicidade de implementação. Para auxiliar a análise do preenchimento da PCF foram utilizadas técnicas computacionais de processamento de imagem.

Neste capítulo introdutório são tratados dois fenômenos ópticos, a difração e a focalização de um feixe Gaussiano, que serão importantes para o entendimento das análises dos capítulos seguintes. Uma revisão sobre fibras ópticas convencionais, a apresentação das fibras de cristal fotônico e algumas de suas aplicações, serão realizadas no Capítulo 2.

No Capítulo 3 descrevem-se estudos anteriores, disponíveis na literatura, sobre microvazão em fibras de cristal fotônico, desenvolvidos com o intuito de entender o fluxo de líquidos em dimensões microscópicas. Descrevem-se também as características

do efeito de difração lateral em PCFs, conforme também disponível na literatura. O experimento proposto e os resultados obtidos são também apresentados no mesmo capítulo.

A partir do experimento proposto é possível identificar o tempo de preenchimento em um ponto específico da fibra e o tempo de transição da alteração do padrão de difração de uma PCF vazia para uma preenchida. Como dito anteriormente, para analisar os resultados dos experimentos realizados foram utilizadas técnicas de processamento de imagens, que serão apresentadas no Capítulo 4, junto com a análise dos resultados.

Por fim, no Capítulo 5, serão apresentadas as conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros.

## 1.1. DIFRAÇÃO

No experimento proposto por este trabalho o preenchimento da PCF será observado pela alteração no padrão de difração, observado em um anteparo distante. Portanto, é importante conhecer o fenômeno da difração.

Hecht explica que a difração ocorre sempre que a fase ou a amplitude de parte da frente de onda se altera, após interação com obstáculos, transparentes ou opacos [1]. Os vários segmentos da frente de onda que se propagam e encontram um obstáculo, sofrem interferência entre si, dando origem a uma distribuição particular de densidade de energia. Esta distribuição é conhecida como padrão de difração e é caracterizado por uma seqüência com máximos e mínimos de intensidade (franjas de interferência). Não existe uma distinção física significativa entre interferência e difração. Porém, de uma forma simplista, convencionou-se dizer que interferência é a sobreposição de um número reduzido de ondas; já a difração ocorre com um elevado número de ondas [1].

A difração é um fenômeno tipicamente ondulatório. As ondas, ao passarem por um único orifício com abertura de largura similar ao seu comprimento de onda, abrem-se formando um feixe divergente, como mostrado na Figura 1.

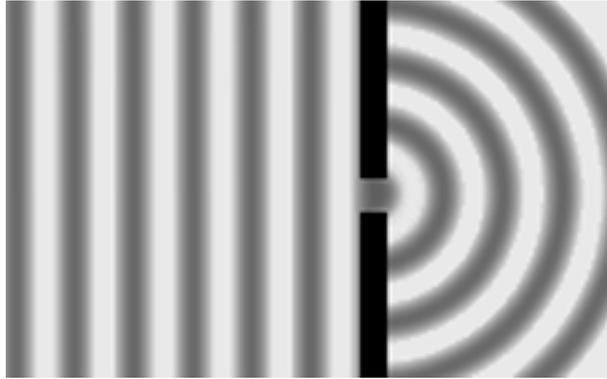


Fig. 1. Uma onda paralela se propagando da esquerda para a direita encontra um anteparo com uma fenda; ao passar pela fenda, a onda difrata e se abre formando um feixe divergente.

A difração de um feixe em uma fenda pode ser explicada, em uma primeira abordagem, pelo princípio de Huygens, que considera cada ponto da frente de onda como uma fonte secundária de ondas esféricas [1]. Em cada ponto da propagação, a interferência entre as fontes secundárias de ondas esféricas, recompõe a frente de onda original. Um anteparo que tenha uma pequena abertura (fenda) faz com que apenas parte da frente de onda o atravesse, fazendo com que a interferência entre as fontes secundárias de ondas esféricas dê origem a uma onda cilíndrica como mostrado na Figura 2.

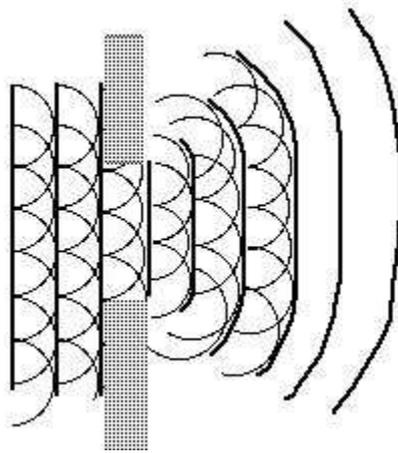


Fig.2. Descrição da propagação de uma onda a partir de fontes secundárias, e o efeito da passagem por uma pequena abertura. [2]

A difração da luz por uma fenda simples foi inicialmente observada por Young, no início do século XIX, demonstrando que a luz possuía natureza ondulatória. No experimento de Young, uma pequena fenda foi feita em um anteparo por onde passaria luz solar. Constatou-se que, num anteparo instalado do outro lado, não surgia simplesmente uma linha nítida, mas sim uma linha com forte intensidade no centro que ia decaindo pelas laterais. Em um segundo anteparo foram, então, feitas duas fendas, e do outro lado foi colocado um anteparo. Neste caso era observado um conjunto de faixas luminosas de diferentes intensidades. Isto ocorria pois a onda proveniente dos dois orifícios se superpunham, gerando interferências construtivas e destrutivas e, com isso, as faixas luminosas observadas [3]. A representação da configuração clássica da experiência da dupla fenda de Young é mostrada nas Figuras 3a e 3b.

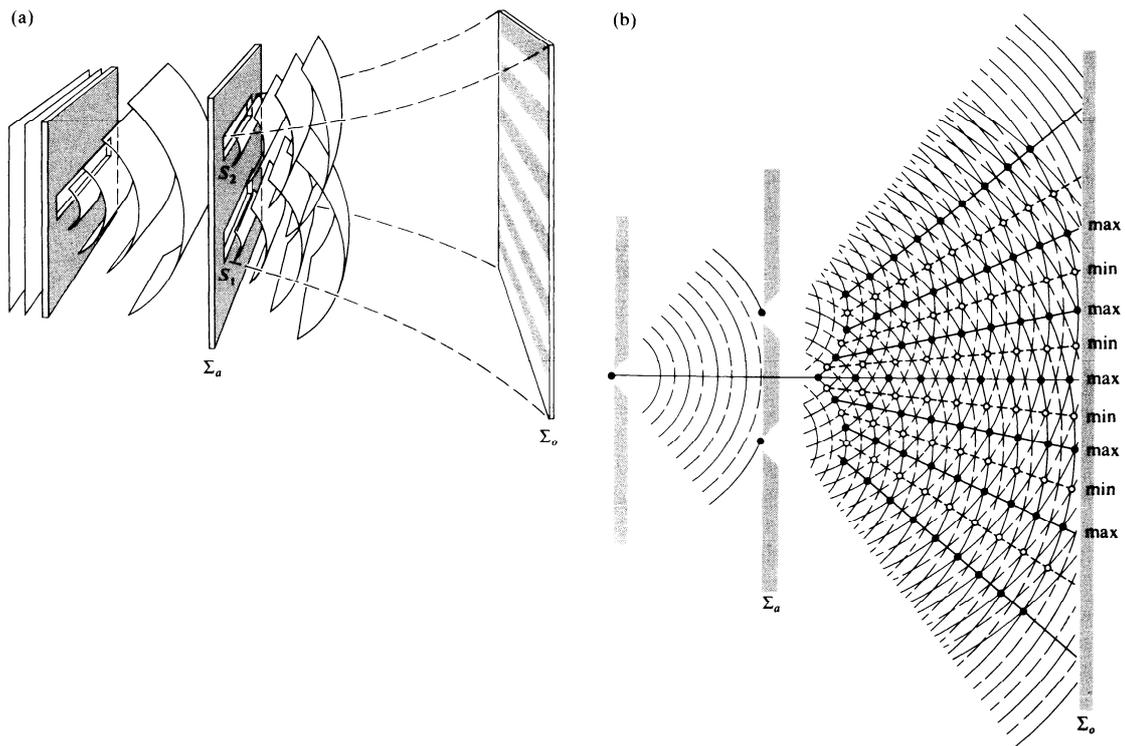


Fig. 3 Experiência da dupla fenda de Young: (a) Sobreposição de ondas cilíndricas. (b) Sobreposição, com zonas de interferência construtiva e destrutiva assinaladas [1].

A Figura 4 apresenta o padrão difrativo observado em um anteparo distante em função do número de fendas. O espaçamento entre fendas é mantido constante. Observa-se que o aumento do número de fendas, neste caso, não afeta a periodicidade das franjas luminosas observadas, apenas induzindo um estreitamento das mesmas. O posicionamento do observador em relação ao anteparo também é apresentado na Figura 4.

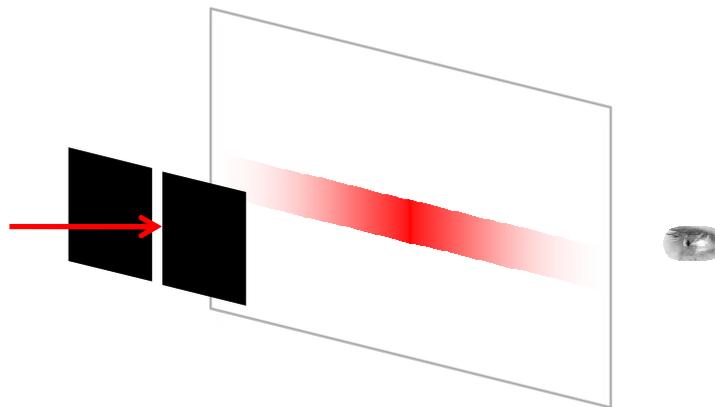
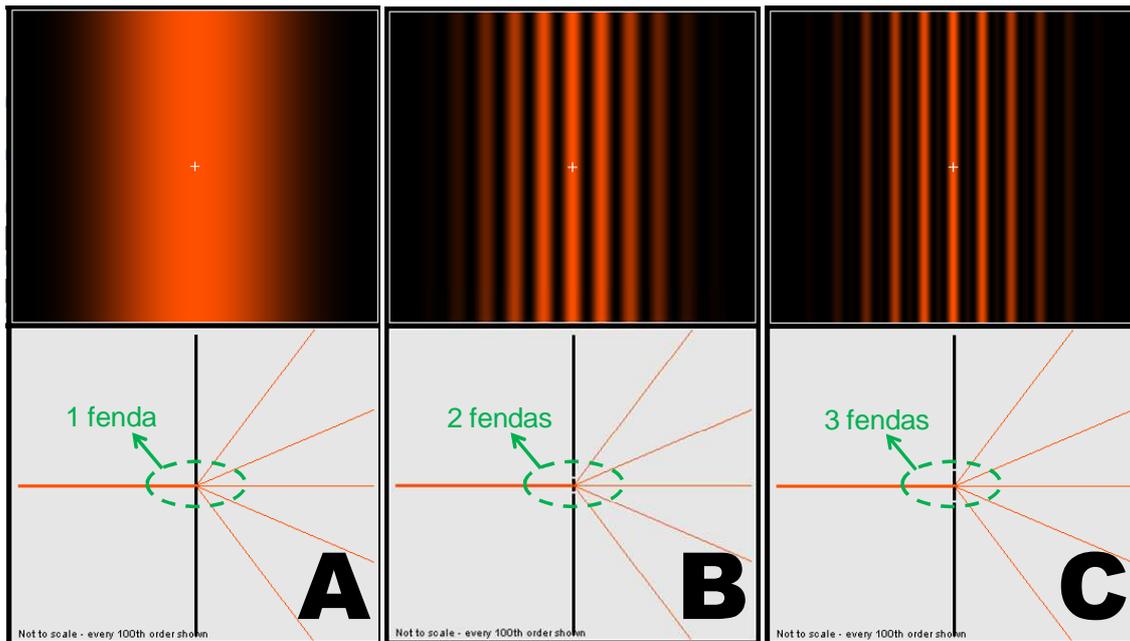


Fig. 4. Demonstração esquemática da observação da difração em um anteparo distante com uma (A), duas (B) e três (C) fendas [4]. A figura também mostra a indicação da posição do observador em relação ao anteparo.

Um fenômeno difrativo também é observado em nosso experimento. Quando o laser atravessa a seção transversal de uma PCF, a microestrutura se comporta como múltiplas fendas dispostas tridimensionalmente com as quais o laser interage e, por este motivo, sofrerá difração. Como a fibra é feita de material transparente, o efeito do material é o de induzir atrasos de fase ao invés de bloquear a luz. Neste sentido, a fibra se comporta como uma grade de fase tridimensional, direcionando a luz para determinados ângulos, dependendo do comprimento de onda. Como será mencionado

mais adiante, PCFs já foram utilizadas, desta forma, tendo sido exploradas em um experimento como um filtro ajustável [5]. Os comprimentos de onda transmitidos eram ajustados pela inserção de um líquido na microestrutura.

## 1.2. FOCALIZAÇÃO DA LUZ E COMPRIMENTO DE RAYLEIGH

Esta seção trata da focalização de um feixe com perfil transversal gaussiano por uma lente. É importante entendermos sua dinâmica pois usaremos uma lente objetiva para focalizar o feixe laser sobre a PCF, com o objetivo de que o feixe interaja apenas com a região microestruturada (região central) da fibra. A Figura 5 mostra alguns dos parâmetros relevantes. Ao atravessar a lente, a frente de onda sofre um atraso de fase que diminui radialmente a partir do centro. Este perfil de fase focaliza então o feixe a uma distância  $f$  da lente, conhecida como distância focal. O feixe, originalmente com um largura (ou *spot size*)  $D$ , e raio  $w(f)$ , possui largura mínima  $d_0$ , e raio mínimo  $w_0$ , no foco. O feixe permanece aproximadamente colimado por uma determinada distância, caracterizada pelo comprimento de Rayleigh.

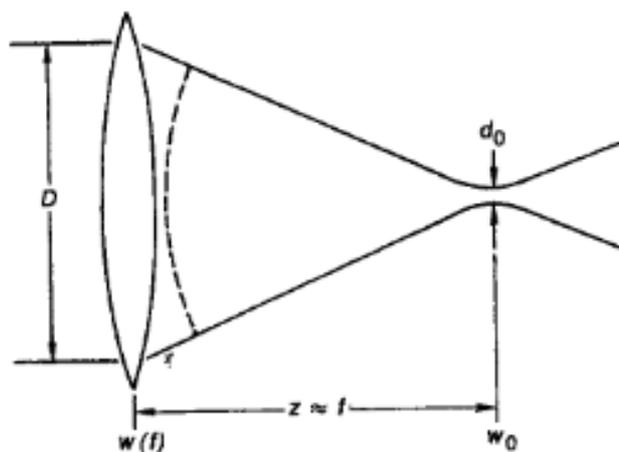


Fig.5. Focalização de um feixe gaussiano por uma lente [6].

Um feixe gaussiano tem um pico em seu centro e decai ao se afastar deste, de acordo com um perfil gaussiano. Como em uma curva gaussiana a função só se anula no infinito, é preciso medir a largura do feixe a partir de alguma convenção específica. Em uma delas, define-se o raio ( $w$ ) do feixe a meia altura, e o *spot size* ( $D$ ) como sendo a largura dentro da qual tem-se aproximadamente 86% ou 99% da potência total carregada pelo feixe. A Figura 6 mostra tais larguras e suas relações com o raio  $w$ , definido a meia altura.

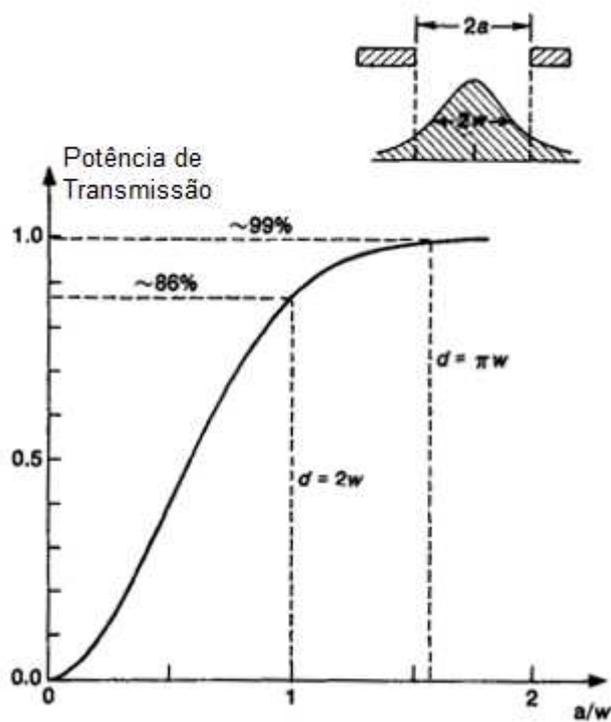


Fig.6. Potência de transmissão em um feixe gaussiano em função da largura [6].

Como pode-se observar a partir das Figuras 5 e 6, a largura  $D$  correspondente a 86% da potência do feixe antes da focalização é dada por:

$$D(86\%) = 2w(f) \quad (1)$$

Enquanto que o valor de  $D$  correspondente a 99% da potência do laser (que corresponde à largura para a qual a gaussiana cai a um valor de  $1/e^2$  do seu valor de pico) é dado por:

$$D(99\%) = \pi w(f) \quad (2)$$

Equações semelhantes relacionam a largura do feixe no ponto focal ( $d_0$ ) e o raio do feixe no mesmo ponto ( $w_0$ ).  $d_0$ , por outro lado, é dado a partir das características da lente e do feixe por [6]:

$$d_0 = 2f\lambda/D \quad (3)$$

Onde  $\lambda$  é o comprimento de onda do laser.

O termo comprimento de Rayleigh ( $z_R$ ) é usado algumas vezes na teoria de antenas para descrever a distância  $z \sim d^2/\lambda$  na qual o feixe colimado viaja a partir de uma antena com diâmetro de abertura  $d$  (assumindo  $d \gg \lambda$ ) antes que comece a divergir significativamente [6]. Na óptica, o comprimento de Rayleigh está relacionado com a distância em que um feixe de luz pode ser considerado colimado, se comportando como uma onda plana antes de divergir por efeitos difrativos. Para um feixe focalizado, a região que pode ser considerada colimada é definida pelo parâmetro confocal ( $b$ ), que é duas vezes o comprimento de Rayleigh e é centralizado no foco do feixe. O parâmetro confocal é formalmente definido como o comprimento para o qual o menor raio ( $w_0$ ) se alarga até atingir um raio de  $\sqrt{2}w_0$  [6]. Esta situação, assim como as definições para comprimento de Rayleigh e parâmetro confocal, são mostradas na Figura 7.

O comprimento de Rayleigh e o parâmetro confocal podem ser calculados a partir das seguintes equações [6]:

$$z_R = \pi w_0^2 / \lambda \quad (4)$$

$$b \approx 2 z_R \quad (5)$$

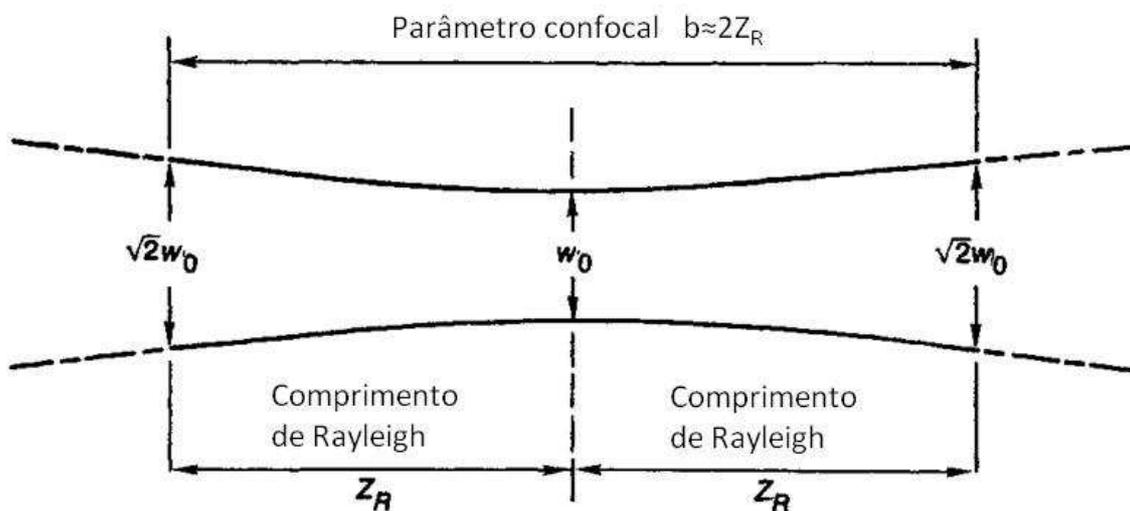


Fig. 7. Análise da região colimada de um feixe gaussiano.[6]

Conhecendo os parâmetros descritos acima podemos determinar a região na qual o feixe está colimado e desta forma trabalhar com o feixe se comportando como uma onda plana durante a interação deste com a PCF, nos experimentos descritos ao longo deste trabalho. Também é possível determinar o tamanho do *spot size* desse feixe e determinar qual a região da fibra será coberta pelo feixe.

Estas informações são importantes, pois usaremos uma lente objetiva para focalizar o feixe sobre a PCF, fazendo com que o feixe tenha a maior interação possível

com a microestrutura da fibra e maximizando o padrão difrativo gerado. É, por outro lado, desejável que o feixe esteja colimado para que a difração se aproxime daquela observada em uma onda plana, facilitando a análise. Para que isso ocorra, é importante posicionar a PCF dentro do comprimento confocal do feixe focalizado,

As equações aqui descritas auxiliarão na determinação do *spot size* no foco da lente utilizada e na determinação da região onde o feixe laser focalizado pode ser considerado colimado.

## 2.1. FIBRAS ÓPTICAS

Os princípios de funcionamento de fibras ópticas são conhecidos e estudados há mais de um século. Porém, só a partir da década de 1970 estas fibras passaram a ser utilizadas em telecomunicações devido a novas técnicas de fabricação que permitiram atingir perdas inferiores a 20dB/km e que trouxeram grande avanço ao campo de telecomunicações [1].

Porém, atualmente é crescente o interesse em aplicar fibras ópticas em outros campos além das comunicações, pelas suas diversas vantagens como dimensões reduzidas (geralmente com diâmetros inferiores a 1 mm), por serem inertes, pela sua imunidade a ruídos eletromagnéticos, atenuação de sinal muito baixa, material de fabricação abundante e custo de fabricação cada vez mais baixo [1].

Dentre os campos que hoje se beneficiam das fibras ópticas, o de sensoriamento é um dos mais desenvolvidos. Sensores de temperatura e pressão, por exemplo, passaram a ser desenvolvidos utilizando fibras ópticas [1].

A partir da década de 1990 surgiu um novo tipo de fibra, conhecida como fibra microestruturada, que apresenta estruturas (em geral buracos) de escala micrométrica em sua seção transversal. Esta característica dá a estes guias de onda propriedades especiais que vêm sendo estudadas para diversas aplicações e em novas soluções para problemas de diversas áreas [7]. As fibras microestruturadas que apresentam uma matriz periódica bem definida de buracos são conhecidas como fibras de cristal fotônico.

As fibras de cristal fotônico, passaram a ser pesquisadas para diversas aplicações, como sensores de pressão [8], sensores bioquímicos [9], na geração de supercontínuo [10], entre outros.

## 2.1. FIBRAS ÓPTICAS CONVENCIONAIS

Em sua grande maioria as fibras ópticas são fabricadas com sílica (vidro) ou polímeros, porém existem fibras fabricadas com materiais especiais devido a características específicas que são necessárias em determinadas aplicações, como resistência a altas temperaturas, que exige a utilização de safira, por exemplo [1,11].

Uma fibra óptica comum tem formato cilíndrico e é formada por dois cilindros concêntricos, além de um revestimento que tem por objetivo proteger a fibra. O cilindro mais interno é chamado de núcleo e tem o índice de refração maior que o do cilindro mais externo, chamado de casca [1]. A Figura 8 apresenta o desenho esquemático de uma fibra óptica comum. Este tipo de fibra conduz a luz através de seu núcleo por reflexão interna total, fenômeno que será revisado a seguir.

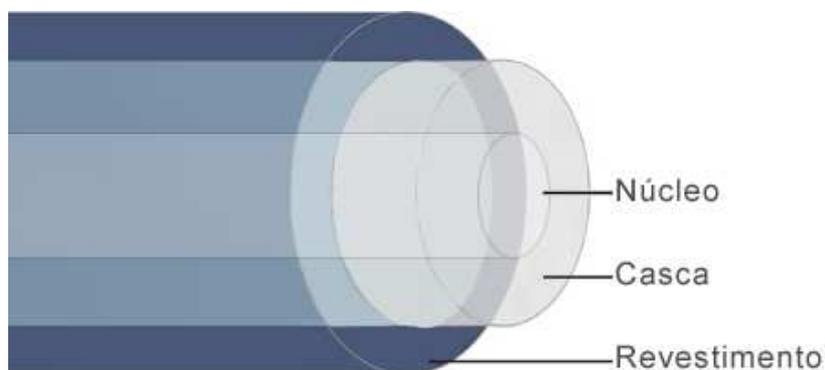


Fig. 8. Desenho esquemático de uma fibra óptica comum.

Na interface de dois materiais com índices de refração diferentes, a luz sofre dois fenômenos: a refração e a reflexão. A parte refratada atravessa a interface sofrendo um desvio devido à diferença no índice de refração dos dois materiais, enquanto a refletida retorna ao meio de propagação inicial [1]. Entretanto, a luz sofrerá reflexão

total caso o índice do primeiro material ( $n_1$ ) seja maior que o do segundo ( $n_2$ ) e o ângulo de incidência seja maior que o chamado Ângulo Crítico ( $\theta_C$ ) [1]. Caso a luz incida com ângulo igual ao Ângulo Crítico, será refratada com um ângulo de  $90^\circ$ , conforme a Figura 9.

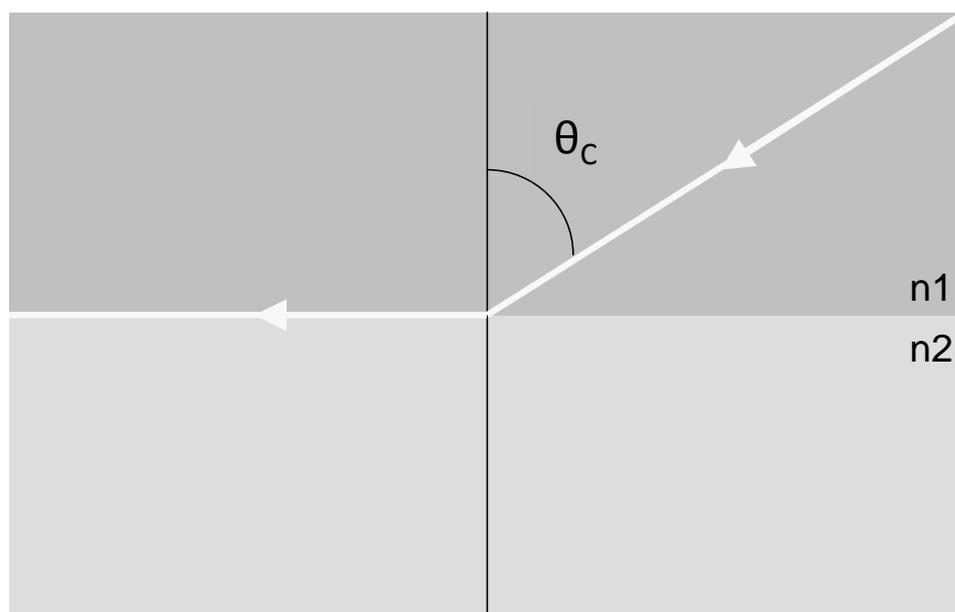


Fig. 9. Diagrama demonstrando o Ângulo Crítico ( $\theta_C$ ). A luz incidente pelo meio de índice  $n_1$ , sendo  $n_1 > n_2$ , sofre reflexão interna total se o ângulo incidente for maior ou igual a este ângulo.

A equação do Ângulo Crítico é [1]:

$$\text{sen}(\theta_C) = n_2/n_1, \text{ sendo } n_1 > n_2. \quad (6)$$

As fibras ópticas comuns utilizam esse conceito para guiar a luz pelo seu interior. A Figura 10 mostra, a partir de um diagrama esquemático baseado na óptica de raios, a luz sofrendo reflexão interna total e com isso sendo guiada pelo núcleo da fibra.

Este fenômeno ocorre, pois o ângulo de incidência da luz guiada na interface núcleo-casca é maior que o Ângulo Crítico.

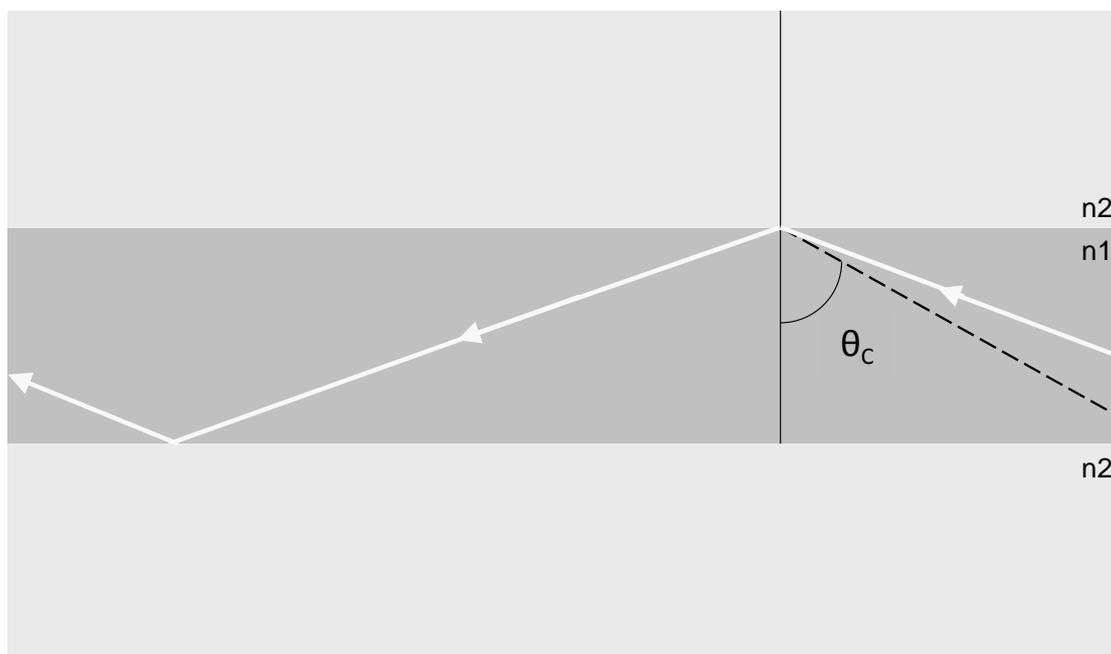


Fig. 10. Luz sendo guiada no interior de uma Fibra Óptica.

Em telecomunicações, as vantagens de se transmitir informação através de feixes luminosos se devem às elevadas frequências (da ordem de  $10^{14}$  Hz), que permitem transmitir centenas de milhares de vezes mais informação do que na região de microondas [1]. Em 2002 estimava-se que mais do que 100 milhões de quilômetros de fibras tivessem sido instalados desde 1970 em todo o mundo [1]. O interesse nas fibras ópticas só cresce e hoje elas são também utilizadas em sensores de pressão, temperatura, som, potencial elétrico, corrente, níveis de líquidos, campos elétricos e magnéticos, rotações, etc [1,10].

## 2.2. FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO

As PCFs foram demonstradas pela primeira vez em 1995 [12] com o intuito de se guiar a luz através de um novo conceito: o de *bandgap* fotônico, a ser explicado mais adiante. As primeiras PCFs, no entanto, guiavam, involuntariamente, por reflexão interna total. Mesmo assim, elas apresentavam propriedades novas e interessantes. Existem dois tipos de PCFs, as de núcleo sólido e as de núcleo oco; exemplos da seção transversal desses dois tipos de fibra são mostrados na Figura 11. A Figura 12 apresenta um desenho esquemático de uma PCF de núcleo oco indicando que os buracos em sua estrutura correm longitudinalmente por todo seu comprimento.

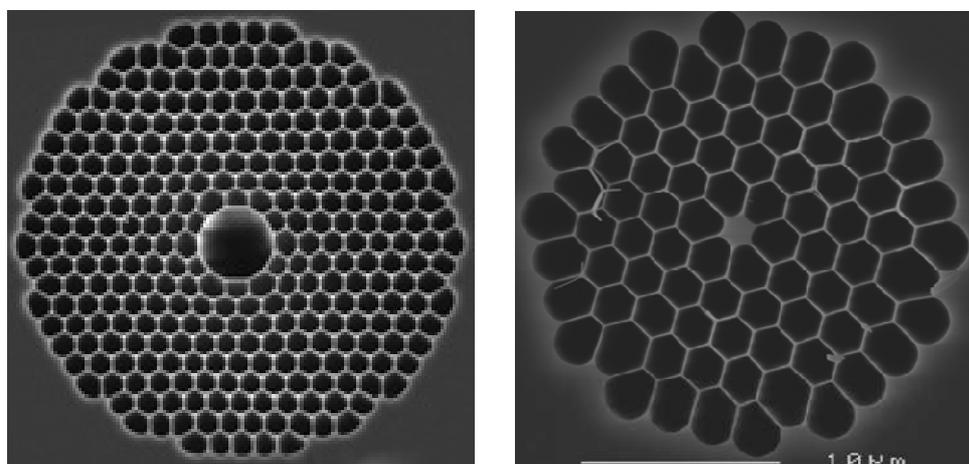


Fig. 11. Imagens de microscopia eletrônica da seção reta de Fibras de Cristal Fotônico de núcleo oco (esquerda) e de núcleo sólido (direita) [13].

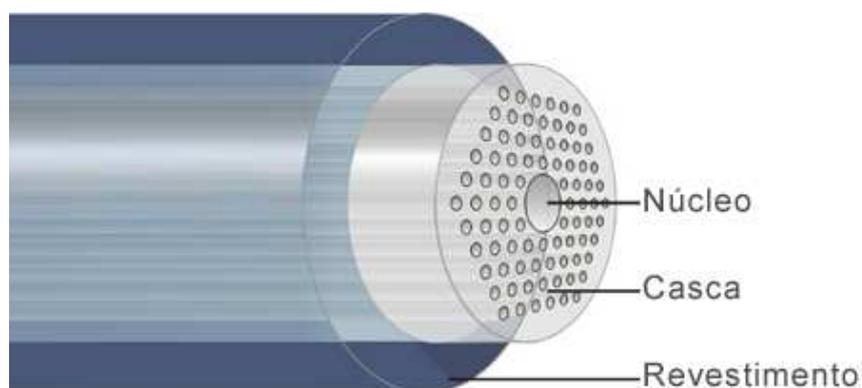


Fig. 12. Desenho esquemático de uma fibra de cristal fotônico de núcleo oco [13]

Uma das grandes vantagens das PCFs é a grande flexibilidade de design, pois alterando-se as características geométricas da seção transversal da fibra, como o tamanho dos buracos ou sua disposição, é possível obter fibras com propriedades ópticas distintas [12]. As propriedades das fibras de cristal fotônico superam algumas das limitações das fibras ópticas convencionais e viabilizam, por exemplo, melhor controle sobre as propriedades de dispersão. Estas fibras estão provando ter diversas aplicações tecnológicas em muitas disciplinas. O resultado de sua invenção foi um renascimento do interesse pela pesquisa na área de fibras ópticas e em seus usos [14].

### 2.2.1. Métodos de Fabricação

É interessante mencionar os métodos de fabricação que viabilizam a criação de padrões microscópicos tão regulares quanto os observados em fibras de cristal fotônico. No método mais difundido cria-se uma pilha de tubos e hastes sólidas com diâmetros de poucos milímetros, criando-se uma “pré-forma macroscópica” da estrutura desejada da PCF, como mostrado na Figura 13. Esta pré-forma é então fundida e puxada em dois

estágios usando uma torre de puxamento de fibras convencionais, como mostrado na Figura 14. Para amolecer a sílica, a fornalha (zona de aquecimento) funciona entre 1800° a 2000°C [14].



Fig. 13. Capilares de sílica organizados para formar a casca microestruturada de uma fibra de cristal fotônico [13].

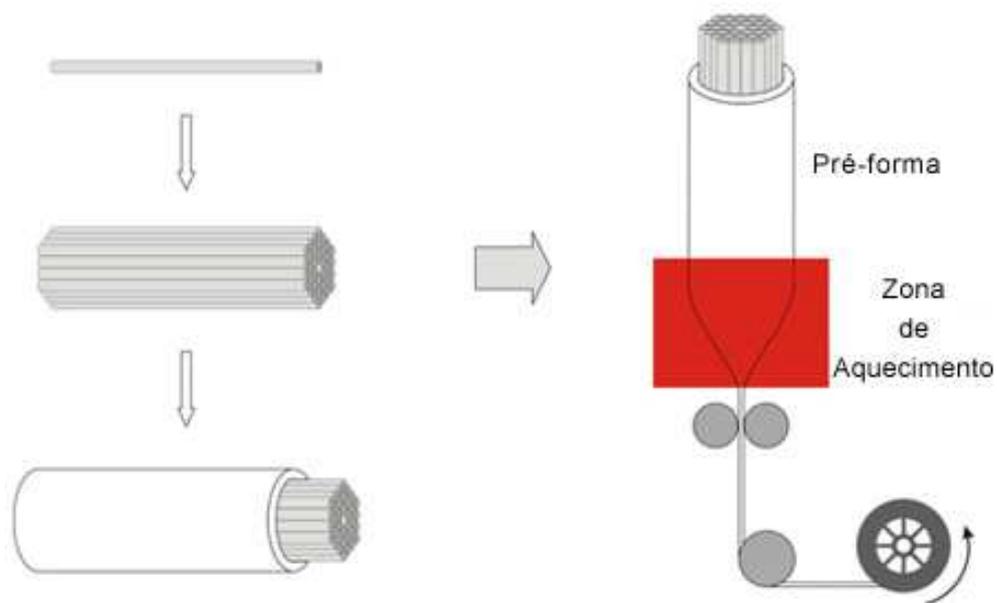


Fig. 14. Processo de fabricação de uma fibra microestruturada [13].

A Figura 15 mostra alguns exemplos das microestruturas que podem ser criadas a partir deste processo de fabricação. Para a observação de padrões regulares de difração a partir da incidência de um laser pela lateral da fibra, como é o objeto de estudo deste trabalho, são necessárias estruturas regulares com diversos períodos, como mostrado na última seção transversal apresentada na Figura 15.

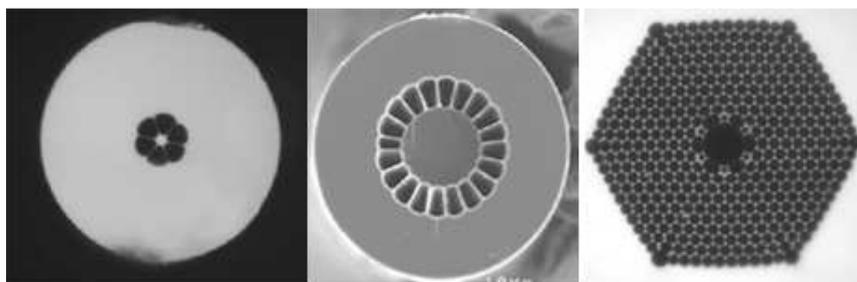


Fig. 15. Exemplos de microestruturas geradas a partir do método de empilhamento de tubos e hastes [13].

### 2.2.2. PCF de núcleo sólido

As PCFs de núcleo sólido são o tipo de PCF mais comum, devido à maior facilidade de fabricação [15]. Neste tipo de PCF a luz é guiada pelo núcleo por reflexão interna total, por o índice de refração do núcleo (em geral vidro) ser maior do que o índice de refração da casca, que é formada pela matriz de buracos que percorrem todo seu comprimento. O índice de refração efetivo da casca é uma média entre o índice de refração do vidro e o do ar, já que estes dois materiais compõem a microestrutura [15].

Desta forma, a PCF de núcleo sólido funciona de maneira semelhante às fibras convencionais. Entretanto, as características de guiamento da luz dependem fortemente da geometria da microestrutura da casca [12]. Isto faz com que se tenha muito mais flexibilidade para se customizar as propriedades de guiamento, o que constitui uma vantagem para as PCFs.

### 2.2.3. PCF de núcleo oco

No caso de PCFs de núcleo oco, a luz não deveria ser conduzida pelo buraco central, já que o índice de refração do ar é menor que o índice de refração observado na matriz de buracos, o que impede a reflexão interna total. Porém, em fibras deste tipo, e que possuam uma matriz extensa e periódica de buracos, uma determinada faixa de comprimentos de onda da luz pode ser conduzida pelo núcleo, a partir do fenômeno chamado de *bandgap* fotônico.

A luz em determinados comprimentos de onda é confinada ao núcleo oco por efeitos interferométricos que a impedem de passar para a casca, como mostra a Figura

16. Refrações e reflexões ocorrem em cada interface ar/vidro da casca e, devido à estrutura da PCF ser periódica, as fases adquiridas pela luz em seus vários possíveis caminhos podem gerar interferências construtivas no núcleo oco da PCF. Desta forma, a luz, em uma determinada faixa de comprimentos de onda é conduzida, enquanto que os demais comprimentos de onda se perdem para fora da PCF [7]. O que determina o comprimento de onda guiado é, portanto, a periodicidade e organização da microestrutura.

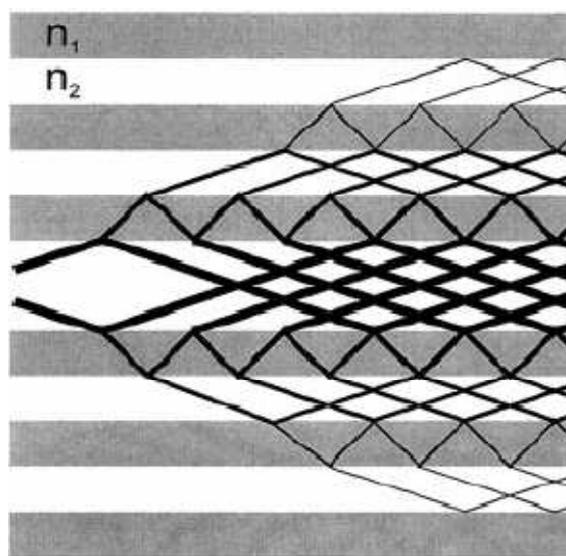


Fig. 16. Luz sendo guiada, para determinados comprimentos de onda, por uma PCF de núcleo oco [16].

Em 1999, a primeira PCF de núcleo oco que apresentava *bandgap* fotônico foi demonstrada a partir de uma pilha de finos capilares de sílica com um furo no centro, que foi formado pela retirada de sete capilares da pilha. A forte dependência do comprimento de onda guiado indicou o efeito *bandgap* fotônico: apenas determinadas faixas de frequência, abrangidas pelo *bandgap*, eram guiadas e as demais frequências de luz escapavam rapidamente para fora do núcleo oco [7]. A Figura 17 apresenta a face de

uma PCF de núcleo oco iluminada com luz branca. Neste caso o *bandgap* fotônico faz com que o núcleo conduza a luz vermelha.

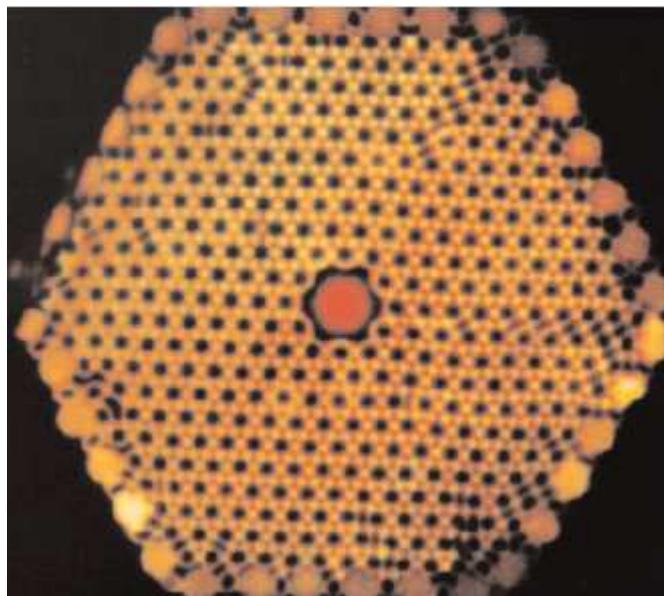


Fig. 17 Micrografia óptica mostrando a face de uma PCF de núcleo oco. A PCF iluminada com uma fonte de luz branca gera luz vermelha no núcleo devido ao *bandgap* gerado pela matriz de buracos. As outras cores vazam para fora da fibra [17].

#### 2.2.4. PCFs preenchidas por líquidos

Uma das principais vantagens das PCFs sobre as fibras convencionais é a possibilidade de se colocarem materiais diversos em contato com a luz guiada sem comprometer a integridade do guia e sem a necessidade de se extrair e se re-inserir a luz no mesmo. Em PCFs, isto pode ser feito inserindo-se o material desejado, que pode ser líquido, gasoso, ou sólido em escala sub-micrométrica, nos buracos. A proximidade dos buracos com a luz guiada faz com que a interação com o material seja grande e eficiente. Diversas aplicações são, portanto, viabilizadas por PCFs preenchidas, tais como sensoriamento bioquímico, onde líquidos ou gases a serem analisados são inseridos na

PCF para que interajam com a luz guiada. Através da análise da luz transmitida, as características da amostra são determinadas.

Neste sentido, já foram apresentados, por exemplo, sensores bioquímicos onde material biológico era inserido em uma PCF na qual foi escrita uma rede de período longo (LPG) [9]. A introdução do material mudava comprimento de onda da LPG e desta forma era possível medir a espessura da camada do material analisado. Um sensor para determinar a concentração de etanol, também já foi apresentado, onde o etanol era inserido na PCF para que interagisse com a luz guiada por espalhamento Raman. A alteração no comprimento de onda guiado causado por este espalhamento era analisado por um espectrômetro e com isso a concentração de etanol em uma solução aquosa era determinada [18].

Outro tipo de aplicação de PCFs preenchidas por líquidos, consiste em se utilizar um material com características conhecidas para alterar as propriedades da luz de uma forma pré-determinada, viabilizando o desenvolvimento de dispositivos fotônicos. Nesta direção, uma PCF teve água inserida apenas em seu núcleo oco, de forma que passasse a guiar por reflexão interna total [10]. Explorou-se então a baixa dispersão cromática apresentada pela água em 1  $\mu\text{m}$  para que a fibra passasse a gerar um espectro supercontínuo.

Por estes motivos é importante se conhecer a dinâmica de fluidos, e em particular líquidos, no interior de fibras de cristal fotônico. A dimensão dos buracos, faz com que este estudo se insira na recente área de microfluidica. As inúmeras aplicações de PCFs preenchidas são a motivação para o presente trabalho e para o estudo experimental que será apresentado no capítulo 3.

### 3. ESTUDO DE MICROVAZÃO EM FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO

Com o desenvolvimento das fibras de cristal fotônico, uma quantidade considerável de estudos tem sido dedicada a aplicações envolvendo preenchimento dos buracos dessas fibras com líquidos [19]. No capítulo 2 alguns exemplos de PCFs preenchidas foram apresentados [8,9,17].

Uma parte crucial da pesquisa com fibras preenchidas diz respeito ao próprio processo de preenchimento, incluindo a dependência do tempo de preenchimento com a viscosidade do líquido e a pressão aplicada. É importante mencionar que este estudo insere-se numa área maior, denominada microfluídica, que tem recebido grande atenção recentemente devido a suas aplicações principalmente na análise de amostras biológicas [20].

Para caracterizar o preenchimento de PCFs com líquidos, Nilesen et al. [19] propuseram um modelo que quantitativamente prediz o tempo de infusão específico dentro dos micro-buracos e realizaram medidas com o intuito de verificar a exatidão do modelo, que se mostrou eficiente.

O modelo assume fluxo laminar e leva em consideração quatro forças: força capilar, atrito, força devido à aplicação de diferença de pressão e força gravitacional. A seguinte equação para o comprimento preenchido,  $L$ , de um micro-buraco cilíndrico de raio  $a$  em função do tempo,  $t$ , é deduzida [19]:

$$L(t) = \sqrt{\left(\frac{A}{B^2} \exp(-Bt) + \frac{At}{B} - \frac{A}{B^2}\right)} \quad (7)$$

Onde:

$$A = \frac{4\sigma \cos \theta + 2\Delta P a}{\rho a} \quad (8)$$

$$B = \frac{8\mu}{\rho a^2} \quad (9)$$

Sendo:

$\sigma$  a tensão superficial do líquido;

$\rho$  a densidade do líquido;

$\Delta P$  a diferença de pressão entre a entrada e a saída do buraco;

$\theta$  o ângulo de contato entre o líquido e a parede do tubo;

$\mu$  a viscosidade dinâmica do líquido.

A Figura 18 [19] apresenta a curva de comprimento preenchido em função do tempo para um tubo capilar posicionado vertical e horizontalmente, simulado com 1  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$  de raio. O líquido considerado na simulação de Nielsen et al. foi a água com o ângulo de contato de  $0^\circ$ , a tensão superficial igual a 72 dyn/cm e a viscosidade de 1 cP [19]. Não foi considerada aplicação de pressão nessa simulação, portanto  $\Delta P=0$ .

A figura mostra que para pequenos buracos a força gravitacional, que afeta o capilar na vertical, pode ser desprezada.

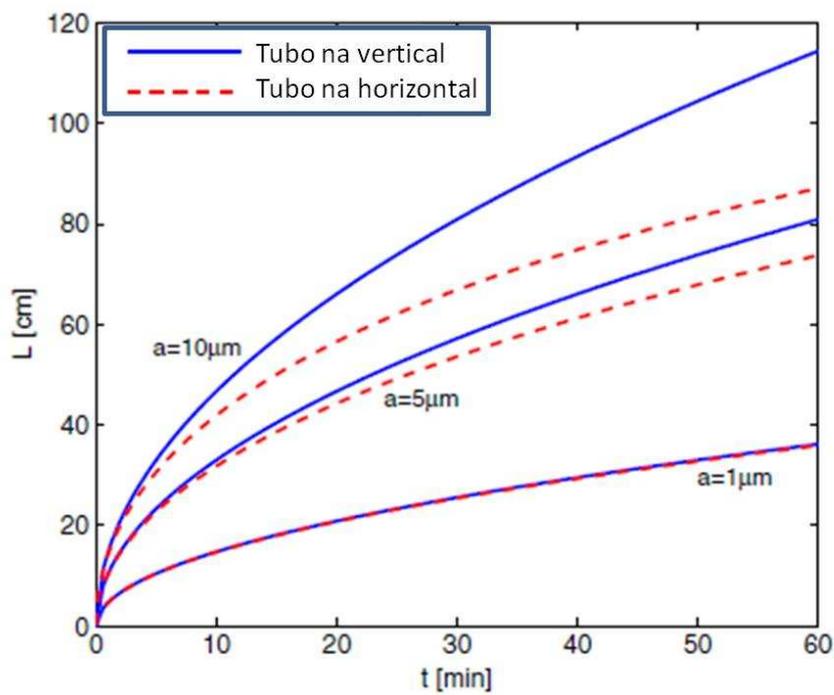


Fig. 18. Curva teórica de preenchimento de um tubo capilar [19]

Para determinar  $L(t)$  experimentalmente e verificar o modelo, Nielsen et al. [19] propuseram três experimentos. No primeiro, as PCFs foram cortadas em tamanhos conhecidos, uma câmera digital com lente microscópica foi posicionada em uma das extremidades e a partir da outra o líquido foi inserido. O tempo que o líquido levava de uma extremidade a outra foi determinado pela observação da chegada do líquido na extremidade onde a câmera foi posicionada.

No segundo experimento realizava-se um corante no líquido inserido e lançava-se luz na fibra para que este fluorescesse. Posições pré-determinadas ao longo da fibra eram observadas com um microscópio e à medida que o líquido atingia cada uma delas o tempo era registrado. Este experimento, por ser não destrutivo, tem vantagens sobre o anterior, já que uma mesma fibra pode ser utilizada para registrar a

coluna de líquido em diferentes posições. Por outro lado, a introdução de um material adicional (o corante) é necessária.

O terceiro e último experimento proposto utilizava um refletômetro de baixa coerência para verificar o preenchimento da fibra. O princípio de operação é baseado na mudança abrupta do índice de refração na interface ar-água a que é submetida a luz que se propaga no interior da fibra, que irá resultar em uma reflexão que é facilmente detectada com resolução espacial pelo refletômetro. Este método é ainda melhor que os outros dois propostos, já que acompanha continuamente o deslocamento da coluna de líquido ao longo de toda a fibra e reduz o erro humano. Entretanto, exige um aparato e uma análise experimentais significativamente mais complexos. É importante mencionar que este método foi também utilizado por J.S.K. Ong et al. [21] para monitorar a evaporação de líquidos em uma PCF. A montagem usada neste caso é apresentada na Figura 19.

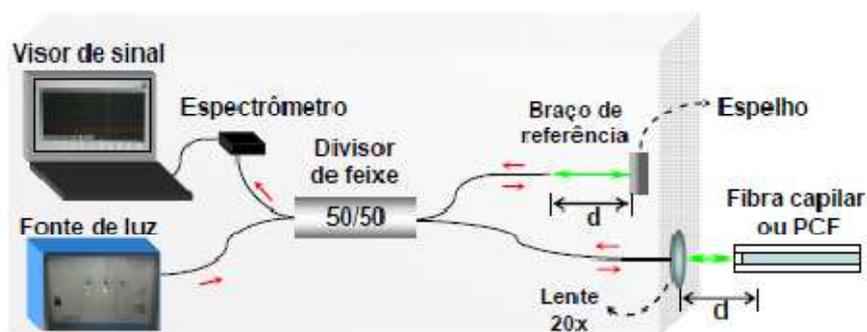


Fig. 19. Experimento para monitoramento da evaporação de líquidos em PCFs [21].

Os resultados dos três experimentos foram bem próximos daqueles previstos com a equação proposta, portanto esta se mostrou eficiente na determinação da posição do líquido na fibra em função do tempo. É importante notar que as técnicas

experimentais propostas eram capazes de monitorar o preenchimento de buracos isolados. A análise, pelas técnicas propostas, do preenchimento simultâneo de toda a microestrutura de uma PCF é bastante mais complexa.

Tendo como base este estudo, e pela importância da microvasão no estudo de fibras de cristal fotônico, o presente trabalho propõe um método alternativo, não invasivo, não destrutivo e de simples implementação, pois não requer equipamentos sofisticados para avaliar e monitorar o preenchimento simultâneo dos buracos de uma PCF assim como medir o tempo que o líquido leva para percorrer o interior da fibra. Esta análise se dá de forma não invasiva e não destrutiva, com um laser incidindo perpendicularmente ao comprimento da fibra e com o monitoramento do padrão de difração causado por essa. Como o padrão de difração causado por uma PCF preenchida com ar é diferente daquele causado por uma PCF preenchida com líquido, o fluxo de líquido altera o padrão observado.

### 3.1. DIFRAÇÃO NA LATERAL DE UMA PCF

Experimentos que observam a difração na lateral de uma PCF já foram propostos [22-24]. Em sua maioria, estes experimentos visavam a utilizar a PCF como uma grade de difração tridimensional, explorando os *bandgaps* fotônicos observados em determinados ângulos e comprimentos de onda. Um dispositivo sintonizável baseado neste princípio foi proposto, como mostra a Figura 20 [22]. A PCF era posicionada entre duas fibras comuns e as bandas espectrais transmitidas eram determinadas pela microestrutura da PCF. Era então possível alterar a banda transmitida inserindo-se um líquido em seu interior, já que a periodicidade óptica da grade é função do índice de refração dos buracos.

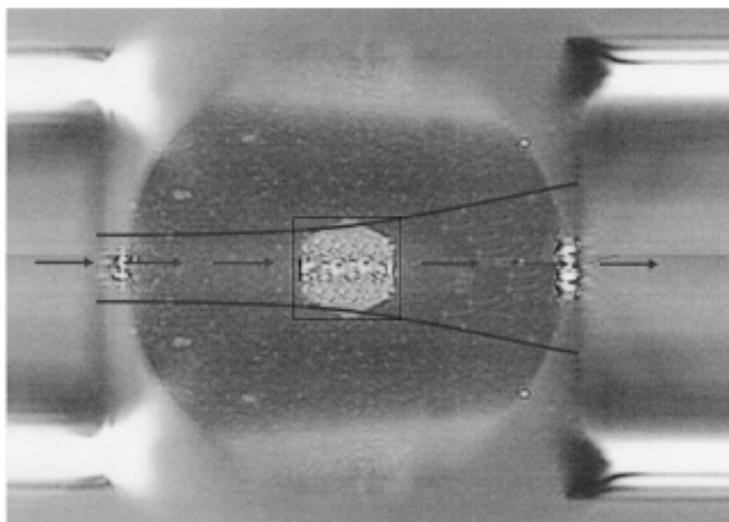


Fig. 20. Estrutura de um dispositivo baseado em difração na lateral de uma PCF [22].

O experimento aqui proposto utiliza este conceito para identificar o preenchimento de uma PCF pela observação da alteração no padrão de difração gerado pela microestrutura.

### 3.2. EXPERIMENTO PROPOSTO

O experimento proposto consiste em detectar o fluxo de um líquido (com índice de refração próximo ao do vidro) no interior de uma fibra de cristal fotônico através da investigação da difração lateral gerada a partir da incidência e focalização de um laser com ângulo de incidência de  $90^\circ$  com o eixo da PCF. Este padrão começa a se modificar no instante em que a fibra, no ponto onde o laser incide, começa a ser preenchida. Se o índice do líquido for suficientemente próximo ao do índice da sílica, quando a fibra está preenchida o padrão de difração gerado naquele ponto desaparece e

dá lugar a um padrão correspondente a um feixe distorcido pela passagem por um cilindro homogêneo.

O padrão observado com uma fibra convencional foi registrado antes de se iniciar o experimento com a fibra de cristal fotônico e é mostrado na Figura 21. Este padrão foi usado como controle para determinar quando a PCF estaria completamente preenchida, pois é um padrão semelhante a este que se espera observar quando uma PCF for preenchida com um líquido de índice de refração próximo ao do vidro.



Fig. 21. Imagem obtida em um anteparo distante a partir do laser de Hélio-Neônio focalizado por uma objetiva de 5x após atravessar uma Fibra Óptica Convencional.

O esquema da montagem do experimento para investigar lateralmente o fluxo no interior de uma PCF é mostrado na Figura 22. Foi utilizado o feixe de um laser de Hélio-Neônio, com comprimento de onda de 633 nm e aproximadamente 1,20 mm de diâmetro. Este diâmetro considera a área que compreende 86,5% da potência. O laser era focalizado na lateral da fibra com uma lente objetiva, num ponto centrado em seu

eixo. O padrão de difração gerado pela microestrutura era observado e registrado em um anteparo colocado a 15 cm da fibra.

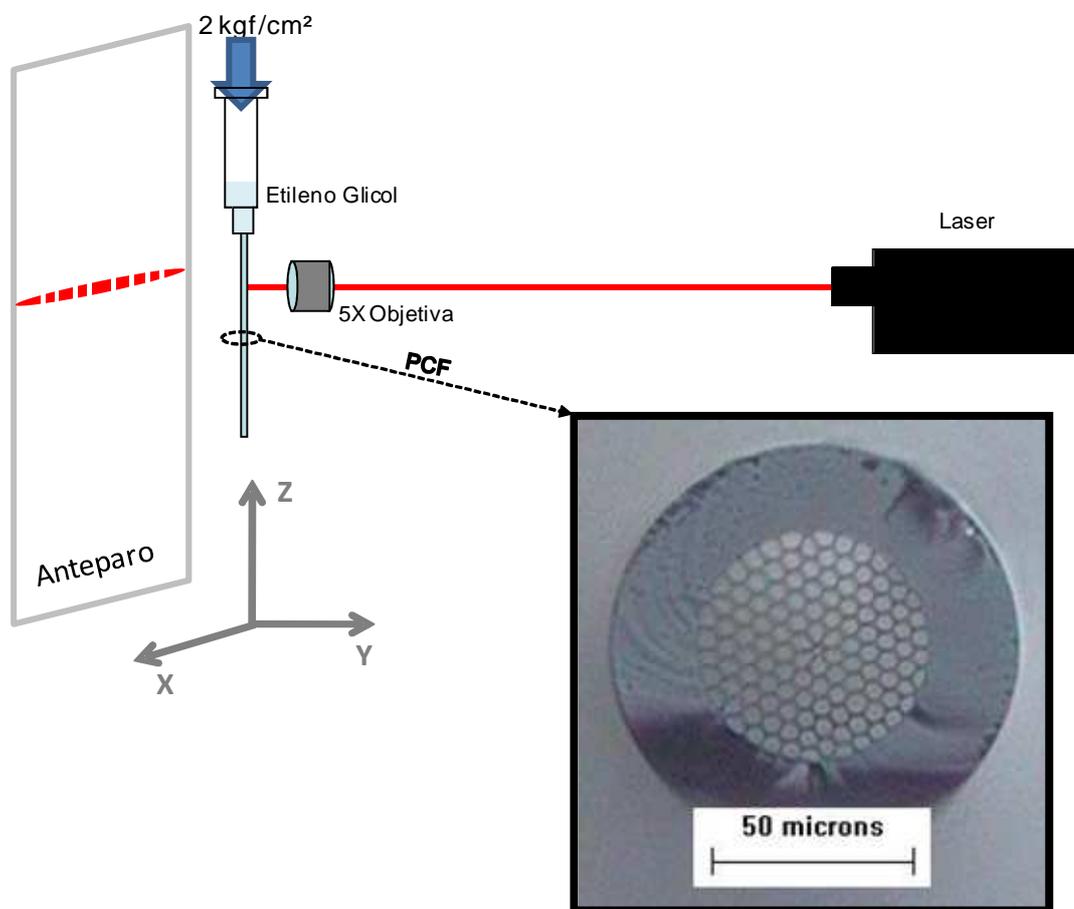


Fig. 22. Montagem do experimento para detectar vazão no interior de uma fibra de cristal fotônico.

A fibra de cristal fotônico utilizada neste experimento é apresentada na Figura 23. É possível observar que nem todos os buracos da PCF têm o mesmo tamanho. O raio de todos os buracos da microestrutura foi medido e, a partir destas medidas, foi gerado o histograma da Figura 24. A partir desta análise definimos que a microestrutura da PCF utilizada possui um raio médio de buracos igual a  $2,20 \mu\text{m}$ , com um desvio padrão de  $0,24 \mu\text{m}$ . A PCF possui também um núcleo sólido de  $2,5 \mu\text{m}$  de diâmetro, um diâmetro externo de  $102 \mu\text{m}$ , e uma região microestruturada de  $58 \mu\text{m}$  de largura.

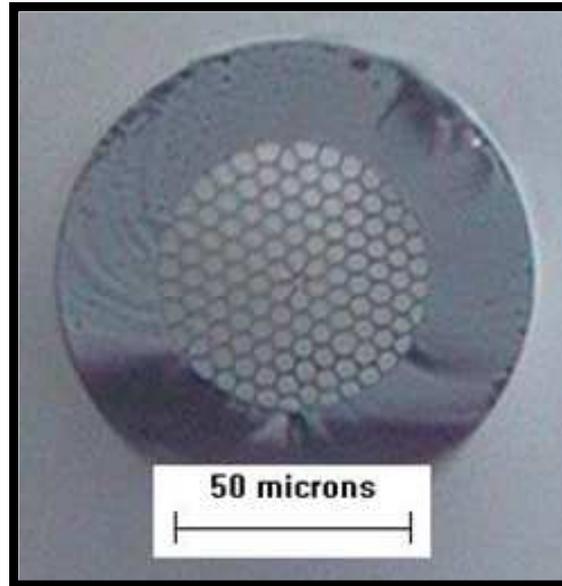


Fig. 23. Seção transversal da PCF utilizada no experimento.

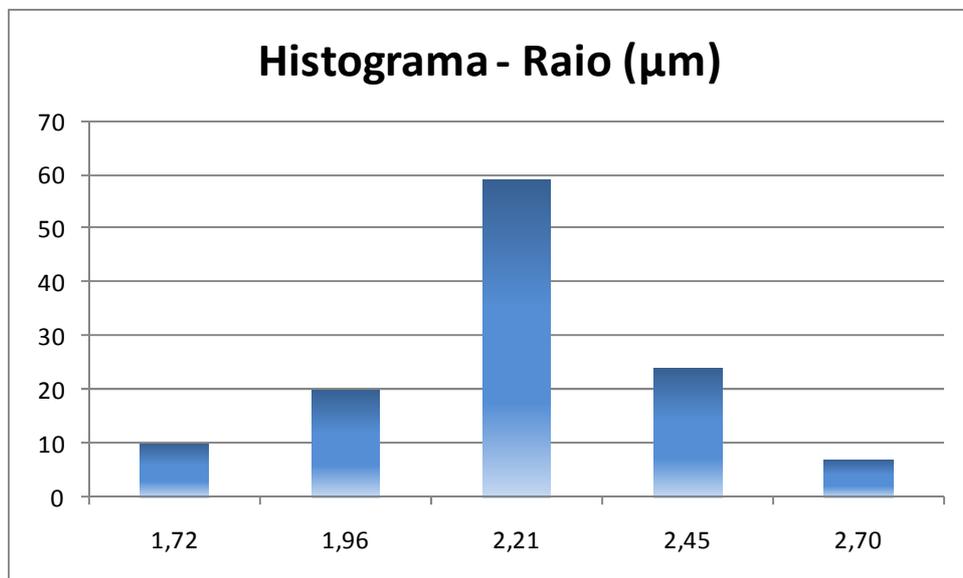


Fig. 24 – Histograma do raios dos buracos da PCF utilizada.

Para focalizar o laser sobre a PCF estavam disponíveis lentes objetivas de 5x, 10x, 20x e 40x. A lente foi escolhida em função do tamanho do *spot size* gerado, pois desejava-se que o laser interagisse com o maior número possível de períodos da microestrutura, o que maximiza os efeitos difrativos. A objetiva escolhida foi a de 5x.

A lente de 5x utilizada apresenta uma distância focal de 30mm. A partir da equação 3, obtemos um *spot size* no foco de 20,15  $\mu\text{m}$ , para o comprimento de onda usado e o diâmetro do feixe laser medido a 86% de potência. A partir das equações 4 e 5 determinamos que o comprimento de Rayleigh é 2,01 mm e o parâmetro confocal é 4,02 mm. Com isso o posicionamento da PCF no foco tolera um erro de  $\pm 2\text{mm}$ .

Como líquidos para preenchimento, foram testados etileno glicol (índice de refração de  $\sim 1,44$  [25]) e óleo mineral (índice de refração de  $\sim 1,46$  [26]). Ambos apresentaram um bom resultado, com bom contraste sendo obtido entre os padrões observados no anteparo com a fibra vazia e preenchida. Ou seja, quando os buracos estavam preenchidos o padrão de difração observado no anteparo era reduzido e a PCF gerava padrão semelhante ao de uma fibra convencional. Para os experimentos relatados a seguir foi utilizado apenas etileno glicol, por ser menos viscoso que o óleo mineral e, portanto, levar menos tempo para preencher as fibras.

Para inserir o líquido, a PCF era colada, com polímero curável a luz ultravioleta, à agulha de uma seringa. A pressão era aplicada à seringa por um compressor de ar ajustado para  $2\text{kgf/cm}^2$  através de um regulador de pressão. O etileno glicol, inserido no interior da seringa, era então forçado a entrar nos buracos pela pressão aplicada.

Testes de controle foram realizados para verificar se o fluxo do etileno glicol por capilaridade (sem aplicação de pressão) deveria ser considerado na análise. Para isso, o experimento foi montado, o etileno glicol foi inserido na seringa, e uma posição a 2cm da ponta da fibra foi monitorada. Mesmo após 10 minutos nenhuma alteração no padrão difrativo foi observado. Quando a pressão era aplicada, o padrão difrativo sofria alteração após algumas dezenas de segundos. Portanto, o fluxo por capilaridade pôde ser

desprezado nos experimentos (mas não na análise teórica) e o tempo de preenchimento era contado a partir da aplicação da pressão.

### 3.3.RESULTADOS

No decorrer do experimento, era possível determinar 3 instantes na observação do padrão de difração projetado no anteparo:

1°-Início: PCF preenchida com ar;

2°-Durante: PCF começando a ser preenchida, com o líquido de índice de refração semelhante ao do vidro ocupando parte do conjunto de buracos;

3°-Fim: PCF completamente preenchida.

As Figuras 25A e 25B mostram o padrão obtido no anteparo com a PCF preenchida com ar e com etileno glicol, respectivamente. As diferenças são facilmente identificáveis. O padrão de difração da fibra preenchida com ar era observado em toda a volta da fibra, efeito que é minimizado quando esta está preenchida com etileno glicol ou óleo mineral. A Figura 26 mostra a observação, a 90°, do feixe de laser em dois momentos: com a PCF vazia e com a PCF preenchida. As diferenças observadas poderiam também ser exploradas para o monitoramento do fluxo do líquido. Entretanto, no trabalho aqui descrito esta possibilidade não foi investigada mais profundamente.

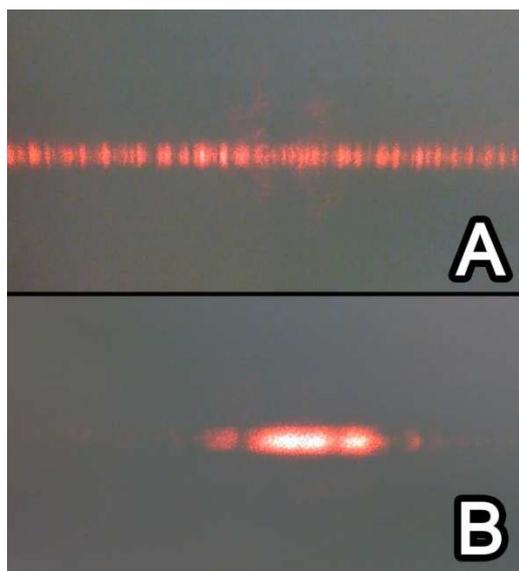


Fig. 25. Padrão observado no anteparo com (A) PCF preenchida com ar; (B) PCF preenchida com etileno glicol.

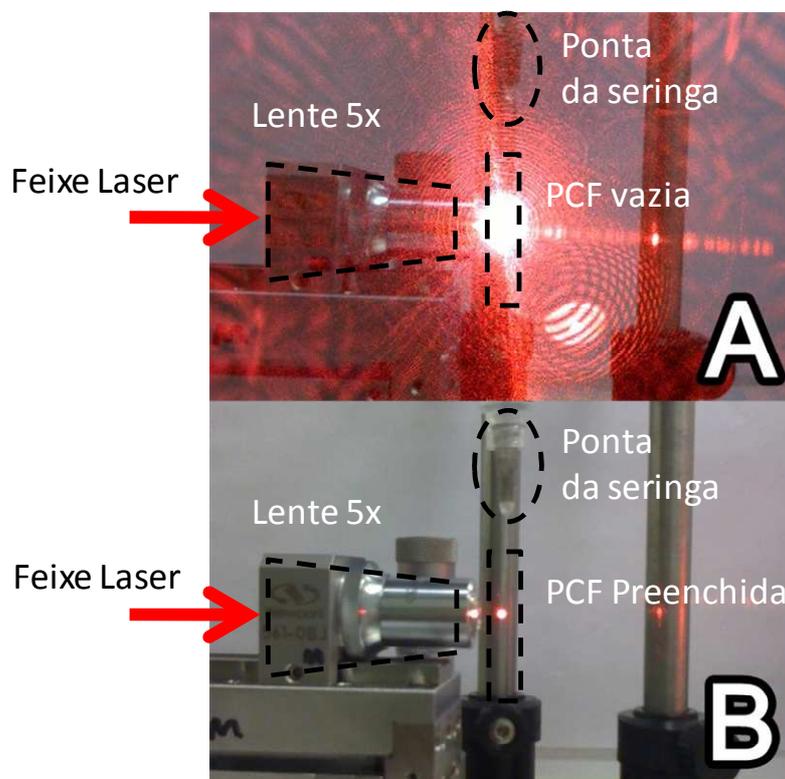


Fig. 26. Vista a 90° do feixe do laser incidindo sobre a fibra. Em (A) a fibra está preenchida com ar e em (B) com etileno glicol.

Por este experimento e pelas observações até aqui apresentadas, concluímos que é possível distinguir lateralmente se um líquido está ou não no interior de uma PCF. Entretanto, para uma comparação inicial entre os dados experimentais e os tempos de preenchimento previstos pela teoria, é conveniente analisarmos o preenchimento de uma fibra possuindo um único buraco cilíndrico, ou seja, uma fibra capilar com diâmetro conhecido. Neste caso, no entanto, o padrão observado antes do preenchimento não é tão característico quanto o da Figura 25A, devido à inexistência de uma matriz periódica de buracos. Desta forma, não é claro se o padrão gerado pela fibra preenchida é suficientemente distinto daquele obtido com a fibra vazia para indicar o tempo exato de preenchimento.

Para verificar essa possibilidade e se realizar uma comparação simplificada com a teoria, foi utilizada uma fibra capilar com diâmetro interno de aproximadamente  $5\mu\text{m}$ . O etileno glicol foi aplicado a  $2\text{ kgf/cm}^2$  e o laser foi posicionado a 2 cm da extremidade da qual o líquido seria inserido. Experimentalmente foi possível identificar a alteração na imagem e verificar que o etileno glicol levou 16 segundos para atingir os 2 cm, conforme mostrado na Figura 26.

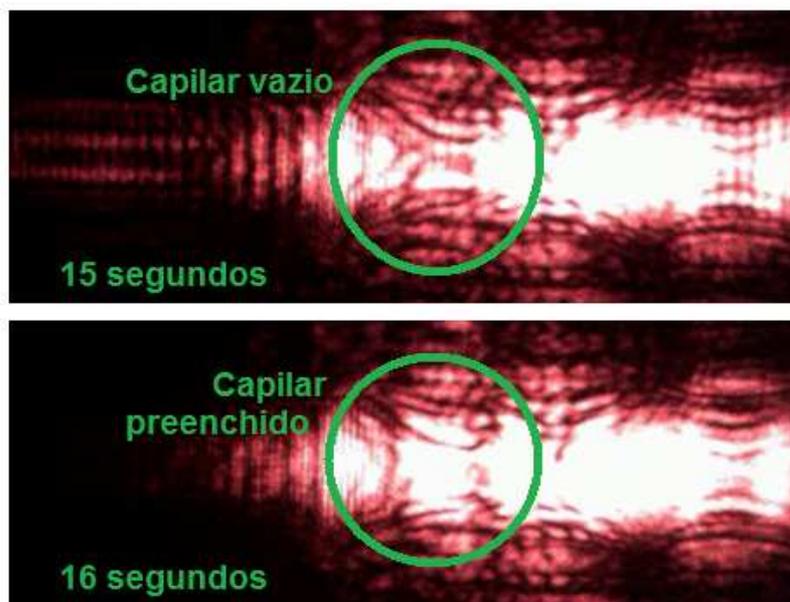


Fig. 26. Padrão observado no anteparo com uma fibra capilar vazia (imagem superior) e preenchida com etileno glicol aplicado a uma pressão de  $2\text{ kgf/cm}^2$  (imagem inferior). Distância entre entrada da fibra e ponto monitorado: 2 cm.

Para os cálculos consideramos os seguintes parâmetros para o etileno glicol, também utilizados para os demais cálculos realizados neste trabalho:

$$\gamma = 0,0477 \text{ mN/m [27]}$$

$\theta = 0^\circ$  ( $0^\circ$  foi adotado pois é o ângulo obtido para diversos líquidos em contato com sílica; alterações neste valor influenciam muito pouco nos resultados teóricos obtidos; por exemplo, de  $0^\circ$  a  $60^\circ$  o valor é afetado em apenas 4,85%)

$$\rho = 1113,2 \text{ kg/m}^3 \text{ [28]}$$

$$\mu = 0,0161 \text{ cP [29]}$$

Pela teoria o tubo capilar deveria atingir os 2 cm logo após os 17 segundos, portanto foi observado um erro de apenas ~1 segundo, mostrando que o experimento e os valores dos parâmetros para o etileno glicol parecem indicar eficazmente o preenchimento. Os fatores que podem provocar a pequena discordância entre o valor experimental e o valor teórico são: imprecisão no posicionamento do laser no ponto exato onde se deseja realizar a medida, medida de tempo, medida de pressão e imprecisão na medida do diâmetro do capilar.

Em nosso experimento com a PCF monitoramos três posições (L) ao longo da fibra: 2cm, 3cm e 4cm, medidos a partir da extremidade na qual o etileno glicol é aplicado. Pela equação 7 (e com  $2 \text{ kgf/cm}^2$  de pressão e  $2,20 \mu\text{m}$  de raio de buraco) podemos prever quanto tempo o etileno glicol leva para atingir estas posições: 23 segundos, 50 segundos e 89 segundos para as três posições mencionadas, respectivamente.

Porém, conforme descrito anteriormente, observa-se que há um período de transição do padrão de difração correspondendo ao preenchimento parcial da matriz de buracos. Este período é relativamente longo, levando-se alguns segundos para que o

ponto observado seja completamente preenchido e se comporte de forma semelhante a uma fibra óptica comum. Este comportamento é ilustrado na Figura 27, que mostra o padrão observado em função do tempo para  $L = 2$  cm. O preenchimento parcial da microestrutura ocorre pois nem todos os buracos da microestrutura têm exatamente o mesmo tamanho e forma.

Buracos com raio menor fazem com que o etileno glicol leve mais tempo para chegar ao ponto observado; já em buracos de tamanho maior este tempo é menor. Determinando, através do padrão observado, o instante em que a fibra começa a ser preenchida até o momento de seu completo preenchimento, é possível identificar a variação no tamanho dos buracos da PCF em questão. Isto será feito no próximo capítulo.



Fig. 27. Observação do padrão no anteparo, com  $L = 2\text{cm}$ , dos 21 aos 45 segundos.

A Figura 27 mostra que é difícil definir um critério para se avaliar quantitativamente o momento a partir do qual a fibra pode ser considerada preenchida. Em nossos experimentos foram feitas 3 medidas para 2cm, 3 medidas para 3cm e 1 medida para 4 cm com os seguintes resultados observados:

Período de transição para  $L = 2\text{cm}$ :

Medida 1: dos 24 aos 43 segundos

Medida 2: dos 24 aos 40 segundos

Medida 3: dos 21 aos 34 segundos

Período de transição para  $L = 3\text{cm}$ :

Medida 1: dos 54 aos 80 segundos

Medida 2: dos 53 aos 81 segundos

Medida 3: dos 41 aos 63 segundos

Período de transição para  $L = 4\text{cm}$ :

Dos 79 aos 120 segundos

É possível verificar uma certa coerência e reprodutibilidade dos resultados. Além disso, o tempo obtido teoricamente para o preenchimento de um capilar com raio igual ao raio médio dos buracos da fibra encontra-se dentro dos intervalos observados nos experimentos, indicando tanto a consistência das medidas quanto a validade do valor de  $a = 2,20\ \mu\text{m}$  como valor médio para o raio dos buracos. Observa-se também que o período de transição (definido como a diferença entre os tempos de início e fim da transição nos padrões de difração) aumenta com o valor de  $L$ . Isto é consistente com a afirmação de que é a variação no diâmetro e forma dos buracos que causa o período de transição. Como a variação do diâmetro acarreta uma variação de velocidade de

preenchimento, quanto maior  $L$ , maior será a discrepância entre os tempos máximo e mínimo de preenchimento.

A difícil identificação do momento exato do início do preenchimento até o seu fim pode gerar erros na análise. Buscando-se minimizar este erro, foram utilizadas técnicas de processamento de imagens, descritas no Capítulo 4, para a determinação sistemática dos instantes de início e fim do preenchimento. Estes tempos serão também associados aos tamanhos máximo e mínimo dos buracos da PCF utilizada neste experimento.

#### **4. PROCESSAMENTO DE IMAGENS E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS: DETERMINAÇÃO DO PREENCHIMENTO DE UMA PCF**

A técnica para determinar o preenchimento de uma fibra de cristal fotônico, proposta neste trabalho, se baseou na observação da alteração no padrão de difração sofrido por um feixe de laser incidindo lateralmente na fibra. Porém, sem suporte computacional a determinação do preenchimento de todos os buracos da PCF, no ponto monitorado, ficava sujeita ao bom senso do realizador da análise.

Para eliminar a subjetividade e garantir que o mesmo critério de análise fosse utilizado para diversas amostras, permitindo desta forma comparar os diversos resultados segundo um critério bem definido, foram utilizadas técnicas de visão computacional e processamento de imagens.

O programa para análise da alteração no padrão de difração foi desenvolvido em MATLAB (*Matrix Laboratory*). O MATLAB é um poderoso software para cálculo de matrizes e vem sendo utilizado em diversas áreas para realizar cálculos e simulação, tendo se tornado muito popular para o processamento de imagens.

Para realizar a análise, o anteparo no qual a luz difratada se projetava era filmado com uma câmera digital colorida para uso em computadores via entrada USB (*webcam*). A filmagem tinha início no momento em que a pressão era aplicada e finalizava alguns segundos após o padrão observado não sofrer mais alteração. A análise dos vídeos foi realizada com imagens estáticas capturadas com um intervalo de 1 segundo, que tinham resolução de 640x480 pixels.

#### 4.1. PROGRAMA PARA PROCESSAMENTO DE IMAGEM E MÉTODO PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para se quantificar o preenchimento e determinar o momento em que o ponto investigado ao longo da fibra de cristal fotônico começava e terminava de ser preenchida, as imagens capturadas foram analisadas.

Com a PCF vazia é possível verificar um padrão dominado por altas frequências espaciais na imagem projetada no anteparo, no qual é possível identificar claramente as franjas criadas pela difração que ocorre em função dos diversos obstáculos com que a luz se depara ao atravessar a microestrutura. Conforme apresentado no Capítulo 3, a PCF preenchida com líquido de índice de refração muito próximo ao da sílica faz com que as franjas criadas pela difração sejam fortemente reduzidas já que os obstáculos efetivamente desaparecem. Desta forma, a análise computacional se baseou na redução da amplitude de altas frequências espaciais (e no conseqüente aumento das baixas frequências) observadas. A amplitude das frequências espaciais foi determinada realizando-se uma transformada de Fourier discreta na imagem. O aumento da intensidade das baixas frequências e da frequência zero foi então monitorado.

Como ilustra a Figura 28, para a análise converte-se primeiramente a imagem para níveis de cinza, de forma a não se desconsiderar nenhuma das três bandas que formam a imagem (vermelha, verde, e azul). Para este fim os dados das três bandas são somados e divididos por três, obtendo-se assim a média simples dos sinais. Como o interesse na análise é apenas no padrão de difração, o programa corta uma janela apenas na região onde o padrão de difração gerado pela PCF está presente.

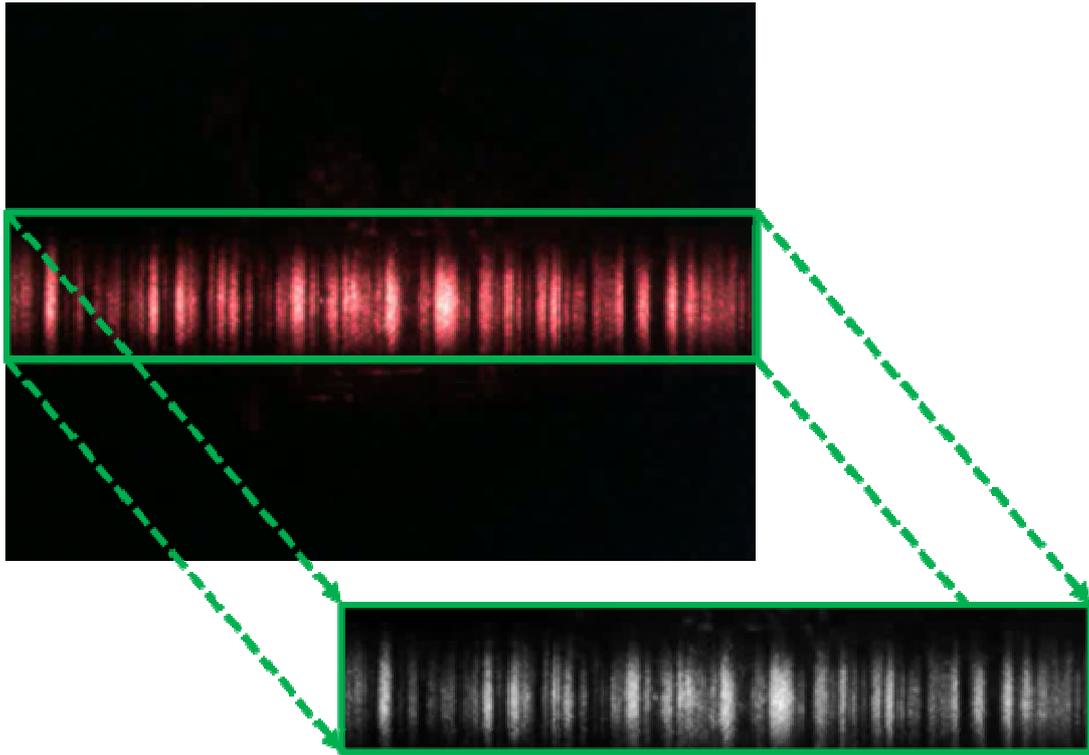


Fig. 28. Resultado da conversão da imagem em preto e branco e corte da imagem na janela da região de interesse.

Para esta parte do processamento, são utilizados os seguintes comandos do MATLAB:

```
print=imread('01.jpg');      % Carrega a imagem na variável print
```

```
[sizey,sizex,sizez]=size(print);
```

```
for i=1:128
```

```
    for j=1:640
```

```
printCinza(i,j) = print(i+176,j,1)/3 + print(i+176,j,2)/3 +  
print(i+176,j,3)/3;
```

```
end
```

```
end % Cria a janela na região de interesse da imagem.
```

Para converter a imagem para o domínio da frequência e analisar seu espectro, foi utilizada a Transformada Rápida de Fourier, ou FFT do inglês *Fast Fourier Transform*. A seguinte linha de comando é utilizada no programa:

```
pFFT=fft(double(printCinza));
```

Como a transformada é centrada em zero, temos frequências positivas e negativas. Para não trabalharmos com frequência negativas, desloca-se o centro de referência para o centro da imagem, eliminando-se a parte negativa. Para a análise, trabalhou-se apenas com valores absolutos de amplitude, utilizando-se os seguintes comandos:

```
T=fftshift(pFFT); % Desloca o resultado eliminando a parte negativa
```

```
Spectrum=abs(T); %Retorna os valores absolutos do espectro
```

Apenas para melhor analisar visualmente os resultados do espectro, convertamos a amplitude para decibéis. A Figura 29 mostra um exemplo do espectro obtido desta forma para a PCF vazia e após seu completo preenchimento. Para isto foram utilizadas as seguintes linhas de comando:

*LogSpec=10\*log(1+Spectrum); % É somado 1 ao Spectrum, pois podem existir zeros na matriz e seria impossível obter o Logaritmo para se obter o valor em decibéis .*

*ImLogSpec=uint8(LogSpec); % Conversão da variável para apresentar a imagem resultante*

*Imshow(ImLogSpec); % Apresenta a imagem do espectro*

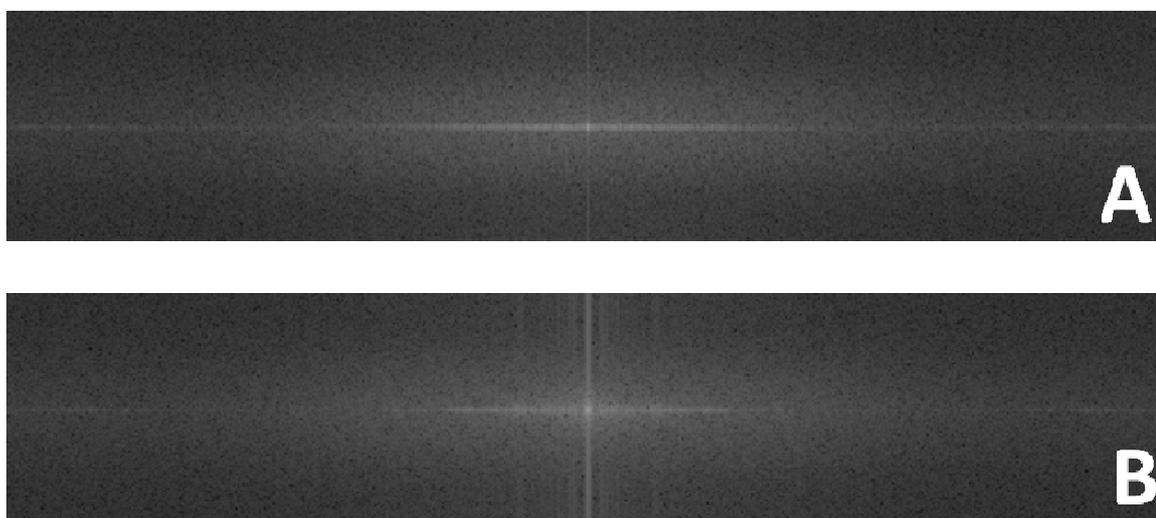


Fig. 29. Espectro de freqüências espaciais em decibéis: A- PCF vazia; B-PCF preenchida.

Observa-se que o ponto central da imagem resultante, que corresponde à freqüência zero, aumenta de intensidade a medida em que as franjas (padrão que intercala claro/escuro) são eliminadas pelo preenchimento da PCF. A intensidade do ponto central aumenta pela eliminação das franjas (ou seja, a freqüência espacial é reduzida). Note que, assim, a saturação da intensidade observada em alguns pontos da imagem (regiões mais claras na Fig. 28) obtida no anteparo não afeta de forma

apreciável a análise, pois não influencia significativamente na diminuição das frequências altas ocasionada pelo preenchimento da PCF. Portanto, para avaliar o preenchimento, monitorou-se a variação de intensidade do ponto central, atribuindo-se o completo preenchimento da PCF ao fim desta variação. Para esta análise o uso de escala linear provou-se mais apropriado; portanto, no programa, a variável “*Spectrum*” é a que é monitorada.

Para validação deste método de análise, é necessário se demonstrar que as variações observadas decorrentes do preenchimento são substancialmente maiores do que outras variações, tais como a rotação da PCF em torno de seu eixo. Devido à simetria hexagonal da fibra, espera-se que a rotação da mesma acarrete em alterações periódicas do padrão difrativo observado. Para analisar tais alterações em uma fibra vazia realizamos um experimento no qual incidiu-se o laser na fibra e esta foi rotacionada de  $15^\circ$  em  $15^\circ$  até completar uma volta inteira; a cada  $15^\circ$  uma foto do anteparo era tirada e o programa era aplicado para determinação da intensidade do ponto central do espectro. A Figura 30 mostra a variação percentual da intensidade em relação ao valor médio obtido na rotação de  $360^\circ$  em torno do eixo da PCF. É possível verificar que a intensidade se comporta de forma semelhante a cada  $60^\circ$ , devido à simetria hexagonal. Observam-se, entretanto, variações claramente decorrentes de erros experimentais, como é o caso dos pontos  $0^\circ$  e  $360^\circ$ , que deveriam apresentar exatamente o mesmo valor de intensidade da frequência zero. Isto pode ter ocorrido pois, apesar de todos os cuidados tomados, o feixe de laser focalizado sobre a PCF pode não ter incidido exatamente na mesma posição, provocando esta variação.

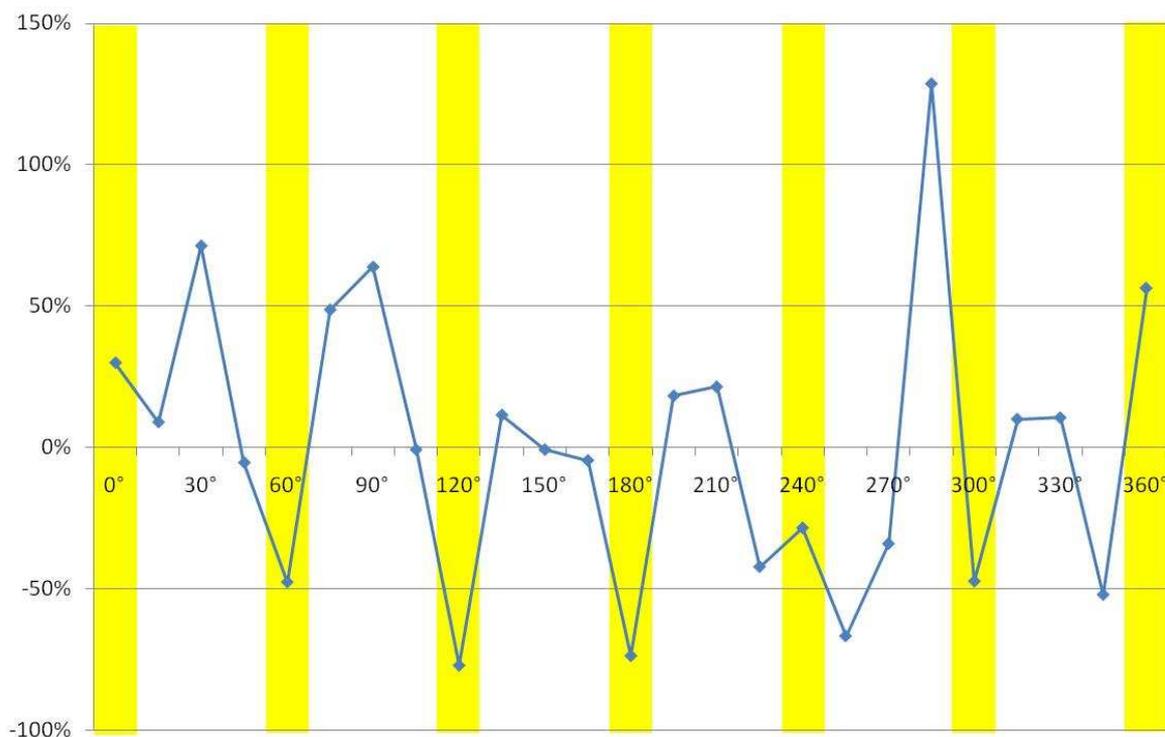


Fig. 30. Variação percentual da intensidade em relação à média para uma volta completa da PCF em torno de seu eixo. Em amarelo destaque para a intensidade a cada 60°.

A Fig. 30 mostra que a variação da intensidade com o ângulo foi de -77% a 129% em relação à média da intensidade nos 360°. Mesmo com esta grande variação de intensidade, o maior valor obtido com a rotação ( $6,5 \times 10^5$ ) ainda é apenas 65% do valor tipicamente atingido com preenchimento ( $10^6$ , conforme mostrado mais adiante). Para os ângulos de menor intensidade, o valor é de apenas 6,5% o valor obtido com o preenchimento.

No experimento de rotação tomou-se o cuidado de tentar fazer com que o laser atingisse sempre o eixo central da PCF. Porém, devido a limitações quanto ao alinhamento e a vibrações na fibra, erros neste posicionamento possivelmente ocorreram, gerando variações na intensidade que provavelmente explicam parcialmente a irregularidade da curva da Figura 30. O fato de a fibra não possuir simetria hexagonal perfeita também deve contribuir para tal irregularidade. De qualquer forma, pode-se

considerar que independente destes erros, a diferença de intensidade do espectro será suficiente para identificar o preenchimento.

Na Figura 31 apresentamos a variação de intensidade ao longo do tempo em um experimento de preenchimento da PCF onde o ponto monitorado está a 2cm da entrada de líquido da PCF. Este resultado corresponde à medida 3 apresentada no capítulo anterior. Como pode ser observado, o resultado mostra-se bastante promissor e atende às expectativas, sendo possível identificar graficamente o momento onde a PCF torna-se preenchida. A figura também mostra os pontos identificados como início e fim do preenchimento por inspeção visual. Observa-se, portanto, que o método de processamento de imagem é capaz de identificar o início do preenchimento mais precocemente, assim como identificar o fim do mesmo em um instante em que visualmente já não se observavam alterações no padrão difrativo.

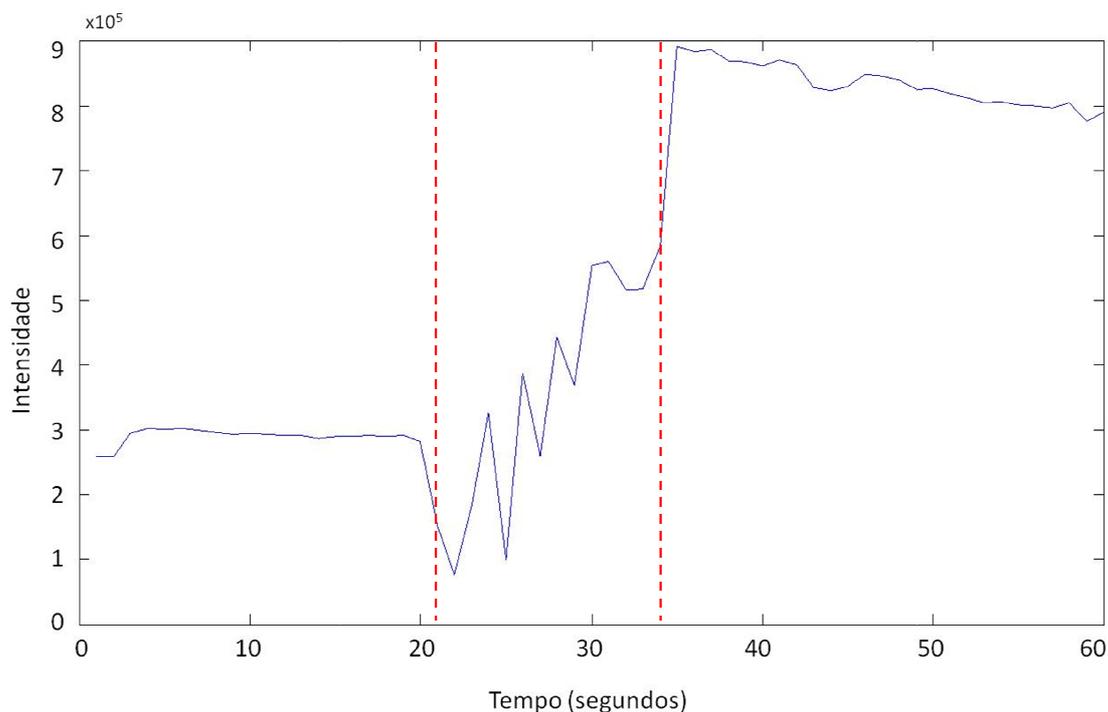


Fig. 31. Resultado da análise da medida 3 do preenchimento de 2cm de PCF com Etileno Glicol. As linhas pontilhadas em vermelho indicam os instantes que haviam sido observados a olho nu como início (aos 21 segundos) e fim (aos 34 segundos) do preenchimento.

Definiu-se, portanto, esta técnica para análise dos experimentos. Porém, apesar de ser possível identificar graficamente o início do preenchimento (onde a curva sofre a primeira variação e inicia sua subida) até seu fim (última variação abrupta), o ruído presente ainda dá margem a mais de uma interpretação quanto ao tempo exato em que ocorrem estes eventos. Na Figura 31, por exemplo, podemos dizer que a PCF começou a ser preenchida aos 19 segundos, porém outro observador pode identificar que o início do preenchimento se deu aos 21 segundos. O completo preenchimento pode ter ocorrido aos 34 segundos, mas também é plausível considerar que a fibra está completamente preenchida aos 36 segundos.

Para eliminar os ruídos da curva (que podem ser causados pela simples vibração da fibra), foi utilizado um filtro de média 7, que a cada ponto realiza a média do valor de intensidade do ponto com seus três primeiros vizinhos anteriores e posteriores (sete pontos, portanto, participam da média). O resultado do filtro é mostrado na Figura 32.

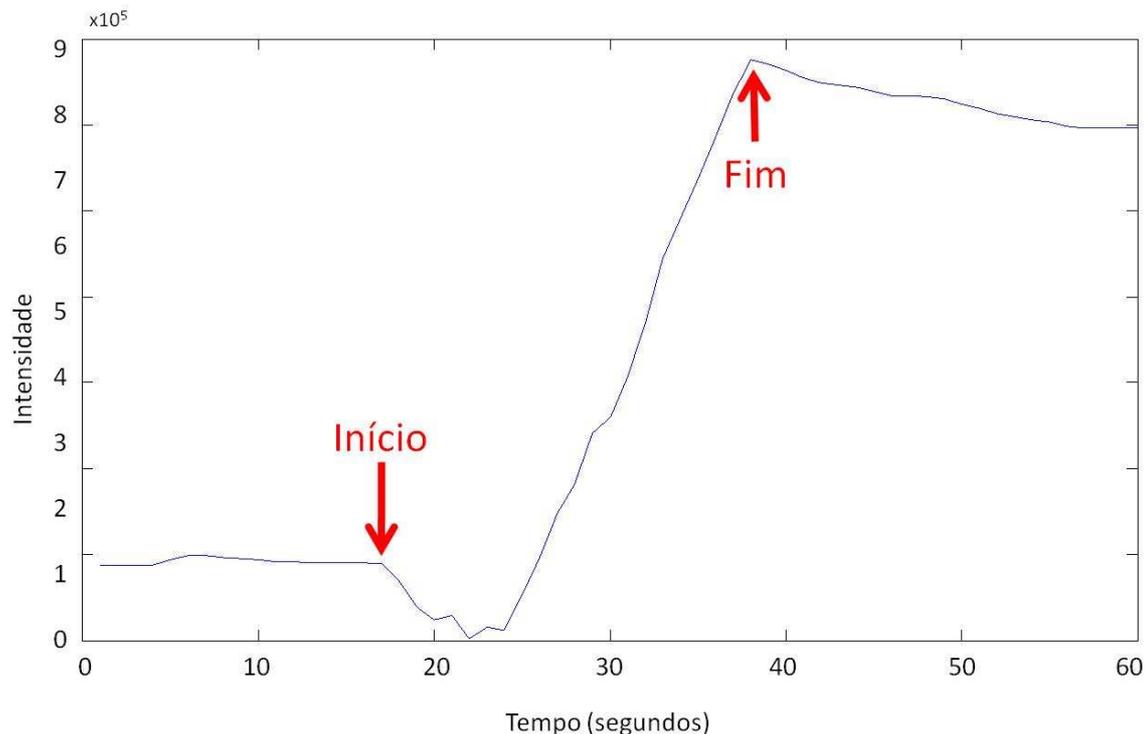


Fig. 32. Curva da figura anterior após aplicação de um filtro de média 7.

Pela curva filtrada pode-se afirmar com maior convicção que a PCF começou a ser preenchida aos 17 segundos e que a queda inicial corresponde a um evento real. De fato, esta queda foi observada em todas as medidas realizadas. Conclui-se, portanto, que o preenchimento de alguns poucos buracos reduz ainda mais as intensidades das baixas frequências espaciais. O total preenchimento da fibra se dá aos 38 segundos, que é quando a variação da intensidade chega ao seu máximo. É, portanto, significativamente mais simples analisar o gráfico filtrado do que o gráfico original.

Neste trabalho, o ponto no qual a fibra será considerada completamente preenchida é aquele a partir do qual a derivada da curva se torna constante. Consideramos este critério pois podem haver instabilidades mecânicas nas montagens experimentais que deslocam o feixe em relação a fibra, acarretando uma variação na intensidade da frequência zero, já que a superposição do feixe laser com a microestrutura aumenta ou diminui. Com a escolha do ponto onde a derivada da curva

obtida se torna constante, assume-se que a taxa desse desalinhamento é constante e menor do que a taxa de preenchimento. Assim, assume-se que é ele o responsável pela variação lenta de intensidade que pode ocorrer no final da medida (como visto na Figura 32). Com este critério determinamos, como já mencionado, que a fibra está completamente preenchida aos 38 segundos.

A Figura 33 mostra curvas originais e filtradas obtidas de experimentos onde se monitoraram pontos a 3 e 4 centímetros da entrada da PCF. Em todos os casos a uso do filtro mostra-se crucial e, como já mencionado, uma queda inicial é observada quando do início do preenchimento. Atribuímos o aumento do ruído com a distância ao aumento das vibrações observado para fibras mais longas, já que nos experimentos a parte inferior das fibras não era fixada. No caso de 4 cm o ruído não pode ser completamente removido com o filtro.

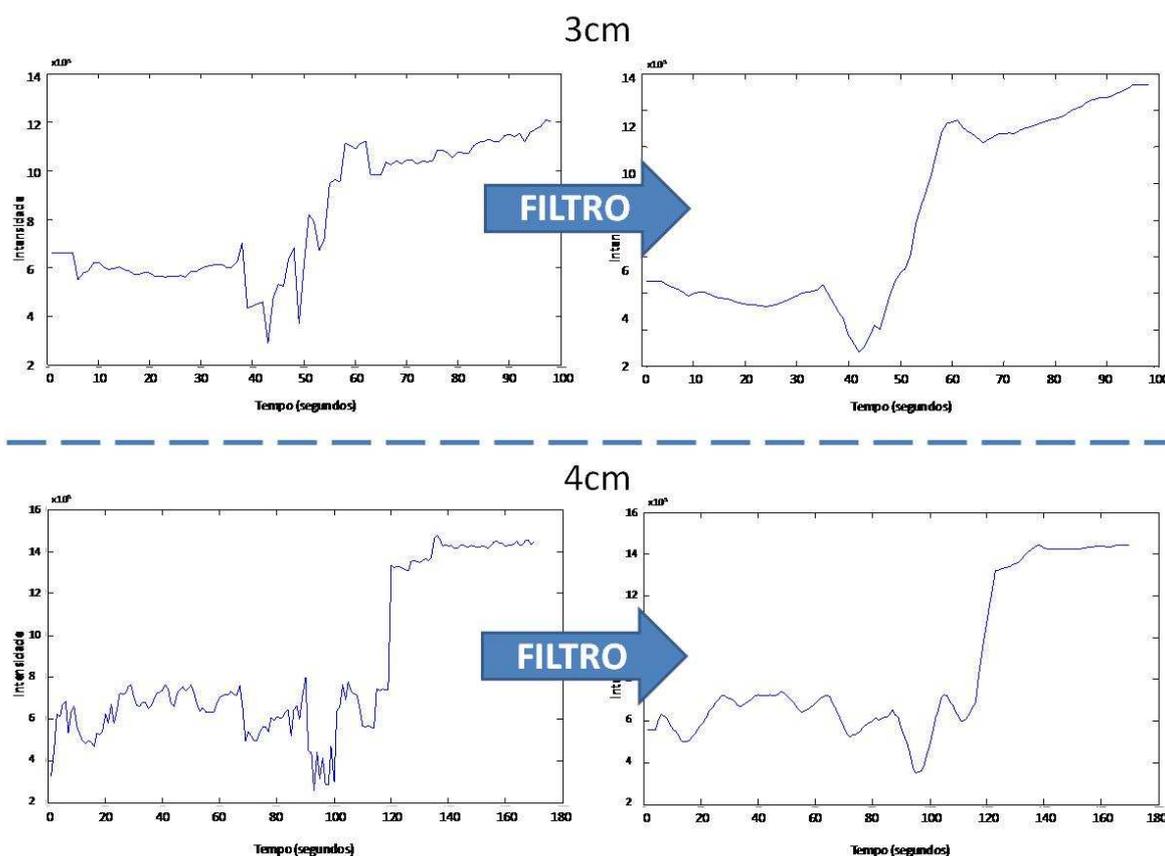


Fig. 33. Curvas de preenchimento para 3 (Medida 3) e 4 cm (Medida 1) antes e depois do filtro.

Analisando as curvas, consideraremos o princípio da queda inicial como o início do preenchimento e, após esse instante, o ponto a partir do qual a derivada da curva se torna constante como o fim do preenchimento. Obedecendo este critério obtivemos os seguintes tempos para posições de 2, 3 e 4 cm.

Tabela 1. Tempos de início e fim para o preenchimento de 2cm.

<b>2cm</b>	<b>t<sub>início</sub>(s)</b>	<b>t<sub>fim</sub>(s)</b>
<b>Medida</b>		
<b>1</b>	20	38
<b>Medida</b>		
<b>2</b>	18	45
<b>Medida</b>		
<b>3</b>	17	38

Tabela 2. Tempos de início e fim para o preenchimento de 3cm.

<b>3cm</b>	<b>t<sub>início</sub>(s)</b>	<b>t<sub>fim</sub>(s)</b>
<b>Medida</b>		
<b>1</b>	65	96
<b>Medida</b>		
<b>2</b>	43	84
<b>Medida</b>		
<b>3</b>	35	66

Tabela 3. Tempos de início e fim para o preenchimento de 4cm.

<b>4cm</b>	<b>t<sub>início</sub>(s)</b>	<b>t<sub>fim</sub>(s)</b>
<b>Medida</b>		
<b>1</b>	63	141

Em comparação com os tempos obtidos por inspeção visual dos padrões de interferência, mostrados no capítulo anterior, nota-se em especial que, em geral, o processamento de imagem permite identificar o início do preenchimento em um estágio mais preliminar. Este é mais um dos benefícios da técnica desenvolvida.

#### 4.2. RESULTADO DAS ANÁLISES E DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO DOS BURACOS DA PCF

Conforme demonstrado, o método de análise descrito na seção anterior permite a determinação de critérios objetivos para avaliar o preenchimento da PCF. É importante, agora, confrontar os dados experimentais com os resultados obtidos a partir do modelo proposto por Nielsen et al. [19], apresentado do capítulo anterior.

A partir da análise da seção 4.1, nota-se que o período durante o qual o preenchimento ocorre estende-se por dezenas de segundos. Conforme mencionado no capítulo anterior, pode-se intuir que este período de transição corresponde a alguns buracos já preenchidos e outros não, devido à variação de raio e forma dos buracos.

Desprezando-se o efeito da variação de forma sobre os tempos de preenchimento e assumindo buracos cilíndricos, é possível se inferir o raio do menor e do maior buraco da PCF a partir dos tempos de preenchimento e do uso do modelo teórico de Nielsen et al. [19]. Estes raios podem ser confrontados com os tamanhos obtidos por inspeção direta da seção reta da fibra, apresentados no capítulo anterior. Conforme mencionado, a análise estatística do histograma determinou o raio médio dos buracos e o desvio padrão destes:

Raio Médio ( $\langle r \rangle$ ): 2,20  $\mu\text{m}$

Desvio Padrão (s): 0,24  $\mu\text{m}$

Em uma distribuição estatística Gaussiana, uma largura de  $4s$  (quarto vezes o desvio padrão), de  $\langle r \rangle - 2s$  a  $\langle r \rangle + 2s$ , compreende 95,4% dos eventos analisados (no caso, o raio dos buracos). A Figura 34 mostra curvas teóricas de comprimento preenchido em função do tempo,  $L(t)$ , traçadas com estes dois raios, considerados limites da distribuição estatística, assim como com o raio médio ( $\langle r \rangle$ ).

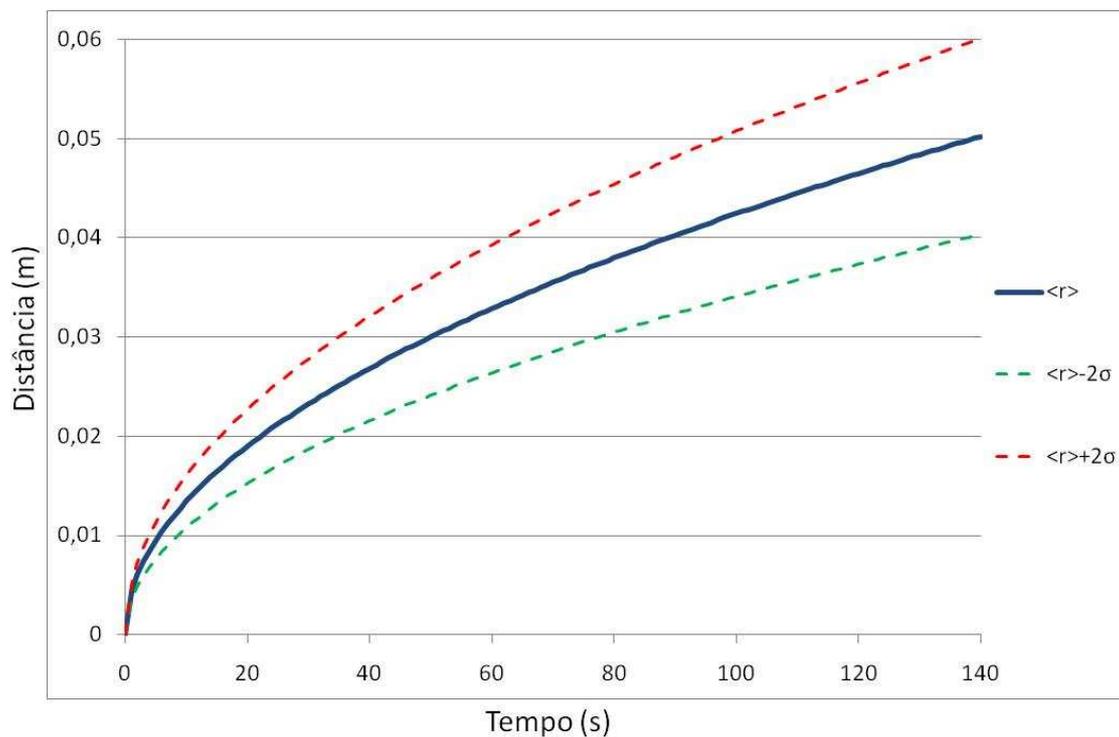


Fig. 34. Curvas teóricas de preenchimento assumindo-se, para os raios dos buracos da PCF, os valores  $\langle r \rangle - 2s$ ,  $\langle r \rangle$ , e  $\langle r \rangle + 2s$ .

Por estes valores, espera-se que o preenchimento das várias posições investigadas experimentalmente ocorra dentro dos seguintes intervalos:

2cm

Início: 16 segundos

Fim: 35 segundos

3cm

Início: 35 segundos

Fim: 78 segundos

4cm

Início: 63 segundos

Fim: 138 segundos

As Figuras 35, 36 e 37 mostram os tempos experimentalmente determinados para preenchimento da PCF aos 2, 3 e 4 cm conforme indicados nas Tabelas 1, 2 e 3. sobre as curvas teóricas.

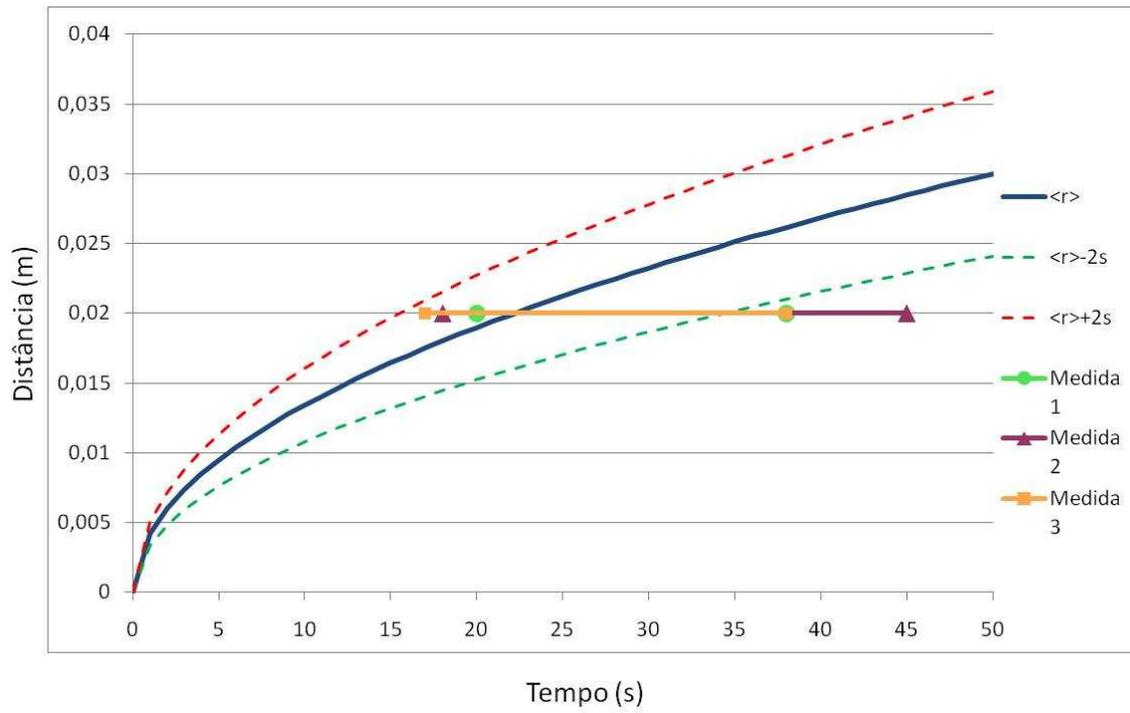


Fig. 35. Curvas teóricas de preenchimento em função do tempo e os tempos obtidos nas 3 medidas para preenchimento em 2 cm.

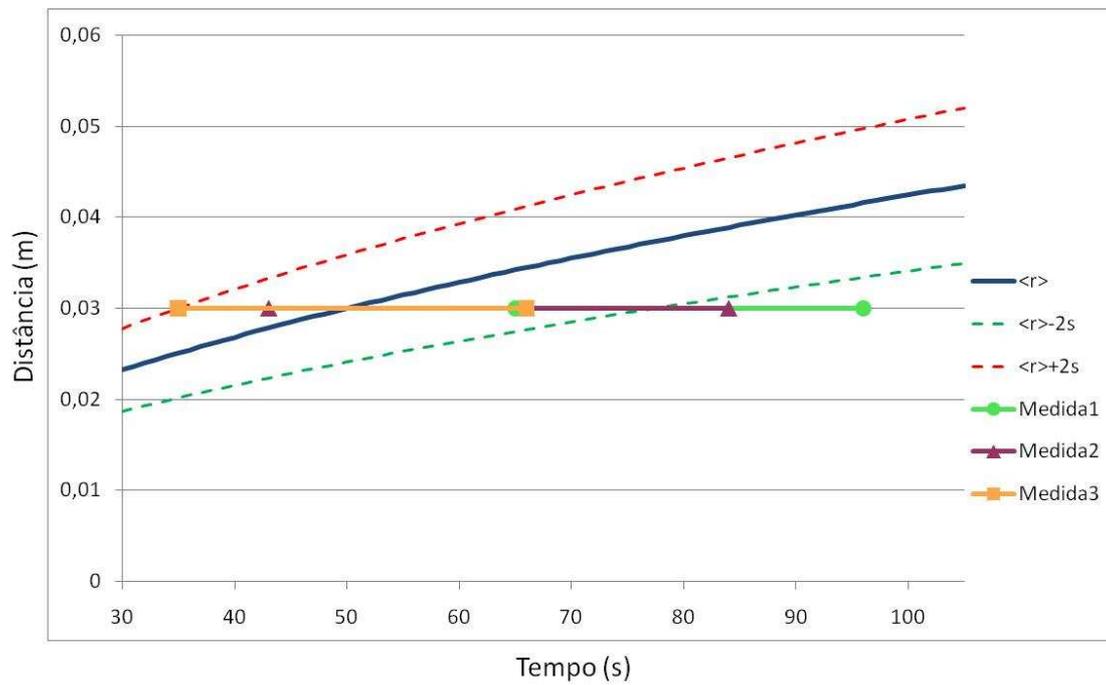


Fig. 36. Curvas teóricas de preenchimento em função do tempo e os tempos obtidos nas 3 medidas para preenchimento em 3 cm.

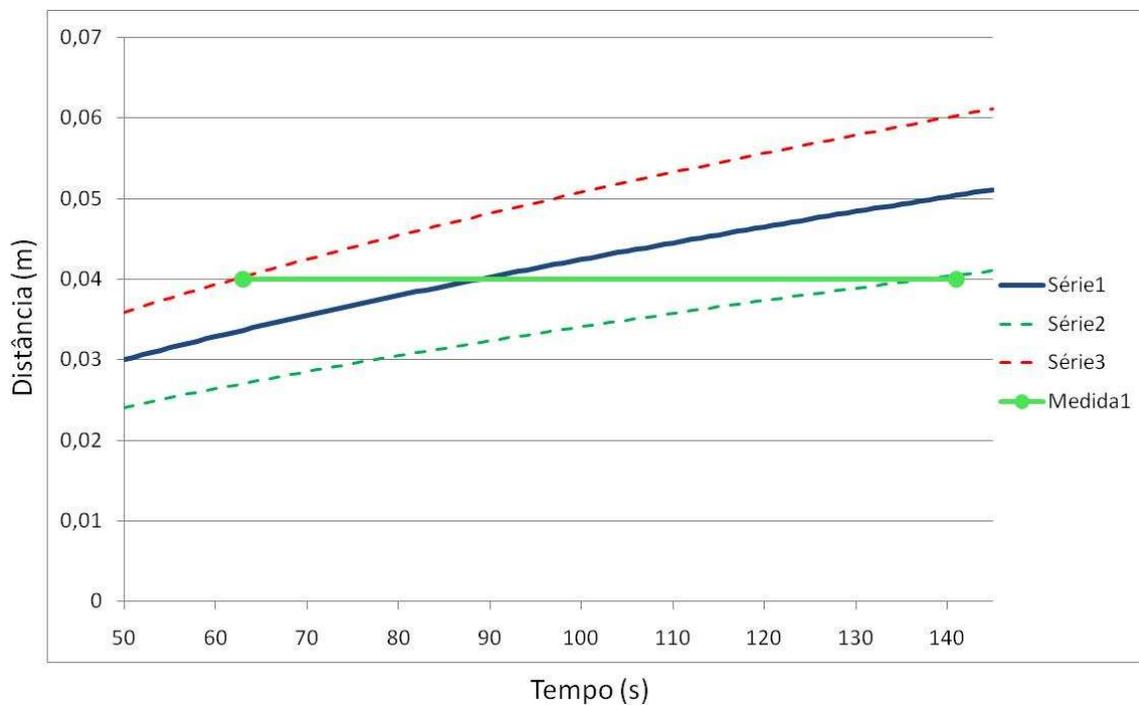


Fig. 37. Curvas teóricas de preenchimento em função do tempo e os tempos obtidos na medida para preenchimento em 4 cm.

Exceto para a Medida 1 do preenchimento de 3 cm, os demais resultados experimentais se mostraram satisfatórios em comparação com o intervalo determinado pela análise estatística.

A comparação inversa também pode ser realizada, determinando-se o raio dos buracos utilizando os tempos obtidos experimentalmente e a equação de Nielsen para os 2, 3 e 4cm, e podemos compará-lo ao tamanho do menor e do maior buraco observado por microscopia como mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Raio dos buracos obtidos a partir dos tempos de preenchimento da PCF. “Erro” refere-se à diferença relativa entre a média dos raios aqui obtidos e os raios obtidos por microscopia.

“2cm	tinício(s)	>buraco( $\mu\text{m}$ )	tfim(s)	<buraco( $\mu\text{m}$ )
<b>Medida 1</b>	20	2,35	38	1,64
<b>Medida 2</b>	18	2,5	45	1,5
<b>Medida 3</b>	17	2,55	38	1,64
<b>Média</b>		2,47		1,59
<b>Erro</b>		8,64%		7,36%

3cm	tinício(s)	>buraco( $\mu\text{m}$ )	tfim(s)	<buraco( $\mu\text{m}$ )
<b>Medida 2</b>	43	2,4	84	1,65
<b>Medida 3</b>	35	2,7	66	1,89
<b>Média</b>		2,55		1,77
<b>Erro</b>		5,56%		-2,91%

4cm	tinício(s)	>buraco( $\mu\text{m}$ )	tfim(s)	<buraco( $\mu\text{m}$ )
<b>Medida 1</b>	63	2,66	141	1,7
<b>Erro</b>		1,48%		1,16%

Observa-se que o erro obtido pela técnica decresce com o aumento da distância entre o ponto inspecionado e a entrada da fibra. Isto possivelmente ocorre porque erros na marcação dos tempos de início da aplicação da pressão tornam-se menos relevantes à medida que os tempos de preenchimento crescem. Além disso, para comprimentos maiores a inclinação da curva “distância x tempo” (Figura 34) diminui, fazendo com que os tempos de preenchimento tornem-se menos sensíveis à posição exata inspecionada. Ressalta-se, também, que o aumento do ruído observado para comprimentos maiores (Figura 33) não tem um impacto significativo nas medidas da Tabela 4.

Com resultados da Tabela 4 temos, na média, buracos mínimos de  $1,67 \mu\text{m}$  de raio e buracos máximos de  $2,53 \mu\text{m}$  de raio. Se considerarmos os valores medidos apresentados no Capítulo 3, temos um erro de 2,91% e 6,30% respectivamente na determinação destas dimensões a partir da inspeção do padrão de difração acompanhada do processamento de imagens.

Como se pode observar, é possível verificar que o experimento não invasivo proposto, baseado em montagem relativamente simples, aliado à análise computacional desenvolvida e utilizada são eficientes para se caracterizar o preenchimento dos buracos de uma PCF, podendo, ainda, ser utilizados para determinar os tamanhos máximo e mínimo dos buracos de uma PCF, assim como para se estimar a distribuição estatística dos mesmos.

## 5. CONCLUSÃO E PRÓXIMOS PASSOS

### 5.1 CONCLUSÃO

Os experimentos realizados demonstram que é possível determinar o preenchimento da fibra pela observação da alteração do padrão de difração gerado pela incidência de um feixe laser a  $90^\circ$  da PCF e apresentam vantagens sobre experimentos já propostos, como os apresentados por Nielsen et al. [19], pois sua montagem é menos complexa, a abordagem é não invasiva e não destrutiva e os resultados se mostraram muito satisfatórios.

Para determinar o quantitativamente o momento em que a fibra está completamente preenchida, um programa computacional foi proposto e mostrou-se eficiente, na identificação dos tempos de início e fim do preenchimento da PCF. Portanto, esta técnica de determinação do preenchimento da PCF foi aplicada nos experimentos e os tempos de início e fim foram determinados, de forma clara e eficiente.

A partir das equações de Nielsen et al. [19] foi possível determinar, através dos tempos de início e fim obtidos, o tamanho dos maiores e menores buracos da PCF. Esses resultados foram próximos ao resultado medido por microscopia, mostrando que a técnica apresentada é eficiente para determinação do tamanho dos buracos através da determinação dos tempos de preenchimento da PCF, que por sua vez eram obtidos pela observação da alteração do padrão difrativo. Está é uma abordagem inédita para estimar os tamanhos máximos e mínimos dos buracos de uma PCF, se considerarmos estes como cilíndricos.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Os experimentos realizados não estavam isolados de influências externas. Por exemplo, quanto mais longa a PCF, mais esta estava sujeita a vibrar devido a correntes de ar presentes no laboratório. Esta vibração alterava sutilmente o padrão difrativo, porém na análise dos resultados do processamento de imagem é possível observar ruídos gerados devido a esta vibração. O experimento repetido em um ambiente isolado deve gerar melhores resultados e proporcionar análises mais precisas.

O filtro de média sete utilizado foi satisfatório para determinação dos instantes de início e fim de preenchimento, porém podem existir outros filtros que gerem resultados melhores que estes, que, portanto, deveriam ser testados.

O experimento deveria ser refeito com uma lente que gerasse um *spot size* com tamanho mais próximo ao da microestrutura; com isso seria garantido que todos os buracos estavam sendo observados, desta forma é esperando um resultado ainda mais confiável.

A observação a  $90^\circ$  da PCF e do feixe laser, como mostrado na Figura 26, deve ser testada como uma alternativa melhor para determinação do preenchimento da fibra. Porém, neste caso o que deveria ser observado era a diminuição da intensidade do espalhamento gerado pela PCF e não a diminuição da frequência espacial observada no anteparo.

Estas análises possibilitariam verificar otimizar ainda mais o método para determinação do instante exato do início e fim do preenchimento da PCF e desta forma determinar com exatidão os tamanhos do maior e menor raios dos buracos da PCF.



## REFERENCIAS

[1] Hecht E., “Óptica”, Fundação Calouste Gulbenkian, 2ª Edição, pp. 496-496, Abril de 2002.

[2] disponível em

<http://www.lems.brown.edu/~leymarie/WaveRender/NotesDec98.html> acesso em 05/02/2009.

[3] Braun L.M.B., Braun T., “A Montagem de Young no estudo da interferência, difração e coerência de fontes luminosas”, Cad.Cat.Ens.Fis., v.11, nº3, pp.184-195, Dezembro 1994

[4] disponível em

<http://www.physics.uq.edu.au/people/mcintyre/applets/grating/grating.html> acesso em 05/02/2009.

[5] Domachuk P., Nguyen H. C., Eggleton B. J., Straub M. and Gu M., “Microfluidic tunable photonic band-gap device”, Applied Physics Letters v.84, nº 11, pp.1838-1840 March 2004

[6] Siegman A. E., “Lasers”, University Science Books, 1986.

[7] Knight J. C., “Photonic crystal fibres”, Nature, vol. 424, pp.847-850, August 2003.

[8] Bock W. J., Chen J., Eftimov T., and Urbanczyk W., “A Photonic Crystal Fiber Sensor for Pressure Measurements”, IEEE Transactions on Instrumentations and Measurement, vol. 55, n° 4, pp.1119-1123 August 2006

[9] Rindorf L., Jensen J. B., Dufva M., Pedersen L. H., Højby P. E., O. Bang “Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing”, Optics Express , vol. 14, n° 18, pp. 8224-8231 4 September 2006.

[10] Bozolan A., de Matos C. J. S., Cordeiro C. M. B., dos Santos E. M. and Travers J., “Supercontinuum generation in a water-core photonic crystal fiber”, Optics Express, vol. 16, n°13 9671-9676 (2008).

[11] Grattan K.T.V. and Sun T., “Optical-Fiber Sensors: Temperature and Pressure Sensors,” MRS Bulletin, May 2002, pp. 389–395.

[12] Poli F., Cucinotta A., Selleri S. “Photonic Crystal Fibers – Properties and Applications”, Springer.

[13] disponível em <http://www.crystal-fibre.com> acesso em 01/06/2007, 17/11/2008 e 28/02/2010.

[14] P. Russell, "Photonic Crystal Fibers" *Science*, vol. 299, pp.358-362, January 2003.

[15] Zolla F., Renversez G., Nicolet A., Kuhlmeij B., Guenneau S., Felbacq D. "Foundations of Photonic Crystal Fibers", Imperial College Press, 2005.

[16] Cregan R. F., Mangan B. J., Knight J. C., Birks T. A., Russell P. St. J., Roberts P. J., Allan D. C., "Single-Mode Photonic Band Gap Guidance of Light in Air", *Science* vol. 285, n° 3, pp. 1537-1539, September 1999.

[17] Knight J., Birks T., Mangan B., Russel P.St.J. "Photonic Crystal Fibers – New Solutions in Fiber Optics", *Optics & Photonics News*, pp. 26-30, March 2002.

[18] Meneghini C., Caron S., Poulin A.C.J., Proulx A., Émond F., Paradis P., Paré C., Fougères A. "Determination of Ethanol Concentration by Raman Spectroscopy in Liquid-Core Microstructured Optical Fiber" *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, n° 7, PP. 1250 1255, July 2008.

[19] Nielsen K., Noordegraaf D., Sørensen T., Bjarklev A., Hansen T. P., "Selective filling of photonic crystal fibres", *Journal of Optics a Pure and Applied Optics* Vol. 7, pp. L13–L20, 2005.

[20] Tabeling P., *Introduction to Microfluidics*, Oxford University Press, Oxford, 2005

[21] Ong J.S.K. “Análise de Perda e Fluorescência em Fibras de Cristal Fotônico com Líquidos e Polímeros” Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2007.

[22] Domachuk P., Nguyen H. C., Eggleton B. J., Straub M., Gu M., “Microfluidic tunable photonic band-gap device”, Applied Physics Letters, Vol. 84, pp. 1838-1840, March 2004

[23] Domachuk P., Chapman A., Mägi E., Steel M. J., Nguyen H. C., Eggleton B. J., “Transverse characterization of high air-fill fraction tapered photonic crystal fiber”, Applied Optics, Vol. 44, n° 19 pp. 3885-3892, July 2005.

[24] Knight J. C., Birks T. A., Russell P St. J., Rarity J. G., “Bragg scattering from an obliquely illuminated photonic crystal fiber”, Applied Optics, Vol. 37, n° 3, January 1998.

[25] El-Kashef H., “The necessary requirements imposed on polar dielectric laser dye solvents” Physica B: Condensed Matter, vol. 279, n°4, pp. 295-301, 2000.

[26] disponível em

[http://www.physics.uc.edu/~johnson/Boone/oil\\_page/refraction/refraction.html](http://www.physics.uc.edu/~johnson/Boone/oil_page/refraction/refraction.html)  
acesso em 11/10/2008.

[27] disponível em <http://www.surface-tension.de/> acesso em 05/09/2009.

[28] disponível em [http://www.ethyleneamines.com/NR/rdonlyres/C3E3C863-7629-4B05-83A8-D64FA562119B/0/MEG\\_PIS\\_2009\\_04.pdf](http://www.ethyleneamines.com/NR/rdonlyres/C3E3C863-7629-4B05-83A8-D64FA562119B/0/MEG_PIS_2009_04.pdf) acesso em 05/09/2009.

[29] disponível em <http://physics.info/viscosity/> acesso em 05/09/2009.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)