

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

Jackson Sen Kiat Ong

**Análise de Perda e Fluorescência em Fibras de
Cristal Fotônico com Líquidos e Polímeros**

São Paulo

2007

Jackson Sen Kiat Ong

**Análise de Perda e Fluorescência em Fibras de Cristal Fotônico com
Líquidos e Polímeros**

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

Orientador: Prof. Dr. Christiano José Santiago de Matos

São Paulo

2007

À minha família pelo apoio e incentivo que contribuíram para esta conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me auxiliar nos momentos mais difíceis destes anos de vida acadêmica.

Especialmente ao meu orientador Prof. Christiano J. S. de Matos por me dar a oportunidade de trabalhar na área de Fotônica; pela força, dedicação, aprendizagem e orientação que permitiram concluir este trabalho.

Aos Profs. Eunézio A. de Souza (Thoróh) e Sérgio Szpigel, pela dedicação e incentivo aos futuros pesquisadores brasileiros.

Ao Prof. Cristiano M. de B. Cordeiro da Unicamp, por colaborar inúmeras vezes disponibilizando o laboratório de Fenômenos Ultra-rápidos para realizar experimentos com fibras ópticas microestruturadas, e fornecendo a fibra capilar de 3 μm , materiais ópticos, o gráfico da transmissão do polímero NOA73 (volumétrico) e outras informações imprescindíveis para este trabalho.

Ao Prof. Niklaus U. Wetter do IPEN, pela colaboração em fornecer equipamentos (laser de 679 nm, fibra óptica e outros) para realizar medidas de fluorescência em pontos quânticos.

Ao Prof. Anderson S. L. Gomes, Prof. Leonardo Menezes e ao amigo Bernardo de B. C. Kyotoku da UFPE, pelo acolhimento em Recife e colaboração em disponibilizar o laboratório de Fotônica para realizar medidas de evaporação em tomografia por coerência óptica.

Ao colega inseparável, Alexandre B. dos Santos, pelos constantes momentos de amizade, bom humor, explicações e muito *STRESS*.

As “meninas”, Lúcia A. M. Saito, Camila C. Dias e Suzanne B. Susskind pela ajuda imprescindível na aprendizagem; pela amizade, alegria e motivação que permitiram a união do grupo do laboratório de Comunicações Ópticas e Fotônica.

Ao “computólogo” e amigo Joaquim P. Filho, pela força, estudos, conhecimentos inigualáveis e bom humor.

Aos colegas do curso Emerson, Alfredo, Erik, Felipe, Maurício... pela agradável convivência e companheirismo.

Aos meus pais Ong Kok Hin e Ong Rin Shioh Chuen, pela paciência, sinceridade, honestidade, incentivo e extremo apoio a minha formação.

Aos meus irmãos Ong Giok Wei e Eddyson Sen Yun Ong, pela SUPER amizade e conhecimento espiritual que permitiram compreender e valorizar a minha existência.

Às agências FINEP, MACKPESQUISA, CAPES e FAPESP pelo suporte financeiro.

A todos que contribuíram diretamente e indiretamente para a concretização deste trabalho.

RESUMO

Fibras de cristal fotônico (PCFs) têm levado a uma atenção renovada ao campo das fibras ópticas devido às diversas propriedades exclusivas resultantes do seu perfil microestruturado. Em particular, este perfil permite a introdução de líquidos e polímeros na fibra de modo que estes interajam eficientemente com a luz, levando a aplicações em sensoriamento químico e biológico, óptica não-linear, e o desenvolvimento de dispositivos fotônicos ativos. Diversas aplicações requerem a inserção seletiva da amostra no núcleo de uma PCF de núcleo oco, deixando buracos da casca sem preenchimento. Esta dissertação apresenta duas contribuições para o desenvolvimento de PCFs de núcleo preenchido. Os mecanismos de perda em PCFs de núcleo líquido são estudados e a fluorescência de uma PCF de núcleo polimérico dopado com pontos quânticos é demonstrada.

Os estudos da perda foram motivados pela análise da transmissão da luz em 633 nm em amostras de 5-7 cm de PCF de núcleo de água cujas pontas eram clivadas e deixadas no ar. Geralmente a transmissão encontrada era menor do que 5%, enquanto que a atenuação da água poderia levar a ~98% de transmissão. Verificou-se que a evaporação do líquido era um mecanismo de perda importante e sua taxa foi determinada através de microscopia e de tomografia por coerência óptica (OCT) em fibras capilares e PCFs preenchidas com água deionizada, etanol e o tolueno. Embora a taxa da evaporação no etanol seja maior, para todas as amostras algumas centenas de micrômetros nas pontas da fibra são esvaziadas em minutos. Um método para impedir a evaporação que consiste em selar as pontas da fibra com um polímero curável por UV (NOA 73) foi testado com sucesso.

O preenchimento de uma PCF com elementos ativos pode conduzir a amplificação óptica e ação laser. Pesquisadores da NTT observaram recentemente fluorescência em 609 nm em pontos quânticos de CdSe no núcleo de uma PCF de 1 m de comprimento. Nesta dissertação, a emissão de fluorescência é observada com pontos quânticos de PbS de ~2,2 nm

e pico de emissão nominal em 890 nm. Os pontos quânticos foram suspensos em NOA73 e introduzidos no núcleo de PCFs de 7-9 cm de comprimento e núcleo oco de 10,9 μm de diâmetro. A fibra foi bombeada por um laser de He-Ne de 2,5 mW ou um laser de diodo de 679 nm e 390 mW e sua emissão foi caracterizada. Uma fluorescência com potência máxima de 2,2 μW e eficiência máxima de 0,03% foi obtida. Variando a concentração de pontos quânticos observou-se que baixas concentrações levam a eficiências mais elevadas.

Palavras-chave: Fibras de Cristal Fotônico, Pontos Quânticos, Sulfeto de Chumbo, Fluorescência, Sensoriamento Químico.

ABSTRACT

Photonic Crystal Fibers (PCFs) have led to renewed attention to the fiber optics field due to the several unique properties resulting from their microstructured profile. In particular, this profile enables one to insert liquids and polymers into the fiber so that they efficiently interact with light, which can be used for chemical and biological sensing, nonlinear optics, and the development of active photonic devices. Several applications require selectively inserting the sample into the core of a hollow-core PCF, leaving cladding holes unfilled. This dissertation presents two contributions toward the development of core-filled PCFs. Loss mechanisms in liquid-core PCFs are studied and fluorescence from a quantum-dot-doped polymer-core PCF is demonstrated.

Loss studies were motivated by the evaluation of the transmission of light at 633 nm in 5-7 cm long water-core PCF samples the tips of which are cleaved at left in air. It was generally found that transmission was less than 5%, while water attenuation alone would lead to ~98% transmission. Liquid evaporation was found to be an important additional loss mechanism and its rate was determined both through microscopy and optical coherence tomography (OCT) in capillary fibers and PCFs filled with deionized water, ethanol and toluene. Although the evaporation rate in ethanol was found to be higher, for all samples a few hundreds of micrometers at the fiber tips are emptied over minutes. A method to prevent evaporation consisting of sealing the fiber tips with a clear UV curable polymer (NOA 73) was successfully tested.

Filling a PCF with active elements can lead to optical amplification and laser action. Researchers at NTT recently observed fluorescence at 609nm from CdSe quantum dots in the core of a 1m long PCF. In this dissertation, the fluorescence emission is described from ~2.2 nm PbS quantum dots was observed with a specified emission peak of 890 nm. The quantum dots were suspended in NOA73 and inserted in the core of 7-9 cm long PCFs of with a hollow

core diameter of 10.9 μm . The fiber was pumped by a 2.5 mW He-Ne laser or a 679 nm, 390 mW diode laser and its emission was characterized. A maximum fluorescence power of 2.2 μW and a maximum efficiency of 0.03% were achieved. Varying the quantum dot concentration revealed that lower concentrations lead to higher efficiencies.

Keywords: Photonic Crystal Fibers, Quantum Dots, Lead Sulfide, Fluorescence, Chemical Sensing.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	FIBRA ÓPTICA	16
2.1	REFLEXÃO INTERNA TOTAL.....	16
2.2	ABERTURA NUMÉRICA.....	18
2.3	MODOS DE PROPAGAÇÃO.....	19
2.4	TIPOS DE FIBRA ÓPTICA.....	20
3	FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO.....	22
3.1	ÍNDICE EFETIVO DE CASCA.....	23
3.2	PCFs DE NÚCLEO SÓLIDO.....	24
3.3	PCFs DE NÚCLEO OCO.....	25
3.4	INSERÇÃO DE LÍQUIDOS E POLÍMEROS EM PCFs	27
4	EVAPORAÇÃO DE LÍQUIDOS EM PCFs	31
4.1	MEDIDAS DE EVAPORAÇÃO COM UM MICROSCÓPICO	32
4.2	MEDIDAS DE EVAPORAÇÃO POR TOMOGRAFIA POR COERÊNCIA ÓPTICA.....	37
4.3	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS POR MICROSCOPIA E OCT	43
4.4	MÉTODO PARA EVITAR A EVAPORAÇÃO	45
5	PONTOS QUÂNTICOS COLOIDAIS.....	50
5.1	BANDAS DE ENERGIA EM SEMICONDUTORES VOLUMÉTRICOS E EM PONTOS QUÂNTICOS COLOIDAIS	51
5.2	TIPOS DE PONTOS QUÂNTICOS COLOIDAIS.....	55

5.3	PONTOS QUÂNTICOS EM PCFs	57
5.4	LASERS E AMPLIFICADORES BASEADOS EM PONTOS QUÂNTICOS COLOIDAIS	59
5.5	EXPERIMENTOS COM PCFs DE NÚCLEOS POLIMÉRICOS DOPADOS COM PONTOS QUÂNTICOS.....	60
5.5.1	PCFs COM NÚCLEOS POLIMÉRICOS.....	60
5.5.2	PCFs COM NÚCLEOS POLIMÉRICOS DOPADOS COM PONTOS QUÂNTICOS	65
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	77
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

ABREVIATURAS

ASE	Amplified Spontaneous Emission
FWHM	Full-Width at Half-Maximum
HC-PCF	Hollow Core Photonic Crystal Fiber
MOF	Microstructured Optical Fiber
mPCF	Microstructured Polymer Optical Fiber
OCT	Optical Coherence Tomography
PBG	Photonic Bandgap
PCF	Photonic Crystal Fiber
PMMA	Polimetilmetacrilato
QD	Quantum Dot
SC-PCF	Solid-Core Photonic Crystal Fiber

1 INTRODUÇÃO

As fibras de cristal fotônico (PCFs do inglês *Photonic Crystal Fibers*) [1] surgiram na década de 1990 na tentativa de viabilizar um mecanismo novo de guiamento em fibras ópticas, que até então só guiavam por reflexão interna total. Elas apresentam propriedades peculiares devido à estrutura periódica de buracos, que correm longitudinalmente ao longo de seu eixo (figura 1.1).

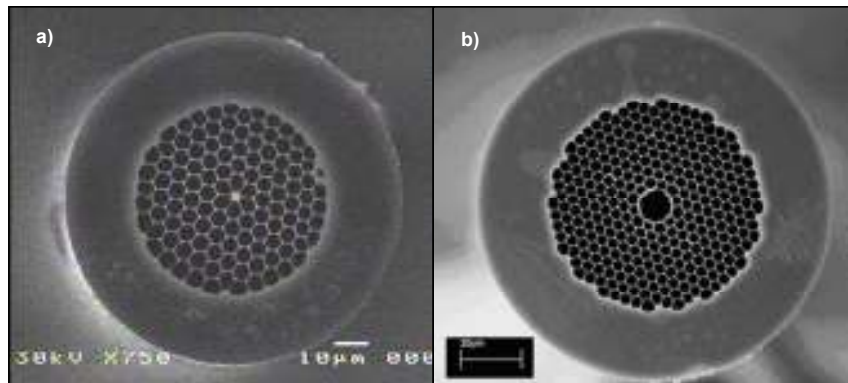


Figura 1.1 – Exemplos de PCFs: (a) núcleo sólido e (b) núcleo oco [2, 3].

A denominação fibra de cristal fotônico é devida à estrutura periódica semelhante à de cristais. Entretanto, estas fibras também são chamadas de fibras ópticas microestruturadas (MOFs do inglês *Microstructured Optical Fibers*) ou fibras esburacadas (*Holey Fibers*). Em artigo recente, Russell defende o uso do termo PCF, já que os termos MOF, e fibras esburacadas, se referem à existência de micro-buracos (ou micro-estruturas) na casca e não à periodicidade da matriz destes, que é essencial para a obtenção de diversas das propriedades [4]. Neste contexto, o termo MOF é mais geral do que PCF, pois se refere à existência de qualquer microestrutura, periódica ou não.

Na natureza, alguns seres vivos apresentam estruturas de cristais fotônicos que foram recentemente descobertos e são motivo de estudos pela intrigante beleza de nuances emitidas nos mais diversos comprimentos de onda e que servem para atrair suas presas ou proteger contra os predadores. O exemplo clássico são as cores refletidas na asa da borboleta através da difração da luz na microestrutura periódica, que seleciona o comprimento de onda em função do ângulo (figura 1.2a) [1, 12]. Ultimamente foram relatados estes efeitos também em rato marinho, afrodita (figura 1.2b) [5], e besouros.

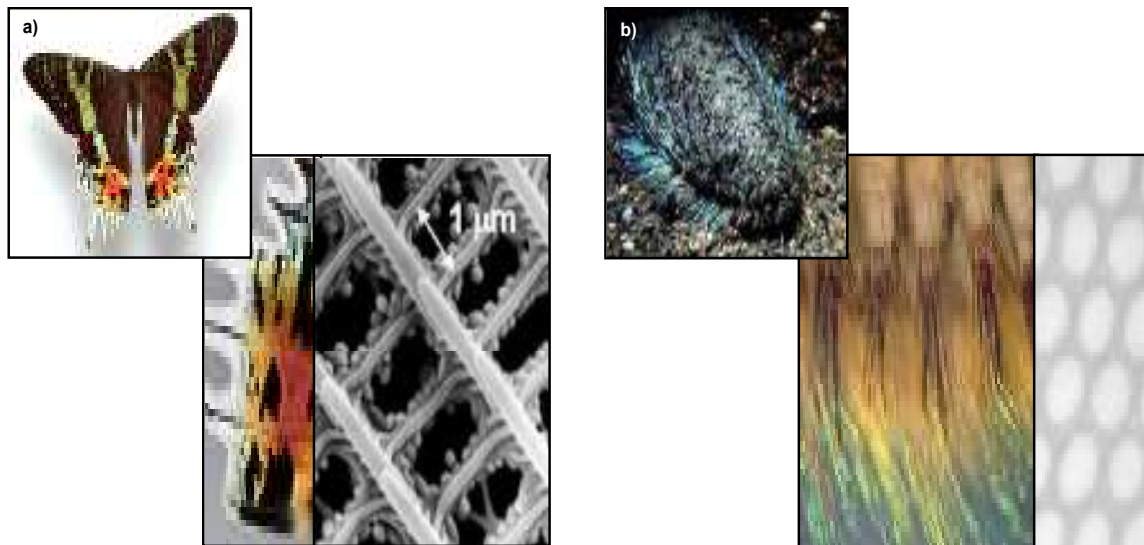


Figura 1.2 – Cristais fotônicos encontrados na natureza: (a) asa da borboleta e (b) espinhos do rato marinho (b) [3,5].

O contorno microestruturado das PCFs possibilita a inserção de líquidos dentro delas que eficientemente interagem com a luz, o que pode ser usado em sensoriamento biológico e químico [6], óptica não-linear [7] e no desenvolvimento de dispositivos fotônicos ativos [8]. Algumas das aplicações requerem a inserção seletiva da amostra no núcleo das PCFs de núcleo oco, deixando os buracos da casca vazios [9]. Amostras líquidas em micro-canais são susceptíveis a evaporação, o que leva a perdas ópticas no caso das PCFs com núcleo líquido. Neste contexto, esta dissertação apresenta estudos realizados desse mecanismo de perda, onde

a evaporação em micro-capilares foi acompanhada através de microscopia e tomografia por coerência óptica.

A fabricação de fibras de núcleo sólido a partir de pós-processamento de PCFs de núcleo oco também trás benefícios, pois permite a inserção de materiais não compatíveis com a fabricação de fibras de sílica, como nanopartículas opticamente ativas. Portanto, foram investigadas as propriedades ópticas de uma PCF com núcleo de polímero introduzido no estado líquido e posteriormente curado. Em seguida, PCFs com núcleo de polímero dopado com pontos quânticos coloidais [10], nanopartículas semicondutoras, foram estudadas visando ao desenvolvimento de dispositivos fotônicos. Estes pontos quânticos são mais versáteis e flexíveis do que os tradicionais semicondutores pelo fato de possibilitarem a sintonização do *bandgap* e, portanto, a manipulação do comprimento de onda de emissão, e por poderem ser inseridos em grande número de materiais sólidos e líquidos. Preencher uma PCF com elementos ativos pode resultar em um amplificador óptico ou laser. Aqui, a emissão de fluorescência de pontos quânticos suspensos em polímero e inseridos no núcleo de uma PCF é demonstrada.

A dissertação é organizada da seguinte forma. No capítulo 2 são expostos conceitos básicos sobre as fibras ópticas padrão tais como o guiamento da luz por reflexão interna total, a abertura numérica, os modos de propagação e os tipos de fibras ópticas. No capítulo 3 são abordados os tipos de PCF, suas características exclusivas e métodos de inserção seletiva de líquidos e polímeros em PCFs. No capítulo 4 são descritas medidas de evaporação de líquidos em fibras capilares e PCFs por microscopia e tomografia por coerência óptica assim como um método para evitar tal evaporação. No capítulo 5 os pontos quânticos coloidais são descritos e comparados com os semicondutores tradicionais no que diz respeito à banda de energia. Os tipos de pontos quânticos e trabalhos anteriores descrevendo a inserção destes em PCFs são revisados. Além disso, são descritos os experimentos envolvendo a fluorescência dos pontos

quânticos de PbS em PCFs e sua dependência com a potência de bombeamento, tempo, e concentração de pontos quânticos. O capítulo 6 finaliza a dissertação apresentando conclusões e perspectivas.

2 FIBRA ÓPTICA

2.1 REFLEXÃO INTERNA TOTAL

Fibras ópticas são guias de onda dielétricos formados por dois cilindros concêntricos de diferentes índices de refração. O cilindro mais interno é chamado de núcleo e possui índice de refração maior do que o cilindro mais externo (a casca). Em fibras convencionais a luz é confinada e guiada pelo núcleo através do fenômeno de reflexão interna total. Neste capítulo são revisados alguns dos conceitos importantes para o entendimento da propagação da luz em fibras.

O índice de refração (n), de um certo meio, é calculado pela razão entre a velocidade da luz (c) no espaço livre e a velocidade da luz no material analisado (v),

$$n = \frac{c}{v}. \quad (1)$$

Quanto maior o índice de refração (maior refringência) no meio, menor é a velocidade de propagação da luz nele e vice-versa. O índice de refração varia de acordo com o comprimento de onda λ (ou com a frequência), dando origem ao efeito de dispersão cromática.

Como mencionado, na fibra óptica, o núcleo e a casca são dois meios de índice de refração diferente. A luz que propaga na fibra irá incidir pelo meio 1 (núcleo). De um modo geral, ao atingir a interface núcleo-casca, parte deste raio é refletida e outra parte é refratada, atravessando para o meio 2 (casca) com mudança de direção (ver figura 2.1a)[11].

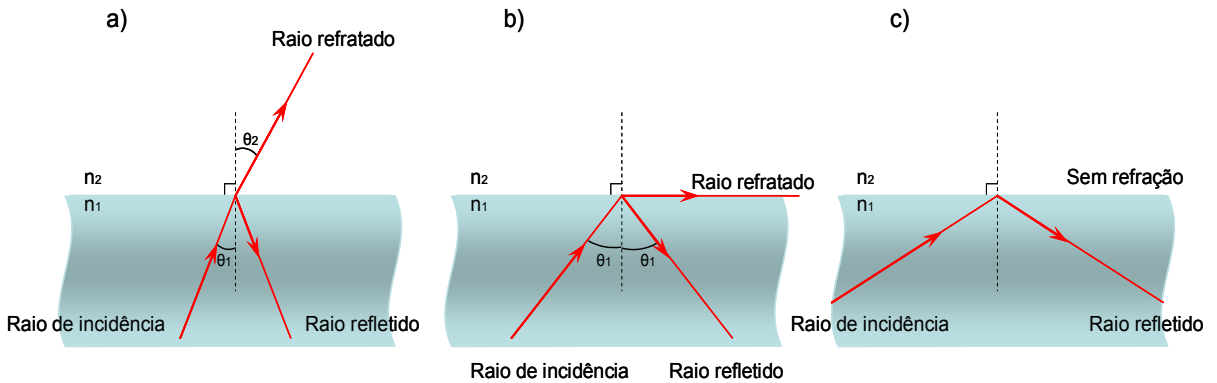


Figura 2.1 – Reflexão dos raios de luz em uma interface entre dois meios de índices de refração distintos, $n_1 > n_2$: a) refração; b) ângulo crítico; c) reflexão interna total. Adaptado de [11].

Este processo ocorre de acordo com a lei de Snell:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2}, \quad (2)$$

onde n_1 é o índice de refração do meio 1 e θ_1 é o ângulo do raio incidente com relação à normal, e n_2 é o índice de refração do meio 2 e θ_2 é o ângulo do raio refratado no meio 2.

Se a luz propaga de um meio de maior índice de refração para outro de menor índice de refração, o raio refratado tem um ângulo maior do que o raio incidente (ver figura 2.1a). O raio refratado pode então atingir um ângulo de 90° e propagar paralelamente entre os dois meios (ver figura 2.1b). Nestas condições θ_1 é chamado de ângulo crítico. Se o raio incidente propagar com um ângulo acima do ângulo crítico (ver figura 2.1c), não haverá raio refratado, obtendo-se, portanto, reflexão interna total (TIR do inglês *Total Internal Reflection*). A luz guiada em uma fibra óptica propaga-se nestas condições.

2.2 ABERTURA NUMÉRICA

Em uma fibra óptica, para que um raio externo à fibra se acople ao núcleo e sofra dentro deste o efeito da TIR, ele deve fazer com a normal da face de entrada um ângulo menor ou igual ao ângulo de aceitação θ (ver figura 2.2). É possível mostrar a partir da lei de Snell que θ será dado por:

$$\theta = \text{sen}^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (3)$$

É comum caracterizar tal ângulo através da abertura numérica (NA do inglês *Numerical Aperture*), definida como seno do ângulo de aceitação da fibra óptica ou a seguinte relação entre o índice do núcleo (n_1) e do índice da casca (n_2):

$$NA = \text{sen} \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (4)$$

Caso um raio incida na superfície de entrada da fibra com um ângulo (linha azul na figura 2.2) maior do que o ângulo do cone de aceitação, o raio será perdido para a casca. Por outro lado, se estiver dentro do cone de aceitação, o raio refletirá e transmitirá ao longo do núcleo (linha vermelha na figura 2.2).

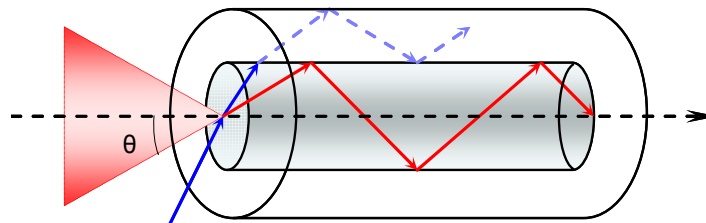


Figura 2.2 – Ângulo de aceitação (θ): raios com ângulos dentro (linha vermelha) e fora (linha azul) do cone de aceitação. Adaptado de [11].

Pode-se ver, portanto, que a abertura numérica mede a capacidade de captação e transmissão da luz na fibra óptica.

2.3 MODOS DE PROPAGAÇÃO

Seguindo-se uma análise de óptica de raios, em geral pode-se dizer que uma fibra possui diversos modos de propagação, cada um caracterizado pelo próprio ângulo de reflexão (θ_1) na interface núcleo-casca. O número de modos guiados é finito (já que não há modos guiados com $\theta_1 > \theta_{\text{crítico}}$) e discreto (pois além de satisfazer a TIR os modos devem ser ressonantes com a estrutura transversal da fibra).

Pode-se saber o número de modos propagados em uma fibra através da equação do parâmetro V , que se relaciona da seguinte forma com o raio (a) do núcleo da fibra, o comprimento de onda (λ) da luz propagada, e os índices de refração do núcleo (n_1) e da casca (n_2):

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} . \quad (5)$$

Se o parâmetro $V < 2,405$, então, a fibra apresenta um único modo (fibra monomodo). Se $V > 2,405$, a fibra será multimodo [11] com o número exato de modos estando relacionado com a magnitude de V . Para mais de um modo, é possível estimar o número de modos (N) através da fórmula:

$$N = \frac{V^2}{2} . \quad (6)$$

Esta equação é tanto mais exata quanto maior for o valor de N .

2.4 TIPOS DE FIBRA ÓPTICA

As fibras ópticas convencionais são classificadas de acordo com a capacidade de transmissão em um ou mais modos guiados. Os tipos de fibra mais utilizados no mercado são as fibras ópticas multimodo de índice degrau e as fibras monomodo [11].

A fibra óptica multimodo de índice degrau foi a primeira fibra a ser desenvolvida e, em geral, possui diferença de índice entre núcleo e casca de $\sim 1\%$, e diâmetro do núcleo entre 25 e 50 μm (ver figura 2.3). Este diâmetro facilita a emenda entre fibras iguais e o acoplamento da luz no núcleo, permitindo utilizar fontes de luz de baixa coerência (LEDs) e reduzindo o custo. Por outro lado, as diferenças de velocidade de propagação entre modos levam à dispersão modal. Esta fibra é usada em aplicações de curta distância como iluminação, instrumentação, transmissão de imagens, etc.

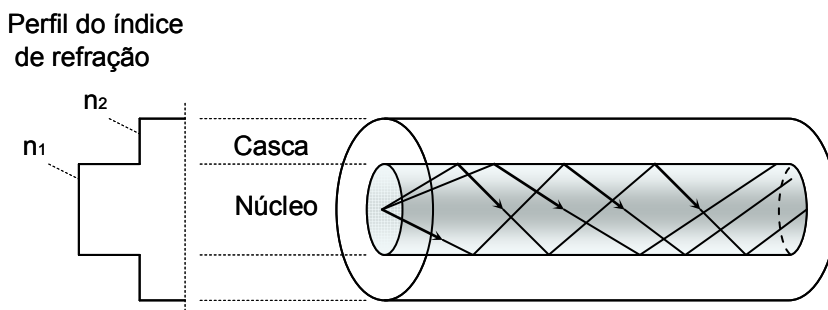


Fig. 2.3 – Fibra óptica multimodo de índice degrau. Adaptado de [11].

A diferença da fibra monomodo (ver figura 2.4) em relação às fibras multimodo é a capacidade de transmissão de luz em um único modo. Isto é obtido pela redução da diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca para $\sim 0,4\%$ e redução do diâmetro do núcleo para $\sim 10 \mu\text{m}$, o que reduz o valor de V . Fibras monomodo são amplamente utilizadas em enlaces ópticos de média e longa distância para telecomunicação por não apresentarem dispersão modal, e, portanto, causarem menor alargamento dos pulsos ópticos.

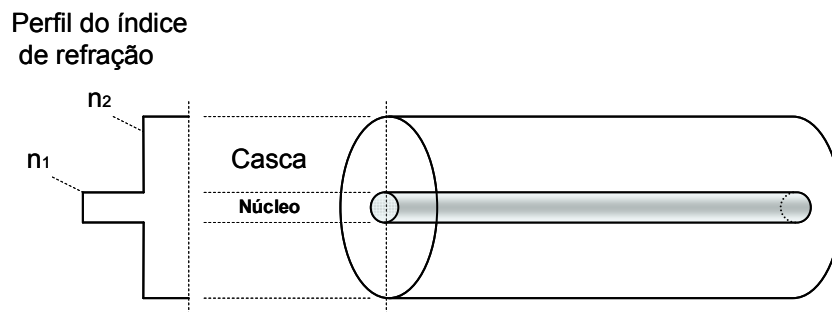


Figura 2.4 – Fibra óptica monomodo de índice degrau. Adaptado de [11].

3 FIBRAS DE CRISTAL FOTÔNICO

As PCFs diferem das fibras ópticas convencionais por possuírem na casca uma matriz microscópica de buracos que corre longitudinalmente pela fibra, proporcionando propriedades especiais. As PCFs são classificadas em fibras de núcleo sólido (SC-PCFs do inglês *Solid-Core Photonic Crystal Fibers*) e de núcleo oco (HC-PCFs do inglês *Hollow-core Photonic Crystal Fibres*) [3, 12], descritas nas seções seguintes. Em geral a microestrutura consiste numa matriz triangular de buracos de diâmetro (d) e periodicidade espacial dada pela distância entre o ponto central de dois buracos adjacentes (Λ).

A microestrutura presente na casca das PCFs faz com que suas propriedades apresentem forte dependência com o comprimento de onda e adiciona flexibilidade na fabricação. Isto possibilita a criação de fibras com propriedades distintas que podem incluir propagação monomodo independente do comprimento de onda, alta não-linearidade usada (por exemplo) para a geração de supercontínuo, e espectros de dispersão de velocidade de grupo significativamente diferentes dos obteníveis em fibras convencionais.

A alteração do núcleo das fibras, por exemplo, para diâmetros bem reduzidos pode confinar mais a luz enquanto que para diâmetros maiores pode gerar um único modo com área modal enorme. Além disso, pode-se fabricar PCFs com microestruturas de tamanhos diferentes, aumentando a complexidade do perfil de índice da fibra. Isto permite, por exemplo, o desenvolvimento de fibras de núcleos altamente assimétricos para a obtenção de alto nível de birrefringência.

3.1 ÍNDICE EFETIVO DE CASCA

Na casca microestruturada, o diâmetro do buraco (d) e a periodicidade (Λ) são relacionados à fração da área total ocupada por buracos (f , *air-filling fraction*). Em uma estrutura triangular periódica esta relação é dada por [1]:

$$f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \frac{d^2}{\Lambda^2}. \quad (6)$$

Em HC-PCFs pode-se encontrar $f > 90\%$ [12], como por exemplo na fibra HC-1550-02 da Crystal Fibre A/S (diâmetro do núcleo de 10,9 μm , espaçamento entre buracos de 3,8 μm [1, 14]) que foi utilizada nos experimentos.

A constituição da casca por dois materiais (vidro e ar) de índices diferentes aumenta a complexidade da análise da propagação guiada da luz. Uma simplificação para esta análise é apresentada aqui, e é válida para fibras apresentando guiamento por TIR. Como em geral Λ é da ordem do comprimento de onda da luz, esta não identifica individualmente os componentes da microestrutura e se propaga na casca como se esta fosse composta de um material uniforme apresentando um índice de refração efetivo. Este índice efetivo da casca (n_{ef}), em primeira aproximação pode ser tomado como a média dos índices de refração, ponderada pelas áreas:

$$n_{ef} = \frac{A_{vidro} n_{vidro} + A_{ar} n_{ar}}{A_{casca}}, \quad (7)$$

onde A_{vidro} é a área do vidro da casca, A_{ar} é a área dos buracos, A_{casca} é a área total da casca, n_{vidro} é o índice de refração do vidro e n_{ar} é o índice de refração do ar. Em uma análise mais

rigorosa a ponderação entre o índice do ar e do vidro deve ser dada pela distribuição do campo elétrico em cada material. Se o campo elétrico propaga-se mais no vidro, o vidro tem maior contribuição no resultado, o mesmo ocorrendo para o ar. Na prática, o índice efetivo é obtido por cálculos numéricos, por exemplo, no *software Lumerical Mode Solution* [13] que simula a distribuição dos campos da luz em qualquer estrutura. Para isso, simula-se uma microestrutura infinita com características idênticas às da casca e os modos de propagação nesta são determinados. Dentre os resultados pode-se encontrar o modo fundamental de propagação (modo de mais baixa ordem) que preenche o mais homoganeamente a casca inteira e que apresenta o maior índice de refração modal. Este índice é tomado como o índice efetivo da casca.

3.2 PCFs DE NÚCLEO SÓLIDO

As SC-PCFs, além da microestrutura de índice de refração efetivo baixo na casca, apresentam núcleo de índice de refração alto, podendo ou não ser do mesmo material (vidro ou plástico) da fibra (ver figura 3.1).

Similar às fibras ópticas padrão de índice degrau, SC-PCFs guiam a luz no núcleo sólido através da TIR por causa do índice efetivo baixo na microestrutura da casca. Entretanto, a microestrutura permite que índices efetivos de casca baixíssimos sejam obtidos (quando a fração de ar na casca é grande) possibilitando a fabricação de fibras com degrau de índice altíssimo (dezenas de %), que podem confinar a luz em núcleos de $\sim 1 \mu\text{m}$ de diâmetro. Este grande confinamento permite a obtenção de efeitos não lineares com alta eficiência. Além disso, como o índice efetivo apresenta alta dependência com comprimento de onda, obtém-se grande flexibilidade na manipulação da dispersão de SC-PCFs, que têm sido propostas como fibras para compensação de dispersão [15]. Como já mencionado, a combinação de alta eficiência de efeitos não lineares com alto controle de dispersão leva à