

**Universidade Estadual de Campinas  
Instituto de Física “Gleb Wataghin”**

**“Eficiência de Fibras Ópticas Fotônicas comparada  
com Fibras Ópticas Convencionais”**

**Relatório Final da Disciplina Instrumentação para o  
Ensino -F 809**

**Aluno:** Diogo Burigo Almeida RA: 015871  
**Orientador:** Prof. Dr. Luiz Carlos Barboza

## 1. Resumo

Neste trabalho estudamos como funcionam as fibras ópticas e fotônicas, desde a sua fabricação, até o seu modo de funcionamento, comparando a eficiência entre as duas, já que ambas podem ser usadas para transmissão de dados. Desta forma, pretendemos levar ao aluno um pouco mais de conhecimento sobre a física que esta por trás das comunicações ópticas, relacionando assim o cotidiano e a ciência.

## 2. Estudo do Funcionamento

### 2.1. Fibra óptica convencional

Fibra óptica é o termo escolhido para designar um certo tipo de guias de onda dielétricos. Trata-se de uma estrutura filamentar cilíndrica. São constituídas basicamente de um arranjo coaxial de dois vidros homogêneos, no qual a parte central (núcleo) possui um índice de refração ligeiramente maior que o da parte externa (casca). Essa diferença de índice normalmente é feita pela dopagem do vidro do núcleo com germânio ou fósforo.

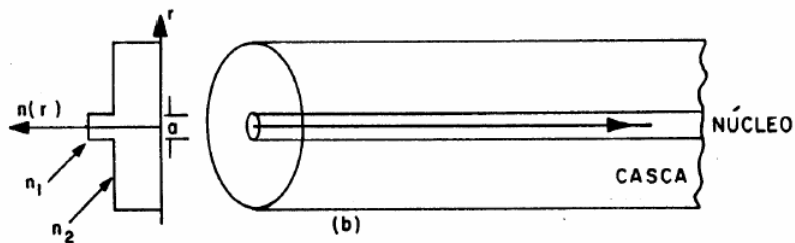
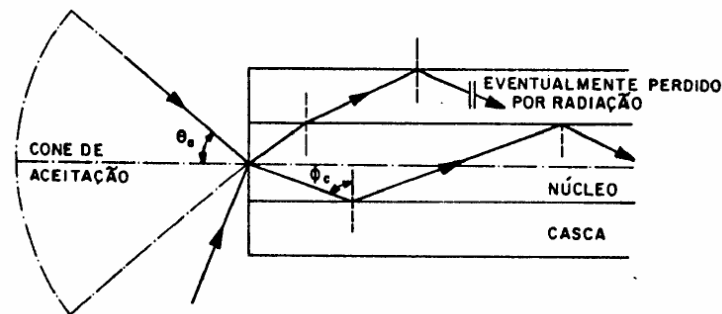


Ilustração 1: Esquema de uma fibra óptica com um perfil de índice de refração tipo degrau

O guiamento da luz na fibra ocorre sempre que a esta incidir na interface núcleo-casca com um ângulo maior que o ângulo crítico  $\phi_c$  definido por:

$$\text{sen} \phi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

onde  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração da casca do núcleo respectivamente. Assim sendo a será guiado quando incidir na interface fibra-ar com um ângulo menor do que o ângulo de aceitação,  $\theta_a$  como visto na figura 2.



**Ilustração 2: Ângulo de aceitação  $\theta_a$  de luz acoplada numa fibra óptica**

Este ângulo é normalmente expresso em termos da abertura numérica, NA, dada por:

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

### 2.1.1 Atenuação:

Ao percorrer a extensão da fibra, o pulso luminoso é atenuado de tal forma que a potencia transmitida da luz será dada por:

$$P_t = P_0 e^{-\alpha L} \quad (3)$$

onde  $\alpha$  é a constante de atenuação e  $L$  o comprimento da fibra e  $P_0$  é a potencia inicial do feixe luminoso. Normalmente a perda da fibra é expressa em unidades de dB/km, esta grandeza pode ser obtida desta forma:

$$\alpha_{\text{dB}} = -\frac{10}{L} \log \frac{P_t}{P_0} = 4.343\alpha \quad (4)$$

A atenuação da fibra ocorre devido a perdas do próprio material, impurezas e imperfeições. A contribuição deste últimos fatores pode ser minimizada no processo de fabricação da fibra, porém a primeira é uma característica intrínseca a esta. Com processos de produção cada vez mais eficientes, o limite de eficiência da transmissão da luz destas está se aproximando. E é aí que entram as fibras fotônicas.

## 2.2 Fibra óptica fotônica

A teoria sobre fibras fotônicas tem uma descrição matemática rebuscada, por isso optamos por apresentar seus conceitos o mais qualitativamente possível.

Na década de 1990 foi proposto que luz poderia se confinada num núcleo oco de fibra óptica pela criação de buracos microscópicos, da ordem dos comprimentos de onda, e periódicos no vidro da casca, um “cristal fotônico”.

Para entender como isso poderia funcionar, considere que todas as estruturas que tenham seu tamanho da ordem dos comprimentos de onda com as quais interagem, exibem ângulos e cores “*stop bands*” nas quais a luz incide e reflete fortemente, este princípio é regido pela lei de Bragg, a qual merece uma explicação mais detalhada.

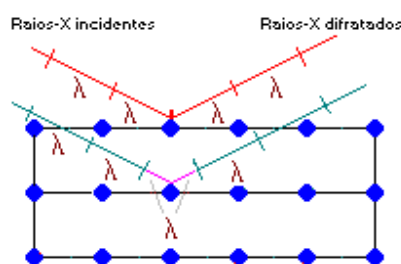
Em materiais com *band gap* fotônico, ou seja, região onde alguns níveis de energia são proibidos no nosso caso a região das comunicações ópticas (infravermelho) as *stop bands* bloqueiam a propagação da luz resultando na supressão de todas as vibrações ópticas na faixa de comprimentos de onda varridos por esse tipo de material. Sendo assim, cascas de cristal fotônico com “buracos” empregados apropriadamente em toda a extensão da fibra, podem prevenir que a luz escape do núcleo oco. O que faz com que a perda de luz devido ao meio que ela viaja seja muito menor do que comparado com a fibra óptica convencional, afinal estamos comparando vidro com o ar.

### 2.2.1 Lei de Bragg

Sempre que a diferença de fase entre duas ondas for zero, 1 comprimento de onda, 2 comprimentos de onda etc (números inteiros), as ondas interferem construtivamente e suas amplitudes se somam. Mas, se a diferença de fase for de meio comprimento de onda, três meios comprimentos de onda etc (números semi-inteiros), elas interferem destrutivamente e suas amplitudes se subtraem.

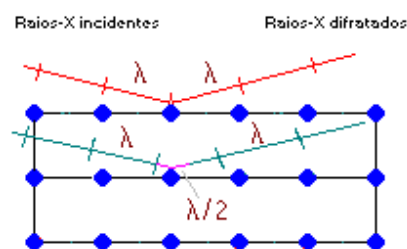
Imagine então que um feixe luminoso incida sobre um cristal.fotônico Como o espaçamento dos buracos criados neste cristal têm um valor comparável com o comprimento de onda do raio incidente o feixe se refletirá nos planos dos buracos como em um espelho. Veja o que se passa com dois raios que incidem em planos vizinhos. Os máximos ("altos") de cada onda são assinalados com uns tracinhos. Um dos raios, que

desenhamos em cor verde, incide no plano de baixo e percorre uma distância um pouco maior que o outro, pintado de vermelho. A diferença entre os dois caminhos é mostrada na trajetória do raio verde, com uma cor rosa. Nesse desenho, essa diferença é exatamente um comprimento de onda. Portanto, os raios refletidos (ou "difratados", no caso) saem em fase e terão interferência construtiva. É claro que isso só acontece para um ângulo de incidência bem determinado.



**Ilustração 3: Interferência construtiva regida pela lei de Bragg numa rede cristalina**

Veja agora um feixe incidindo em um ângulo mais rasante. Nesse caso, a diferença de caminhos é menor. Desenhamos o caso especial em que a diferença de caminho é exatamente meio comprimento de onda. Agora os raios difratados estão defasados um do outro: um alto de um corresponde a um baixo do outro. Haverá interferência destrutiva e os dois raios se anularão. Isto é, nessa direção não haverá luz refletida.



**Ilustração 4: Interferência destrutiva regida pela lei de Bragg numa rede cristalina**

Agora podemos escrever a chamada Lei de Bragg. Usando conceitos de trigonometria podemos ver, na ilustração 4, que a diferença de caminhos é  $2d \sin\theta$ , onde  $\theta$  é o ângulo entre a direção da luz e o plano de átomos do cristal. A interferência será construtiva e, portanto, haverá um feixe difratado, pois como vimos, a diferença de

caminhos é um número inteiro de comprimentos de onda da luz incidente. Portanto, se  $2d \sin\theta = n\lambda$  ( $n = \text{inteiro}$ ), haverá um feixe difratado. Essa é a Lei de Bragg.

### **3. Métodos de Fabricação das fibras**

#### **3.1. Fibra óptica convencional**

A maioria das fibras ópticas de baixa perda é feita de vidro, um sólido amorfo com porcentagens variáveis de óxidos de vidro (dióxido de silício, óxido de cálcio, óxido de sódio, etc). Estes compostos, sob condições específicas de preparação, formam um material sólido amorfo e não cristalino chamado pré-forma cuja quantidade de impurezas, na forma de íons metálicos, interfere na atenuação da fibra, ou seja, na capacidade de transmissão da fibra que a ser formada. Por isso a importância do estudos de dopagens de vidros nessa área;

De posse da pré-forma e com as características desejadas, dá-se início ao processo básico de fabricação da fibra, descrita abaixo:

- A pré-forma é abaixada até que atinja um forno toroidal de indução e onde é centralizada através de uma circunferência de grafite de diâmetro variável.
- O equipamento para controle da temperatura, fluxo de nitrogênio e água no forno é acionado e sua temperatura é elevada gradualmente;
- Como o vidro não tem uma transição abrupta de sólido para líquido, esta temperatura não é exatamente definida e deve-se observar, com um espelho direcionado para o centro do forno, se a parte inferior da pré-forma está se movimentando. Sinal de que o vidro atingiu a temperatura de amolecimento;
- Acompanhar a queda da parte inferior da pré-forma, o que provoca um alongamento do vidro amolecido e uma correspondente diminuição do diâmetro do cilindro do material amolecido, que é puxado. Enquanto desce, o cilindro fino esfria à temperatura ambiente até que atinge a temperatura de solidificação do material, definindo o diâmetro final da fibra produzida que pode ser medido por instrumentos.

No momento em que a extremidade da pré-forma liquefeita está prestes a cair, o cilindro líquido está sujeito a forças de tensão superficial, podendo ser rompido numa série de esferas,

como acontece em nossas torneiras de água. Entretanto, se o material da pré-forma tem uma fase líquida de alta viscosidade (vidro e plástico), o efeito das tensões não provoca rompimento do líquido e a fibra pode ser formada quando a temperatura de solidificação é atingida.

- Corta-se a parte disforme que caiu e puxa-se a fibra, fazendo-a passar pelo recipiente de depósito de acrilato, e das lâmpadas de ultravioleta;
- A fibra resultante é puxada e atada a um grande carretel que é colocado em rotação para coletar a fibra produzida. Imediatamente ajusta-se a velocidade de descida da pré-forma que atinge o ponto de amolecimento;
- Os parâmetros que definem o diâmetro da fibra: temperatura do forno (a viscosidade diminui uniformemente com a temperatura), velocidade de rotação do carretel, e taxa com que a pré-forma é abaixada ao forno; podem ser ajustados por retro-alimentação ao monitorar-se o diâmetro da fibra com um equipamento atravessado pela fibra na descida. Assim, o diâmetro desejado da fibra pode ser obtido;
- Uma vez obtido o diâmetro desejado, com os parâmetros todos estabilizados, coloca-se acrilato no depósito, a fim de produzir o revestimento da fibra (casca), conferindo-lhe flexibilidade e opacidade.

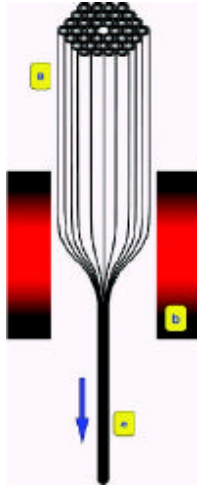


**Ilustração 5: Puaxador de fibras do Laboratrio do DEQ onde foram fabricadas as amostras**

### **3.2. Fibra óptica fotônica**

Fibras fotônicas são produzidas usando técnicas adaptadas de métodos conhecidos para puxar feixes de fibras ópticas utilizadas em aplicações de imagens e iluminação. Este processo é constituído por uma série de estágios: Primeiramente tubos de vidro são empilhados e fundidos juntos em um forno de alta temperatura (dependendo do tipo de vidro utilizado podem ser necessários 2000 °C) e puxados para formar um aglomerado de tubos. Posteriormente, este aglomerado é fundido novamente, reduzindo assim o diâmetro do mesmo e eliminando o espaço inicial entre os diversos tubos. Ao invés de tubos também é possível utilizar bastões maciços de vidro para produzir fibras fotônicas. O processo de puxamento pode reduzir o diâmetro inicial do arranjo em até 10000 vezes, deixando os buracos internos com diâmetros tão pequenos da ordem de nanômetros. Existem muitas variações destas fibras, mas dois tipos são mais utilizados, as de núcleo oco e as de núcleo sólido. Para obter um núcleo oco basta retirar do centro do arranjo inicial um ou alguns tubos.





**Ilustração 6: Puxamento de uma fibra óptica. Uma pilha de tubos de vidros é construída da maneira desejada (preforma). Então estes tubos são fundidos e puxados na forma de fibras. Para amolecer o vidro é utilizado um forno entre 1000 e 2000 °C.**

## **4. Medida de Transmissão:**

### **4.1. Montagem**

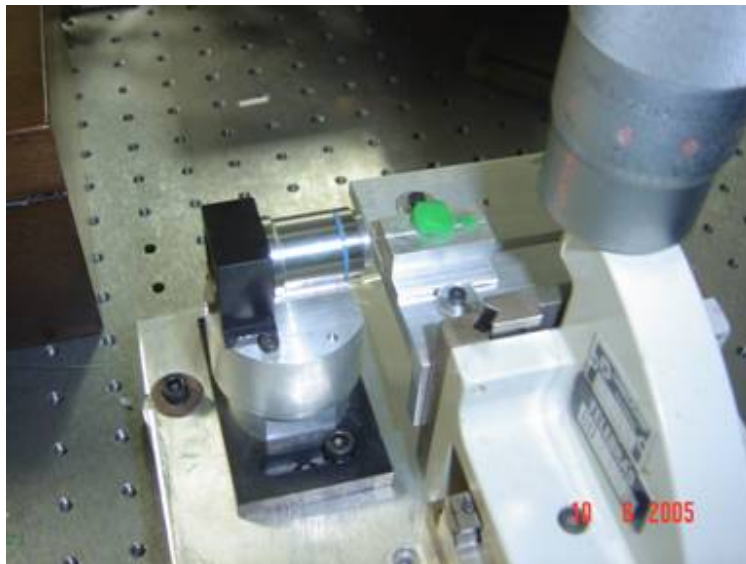
Uma fibra de comprimento conhecido é bombeada com uma fonte luminosa cuja potência é previamente medida. No lado oposto a fibra é acoplada a um detector OSA, cuja função é medir a potencia do feixe luminoso que incide no seu detector de acordo com o comprimento de onda.

Segue abaixo um esquema ilustrado da montagem usada para a medida.

No lado direito da ilustração pode ver-se o laser usado como fonte luminosa para passar pela fibra. Neste trabalho usamos um laser de Ti:Saphire cujo feixe é infravermelho (de 730 nm a 850 nm). A luz passa por alguns espelhos (centro da figura) e finalmente é focalizado na fibra como pode-se ver no lado direito da figura e que está melhor detalhado na ilustração 8.



**Ilustração 7: Esquema geral da montagem**



**Ilustração 8: aparato para a focalização do feixe na fibra**

O feixe passa por uma lente objetiva do microscópio (com ampliação de 20 vezes) a fim de concentrá-lo e focá-lo na extremidade da fibra. Esta é presa com massa adesiva (em verde na ilustração 8) num microposicionador XYZ que possui mecanismos de translação nos três eixos que permite o acoplamento do feixe do laser no núcleo da fibra óptica.



**Ilustração 9: espectrômetro OSA**

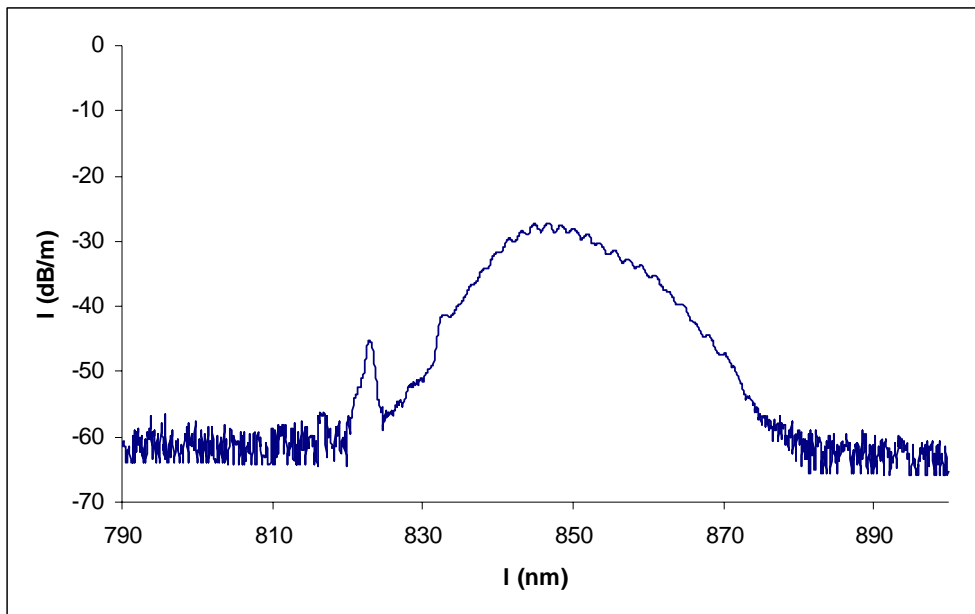
Após o alinhamento do feixe com a fibra, a outra extremidade é acoplada (parte em preto da Ilustração 9) ao analisador de espectro OSA, mostrado na figura acima e este nos dá o espectro de atenuação da fibra.

#### **4.2. Resultados**

Para saber a atenuação para um determinado comprimento de onda, medimos primeiramente o comprimento da fibra óptica. Logo após a acoplamos ao OSA, alinhamos a mesma com o feixe laser e tiramos a medida no analisador de espectro. Feito isso cortamos um comprimento conhecido da fibra e repetimos a operação e, com o auxílio da equação 3, montamos um sistema para dois valores de comprimento ( $L$ ) e achamos o parâmetro  $\alpha$  da fibra.

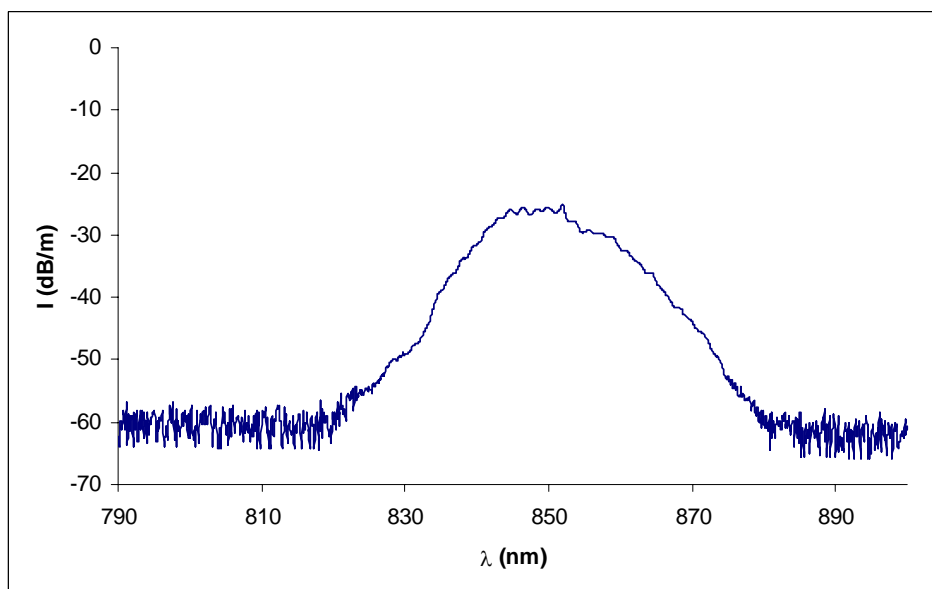
Fixamos o bombeio do laser de Ti:Sapphire em  $852 \pm 02$  nm e tiramos um espectro com o OSA com a mesma fibra porém a primeira vez com  $25,2 \pm 0,1$  m e logo após a reduzimos a um comprimento de  $8,6 \pm 0,1$  m e medimos novamente.

Seguem abaixo os espectros OSA tirados:



**Ilustração 10: Espectro de atenuação da fibra de 25,2m com comprimento de onda de 852nm**

O valor da intensidade encontrado no pico do gráfico (852,1 nm) foi de  $-27,890 \pm 0,005$  dB/m. Este erro foi baseado na ordem de grandeza das pequenas oscilações encontradas ao redor do pico. A potência do feixe antes de atingir a fibra era de  $119 \pm 1$  mW, erro de acordo com a precisão do aparelho de medida, um “*power meter*”.



**Ilustração 11: Espectro de atenuação da fibra de 8.0 m com comprimento de onda de 852nm**

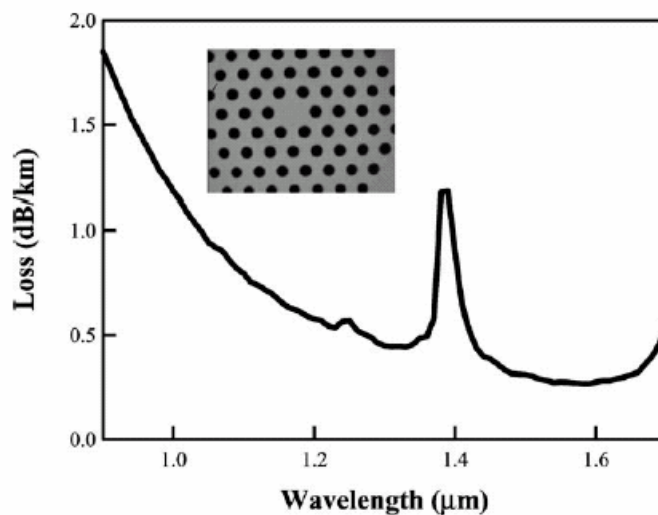
O valor da intensidade encontrado no pico do gráfico (852,0 nm) foi de  $-27,86 \pm 0,005$  dB/m, com a potencia incidente na fibra de  $120 \pm 1$  mW

A partir destes dados podemos, trabalhando as equações 3 e 4, obtemos a constante de atenuação ( $\alpha$ )

$$\alpha_{dB} = I_0 - I_1 / L_0 - L_1 \quad (6)$$

Logo obtemos que a atenuação da fibra é da ordem de  $2,3 \pm 0,3$  dB/Km, com o erro vindo da propagação. Observa-se um erro grande devido à inexperiência com o tipo de medida, pois o melhor seria se usássemos um diferença maior de comprimento de fibra.

A medida da transmissão da fibra fotônica segue o mesmo protocolo, porém ela necessita de um acoplamento especial no OSA, pois este só comporta fibras convencionais. Este tipo de acoplamento não disponível até o presente momento no grupo (necessita ser desenvolvido) , seria extremamente trabalhoso e como já executamos com sucesso o método, optamos por comparar os dados obtidos na fibra convencional com os de fibras fotônicas presentes na literatura, como segue um espectro abaixo.



**Ilustração12: Atenuação de uma fibra fotônica (material semelhante ao da fibra convencional)**

Comparando-se com a literatura, vê-se que para comprimento menores (por volta de 800 nm) essas fibras fotônicas possuem uma perda acima de 2 dB/km, mmaior que a da fibra medida, que apesar do erro pode nos dar uma comparação razoável.

Uma fibra óptica fotônica tem o potencial de atingir perdas menores do que fibras convencionais monomodo por que ela não sofre de perda por espalhamento devido à flutuações induzidas, em outras palavras, pelo fato de serem dopados, os vidros apresentam mínimas variações no seu índice de refração de uma região para outra, ocasionando perda

da potência do feixe que o atravessa. Desde as primeiras fibras fotônicas fabricadas, sua atenuação óptica tem sido reduzida rapidamente nos últimos anos. No entanto elas ainda não são de transmissão mais baixas do que as fibras convencionais. Mas este quadro tende a mudar rapidamente, já que estas podem ser adaptadas ao que queremos no decorrer das pesquisas.

## 5. Conclusões

Pelo fato das fibras fotonicas ainda terem uma perda maior do que as fibras opticas convencionais (exigem uma potência de entrada muito grande) estas ainda sao inviáveis para aplicaçs imediatas no mercado, carecendo ainda de mais desenvolvimento e caracterizacao, porem o ritmo com que se vem obtendo resultados promissores é possível afirmar que num futuro proximos esta nova geracao de fibras opticas substiuira com vantagens as atualmente empregadas.

## 6. Parecer do Orientador

O projeto foi realizado e executado a contendo, e o aluno realizou com desempenho os trabalhos a ele designado, sua nota é 10,0

## 7. Referências

- Telma Vinhas Cardoso, "*Lancamento de luz em fibras opticas multimodo e sua influência nas características de dispersão*", Tese de mestrado - Abril/84.
- Valeria Loureiro da Silva, "*Aplicações de fibras ópticas na geração de pulsos ultracurtos*", Tese de doutorado abril/90.
- P. J. Russel; Photonic Crystal Fibers; *Science* **299**, 358 (2003).
- Fibre Optics: Theory and Practice, 1973; W.B.Allan.

- Zhou, J; Tajima, K; Nakajima, K; Kurokawa, K; Fukai, C; Matsui, T; Sankawa, I; Progress in low loss photonic crystal fibers; *Optical Fiber Technology* **11**, 101 (2005)
- Photonic Crystal Fibers, 2003; Bjarklev, A.; Broeng, J.; Bjarklev, A. S.