



Universidade de Aveiro
2009

Departamento de Física

**André Filipe Moreira
Martins**

**Estudo de Fibras Ópticas Sujeitas a Curvaturas
Apertadas**



**André Filipe Moreira
Martins**

**Estudo de Fibras Ópticas Sujeitas a Curvaturas
Apertadas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Dr. Paulo Sérgio de Brito André, Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e Investigador Auxiliar no Instituto de Telecomunicações.

o júri

presidente

Prof. Dr. João Lemos Pinto

Professor Catedrático do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Manuel Joaquim Marques

Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Prof. Dr. Paulo Sérgio de Brito André

Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Física da Universidade de Aveiro
Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações

agradecimentos

Desejo agradecer a todas as pessoas que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização deste estudo.

Gostava inicialmente de expressar o meu profundo agradecimento ao meu orientador, Prof. Doutor Paulo André. Todo este trabalho não seria possível sem o seu empenho, dedicação, disponibilidade e rigor. Sem os seus conhecimentos, não teria sido possível a redacção deste documento.

Quero destacar o Prof. Doutor João Lemos Pinto pelos preciosos concelhos durante o meu percurso académico.

Quero agradecer também a Mestre Ana Maria Rocha. Todas as nossas conversas e debates tornaram possível a compreensão de alguns fenómenos descritos aqui.

À Lic. Silvia Correia pela discussão de alguns assuntos que se mostraram preciosos para a elaboração deste documento.

A todos os meus colegas que contribuíram com muito apoio, encorajamento e companheirismo ao longo deste tempo.

E como não podia deixar de referir, aos meus pais, à minha irmã e a todos os meus familiares e amigos que sempre me apoiaram.

Finalmente quero também agradecer às seguintes instituições:

À Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento providenciado através do projecto FEFOF (PTDC/EEA-TEL/72025/2006).

Ao Instituto de Telecomunicações (I.T.) - Aveiro e ao Departamento de Física pela cedência de material laboratorial que permitiu fazer muitos dos testes e experiências.

A todos, o meu muito obrigado.

André Martins

palavras-chave

Fibras ópticas, macro-curvaturas, aquecimento de fibra

resumo

Este trabalho centra-se no estudo de fibras ópticas, do tipo monomodo, sujeitas a curvaturas apertadas, nomeadamente, na atenuação do sinal e no aquecimento da fibra.

Verificou-se experimentalmente o comportamento da atenuação e o fenómeno de reflexão de modos de fuga.

Demonstrou-se que a atenuação da fibra quando sujeita a curvaturas apertadas pode ser modelizada pelos modelos de Marcuse e de Renner com correções dos efeitos elasto-ópticos.

Demonstrou-se ainda que uma fibra óptica curvada que transmita um sinal de com uma potência de 0.5 W pode atingir temperaturas de 85°C.

keywords

Optical fibers, bending, fiber heating

abstract

This work presented the study of mechanisms in bending single mode optical fibers, namely signal losses and fiber heating.

The loss behavior and the whispering gallery modes phenomenon was experimentally verified.

Was demonstrated that fiber bending loss can be modeled by the Marcuse and Renner expressions with the elasto-optical corrections.

Was shown that a curved optical fiber propagating a signal with 0.5 W of power can easily reach temperatures of 85 ° C.

Glossário de Acrónimos

FTTH	<i>Fiber to the Home</i>	Fibra até à residência
ONA	<i>Optical Network Analyzer</i>	Analisador de quadripolos ópticos
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>	Amplificador de fibra dopada com Érbio
SMF	<i>Standard Single Mode Fiber</i>	Fibra óptica monomodo padrão
WGM	<i>Whispering Gallery mode</i>	Modos de fuga que são reflectidos nas interfaces das camadas externas da fibra
PM	<i>Optical Power meter</i>	Medidor de potência óptica
ECL	<i>External Cavity Laser</i>	Laser de cavidade externa
MFD	<i>Mode Field Diameter</i>	Diâmetro modal do campo

Índice de Figuras

Figura 2-1 Esquema dos dois tipos de curvatura em fibras ópticas: macro-curvatura ou curvatura (a) e micro-curvatura (b) [Dutton98].	6
Figura 2-2 Esquema de uma macro-curvatura.	7
Figura 2-3 Esquema que ilustra o diâmetro do campo modal na fibra óptica. Como se observar o sinal também é propagado na bainha da fibra [JDSU].	7
Figura 2-4 Esquema da distribuição do campo modal numa fibra com curvatura.	8
Figura 2-5 Esquema de uma fibra curvada que mostra a reflexão de modos de fuga na interface entre o revestimento polimérico e a bainha.	9
Figura 3-1 Foto das 3 fibras ópticas utilizadas neste estudo.	11
Figura 3-2 Esquema de montagem experimental.	12
Figura 3-3 Espectro de perdas, obtido para o enrolamento de fibra óptica em torno do cilindro com 7 mm de raio.	13
Figura 3-4 Dispositivo usado para a criação de meia curvatura na fibra SMF: Foto geral (a), Foto com uma fibra óptica no dispositivo de frente (b) e de perfil (c).	13
Figura 3-5 Espectro de perdas, em dB/meia volta, obtido para diferentes raios de curvatura de fibra óptica.	14
Figura 3-6 Esquema da montagem experimental utilizada.	15
Figura 3-7 Suporte utilizado para impor a meia curvatura na fibra óptica: foto geral (a) e foto pormenorizada da curva induzida numa fibra óptica (b).	15
Figura 3-8 Gráfico de atenuação média com o desvio padrão associado, para cada raio de curvatura, para um sinal com um comprimento de onda de 1550nm. A linha é apenas um guia visual.	16
Figura 3-9 Mecanismo utilizado para criar uma curvatura completa na fibra com um diâmetro conhecido: Foto geral (a) e foto pormenorizada da curva induzida na fibra óptica (b).	17
Figura 3-10 Esquema da montagem experimental	17
Figura 3-11 Gráfico de atenuação média com o desvio padrão associado, em função de cada raio de curvatura completa, para sinais com comprimento de onda de 1480 e 1550nm. A linha é apenas um guia visual.	18
Figura 3-12 Gráfico de atenuação média com o desvio padrão associado, em função do raio de curvatura para cada comprimento de onda do sinal óptico polarizado. A linha é apenas um guia visual.	18
Figura 3-13 Gráfico com a amplitude máxima das perdas, em função do raio de curvatura para cada comprimento de onda do sinal óptico polarizado e não polarizado. As linhas são apenas guias visuais.	19
Figura 3-14 Espectro de perdas, obtido para diferentes raios de curvatura de fibra óptica fornecido pela Cabelte®.	20

Figura 3-15 Espectro de perdas, obtido para diferentes raios de curvatura de fibra óptica fornecido pela Thorlabs®	21
Figura 3-16 Gráfico de atenuação média com o desvio padrão associado, em função do raio de curvatura para cada tipo de tipo de fibra para um comprimento de onda de 1480nm. As linhas são apenas guias visuais.	21
Figura 3-17 Gráfico de atenuação média com o desvio padrão associado, em função do raio de curvatura para cada tipo de tipo de fibra para um comprimento de onda de 1550nm. As linhas são apenas um guia visual.	22
Figura 3-18 Gráfico da diferença entre perda média e perda instantânea em função do tempo, para cada tipo de fibra, para um raio de curvatura de fibra de 6,25mm e para um sinal óptico com comprimento de onda de 1550 e 1480nm. As linhas são apenas guias visuais.	23
Figura 4-1 Geometria de uma guia de onda curvado [Buck04].	26
Figura 4-2 Curva de perdas calculada analiticamente através da expressão de Marcuse para um sinal óptico com um comprimento de onda de 1550nm ($a = 4,1 \mu m$, $nn = 1,4447$, $nb = 1,440$)	28
Figura 4-3 Ilustração do corte longitudinal da fibra óptica considerada no modelo de Renner. Foi considerado uma fibra com uma camada de revestimento de diâmetro infinito.	28
Figura 4-4 Curva de perdas calculada analiticamente através da expressão de Renner para um sinal com um comprimento de onda de 1550nm ($a = 4,1 \mu m$, $b = 62,5 \mu m$, $nn = 1,4447$, $nb = 1,440$, $nr = 1,6$).	29
Figura 4-5 (a) Esquema da circularidade duma fibra com curvatura e (b) o equivalente, mas em fibra recta, depois de aplicada a técnica [Schermer07].	30
Figura 4-6 (a) Distribuição do índice de refração de uma fibra dobrada sem contemplar a deformação e (b) a distribuição equivalente, para em fibra recta, depois de aplicada a correcção. Pode-se visualizar que o índice de refração junto à curvatura fica com um valor mais baixo [Schermer07].	31
Figura 4-7 Gráfico das perdas obtidas para a fibra fabricada pela Corning® com um sinal de entrada polarizado com um comprimento de onda de 1480nm ajustado com o modelo de Renner ($\chi^2 = 0.78$) e com o modelo de Marcuse ($\chi^2 = 0.78$).	33
Figura 4-8 Gráfico das perdas obtidas para a fibra fabricada pela Corning® com um sinal de entrada polarizado com um comprimento de onda de 1550nm ajustado com o modelo de Renner ($\chi^2 = 12.58$) e com o modelo de Marcuse ($\chi^2 = 16.35$).	33
Figura 4-9 Gráfico das perdas obtidas para a fibra fabricada pela Cabelte® com um sinal de entrada polarizado com um comprimento de onda de 1550nm ajustado com o modelo de Renner ($\chi^2 = 0.22$) e com o modelo de Marcuse ($\chi^2 = 0.28$).	34
Figura 4-10 Gráfico das perdas obtidas para a fibra fabricada pela Cabelte® com um sinal de entrada polarizado com um comprimento de onda de 1480nm ajustado com o modelo de Renner ($\chi^2 = 0.82$) e com o modelo de Marcuse ($\chi^2 = 1.86$).	34
Figura 4-11 Gráfico das perdas obtidas para a fibra fabricada pela Thorlabs® com um sinal de entrada polarizado com um comprimento de onda de 1480nm ajustado com o modelo de Renner ($\chi^2 = 1.96$) e com o modelo de Marcuse ($\chi^2 = 2.02$).	35
Figura 4-12 Gráfico das perdas obtidas para a fibra fabricada pela Thorlabs® com um sinal de entrada polarizado com um comprimento de onda de 1550nm ajustado com o modelo de Renner ($\chi^2 = 3.62$) e com o modelo de Marcuse ($\chi^2 = 4.85$).	35
Figura 4-13 Tabela com os parâmetros de todos os ajustes efectuados aos dados experimentais de atenuação.	36
Figura 4-14 Tabela com os parâmetros da fibra padrão do tipo SMF28™ da Corning® [Wang07]. ..	36
Figura 5-1 Foto de uma fibra óptica vista ao microscópico depois de ter propagado o efeito fusível.	38
Figura 5-2 Esquema da montagem experimental utilizada.	38
Figura 5-3 Atenuação média do sinal óptico em função do raio de curvatura. A linha serve apenas como guia visual.	39

Figura 5-4 Imagens obtidas pela câmara de infravermelhos da fibra óptica quando sujeita a curvaturas com raios de curvatura de 6,3mm (a) e 2,4mm (b) durante o regime estacionário. Na imagem é indicado a direcção do sinal assim como a potência de entrada (P_{in}) e a temperatura máxima do revestimento. 40

Figura 5-5 Temperatura máxima de revestimento da fibra em função do raio de curvatura. As linhas servem apenas de guias visuais. 40

Índice

O júri	
Agradecimentos	
Resumo	
Abstract	
Glossário de Acrónimos	
Índice de figuras	
Índice	
Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objectivos.....	2
1.3 Estrutura.....	2
Capítulo 2 Teoria	5
2.1 Atenuação do Sinal Óptico	5
2.2 Curvaturas.....	7
Capítulo 3 Investigações Experimentais	11
3.1 Perdas associadas a enrolamentos de fibra em cilindros	12
3.2 Perdas associadas a meia curvatura	13
3.3 Perdas associadas a uma curvatura completa.....	16
Capítulo 4 Modelos Analíticos.....	25
4.1 Introdução	25
4.2 Modelo de Marcuse	26
4.3 Modelo de Renner	28
4.4 Correção considerando os efeitos elasto-ópticos.....	30
4.5 Verificação dos Modelos.....	32
Capítulo 5 Implicações das curvaturas em redes ópticas.....	37
5.1 Efeito Fusível.....	37
5.2 Verificações experimentais	38
Capítulo 6 Considerações Finais	43
6.1 Conclusões.....	43
6.2 Contribuições no âmbito da dissertação	44
6.3 Sugestões de trabalho futuro.....	45
Referências Bibliográficas	

Capítulo 1 | Introdução

1.1 Enquadramento

O mercado das comunicações teve, nas últimas duas décadas, um crescimento grandioso. A fibra óptica é, actualmente, um dos componentes primários dos sistemas de comunicação, quer global quer localmente. As redes de fibra óptica até à residência (*FTTH - Fiber to the Home*) são, cada vez mais, uma realidade. Para responder a estas exigências contínuas do mercado, a indústria das comunicações procura a miniaturização dos sistemas, nomeadamente a instalação de fibras ópticas em espaços com dimensões reduzidas. Porém, isso sujeita as fibras a curvaturas com raios apertados, o que aumenta drasticamente a atenuação do sinal óptico propagado. Por outro lado, devido ao aumento do número de canais em fibra óptica, a potência óptica dos sinais que circula nas fibras tem vindo a aumentar. Além disso, a utilização de amplificação Raman que requer laser de bombeamento de elevada potência é cada vez mais uma realidade [Neat07]. Estas duas características (o aumento de potência propagada e o aumento da densidade) combinadas, provocam nas fibras, com raios de curvaturas apertadas, um aumento da sua temperatura local. Este aumento de temperatura degrada as fibras e pode ser suficiente para iniciar o efeito fusível na fibra, que resulta na destruição das fibras ao longo de quilómetros [Seo03].

Ao mesmo tempo, as perdas induzidas por curvatura põem em risco a utilização da banda espectral L (1565-1625nm) como janela de transmissão, que pode aumentar a capacidade da rede de fibras instalada. Pois, em fibras do tipo monomodo, o diâmetro do campo modal aumenta com o comprimento de onda do sinal óptico, tornando as fibras ópticas mais sensíveis às perdas por curvatura para comprimentos de onda mais

elevados. Por essa razão, durante os últimos anos, os fabricantes de fibras ópticas, optimizaram novos desenhos e introduziram novos tipos de fibras com atenuação reduzida quando sujeitas a curvaturas apertadas. Em simultâneo, as organizações que definem os padrões de uso de fibras, como a IEC (*International Electrotechnical Commission*) ou a ITU (*International Telecommunication Union*) seguiram a tendência, e desenvolveram e definiram normas mais específicas para os testes e métodos para determinar a atenuação em fibras com macro-curvaturas [FibreSystems03]. Contudo, existe uma grande quantidade de fibra que foi instalada ao longo do tempo que não foi sujeita a estas novas normas.

De referir, no entanto, que as macro-curvaturas em fibra óptica, têm tido algumas aplicações na área dos sensores ópticos. Nomeadamente sensores de pressão, sensores de temperatura, sensores de referência de comprimento de onda, entre outros [Wang07].

1.2 Objectivos

Este estudo está inserido no âmbito de um projecto de investigação financiado pela fundação para a ciência e tecnologia, FEFOF (PTDC/EEA-TEL/72025/2006), que pretende estudar o efeito fusível.

Tomando como base as considerações descritas na secção anterior, este trabalho centra-se no estudo de atenuação em fibras ópticas do tipo monomodo, sujeitas a curvaturas apertadas, tendo como principal objectivo a modelização desta atenuação de uma forma analítica.

Numa primeira fase pretende-se compreender experimentalmente o fenómeno da atenuação do sinal em fibras ópticas sujeitas a curvaturas apertadas. Numa fase posterior serão estudados os modelos teóricos que descrevem o fenómeno, verificando-se a sua exactidão em reproduzir os dados experimentais obtidos. Numa última fase, pretende-se demonstrar os efeitos, nomeadamente o aquecimento que uma fibra óptica pode ser sujeita quando contem este tipo de curvaturas e transmita sinais de elevada intensidade.

1.3 Estrutura

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo, apresentou-se o contexto em que se insere o presente trabalho, assim como os objectivos do mesmo.

No segundo capítulo descrevem-se os fundamentos teóricos necessários para a compreensão dos mecanismos de atenuação, assim como o formalismo associado a fibras ópticas sujeita a curvaturas apertadas.

No terceiro capítulo descrevem-se os testes experimentais que se realizaram para se determinar a atenuação em fibras sujeitas a curvaturas apertadas, analisando os seus resultados de uma forma qualitativa.

No quarto capítulo, apresenta-se os modelos analíticos que quantificam as perdas de sinal óptico para fibras ópticas, do tipo monomodo, sujeitas a curvaturas apertadas, comparando-os com os dados experimentais.

No quinto capítulo descreve-se o efeito resultante da propagação de sinais com elevada potência, nomeadamente o aquecimento que a fibra com curvaturas se sujeita.

Finalmente, no sexto capítulo, apresenta-se conclusões do estudo e as recomendações para trabalho futuro.

Capítulo 2 | Teoria

Neste capítulo são abordados os fundamentos teóricos essenciais à compreensão dos mecanismos de atenuação do sinal resultante de raios de curvatura apertados nas fibras óptica. Inicialmente apresenta-se uma breve descrição dos mecanismos que provocam atenuação do sinal óptico em fibras ópticas. Posteriormente abordam-se as questões relacionadas com macro-curvaturas em fibras monomodo.

2.1 Atenuação do Sinal Óptico

A atenuação do sinal que se propaga numa fibra óptica é um dos principais factores a considerar num sistema de telecomunicações, pois estabelece a distância máxima entre repetidores. A atenuação, também designada como perda, é geralmente, expressa em unidades logarítmicas por comprimento, representando-se pelo símbolo α , de acordo com a equação (2-1).

$$\alpha \cdot L = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (2-1)$$

onde P_{in} representa a potência óptica de entrada do sinal, P_{out} representa a potência óptica de saída do sinal e L representa o comprimento de fibra óptica entre a entrada e a saída. Existem vários mecanismos que podem provocar a atenuação do sinal que se propaga nas fibras, tais como a absorção intrínseca da sílica, o espalhamento de *Rayleigh*, a presença de impurezas e imperfeições no guia de onda. As atenuações por

imperfeições no guia de onda contemplam as perdas associadas a curvaturas das fibras ópticas [Hecht91].

As perdas pelas imperfeições do guia podem ser divididas em duas categorias consoante o tipo de curvatura a que a fibra está sujeita. Quando a fibra é submetida a uma pressão transversal que induz uma deformação local, diz-se que a fibra tem uma micro-curvatura. [Agrawal02]. Este tipo de pressão é frequente durante a instalação de fibras, quando estas são comprimidas contra uma superfície ligeiramente rugosa, causando grande impacto na atenuação do sinal (~ 100 dB/m), tanto em fibras do tipo multimodo, como em fibras do tipo monomodo. Pode-se minimizar estas perdas em fibras monomodo desenhando fibras com um valor para a frequência normalizada muito próximo do valor de corte (2.405), tal que a energia seja confinada quase exclusivamente no núcleo da fibra [Agrawal02]. Outra forma de minimizar as perdas é pela extrusão em torno da fibra de uma camada compressível. Assim, quando forças externas forem aplicadas, só a camada protectora será deformada, protegendo a fibra [Costa05].

Por outro lado, quando o raio de curvatura R da fibra é elevado, quando comparado com o seu diâmetro, diz-se que a fibra tem uma macro-curvatura. A Figura 2-1 representa esquematicamente os dois tipos de curvatura existentes. Como se pode observar, em ambas as situações, o sinal óptico (representado por setas), é perdido para a bainha da

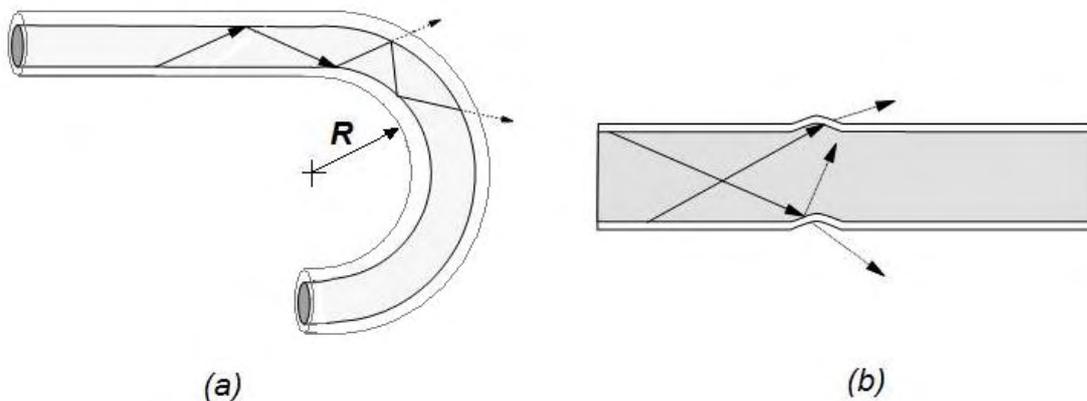


Figura 2-1 Esquema dos dois tipos de curvatura em fibras ópticas: macro-curvatura ou curvatura (a) e micro-curvatura (b) [Dutton98].

fibra óptica. É usual, alguns autores, denominarem unicamente como curvaturas as macro-curvaturas. Como este estudo se centra neste tipo de deformação, utilizou-se este tipo de designação. A compreensão de ambos os mecanismos levou, por exemplo, a ser definidas tolerâncias de curvatura mínima para o uso correcto das fibras ópticas [Buck04].

2.2 Curvaturas

As curvaturas, são geralmente interpretadas recorrendo ao princípio físico que desencadeou o início das comunicações em fibra óptica, a óptica geométrica. Na Figura 2-2 é possível observar um esquema de uma fibra curvada com raios ópticos que ilustram

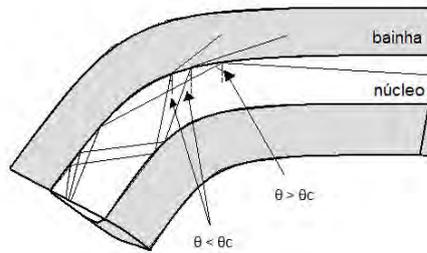


Figura 2-2 Esquema de uma macro-curvatura.

o sinal óptico dentro da fibra. O sinal óptico é perdido para a bainha quando o ângulo do feixe incidente (θ) na interface *núcleo-bainha* não atinge o valor do ângulo do raio crítico (θ_c), para o qual existe reflexão interna total. Apesar da explicação física para o mecanismo associado às perdas numa curvatura ser de fácil compreensão, a determinação e quantificação das perdas associadas é complexo. Devido a tal facto, torna-se necessário introduzir outros conceitos para além da óptica geométrica tais como o diâmetro modal de campo (MFD - *Mode Field Diameter*). O diâmetro modal de campo é o factor mais importante, e que determina a susceptibilidade de uma fibra óptica às perdas de sinal induzidas por uma curvatura. Como se pode observar na Figura 2-3, o diâmetro do campo modal é definido como a largura do feixe medida a $1/e^2$ da intensidade do perfil do sinal propagado na fibra óptica.

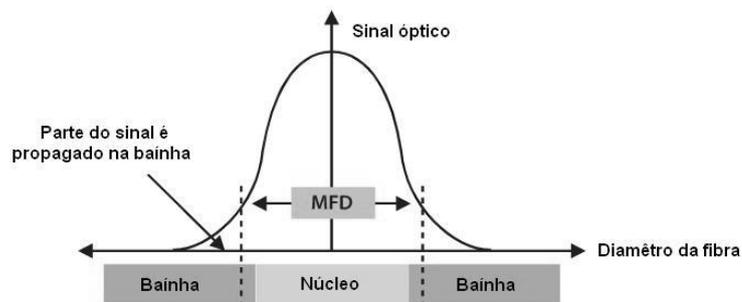


Figura 2-3 Esquema que ilustra o diâmetro do campo modal na fibra óptica. Como se observar o sinal também é propagado na bainha da fibra [JDSU].

Apesar da maior contribuição do sinal estar confinado no núcleo da fibra, existe uma pequena parte que é propagada na bainha. Um diâmetro do campo modal diminuto indica que o sinal está mais confinado no núcleo da fibra e por isso é menos susceptível a fugas quando a fibra é dobrada. O diâmetro do campo modal é função do comprimento de onda do sinal, do diâmetro do núcleo e do contraste do índice de refração da fibra. Quanto maior for o comprimento de onda, maior vai ser o diâmetro de campo modal. De referir que é comum aproximar uma função *Gaussiana* à distribuição do campo modal [Yablon05].

As perdas por curvatura são induzidas por dois mecanismos físicos diferentes: perdas de curvatura pura (*pure bend loss*) e perdas por transição (*transition loss*). As perdas de curvatura pura ocorrem continuamente ao longo de uma secção curva de uma fibra óptica. A parte exterior da distribuição modal do campo necessita de percorrer uma maior distância para que o sinal óptico seja propagado, como tal, parte do sinal é perdido. Por sua vez, quando a luz viaja numa fibra curva, a distribuição modal de campo é distorcida, estendendo radialmente para o exterior, causando perdas por transição, como se pode ver, esquematicamente na Figura 2-4. [Bagget01]; [Omari08]. Uma aplicação popular deste fenómeno, são os chamados filtros de modo. O filtro de modo mais popular tem como principal componente um mandril (*mandrel wrapping*), isto porque, a fibra óptica é envolvida várias vezes em torno de um mandrel. Os filtros de modos têm como objectivo remover ao sinal óptico, os modos de propagação mais elevados e por isso são usados em fibras multimodo.

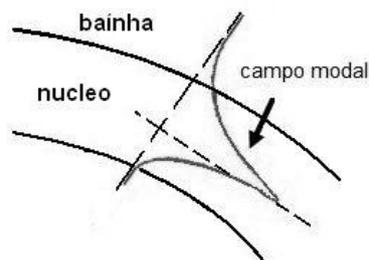


Figura 2-4 Esquema da distribuição do campo modal numa fibra com curvatura.

Como as perdas por transição têm uma contribuição muito baixa, é usual aproximar a totalidade das perdas por curvatura às perdas de curvatura pura. Esta aproximação é frequente em pequenos comprimentos de fibra curvados, isto é, quando as fibras ópticas contêm no máximo uma única volta completa, que é o caso deste estudo.

Nos últimos anos começou-se a dar mais importância às perdas de curvatura pura e um grande indício são as normas que a IEC (*International Electrotechnical Commission*) e

a ITU (*International Telecommunication Union*) publicadas recentemente para medir as perdas neste tipo de curvatura. Estas normas descrevem vários métodos e testes para medir as perdas em curvaturas apertadas, mas podem-se agrupar em dois tipos: medição da atenuação em enrolamentos de fibra e medição da atenuação em fibras com uma curvatura de 90° [IEC09].

Quando se fala de curvaturas apertadas em fibra óptica não se pode deixar de mencionar um fenómeno que ocorre frequentemente devido à reflexão de modos de fuga. Numa fibra curvada, nas interfaces entre a bainha e o revestimento polimérico ou entre o revestimento polimérico e o ar, parte do sinal óptico é reflectido. Este sinal óptico reflectido pode voltar para o núcleo, o que faz com que o valor das perdas totais diminuam criando espectros de atenuação com bandas. Existem autores que identificaram os dois tipos de bandas consoante a interface onde o sinal foi reflectido [Faustini97]. A este fenómeno de acomplamento do sinal propagado com modos de fuga que são reflectidos nas interfaces deu-se o nome de WGM (*Whispering Gallery Mode*) [Buck04] [Hyun05]. A Figura 2-5 apresenta um esquema deste fenómeno na interface entre o revestimento polimérico e a bainha.

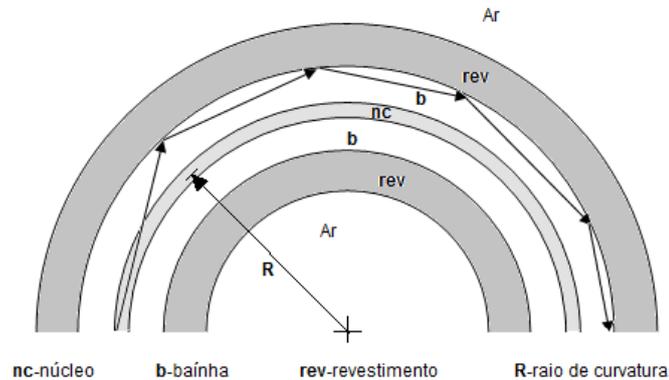


Figura 2-5 Esquema de uma fibra curvada que mostra a reflexão de modos de fuga na interface entre o revestimento polimérico e a bainha.

Devido a todos estes problemas, os fabricantes começaram a desenvolver fibras ópticas com características específicas para diminuir este tipo de atenuação (Ex.: *Corning HI 1060 FLEX Speciality Fiber*). É possível reduzir a atenuação através da diminuição do diâmetro do núcleo ou ainda através do aumento do contraste entre os índices de refração da bainha e do núcleo [Powers97].

Capítulo 3 | Investigações Experimentais

Neste capítulo é apresentada a verificação experimental envolvida neste estudo. As fibras ópticas utilizadas são fibras monomodo, do tipo SMF-28™, produzidas pela Corning®, Cabelte® e pela Thorlabs®. Todas as fibras possuem a camada de revestimento em acrílate de 250 µm. A fibra da Thorlabs possui uma camada adicional de revestimento em material plástico opaco, com um diâmetro de 900 µm. A Figura 3-1 apresenta uma foto com estas três fibras ópticas.

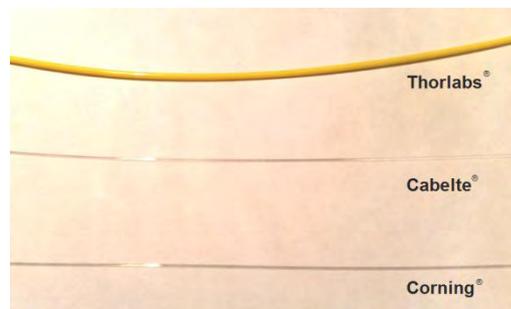


Figura 3-1 Foto das 3 fibras ópticas utilizadas neste estudo.

Dividiu-se este capítulo em três partes. A primeira trata dos testes realizados para determinar as perdas associadas a enrolamentos de fibra em cilindros, enquanto a segunda descreve as perdas associadas a fibras dobradas com meia curvatura. A terceira, e última parte, trata as perdas associadas a fibras dobradas com uma curvatura completa.

3.1 Perdas associadas a enrolamentos de fibra em cilindros

Decidiu-se iniciar o trabalho experimental medindo a atenuação em fibras ópticas em enrolamentos de cilindros pois é uma técnica frequente, nomeadamente em torno de um mandril. Portanto foi utilizado um analisador de quadripolos ópticos (ONA – *optical network analyzer*), Agilent 86038B, para se obter um sinal óptico sintonizável e polarizado. Este sinal é injectado na fibra SMF e é analisado, após o enrolamento de fibra óptica. Foi enrolada 13 cm de fibra óptica, fornecida pela Corning®, em dois cilindros de latão com raios de 7 e 2 mm. A Figura 3-2 apresenta o esquema experimental utilizado.

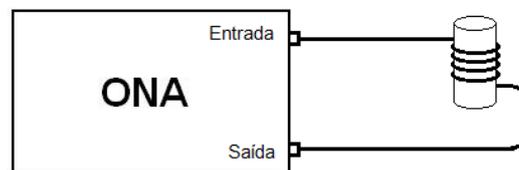


Figura 3-2 Esquema de montagem experimental.

Foram efectuados três ensaios para cada enrolamento de fibra óptica. Utilizou-se a região espectral máxima permitida pelo dispositivo, de 1490 a 1640 nm, com uma resolução de 0.02 nm. Não foi possível obter dados de atenuação quando foi utilizado o enrolamento de fibra no cilindro com raio de 2mm pois foi atingido o limite da gama dinâmica do dispositivo. A Figura 3-3 apresenta o espectro de atenuação média para o enrolamento no cilindro com maiores dimensões. Como esperado as perdas aumentam com a diminuição do raio de curvatura da fibra e com o aumento do comprimento de onda. Analisando o gráfico é possível observar que, para comprimentos de onda superiores a 1580nm, foi atingido o limite da gama dinâmica permitida pelo dispositivo. Observa-se também que os valores de perdas apresentam oscilações periódicas no comprimento de onda. Isto deve-se ao fenómeno de acoplamento entre o modo fundamental e os modos de fuga que são reflectidos na interface externa da bainha e na interface externa do revestimento polimérico (*WPM – Whispering gallery mode*).

Através desta experiencia verificou-se que a atenuação em enrolamentos de cilindros era demasiado elevada para se medir no ONA, pois o comprimento de fibra óptica curvada era também elevado. Devido a isto e com o intuito de reduzir o comprimento de fibra óptica curvada, decidiu-se modificar o dispositivo que impõe as curvaturas na fibra

óptica. Desta forma construiu-se um suporte, em madeira, pré-furada com furos de vários diâmetros, que cria uma meia curvatura ou uma meio volta na fibra óptica (Figura 3-4).

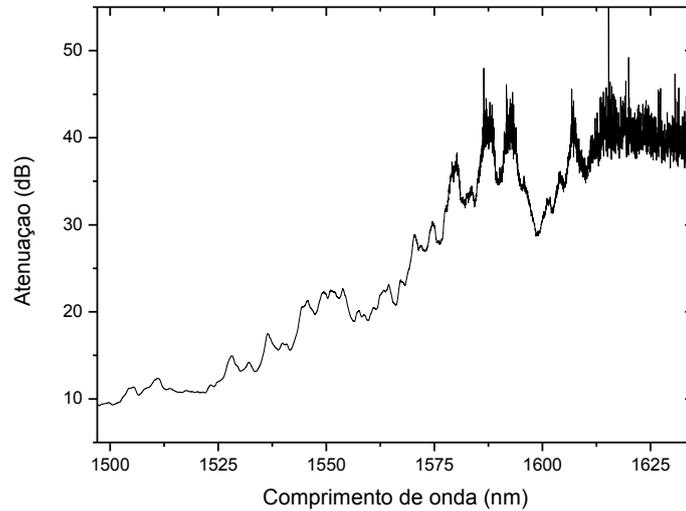


Figura 3-3 Espectro de perdas, obtido para o enrolamento de fibra óptica em torno do cilindro com 7 mm de raio.

3.2 Perdas associadas a meia curvatura

Foi utilizado, novamente, o analisador de quadripolos ópticos (ONA) para se obter um sinal óptico nas situações descritas no capítulo 3.1. Este sinal é injectado na fibra SMF e é analisado, após a meia curvatura.

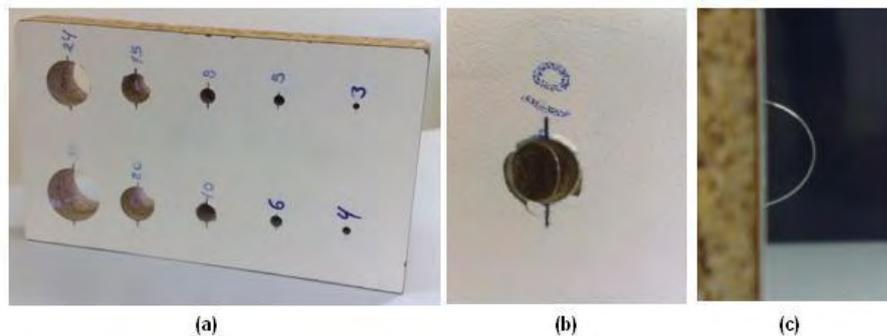


Figura 3-4 Dispositivo usado para a criação de meia curvatura na fibra SMF: Foto geral (a), Foto com uma fibra óptica no dispositivo de frente (b) e de perfil (c).

Foram efectuados três ensaios para diferentes curvaturas na fibra óptica. Utilizou-se a região espectral máxima permitida pelo dispositivo, de 1490 a 1640 nm, com uma resolução de 0.02nm.

A Figura 3-5 apresenta o espectro de atenuação média obtido para vários raios de curvatura. Não são representados dados para raios de curvatura superiores a 10 mm pois as perdas para estes casos são reduzidas. Também, não são apresentados dados de perdas, para curvaturas inferiores a 4 mm pois foi atingido o limite da gama dinâmica do ONA. Como esperado as perdas aumentam com a diminuição do raio de curvatura da fibra e com o aumento do comprimento de onda. Observa-se novamente a existência de oscilações periódicas no comprimento de onda. Isto deve-se ao fenómeno de acoplamento entre o modo fundamental e os modos de fuga.

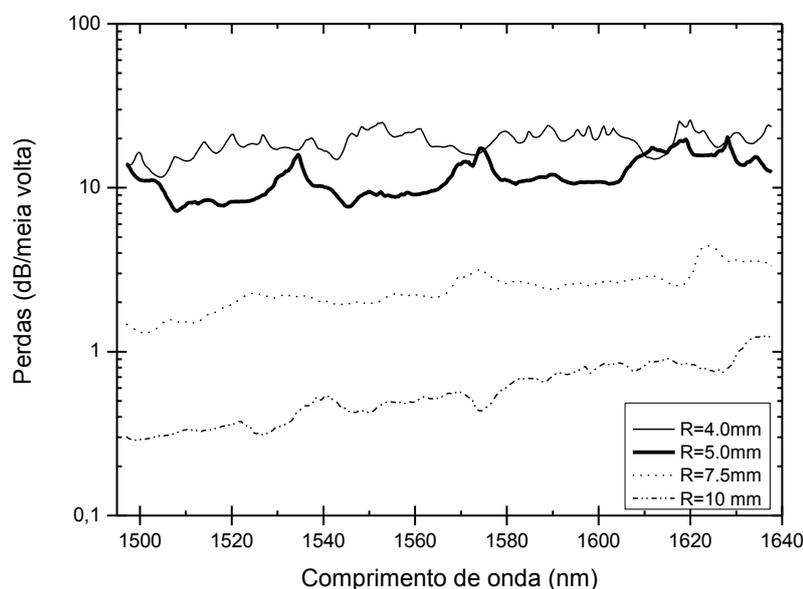


Figura 3-5 Espectro de perdas, em dB/meia volta, obtido para diferentes raios de curvatura de fibra óptica.

Decidiu-se otimizar o sistema experimental porque pretendeu-se obter dados de perdas do sinal para raios de curvatura da fibra óptica menores. Para tal, efectuou-se um novo teste, onde se utiliza um novo suporte para impor a curvatura à fibra óptica. Substituiu-se também o ONA por um laser e um medidor de potência óptica (PM – *Optical Power Meter*). O laser utilizado foi do tipo *DFB* (*distributed feedback laser*) a emitir no comprimento de onda de 1550nm (THORLABS, modelo S3FC1550). A Figura 3-6 apresenta um esquema experimental deste teste. A Figura 3-7 apresenta uma foto do suporte e pode-se observar que este permite uma maior selecção de diâmetros de curvatura. O sinal à saída da fibra é analisado por um medidor de potência óptica (PM –

Optical Power Meter) da EXFO referência FPM-600. Como no teste anterior, retirou-se inicialmente o valor do sinal de referência quando a fibra óptica não está sujeita a nenhuma curvatura, para se poder determinar a atenuação. Seguidamente, verificou-se

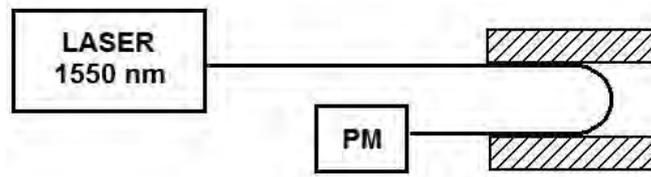


Figura 3-6 Esquema da montagem experimental utilizada.

que a potência do sinal óptico de saída não era constante ao longo do tempo então decidiu-se medir para cada ensaio o valor máximo e mínimo da potência do sinal óptico à saída da fibra, durante um minuto. Efectuou-se 5 ensaios para cada diâmetro de curvatura seleccionado, determinando-se a média de atenuações e o desvio padrão associado.



Figura 3-7 Suporte utilizado para impor a meia curvatura na fibra óptica: foto geral (a) e foto pormenorizada da curva induzida numa fibra óptica (b).

A Figura 3-8 apresenta o gráfico de atenuação média, em dB por comprimento de fibra dobrada, para cada diâmetro de curvatura. Como esperado à medida que o raio de curvatura da fibra óptica diminui, a atenuação aumenta e o erro associada aumenta também, resultado da maior amplitude das oscilações do sinal óptico de saída.

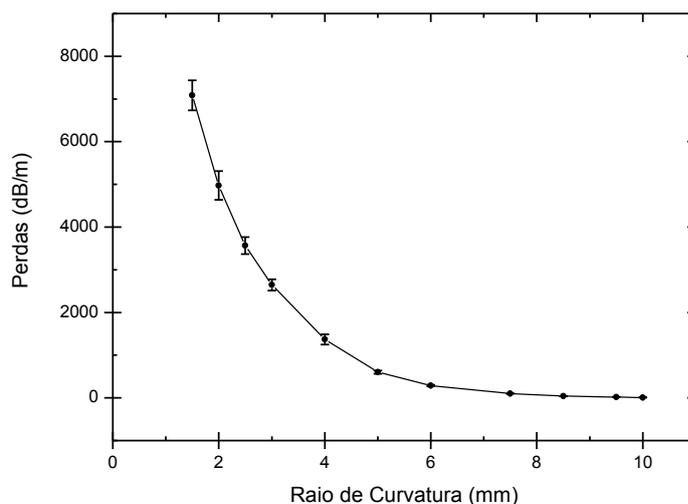


Figura 3-8 Gráfico de atenuação média com o desvio padrão associado, para cada raio de curvatura, para um sinal com um comprimento de onda de 1550nm. A linha é apenas um guia visual.

Devido sobretudo às oscilações de potência dos sinais medidos e à baixa precisão na imposição de raios de curvatura decidiu-se construir um novo suporte.

3.3 Perdas associadas a uma curvatura completa

Assim, foi construído o dispositivo apresentado na Figura 3-9. Modificou-se a configuração da curvatura da fibra de meia para curvatura completa, pois é a forma mais simples de se obter uma maior sensibilidade e precisão na imposição e selecção de diâmetros de curvaturas na fibra óptica. Como se pode observar na figura, este dispositivo permite alterar o perímetro de curvatura da fibra óptica, puxando a agulha que se encontra fixa à fibra óptica. Este arrastamento é medido através da escala que se encontra em cima da agulha.

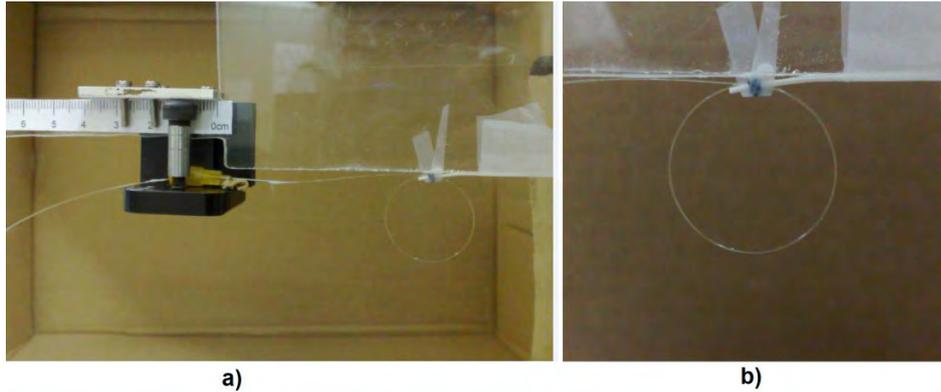


Figura 3-9 Mecanismo utilizado para criar uma curvatura completa na fibra com um diâmetro conhecido: Foto geral (a) e foto pormenorizada da curva induzida na fibra óptica (b)

Neste teste, utilizaram-se como fontes ópticas dois lasers a emitir em 1550nm e em 1480nm. A Figura 3-10 apresenta um esquema da montagem experimental utilizada. As fontes ópticas utilizadas foram lasers de cavidade externa (*ECL-External Cavity Laser*) sintonizáveis e modulares da *OS/CS*. Utilizou-se também um medidor de potência (*EXFO FPM-600*) para analisar o sinal óptico à saída da curvatura da fibra. Como nos outros testes, primeiro mediu-se a potência do sinal de saída da fibra sem curvatura, para ser utilizado como sinal de referência. Efectuaram-se três ensaios, onde se mediu o máximo e o mínimo de potência à saída da fibra durante um período de um minuto.

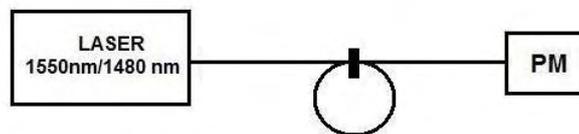


Figura 3-10 Esquema da montagem experimental

No final calculou-se a atenuação média e o desvio padrão associado, para os dois comprimentos de onda utilizados, em função do raio de curvatura completa da fibra óptica. Pode-se observar os resultados na Figura 3-11. Como esperado, as perdas aumentam à medida que o diâmetro de curvatura da fibra óptica diminui. Este aumento das perdas do sinal em função do raio de curvatura da fibra óptica é superior para sinais com comprimentos de onda mais elevados, pois o diâmetro do campo modal é maior. Verificou-se novamente que existem oscilações maiores para raios de curvatura mais reduzidos. De referir que não foi possível obter dados de atenuação para raios de curvatura de fibra óptica inferiores a 3 mm, para o sinal com comprimento de onda de 1550 nm, dado que, foi atingido a gama dinâmica do medidor de potência utilizado. De referir também que o gráfico para o sinal com comprimento de onda de 1550 nm em função do raio de curvatura descrevia algumas oscilações ténues ou bandas.

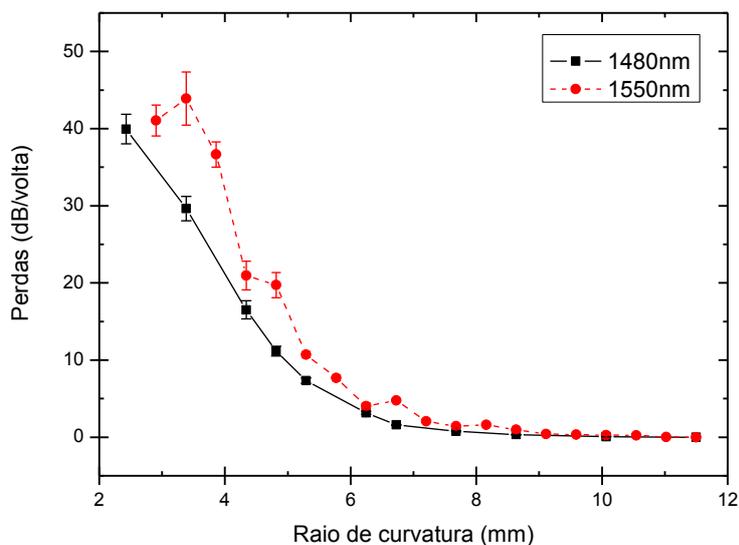


Figura 3-11 Gráfico de atenuação média com o desvio padrão associado, em função de cada raio de curvatura completa, para sinais com comprimento de onda de 1480 e 1550nm. A linha é apenas um guia visual.

De seguida, efectuou-se o mesmo teste, mas com a inclusão de um polarizador, para utilizarmos um sinal de entrada polarizado. Neste teste também se utilizou o mesmo procedimento que no anterior.

Os resultados são apresentados na Figura 3-12. Observa-se novamente que as perdas aumentam à medida que o raio de curvatura diminui e que o sinal com comprimento de onda superior têm perdas maiores. Por outro lado confirma-se a

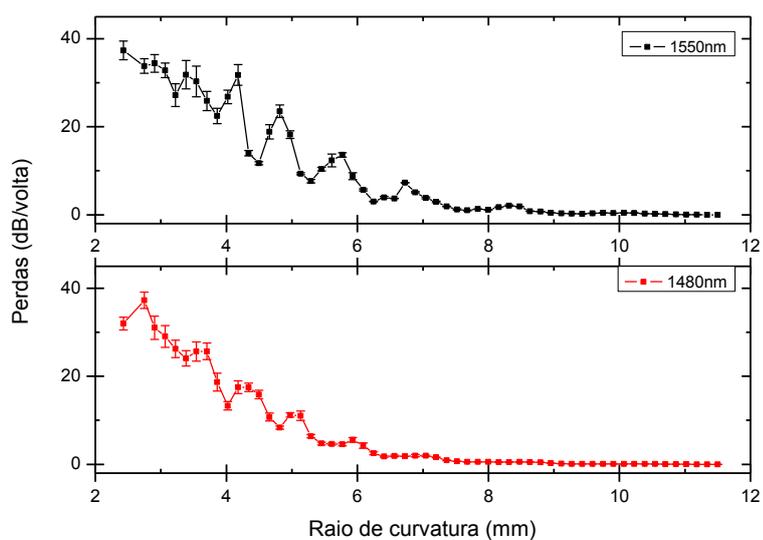


Figura 3-12 Gráfico de atenuação média com o desvio padrão associado, em função do raio de curvatura para cada comprimento de onda do sinal óptico polarizado. A linha é apenas um guia visual.

presença de bandas, ou como alguns autores denominam, um padrão oscilante irregular [Travagnin09]. Este padrão é explicado como já foi dito, pela interação entre o modo fundamental e os modos de fuga.

A Figura 3-13 mostra um gráfico com as amplitudes das atenuações medidas nos últimos dois testes efectuados em função do raio de curvatura de fibra óptica utilizado. Como se pode observar pelos dados da figura, a amplitude é menor para os sinais polarizados. Portanto, o sinal polarizado diminui as oscilações do sinal [QWang07].

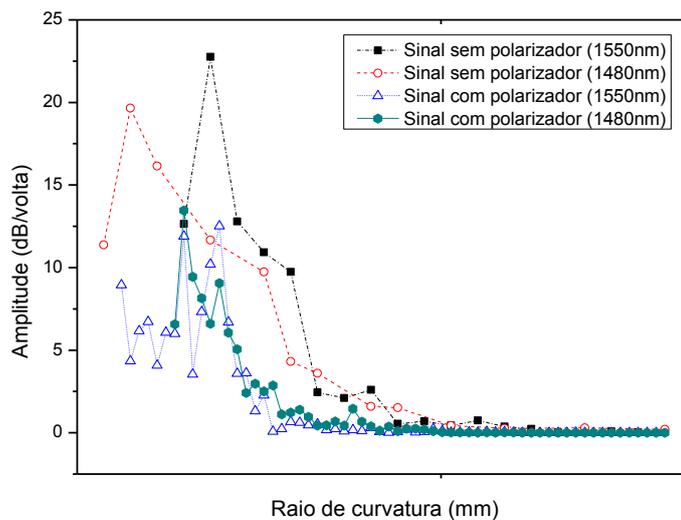


Figura 3-13 Gráfico com a amplitude máxima das perdas, em função do raio de curvatura para cada comprimento de onda do sinal óptico polarizado e não polarizado. As linhas são apenas guias visuais.

Seguidamente, comparou-se as perdas de sinal óptico para fibras de diferentes fabricantes. Para tal efectuou-se dois testes experimentais para duas fibras monomodo, do tipo SMF-28™, fabricadas pela Cabelte® e pela Thorlabs®. Para isso, utilizou-se novamente um analisador de quadripolos ópticos (ONA) e o dispositivo para criar uma curvatura completa de raio variável da Figura 3-9. Foram efectuados três ensaios para diferentes curvaturas na fibra óptica. Utilizou-se a região espectral máxima permitida pelo dispositivo, de 1490 a 1640 nm, com uma resolução de 0.02 nm.

Os resultados experimentais referentes à fibra da Cabelte® são apresentados na Figura 3-14. Como se pode observar as perdas do sinal óptico aumentam com a diminuição do raio de curvatura. Verifica-se a existência novamente de bandas, ou oscilações, induzida pelo fenómeno de WPM.

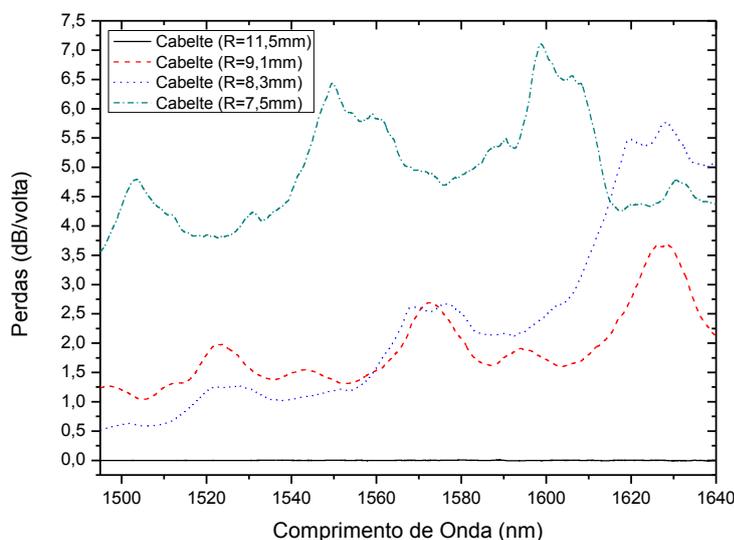


Figura 3-14 Espectro de perdas, obtido para diferentes raios de curvatura de fibra óptica fornecido pela Cabelte®.

Os espectros obtidos experimentalmente referentes à fibra da Thorlabs® são apresentados na Figura 3-15. Novamente, verifica-se que as perdas aumentam com o aumento do comprimento de onda do sinal e com a diminuição do raio de curvatura da fibra óptica. Como se pode observar estes espectros de perdas de sinal são contínuos e não têm qualquer tipo de banda. Isto acontece porque esta fibra possui um revestimento plástico opaco exterior. Este revestimento elimina as reflexões dos modos de fuga na interface externa do revestimento polimérico e funciona como uma camada absorvente de radiação [Faustini05] [Wang07]. Assim, o fenómeno de WGM pode ser amplamente reduzido utilizando um revestimento plástico exterior opaco.

De seguida, foram medidas as atenuações em função do raio de curvatura de fibra óptica para os comprimentos de onda de 1480 e 1550 nm. A montagem utilizada está esquematizada na Figura 3-10. Os dados são apresentados respectivamente nas Figura 3-16 e Figura 3-17. Como esperado, as perdas de sinal óptico aumentam com a diminuição do raio de curvatura da fibra óptica. Por outro lado, podemos observar que existem oscilações periódicas nos gráficos de perdas da fibra produzida pela Cabelte®, enquanto na Thorlabs® estas oscilações são quase inexistentes. Pela observação um pouco mais detalhada de cada um dos gráficos, podemos notar que o gráfico de perdas da fibra óptica da Thorlabs é uma linha de base do gráfico de perdas da fibra da

Cabelte[®]. Isto indicia que a única diferença entre os gráficos é o aparecimento das oscilações, o que é explicado pela morfologia de cada uma das fibras ópticas como já foi referido.

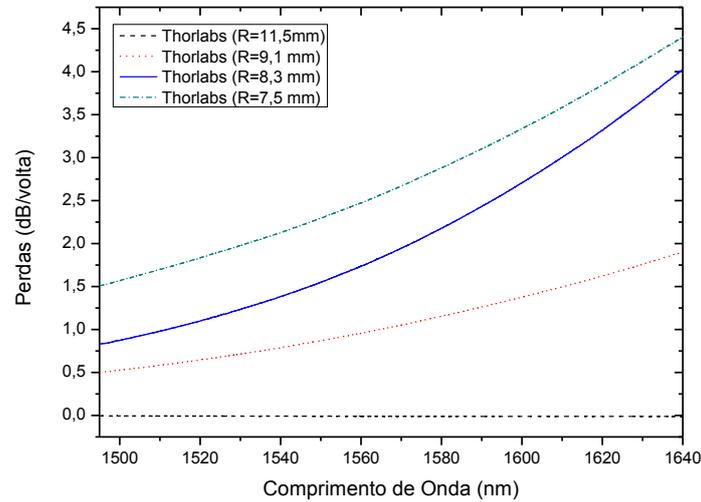


Figura 3-15 Espectro de perdas, obtido para diferentes raios de curvatura de fibra óptica fornecido pela Thorlabs[®].

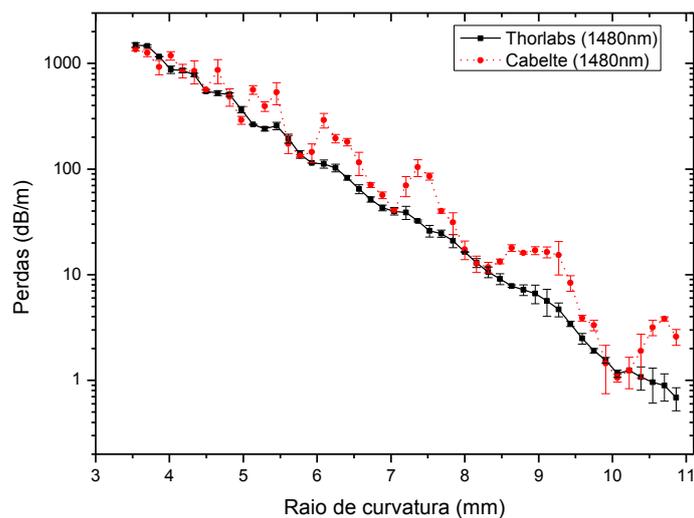


Figura 3-16 Gráfico de atenuação média com o desvio padrão associado, em função do raio de curvatura para cada tipo de tipo de fibra para um comprimento de onda de 1480nm. As linhas são apenas guias visuais.

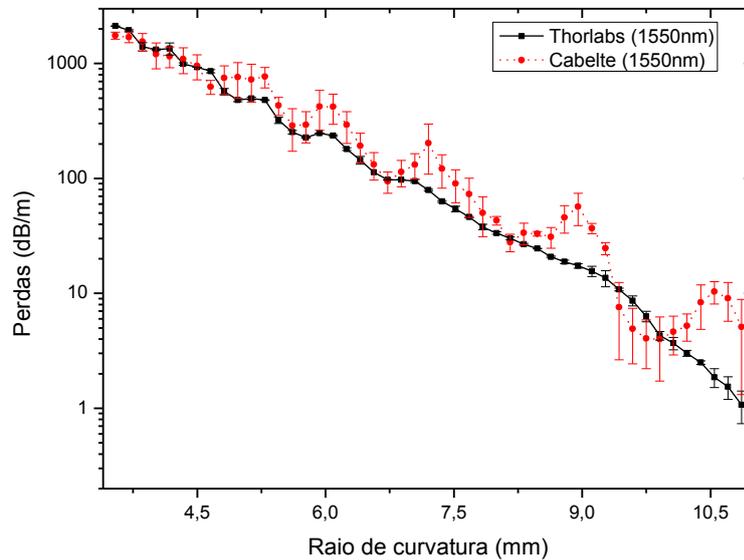


Figura 3-17 Gráfico de atenuação média com o desvio padrão associado, em função do raio de curvatura para cada tipo de tipo de fibra para um comprimento de onda de 1550nm. As linhas são apenas um guia visual.

Mediu-se também as oscilações das perdas de sinal óptico em função do tempo para os mesmos raios de curvatura de fibra óptica. Na Figura 3-18 é apresentado um gráfico da diferença entre o valor de perdas médio e o valor de perdas medido instantaneamente para um raio de curvatura de 6,25 mm das fibras ópticas da Cabelte® e da Thorlabs®. Depois da análise do gráfico é possível verificar que as oscilações têm uma amplitude mais elevada para a fibra fabricada pela Cabelte®. Através desta comparação é possível concluir que a existência da interface ar- acrílato provoca a maior parte das oscilações de atenuação no sinal óptico.

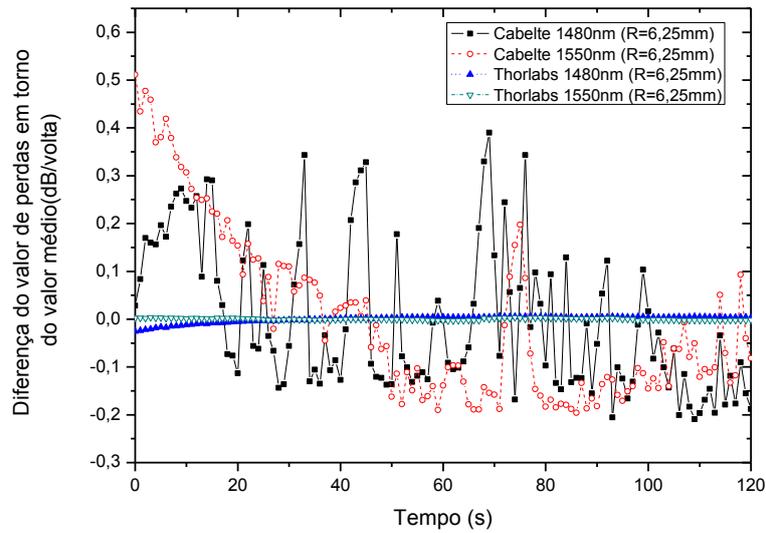


Figura 3-18 Gráfico da diferença entre perda média e perda instantânea em função do tempo, para cada tipo de fibra, para um raio de curvatura de fibra de 6,25mm e para um sinal óptico com comprimento de onda de 1550 e 1480nm. As linhas são apenas guias visuais.

Em síntese, as oscilações podem ser originadas devido à reflexão de modos de fuga em duas interfaces distintas como já foi referido no capítulo anterior. Com esta informação e através da verificação experimental destas oscilações em fibras com diferentes morfologias, pode-se afirmar que os modos de fuga são reflectidos na sua maioria na interface entre o revestimento em acrílato e o ar.

Capítulo 4 | Modelos Analíticos

Neste capítulo, são apresentados os modelos teóricos analíticos utilizados para modelizar as perdas em fibras ópticas do tipo monomodo sujeitas a curvaturas com raios reduzidos.

O estudo inicia-se com o primeiro modelo a ser publicado, o modelo de Marcuse. De seguida, apresenta-se o modelo de perdas de Renner, que é baseado no modelo de Marcuse mas, considera o revestimento da fibra óptica como camada externa. Posteriormente, aborda-se uma correcção elástica e óptica dos modelos. Na parte final apresenta-se os ajustes dos modelos descritos comparando-os aos dados experimentais obtidos no capítulo 3.

4.1 Introdução

Desde 1960, muitos modelos têm sido desenvolvidos à volta do mecanismo de perdas resultante de curvaturas, mas nenhum foi completamente validado. Isto deve-se ao facto da maioria dos modelos desenvolvidos conterem aproximações próprias que são necessárias para se obter resultados, tais como, bainha semi-infinita, curvaturas com diâmetros elevados, entre outras [Buck04]. Os modelos devem-se agrupar em três categorias: modelos de onda directos, onde a equação de onda é resolvida analiticamente ou numericamente sob vários pressupostos; modelos de onda indirectos, envolvendo transformações das fronteiras, isto é, criando perfis de índice de refração equivalentes a uma fibra recta; e modelos de propagação de raios, onde as perdas são determinadas através de coeficientes de reflexão de *Fresnel* modificados [Buck04].

4.2 Modelo de Marcuse

Dietrich Marcuse, em 1975, derivou e apresentou uma expressão para as perdas induzidas por curvaturas em fibras ópticas. A fórmula foi deduzida através da distribuição do campo dos diferentes modos que circulam na bainha, numa fibra sujeita a curvatura [Marcuse76]. Marcuse considerou que a fibra era composto por um núcleo, de raio a , e uma bainha com dimensão infinita.

Usando a geometria da Figura 4-1, a equação de onda para o campo eléctrico, na direcção z , na bainha da fibra é [Buck04]:

$$\nabla^2 E_{zb} + n_b^2 k_0^2 E_{zb} = 0 \quad (4-1)$$

Considerando

$$E_{zb}(r, \varphi) = AH_\rho^{(2)}(n_b k_0 r) \exp(i\varphi - i\rho\varphi) \quad (4-2)$$

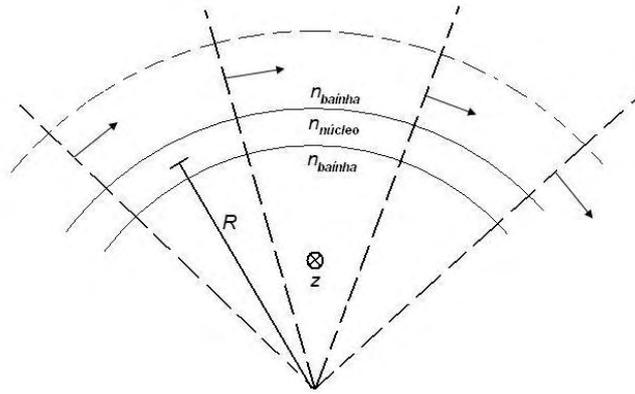


Figura 4-1 Geometria de uma guia de onda curvado [Buck04].

onde $H_\rho^{(2)}$ é a função de Henkel de segundo tipo e ordem ρ , E_{zb} é o campo eléctrico na direcção z na bainha, n_b é o índice de refração da bainha e k_0 é o vector de onda no vazio. Considerando que os raios de curvatura são grandes em relação ao diâmetro da fibra, pode-se definir que o campo eléctrico na bainha é dado por:

$$E_{zb}(r, \varphi) \approx A \sqrt{\frac{2}{\pi n_b k_0 r} \exp\left[\frac{i(1+2\rho)\pi}{4}\right] \exp(-in_b k_0 r) \exp(i\varphi - i\rho\varphi)} \quad (4-3)$$

onde r e φ são as coordenadas cilíndricas definidas na Figura 4-1.

Considerando a constante de propagação, β_z , como

$$\rho = \beta_z R \quad (4-4)$$

e considerando ainda as equações de campo acima descritas, pode-se deduzir as perdas, através da integração radial do vector *poyniting* sobre a superfície de um cilindro longo e infinito, com um raio elevado e concêntrico com a curvatura. Portanto, pode-se chegar à expressão deduzida por Marcuse para as perdas de sinal numa fibra óptica do tipo monomodo, com uma curvatura de raio R :

$$\alpha_b = 4.343 \frac{\sqrt{\pi} k^2 \exp\left(-\frac{2\gamma^3 R}{3\beta_z^2}\right)}{2R^{1/2} \gamma^{2/3} V^2 K_{m-1}(\gamma a) K_{m+1}(\gamma a)} \quad (4-5)$$

onde α_b é a perda de sinal expressa em *dB/m*, K são as funções modificadas de Bessel, e m é o número de modo. A frequência normalizada, V , é definida como:

$$V = \frac{2\pi a (n_n^2 - n_b^2)^{1/2}}{\lambda} \quad (4-6)$$

As fracções de sinal propagado no núcleo e na bainha podem ser expressas como:

$$\kappa = \sqrt{n_n^2 k_0^2 - \beta_z^2} \quad (4-7)$$

$$\gamma = \sqrt{\beta_z^2 - n_b^2 k_0^2} \quad (4-8)$$

A constante de propagação pode ser determinada usando a seguinte expressão [Harris86]:

$$\beta_z = n_b \kappa (1 + b\Delta) \quad (4-9)$$

Para $\Delta \ll 1$

$$\Delta = \frac{(n_n^2 - n_b^2)}{2n_n^2} \quad (4-10)$$

onde b é a fracção de campo do modo *HE11* no núcleo em relação ao campo total.

A Figura 4-2 apresenta uma curva de atenuação típica, calculada analiticamente através da expressão de Marcuse (4-5), para um sinal óptico com um comprimento de onda de 1550nm.

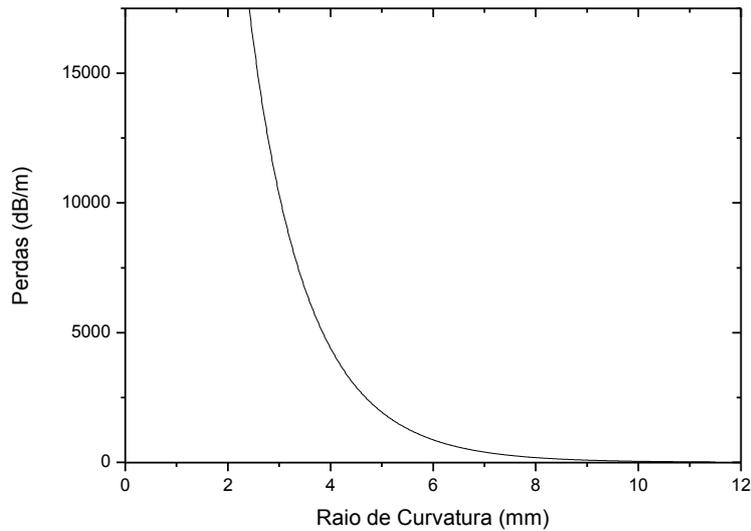


Figura 4-2 Curva de perdas calculada analiticamente através da expressão de Marcuse para um sinal óptico com um comprimento de onda de 1550nm ($a = 4,1 \mu m$, $n_n = 1,4447$, $n_b = 1,440$)

Apesar de todo este formalismo, a expressão de perdas proposta por Marcuse foi alterada e ajustada por outros autores, devido às suas limitações. No próximo subcapítulo aborda-se um modelo que tem como por base a formula simples de perdas de Marcuse, mas que contempla mais uma camada na fibra óptica.

4.3 Modelo de Renner

Hangen Renner, em 1992, publicou uma expressão analítica das perdas para fibras ópticas do tipo monomodo sujeitas a curvaturas apertadas em função do seu raio de curvatura [Renner92].

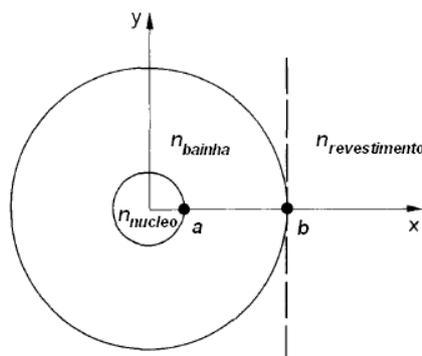


Figura 4-3 Ilustração do corte longitudinal da fibra óptica considerada no modelo de Renner. Foi considerado uma fibra com uma camada de revestimento de diâmetro infinito.

A fórmula foi deduzida através da equação de onda para uma estrutura equivalente a uma curvatura de uma fibra com três camadas, como podemos ver na Figura 4-3. Foi considerada uma transformação de fronteiras de forma a alterar a interface entre a bainha e o revestimento como plana. Esta simplificação permitiu obter a expressão para as perdas de sinal numa fibra óptica sujeita a curvaturas apertadas como um produto entre a expressão de perdas com uma bainha infinita, α_b (formula de Marcuse), e um termo que contempla as oscilações devido à terceira camada [Olszewski06]:

$$\alpha_{bc} = \alpha_b \frac{2(Z_r Z_b)^{1/2}}{(Z_r + Z_b) - (Z_r - Z_b) \cos(2\theta_0)} \quad (4-11)$$

onde:

$$Z_b = k_0^2 n_b^2 \left(\frac{1+2b}{R} \right) - \beta_z^2, \quad Z_r = k_0^2 n_r^2 \left(\frac{1+2b}{R} \right) - \beta_z^2 \quad (4-12)$$

$$\theta_0 = \frac{\gamma^3 R}{3k_0^2 n_r^2} \left(\frac{R_c}{R} - 1 \right)^{3/2} \quad (4-13)$$

$$Rc = \frac{2k_0^2 n_b^2 b}{\gamma^2} \quad (4-14)$$

em que b é o diâmetro da bainha, Rc é o raio crítico e n_r é o índice de refração do revestimento. A Figura 4-4 apresenta uma curva típica calculada analiticamente através da expressão de Renner (4-11) para um sinal com um comprimento de onda de 1550nm.

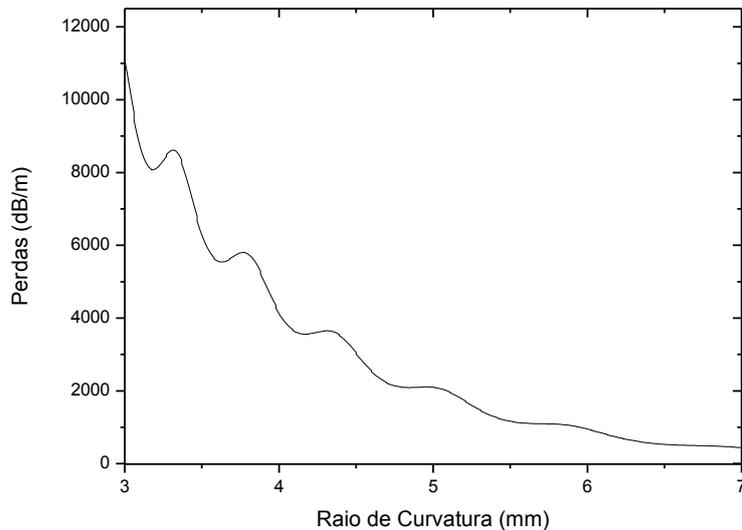


Figura 4-4 Curva de perdas calculada analiticamente através da expressão de Renner para um sinal com um comprimento de onda de 1550nm ($a = 4,1 \mu m$, $b = 62,5 \mu m$, $n_n = 1,4447$, $n_b = 1,440$, $n_r = 1,6$).

4.4 Correção considerando os efeitos elasto-ópticos

Alguns autores sugerem que os modelos de Marcuse de perdas de sinal óptico, em fibra sujeitas a curvaturas apertadas, necessitam de sofrer uma correção tendo em conta o efeito elasto-óptico [Sharma84];[Renner92];[Schermer07];

Inicialmente, é necessário transformar a circularidade da fibra óptica curvada numa fibra equivalente mas rectilínea, isto é, numa fibra que não esteja dobrada, através da técnica de projecção conforme. Pode-se ver este processo esquematicamente na Figura 4-5. Esta transformação de coordenadas, permite que a fibra dobrada seja representada por uma equivalente rectilínea, com um perfil de índice de refração modificado, $n'(x, y)$:

$$n' = n_{material} \exp\left(\frac{x}{R}\right) \approx n_{material} \left(1 + \frac{x}{R}\right) \quad (4-15)$$

onde $n_{material}(x, y)$ é a distribuição de perfil do índice de refração numa fibra curvada e o termo exponencial contabiliza o aumento do tamanho do caminho óptico ao longo da fibra. Foram consideradas curvaturas muito superiores ao diâmetro da fibra óptica, para se poder aproximar a expressão (4-16). A distribuição de perfil do índice de refração sofreu uma rotação como se pode ver pela Figura 4-6.

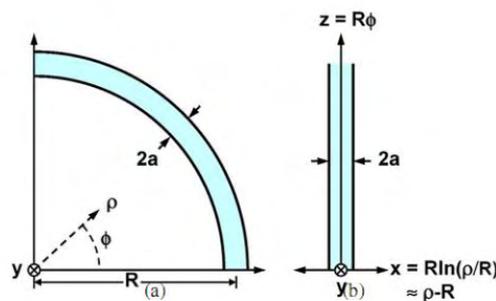


Figura 4-5 (a) Esquema da circularidade duma fibra com curvatura e (b) o equivalente, mas em fibra recta, depois de aplicada a técnica [Schermer07].

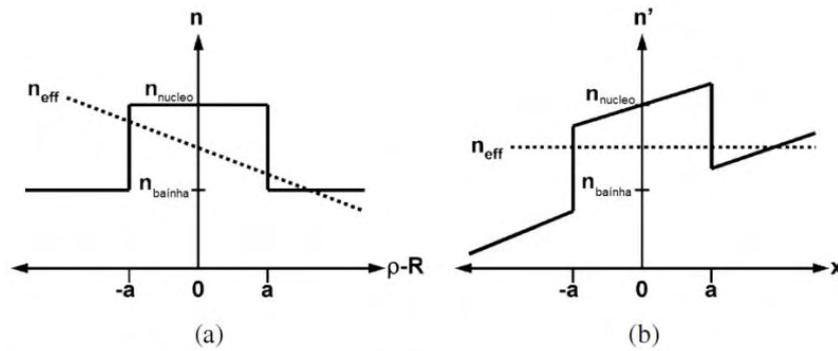


Figura 4-6 (a) Distribuição do índice de refração de uma fibra dobrada sem contemplar a deformação e (b) a distribuição equivalente, para em fibra recta, depois de aplicada a correcção. Pode-se visualizar que o índice de refração junto à curvatura fica com um valor mais baixo [Schermer07].

Considerando agora a modificação que existe no índice de refração da fibra quando dobrada, devido ao efeito elásto-óptico. A fibra óptica quando curvada possui uma secção côncava e uma secção convexa. Nesta situação, a secção côncava sofre compressão enquanto a secção convexa sofre tracção. Pode-se expressar o índice de refração da fibra óptica, quando sujeito a este efeito, através de [Schermer07]:

$$n_{material} = n \left[1 - \frac{n^2 x}{2R} (P_{12} - \nu P_{11} + P_{12}) \right] \quad (4-16)$$

onde $n(x, y)$ é o índice de refração para a fibra recta, ν é o coeficiente de Poisson, P_{11} e P_{12} são as componentes do tensor elásto-óptico. Mais uma vez, o índice de refração é modificado com a curvatura, mas neste caso, o índice de refração decresce da parte de fora da curvatura.

Combinando (4-16) e (4-17), pode-se definir um raio equivalente, R_{eff} , de curvatura:

$$R_{eff} = \frac{R}{1 - \frac{n^2}{2} [P_{11} - \nu(P_{11} - P_{12})]} \quad (4-17)$$

para a fibra de Sílica, $R_{eff}/R \approx 1.28$ [Schermer07]. Como se pode observar o efeito da deformação mecânica a que a fibra é exposta contraria os efeitos da curvatura.

4.5 Verificação dos Modelos

Para a verificação dos modelos decidiu-se utilizar somente os dados experimentais de perdas obtidas com curvaturas completas de fibra óptica. A razão desta escolha provém do facto destes dados serem mais precisos pois utilizou-se um suporte mais controlável na aplicação de dobragens na fibra (Figura 3-9).

As expressões foram ajustadas aos dados experimentais, com a subrotina *fminsearch* do Matlab®. Esta subrotina permite ajustar uma função aos dados experimentais através da minimização do erro que o utilizador definir. O erro do ajuste foi definido como [Bevington03]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{\frac{(y_i - y_{ajuste})^2}{\sigma_i^2}}}{n-p-1} \quad (4-18)$$

onde y_i são os dados experimentais, y_{ajuste} os dados do ajuste, σ_i o desvio padrão dos dados experimentais, n o numero de dados a ajustar e p o número de variáveis de ajuste. Os parâmetros ajustados para cada modelo foram o índice de refração do núcleo (n_n), o índice de refração da bainha (n_b), o índice de refração do revestimento polimérico (n_r) e o coeficiente do raio equivalente (R_{eff}/R).

De seguida, apresenta-se os ajustes efectuados aos dados de atenuação obtidos para a fibra da Corning®. Para esta fibra, utilizaram-se os dados referentes à experiencia onde se usou o polarizador, pois estes dados continham menos oscilações, como já foi demonstrado, e portanto um menor erro experimental. Na Figura 4-7 e Figura 4-8 são apresentados os gráficos com os dados experimentais e dados do ajuste efectuados para um sinal óptico com um comprimento de onda de 1480 e 1550 nm respectivamente. Analisando as figuras pode-se observar que o ajuste traduz o mesmo comportamento dos dados experimentais. Observa-se também que o modelo de Renner é o que traduz melhor o comportamento de atenuação. Para o sinal óptico de entrada com comprimento de onda de 1480 nm foi alcançado um ajuste com um χ^2 mais reduzido. Isto é explicado, pelo valor do desvio padrão associado aos dados experimentais, que é, neste caso, mais elevado.

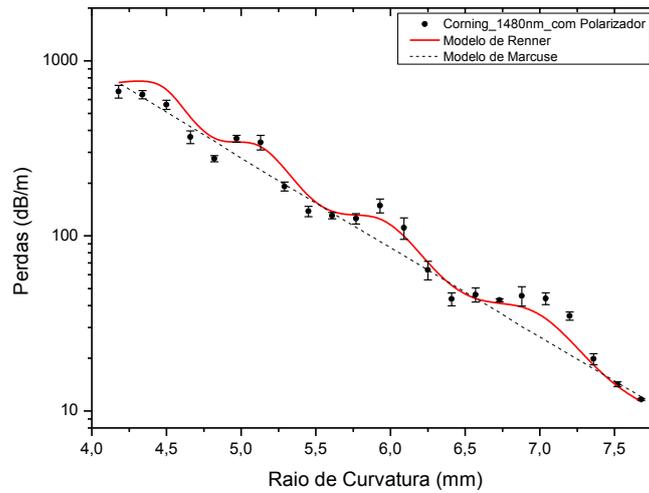


Figura 4-7 Gráfico das perdas obtidas para a fibra fabricada pela Corning® com um sinal de entrada polarizado com um comprimento de onda de 1480nm ajustado com o modelo de Renner ($\chi^2 = 0.78$) e com o modelo de Marcuse ($\chi^2 = 0.78$).

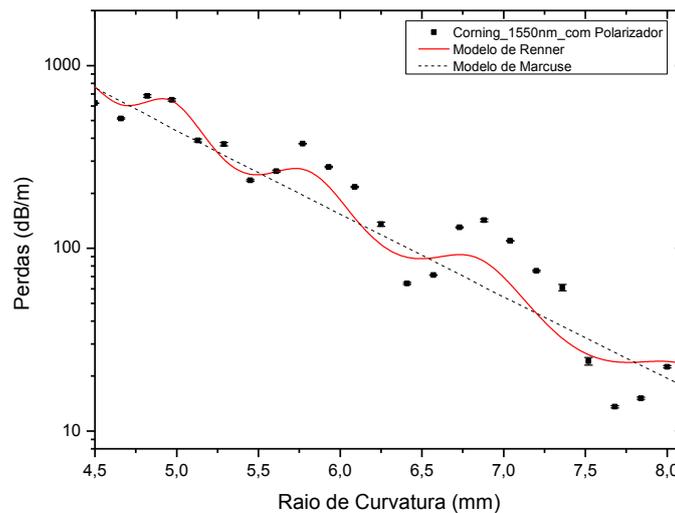


Figura 4-8 Gráfico das perdas obtidas para a fibra fabricada pela Corning® com um sinal de entrada polarizado com um comprimento de onda de 1550nm ajustado com o modelo de Renner ($\chi^2 = 12.58$) e com o modelo de Marcuse ($\chi^2 = 16.35$).

Na Figura 4-9 e na Figura 4-10 são apresentados os gráficos com os dados experimentais e de ajuste de perdas obtidas para a fibra fabricada pela Cabelte® para os comprimentos de onda de 1550 e 1480nm respectivamente. Observa-se que o modelo de Renner é o que traduz o comportamento dos dados experimentais com erro de ajuste menor. Como se pode verificar também, o erro dos ajustes para o sinal óptico com um

comprimento de onda de 1550nm é o menor já apresentado indicando que o modelo traduz o comportamento dos dados experimentais.

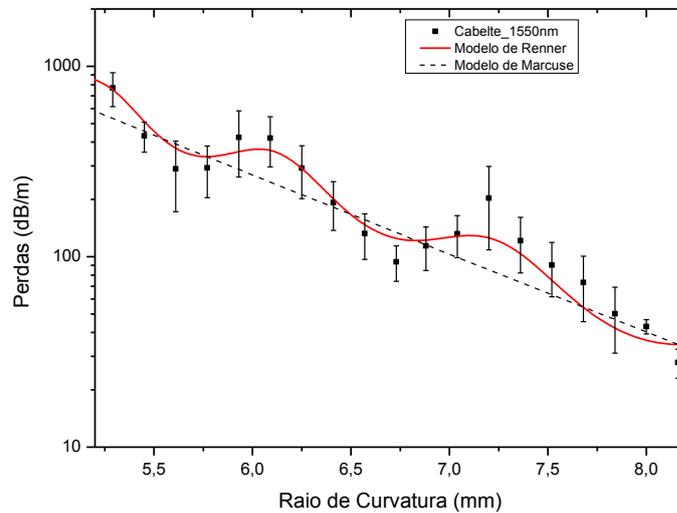


Figura 4-9 Gráfico das perdas obtidas para a fibra fabricada pela Cabelte® com um sinal de entrada polarizado com um comprimento de onda de 1550nm ajustado com o modelo de Renner ($\chi^2 = 0.22$) e com o modelo de Marcuse ($\chi^2 = 0.28$).

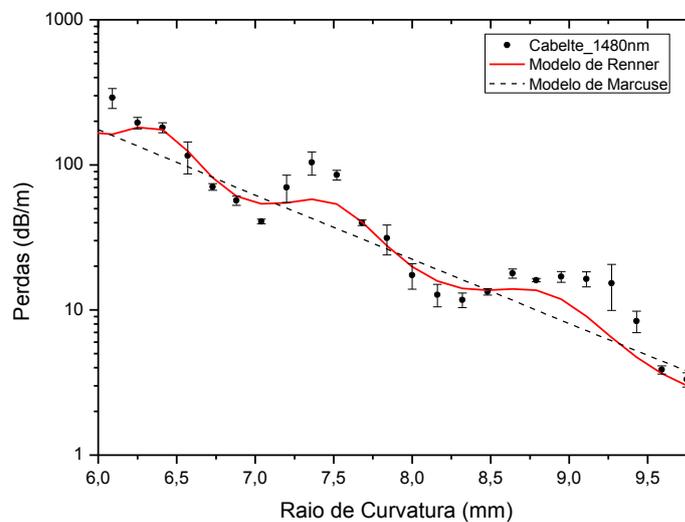


Figura 4-10 Gráfico das perdas obtidas para a fibra fabricada pela Cabelte® com um sinal de entrada polarizado com um comprimento de onda de 1480nm ajustado com o modelo de Renner ($\chi^2 = 0.82$) e com o modelo de Marcuse ($\chi^2 = 1.86$).

Na Figura 4-11 e Figura 4-12 são apresentados os resultados dos ajustes executados para os dados experimentais perdas obtidas para a fibra fabricada pela Thorlabs®. Verifica-se que o modelo de Renner traduz o comportamento experimental com um erro

de ajuste menor. Contudo, os erros de ajuste de ambos os modelos são aproximados. Esta proximidade deve-se ao facto dos dados de atenuação possuírem bandas ou oscilações mais ténues em relação aos dados das fibras de outros fabricantes. E como tal, o modelo de Marcuse, que não contempla mais uma camada de revestimento polimérico, é uma boa aproximação e pode ser suficiente para modelizar este tipo de sistemas.

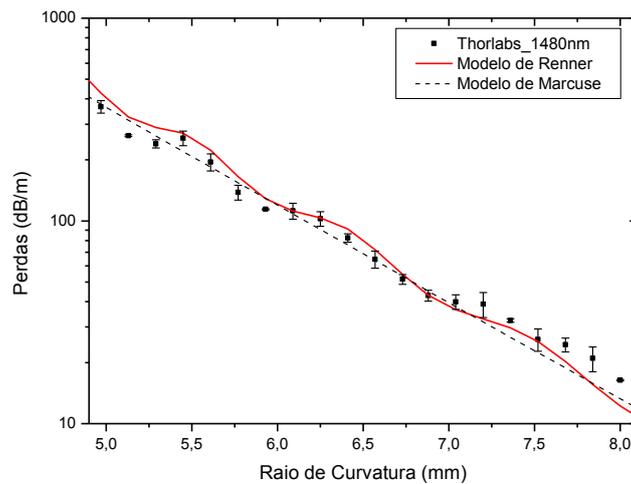


Figura 4-11 Gráfico das perdas obtidas para a fibra fabricada pela Thorlabs[®] com um sinal de entrada polarizado com um comprimento de onda de 1480nm ajustado com o modelo de Renner ($\chi^2 = 1.96$) e com o modelo de Marcuse ($\chi^2 = 2.02$).

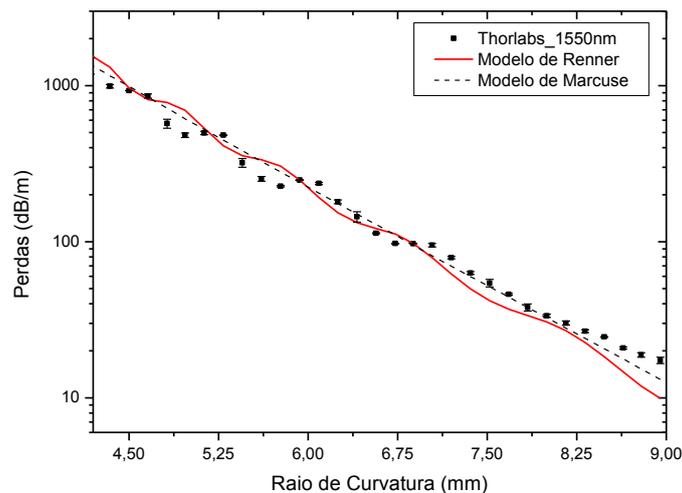


Figura 4-12 Gráfico das perdas obtidas para a fibra fabricada pela Thorlabs[®] com um sinal de entrada polarizado com um comprimento de onda de 1550nm ajustado com o modelo de Renner ($\chi^2 = 3.62$) e com o modelo de Marcuse ($\chi^2 = 4.85$).

Em síntese, através da modelização dos dados experimentais, verificou-se que os modelos apresentados, com as devidas correcções elasto-ópticas, traduzem o comportamento de atenuação em fibras ópticas curvadas. Observou-se que o modelo de Renner traduz com um menor erro o comportamento de todas as fibras em teste. Na Figura 4-13 é apresentado em forma de tabela os parâmetros de todos os ajustes efectuados.

Fibra	λ (nm)	Modelo Utilizado	Parâmetros do ajuste				Erro do ajuste
			n_n	n_b	n_r	R_{eff}/R	χ^2
Corning®	1480	Marcuse	1.4469	1.4414	-	1.35	0.98
		Renner	1.4440	1.4388	1.7397	1.32	0.78
	1550	Marcuse	1.4460	1.4405	-	1.40	16.35
		Renner	1.4441	1.4385	1.8999	1.35	12.58
Thorlabs®	1480	Marcuse	1.4442	1.4388	-	1.35	2.02
		Renner	1.4500	1.4444	1.5989	1.26	1.96
	1550	Marcuse	1.4442	1.4388	-	1.40	4.85
		Renner	1.4487	1,4433	1,5959	1,40	3.62
Cabelte®	1480	Marcuse	1.4440	1.4388	-	1.35	1.26
		Renner	1.4489	1.4436	1.9000	1.27	0.82
	1550	Marcuse	1.4444	1.4391	-	1.40	0.28
		Renner	1.4515	1.4461	1.9000	1.29	0.22

Figura 4-13 Tabela com os parâmetros de todos os ajustes efectuados aos dados experimentais de atenuação.

Comparando os parâmetros ajustados com os parâmetros reais da fibra SMF-28™, da Corning® pode-se verificar que são aproximadamente os mesmos à excepção do índice de refração do revestimento. Os parâmetros reais da fibra podem ser visualizados na tabela da Figura 4-14.

Parâmetro da fibra SMF28™	
n_n	1,4504
n_b	1,4447
n_r	1,4786

Figura 4-14 Tabela com os parâmetros da fibra padrão do tipo SMF28™ da Corning® [Wang07].

Capítulo 5 | **Implicações das curvaturas em redes ópticas**

Neste capítulo apresenta-se sucintamente as consequências das curvaturas, nomeadamente o aquecimento a que a fibra está sujeita. Inicialmente aborda-se o tema central do projecto onde este estudo está inserido, o efeito fusível. Seguidamente, mostra-se alguns dos resultados dos testes já efectuados, onde se pode verificar o aquecimento da fibra.

5.1 Efeito Fusível

Como já foi referido, o aumento da potência óptica que circula nas fibras ópticas combinada com as dobragens ou curvaturas provocam um aumento da temperatura local do revestimento da fibra óptica. Este aumento causa a degradação da fibra e pode ser suficiente para induzir o efeito fusível na fibra óptica. Este fenómeno, observado pela primeira vez em 1987, pode causar, a destruição da fibra ao longo de vários quilómetros [Seo03]. Este efeito é iniciado pelo aumento local da temperatura e basicamente provoca a fusão da sílica no núcleo. Este mecanismo é propagado ao longo da fibra emitindo luz visível. Depois de propagado, a fibra, na região do núcleo, exhibe uma espécie de bolhas, como se pode observar pela Figura 5-1. Este fenómeno continua a propagar-se até que a fonte óptica seja desligada ou então até que a potência óptica seja inferior ao valor de limite do fenómeno.

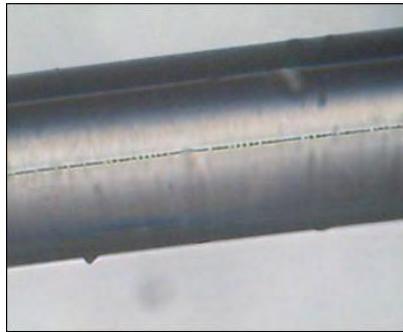


Figura 5-1 Foto de uma fibra óptica vista ao microscópico depois de ter propagado o efeito fusível.

De forma a entender o aquecimento em fibras ópticas quando sujeitas a curvaturas fez-se alguns testes experimentais usando fontes ópticas de alta potência.

5.2 Verificações experimentais

Na Figura 5-2 apresenta-se a montagem experimental utilizada para verificar o aquecimento da fibra quando transmite sinais de alta potência e é sujeita a curvaturas apertadas. O sinal óptico com um comprimento de onda de 1550 nm é gerado com uma LASER é pré-amplificado com um EDFA (Amplificador de fibra dopada com érbio) e injectado na fibra óptica. A fibra possui uma curvatura circular, com um raio de curvatura variável. A potência do sinal óptico à saída da fibra é analisada com um medidor de potência (*Agilent 8153A*). O dispositivo para impor a curvatura na fibra óptica é mostrado na Figura 3-9. Para se determinar a temperatura máxima do revestimento utilizou-se uma câmara de infravermelhos (ThermaCAM™ Flir i40). Neste teste a fibra óptica utilizada foi a SMF28 da Corning®.

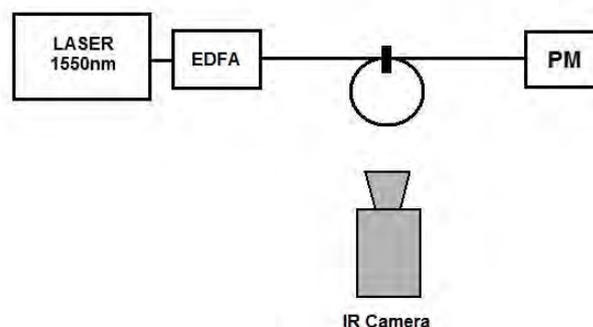


Figura 5-2 Esquema da montagem experimental utilizada.

Inicialmente, utilizou-se um sinal óptico de entrada na fibra com uma potência de 2mW com o objectivo de medir a atenuação da curvatura. De seguida, foram utilizados sinais com potências de 1W e 0.5 W para se determinar a temperatura máxima que o revestimento da fibra atinge. A fibra foi exposta a esses sinais de alta potência durante 90 segundos para cada raio de curvatura medido, assegurando que o regime estacionário fosse atingido.

A Figura 5-3 apresenta os dados experimentais da atenuação média, do sinal óptico, medida para diferentes raios de curvatura da fibra óptica.

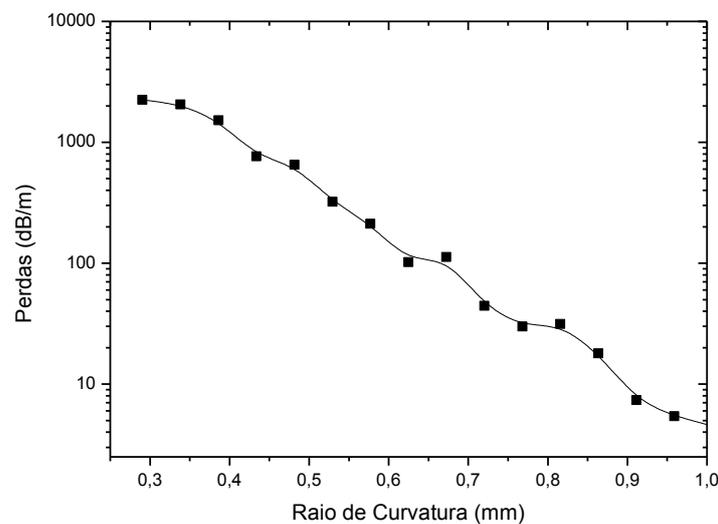


Figura 5-3 Atenuação média do sinal óptico em função do raio de curvatura. A linha serve apenas como guia visual.

Pode-se observar algumas imagens retiradas pela câmara de infravermelho na Figura 5-4. Pelas imagens é possível verificar que o aquecimento da fibra é mais intenso na extremidade da curvatura oposta à entrada do sinal óptico.

Durante os registos da evolução temporal da temperatura máxima do revestimento ao longo do tempo, observou-se que a fibra aquece até uma determinada temperatura de equilíbrio, atingindo-se depois um regime estacionário. Na Figura 5-5 apresenta os dados da média de temperaturas máximas do revestimento da fibra óptica em função do raio de curvatura obtidas para sinais ópticos com 0.5 e 1 W de potência.

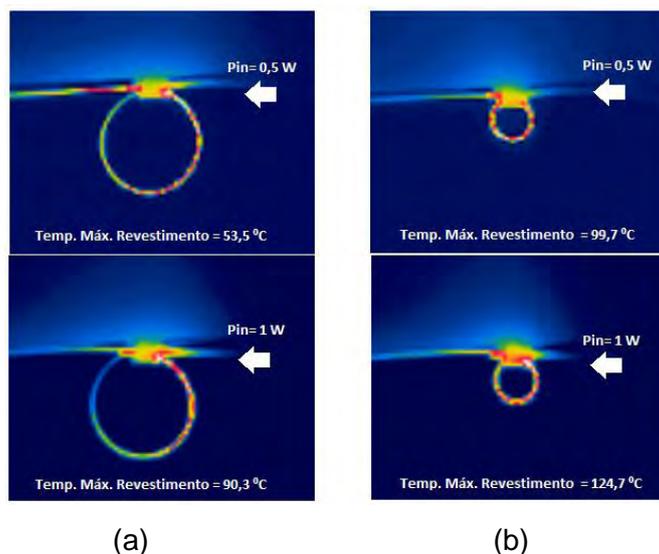


Figura 5-4 Imagens obtidas pela câmara de infravermelhos da fibra óptica quando sujeita a curvaturas com raios de curvatura de 6,3mm (a) e 2,4mm (b) durante o regime estacionário. Na imagem é indicado a direcção do sinal assim como a potência de entrada (Pin) e a temperatura máxima do revestimento.

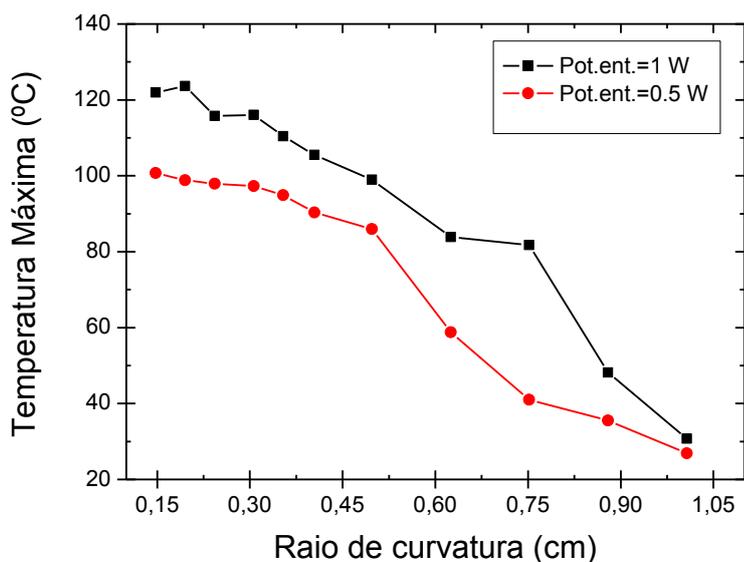


Figura 5-5 Temperatura máxima de revestimento da fibra em função do raio de curvatura. As linhas servem apenas de guias visuais.

A temperatura do revestimento aumenta à medida que o raio de curvatura da fibra óptica diminui, que é consistente com os resultados experimentais de atenuação apresentados na Figura 5-3.

Foi realizado outro teste experimental, idêntico ao descrito anteriormente, mas com uma fibra óptica sem quaisquer camadas de revestimento. Neste teste a temperatura da fibra não sofreu alteração. A partir destes resultados prova-se que a radiação de fuga,

que provém da existência de uma curvatura na fibra óptica, provoca o aquecimento da camada de revestimento. Este aquecimento estende-se ao longo de toda a fibra óptica através de condução térmica.

Estes resultados mostram que uma fibra óptica, com uma curvatura, que transmita um sinal de alta potência, aquece. Para uma potência injectada de 0.5 W, a temperatura de revestimento da fibra pode ultrapassar os 85°C, que é o limite máximo de funcionamento especificado pelo fabricante. Mostrou-se assim como é imperativo a compreensão deste fenómeno para tentar evitar a todo o custo a deterioração e destruição das fibras ópticas.

Capítulo 6 | **Considerações Finais**

6.1 Conclusões

Durante esta dissertação, foi apresentado o estudo relativo à atenuação do sinal óptico propagado em fibras, do tipo monomodo, sujeitas a curvaturas apertadas.

Primeiro foi verificado experimentalmente o comportamento da atenuação do sinal óptico. Observou-se que a atenuação aumenta significativamente com a diminuição do diâmetro de curvatura de fibra óptica. Observou-se ainda que o gráfico das perdas de sinal em função do diâmetro de curvatura continha bandas. Estas bandas são explicadas pelo fenómeno de reflexão de modos de fuga na interface interior e exterior do revestimento polimérico.

Por outro lado, observou-se que quanto maior for o comprimento de onda do sinal óptico de entrada, maior será a atenuação do sinal óptico. Nos espectros de atenuação do sinal óptico verificou-se que existia uma banda oscilante irregular em função do comprimento de onda.

Foi também detectado experimentalmente que a atenuação revela-se oscilante ao longo do tempo, para raios menores de curvatura de fibra óptica. A amplitude destas oscilações aumenta à medida que diminuimos o diâmetro de curvatura da fibra óptica. No entanto, se for utilizado um sinal de entrada polarizado, estas oscilações diminuem.

Foi também verificado que a morfologia dos revestimentos das fibras ópticas influencia a atenuação do sinal óptico quando a fibra está sujeita a curvaturas apertadas. Foram efectuados testes em fibras ópticas com e sem revestimento com um diâmetro de 900 μm que revelaram-se importantes. Quando se utilizou uma fibra óptica com este tipo de

revestimento as bandas no gráfico de atenuação de sinal em função do raio de curvatura diminuíram consideravelmente. Nesta fibra também diminuíram as oscilações da atenuação ao longo do tempo para os diâmetros de curvatura mais pequenos.

Na segunda parte desta dissertação modelizou-se os dados de perdas de sinal óptico experimentalmente recolhidos quando as fibras eram sujeitas a curvaturas apertadas. Verificou-se que os modelos de Marcuse e de Renner, com correcções elástico-ópticas, traduzem o comportamento de atenuação em fibras ópticas curvadas. Apesar do modelo de Renner apresentar um menor erro de ajuste, o modelo de Marcuse apresenta-se como uma boa aproximação aos dados experimentais, nomeadamente para fibras com revestimento plástico opaco.

Na terceira e última parte desta dissertação foi mostrado como a atenuação do sinal óptico em fibras com curvaturas apertadas é consistente com os dados de temperatura do revestimento. Mostrou-se também que uma fibra óptica com uma curvatura apertada que contenha um sinal óptico com uma potência de 0,5 W pode aquecer, atingindo temperaturas superiores a 85 °C, diminuindo drasticamente o seu tempo de vida útil e aumentando a probabilidade de iniciar o efeito fusível, que pode destruir completamente a fibra óptica. Comprovou-se ainda que o aquecimento da fibra provém unicamente do aquecimento do revestimento.

6.2 Contribuições no âmbito da dissertação

Este estudo deu origem às seguintes publicações:

André Martins, Ana M. Rocha, B. Neto, A. L. J. Teixeira, M. Facão, R. N. Nogueira, M. J. Lima, P.S. André, *Modeling of Bend Losses in Single-Mode Optical Fibers*, 7th Conference on Telecommunications, paper: 108, Santa Maria da Feira, Portugal, Maio, 2009.

Ana M. Rocha, B. Neto, **André Martins**, G. Incerti, D. Forin, G. Bellefi, M. Facão, J. L. Pinto, A. L. J. Teixeira, R. N. Nogueira, M. J. Lima, P.S. Andre, *Thermal effects in bend SMF fiber with high propagated power*, NOC/OC&I 2009, pp. 5-10, Valladolid, Espanha Junho, 2009.

Ana M. Rocha, **André Martins**, P.S. André, M. Facão, *Effect of Bending in SMF Fibers under High Power*, 11th International Conference on Transparent Optical Networks, paper: Th.B2.1, Ponta Delgada, Portugal, Junho, 2009

André Martins, Ana M. Rocha, P.S. André, Efeito de potências ópticas elevadas em fibras sujeitas a curvaturas apertadas, Conferencia Engenharia 2009, Novembro 2009

André Martins, Ana M. Rocha, P.S. André, *High power effects on fiber optic connectors*, IMOC 2009 - Internacional Microwave and Optoelectronics Conference,

Também resultaram deste trabalho as seguintes publicações:

Ana M. Rocha, M. Facão, **André Martins**, P.S. André, *Simulation of Fiber Fuse Effect Propagation*, 3rd ICTON - 'Mediterranean Winter' 2009, submetido para avaliação.

P. S. André, M. Facão, A. M. Rocha, P. Antunes, **A. Martins**, *Evaluation of the Fuse Effect Propagation in Networks Infrastructures with Different Types of Fibers*, OFC/NFOEC 2010 - Optical Fiber Communication Conference and Exposition, submetido para avaliação.

6.3 Sugestões de trabalho futuro

No âmbito das fibras com curvaturas apertadas pode-se efectuar trabalhos em duas áreas distintas: estudar a atenuação do sinal óptico e estudar a temperatura.

Como foi demonstrado, a atenuação de sinal em fibras ópticas com curvaturas apertadas é muito sensível ao raio de curvatura. Portanto, uma sugestão seria otimizar o sistema de selecção de diâmetros para tentar melhorar a sua precisão. Outras das sugestões, neste âmbito seria o de observar o comportamento da atenuação para outro tipo de fibras, nomeadamente fibras que surgiram recentemente no mercado optimizadas para baixa atenuação quando curvadas.

Por outro lado, era importante também estudar mais modelos de atenuação de sinal óptico, nomeadamente modelos que considerem todas as camadas de uma fibra óptica.

Foi também demonstrado que uma fibra óptica pode facilmente atingir temperaturas máximas de funcionamento quando sujeitas a sinais de alta potência. Portanto, seria importante definir raios de curvatura mínimos de segurança em função da potência óptica injectada.

Referencias Bibliográficas

- [Agrawal02] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd ed. Wiley, 2002
- [Bevington03] Philip R. Bevington, D. Keith Robinson, *Data Reduction and error analysis for the physical sciences*, 3rd ed, McGraw Hill, 2003
- [Buck04] J. A. Buck, *Fundamentals of optical fibers*, 2nd ed., Wiley, 2004
- [Costa05] J. A. Costa, *Transparências de comunicações ópticas*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, ano lectivo 2005/2006.
- [Dutton98] H.J.R. Dutton, *Understanding Optical Communications*, 1st ed., IBM, 1998
- [FibreSystems03] P. Matthijsse , *Fibre bends jeopardize long-wavelength traffic*, FibreSystems Europe magazine, Maio 2003
- [Faustini97] Luca Faustini and Giuseppe Martini, *Bend Loss in Single-Mode Fibers*, , J. Lightwave Technology , Vol. 15, No.4, April 1997
- [Harris86] A. J. Harris, P. F. Castle, *Bend Loss Measurements on High Numerical Aperture Single-Mode Fibers as a function of Wavelength and Bend Radius*, J. Lightwave Technology , Vol. LT-40, No.1, January 1986
- [Hecht91] Eugene Hecht , *Óptica*, , 1991, Fund. Calouste Gulbenkia
- [Hyun05] Sung Hyun Nam and Shizhuo Yin, *High-temperature sensing using Whispering Gallery Mode Resonance in Bent Optical Fibers*, IEEE J. Phot. Tech. Lett. Vol.17, no.11, November 2005
- [IEC] Internacional ElectroTechnical Commission, *Optical fibres- Part1-47: Measurement methods and test procedures – Macrobending loss*, IEC 60793-1-47, Edition 3.0, 2009
- [JDSU] JDSU, *Macrobend detection using an OTDR*, <http://www.jdsu.com/product-literature/macdet.wp.fop.tm.ae.pdf>, 10 de Outubro de 2009
- [Kuzyk07] M. G. Kuzyk, *Polymer Fiber Optics: Materials, Physics and Applications*, 1st ed., CRC, 2006

- [Marcuse76] D. Marcuse, *Curvature loss for optical fibers*, *J. Opt. Soc. Amer. B*, vol. 66, pp. 216-220, Mar 1976.
- [Neat07] R. Neat, *International standards activity related to high power in optical fibres*, Proc. of NOC, 2007
- [Olszewski06] J. Olszewski, M. Szupulak, T. Martynkien, W. Urbanczyk, F. Berghmans, T. Nasilowski, H. Theinpont, *Analytical evaluation of bending loss oscillations in photonic crystal fibers*, *J. Optics Communication* 269 (2007) 261-270
- [Omari08] M. Omari, A. Ijeh, I. S. Al-Kofahi, *Minimization of bending loss in materials for integrated optics*, *J. of Active and Passive Electronic Devices*, vol. 3, pp 223-230
- [Powers97] John Powers, *An introduction to fiber optic systems*, 2nd edition, Irwin, 1997
- [QWang07] Q. Wang, G. Rajan, P. Wang, G. Farrell, *Polarization dependence of bend loss for a standard singlemode fiber*, *Optics Express*, vol 15, no.8, pp 4909-4920
- [Renner92] H. Renner, *Bending Losses of Coated Single-Mode Fibers: A Simple Approach*, *J. Lightwave Technology* , Vol. 10, No.5, May 1992
- [Schermer07] R. T. Schermer, J. H. Cole, *Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment*, *IEEE J. Quantum, Elect.* Vol.43, no.10, October 2007
- [Seo03] k. Seo, N. Nishimura, M. Shiino, R. Yuguchi, H. Sasaki, *Evaluation of High Power Endurance in Optical Fiber Links*, *Furakawa Review*, no. 24, 2003
- [Sharma84] A. Sharma, A.-H. Ani, and S.J.Halme, *Constant-curvature loss in monomode fibers:an experimental investigation*, *Appl. Opt.*, vol.23, pp. 3297-3301, 1984
- [Travagnin09] M. Travagnin, , M. Ruzzier, F. Sartori, *Measurement of optical fiber macrobending losses in a single turn with continuously-varying radius*, Proc. of the OFC, 2009
- [Wang07] P. Wang, Q. Wang, G. Farrell, G. Rajan, T. Freir, J. Cassidy, *Investigation of macrobending of standard Single mode fiber with small bend radii*, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol 49, no.9, pp 2133-2138
- [Yablon05] Andrew D. Yablon, *Optical fiber fusion Splicing*, Springer-Verlag Berlin And Heidelberg GmbH & Co. Kg, 2005