

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DESENVOLVIMENTO DE SENSORES BASEADOS EM FIBRA ÓPTICA
PARA MONITORAMENTO ESTRUTURAL

CINDY STELLA FERNANDES

TD 13/2016

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CINDY STELLA FERNANDES

DESENVOLVIMENTO DE SENSORES BASEADOS EM FIBRA ÓPTICA
PARA MONITORAMENTO ESTRUTURAL

TD 13/2016

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CINDY STELLA FERNANDES

DESENVOLVIMENTO DE SENSORES BASEADOS EM FIBRA ÓPTICA
PARA MONITORAMENTO ESTRUTURAL

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação
(CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Fernandes, Cindy Stella, 1984-

Desenvolvimento de sensores baseados em fibra
óptica para monitoramento estrutural / Cindy Stella
Fernandes.

- 2016.

Orientador: João Crisóstomo Weyl Albuquerque
Costa;

Coorientadora: Maria Thereza Miranda Rocco
Giraldi.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do
Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,
2016.

1. Detectores de fibras ópticas - testes. 2.
Dispositivos optoeletrônicos. 3. Fibras ópticas -
modelos matemáticos. I. Título.

CDD 23. ed. 681.25

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“DESENVOLVIMENTO DE SENSORES BASEADOS EM FIBRA ÓPTICA PARA
MONITORAMENTO ESTRUTURAL”**

AUTORA: **CINDY STELLA FERNANDES**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM **01/ABRIL/2016**.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa
(Orientador – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. João Claudio Chamma Carvalho
(Membro Externo ao Programa – UFPA/Castanhal)

Prof. Dr. Marco José de Sousa
(Membro Externo ao Programa – FCT/UFPA)

Prof. Dr. Carlos de Jesus Gouveia
(Membro Externo – UFCG)

Prof. Dr. Marcos Antônio Ruggieri Franco
(Membro Externo – IEAv)

Prof. Dr.^a Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi
(Membro Externo – IME)

Prof. Dr. Pedro Alberto da Silva Jorge
(Membro Externo – UNIPORTO)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”.

(Charles Chaplin)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela existência e por estar sempre abençoando e iluminando meu caminho.

Aos meus pais, Antônio Ernani e Josefa Navarro, meus grandes patrocinadores, que sempre acreditaram e apostaram em mim, me mostrando o caminho do estudo, sem o qual não estaria aqui hoje. Agradeço-lhes por todo amor, compreensão, dedicação e incentivo, principalmente quando estava cansada de seguir.

Ao meu irmão e segundo pai, Max William, por todo amor, apoio, carinho, dedicação e incentivo de cada dia.

Ao meu namorado Adam Dreyton, companheiro de vida, por todo amor, amparo, apoio, carinho e conselhos. Bem como à sua família, que me “adotou” e sempre me tratou como filha.

Ao Prof. João Crisóstomo W. A. Costa, pela orientação durante a elaboração da tese, pela amizade, pelo profissionalismo, pela compreensão, dedicação e paciência, que fez deste trabalho uma realidade.

À Profa. Maria Thereza M. R. Giraldi, pela coorientação, pela amizade, por todo apoio, pela motivação e incentivo, imprescindíveis para que eu continuasse caminhando e chegasse até aqui.

Aos Professores Marco J. de Sousa e Marcos A. R. Franco, que com inestimável conhecimento, incentivo e apoio, permitiram-me vislumbrar um objetivo maior, ajudando a pavimentar a estrada tornando-a menos tortuosa.

Aos Professores Pedro A. S. Jorge e Carlos J. Gouveia, por me receber de forma tão calorosa no doutoramento sanduíche no INESC Porto em Portugal, ajudando a lapidar meu conhecimento, me orientando e auxiliando de maneira responsável e esclarecedora.

Aos amigos Eulália Mata, Ketyllen Silva, Priscila Aranha, Jorge Cardoso, Evelin Cardoso, Reginaldo Santos, Moisés Felipe, Thaís Duarte, Aline Alvarenga, Ângela Brígida, Clenilson, Delsinho, Hérica, Victor, Liane, Gilvan, Roberto e a todos os amigos que em algum momento seguiram comigo, pela amizade e respeito conquistados, pelo companheirismo, pelos sorrisos, pela convivência em harmonia, por toda descontração e incentivo que me foi dado diante dos inúmeros percalços da estrada. Peço desculpas por não nominar todos meus amigos, mas tenho certeza que cada um entende o momento em estiveram comigo, unindo forças para continuar a caminhada

Finalmente agradeço a CAPES, VALE, CNPq e FAPESPA, por todo suporte financeiro ao longo da tese, sem o qual a realização dessa pesquisa não seria possível.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	4
1.2 Motivação.....	5
1.3 Contribuições da Tese	6
1.4 Organização da Tese	6
CAPÍTULO 2. PRINCIPAIS SENSORES BASEADOS EM FIBRA ÓPTICA PARA MONITORAMENTO DE SAÚDE ESTRUTURAL.....	8
2.1 Sensores Quasi-distribuídos	10
2.1.1 Sensores ópticos com base em grades de difração - Grade de Bragg em fibra	10
2.1.2 Sensores ópticos com base em grades de difração - Grade de Período Longo.....	13
2.2 Interferência multimodal	14
2.3 Sensores ópticos com base em interferômetros.....	16
2.3.1 Interferômetro de Mach-Zehnder	16
2.3.2 Interferômetros de Michelson.....	19
2.3.3 SMF com taper	20
2.4 Sensores Distribuídos.....	21
CAPÍTULO 3. MODELAGEM NUMÉRICA DE SENSOR SMS BASEADO EM TÉCNICA CDM 24	
3.1 Método de propagação de feixes com diferenças finitas.....	24
3.1.1 BPM e restrições de campo escalar e paraxialidade.....	24
3.1.2 BPM - solução numérica e condições de contorno.....	26
3.2 Interferência multimodal – ponto de reimagem	27
3.2.1 Ponto de reimagem	30
CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS	32
4.1 Análise de curvatura.....	33
4.1.1 Caracterização de um <i>taper</i> submetido à curvatura e interrogação através de unidade BraggMETER	34

4.1.2	Caracterização de dois <i>tapers</i> submetidos à curvatura e interrogação através de analisador de espectro óptico.....	38
4.1.3	Caracterização de um <i>taper</i> e <i>offset</i> em fibra sob curvatura e interrogação através da unidade BraggMETER	40
4.1.4	Caracterização de estrutura SMS submetida à curvatura e interrogação através de OTDR42	
4.2	Caracterização de sensor SMSMS sob vibração	50
4.2.1	Sensor SMSMS submetido à vibração com método de interrogação que utiliza osciloscópio	50
4.2.2	Sensor SMSMS submetido à vibração interrogado por meio de DAQ e Arduíno	54
4.3	Modelagem numérica de sensor de curvatura SMS baseado em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo monitorado na transmissão	57
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS		65
5.1	Propostas de trabalhos futuros.....	67
5.2	Lista de Artigos Publicados e Submetido	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama de mapeamento das tecnologias de sensores a fibra óptica quasi-distribuídos [57].....	9
Figura 2.2 - Diagrama de mapeamento das tecnologias de sensores a fibra óptica distribuídos [57].	10
Figura 2.3 - Classificação das tecnologias de mensuração dos sensores ópticos [27].	10
Figura 2.4 - Princípio de operação de uma grade de Bragg em fibra (FBG) [62].	12
Figura 2.5 - Princípio de operação de uma grade de período longo (LPG).....	13
Figura 2.6 - Interferômetro multimodal monomodo-multimodo-monomodo (SMS).	15
Figura 2.7 - Configurações de MZI em linha aplicando (i) um par de LPGs; (ii) desalinhamento do núcleo; (iii) SMF entre duas fibras de cristal fotônico; (iv) SMF de pequeno núcleo; (v) segmento de fibra multimodo e, (vi) afunilamento em fibra [2].	16
Figura 2.8 - Diagrama esquemático de sensor que consiste em um <i>taper</i> e <i>offset</i> em fibra [53].	18
Figura 2.9 - Configuração básica de interferômetro de Michelson [2].	20
Figura 2.10 - Diagrama de um MI em linha compacto [2].	20
Figura 2.11 - MI em linha aplicando <i>taper</i> [83].	20
Figura 2.12 - Configuração de <i>taper</i> simples em SMF [52].	21
Figura 2.13 - Ilustração dos efeitos de espalhamento [87].	22
Figura 3.1 – Modelo tridimensional de estrutura SMS com MMF 105/125 μ m para análise de efeito de reimagem, com guias monomodo à $z < 0$ e $z > L$	29
Figura 3.2 – Padrões de interferência obtidos por método de propagação de feixe para uma estrutura SMS com um guia multimodo de índice degrau com 105 μ m de diâmetro de núcleo e 4.44 cm de comprimento: (i) campo de propagação; e (ii) projeção do campo de propagação no campo modal da MMF em comprimento de onda de 1550 nm.	30
Figura 4.1 - Esquema ilustrativo de <i>setup</i> de análise de curvatura em fibra.	34
Figura 4.2 - Foto do <i>taper</i> registrada pela máquina de emenda FSM-40S da Fujikura.	34
Figura 4.3 - <i>Setup</i> de análise de curvatura com a unidade BraggMeter da FiberSensing.	35
Figura 4.4 - Foto de <i>setup</i> experimental com inserção de curvatura.	35
Figura 4.5 - Espectro do sensor em fibra baseado em <i>taper</i> , sob curvatura.	36
Figura 4.6 - Espectro de sensor em fibra baseado em <i>taper</i> , submetido à curvatura com $d = 10.7$ cm.	37

Figura 4.7 - Espectro de sensor baseado em fibra com <i>taper</i> submetido à curvatura com $d = 8.25$ cm.	38
Figura 4.8 - <i>Setup</i> de análise de curvatura baseado em dois <i>tapers</i> e com uso de um OSA. ...	39
Figura 4.9 - Espectro de sensor baseado em fibra com dois <i>tapers</i> , submetido à curvatura.	39
Figura 4.10 – Foto de máquina de emenda no processo de fabricação de <i>offset</i> em fibra.	40
Figura 4.11 – <i>Setup</i> de análise de <i>taper</i> e <i>offset</i> sob curvatura com a unidade BraggMeter.	40
Figura 4.12 - Espectro de sensor baseado em fibra com <i>taper</i> e <i>offset</i> submetidos à curvatura, com $L = 2,5$ cm.	41
Figura 4.13 - Espectro de sensor baseado em fibra com <i>taper</i> e <i>offset</i> submetidos à curvatura, com $L = 9$ cm.	42
Figura 4.14 - Diagrama esquemático para análise de curvatura em sensor SMS com OSA.	44
Figura 4.15 - Espectro resultante de curvatura aplicada a sensor em fibra baseado em SMS interrogado com OSA.	44
Figura 4.16 - Configuração experimental para medidas de curvatura remota com sensor SMS e OTDR.	45
Figura 4.17 - Traço do OTDR à 1550 nm aplicado a sensor de curvatura SMS.	46
Figura 4.18 - <i>PDif</i> em função da curvatura para os dois sensores SMS.	46
Figura 4.19 - <i>Setup</i> experimental de análise de temperatura para sensor SMS.	48
Figura 4.20 - Foto de <i>setup</i> experimental de temperatura para sensor SMS.	48
Figura 4.21 - Foto de placa de aquecimento.	48
Figura 4.22 – Foto da câmara de acrílico de análise experimental de temperatura.	49
Figura 4.23 - <i>PDif</i> em função da temperatura para os dois sensores SMS.	49
Figura 4.24 – Esquema de primeiro <i>setup</i> experimental para caracterização de sensor SMSMS à vibração.	51
Figura 4.25 – Espectro do sensor SMSMS visto com unidade BraggMETER da Fiber Sensing.	51
Figura 4.26 - (i) Foto de sensor SMSMS pré-curvado colado ao PZT; e (ii) caracterização do PZT.	51
Figura 4.27 - Caracterização do PZT dentro da faixa de frequências testadas.	52
Figura 4.28 - Sinal Amplificador e sensor a 10 Hz.	52
Figura 4.29 - Sinal Amplificador e sensor a 5 kHz.	53
Figura 4.30 - Sinal Amplificador e sensor a 20 kHz.	53
Figura 4.31 - Variação de amplitude do sinal do sensor SMSMS em função da frequência aplicada em teste de vibração com sensor SMSMS.	54

Figura 4.32 - Setup experimental para o sensor SMSMS, (i-I) fonte laser, (i-II) <i>shaker</i> com o acelerômetro de referência e o sensor SMSMS, e (i-III) sistema DAQ óptico, baseado em configuração de Arduino; (ii) Zoom em i-II com o acelerômetro de referência e o sensor SMSMS fixado no <i>shaker</i>	55
Figura 4.33 - <i>Shaker</i> da Bruel & Kjaer, tipo 4809, com sensor eletrônico de referência e o sensor SMSMS fixados.....	55
Figura 4.34 - Espectros no domínio do tempo do sensor SMSMS submetido a frequências de 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1 e 10Hz.....	56
Figura 4.35 - Espectro de frequência do sensor SMSMS na gama de 0,1 a 10 Hz (i) e um zoom no espectro do sensor SMSMS na faixa de 0,1 Hz a 1 Hz (ii).	57
Figura 4.36 - Esquema representativo de sensor SMS usado na modelagem.	58
Figura 4.37 - Modelo geométrico 3D da estrutura SMS com 3mm de MMF de 105/125 μ m, feito com BeamProp da RSoft.	59
Figura 4.38 - Modo de propagação da luz ao longo de z na estrutura SMS.....	61
Figura 4.39 - Modo fundamental após propagar-se pela SMS.....	61
Figura 4.40 – Porcentagem de potência óptica em função do comprimento de onda para	62
Figura 4.41 – Comparação entre resultados experimentais e simulado para sensor SMS submetido a curvatura.....	63
Figura 4.42 – Comparação entre resultados experimentais com resultados simulados para diferentes comprimentos de seção MMF do sensor SMS submetido a curvatura.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Dados referentes à primeira análise de curvatura de sensor em fibra baseado em <i>taper</i>	36
Tabela 4.2 - Dados referentes à segunda análise de curvatura de sensor em fibra baseado em <i>taper</i>	37
Tabela 4.3 - Dados referentes à terceira análise de curvatura de sensor em fibra baseado em <i>taper</i>	38
Tabela 4.4 - Características de dois sensores SMS submetidos a testes de curvatura.....	47
Tabela 4.5 - Parâmetros das fibras SMF-28 (Corning) e MMF- FG105-LCA (Thorlabs).....	58
Tabela 4.6 - Valores de comprimento de onda e de raio de curvatura aplicados na modelagem do SMS usando o software BeamPROP.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS

BPM	<i>Beam Propagation Method</i>
CDM	<i>Core Diameter Mismatch</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
DAS	<i>Distributed Acoustic Sensing</i>
DSS	<i>Distributed Strain Sensing</i>
DTS	<i>Distributed Temperature Sensing</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FD- BPM	<i>Finite Difference Beam Propagation Method</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
LPG	<i>Long Period Grating</i>
MI	<i>Michelson Interferometer</i>
MMF	<i>Multimode Fiber</i>
MMI	<i>Multimode Interference</i>
MZI	<i>Mach-Zehnder Interferometer</i>
OFM	<i>Optical Fiber Mirror</i>
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i>
OTDR	<i>Optical Time Domain Reflectometer</i>
PCF	<i>Photonic Crystal Fiber</i>
PZT	<i>Piezoelectric Transducer</i>
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>
SMF	<i>Single mode Fiber</i>
SMS	<i>Single mode – Multimode – Single mode</i>
SMSMS	<i>Single mode – Multimode – Single mode – Multimode –Single mode</i>
TBC	<i>Transparent Boundary Condition</i>

RESUMO

A investigação e o desenvolvimento de sistemas para a medição de parâmetros físicos e mecânicos de integridade estrutural, pode permitir a prévia detecção de colapsos, processos de deterioração e outros fatores naturais e/ou provocados pelo homem. Nesse caso, a medida desses parâmetros em tempo real é crucial para a identificação, localização e quantificação de danos, e também para melhorar a manutenção e segurança dessas estruturas. Medições de curvatura e vibração são importantes para o monitoramento estrutural devido a sua relação com as respostas dinâmicas de estruturas de engenharia. Nessa tese, estruturas de descasamento de diâmetro de núcleo são propostas e experimentalmente investigadas para sensoriamento de curvatura e vibração. Entre as análises, duas configurações exibiram um melhor desempenho, uma abordagem usa uma estrutura formada pela emenda de uma pequena seção de fibra multimodo não revestida entre duas fibras monomodo padrão (SMS), combinada com um espelho óptico em fibra na sua extremidade, e a outra abordagem é formada pelo sanduíche de uma seção de fibra monomodo entre duas pequenas seções de fibra multimodo, emendadas entre duas fibras monomodo padrão (SMSMS). O dispositivo SMS é analisado através de medidas experimentais e simulações numéricas. Na análise experimental de curvatura, o sensor SMS proposto gera padrões de interferência destrutiva e aumenta a perda óptica se é curvado, variando somente a atenuação do sinal óptico sem variação do comprimento de onda. A modelagem numérica é feita com o método de propagação de feixe por diferenças finitas através da utilização do software BeamProp 9.0 da empresa RSoft. O sensor SMSMS possui duas seções MMF que agem como acoplador e reacoplador de modos de núcleo-casca, e a seção SMF ao meio atua como o “braço” de interferência. Assim os modos da casca que se propagam na seção SMF do meio tornam-se sensíveis às frequências aplicadas. Este dispositivo foi analisado experimentalmente como sensor de vibração e provou ser adequado para monitorar frequências tão baixas como 0.1 Hz. As configurações de sensores propostos apresentam várias características interessantes, tais como fácil fabricação, baixo custo, alta eficiência e alta sensibilidade. Embora o processo de fabricação das estruturas não seja muito preciso, o que afeta sua reprodutibilidade, esses sensores são muito úteis numa vasta variedade de aplicações, tais como monitoramento de integridade estrutural.

Palavras-chave: Sensor óptico de curvatura, sensor óptico de vibração, técnica de descasamento de diâmetro de núcleo, monitoramento de integridade estrutural, SMS, SMSMS.

ABSTRACT

The research and development of systems for measuring physical and mechanical parameters of structural health, allows the early detection of collapses, deterioration process and other natural and / or caused by man factors. In this case, real-time measurements of these parameters are crucial for identification, localization and quantification of damages, and also improve the maintenance and safety of such structures. Curvature and vibration measurements are important to structural monitoring due to their relationship with the dynamic responses of engineering structures. In this thesis, core diameter mismatch structures are proposed and experimentally investigated for curvature and vibration sensing. Among the analyzes, two settings exhibited improved performance, one approach uses a structure formed by splicing an uncoated short section of multimode fiber between two standard single mode fibers (SMS), combined to an optical fiber mirror at its end, and the other approach is made by the sandwich of one single mode fiber section between two short multimode fiber sections, spliced between two standard single mode fibers (SMSMS). The SMS device is analyzed through experimental measurements and numerical simulations. In the curvature analysis, the proposed SMS sensor generates destructive interference patterns whether it is bent, varying only the attenuation of the optical signal without wavelength shifts. Numerical modeling is performed using the finite difference beam propagation method by means of the BeamProp 9.0 software of Rsoft™ company. In the experimental vibration analysis, the SMSMS sensor is formed by two MMF sections that act as coupler and re-coupler of core-cladding modes, and the SMF section in the middle acts as the "arm" of interference. So the cladding modes that propagate in the SMF middle section become sensitive to the applied frequencies. The SMSMS vibration sensor proved to be suitable to monitor very low frequencies such as 0.1 Hz. The proposed sensors configurations present several interesting features, such as easy fabrication, low-cost, high-efficiency, and high sensitivity. Although the manufacturing process of the structures is not very precise, which affects its reproducibility, such sensors very useful in a wide range of applications, such as structural health monitoring.

Keywords: *Curvature optical fiber sensor, vibration optical fiber sensor, core diameter mismatch technique, structural health monitoring, SMS, SMSMS.*

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

Avanços recentes nas indústrias de optoeletrônica e comunicações a fibra óptica, tem tornado a área das fibras ópticas objeto de intensa investigação e conduzindo a obtenção de grande progresso no campo dos sensores [1-3]. A redução no custo dos dispositivos ópticos tem estimulado o interesse da utilização de sensores baseados em fibra óptica para medidas de parâmetros físicos e mecânicos, presentes em várias aplicações em diversas áreas, por exemplo, na área de monitoramento estrutural [4-6].

Os sensores a fibra óptica demonstram ser mais vantajosos em comparação aos seus análogos convencionais, por serem compactos, inertes, independentes de fonte de energia elétrica externa e intrinsecamente imunes à interferência eletromagnética, ou seja, a luz confinada no núcleo das fibras ópticas usadas para fins de sensoriamento não interage com qualquer campo eletromagnético circundante, etc. [1,3]. Além disso, pode haver a imersão de sensores ópticos em inúmeros materiais, tais como, os materiais de construção, o concreto e compósito e lá mantê-los em funcionamento pelo tempo de vida das assim chamadas estruturas inteligentes [7-11]. Existem vários dispositivos e técnicas difundidas para sensoriamento óptico, tais como, grades de Bragg em fibra [12-13] e interferômetros a fibra óptica, como interferômetro de Fabry-Perot, interferômetro de Mach-Zehnder e interferômetro de Michelson, entre outros [2,14].

Na área de monitoramento estrutural, desde os primeiros estudos sobre estruturas da engenharia civil, a ciência tenta explicar o comportamento de novos materiais e estruturas, aplicando novas técnicas para resolver desafios específicos. Esse entendimento melhorou quando as estruturas se tornaram um fator importante na sociedade e na economia, evoluindo de uma tecnologia limitada a grandes monumentos para impulsionar a indústria e a economia durante a revolução industrial. Durante o último século, através do desenvolvimento de novas técnicas de modelagem e com a melhoria em materiais de construção, a engenharia estrutural tornou-se um campo de pesquisa muito ativo [15-17].

O crescimento econômico e demográfico refletiu no aumento do número de estruturas de engenharia, tais como edifícios, estradas, ferrovias e pontes nos últimos anos. Muitas infraestruturas apresentam severa degradação estrutural com o tempo de uso, a influência de intempéries ambientais e a aplicação de cargas severas, o que pode causar sérios acidentes com impactos econômicos e comprometer eventualmente a segurança e

integridade da estrutura ou causar danos irreparáveis. No intuito de garantir segurança, durabilidade e realizar adequada manutenção/reabilitação infraestrutural, existe a necessidade de monitoramento prévio da condição estrutural ou de sua “saúde” ao longo do tempo, o que viabiliza a detecção de iminentes alterações, eventuais danos ou anomalias que condicionem a integridade e o desempenho destas estruturas [18-20]. Nesse caso, medições em tempo real de tração, curvatura, vibração e outros parâmetros, são cruciais para a identificação, localização e quantificação de danos e, também, melhoram a manutenção e segurança de tais estruturas [21-23].

O atual sistema de monitoramento de estruturas da engenharia civil é mais comumente conhecido como monitoramento de integridade estrutural (SHM - *Structural Health Monitoring*) [24-26], o qual surgiu combinando novos métodos de detecção com processos de *feedback*, que respondem às alterações detectadas. Tecnicamente, o SHM pode ser definido como a integração de detecção e, possivelmente, também a atuação de dispositivos, para permitir que as condições de carga e condições danosas de uma estrutura possam ser gravadas, analisadas, localizadas e ainda previstas. O SHM fornece informações precisas e em tempo real sobre condição estrutural e desempenho, dando um prognóstico prévio do comportamento da estrutura [23, 27].

Tipicamente, o SHM permite sensoriamento de importantes parâmetros como, a temperatura, deformação, tração, tração mecânica, curvatura, vibração, etc., incluindo alterações de propriedades químicas ou elétricas, corrosão e fadiga. Esses parâmetros relacionam-se com propriedades físicas, tais como, deformação, tração e aceleração entre outros [28-29].

Existem dois tipos de sensores para monitoramento estrutural, os tradicionais sensores eletrônicos e os sensores ópticos. Detentor de metodologia bem estabelecida, os sensores eletrônicos subdividem-se em sensores com e sem fio. Os sensores eletrônicos com fio aplicam-se em monitoramento de curto e médio prazo. Sensores eletrônicos sem fio são aplicados para monitoramento de curto prazo e os sensores ópticos são utilizados para monitoramento definitivo, já que podem ser utilizados permanentemente.

A capacidade dos sensores ópticos de atuar remotamente sem que seja preciso qualquer componente eletricamente ativo também é uma vantagem herdada da indústria de telecomunicações em fibra óptica [30]. Essa é uma característica importante em monitoramento de estruturas grandes e remotas. Os sensores ópticos oferecem uma vasta variedade de parâmetros que podem ser medidos, de modo que vários parâmetros podem ser multiplexados na mesma rede [31], diminuindo a quantidade de cabos e também o

número de canais do sistema de aquisição de dados. Em comparação com sensores eletrônicos convencionais, os sensores ópticos oferecem novas e únicas topologias de sensoriamento, incluindo multiplexação na mesma fibra e sensoriamento totalmente distribuído, oferecendo novas oportunidades de monitoramento.

Entre os parâmetros já referidos anteriormente, medidas de curvatura e vibração são importantes para o monitoramento estrutural, devido a sua relação com as respostas dinâmicas de estruturas de engenharia. Sensores de curvatura aparecem como uma alternativa à sensores de tração para aplicações em SHM, por exemplo, na avaliação de uma deflexão de curvatura. O uso de sensores de tração eletrônicos ou ópticos para medir a tração na superfície estrutural, torna-se demasiado caro quando pequenas deflexões devem ser medidas, pois nesse caso é necessária uma alta resolução [32-34]. As medidas de curvatura podem ser realizadas em qualquer lugar ao longo da seção transversal, e fornecem uma indicação de qualquer alteração na rigidez de uma estrutura sujeita à flexão [32-36]. Além disso, os sensores de curvatura são usados com a vantagem de que a deflexão de curvatura não depende da espessura estrutural.

Por sua vez, sensores de vibração são essenciais para avaliação estrutural, necessária na detecção precoce de anomalias, evitando o mau funcionamento ou colapsos [21,37]. Apesar das fibras ópticas apresentarem inúmeras vantagens, já descritas, os sensores baseados em fibra ainda possuem algumas deficiências na aquisição de alguns parâmetros, como, vibrações, em relação a outras tecnologias já bastante maduras, tais como os sensores eletrônicos. A análise do parâmetro de vibração em estruturas demanda esquemas de aquisição com taxas de amostragem bem mais elevadas que aquelas usualmente empregadas pelos instrumentos ópticos de aquisição de sinais quasi-estáticos [28, 38-41]. Estes instrumentos com taxas de amostragem superiores a 1 Hz ainda são relativamente caros e, comparados aos instrumentos eletrônicos equivalentes, ainda possuem um custo-benefício inferior. Além disso, para detectar frequências de sinais que variam de 0,1 Hz a 100 Hz, são normalmente empregados acelerômetros sísmicos de grande sensibilidade (inferior a um milésimo de g ou 0.01 m/s^2) [27] [42]. Embora o sensoriamento a fibra apresente diversas vantagens inerentes a fibra óptica, ainda não se atingiu uma maturidade em acelerômetros ópticos que consigam superar simultaneamente a sensibilidade e a resposta em frequência dos acelerômetros sísmicos eletrônicos em frequências inferiores a 1 Hz [43-44].

1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver métodos e dispositivos para sensoriamento baseado em fibra óptica para monitoramento de parâmetros de integridade de infraestruturas civis (SHM - *Structural health monitoring*). Como objetivos específicos, o trabalho faz a pesquisa por novas configurações de dispositivos sensores em fibra para sensoriamento de parâmetros de curvatura e vibração; investiga a sensibilidade de configurações sensoras através de análises experimentais de curvatura e vibração e aplica modelagem numérica para atestar desempenho de configuração em fibra utilizada, comparando resultados simulados com experimentais.

Neste contexto, as tecnologias investigadas são baseadas em, (i) emendas de fibra monomodo padrão (SMF - *Singlemode fiber*) com fibra multimodo (MMF - *Multimode fiber*), conhecido como sensor SMS (*singlemode-multimode-singlemode*) [45-47], que faz uso da técnica de descasamento de diâmetro de núcleo na fibra óptica (CDM - *Core diameter mismatch*) [48,49]; (ii) sanduíche de uma SMF com duas seções MMF, entre duas SMFs, chamado de sensor SMSMS (*singlemode-multimode-singlemode-multimode-singlemode*) [35,50]; (iii) SMF com seção afunilada (*taper*) [51,52]; (iv) SMF com duas seções afuniladas [53] e (v) SMF com seção afunilada e emenda desalinhada em fibra (*offset*) [54]. Todos esses dispositivos foram analisados através de medidas experimentais e, para a configuração do sensor SMS, também foi realizada análise através de simulação numérica. A primeira abordagem consiste em um interferômetro Mach-Zehnder baseado no sanduíche de uma seção MMF entre duas SMFs (SMS), tendo os revestimentos da MMF e da SMF sido retirados e um espelho depositado em uma das extremidades clivadas da SMF. Essa configuração é analisada numérica e experimentalmente como sensor de curvatura, sendo sua sensibilidade avaliada em função da curvatura imposta ao sensor. A segunda abordagem trata de um interferômetro Mach-Zehnder com sanduíche de uma seção SMF entre duas MMF, emendadas entre duas SMFs (SMSMS). Esse dispositivo é analisado experimentalmente como sensor de vibração. A sensibilidade desse dispositivo é computada quando submetido a excitações de variadas frequências chegando-se a medições de frequências tão baixas quanto 0,1 Hz. A terceira configuração refere-se a um interferômetro de Michelson construído com um *taper* em uma SMF. Este dispositivo é submetido experimentalmente a análises de curvatura, para se verificar seu desempenho como sensor de curvatura, sendo a sensibilidade desse dispositivo comparada ao dispositivo não curvado. A quarta configuração aborda o uso de um

interferômetro Mach-Zehnder baseado em dois *tapers* concatenados em uma SMF, sendo retirado o revestimento entre os *tapers*. A avaliação dessa configuração é feita experimentalmente em função da curvatura imposta à seção entre os *tapers*. A quinta e última abordagem trata de um interferômetro Mach-Zehnder baseado em um *taper* e um *offset* em SMF. Essa estrutura é analisada experimentalmente sob aplicação de curvaturas sobre a mesma.

1.2 Motivação

A motivação desse trabalho resulta do fato de que atualmente, a identificação de danos estruturais ganhou cada vez mais atenção da comunidade científica e de engenharia, porque uma falha estrutural imprevista pode causar perdas catastróficas, econômicas e de vidas humanas. O monitoramento de parâmetros de integridade estrutural (SHM – *Structural Health Monitoring*) é crucial para a identificação, localização e quantificação de danos, bem como para a manutenção e a segurança de estruturas civis. Dessa forma, a investigação e o progresso no desenvolvimento de sistemas para a medição em tempo real de parâmetros físicos e mecânicos, tais como deformação, curvatura, vibração entre outros, pode permitir a prévia detecção de colapsos, processos de deterioração (corrosão, desgaste), ocorrência de danos (trincas, perdas de elementos de união) e outros fatores naturais e/ou provocados pelo homem, que comprometam o bom funcionamento de estruturas civis [21-25]. Medição de curvatura aparece como uma alternativa aos sensores de deformação. Isso porque para uma quantidade fixa de deformação estrutural, a magnitude da tração diminui de acordo com a espessura estrutural, exigindo equipamentos cada vez mais sensíveis para medir deformação em estruturas muito finas. Em contraste, a curvatura independe da espessura da estrutura (para uma quantidade fixa de deflexão), pode ser medida em toda a seção transversal e fornecer uma indicação de quaisquer mudanças na rigidez de uma estrutura sujeita a flexão [34-36].

Para a medição de vibração, outro parâmetro importante no monitoramento de estruturas, a ideia fundamental baseia-se no fato de que o dano induz alterações nas propriedades físicas (massa, amortecimento e rigidez), o que causará mudanças detectáveis nas propriedades modais (frequências naturais, amortecimento modal e modos de vibração). Assim, é intuitivo que os danos podem ser identificados por análise das mudanças nas características de vibração da estrutura [12, 37, 55].

Este trabalho foi inserido em um projeto de pesquisa e desenvolvimento na área de sensores em fibra óptica para monitoramento estrutural, vinculado a um convênio de

cooperação científica, entre a Universidade Federal do Pará (UFPA) e a empresa VALE S.A., com interveniência da Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA), cujo título é “Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação da Integridade Estrutural de Pontes e Viadutos Ferroviários ao Longo da Estrada de Ferro Carajás”. Este projeto teve cooperação de instituições brasileiras, tais como, UFPA, Instituto Militar de Engenharia (IME) e a instituição portuguesa, Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto (INESC Porto - Universidade do Porto), iniciada dentro do Programa de Cooperação Brasil-Portugal financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

O objetivo do projeto envolve a investigação da tecnologia de sensoriamento utilizando fibras ópticas e o incremento da colaboração científica e tecnológica na área de sensoriamento remoto para o monitoramento de parâmetros estruturais. Essa pesquisa também foi financiada pela CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, que financiou o estágio de doutoramento no INESC Porto, desenvolvido ao longo desta tese. No estágio de doutoramento foi realizada pesquisa através de medidas experimentais de sensores baseados em fibra óptica, cujos resultados foram publicados em conferências internacionais e nesta tese.

1.3 Contribuições da Tese

As principais contribuições dessa tese foram:

- Montagem e caracterização experimental de sensor de curvatura baseado em um interferômetro de Mach-Zehnder, que utiliza a técnica de descasamento de diâmetro de núcleo na fibra óptica, com sanduíche de seção MMF com SMF.
- Montagem e caracterização experimental de sensor de vibração baseado em um interferômetro de Mach-Zehnder, que utiliza a técnica de descasamento de diâmetro de núcleo na fibra óptica, com sanduíche de seção SMF com duas seções MMF, emendado entre duas SMFs.
- Publicação e aceitação de artigos em revistas internacionais e conferências internacionais.

1.4 Organização da Tese

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: O capítulo 2 apresenta breve revisão bibliográfica acerca de sensores à fibra óptica para SHM. Também é apresentado o estado da arte sobre os principais tipos de sensores ópticos interferométricos. O capítulo 3 trata

da modelagem numérica do sensor SMS por meio de software BeamProp 9.0 da empresa RSoft, testado sob aplicação de curvatura. Os resultados experimentais e os resultados numéricos são apresentados no capítulo 4. Por fim, o capítulo 5 aborda as conclusões desse trabalho e propostas para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2. PRINCIPAIS SENSORES BASEADOS EM FIBRA ÓPTICA PARA MONITORAMENTO DE SAÚDE ESTRUTURAL

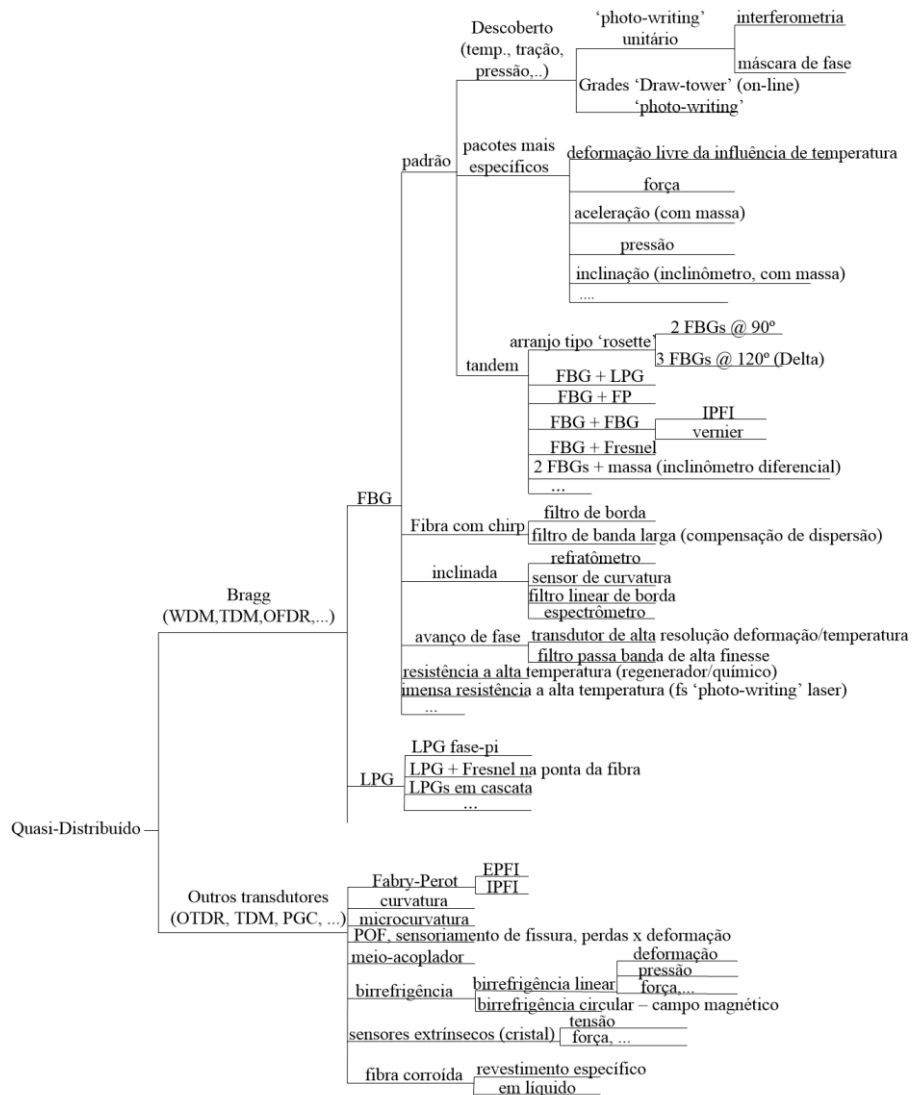
Desde a década de oitenta os sensores em fibra óptica tem sido gradativamente desenvolvido e testado nos mais diversos campos da engenharia, como, energia elétrica, civil, petróleo e gás, aviação, setor automotivo, etc. A partir de então, esta tecnologia tem estabelecido uma série de nichos de aplicações juntamente com outras tecnologias de sensoriamento especializado, onde as propriedades únicas de detecção da fibra oferecem soluções ótimas para problemas complexos de medição. Diversos tipos de sensores em fibra têm sido comercializados até o momento, no entanto, apenas um número limitado de técnicas e aplicações tem sido operacionalizado a contento. Embora as fibras ópticas apresentem vantagens, como citado no capítulo 1, os sensores baseados em tecnologia de fibra óptica precisam concorrer com outras tecnologias maduras e bem consolidadas, tais como os sensores eletrônicos. A fim de convencer o mercado habituado com a utilização das técnicas de sensoriamento tradicionais, é necessário comprovar a vantagem dos sensores ópticos sobre os sensores convencionais. Os sensores à fibra óptica precisam ter bom desempenho agregado a um custo razoável. É necessário também ter disponibilidade na forma de sistemas completos, com a eletrônica de detecção e processamento de sinais já embarcados. Apesar disso, os sensores baseados em fibra óptica tem mantido um nível surpreendente de interesse e entusiasmo entre a comunidade de pesquisa que continua com várias propostas e ideias para investigar abordagens inovadoras para o desenvolvimento de novos sensores [56].

Este capítulo apresenta um breve apanhado bibliográfico a respeito do estado da arte de técnicas de sensores baseados em fibra óptica para monitoramento estrutural. São abordados alguns dos princípios envolvidos em dispositivos de sensoriamento à fibra óptica.

Há uma vasta variedade de sensores ópticos aplicáveis para SHM desenvolvidos pelas instituições acadêmicas e industriais. Centros de pesquisas e universidades estão desenvolvendo e produzindo uma grande variedade de sensores para os mais diversos tipos de medições e aplicações. Nesta visão geral, as configurações de sensores investigadas neste trabalho serão discutidas e analisadas.

Existem três categorias principais de configuração dos sensores a fibra óptica que podem ser agrupadas em (i) sensores pontuais; (ii) multiponto e (iii) distribuídos. Um sensor

pontual é colocado em um determinado ponto da fibra óptica, e somente neste ponto ocorre a interrogação do meio. Sensores multiponto são semelhantes aos pontuais, com a diferença que existem vários pontos de sensoriamento em uma mesma fibra. Sensores pontuais podem funcionar como sensor multiponto na mesma fibra óptica. No caso dos sensores distribuídos, a fibra inteira funciona como elemento sensor, ou seja, existe uma infinidade de elementos sensores na fibra óptica. O objetivo deste trabalho não é rever todas as tecnologias de sensores de fibra óptica, no entanto, a Figura 2.1e a Figura 2.2apresentam uma visão de algumas dessas opções e a Figura 2.3mostra a classificação geral das tecnologias de sensores ópticos, de acordo com o princípio de medição. É claro que esta apresentação é apenas um breve resumo, já que as tecnologias de sensores quasi-distribuídos e distribuídos oferecem muitas possibilidades.



Multiplexagem no domínio do tempo (Time Domain Multiplexing-TDM); Portadora de geração de fase (Phase Generating Carrier - PGC); Grades de Bragg em fibra (Fiber Bragg Grating - FBG); Grades de período longo (Long Period Grating - LPG); Fabry-Perot (FP); Interferômetro Intrínseco de Fabry-Perot (Intrinsic Fabry-Perot Interferometer - IPFI); Interferômetro Extrínseco de Fabry-Perot (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer - EPFI); Fibra óptica plástica (Plastic Optical Fiber - POF)

Figura 2.1 - Diagrama de mapeamento das tecnologias de sensores a fibra óptica quasi-distribuídos[57].

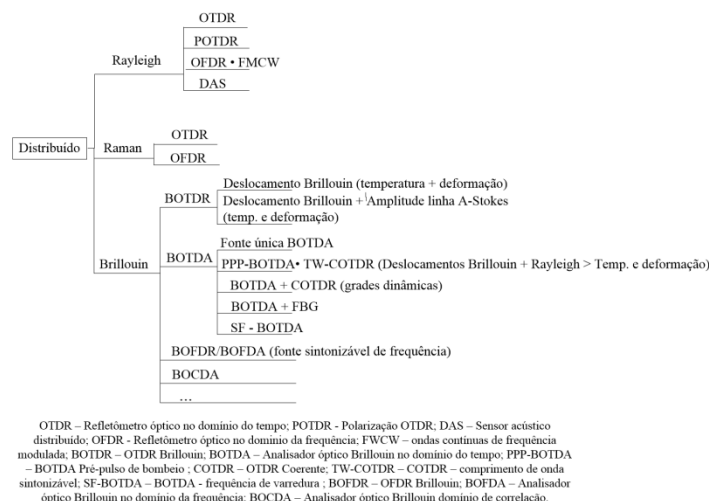


Figura 2.2 - Diagrama de mapeamento das tecnologias de sensores a fibra óptica distribuídos [57].

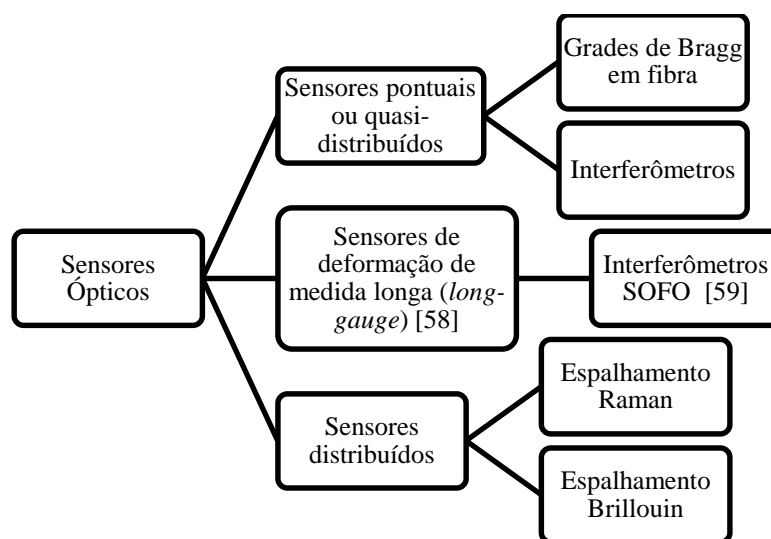


Figura 2.3 - Classificação das tecnologias de mensuração dos sensores ópticos [27].

Nas seções que seguem são apresentadas as plataformas mais usadas de sensores ópticos e os investigados neste trabalho de pesquisa, incluindo o princípio de medição e suas configurações.

2.1 Sensores Quasi-distribuídos

2.1.1 Sensores ópticos com base em grades de difração - Grade de Bragg em fibra

Os sensores baseados em grade de Bragg em fibra (FBG – *Fiber Bragg Grating*) têm gerado grande interesse nos últimos anos devido as suas aplicações em diversos campos, como industriais, ambientais e estruturais. FBGs são simples, versáteis e pequenos elementos sensores intrínsecos, que podem ser inscritos em fibra óptica e que, conseqüentemente, tem todas as vantagens normalmente atribuídas a sensores de fibra óptica. Devido ao fato de que tipicamente a informação mensurada é codificada em comprimento de onda de ressonância da estrutura, o que é um parâmetro absoluto, estes

dispositivos são inerentemente auto referenciados, tornando-os independentes de flutuações da amplitude da luz, e imunes às perdas entre o sensor e a fonte óptica que atrapalham o desempenho de sensores à fibra óptica. Além disso, são várias as vantagens intrínsecas associadas com a tecnologia FBG, tais como a operação em modo de reflexão, resposta espectral de banda estreita e compatibilidade com a tecnologia de telecomunicações. Dessa forma, sensores FBG podem ser facilmente multiplexados, o que é particularmente importante no contexto que trata de análise remota, multiponto e sensoriamento multiparâmetro [60].

As grades de Bragg nada mais são que alterações periódicas do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica monomodo, que podem ser produzidas por exposição da fibra a um padrão de interferência ultravioleta ou radiação de femtosegundos. O dispositivo funciona como um espelho seletivo em comprimento de onda (λ) ou um filtro de reflexão altamente seletivo em comprimento de onda. O comprimento de onda do pico da refletividade (λ_B) é determinado pela condição de casamento de fase, segundo,

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda , \quad (2.1)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo guiado na fibra e Λ é o período de modulação espacial do índice de refração definido como,

$$n(z) = n_{co} + \delta n[1 + \cos(2\pi z/\Lambda)] \quad (2.2)$$

onde n_{co} é o índice de refração original do núcleo e δn é a amplitude da excursão do índice fotoinduzido. A modulação periódica do índice de refração do núcleo faz com que haja difração da luz que se propaga na grade causando o acoplamento da luz do modo do núcleo que se propaga no sentido direto ao modo do núcleo que se propaga em sentido contra propagante, gerando assim, uma banda de reflexão com comprimento de onda central definido pelos parâmetros da grade [61]. Ou seja, quando um sinal óptico de banda larga é injetado na fibra óptica que contém a grade, uma estreita fração espectral é refletida e o restante é transmitido. O sinal refletido tem comprimento de onda de pico definido pelo comprimento de onda da ressonância de Bragg, enquanto todos os outros comprimentos de onda passam através da grade sem perturbações [62], como ilustrado na Figura 2.4. O comprimento físico das grades produzidas é geralmente da ordem de alguns milímetros [63].

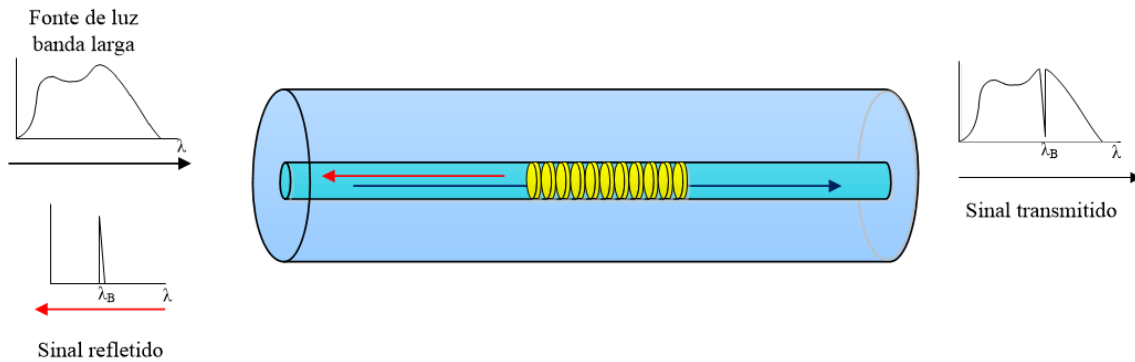


Figura 2.4 - Princípio de operação de uma grade de Bragg em fibra (FBG) [62].

Os sensores FBG têm sido amplamente utilizados para a medição de tração e temperatura [64]. O índice de refração da fibra óptica é diretamente alterado sob aplicação de tração e/ou temperatura, o que gera uma alteração no pico de reflexão e aumenta o valor do comprimento de onda de ressonância [65]. Uma FBG apresenta sensibilidade à temperatura principalmente por meio de mudança induzida no índice de refração e, em proporção menor, no coeficiente de expansão térmica da fibra. Dado que esses parâmetros não podem ser separadamente medidos, o pico de reflexão mostra mudanças de comprimento de onda em um valor $\Delta\lambda_B$, em resposta à deformação ε e a mudança de temperatura ΔT dado por [61],

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = P_e \varepsilon + [P_e(\alpha_s - \alpha_f) + \zeta] \Delta T, \quad (2.3)$$

onde P_e é o coeficiente óptico de tração; α_s é o coeficiente de expansão térmica de qualquer material ligado à fibra; α_f é o coeficiente de expansão térmica da própria fibra; e ζ é o coeficiente termo-óptico.

Caso se analise variações de tração e temperatura simultaneamente, é necessário a utilização de uma grade de referência que meça somente a temperatura, fazendo uso de sua leitura para corrigir os valores de tração [66]. Algumas configurações que permitem a medição simultânea de tração e temperatura têm sido propostas, mas ainda são complexas e caras [67]. O principal interesse no uso de grades de Bragg reside no seu potencial de multiplexação. Muitas grades podem ser inscritas na mesma fibra em diferentes locais e ajustadas para refletir comprimentos de onda diferentes, isso permite a medição da tração em diferentes locais ao longo de uma fibra utilizando uma única fibra. Note que, uma vez que as grades compartilham o espectro da fonte utilizada para iluminá-las, existe um balanceamento entre o número de grades e o intervalo dinâmico das medições em cada uma delas. Existem disponíveis diversas técnicas de medição e instrumentos para a demodulação de sensores FBG, diferenciando-se em termos de

precisão do comprimento de onda e alcance, assim como nas propriedades de sensoriamento dinâmico [67].

2.1.2 Sensores ópticos com base em grades de difração - Grade de Período Longo

O sensor que usa a grade de período longo (LPG - *Long Period Grating*) é um dos sensores a fibra óptica utilizado devido a sua alta sensibilidade ao meio circundante. Este dispositivo, também, consiste em uma estrutura de difração, onde o índice de refração do núcleo da fibra é modulado, com um grande período, entre 100 μm a 600 μm . Esta modulação no índice de refração é induzida na fibra óptica utilizando-se diferentes técnicas como, a irradiação com laser ultravioleta, irradiação com laser de CO_2 , irradiação com laser de femtosegundo, descarga de arco elétrico, processos mecânicos e *etching* periódico [68].

O grande período da grade permite a escrita de LPGs por meio de radiação ultravioleta, por exemplo, com uso de máscaras de amplitude, que são significativamente mais baratas e menos críticas em qualidade do que as máscaras comumente utilizadas no processo de fabricação das FBGs. Além disso, o grande tamanho do período da grade deixa que se faça a inscrição ultravioleta ponto a ponto de forma direta, não apenas descartando a necessidade de se usar máscaras de amplitude, como oferecendo a vantagem da realização adicional de perfis e períodos arbitrários [69].

A luz que se propaga no modo fundamental do núcleo, ao incidir nesta grade, é difratada e as componentes que satisfazem a condição de casamento de fase são acopladas na casca da fibra óptica, ou seja, os modos do núcleo são acoplados nos modos de casca da fibra, o que resulta em várias bandas de atenuação centradas em comprimentos de onda discretos no espectro transmitido, onde cada banda de atenuação corresponde ao acoplamento a um modo de casca diferente. A Figura 2.5 ilustra o princípio de operação da LPG.

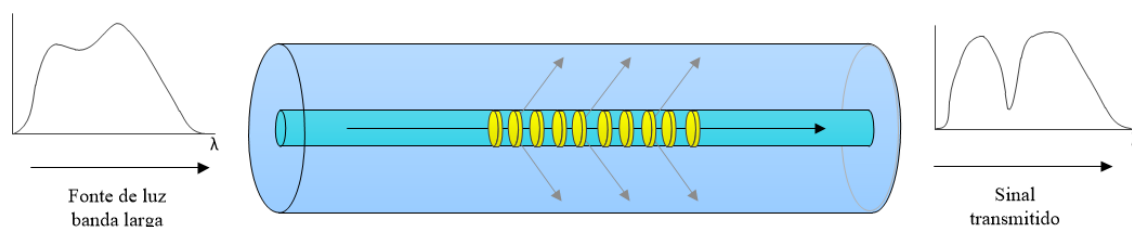


Figura 2.5 - Princípio de operação de uma grade de período longo (LPG).

A largura espectral da ressonância no espectro varia de alguns nanômetros até dezenas de nanômetros, dependendo do comprimento físico da grade. LPGs são intrinsecamente sensíveis ao índice de refração externo, exibindo mudanças na posição do comprimento

de onda da ressonância com a alteração do índice de refração. A ressonância da LPG ocorre somente na condição de casamento de fase [70],

$$\lambda_{res} = (n_{eff,co} - n_{eff,cl}^m)\Lambda \quad , \quad (2.4)$$

onde, λ_{res} é o comprimento de onda ressonante, $n_{eff,co}$ e $n_{eff,cl}^m$ são os índices de refração efetivos do núcleo e do m-ésimo modo da casca, respectivamente, e Λ é o período da grade. Devido aos modos da casca não possuírem boas condições de guiamento, a potência óptica acoplada para estes modos é atenuada rapidamente devido às perdas na interface da casca com o meio externo, o que gera vales de atenuação no espectro de transmissão. Dado que o acoplamento da luz abrange os modos da casca, a resposta espectral da LPG sofre grande influência das propriedades ópticas da casca e do meio que a circunda [71].

Para um sensor LPG de tração, por exemplo, a alteração no período da grade ocorre devido a deformações mecânicas, gerando desvios no comprimento de onda ressonante, λ_{res} . O comportamento descrito pode ser analisado através da equação (2.5) em relação à tração na fibra, ε [65],

$$\frac{d\lambda_{res}}{d\varepsilon} = \frac{d\lambda_{res}}{d(n_{eff,co} - n_{eff,cl}^m)} \left(\frac{dn_{eff,co}}{d\varepsilon} - \frac{dn_{eff,cl}^m}{d\varepsilon} \right) + \Lambda \frac{d\lambda_{res}}{d\Lambda} \quad , \quad (2.5)$$

onde, λ_{res} é o comprimento de onda ressonante, ε é a deformação axial aplicada à fibra, $n_{eff,co}$ e $n_{eff,cl}^m$ são os índices efetivos do núcleo e do m-ésimo modo da casca, respectivamente, e Λ é o período da grade. Entre os termos do lado direito da igualdade, o primeiro constitui a alteração induzida no índice de refração pela deformação da fibra (efeito foto-elástico); e o segundo representa a mudança no período da grade, gerada devido à deformação elástica da fibra [61,65].

Além das configurações de sensoriamento supracitadas, a configuração baseada em interferômetros ópticos tem despertado atenção devido a sua potencial capacidade de sensoriamento e, em alguns casos, devido ao seu custo reduzido e simplicidade de fabricação. A próxima seção descreve brevemente o mecanismo de detecção destes tipos de dispositivos, que são as configurações de sensores investigadas neste trabalho.

2.2 Interferência multimodal

Interferência modal envolvendo mais que dois modos também têm sido estudados, resultando em uma função de transferência espectral que não é co-senoidal, mas em vez disso mostra fortes picos em comprimentos de onda específicos. Essa abordagem é comumente tratada como uma interferência multimodo (MMI - *Multimode Interference*).

Dispositivos MMI são normalmente obtidos por emenda de uma seção MMF entre duas SMF, formando assim uma configuração em fibra SMF-MMF-SMF (SMS) [47] [72-74], como mostra a Figura 2.6. Baseada em interferência multimodal, a estrutura SMS funciona como um filtro de banda óptica que tem sido explorada em comunicações ópticas e aplicações em sensoriamento.

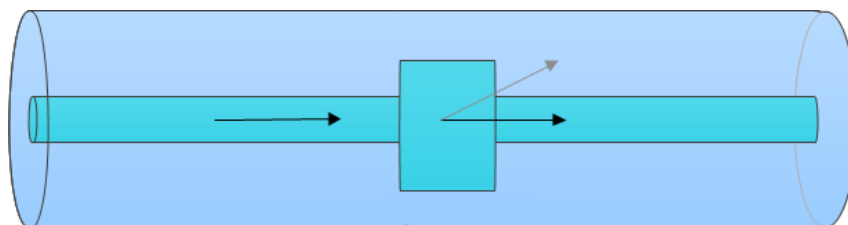


Figura 2.6 - Interferômetro multimodal monomodo-multimodo-monomodo (SMS).

A seção MMF atua como um mecanismo de acoplamento núcleo-casca devido ao grande descasamento de diâmetro de núcleo (CDM- *Core diameter mismatch*) [33,48]. A MMF acopla parte da luz que viaja ao longo do núcleo da primeira SMF para a casca da segunda SMF, e este acoplamento induz a uma perda de potência no sinal transmitido que viaja ao longo do núcleo.

O conceito de configuração SMS se baseia no fato de que, quando o campo de luz que vem da primeira SMF entra na seção da MMF, excita vários modos de alta ordem, gerando um padrão de interferência periódica ao longo da seção MMF. De acordo com o comprimento de onda e comprimento geométrico, a luz dentro da seção MMF pode interferir de forma construtiva ou destrutiva resultando, no final, em um dispositivo com diferentes características espectrais [34]. Portanto, o comprimento da seção MMF determina as características espectrais do dispositivo MMI. A distribuição espectral da potência transmitida é altamente sensível ao comprimento do caminho óptico na seção MMF.

À parte do princípio de MMI, também é possível ter um sensor de mesma configuração onde o acoplamento não é seletivo em termos de comprimento de onda, ou seja, é independente do comprimento de onda [48] [75,76]. O dispositivo SMS produzido neste trabalho mostrou que não age como um MMI. Isto ocorre porque o comprimento físico da MMF é muito pequeno (bem menor que o ponto de reimagem, onde a interferência construtiva entre os modos é máxima) e, assim, a perda no sinal óptico aumenta quando perturbado, o que faz com que seja atraente para várias aplicações. Neste sentido, por exemplo, a atenuação do sinal óptico varia quando a fibra é submetida à curvatura.

2.3 Sensores ópticos com base em interferômetros

Interferômetros a fibra óptica são baseados na interferência entre dois ou mais feixes que se propagam por diferentes caminhos ópticos em uma fibra, ou duas fibras diferentes. Dessa forma, os interferômetros requerem componentes tanto para dividir o feixe como para reagrupá-los [2]. Nesse processo, um dos caminhos precisa ser arranjado de forma que este seja afetado pela perturbação externa que se deseja analisar.

Dispositivos como os interferômetros permitem que se determine o mensurando quantitativamente por meio de detecção de variações de comprimento de onda, potência, fase, intensidade, frequência, largura de banda, entre outros [2-3]. Os interferômetros ópticos podem ser classificados em quatro tipos representativos [2]: Fabry-Perot, Mach-Zehnder, Michelson e Sagnac. As subseções a seguir irão apresentar de forma sucinta o princípio de operação de dois desses tipos de interferômetros, o interferômetro de Mach-Zehnder e o de Michelson, por serem estas as configurações base dos tipos de sensores investigados neste trabalho.

2.3.1 Interferômetro de Mach-Zehnder

Neste dispositivo a luz incidente é dividida em duas partes e, posteriormente, recombinada. Os primeiros interferômetros de Mach-Zehnder (MZI -*Mach-Zehnder Interferometer*) possuíam dois braços independentes, um de referência e outro utilizado para detectar o mensurando. Com o advento das LPGs, a configuração de dois braços independentes de um MZI tem sido substituída pelo esquema do interferômetro em linha. Existem diversos métodos de construção de um MZI em linha em uma fibra óptica [2], como mostra a Figura 2.7.

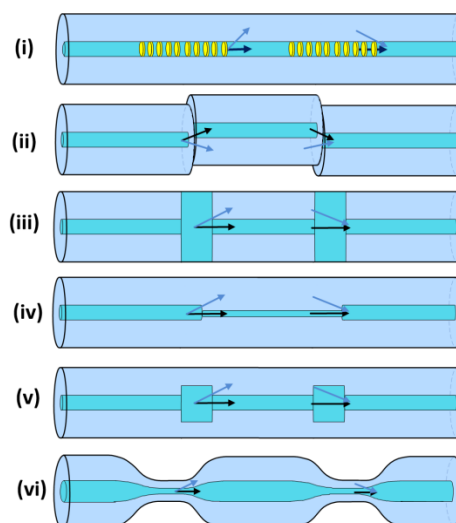


Figura 2.7 - Configurações de MZI em linha aplicando (i) um par de LPGs; (ii) desalinhamento do núcleo; (iii) SMF entre duas fibras de cristal fotônico; (iv)SMF de pequeno núcleo; (v) segmento de fibra multimodo e, (vi) afunilamento em fibra [2].

Dentre os métodos de construção mostrados na Figura 2.7, temos: (i) configuração onde uma parte do modo fundamental do núcleo de uma SMF padrão é acoplado por uma LPG aos modos da casca da fibra, e após uma determinada distância, é reacoplado ao modo do núcleo por outra LPG. A casca da SMF age como um guia multimodo, onde o número de modos envolvidos no MZI é em geral mais que um. Apesar disso, o par de LPGs usa somente um modo da casca na maioria dos casos. O índice de refração efetivo dos modos da casca é menor do que o índice de refração efetivo do modo do núcleo. O feixe dividido e o feixe combinado no núcleo geram interferência, o que faz dessa configuração um compacto e eficaz MZI. Para esse tipo de MZI em linha, os “braços” apresentam comprimentos de caminhos ópticos diferentes devido a dispersão modal [77].

Em (ii) temos uma configuração de MZI que divide o sinal óptico entre o núcleo e a casca da fibra por meio de emenda entre duas fibras com um minúsculo desalinhamento (*offset*) lateral. Devido a esse *offset*, parte do modo do núcleo é acoplada a diversos modos da casca, sem sofrer forte influência do comprimento de onda. Essa configuração supera em custo e rapidez o método que utiliza um par de LPGs. A quantidade de modos da casca e a perda de inserção podem ser controladas por meio de ajuste da quantidade de *offset* [2]. Constituindo outra forma de se ter um MZI em linha, (iii) apresenta configuração baseada na emenda entre uma fibra SMF e duas fibras de cristal fotônico (PCF-*Photonic crystal fiber*). É de fácil construção e não necessita de nenhum processo complicado de alinhamento ou clivagem. O modo do núcleo em uma PCF é expandido para a região de lacuna de ar colapsada, tal que parte dele pode ser acoplado aos modos da casca da PCF. No entanto, tem-se acoplamento para diversos modos da casca, o que dificulta o controle do número de modos envolvidos, além de apresentar maior perda de inserção em comparação ao método anterior [2].

As configurações em (iv) e (v) tratam do uso de fibras com diferentes diâmetros de núcleo [78,79]. Na Figura 2.7(iv) uma fibra de pequeno núcleo é inserida entre duas SMF padrão. Na região de núcleo pequeno, o feixe de luz é guiado como modo do núcleo e como modo da casca. O modo da casca é excitado devido a diferença entre os diâmetros dos núcleos das duas fibras, e interfere com o modo do núcleo, formando um interferômetro modal em fibra [2,78].

A configuração (v) tem um pequeno pedaço de fibra multimodo emendado por fusão em dois pontos ao longo da SMF. As duas seções MMF agem como acoplador e reacoplador dos modos núcleo-casca e a seção da SMF ao meio atua como o “braço” de interferência[79]. A última configuração, (vi), ilustra um MZI em linha formado por

afunilamento de uma fibra (*taper*) em duas secções [53,80]. Com outro *taper* semelhante a alguns centímetros do primeiro, a atenuação do modo da casca é desprezível e a energia do modo da casca pode ser acoplada de volta da casca para o núcleo. Esse tipo de configuração é eficaz e relativamente simples, no entanto mecanicamente frágil principalmente na secção do *taper*.

As duas últimas configurações da Figura 2.7, serão melhor explicadas na secção 2.3.1.1 e 2.3.1.3 da tese.

2.3.1.1 Dois *tapers* em SMF

Baseadas em aplicações de *taper* em fibra, algumas pesquisas em acoplamento de potência e filtragem focaram principalmente na minimização da perda de inserção por meio de afunilamento gradual da SMF para um diâmetro do *taper* de vários micrômetros. Assim, *tapers* mais graduais ou ângulos de *tapers* menores despertam preferência. Se o ângulo do *taper* é grande, alguma energia da luz no núcleo vai ser acoplada na casca e, finalmente, ser atenuada na casca da fibra óptica. No entanto, se na SMF existe outro *taper* semelhante a alguns centímetros do primeiro, como ilustrado na Figura 2.7(vi), a atenuação do modo da casca é desprezível, e a energia do modo da casca pode ser acoplada de volta da casca para o núcleo. Devido à diferença de fase entre os modos do núcleo e da casca, é criado um interferômetro MZI após o segundo *taper* [53].

2.3.1.2 *Taper* e desalinhamento lateral em fibra

Outra configuração em fibra para sensoriamento consiste em fazer um *taper* seguido de emenda desalinhada (*offset*) em fibra óptica. A Figura 2.8 mostra o diagrama esquemático dessa configuração. Primeiro, a luz de entrada é dividida em duas porções na secção do *taper*: uma porção viaja através do núcleo e outra através da casca. Ao chegar à secção com *offset*, o sinal óptico é novamente dividido e a luz se propaga ao longo do núcleo e da casca [54]. Devido ao *offset* parte do modo do núcleo é acoplada a diversos modos da casca. O número de modos da casca e a perda de inserção podem ser geridos por meio de ajuste da quantidade de *offset*.

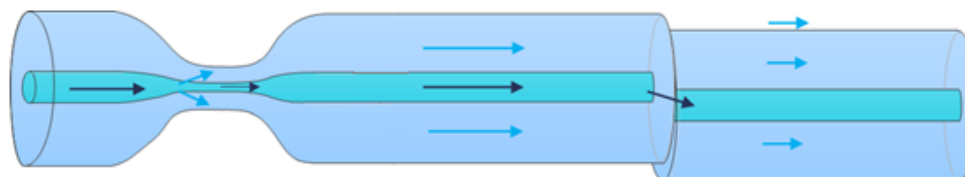


Figura 2.8 - Diagrama esquemático de sensor que consiste em um *taper* e *offset* em fibra [53].

2.3.1.3 Descasamento de diâmetro de núcleo

A configuração de descasamento de diâmetro de núcleo (CDM - *Core diameter mismatch*), como já citado na seção 2.2, é proposta como alternativa válida de mecanismo de acoplamento de modo para transferir potência óptica entre o núcleo e os modos de alta ordem da casca através de duas seções descasadas. Isso pode ser feito inserindo uma pequena seção de fibra especial entre duas SMF. O princípio por trás destas configurações é o mesmo de interferômetros modais expostos nas seções anteriores [2, 78, 79].

A configuração se baseia no uso de uma pequena seção de fibra monomodo (SMF) emendada por fusão entre duas fibras multimodo (MMF) que são emendadas por fusão em dois pontos ao longo da SMF, também designada como SMSMS (*singlemode – multimode – singlemode – multimode – singlemode*), como ilustrado na Figura 2.7 (v). A luz injetada na fibra se propaga no núcleo da SMF e se espalha na região da MMF, e então é acoplada ao núcleo e à casca da SMF seguinte [79]. A primeira MMF acopla parte do modo fundamental guiado no núcleo aos modos da casca via descasamento de diâmetro de núcleo (CDM). Assim os modos da casca que se propagam na seção SMF do meio tornam-se sensíveis. Por fim, os modos da casca são acoplados de volta para o núcleo da última SMF por meio da segunda MMF, misturando-se com o modo do núcleo original, gerando o sinal de interferência [50]. As duas seções MMF agem como acoplador e reacoplador de modos de núcleo-casca, e a seção de SMF ao meio atua como o “braço” de interferência. O dispositivo de sensoriamento utilizado neste trabalho é constituído pelo sanduíche de uma seção de 30 mm de SMF entre dois segmentos de 3 mm de MMF, emendados entre duas SMFs.

2.3.2 Interferômetros de Michelson

O interferômetro de Michelson (MI - *Michelson interferometer*) é o tipo mais fundamental de interferômetro de dois feixes. Ele pode ser utilizado para medir comprimentos de onda com grande precisão. O MI é um dispositivo óptico com princípio similar a um MZI, onde um feixe de luz incidente é dividido em duas partes iguais, e cada feixe é refletido ao fim de cada “braço” interferindo entre si quando se encontram como mostra a Figura 2.9 [81, 82].

O método de fabricação e o princípio de funcionamento do MI são quase os mesmos que de um MZI, diferindo na existência de um espelho na extremidade dos “braços”, que funciona como refletor. Como MIs usam modos de reflexão, estes dispositivos são

compactos e adequados em usos práticos. Outra vantagem de um MI é a capacidade de multiplexação com ligação em paralelo de vários sensores [2].

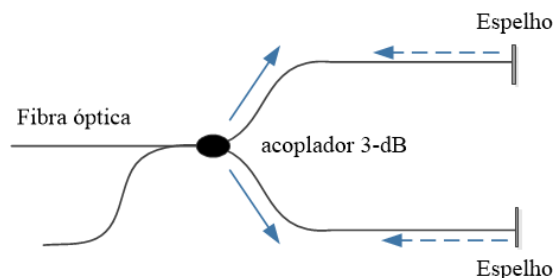


Figura 2.9 - Configuração básica de interferômetro de Michelson [2].

Também é possível ter uma configuração em linha de MI, como mostra a Figura 2.10. Neste caso, uma parte do feixe do modo do núcleo é acoplada aos modos da casca devido a LPG. Estes modos são refletidos junto com o modo do núcleo, mas, são desacoplados pelo espelho no final da fibra [2].

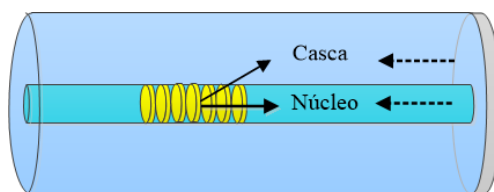


Figura 2.10 - Diagrama de um MI em linha compacto [2].

Outro exemplo de MI em linha é o uso de *taper* em fibra com a extremidade clivada [83], como mostra a Figura 2.11. O modo do núcleo é acoplado aos modos da casca, os quais sofrem reflexão na ponta clivada da fibra devido à reflexão de Fresnel.

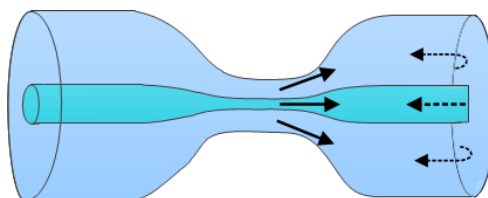


Figura 2.11 - MI em linha aplicando *taper* [83].

2.3.3 SMF com *taper*

Para ter-se um *taper* em uma SMF é necessário reduzir o diâmetro da casca, juntamente com o do núcleo. Essa redução é feita aquecendo-se uma seção da fibra e esticando-a por ambas as extremidades em direções opostas, utilizando um processo de aquecimento. Para o aquecimento pode ser utilizado um feixe de laser de CO₂ focado ou um arco elétrico formado entre um par de eletrodos. Dependendo de que forma é feito o *taper*, é possível fabricá-lo com diferentes formas e propriedades. Na fibra óptica afunilada, a interface núcleo-casca é redefinida de forma que parte da energia do modo do núcleo é

transferida para os modos da casca [52, 84]. Na Figura 2.12 mostra-se o esquema de um *taper* em fibra.

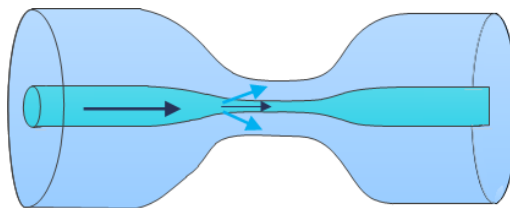


Figura 2.12 - Configuração de *taper* simples em SMF [52].

Tapers em fibra podem ser classificados em duas categorias distintas: adiabático e não adiabático. Um *taper* adiabático é caracterizado por uma alteração muito suave no perfil (pequeno ângulo do *taper*), de forma a garantir uma conversão suave, sem perdas significativas no sinal transmitido. Nesse caso, a parte principal da radiação permanece no modo fundamental (LP_{01}) e não se acopla com os modos de ordem mais elevada quando se propaga ao longo do *taper*. Os *taper* sem regime não adiabático (ângulo de *taper* abrupto) são feitos de forma que parte da energia do modo fundamental pode ser acoplada com os modos de ordem mais elevada da casca [52, 85]. Normalmente, esses dispositivos apresentam comprimentos variando de poucos milímetros a dezenas de milímetros, e um diâmetro de alguns micrômetros, promovendo grande interação do sinal óptico com o meio circundante.

2.4 Sensores Distribuídos

Sensores distribuídos são aqueles onde a própria fibra é o sensor, ou seja, a fibra óptica normalmente utilizada para comunicação entre dois pontos remotos, situados a dezenas de quilômetros de distância, tem o potencial de ser utilizada como sensor de alguns parâmetros importantes [23, 57, 86, 87]. Devido às propriedades da fibra óptica somadas as técnicas de interrogação avançadas, no sensoriamento distribuído, a fibra atua simultaneamente, como canal óptico e transdutor distribuído. É como se a fibra desempenhasse o papel de “nervo” dos materiais e estruturas nos quais a fibra foi embebida [86, 87].

Espalhamento linear e/ou espalhamento não linear podem ser usados como técnicas para se desenvolver sensores distribuídos e, assim, ajustar-se às exigências específicas de comprimento e de resolução do mensurando.

Sensores de fibra óptica distribuídos utilizam algumas técnicas que são: o efeito não linear de espalhamento Raman, o efeito não linear de espalhamento Brillouin e o efeito linear de espalhamento Rayleigh [57, 86, 88, 89]. Espalhamento Raman (para temperatura) e

espalhamento Brillouin (para deformação e/ou temperatura) ou a combinação desses dois efeitos, usando tempo, frequência, polarização, ou outros parâmetros, são utilizados para interrogar o transdutor distribuído [87-89].

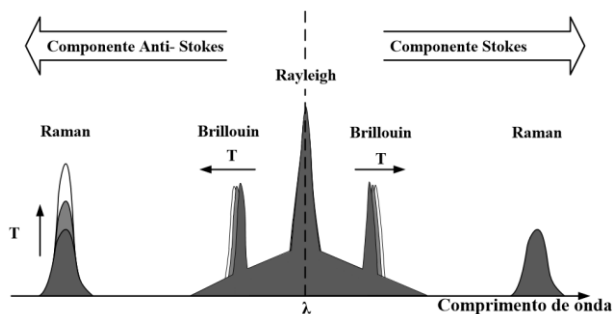


Figura 2.13 - Ilustração dos efeitos de espalhamento [87].

Alguns sistemas distribuídos podem ser de sistemas de sensoriamento distribuído de temperatura, (DTS - *Distributed Temperature Sensing*), onde o que se monitora é a temperatura distribuída. O princípio DTS, baseia-se no espalhamento Raman no núcleo da fibra que é analisado por um refletômetro óptico no domínio do tempo (OTDR - *Optical time domain reflectometer*), ou seja, um processo de localização espacial ao longo da fibra óptica, baseado na dualidade espaço-temporal (análise temporal equivale a um dimensionamento espacial, a velocidade da luz sendo conhecida). Estes sistemas são fundamentais no monitoramento da carga máxima de corrente de linhas de transmissão de energia subterrâneas e na detecção de queimadas em linhas de transmissão de energia aéreas [90]. Outras aplicações são na detecção de falhas em gasodutos e na saúde das estruturas de barragens. Sistemas de sensoriamento distribuído de tração (DSS - *Distributed Strain Sensing*) monitoram a deformação mecânica distribuída. Estes sistemas têm grande importância no campo do SHM, no monitoramento da integridade de construções civis de grande porte tais como barragens, pontes, edifícios, estádios, etc [91]. Sistemas de sensoriamento distribuído de sinais acústicos (DAS - *Distributed Acoustic Sensing*), monitora sinais acústicos que ocorrem nas proximidades de um cabo de fibra óptica instalado. Apesar de ter iniciado seu desenvolvimento desde o final dos anos 80, esta tecnologia ficou um pouco a margem da comunidade científica, por ter aplicações ligadas ao setor de segurança/militar. São sistemas de valor enorme no monitoramento da segurança de perímetros de grandes indústrias, aeroportos, áreas militares, usinas, bem como na segurança de linhas férreas e esteiras de grande porte. Com os sistemas já disponíveis atualmente pode-se reconhecer efeitos que ocorrem a

dezenas de quilômetros de distância e que implicam na invasão de áreas ou em estruturas defeituosas [92].

CAPÍTULO 3. MODELAGEM NUMÉRICA DE SENSOR SMS BASEADO EM TÉCNICA CDM

Neste capítulo é apresentado a modelagem utilizada para estudo e projeto de um sensor SMS baseado na técnica de descasamento de diâmetro de núcleo (CDM – *Core diameter mismatch*). Será descrita a modelagem desse sensor para uso em engenharia civil, com análise da variação do padrão de interferência do sinal interferométrico, avaliada na transmissão como sensor de curvatura.

Para modelagem e resposta da estrutura SMS, como elemento sensor, empregou-se o *software* comercial *BeamPROP* 9.0 da empresa Rsoft™, que se baseia no método de propagação de feixes com diferenças finitas (FD-BPM - *Finite Difference Beam Propagation Method*). As próximas seções deste capítulo abordam algumas características do FD - BPM e do software BeamPROP, assim como os aspectos referentes à modelagem utilizada no sensor SMS, baseada nos aspectos teóricos do interferômetro já apresentado no capítulo 2.

3.1 Método de propagação de feixes com diferenças finitas

O *software* comercial *BeamPROP* 9.0 da empresa Rsoft™, dispõe de um pacote geral para simulação, que calcula a propagação de luz em guias de onda de geometria arbitrária [93]. Utiliza o método numérico FD-BPM, que é uma variação do BPM (*Beam Propagation Method*) tradicional, e faz uso do método de diferenças finitas para resolver a aproximação parabólica ou paraxial da equação de Helmholtz [94,95].

Em sua forma convencional, o BPM possui algumas limitações como de natureza física na sua condição de paraxialidade (ou seja, propagação restrita a uma estreita faixa de ângulos) na direção de propagação primária, a qual deriva da aproximação parabólica à equação de Helmholtz [96, 97].

3.1.1 BPM e restrições de campo escalar e paraxialidade

O método BPM é aplicado na aproximação da equação de onda exata para ondas monocromáticas e solução das equações resultantes numericamente. A ideia de campo escalar possibilita que a equação de onda seja reescrita na forma da equação de Helmholtz para ondas monocromáticas da seguinte forma [94, 95],

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k^2(x, y, z)\phi = 0 \quad , \quad (3.1)$$

onde o campo elétrico escalar é escrito como $E(x, y, z, t) = \phi(x, y, z)e^{-i\omega t}$, e a notação $k(x, y, z) = k_0 \cdot n(x, y, z)$ é definida como o número de onda espacialmente dependente, e $k_0 = 2\pi/\lambda$ sendo o número de onda no espaço livre. A distribuição do índice de refração $n(x, y, z)$ define a geometria do problema.

Considerando-se que, em problemas convencionais de onda guiada a variação mais rápida no campo ϕ é a variação devido à propagação ao longo do eixo de guiamento; e que o eixo é predominantemente ao longo da direção z , é conveniente fatorar essa rápida variação, de forma que seja introduzido um assim definido campo lentamente variante, u [94, 95],

$$\phi(x, y, z) = u(x, y)e^{i\bar{k}z} \quad , \quad (3.2)$$

onde \bar{k} é o número de onda de referência, adotado para representação da variação média do campo ϕ . Aplicando a equação (3.2) na equação de Helmholtz apresentada na equação (3.1), a equação para o campo de variação lenta é dada como [94, 95],

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2i\bar{k} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u = 0 \quad , \quad (3.3)$$

A equação (3.3) é o equivalente da equação de Helmholtz, expressa em termos de u . Considerando que u em relação a z , possui variação lenta, pode-se desprezar o primeiro termo em relação ao segundo termo da equação (3.3). Esta é definida como a aproximação da envoltória de variação lenta e como aproximação paraxial ou parabólica. De posse dessas considerações e aplicando alguns ajustes, pode-se reduzir a equação (3.3) ao formato de [94, 95],

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{i}{2\bar{k}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u \right), \quad (3.4)$$

que é a equação básica do BPM, em três dimensões (3D). Para aplicação em duas dimensões (2D), a simplificação omite qualquer dependência sobre y [93].

A aproximação obtida possui vantagens e limitações. Uma das vantagens dessa simplificação é a eliminação do termo com variação rápida de fase, o que permite que o campo de variação lenta seja numericamente representado em uma malha longitudinal, ou seja ao longo de z , que pode ser muito maior que o comprimento de onda para muitas aplicações, contribuindo em parte na eficiência da técnica [94].

Outra vantagem é a eliminação do termo da segunda derivada em z que reduz o problema de valor de contorno de segunda ordem, requisitando iteração ou análise de autovalor, para um problema de valor inicial de primeira ordem que pode ser solucionado por uma simples integração da equação (3.4) ao longo da direção de propagação z . Essa última

vantagem é fator que determina a eficiência do BPM, que implica na redução do tempo de simulação, de no mínimo, da ordem do número de pontos da malha longitudinal comparada à solução numérica completa da equação de Helmholtz [94]. Além destas vantagens, a aproximação de envoltória de variação lenta limita a consideração dos campos que primariamente se propagam na direção de propagação z (paraxialidade).

O BPM (*Beam Propagation Method*) foi selecionado para modelar o dispositivo SMS estudado nesse trabalho, sob motivação de simplificação que a técnica oferece, considerando a envoltória do campo e não suas oscilações rápidas, o que além de ser importante para se obter um tempo de simulação computacional mínimo, permite que se utilize comprimento longitudinal da malha numérica com valor acima do comprimento de onda.

3.1.2 BPM - solução numérica e condições de contorno

Em aplicações de óptica integrada, a aproximação já citada e suas derivadas definem o método que costuma ser identificado na literatura de FD-BPM (*Finite Difference Beam Propagation Method*) [95, 98, 99]. Com a aproximação pelo método de diferenças finitas, o campo no plano transversal (xy) é representado apenas em pontos discretos sobre uma malha, e em planos discretos ao longo do eixo longitudinal, ou de propagação (z). Para um campo discretizado em um plano no eixo z , é necessário determinar o campo no próximo plano no eixo z através de equações numéricas. Essa etapa é repetida para cada passo de propagação, para determinar o campo através de toda estrutura.

Supondo que u_i^n represente o campo no ponto i da malha transversal e no plano longitudinal n , e assumindo-se que os pontos da malha e dos planos são espaçados igualmente por Δx e Δz , respectivamente, com o método de Crank-Nicholson, a equação (3.4) é definida no plano médio entre o plano conhecido n e o plano desconhecido $n + 1$, como,

$$\frac{u_i^{n+1} + u_i^n}{\Delta z} = \frac{i}{2k} \left(\frac{\delta^2}{\Delta x^2} + (k(x_i, z_{n+1/2})^2 - \bar{k}^2) \right) \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{2}, \quad (3.5)$$

onde δ^2 é o operador padrão diferença de segunda ordem, $\delta^2 u_i = (u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i)$, e $z_{n+1/2} \equiv z_n + \Delta z/2$. Reorganizando a equação (3.5) na forma matricial tridiagonal padrão para o campo desconhecido u_i^{n+1} , em termos das quantidades conhecidas, tem-se,

$$a_i u_{i-1}^{n+1} + b_i u_i^{n+1} + c_i u_{i+1}^{n+1} = d_i, \quad (3.6)$$

Os coeficientes da equação (3.6) podem ser descritos como [93],

$$a_i = c_i = -\rho A_i^{n+1/2}, \quad (3.7)$$

$$b_i = 2(1 + \rho A_i^{n+1/2}) - h B_i^{n+1/2}, \quad (3.8)$$

$$d_i = \left[2 \left(1 - \rho A_i^{n+\frac{1}{2}} \right) + h B_i^{n+\frac{1}{2}} \right] u_i^n + \rho A_i^{n+\frac{1}{2}} (u_{i-1}^n + u_{i+1}^n), \quad (3.9)$$

onde $A = \frac{i}{2\bar{k}}$, $B = i(k^2 - \bar{k})/2\bar{k}$, $h = \Delta z$ e $\rho = \Delta z/\Delta x^2$. A natureza tridiagonal da equação (3.6) possibilita solução rápida nas operações de ordem N , onde N é o número de pontos da malha em x [93].

Uma vez que o campo só pode ser exibido sobre um domínio computacional finito, quando a equação (3.6) é aplicada aos pontos de contorno $i = 1$ e N , refere-se as quantidades desconhecidas externas ao domínio. Considerando esses pontos, a equação (3.6) precisa ser substituída por condições de contorno pertinentes, as quais completam o sistema de equações. No entanto, a seleção apropriada dessas condições é crítica, visto que uma escolha inadequada pode conduzir a reflexão artificial de luz incidente no limite (por exemplo, radiação) de volta ao domínio computacional. Uma condição de contorno comumente utilizada é a condição de contorno transparente (TBC - *Transparent boundary condition*) [100]. Essa abordagem assume que o campo próximo ao contorno, apresenta comportamento de uma onda plana saindo, com características (amplitude, direção) que são determinadas de forma dinâmica por meio de algum algoritmo heurístico. A aplicação do TBC é em geral muito satisfatória, já que permite que a radiação escape livremente do domínio computacional. No entanto, existem problemas nos quais essa condição não apresenta boa performance, em especial para simulações de propagação de ondas paraxiais [101].

3.2 Interferência multimodal – ponto de reimagem

Estruturas convencionais baseadas em interferência multimodal (MMI - *Multimodal Interference*) tem sido empregadas em aplicações como moduladores [102] e filtros [103], operando sobre o princípio de reimagem [104-106], isto é, o ponto de máxima interferência construtiva entre os modos propagantes do guia de onda ao longo do eixo de propagação. Dispositivos sensores construídos em fibra, operando sob o princípio da reimagem, utilizam esse ponto de máxima interferência construtiva, ponto de maior

potência, portanto, para melhor identificar as alterações causadas pelos parâmetros medidos [104].

Segundo Soldano [107], o princípio de reimagem pode ser definido como: *“Uma propriedade de guias de onda multimodo, através da qual um perfil de campo de entrada é produzido em imagens individuais ou múltiplas em intervalos periódicos ao longo da direção de propagação do guia”*.

Estruturas baseadas MMI usam a propriedade que guias com um grande número de modos possuem de reproduzir uma imagem inicial, em certo número de vezes [108]. A luz que se propaga em um guia monomodo, é inserida em região altamente multimodal, onde a potência é transferida para os diferentes modos suportados. Ou seja, quando se excita um guia de onda multimodo, observam-se os efeitos que envolvem a relação do modo de entrada com os modos dos campos do guia de onda multimodo, e, em seguida, a interferência entre ondas [109].

A interferência multimodal é acompanhada pelos chamados efeitos de reimagem do modo de entrada, que é o excitador do guia de onda multimodo. Como resultante desses efeitos, o modo de entrada, o qual frequentemente parte de um guia de onda monomodo, ou de um grupo de guias de onda monomodo, é reproduzido como imagens simples, espelhadas e múltiplas [109]. Esse fenômeno constitui a base de operação das estruturas baseadas em MMI.

O esquema de uma estrutura MMI consiste em (i) guias na entrada e na saída da região multimodo e centrados no eixo de simetria do MMI ($x=0$); e (ii) uma seção multimodo larga, onde os efeitos de interferência dos modos são observados [110,111], como mostra a Figura 3.1.

De posse desta configuração, aplicou-se modelagem numérica à estrutura, utilizando na simulação um comprimento de fibra multimodo maior do que o que foi utilizado pelo sensor proposto neste trabalho. Como o comprimento da seção MMF determina as características espectrais do dispositivo MMI, mostra-se com a simulação que o comprimento adotado neste trabalho é muito menor que o necessário para o surgimento de reimagem. No caso da fibra MMF com apenas 3 mm, como proposto nesta tese, apenas ocorre perda no sinal óptico. Por ser curta, não forma os padrões de interferência construtiva, que requerem um comprimento maior.

Essas considerações sustentam a afirmação de que o sensor SMS de curvatura proposto neste trabalho não funciona como um MMI convencional, visto que gera padrões de

interferência destrutiva, variando somente a atenuação do sinal óptico com o aumento da curvatura, sem ser seletivo em termos de comprimento de onda.

Os parâmetros da estrutura, dimensões e materiais, são apresentados na Figura 3.1, que corresponde a uma estrutura MMI em três dimensões. A SMF tem núcleo com raio de $4.1\mu\text{m}$ e casca com raio de $62.5\mu\text{m}$. O índice de refração da casca vale 1.45, e o índice de refração do núcleo vale 1.45522 (parâmetros equivalentes à fibra padrão de telecomunicações SMF-28 da empresa Corning), o que permite o guiamento da luz pelo núcleo da fibra. A MMF tem núcleo com raio de $52.5\mu\text{m}$ e casca com raio de $62.5\mu\text{m}$. A casca possui índice de refração com valor de 1.440 e índice de refração do núcleo de 1.457 (parâmetros equivalentes à fibra comercial MMF FG105 - LCA, da empresa Thorlabs). O comprimento de onda de luz utilizada foi de $1.55\mu\text{m}$ e o índice de refração do meio externo igual a 1, referente ao índice de refração do ar.

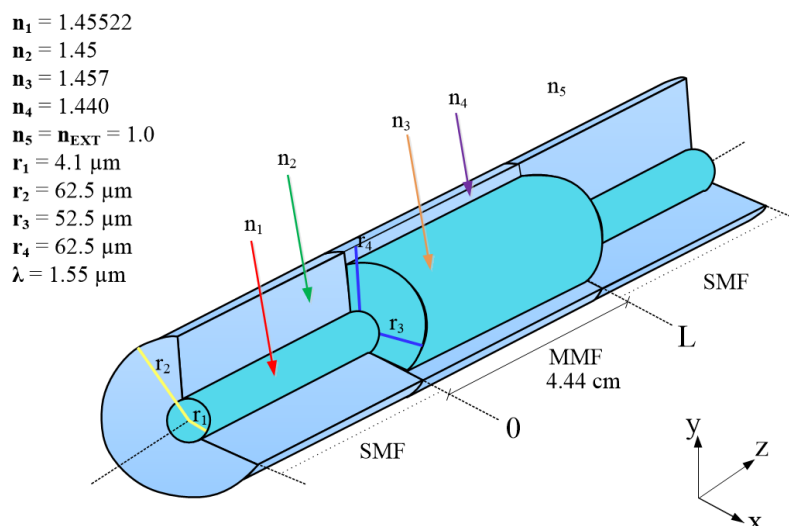


Figura 3.1–Modelo tridimensional de estrutura SMS com MMF 105/125 μm para análise de efeito de reimagem, com guias monomodo à $z < 0$ e $z > L$.

A Figura 3.2 mostra o resultado da simulação realizada, utilizando código computacional baseado no método de propagação de feixe (BPM – *Beam Propagation Method*) [93], da empresa RSOF. Na Figura 3.2 apresenta-se a intensidade óptica ao longo de um plano longitudinal da estrutura SMS, onde o verde representa a máxima intensidade de campo elétrico e o marrom a menor intensidade.

No início da estrutura, à esquerda da imagem, se pode ver o sinal óptico se propagando na seção de fibra monomodo. No trecho de $z \cong 0.1$, o sinal é inserido na seção multimodo e a luz se difrata por toda a superfície acoplando-se com vários modos. Um padrão de interferência ao longo da fibra MMF pode ser observado. Em determinada distância, a

maior parte do sinal entra em fase e nota-se um pico de intensidade óptica, que representa a interferência construtiva dos principais modos da estrutura, ou seja, os modos que transportam a maior parte da energia. O ponto z no qual esses modos entram em fase é o ponto da primeira reimagem, $z = L$. Essa mesma interferência construtiva volta a surgir em posições múltiplas da primeira posição de reimagem. É possível conhecer o valor de L por meio dos dados da simulação ou da análise da propagação dos modos guiados [107]. Baseado no que mostra a Figura 3.2, e nos dados da simulação, a reimagem para a estrutura SMS com MMF 105/125 μm se encontra para um comprimento da seção MMF de ≈ 3.45 cm, valor bem superior ao utilizado no sensor proposto nesta tese. Esse comprimento gerado na simulação depende, geralmente, da qualidade da malha utilizada para discretizar a seção transversal das fibras e também do passo em z utilizado para a análise de propagação. Portanto, deve se ter muito cuidado na escolha da malha e do passo a serem utilizados para garantir a obtenção do resultado correto [93, 112].

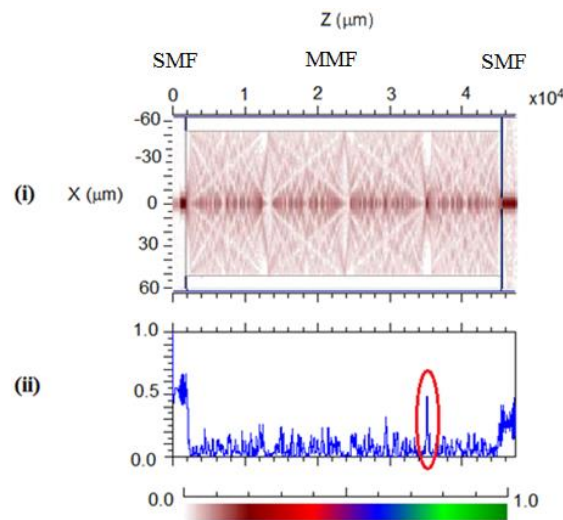


Figura 3.2 – Padrões de interferência obtidos por método de propagação de feixe para uma estrutura SMS com um guia multimodo de índice degrau com 105 μm de diâmetro de núcleo e 4.44 cm de comprimento: (i) campo de propagação; e (ii) projeção do campo de propagação no campo modal da MMF em comprimento de onda de 1550 nm.

3.2.1 Ponto de reimagem

Após a excitação de um guia multimodo, vários modos são excitados com diferentes constantes de propagação. Existem normalmente dois modos consecutivos que são mais excitados [113-115], com constantes de propagação β_m e β_{m+1} . O fenômeno de reimagem surge a uma distância de propagação L_p , onde,

$$(\beta_m - \beta_{m+1})L_p = 2p\pi, \quad (3.10)$$

com p sendo um número inteiro.

O ponto de surgimento da reimagem é dependente da eficiência de acoplamento entre o modo da SMF e os modos da seção MMF [2, 116, 117]. Pode-se estimar a posição da reimagem conhecendo-se qual modo da seção MMF tem maior eficiência de acoplamento com o modo da SMF. O surgimento da reimagem depende da diferença de fase entre o modo acoplado com maior eficiência, e de todos os outros modos da MMF [112, 115]. Para excitações simétricas em guias em fibra de índice degrau, os únicos modos excitados são os modos linearmente polarizados LP_{0n} [115]. Para estes modos, temos a aproximação [118],

$$\beta_m \approx \frac{\pi\lambda}{8n_{\text{núcleo}}a^2}(-2m^2 + m), \quad (3.11)$$

onde $n_{\text{núcleo}}$ é o índice de refração do núcleo do guia multimodo, a é o raio do núcleo da MMF e λ é comprimento de onda aplicado. Logo, $(\beta_m - \beta_{m+1})$, é definido como,

$$(\beta_m - \beta_{m+1}) = \frac{\pi\lambda}{8n_{\text{núcleo}}a^2}(4m + 1). \quad (3.12)$$

Reorganizando a equação (3.10),

$$L_p = \frac{2p\pi}{(\beta_m - \beta_{m+1})}, \quad (3.13)$$

onde $\beta_m - \beta_{m+1}$ são as constantes de propagação e p é um número inteiro ($p = 1, 2, 3, \dots$), e aplicando a equação (3.12), a condição de reimagem é formada a uma distância L_p igual a,

$$L_p = \frac{16n_{\text{núcleo}}a^2p}{(4m+1)\lambda}, \quad (3.14)$$

Assumindo que $p = 1$ e $m = 0$, o comprimento L_p característico, que depende dos outros parâmetros geométricos e físicos desse dispositivo, para o qual a distribuição de campos na entrada do MMI é reproduzida é definida como [112, 115],

$$L_p = \frac{16n_{\text{núcleo}}a^2}{\lambda}. \quad (3.15)$$

onde $n_{\text{núcleo}}$ é o índice de refração do núcleo da MMF, a é o raio do núcleo da MMF e λ é comprimento de onda utilizado.

Pode-se calcular, por exemplo, o comprimento da reimagem, L_p , usando as dimensões da seção MMF usada neste trabalho e mostrada na Figura 3.1,

$$L_p = \frac{16 * 1.457 * (52.5)^2}{1.55} \cong 4.1 \text{ cm} \quad (3.16)$$

que comparado com o resultado simulado de $\cong 3.4$ cm, apresenta uma diferença de ≈ 0.7 cm.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

Em busca de novas soluções de sensoriamento, baseado na simplicidade de fabricação, boa sensibilidade e baixo custo, este capítulo apresenta os resultados obtidos através de (i) medidas experimentais feitas inicialmente com dispositivos interferométricos em fibra, já descritos no capítulo 2, e dispositivos interferométricos multimodais em fibra óptica, baseados em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo (CDM- *Core diameter mismatch*), atuando como sensores de curvatura e vibração, ambos já descritos no capítulo 2; e (ii) modelagem numérica aplicada a um dos dispositivos interferométricos multimodais, baseados em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo, atuando como sensor de curvatura.

A seção 4.1.1 trata de um *taper* baseado em fibra monomodo padrão SMF-28 da Corning, sendo testado sob curvatura. É apresentada investigação realizada com o uso da técnica de interrogação com uma unidade de medição industrial Bragg Meter FS2200 da empresa FiberSensing, para obtenção da resposta do dispositivo à variação de curvatura.

Na seção 4.1.2, são mostrados resultados de análise de sensor baseado em dois *tapers* em fibra monomodo sob variação de curvatura aplicada ao mesmo. É aplicado o método de interrogação por meio de analisador de espectro óptico.

Medida experimental feita com um sensor baseado em *taper* e *offset* em fibra monomodo é apresentada na seção 4.1.3, fazendo uso do método de interrogação por meio da unidade industrial Bragg Meter FS2200.

A seção 4.1.4 apresenta a caracterização do dispositivo SMS, baseado na técnica de descasamento de diâmetro de núcleo, sendo analisado como sensor de curvatura. Sua sensibilidade é avaliada pela variação de potência conforme aplicação de curvatura e medida por método de interrogação usando um refletômetro óptico no domínio do tempo. O item 4.2 descreve a caracterização de sensor interferométrico em fibra utilizado na medida de vibração, a fim de melhorar a sensibilidade da estrutura SMS e estender a viabilidade dessa estrutura para medições de vibração em baixas frequências. É aplicado o método de interrogação por meio de um sistema de aquisição de dados (DAQ - *Data acquisition*), baseado em uma configuração de Arduíno.

Na seção 4.3 o sensor SMS é analisado como sensor de curvatura, por meio de simulações computacionais feitas com o software comercial BeamPROP 9.0 da empresa Rsoft, tendo como base o monitoramento da curvatura em função da potência transmitida de um sinal

óptico. O princípio de funcionamento desse sensor SMS de curvatura se baseia na alteração da curvatura da fibra obtendo-se diversos raios de curvatura, sendo o sinal na saída da fibra atenuado e computado para cada valor de raio de curvatura.

4.1 Análise de curvatura

Em aplicações de monitoramento de saúde estrutural, por exemplo, no caso da avaliação de deformação de uma viga, a medição de tração mecânica sobre a superfície da viga, utilizando sensores de tração elétricos ou ópticos, torna-se muito custoso quando pequenas deformações de vigas finas têm de ser medidas, uma vez que, neste caso, é necessária uma resolução muito alta [33]. Usado como uma alternativa, os sensores de curvatura em fibra podem ser utilizados com a vantagem de que a detecção de curvatura da viga não depende da espessura da viga. Além disso, a medida da curvatura em diferentes posições pode ser empregada para analisar a deformação da estrutura e avaliar os efeitos de carga [33, 34].

Para caracterizar os sensores de curvatura, foi utilizado como base um esquema experimental como mostra a Figura 4.1. As medidas de curvatura foram realizadas fixando primeiramente as duas extremidades do sensor em dois blocos distanciados por uma distância d um do outro, de forma a deixá-lo inicialmente esticado. Um dos blocos foi montado sobre um microposicionador (*linear translation stage*) de forma a aplicar deslocamentos gradativos ao sensor e induzi-lo a curvatura. A utilização da curvatura tem como objetivo melhorar a sensibilidade do sensor. Se o sensor é colocado à meia distância entre os dois blocos, a curvatura da fibra, que é definida como o inverso do raio de curvatura ($1/R$) [119], é dada por,

$$C = \frac{1}{R} = \frac{2h}{h^2 + (d/2)^2}, \quad (4.1)$$

onde $d = L_0 - \Delta L$, L_0 é a distância inicial entre os dois blocos, ΔL a variação dessa distância e h é a profundidade da curvatura.

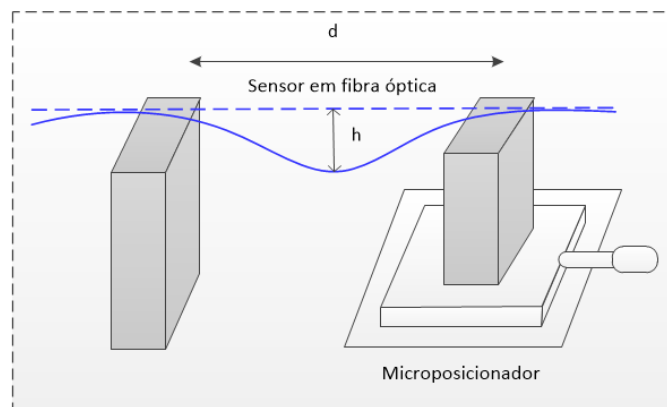


Figura 4.1 - Esquema ilustrativo de *setup* de análise de curvatura em fibra.

Dando início ao processo de investigação e conhecimento de algumas técnicas de sensoriamento para curvatura, os primeiros testes de curvatura foram feitos no Laboratório de Optoeletrônica do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto (INESC Porto - Universidade do Porto - Portugal), parceiro desse trabalho na investigação experimental.

4.1.1 Caracterização de um *taper* submetido à curvatura e interrogação através de unidade BraggMETER

A primeira medida experimental foi feita utilizando um dispositivo interferométrico baseado em uma SMF padrão que possui um *taper* em uma pequena região da mesma, conforme descrição da estrutura na seção 2.3. O *taper* em fibra foi fabricado em fibra SMF-28 da Corning através da técnica de descarga de arco elétrico utilizando uma máquina de emenda por fusão (FSM-40S da Fujikura). Este sensor foi fabricado com diâmetros do núcleo/casca da SMF de aproximadamente 8.2/125 μm , respectivamente. O diâmetro da casca da fibra SMF-28 foi diminuído de 125 μm para 90 μm na região do *taper*, como mostra a Figura 4.2, que exibe imagem do *taper* registrada pela máquina de emenda.

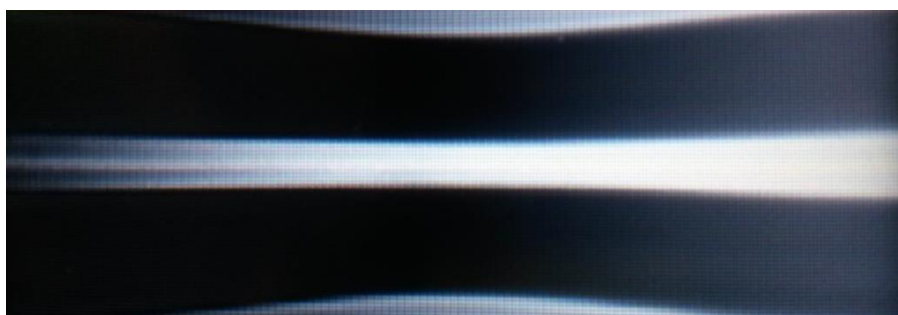


Figura 4.2 – Foto do *taper* registrada pela máquina de emenda FSM-40S da Fujikura.

Como técnica de interrogação, utilizou-se para leitura do sinal óptico resultante uma unidade industrial BraggMETER FS2200 da empresa FiberSensing, que possui uma

resolução de 5 pm e faz um varrimento por segundo ao longo do espectro de comprimento de onda de 1500 nm até 1600 nm. A unidade industrial BraggMETER FS2200 é uma unidade de medição projetada especificamente para interrogar sensores FBG baseados em ambientes industriais, o que não a impossibilita de ser usada como método de interrogação para outros sensores à fibra óptica.

O esquema básico de configuração do aparato experimental usado para caracterização do sensor é mostrado na Figura 4.3. A ponta de entrada da SMF é conectada à porta 1 da unidade BraggMETER, que emite um sinal óptico em banda larga que se propaga pela fibra, ao longo do sensor interferométrico, e a ponta de saída da fibra é conectada a porta 3 da unidade. Os espectros provenientes do sensor são gravados e posteriormente analisados.

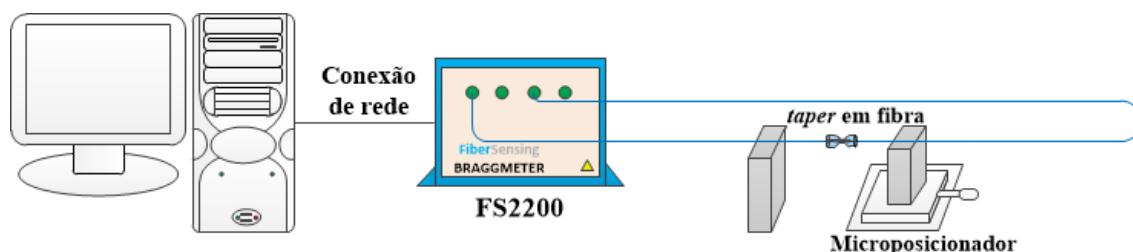


Figura 4.3 - Setup de análise de curvatura com a unidade BraggMeter da FiberSensing.

Na Figura 4.4 tem-se uma imagem real de parte do esquema experimental, onde, além dos blocos de fixação da fibra, vê-se uma régua posicionada ao meio dos blocos. Essa régua foi utilizada para mensurar a profundidade da curvatura h , tendo como base a altura inicial da fibra quando esticada.

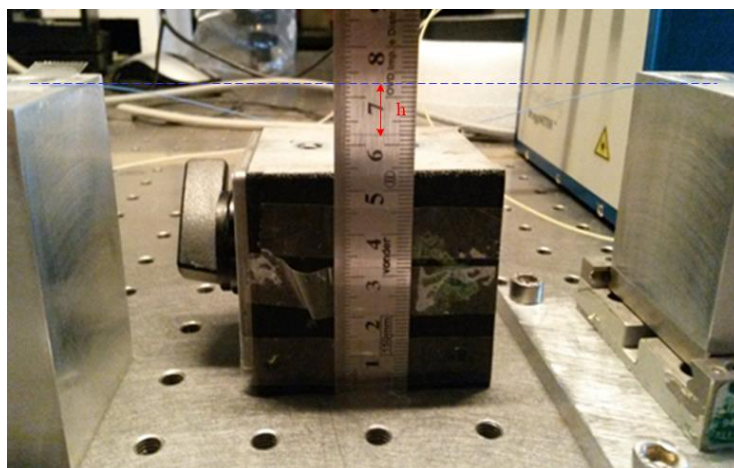


Figura 4.4 - Foto de setup experimental com inserção de curvatura.

Foram produzidos três *tapers* em fibra, que eram similares, mas não idênticos. Para cada *taper* foi aplicado um teste, totalizando três testes realizados, que se diferenciaram pelo valor de d (distância inicial entre os pontos de fixação da fibra aos suportes), como

mostram a Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3. A terceira análise com d menor, não pôde ser finalizada, visto que pela pequena distância entre os blocos, quando se aplicou determinado deslocamento no microposicionador a fibra torcia para os lados ao invés de curvar, o que impossibilitou o cálculo da variação da altura da curvatura da fibra. Os dados foram coletados até o momento da torção, para fins de comparação.

Para pequenos passos de deslocamento aplicados ao microposicionador não foi possível medir o valor de h , para se calcular a curvatura, de acordo com a equação (4.1). Dessa forma, optou-se pela variação de 50 μm a 1365 μm , com incremento de 50 μm . Os dados coletados com a unidade BraggMETER FS2200 foram de potência óptica em função do comprimento de onda.

Tabela 4.1 - Dados referentes à primeira análise de curvatura de sensor em fibra baseado em *taper*.

ΔL (μm)	d (cm)	h (cm)	Curvatura (1/m)	Raio de Curvatura (m)
0	13	0	0	Infinito
50	12.995	0.005	0.023686842	42.21753125
700	12.93	0.019	0.090916516	10.99910158
1365	12.86	0.0265	0.128187757	7.801057028

A Tabela 4.1 mostra os primeiros resultados obtidos com a análise de *taper* em fibra sob curvatura. Nesse primeiro experimento, a distância inicial (d) entre os blocos é da ordem de 13 cm. O deslocamento de 0 à 1365 μm variou a distância entre as torres de 13 cm a 12.86 cm. Usa-se o valor de h para aplicação na equação (4.1) e cálculo da curvatura. Essas medidas foram feitas a olho nu e com uso de uma régua.

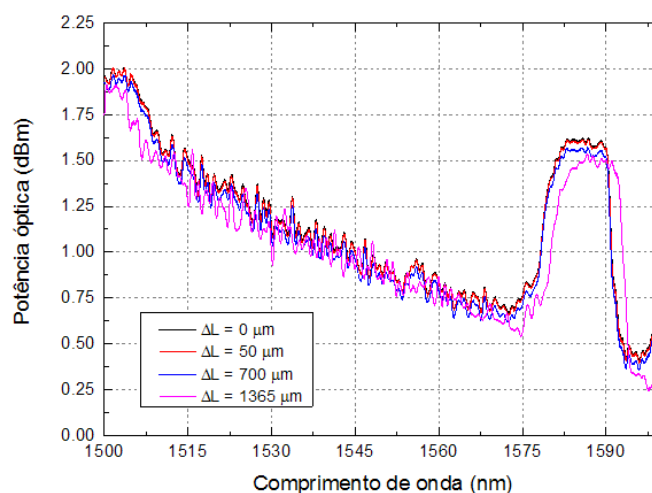


Figura 4.5 - Espectro do sensor em fibra baseado em *taper*, sob curvatura.

Na Figura 4.5, o espectro com $\Delta L = 0$ foi obtido com a fibra em repouso, ainda esticada, bem como configura o espectro característico da unidade BraggMETER. Note que a partir

do deslocamento da ordem de 700 μm começa a existir uma variação perceptível no espectro, pequena, com deslocamento em função do comprimento de onda e gradativa inserção de perda de potência.

A segunda análise de sensor à curvatura com *taper* segue a mesma configuração de sensor e *setup* experimental, diferenciando-se apenas na redução da distância aplicada entre os blocos, agora de $d = 10.7\text{cm}$. A Tabela 4.2 apresenta os dados para esta segunda análise.

Tabela 4.2 - Dados referentes à segunda análise de curvatura de sensor em fibra baseado em *taper*.

ΔL (μm)	d (cm)	h (cm)	Curvatura (1/m)	Raio de Curvatura (m)
0	10.7	0	0	Infinito
50	10.695	0.0045	0.031473179	31.773085
700	10.63	0.017	0.120356053	8.308680588
1365	10.56	0.0245	0.175759531	5.689591888

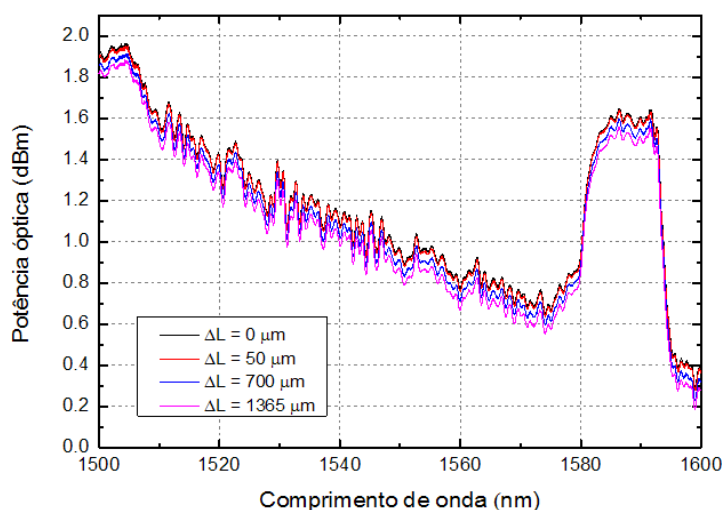


Figura 4.6 - Espectro de sensor em fibra baseado em *taper*, submetido à curvatura com $d = 10.7\text{ cm}$.

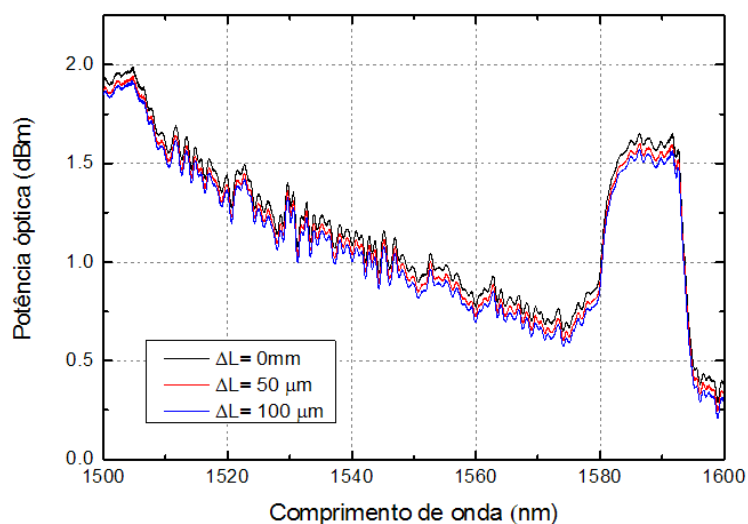
Diferente da primeira análise, no segundo espectro obtido com a aplicação de curvatura ao sensor baseado em *taper*, agora com valor de d reduzido, a variação ocorre em função somente da potência. De acordo com o deslocamento aplicado, aumenta a perda de potência no sinal óptico, apesar de ser muito pequena, sem deslocamento perceptível do espectro em função do comprimento de onda. O deslocamento de 0 a 1365 μm variou entre os blocos uma distância de 10.7 cm a 10.56 cm.

Por fim, a terceira e última análise de *taper* em fibra testado sob curvatura registrou somente três dados. Isso se deve ao fato de que ao aplicar deslocamento à fibra, esta a partir de um determinado deslocamento, sofreu torção ao invés de curvar. Desta forma, apenas os três primeiros dados foram registrados, onde a fibra curvou. Isto está mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Dados referentes à terceira análise de curvatura de sensor em fibra baseado em taper.

ΔL (μm)	d (cm)	h (cm)	Curvatura (1/m)	Raio de Curvatura(m)
0	8.25	0	0	infinito
50	8.245	0.0015	0.017652242	56.65002833
100	8.24	0.0025	0.029456111	33.9488125

O espectro da terceira análise também tem variação em função somente da potência, novamente muito reduzida, sem deslocamento notável em função de comprimento de onda, como mostra a Figura 4.7. O deslocamento foi apenas de 0 a 100 μm , onde d variou de 8.25 cm a 8.24 cm.

Figura 4.7 - Espectro de sensor baseado em fibra com *taper* submetido à curvatura com $d = 8.25$ cm.

Pelos resultados, nota-se que não se observa qualquer modulação significativa do espectro, apenas ligeiras variações da potência total. As franjas geradas são muito pequenas, com poucas perdas e sem uma boa resolução no espectro. O dispositivo não apresenta sensibilidade significativa à curvatura.

Em busca de alguma modulação espectral, foram produzidos outros tipos de sensores para análise.

4.1.2 Caracterização de dois *tapers* submetidos à curvatura e interrogação através de analisador de espectro óptico.

O segundo conjunto de medidas experimentais foi realizado utilizando-se um dispositivo interferométrico baseado no uso de dois *tapers* produzidos em uma SMF padrão, como demonstrado na seção 2.3.1. A fabricação dos dois *tapers* foi feita em uma fibra SMF-28 da empresa Corning por meio da técnica de descarga de arco elétrico utilizando uma máquina de emenda por fusão (FSM-40S da empresa Fujikura). Ambos os *tapers* foram fabricados em fibra SMF com diâmetros do núcleo/casca de aproximadamente 8.2/125

μm , respectivamente. O diâmetro da fibra SMF foi reduzido de $125 \mu\text{m}$ para $90 \mu\text{m}$ na região dos *tapers*. A existência de outro *taper* semelhante e distante alguns centímetros do primeiro *taper*, faz com que a atenuação do modo da casca seja desprezível, e a energia do modo da casca possa ser acoplada de volta da casca para o núcleo, após o segundo *taper*.

O esquema básico de configuração do aparato experimental usado para caracterização do sensor é mostrado na Figura 4.8. Utilizou-se uma fonte de luz banda larga (PolarOnyx ASE2000-B) na faixa de 1490 nm a 1620 nm e um OSA. Os espectros provenientes do sensor foram gravados e posteriormente analisados.

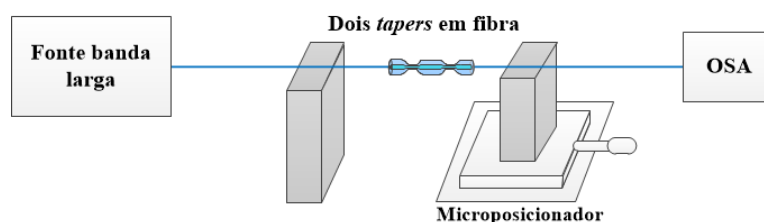


Figura 4.8 - Setup de análise de curvatura baseado em dois *tapers* e com uso de um OSA.

Foram feitos quatro tipos de interferômetros baseados em dois *tapers* em fibra com a mesma configuração, diferenciando-se apenas pela distância entre os *tapers*, definida como $L = 7.8 \text{ cm}$; $L = 6.7 \text{ cm}$; $L = 3.9 \text{ cm}$ e $L = 22 \text{ cm}$. O deslocamento aplicado aos sensores foi da ordem de $50 \mu\text{m}$ a $1365 \mu\text{m}$, com incremento de $50 \mu\text{m}$. A Figura 4.9 mostra o espectro dos sensores sob curvatura, com diferentes distâncias entre os *tapers*.

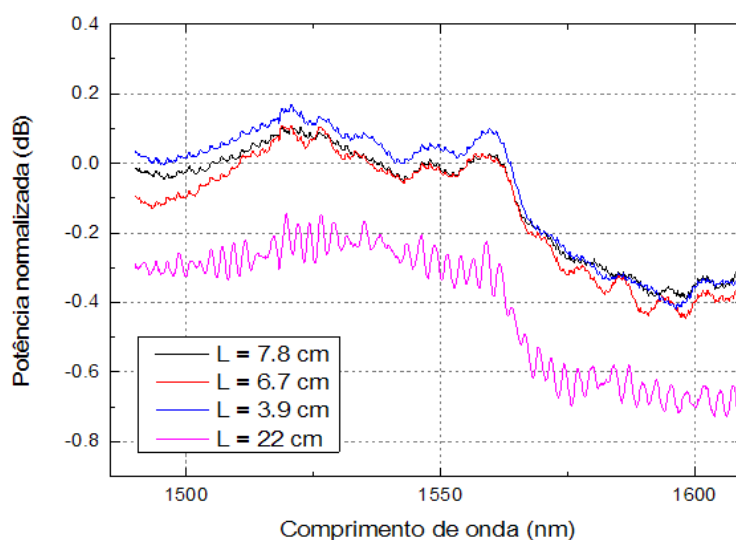


Figura 4.9 - Espectro de sensor baseado em fibra com dois *tapers*, submetido à curvatura.

Embora a resposta espectral dos quatro interferômetros baseados em dois *tapers* em fibra tenha apresentado modulação espectral (franjas), estas ainda são pequenas em amplitude.

Diante disso, optou-se por investigar outras propostas de dispositivos, com uma melhor sensibilidade à curvatura, com objetivo de aumentar a visibilidade dessas franjas.

4.1.3 Caracterização de um *taper* e *offset* em fibra sob curvatura e interrogação através da unidade BraggMETER

No terceiro conjunto de medidas experimentais foi analisado um dispositivo interferométrico baseado em uma SMF padrão com diâmetros do núcleo/casca de aproximadamente 8.2/125 μm , respectivamente, que utiliza um *taper* e um *offset*, conforme descrição da estrutura na seção 2.3.2. O *taper* foi fabricado em fibra SMF-28 da empresa Corning através da técnica de descarga de arco elétrico utilizando uma máquina de emenda por fusão (FSM-40S da empresa Fujikura). O diâmetro da casca da fibra SMF-28 foi diminuído de 125 μm para 90 μm na região do *taper*. A emenda desalinhada (*offset*) também foi feita utilizando a máquina de emenda por fusão (FSM-40S da empresa Fujikura). A Figura 4.10 mostra uma foto obtida com a máquina de emenda durante o processo e finalização do *offset*.

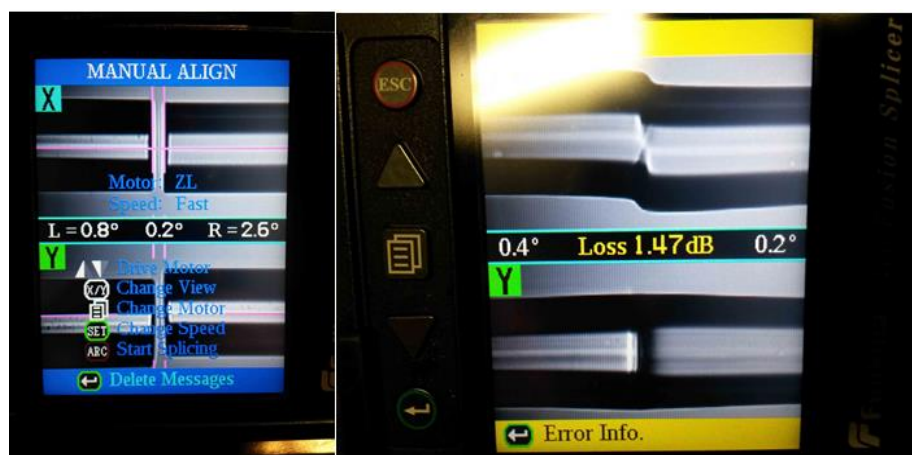


Figura 4.10–Foto de máquina de emenda no processo de fabricação de *offset* em fibra.

A Figura 4.11 mostra o esquema básico de configuração do aparato experimental usado para caracterização do sensor com *taper* e *offset*. A ponta de entrada da SMF é conectada à porta 1 da unidade BraggMETER, que emite um sinal óptico em banda larga que se propaga pela fibra, e a ponta de saída da fibra é conectada a porta 3 da unidade. Os espectros provenientes do sensor são capturados e posteriormente analisados.

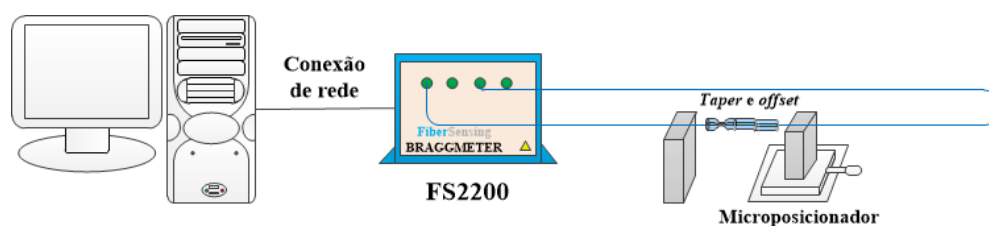


Figura 4.11 – Setup de análise de *taper* e *offset* sob curvatura com a unidade BraggMeter.

O *taper* e o *offset* em fibra SMF-28 foram feitos com uma distância de $L = 2.5$ cm de um para o outro. Foi aplicado um teste para um pequeno deslocamento e curvatura da fibra esticada, com um $\Delta L = 0.1$ mm, variando de $0 \mu\text{m}$ a $1.515 \mu\text{m}$, sendo o último incremento de apenas $15 \mu\text{m}$, pois o microposicionador não permitia a aplicação de mais deslocamentos.

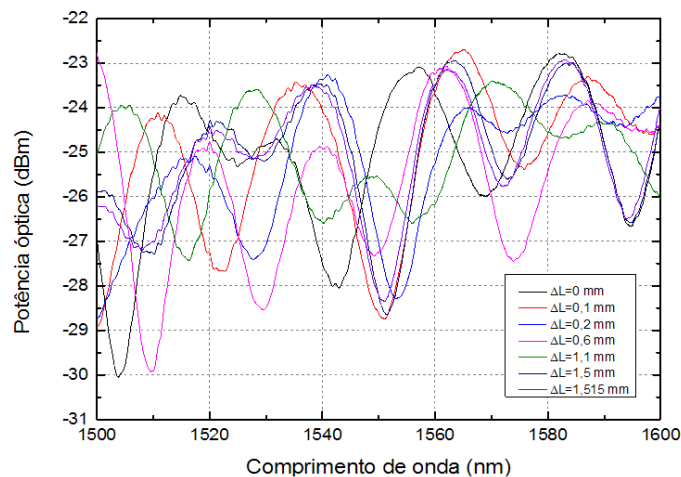


Figura 4.12- Espectro de sensor baseado em fibra com *taper* e *offset* submetidos à curvatura, com $L = 2,5$ cm.

O resultado da Figura 4.12 mostra que a resposta espectral do *taper* mais o *offset* apresenta modulação espectral (franjas) bem maior em amplitude em comparação com o obtido somente com os dois *tapers*, embora a distância de $L = 2.5$ cm talvez ainda seja pequena para uma melhor visibilidade. No entanto, pelo comportamento ainda instável do espectro, ficou difícil analisar a fundo o sensor quando submetido à curvatura.

Também foi produzido um interferômetro baseado em *taper* e *offset*, com uma distância de $L = 9$ cm de um para o outro. Foi realizado um teste com um pequeno deslocamento e curvatura da fibra esticada, com um $\Delta L = 0.05$ mm, ou seja, de $50 \mu\text{m}$ em $50 \mu\text{m}$.

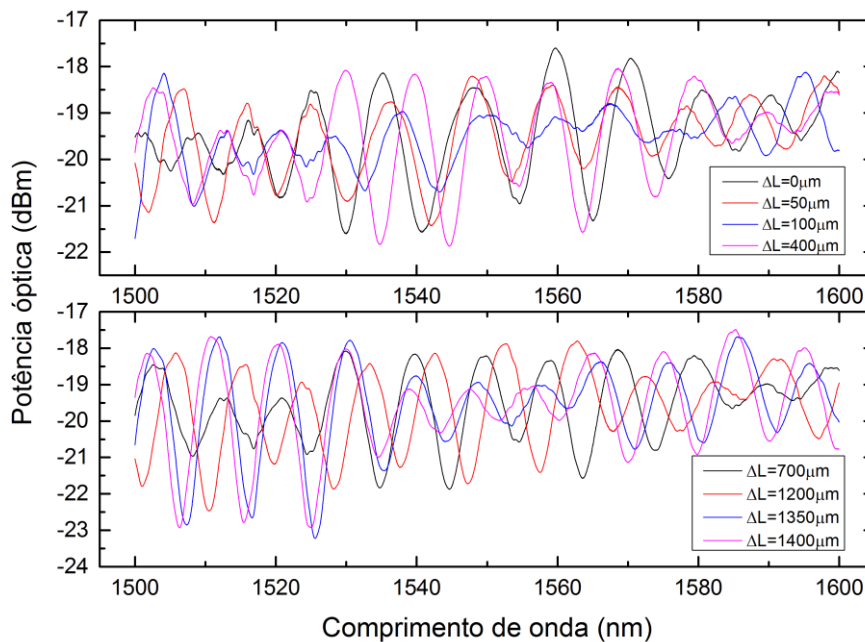


Figura 4.13 - Espectro de sensor baseado em fibra com *taper* e *offset* submetidos à curvatura, com $L=9$ cm.

Nota-se pelo resultado da Figura 4.13 que, novamente se apresenta modulação espectral bem maior em amplitude, em comparação com o obtido somente com os dois *tapers* e deslocamento espectral elevado. A variação é apresentada em função da potência óptica e do comprimento de onda, de acordo com o deslocamento aplicado. No entanto, o comportamento espectral ainda foi instável para uma análise de espectro mais precisa, exigindo que se analisassem regiões espectrais limitadas tentando identificar tendências consistentes, e repetindo testes aplicando variações menores, nos casos onde essa tendência fosse evidente.

4.1.4 Caracterização de estrutura SMS submetida à curvatura e interrogação através de OTDR

O quarto sensor óptico de curvatura, analisado experimentalmente, baseou-se na configuração de estrutura SMS, já mostrada na seção 2.4 do capítulo 2. Essa estrutura é apresentada como uma alternativa para se melhorar a sensibilidade em sensoriamento.

O dispositivo SMS é fabricado através da emenda de uma pequena seção de MMF não revestida (FG105-LCA da empresa Thorlabs), com um comprimento de 3 mm, entre duas SMF padrão (SMF-28 da empresa Corning). Em relação ao comprimento da pequena seção MMF, 3 mm, foi utilizado baseado na demonstração de sua alta sensibilidade [48].

No que diz respeito à reprodutibilidade da estrutura sensora, dois sensores SMS foram feitos com os parâmetros acima mencionados, e submetidos a testes de curvatura. Primeiramente, é feita a emenda de um pedaço da MMF com a seção da SMF, em seguida

a MMF é clivada com o comprimento de 3 mm, o qual foi medido com uma régua. Finalmente, a outra seção de SMF é emendada a MMF clivada.

Embora o processo de fabricação seja simples este não é muito preciso, logo estas estruturas não são exatamente iguais, o que afeta fortemente a sensibilidade. No entanto, uma solução para esse problema seria melhorar o processo de fabricação dos sensores, por exemplo, usando um microposicionador linear de precisão para medir e clivar a fibra. Os sensores propostos foram fabricados com o diâmetro de núcleo/casca da SMF de aproximadamente 8.2/125 μm , e para a seção de MMF de índice degrau, o diâmetro de núcleo/casca é de 105/125 μm .

A seção MMF no sensor, devido ao grande descasamento de diâmetro de núcleo (*CDM-Core diameter mismatch*), atua como um mecanismo de acoplamento núcleo-casca [73]. Muitos modos são excitados na seção MMF quando a luz entra a partir da SMF. Devido ao comprimento curto, a seção MMF gera padrões de interferência destrutivos. A seção MMF acopla parte da luz que viaja ao longo do núcleo da primeira SMF para a casca da segunda SMF, e esse acoplamento induz a uma perda de potência no sinal transmitido viajando no núcleo. No sensor proposto, esse acoplamento não é seletivo em termos de comprimento de onda, ou seja, ele é independente do comprimento de onda. Dessa forma, o dispositivo SMS fabricado não atua como um dispositivo de interferência multimodal (*MMI - Multimode interference*) comum, apenas introduz uma perda no sinal óptico. Quando a estrutura é curvada, o coeficiente de acoplamento da estrutura se altera, variando-se assim a atenuação no sinal transmitido.

A fim de assegurar que o dispositivo não age como uma estrutura de interferência multimodal comum, o sensor foi submetido à curvatura com aplicação de um feixe óptico de uma fonte de banda larga *Multiwave* EDFA, que opera na faixa de 1500 nm a 1580 nm. A medição do sinal em transmissão foi realizada utilizando-se um analisador de espectro óptico, com aplicação de deslocamentos de 0 μm , 100 μm , 200 μm , 400 μm e 600 μm , como mostra o esquema apresentado na Figura 4.14. Os resultados exibidos na Figura 4.15 mostram que quando é aplicada a curvatura, é introduzida apenas uma perda de potência no sinal. A perda induzida independe do comprimento de onda.

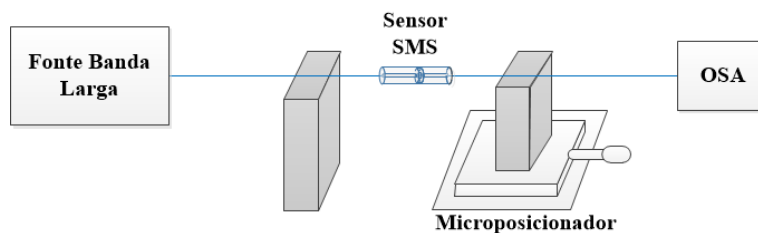


Figura 4.14 - Diagrama esquemático para análise de curvatura em sensor SMS com OSA.

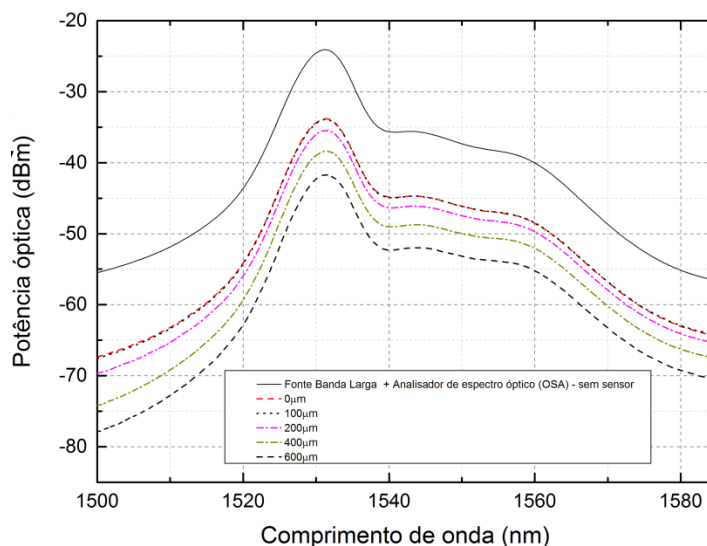


Figura 4.15 - Espectro resultante de curvatura aplicada a sensor em fibra baseado em SMS interrogado com OSA.

O sensor foi, também, interrogado em uma configuração remota usando um refletômetro óptico no domínio do tempo (OTDR - *Optical time domain reflectometer*). A montagem experimental do sistema de interrogação utilizado é ilustrada na Figura 4.16. Um OTDR comercial da empresa *YOKOGAWA*, modelo *AQ 1200 OTDR-Multi Field Tester* com o comprimento de onda operacional de 1550 nm, largura de pulso de 100 ns e média de varredura de 30 segundos, foi utilizado como método de interrogação.

O sensoriamento remoto é obtido conectando-se 800 m de fibra SMF-28 da empresa Corning ao OTDR, e 300 m de fibra SMF-28 da empresa Corning com um espelho em fibra óptica (OFM - *optical fiber mirror*) em sua extremidade final, emendados à ponta de saída do sensor.

O espelho em fibra óptica (OFM - *optical fiber mirror*) com 25% de reflexão é usado para aumentar a potência refletida do sinal transmitido, e conseqüentemente, melhorar a resolução devido ao incremento na relação sinal-ruído. O espelho é formado pela deposição de filmes finos de 2 nm de crômio e 9 nm de prata na ponta final clivada da fibra. Os filmes finos foram depositados por meio da técnica de evaporação de feixe de elétrons [120]. Os espelhos foram fabricados e cedidos pelo Laboratório de Optoeletrônica do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto (INESC

Porto - Universidade do Porto - Portugal), parceiro desse trabalho na investigação experimental.

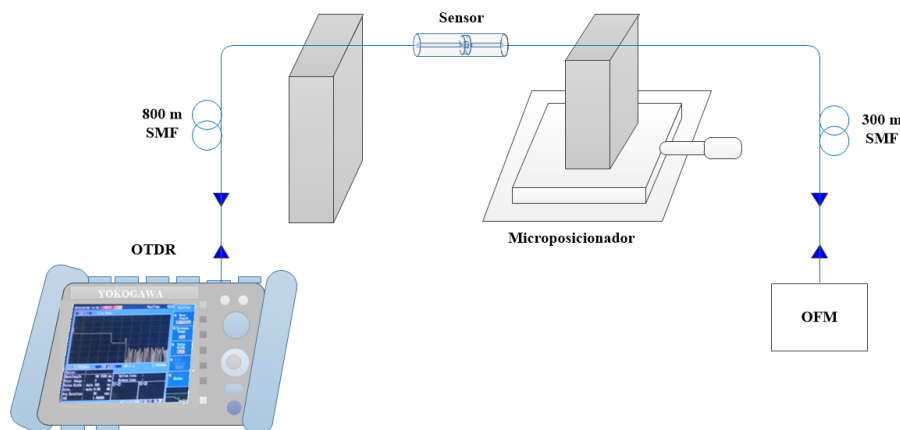


Figura 4.16 - Configuração experimental para medições de curvatura remota com sensor SMS e OTDR.

As medições de curvatura foram realizadas fixando-se o sensor SMS, esticado, em dois blocos distanciados por $d = 22$ cm. As medidas foram realizadas com um intervalo de deslocamento de 0 a 600 μm , com um incremento de 100 μm . Nesse caso, para as medições de curvatura foi utilizada uma aproximação da equação (4.1), devido aos passos de deslocamentos serem da ordem de alguns microns, o que tornou difícil definir h e, por conseguinte o tamanho da curvatura.

O raio de curvatura como função de L_0 e d pode ser obtido usando,

$$R^2 \left(1 - \cos^2 \frac{L_0}{2R} \right) - (d/2)^2 = 0, \quad (4.2)$$

Dessa forma, a equação da curvatura de fibra pode ser redefinida, como,

$$C = \frac{1}{R} \approx \frac{4}{L_0^2} (L_0^2 - d^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (4.3)$$

Quando a luz do OTDR é injetada na fibra esticada, a propagação da luz na seção MMF é simetricamente distribuída. Para uma MMF curvada, o índice de refração não é mais simétrico ao longo do eixo da fibra e parte da potência pode ser perdida nos modos da casca da fibra. A perda aumenta quando a curvatura é aplicada. Onde existe uma perda, o traço do OTDR mostra um degrau, como ilustrado na Figura 4.17.

Para avaliar a estrutura SMS como um sensor de curvatura, foi analisada a diferença entre os níveis de potência óptica, que representa a perda induzida pela curvatura aplicada. Nos dados medidos, uma diferença de potência foi definida como a diferença entre o valor do maior pico de reflexão (P_2) e o valor antes da perda (P_1), tal como mostra a Figura 4.17. Assim, os dados de análise foram obtidos com a diferença de potência definida como,

$$P_{Dif} = P_2 - P_1 \quad . \quad (4.4)$$

Após submeter o sensor SMS à curvatura, as perdas ópticas acumuladas em toda a faixa testada foram em torno de 4.9 dB. As perdas ópticas foram maiores quando a estrutura SMS foi curvada. Quando a curvatura é aplicada, o sinal do pico P_2 é reduzido significativamente quando comparado com o caso sem curvatura. Na Figura 4.17, é exibido o traço do OTDR para seis valores diferentes de curvatura: $C = 0.005 \text{ cm}^{-1}$ a $C = 0.025 \text{ cm}^{-1}$, obtidos com aplicação de deslocamentos. A diferença de potência, P_{Dif} , para os dois sensores SMS em função da curvatura aplicada é apresentada na Figura 4.18.

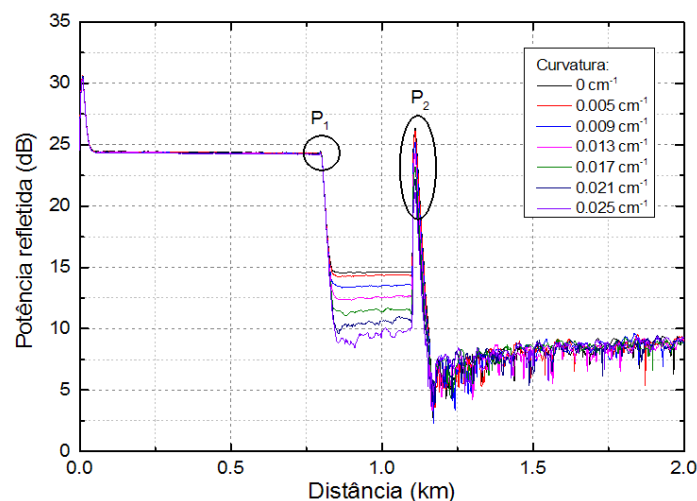


Figura 4.17 - Traço do OTDR à 1550 nm aplicado a sensor de curvatura SMS.

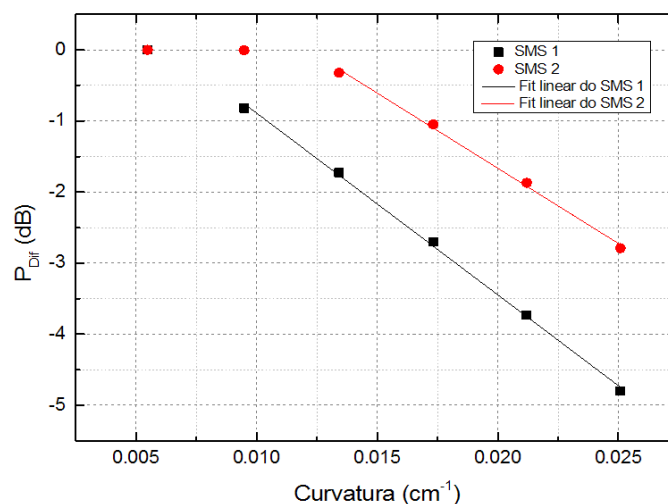


Figura 4.18 - P_{Dif} em função da curvatura para os dois sensores SMS.

De acordo com os resultados da Figura 4.18 na faixa de curvatura de $C = 0.013 \text{ cm}^{-1}$ a $C = 0.025 \text{ cm}^{-1}$, os sensores demonstraram uma sensibilidade satisfatória: o sensor SMS 1 apresentando sensibilidade de $\sim -255.8 \text{ dB/cm}^{-1}$ e linearidade de $R^2 = 0.99833$; sensor SMS 2, apresentando sensibilidade de $\sim -211.8 \text{ dB/cm}^{-1}$ e linearidade de $R^2 = 0.99567$. Foi utilizada uma aproximação de primeira ordem para estimar a sensibilidade dos sensores.

Entre esses resultados, o sensor de curvatura SMS 1 apresentou sensibilidade 17.2% melhor que o sensor SMS 2, como mostrado na Tabela 4.4 -. Apesar disso, o sensor SMS 1 não apresenta a melhor performance para multiplexação, pois introduz uma maior perda de potência, em torno de 4.9 dB. Pela experiência realizada, é possível determinar que se ajustando a atenuação do sensor (através de sua fabricação) se consegue controlar seu desempenho em relação à curvatura. Quanto maior a atenuação introduzida por meio de técnica de descasamento de diâmetro de núcleo, maior será a sensibilidade, no entanto, dependendo da faixa dinâmica do OTDR. Assim, se pode ter um conjunto de sensores multiplexados com menor sensibilidade, ou ter um único sensor pontual com maior atenuação, mas com melhor desempenho, dependendo da aplicação.

Tabela 4.4 -Características de dois sensores SMS submetidos a testes de curvatura.

Características	SMS 1	SMS 2
Sensibilidade (dB/cm ⁻¹)	~ -255.8	~ -211.8
Faixa de resolução (cm ⁻¹)	~ 0.00074	~ 0.0015
Perda de Potência (dB)	4.9	2.67

A fim de analisar a influência da temperatura para os sensores SMS aqui propostos, foi implementado um experimento para a medida de temperatura. Para realizar as medidas de temperatura, foi aplicada uma variação de temperatura na faixa de 27°C a 40°C, com passos de 1°C e cujos valores são escolhidos devido ao interesse em temperaturas ambientais. Assim como nas medições de curvatura, essa análise usou o comprimento de onda de 1550 nm no OTDR e a análise dos resultados foi baseada na diferença de potência (P_{Dif}). O experimento foi desenvolvido em água, visto que esta apresenta maior estabilidade em temperatura.

O *setup* experimental é o mesmo mostrado na Figura 4.16, mas a resposta do sensor para a temperatura aplicada é investigada através da introdução da cabeça sensora em um capilar de metal que fica dentro de uma câmara de acrílico, como mostra a Figura 4.19. A Figura 4.20 mostra foto real do *setup* experimental. Para essa análise, a fibra permanece esticada, fixada em dois pontos separados por 12 cm de distância, de forma a minimizar os efeitos de dilatação e compressão da fibra. Sem aplicação de curvatura, a variação de temperatura foi o único parâmetro a ser medido neste teste e que provoca a dilatação da fibra. A água foi aquecida em uma placa quente (*hot plate*) e posteriormente colocada na câmara de acrílico, onde a temperatura foi medida com um termômetro digital. A Figura 4.21e a Figura 4.22mostram fotos da placa de aquecimento e da câmara de acrílico, respectivamente.

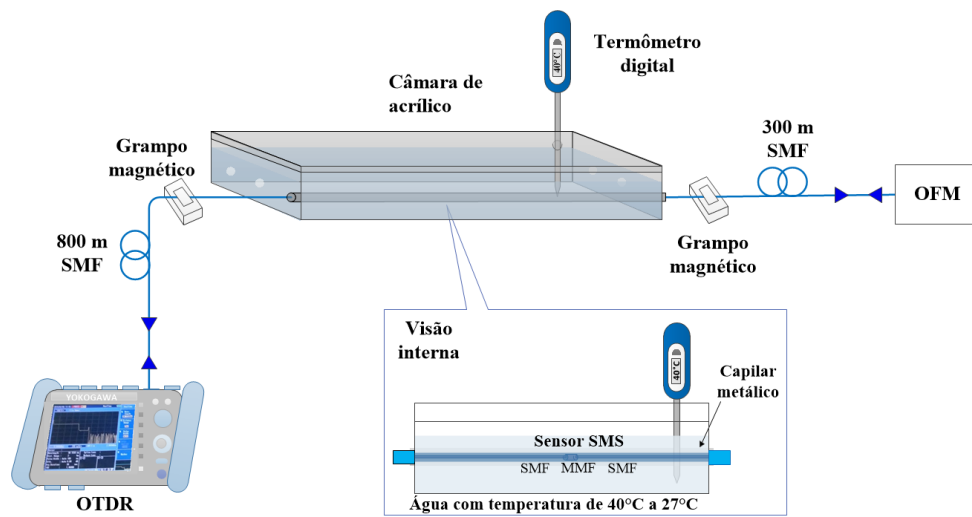


Figura 4.19 - *Setup* experimental de análise de temperatura para sensor SMS.

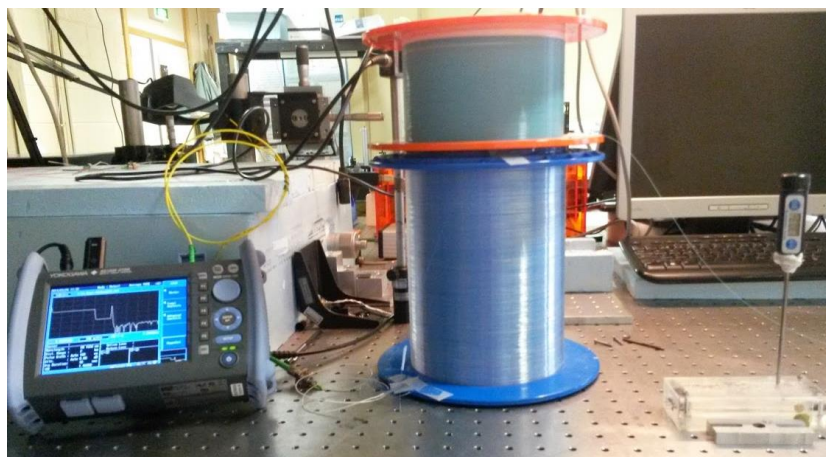


Figura 4.20 - Foto de *setup* experimental de temperatura para sensor SMS.



Figura 4.21 - Foto de placa de aquecimento.



Figura 4.22–Foto da câmara de acrílico de análise experimental de temperatura.

Foi observada mínima influência da temperatura nas medidas de curvatura, visto que os sensores SMS apresentaram perdas quase insignificantes de potência óptica durante as medidas de temperatura. O sensor SMS 1 apresentou uma sensibilidade de cerca de ~ -0.01 dB/°C e uma linearidade de $R^2 = 0.92217$, enquanto o sensor SMS2 obteve valores, de respectivamente, ~ -0.02 dB/°C e $R^2 = 0.96541$. A variação na diferença em potência, P_{Dif} em função da temperatura aplicada é mostrada na Figura 4.23.

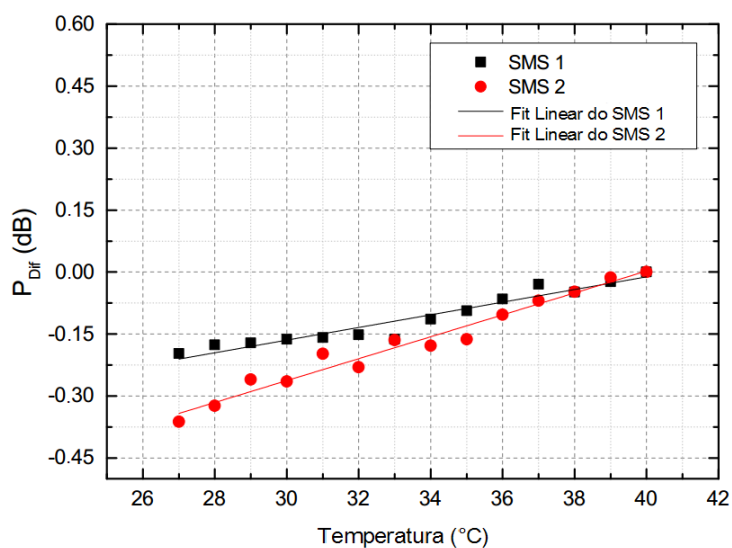


Figura 4.23- P_{Dif} em função da temperatura para os dois sensores SMS.

Os resultados demonstram que o sensor SMS2 mostrou uma sensibilidade à temperatura ligeiramente maior que o sensor SMS1, embora ambos tenham apresentado similaridade em seu comportamento em termos de níveis de potência. Os resultados das medidas mostram que, embora os sensores tenham valores de potência diferentes, ambos os sensores apresentam pouca sensibilidade à temperatura.

4.2 Caracterização de sensor SMSMS sob vibração

Com intuito de obter uma sensibilidade melhor com a estrutura SMS e estender a viabilidade dessa estrutura para medições de vibração a baixas frequências, foi feito um dispositivo interferométrico em fibra, baseado na configuração de sensor apresentada na seção 2.5. O sensor proposto consiste em uma SMF de entrada, uma seção de SMF não revestida emendada entre duas seções MMF, e a última MMF emendada a uma SMF de saída. Essa estrutura, por conseguinte, é chamada de SMSMS. As duas seções MMFs atuam como acopladores modais para dividir e recombinar a luz, devido a técnica de descasamento de diâmetro de núcleo [48]. O interferômetro foi produzido com diâmetros de núcleo/casca para a SMF e para a MMF de aproximadamente 8.2/125 μm , e 105/125 μm , respectivamente. A emenda em fibra foi feita através da técnica de descarga de arco elétrico utilizando uma máquina de emenda por fusão (FSM-40S da empresa Fujikura). A viabilidade da configuração SMSMS é apenas avaliada para vibração. Não é testada para curvatura devido ao fato de que, se o sensor é sensível a vibrações, também é capaz de medir curvatura.

4.2.1 Sensor SMSMS submetido à vibração com método de interrogação que utiliza osciloscópio

O primeiro *setup* experimental montado para a medida de vibração é composto por um laser sintonizável, um transdutor piezoelétrico (PZT - *Piezoelectric transducer*) [121] para imprimir oscilações nas fibras ópticas, um fotodetector, um amplificador de sinais, um equipamento de aquisição de dados (DAQ - *Data acquisition*), um osciloscópio analógico e um computador com *software* em *LabVIEW*, como mostrado na Figura 4.24. O comprimento de onda utilizado, destacado em azul na Figura 4.25, foi escolhido após análise do espectro do sensor. A Figura 4.26(i), mostra que o sensor foi fixado com cola no topo de um PZT de formato cilíndrico oco, com pequena curvatura, com o intuito de se intensificar a sensibilidade do sensor, Figura 4.26(ii), apresenta a caracterização do PZT. A Figura 4.27 mostra o comportamento do PZT na faixa de frequências utilizadas nos testes.

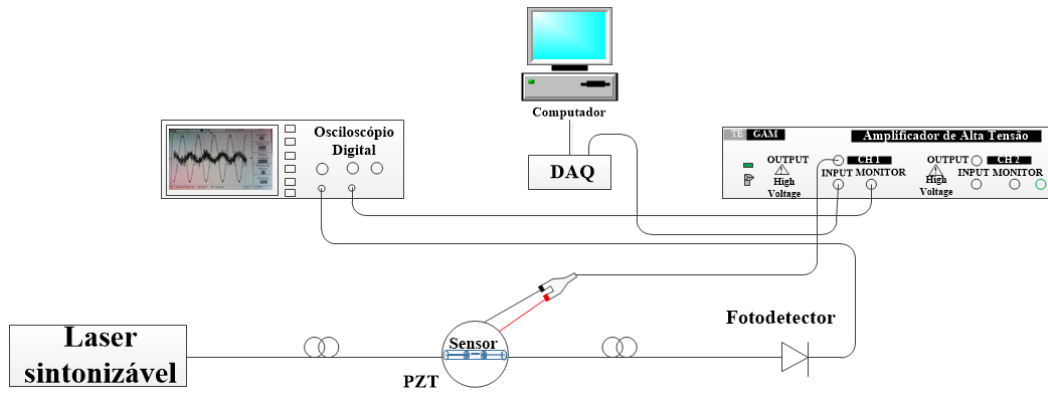


Figura 4.24 –Esquema de primeiro *setup* experimental para caracterização de sensor SMSMS à vibração.

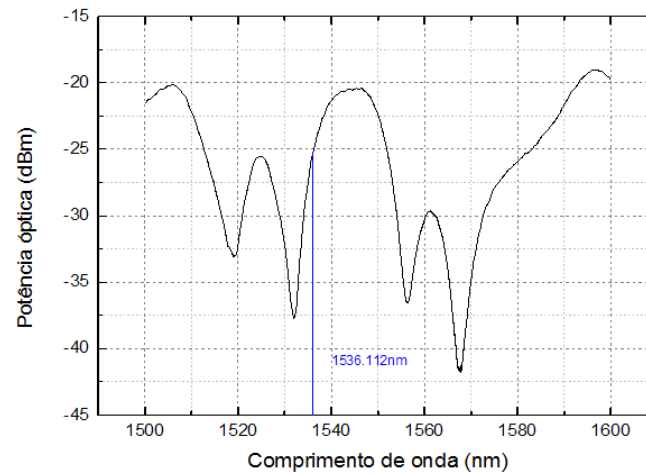


Figura 4.25 –Espectro do sensor SMSMS visto com unidade BraggMETER da Fiber Sensing.

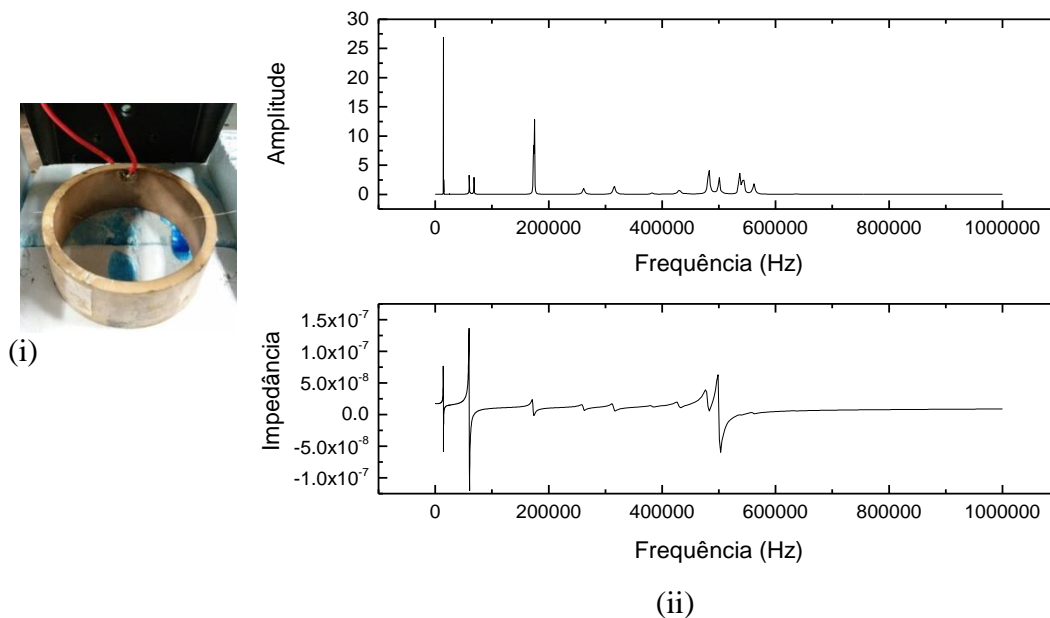


Figura 4.26 - (i) Foto de sensor SMSMS pré-curvado colado ao PZT; e (ii) caracterização do PZT.

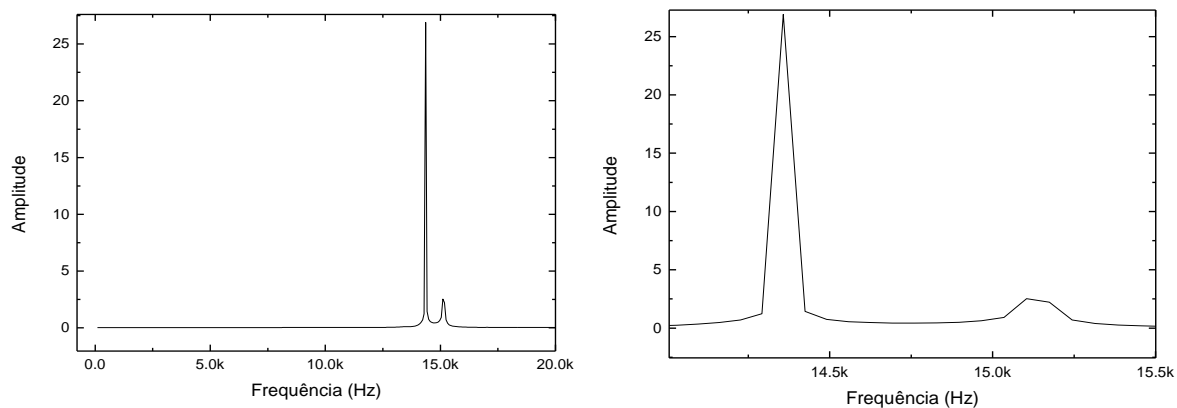


Figura 4.27- Caracterização do PZT dentro da faixa de frequências testadas.

O comprimento de onda emitido pelo laser é de 1536.112 nm com uma potência de 10.44dBm. A análise dos resultados foi feita visualmente, obtendo-se as amplitudes pico a pico do sensor no osciloscópio. Neste equipamento média-se o sinal do fotodetector e do amplificador, este último visualizado para verificar se não havia distorção na onda.

Para cada resultado foram coletadas as amplitudes e feita uma média simples, visto que o sinal do sensor, para as frequências aplicadas, tinha muito ruído. O *software no LabVIEW* foi responsável pela aplicação de frequências diferentes ao PZT, que foram selecionadas aleatoriamente, dentro da faixa de frequências analisadas previamente com o amplificador e osciloscópio, em um intervalo de 10 Hz a 20 kHz. A Figura 4.28, a Figura 4.29 e a Figura 4.30 mostram algumas fotos dos resultados, tiradas da tela do osciloscópio no momento da análise. Em cada figura veem-se dois sinais, o sinal com maior amplitude é o do amplificador e o com menor amplitude é o do sensor. O sinal do sensor é compreendido entre linhas pontilhadas, que identificam a área de análise e coleta das amplitudes, para posterior cálculo da média.

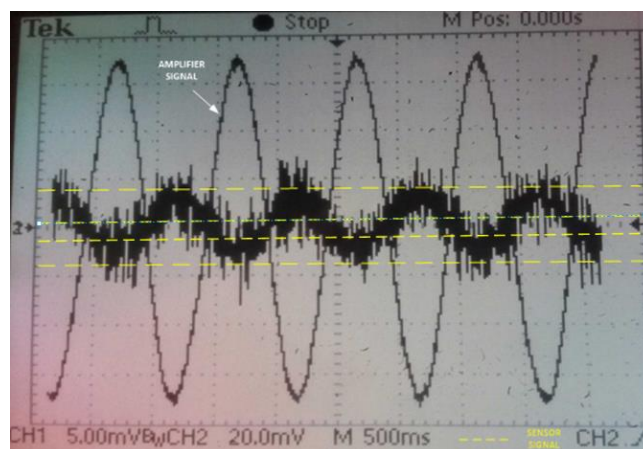


Figura 4.28 - Sinal Amplificador e sensor a 10 Hz.

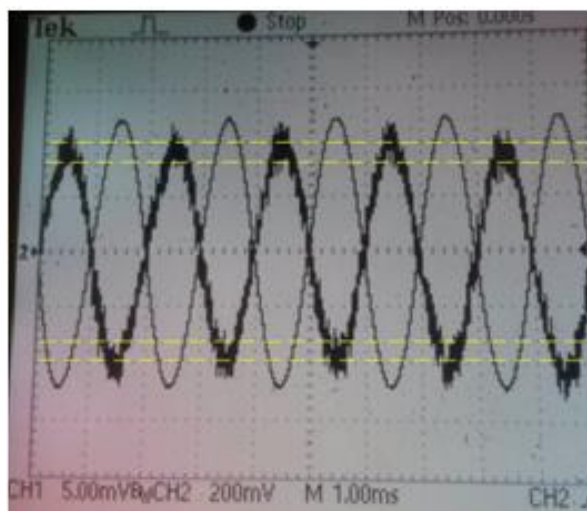


Figura 4.29 - Sinal Amplificador e sensor a 5 kHz.

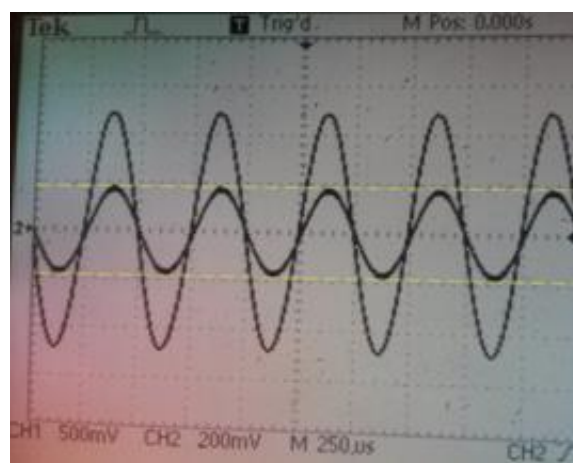


Figura 4.30 - Sinal Amplificador e sensor a 20 kHz.

A Figura 4.28 mostra o sinal do sensor sob aplicação de frequência de 10 Hz, onde o canal 1 do osciloscópio é a porta de entrada do sinal do sensor, enquanto o canal 2 é a porta de entrada do sinal do amplificador. As definições para visualização dos sinais, foram de 5 mV/divisão para o sinal do sensor e 20 mV/divisão para o sinal do amplificador. Para a aplicação de frequência de 10 Hz obteve-se uma amplitude de 5 mV pico a pico para o sinal do sensor.

A Figura 4.29 mostra o sensor sob aplicação de frequência de 5 kHz. Nota-se que o sinal do sensor apresenta menos ruído do que foi observado na frequência inicial de 10 Hz. Com configuração de 5 mV/divisão para visualização do sinal do sensor e 200 mV/divisão para o sinal do amplificador, obteve-se uma amplitude de 18 mV pico a pico para o sinal do sensor.

A última frequência aplicada ao sensor foi de 20 kHz, como mostra a foto da Figura 4.30. O comportamento do sinal do sensor para esta última frequência, apresenta-se mais estável que os primeiros sinais, tendo muito menos ruído que os resultados apresentados anteriormente. Assim, o valor da amplitude pico a pico do sinal do sensor sob frequência de 20 kHz foi obtido sem o cálculo da média, baseando-se no valor real do sinal. Sob configurações de 500 mV/divisão para visualização do sinal do sensor e 200 mV/divisão para visualização do sinal do amplificador, obteve-se uma amplitude pico a pico no valor de 900 mV para o sinal do sensor sob frequência de 20 kHz.

A curva da variação da amplitude em função da frequência obtida com o sensor SMSMS sob vibração é mostrada na Figura 4.31. Os primeiros pontos da curva apresentam comportamento não linear, como destacado em caixa no canto superior esquerdo da Figura 4.31. A partir do ponto de frequência de 5 kHz até a frequência de 15 kHz, o comportamento do sensor é praticamente linear. No ponto de 15 kHz a 20 kHz, a amplitude do sinal do sensor aumenta abruptamente.

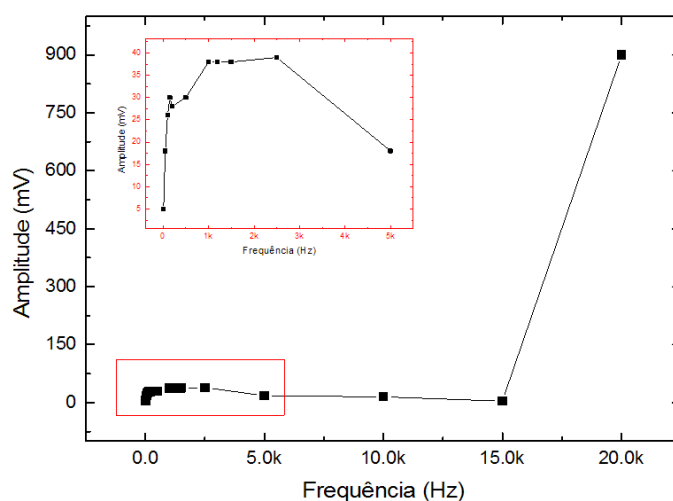


Figura 4.31- Variação de amplitude do sinal do sensor SMSMS em função da frequência aplicada em teste de vibração com sensor SMSMS.

4.2.2 Sensor SMSMS submetido à vibração interrogado por meio de DAQ e Arduíno

Em busca de validar o uso do sensor SMSMS proposto para detecção de frequências muito baixas, um dos objetivos do trabalho, foi realizado mais uma verificação experimental da utilidade da estrutura SMSMS como um sensor de vibração, mudando agora o setup de análise.

O diagrama esquemático da configuração experimental é ilustrado na Figura 4.32, que compreende uma fonte laser (Figura 4.32i-I); um excitador de frequências (*shaker*), da

empresa Bruel & Kjaer, tipo 4809 (Figura 4.32i-II); um sistema óptico de aquisição de dados (DAQ) baseado em uma configuração de Arduino (Figura 4.32i-III); um acelerômetro eletrônico de referência e o sensor óptico SMSMS (Figura 4.32ii).

A resposta em frequência do sensor SMSMS é obtida utilizando o sistema excitador, conhecido como *shaker*, que segundo manual de uso, possui uma excitação uniforme de funcionamento a partir de 5 Hz com elevada estabilidade, mas isso não inviabiliza o mesmo de ser usado em frequências mais baixas. O *shaker*, apresentado em foto da Figura 4.33, é excitado por um sinal senoidal, em frequências selecionadas cobrindo uma faixa de baixas frequências, tais como 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.0 e 10 Hz.

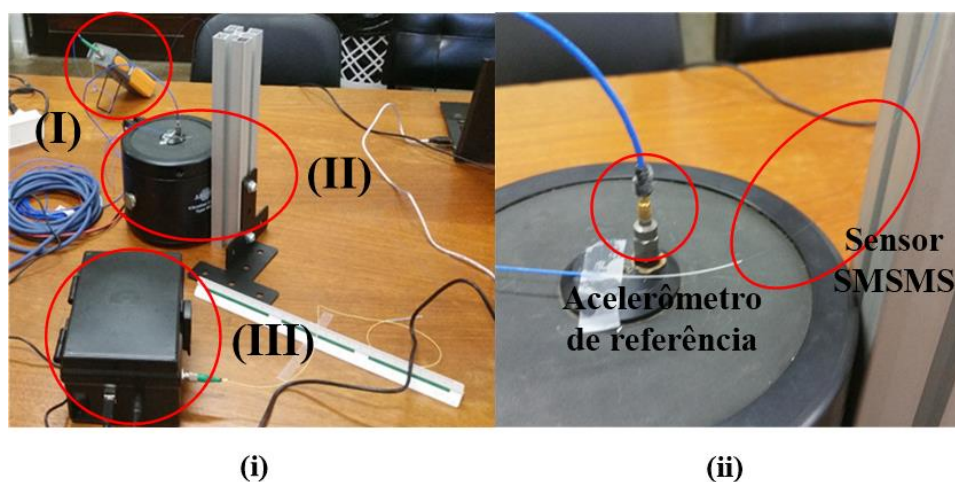


Figura 4.32 - Setup experimental para o sensor SMSMS, (i-I) fonte laser, (i-II) *shaker* com o acelerômetro de referência e o sensor SMSMS, e (i-III) sistema DAQ óptico, baseado em configuração de Arduino; (ii) Zoom em i-II com o acelerômetro de referência e o sensor SMSMS fixado no *shaker*.

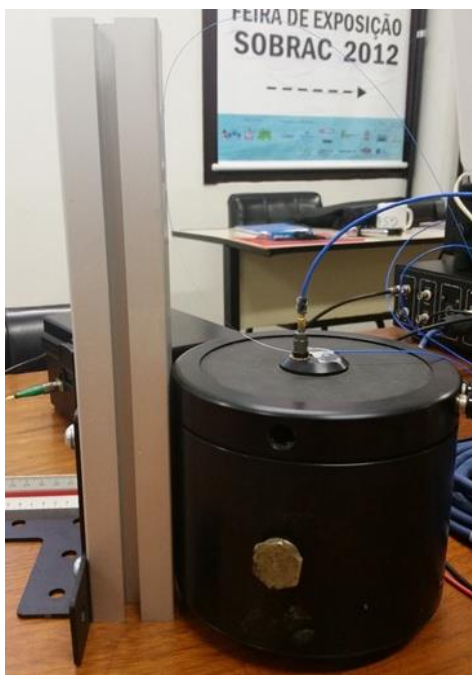


Figura 4.33 - *Shaker* da Bruel & Kjaer, tipo 4809, com sensor eletrônico de referência e o sensor SMSMS fixados.

O sistema óptico de aquisição de dados baseado em configuração de Arduino, apresenta as seguintes configurações: os dados de medição são adquiridos por um conversor analógico/digital (A/D), com período de sinal de aproximadamente 5.194 ms/amostra, com ganho de 11 [parâmetro adimensional (Volt/Volt) configurado no software de aquisição do sensor SMSMS].

Apesar de serem aplicadas as frequências inferiores à operação estável do *shaker*, os picos de frequência característica são claramente definidos. Aplicando-se o método de transformada rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transformer*) nos espectros obtidos no domínio do tempo, como mostra a Figura 4.34, foram obtidos os espectros no domínio da frequência com a clara definição das frequências excitadas, como ilustra a Figura 4.35(i). A Figura 4.35(ii) destaca a resposta do sensor SMSMS para uma faixa de frequência de 0.1 Hz a 1 Hz. Nota-se no espectro obtido por FFT, que mesmo com ruído as ressonâncias 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1 e 10 Hz são medidas pelo sensor SMSMS. As frequências abaixo de 1 Hz, excitadas com o *shaker*, não são medidas pelo acelerômetro eletrônico de referência, devido a deficiência deste sensor para detecção de frequências tão baixas. No espectro de frequência, os ruídos são gerados devido à aplicação de frequências mais baixas do que a faixa de operação recomendada do *shaker*; e pelo ruído ambiente, devido aos computadores, e outros instrumentos próximos ao ambiente de ensaio. Além do ruído, o uso do *shaker* fora de sua faixa de operação recomendada, influencia nas variações de amplitude que aparecem. Por exemplo, a ressonância em 0.4 Hz mostra uma amplitude maior que as ressonâncias em 0.1 Hz e 0.8 Hz.

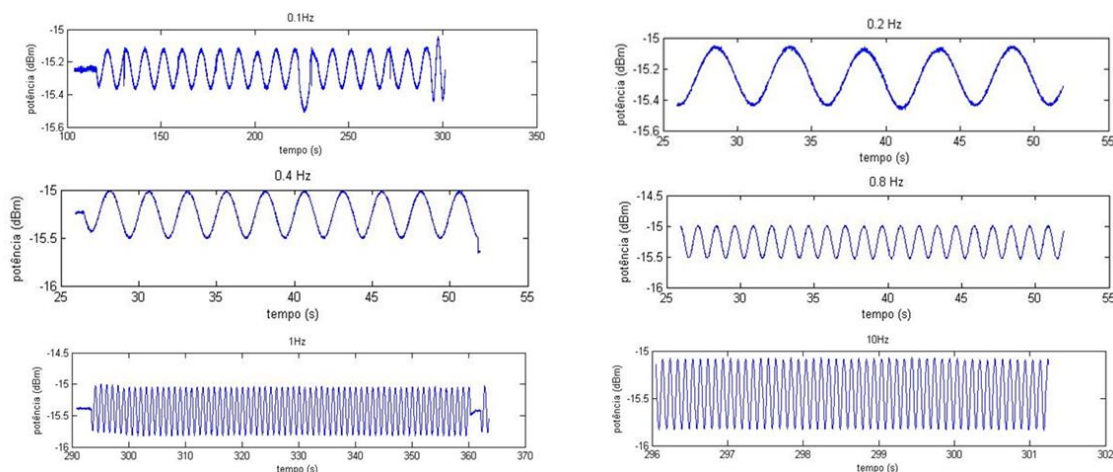


Figura 4.34 - Espectros no domínio do tempo do sensor SMSMS submetido a frequências de 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1 e 10Hz.

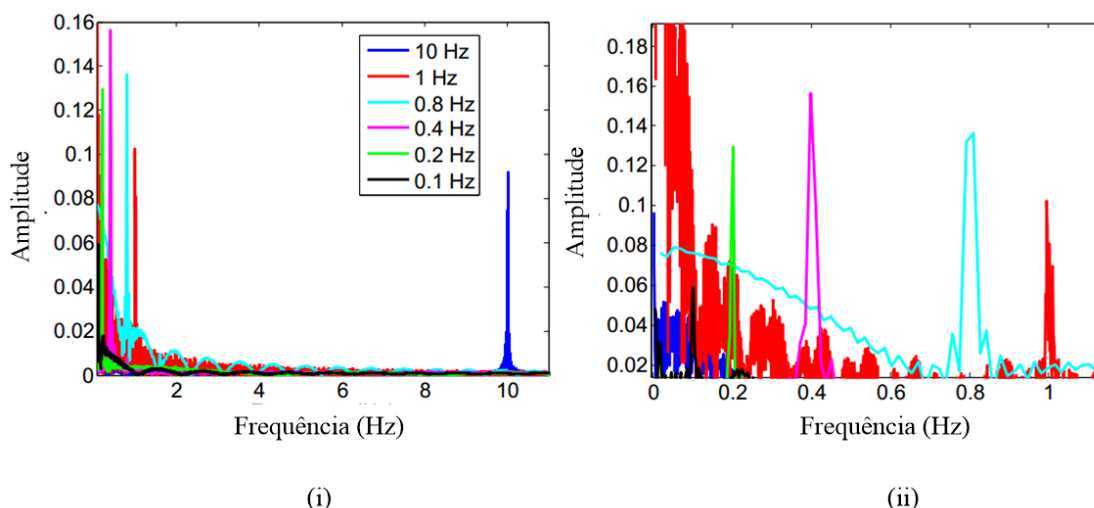


Figura 4.35 - Espectro de frequência do sensor SMSMS na gama de 0,1 a 10 Hz (i) e um zoom no espectro do sensor SMSMS na faixa de 0,1 Hz a 1 Hz (ii).

Os resultados comprovam que a estrutura SMSMS proposta como um sensor de vibração tem uma maior sensibilidade em frequências muito baixas em comparação com alguns acelerômetros comerciais. Isso implica dizer que o sensor SMSMS proposto, pode ser utilizado em frequências inferiores a 1 Hz, dentro de uma precisão satisfatória para medição de vibrações de baixa frequência de estruturas de engenharia civil, contrapondo-se aos convencionais sensores eletrônicos, que possuem como limitação a incapacidade de medir frequências abaixo de 1 Hz.

4.3 Modelagem numérica de sensor de curvatura SMS baseado em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo monitorado na transmissão

O sensor de curvatura analisado nessa seção por meio de simulações computacionais é baseado no monitoramento da curvatura em função da potência transmitida de um sinal óptico. O princípio de funcionamento desse sensor SMS de curvatura se baseia na alteração da curvatura da fibra obtendo-se diversos raios de curvatura e o sinal na saída da fibra é atenuado e computado para cada valor de raio de curvatura.

A parte de modelagem numérica é feita para uma estrutura SMS de configuração mostrada na Figura 4.36, em busca de analisar o acoplamento do modo fundamental, que a partir da primeira emenda de descasamento de diâmetro de núcleo (CDM - *Core diameter mismatch*) começa a perder energia com os modos da casca.

A representação esquemática do SMS modelado no *software* BeamProp da empresa Rsoft tem configuração dividida em três regiões: (i) seção de SMF em que os diâmetros do núcleo e da casca são de 8.2 μm e 125 μm , respectivamente; (ii) região de sensoriamento

compreendida pela seção de MMF, de diâmetros do núcleo e da casca de 105 μm e 125 μm , respectivamente; e (iii) outra seção de SMF, de mesmas dimensões de núcleo e casca da primeira SMF. Os parâmetros das fibras utilizados nas simulações, tais como diâmetros e índices de refração, são mostrados na Tabela 4.5.

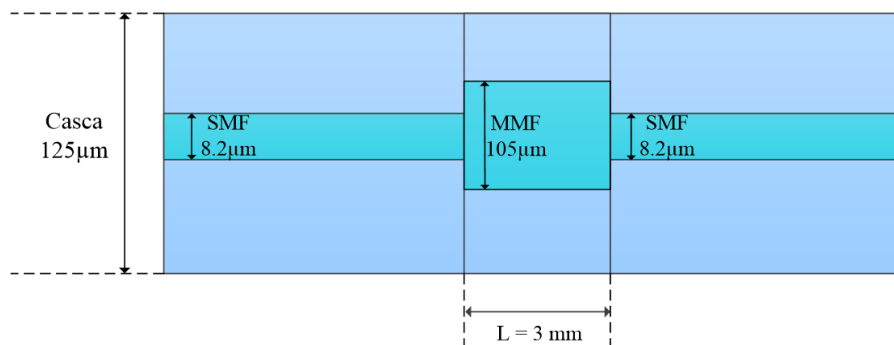


Figura 4.36 - Esquema representativo de sensor SMS usado na modelagem.

Tabela 4.5 - Parâmetros das fibras SMF-28 (Corning) e MMF- FG105-LCA (Thorlabs).

SMF-28 Corning			
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Diâmetro do núcleo	8.2 μm	IR do núcleo	1.45522
Diâmetro da casca	125 μm	IR da casca	1.45
MMF (FG105-LCA – Thorlabs)			
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Diâmetro do núcleo	105 μm	IR do núcleo	1.457
Diâmetro da casca	125 μm	IR da casca	1.440
Diâmetro da região de simulação	160 μm	IR do ambiente	1.0

Na Figura 4.37, é ilustrada a interface gráfica aplicada pelo software BeamProp da empresa RSoft, com um modelo que representa a estrutura SMS em uma estrutura tridimensional (3D), que apresenta quatro perspectivas de visualização do sensor. O sinal óptico de entrada ou lançador, destacado por um círculo na primeira imagem no canto superior esquerdo da Figura 4.37, é o modo fundamental da SMF. O lançador do modo na SMF tem dimensão menor de que o diâmetro do núcleo da SMF, caso contrário a energia é acoplada para a casca. A luz é recuperada novamente por uma SMF na saída da estrutura SMS.

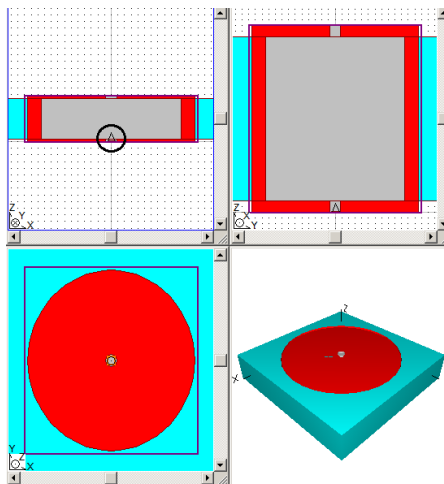


Figura 4.37 - Modelo geométrico 3D da estrutura SMS com 3mm de MMF de 105/125 μ m, feito com BeamProp da RSoft.

A simulação de curvatura do sensor SMS foi realizada através da técnica de mapeamento conforme [122], disponibilizada no *software* BeamProp. Esta técnica trata da transformação na qual a fibra curvada é representada por uma fibra reta equivalente com a distribuição do índice de refração modificada, $n_{eq}(x, y)$ [122],

$$n_{eq}(x, y) \approx n(x, y) \left(1 + \frac{x}{R_c} \right) . \quad (4.5)$$

onde, $n(x, y)$ é o índice de refração (IR) no eixo transversal x e y da fibra reta, x é considerado como o eixo no qual a curvatura ocorre e R_c é o raio de curvatura. Este método demonstra precisão em casos onde a largura do dispositivo é menor que o raio de curvatura [122]. Certamente, a equação (4.5) é uma aproximação válida dentro de determinados valores de raio de curvatura. Quando os raios de curvatura apresentam valores mínimos, abaixo de determinado limite, a própria geometria da fibra pode ser afetada fazendo com que os resultados obtidos apresentem alguma divergência entre simulações e experimentos.

Os resultados da modelagem foram comparados com as respostas espectrais obtidas experimentalmente. Para a simulação de curvatura, os valores das variações de comprimento de onda e raio de curvatura foram baseados na faixa espectral do refletômetro óptico no domínio do tempo (OTDR - *Optical time domain reflectometer*), que foi utilizado para interrogação do sensor em análise experimental e na faixa de deslocamento utilizada na análise experimental. De acordo com o manual do equipamento, o OTDR comercial da empresa *YOKOGAWA* modelo *AQ 1200 OTDR-Multi Field Tester*, trabalha com fonte de luz de comprimento de onda de 1550 nm \pm 25 nm, o que significa que o OTDR usa uma faixa espectral compreendida entre 1525 nm e 1575 nm. Dessa forma, a modelagem do sensor SMS foi feita sob o uso de valores de raio

de curvatura, baseados nos valores obtidos com a análise experimental e a aplicação de variação de valor de comprimento de onda compreendido na faixa espectral do OTDR. Os valores das variações de comprimento de onda e de raio de curvatura são especificados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Valores de comprimento de onda e de raio de curvatura aplicados na modelagem do SMS usando o software BeamPROP.

Variação de comprimento de onda (μm)	1.525, 1.53, 1.535, 1.54, 1.545, 1.55, 1.555, 1.56, 1.565, 1.57, 1.575
Raio de curvatura (μm)	1824350.959, 1053529.037, 745211.7927, 577501.4915, 471796.7468, 399014.1071

Sob a configuração do *software* BeamProp, os comprimentos das fibras foram definidos em escala de μm . Os comprimentos das seções SMF, foram configurados para serem iguais a 200 μm cada, visto que não há a necessidade de se utilizar uma SMF longa na entrada da estrutura SMS. O domínio de simulação longitudinal foi de 3400 μm , relativo ao comprimento das seções SMF, somados ao comprimento da região de sensoriamento, MMF de 3000 μm . É importante o cuidado com a dimensão da janela de cálculo, principalmente no limite máximo no eixo Z. Se este limite não estiver bem definido (soma dos comprimentos de todas as seções da estrutura) o monitor pode falhar em registrar a energia no final da SMS.

Para realizar a simulação de propagação do modo, o *software* BeamProp define uma malha de operação. Essa malha é uma matriz cujas dimensões são proporcionais à largura e altura da janela de cálculo ou de interesse. Utilizou-se tamanho das células da malha de simulação variável e não uniforme, sendo a largura máxima da malha na direção transversal igual a 0.5 μm e o valor mínimo igual a 0.01 μm nas regiões mais abruptas da estrutura. O comprimento do passo da malha no eixo de propagação (z) foi de 0.5 μm nas regiões da SMS e nas demais regiões. A Figura 4.38 (i) mostra a propagação da luz em transmissão ao longo do eixo de propagação longitudinal (z) da estrutura SMS. A Figura 4.38 (ii), mostra a potência normalizada ao longo do sensor SMS, que representa a transmissão da onda na estrutura.

A curvatura aplicada na seção MMF, tem uma significativa influência sobre a distribuição do modo de propagação [123]. O modo fundamental é lançado na entrada do dispositivo e a aplicação de curvatura do dispositivo é variada. A propagação da luz ao longo do

sensor, como ilustrado na Figura 4.38, é repetida para todas as variações de raios de curvatura e comprimentos de onda definidos.

O perfil transversal do campo óptico na extremidade do dispositivo no caso do dispositivo reto, é apresentado na Figura 4.39. Este perfil transversal do campo na saída do dispositivo é assimétrico, indicando que o acoplamento acontece principalmente com os modos azimutais LP_{1m} . Com a aplicação de curvatura, a maior parte da energia é espalhada, e após a pequena seção MMF, essa energia não é transferida de volta ao modo fundamental LP_{01} , e, portanto, é perdida, ou seja, tem-se atenuação de potência óptica.

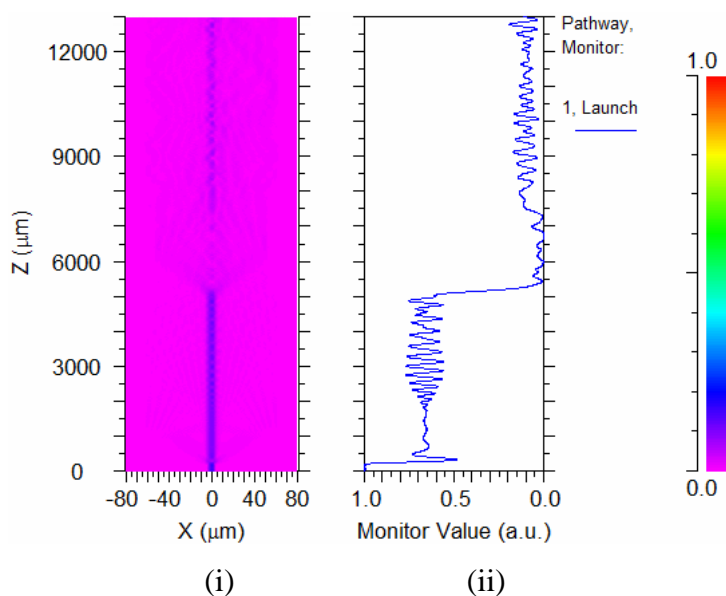


Figura 4.38 - Modo de propagação da luz ao longo de z na estrutura SMS.

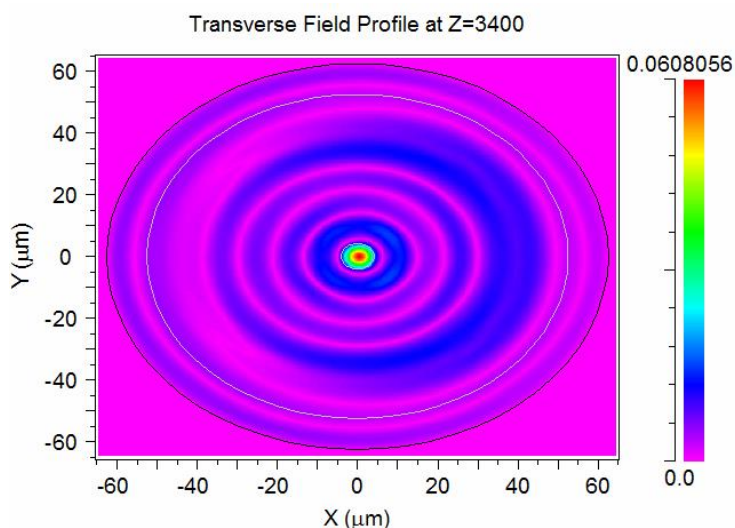


Figura 4.39 - Modo fundamental após propagar-se pela SMS.

A propagação da luz ao longo do sensor para todos os raios de curvatura e comprimentos de onda gera a resposta espectral da estrutura como porcentagem de potência óptica em

função do comprimento de onda para diferentes raios de curvatura, como ilustrado na Figura 4.40.

No geral, sensores baseados em interferometria são analisados tomando-se um pico ou um vale de interferência, que apresente alta visibilidade de franja e analisa-se seu deslocamento em comprimento de onda como função do parâmetro físico analisado [107, 117, 118]. Para o sensor proposto, apenas analisa-se a atenuação de potência óptica do sinal em função do parâmetro estudado, isso porque, como já foi dito, o sensor SMS proposto com o pequeno comprimento de MMF, apenas introduz perda de potência óptica, sem variação no comprimento de onda.

Após a obtenção da porcentagem de potência óptica para variação de comprimento de onda em cada raio de curvatura, foi feita a média de cada uma dessas porcentagens para obtenção da resposta espectral do sensor SMS modelado, como mostra a curva de simulação da Figura 4.41. Na Figura 4.41, apresenta-se a potência refletida normalizada como uma função do raio de curvatura. Os resultados de simulação são comparados com os resultados obtidos experimentalmente.

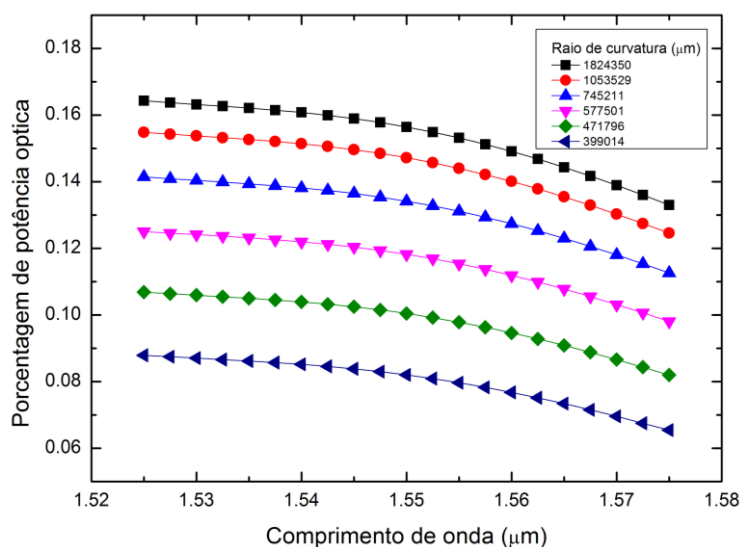


Figura 4.40 – Porcentagem de potência óptica em função do comprimento de onda para diferentes curvaturas.

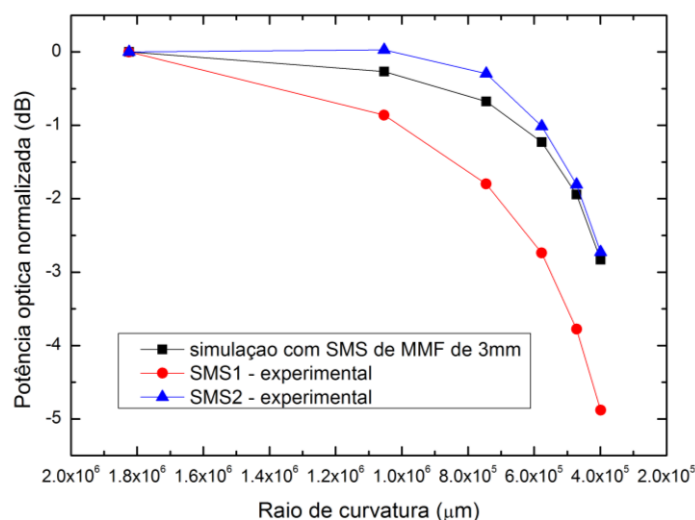


Figura 4.41 – Comparação entre resultados experimentais e simulado para sensor SMS submetido a curvatura.

Os resultados obtidos com a modelagem mostram razoável concordância com os resultados experimentais obtidos com o sensor SMS2. A comparação dos resultados experimentais com os resultados de modelagem fortalece o fato de que a modelagem do dispositivo em questão apresenta uma confiabilidade razoável, dado a proximidade das curvas.

A curva de simulação segue o mesmo comportamento do resultado obtido experimentalmente, o que confirma que a estrutura SMS é adequada para detecção de curvatura. Embora a curva de simulação apresente o mesmo comportamento, essa resposta está mais próxima da curva de resultado experimental do sensor SMS2. Pode-se justificar este fato, devido ao processo de fabricação do sensor, que não é muito preciso o que influencia na total igualdade dos sensores, afeta a sensibilidade; e também considerando que no caso experimental, o sinal óptico injetado no dispositivo é proveniente da fonte de luz do OTDR, que fornece a média do sinal em transmissão medido por reflexão. Os resultados de simulação foram medidos na saída do dispositivo óptico.

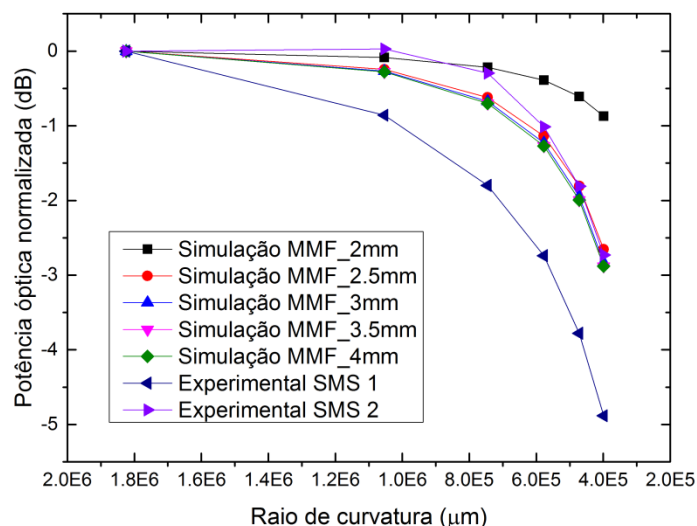


Figura 4.42 – Comparação entre resultados experimentais com resultados simulados para diferentes comprimentos de seção MMF do sensor SMS submetido a curvatura.

Nota-se pelo resultado da Figura 4.42, que apresenta a configuração de sensor SMS simulado com 5 tamanhos de seção MMF diferentes, que a curva de resultado experimental do sensor SMS 2 se aproxima mais da curva de simulação com uso de seção MMF com 2.5 mm. Isso confirma que o processo de fabricação manual e impreciso do sensor, influenciou na total igualdade dos sensores, justificando a diferença no comportamento das curvas obtidas experimentalmente.

Os resultados simulados indicam que esta configuração de sensor de curvatura SMS baseada em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo, sendo monitorada na transmissão, tem grande potencial.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foram propostos dois sensores atuando como interferômetro de Mach-Zehnder, (i) um dispositivo SMS baseado em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo (CDM - *Core diameter mismatch*) foi testado, numericamente e experimentalmente, como sensor de curvatura. A análise numérica e experimental foi realizada nesse dispositivo através do monitoramento da potência na saída do mesmo, monitorada em transmissão, em função da variação da curvatura. Bem como foi analisado a influência da temperatura sobre os sensores SMS propostos; (ii) e um dispositivo SMSMS, também baseado em técnica CDM, foi estado experimentalmente como sensor de vibração. A análise experimental foi realizada em ensaio dinâmico de aplicação de diferentes baixas frequências e monitoramento da potência na saída do mesmo. Este estudo estende a viabilidade destes tipos de estrutura de sensor em fibra para medição de curvatura e vibração.

Os dispositivos propostos neste trabalho apresentam como grande vantagem a facilidade de fabricação, bem como o baixo custo, quando comparado a outras tecnologias como FBG, LPG e fibras micro-estruturadas. O sensor SMS, que é composto por uma pequena seção MMF de 3 mm emendada entre duas SMF, foi testado como sensor de curvatura em conjunto com um sistema de interrogação baseado em um refletômetro óptico no domínio do tempo (OTDR – *Optical time-domain reflectometer*). Para aumentar a potência refletida foi utilizado um espelho de fibra óptica na extremidade de saída do sensor.

A fim de assegurar que o dispositivo não agia como uma estrutura de interferência multimodal (MMI - *Multimode interference*) comum, o sensor foi submetido à curvatura com sistema composto por fonte de banda larga *Multiwave* EDFA, operando na faixa de 1500 nm a 1580 nm e um analisador de espectro óptico, com aplicação de deslocamentos. Os resultados mostraram que quando está sob curvatura, o sensor apenas introduz uma perda de potência do sinal, a perda induzida é independente do comprimento de onda.

O sistema de interrogação usa diferença entre potências de dois pontos do traço do OTDR. Os resultados apresentados indicaram que a utilização do sensor SMS como sensor de curvatura, em conjunto com o sistema de interrogação em questão, pode ser uma opção para medições de curvatura no campo de monitoramento de integridade estrutural. O

sistema de interrogação usa diferença entre potências de dois pontos do traço do OTDR. Dado que essa técnica usa a diferença de intensidade óptica entre dois pontos do traço, ela mostra-se independente de flutuações de potência óptica.

Os resultados das medidas experimentais através do sistema de interrogação com OTDR, para os deslocamentos aplicados, de 0 a 600 μm , aos dois sensores SMS fabricados evidenciaram comportamentos lineares com sensibilidade para o sensor SMS1 de $\sim -255,8 \text{ dB} / \text{cm}^{-1}$ e para o sensor SMS2 de $\sim -211,8 \text{ dB} / \text{cm}^{-1}$, respectivamente. As resoluções alcançadas são de $\sim 0,00074 \text{ cm}^{-1}$ e $\sim 0,0015 \text{ cm}^{-1}$, e uma variação de 4,9 e 2,67 dB no traço do OTDR, para os sensores SMS1 e SMS2, respectivamente.

Também foi aplicado aos sensores SMS, teste com variação de temperatura na faixa de 27°C à 40°C , com passos de 1°C . As medições registraram pequena influência da temperatura nas medidas de curvatura, visto que os sensores SMS apresentaram perdas quase insignificantes de potência óptica durante as medidas de temperatura, apresentando sensibilidade de $\sim -0,01 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ e $\sim -0,02 \text{ dB}/^\circ\text{C}$, para os sensores SMS1 e SMS2, respectivamente, atestando a baixa sensibilidade dos sensores à temperatura.

Um possível problema desse sensor, é que o comprimento da seção MMF de 3 mm é medido e cortado manualmente, o que influencia na sua precisão e sensibilidade. Uma solução para isso seria melhorar o processo de fabricação dos sensores, através do uso de um microposicionador linear de precisão para medir e clivar a fibra.

Analisou-se em transmissão, através de simulações numéricas baseadas na técnica BPM, a resposta do sensor SMS atuando como sensor de curvatura na mesma configuração interferométrica que o sensor SMS produzido experimentalmente. A análise numérica foi usada para prever a resposta da estrutura à perda de potência quando submetida à curvatura. Os resultados numéricos para a estrutura SMS foram compatíveis com o comportamento experimental obtido. As simulações numéricas indicaram que a perda de potência foi intensificada ao se curvar a região sensora. Para determinados raios de curvatura, a resposta sensora apresenta resultado numérico mais aproximado do resultado experimental obtido com o sensor SMS 2 fabricado. Os resultados numéricos confirmaram o comportamento de perda de potência do interferômetro SMS sob curvatura.

Realizou-se análise experimental do sensor SMSMS baseado em técnica de descasamento de diâmetro de núcleo, atuando como sensor de vibração, mas dessa vez, ao invés de se usar método de interrogação convencionais, utilizou-se sistema óptico de aquisição de dados baseado em configuração de Arduíno. Foram realizadas medidas experimentais

com um setup que combina uma fonte laser, um excitador (*shaker*), e o sensor SMSMS. Essa configuração permite uma análise mais precisa do sensor SMSMS sob influência de vibração, uma vez que, o *shaker* consegue aplicar diferentes valores de frequências ao sensor de forma controlada.

A estrutura SMSMS atuando como sensor de vibração foi analisada para medições de frequências bem baixas, de 0.1 Hz a 10 Hz, características de estruturas civis. A investigação experimental demonstrou que, ao contrário dos acelerômetros eletrônicos comuns e de acelerômetros ópticos já existentes, o sensor óptico SMSMS aqui proposto é capaz de detectar baixas frequências, com uma sensibilidade satisfatória e, mais importante, com a seleção adequada das frequências de funcionamento, definindo claramente os picos no espectro de frequência, obtido por técnica de transformada rápida de Fourier. Essa característica garante a qualidade e inovação do sensor apresentado.

Conforme foi demonstrado ao longo da tese, existe grande potencial de desenvolvimento de sensores baseados em fibra óptica para monitorar parâmetros relacionados ao monitoramento no campo de integridade estrutural. Há um vasto campo a ser explorado com os tipos de sensores tratados nessa tese, aplicados não só aos parâmetros analisados, como a outros parâmetros físicos e químicos, tais como, deformação, temperatura, pressão, etc.

5.1 Propostas de trabalhos futuros

A seguir, apresentam-se algumas sugestões para a continuação dessa pesquisa:

- Estudar a variação de sensibilidade do interferômetro de Mach-Zehnder em fibra baseado em técnica CDM, utilizado como sensor de curvatura, pela alteração dos parâmetros de dimensão e comprimento da seção MMF utilizada. A análise desse sensor SMS, baseado em pequena seção MMF emendada entre duas SMFs sob curvatura pode ser feita de forma mais aprofundada, tanto numérica quanto experimentalmente.
- Realizar análise numérica minuciosa para avaliar o comportamento dos modos à medida que o sensor SMS é curvado e seus parâmetros de dimensão e comprimento são alterados. Dessa forma, pode-se tentar prever de forma mais precisa a resposta sensora à variação de sensibilidade em função da curvatura e dos parâmetros da seção MMF.

- Podem ser realizados experimentos utilizando o sensor SMS associado à curvatura como sensor de deformação, com um aparato diferente que permita que se analise o sensor em diversas aplicações em estruturas, como por exemplo no carregamento de cargas, sob tração e flexão, ou mesmo sob análise de pressão de líquidos em tubulações de água ou combustível. Dessa forma pode-se obter maior sensibilidade a curvatura ou mesmo outros parâmetros de medição, mantendo-se as mesmas características do sensor. Essa pesquisa já foi iniciada em colaboração com o grupo de Engenharia Mecânica da UFPA.
- Aplicar método de interrogação por meio de sistema óptico de aquisição de dados baseado em Arduíno, configurado para ensaios estáticos com análise de curvatura e/ou outros parâmetros de medição. Essa implementação inova não só pelo diferente método de interrogação, como também pelo custo do sistema interrogador, que pode ser produzido em laboratório a custo baixo, barateando um pouco o sistema de sensoriamento.
- Estudar em mais detalhe a influência que a curvatura em interferômetros de Mach-Zehnder, baseados em SMS com técnica CDM, pode ter na temperatura. Isso permitirá analisar sensibilidade cruzada e discriminar minuciosamente os efeitos na temperatura e na curvatura.
- Existe um extenso campo de exploração do sensor SMS como MMI, onde pode ser feita modelagem para analisar numericamente esse dispositivo para obter a resposta separada referente a curvatura e a temperatura, comparando-se a sensibilidade entre o sensor SMS como um MMI e o sensor SMS baseado em técnica CDM, com inserção apenas de perdas de potência óptica. Com certeza, após a obtenção desses resultados numéricos comparativos, seria interessante tentar comprová-los experimentalmente.
- Incluir métodos probabilísticos na análise de medidas experimentais com os dispositivos apresentados nesta tese. Dessa forma, as medidas seriam repetidas diversas vezes, permitindo que parâmetros, tais como, média, desvio padrão e incerteza sejam obtidos.
- Estudar a variação de sensibilidade do interferômetro de Mach-Zehnder em fibra baseado em técnica CDM, utilizado como sensor de vibração, pela alteração dos parâmetros de dimensão e comprimento das seções MMFs e seção SMF emendada entre estas. A análise desse sensor SMSMS, baseado em uma seção não revestida de

SMF emendada entre duas pequenas seções MMF sob vibração, pode ser feita de forma mais aprofundada numericamente e experimentalmente.

- Executar análise numérica minuciosa no software COMSOL, para avaliar o comportamento dos modos à medida que o sensor SMSMS é excitado em diferentes frequências e seus parâmetros de dimensão e comprimento são alterados. Assim busque-se prever de forma mais precisa a resposta sensora à variação de frequências e dos parâmetros da seção sensora.
- Analisar o sensor SMSMS em diversas aplicações em estruturas sob tração, flexão, pressão, temperatura, etc. Dessa forma pode-se obter a sensibilidade à curvatura ou mesmo a outros parâmetros de medição, mantendo-se as mesmas características do sensor. Essa pesquisa também já foi iniciada em colaboração com o grupo de Engenharia Mecânica da UFPA.
- Testar o sensor SMSMS de vibração em diversas faixas de frequência, estipulando faixa espectral de trabalho, e analisar a resposta à variação dessas frequências em termos de potência transmitida e espectro de frequências obtido pelo método FFT.
- A configuração de sensor SMSMS monitorado para vibração, pode ser testada como sensor de curvatura, monitorado na transmissão de potência em diversos raios de curvatura e analisar a resposta à variação do parâmetro analisado em termos de potência transmitida. Pode ser desenvolvido com base nessa abordagem um sensor, de diferentes parâmetros, de simples construção e funcionamento.
- Estudar a aplicação de diversos materiais em conjunto com os sensores SMS e SMSMS, em busca da produção de um protótipo de cabeça sensora. Deve-se avaliar todos os componentes materiais que podem ser aplicados para a proteção e usabilidade do sensor em campo, bem como avaliar a influência desses materiais sobre a sensibilidade dos sensores propostos.

5.2 Lista de Artigos Publicados e Submetido

Os artigos publicados e submetido com alguns dos resultados desse trabalho foram os seguintes:

- **Fernandes, C. S.; Giraldi, M. T. M. R.; Gouveia, C.; Sousa, M. J.; Costa, J. C. W. A.; Frazao, O.; Jorge, P. A. S. Remote curvature fiber sensors using core mismatch structures and OTDR based interrogation.** Proceedings of the II International Conference on Applications of Optics and Photonics. Aveiro: SPIE Digital Library. 2014. vol. 1, p. 173-176.

- Giraldi, M. T. M. R.; **Fernandes, C. S.**; Ferreira, M. S.; Costa, J. C. W. A.; Santos, J. L.; Frazao, O. **Interrogation System for Fiber Loop Mirror Sensors using OTDR**. Proceedings of the 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors OFS23. Santander: SPIE Digital Library. 2014 vol. 1, p. 145-148
- Giraldi, M. T. M. R.; **Fernandes, C. S.**; Ferreira, M. S.; Sousa, M. J.; Jorge, P. A. S.; Costa, J. C. W. A.; Santos, J. L.; Frazao, O. Interrogation and multiplexing system for fiber loop mirror coupled intensity sensors using OTDR. **Microwave and Optical Technology Letters**. vol. 56, no.12, p. 2860-2864, Dez 2014.
- Giraldi, M. T. M. R.; **Fernandes, C. S.**; Ferreira, M. S.; Sousa, M. J.; Jorge, P. A. S.; Costa, J. C. W. A.; Santos, J. L.; Frazao, O. Fiber Loop Mirror Sensors Interrogated and Multiplexed by OTDR. **Journal of Lightwave Technology**. vol. 33, no. 12, pp. 2580-2584, June 15, 2015. doi: 10.1109/JLT.2014.2360500.
- Giraldi, M. T. M. R.; **Fernandes, C. S.**; Ferreira, M. S.; Sousa, M. J.; Jorge, P. A. S.; Costa, J. C. W. A.; Santos, J. L.; Frazao, O. Fiber optic displacement sensor based on a double-reflecting otdr technique. **Microwave and Optical Technology Letters**. 2015. vol. 57, no. 6, p. 1312–1315.
- **Fernandes, C. S.**; Giraldi, M. T. M. R.; Sousa, M. J.; Costa, J. C. W. A.; Gouveia, C.; Jorge, P. A. S.; Franco, M. A. R. . Curvature and vibration sensing based on core diameter mismatch structures. **IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement**. 2016. (Submetido).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Yin,S.; Ruffin,P. B.; Yu,F. T. S. *Fiber Optic Sensors*. 2nd Ed., CRC Press, 2008.
- [2] Lee, B. H.*et al.*, Interferometric Fiber Optic Sensors. *Sensors*. 2012. v.12, 2467 – 2486; doi:10.3390/s120302467.
- [3] Grattan,K.T.V.; Meggitt,B.T. *Optical Fiber Sensor Technology*: Applications and Systems. Springer US,v.3, 1, 1999.
- [4] Mescia, L.; Prudenzano, F. Advances on Optical Fiber Sensors. *Fibers*, v. 2, n. 1, p. 1–23, 2014.
- [5] Gleeson, Tomita, M. R.; Y.;Gallego, S.;McLeod, R. Advances in Novel Optical Materials and Devices. *Physics Research International*, v. 2013, p. 1–2, 2013.
- [6] Leung, C. *et al.*Review: optical fiber sensors for civil engineering applications.*Materials and Structures*,v.48, n.4, p. 871–906, Abril 2013.
- [7] Yang, N. Technologies for structural test & monitoring: The modern approach.*IEEE Autotestcon*. [S.l.: s.n.], 2010, pp. 1–5.
- [8] Antunes,P. F. da C. *Sensores ópticos para monitorização dinâmica de estruturas*.174fls.Tese (Doutorado) - Universidade de Aveiro, Aveiro. 2011.
- [9] Lee, B. Review of the Present Status of Optical Fiber Sensors. *Optical Fiber Technology*, v. 9, p. 57-79, 2003.
- [10] Guo,H.;Xiao,G.;Mrad,N.;Yao,J.Fiber Optic Sensor for Structural Health Monitoring of Air Platforms. *Sensors*, v. 11, p. 3687-3705, 2011.
- [11] Bogue,R. Fibre Optic Sensors: a Review of Today’s Applications. *Sensor Review*, v. 31, p. 304-309, 2011.
- [12] García,Y. R.;Corres, J. M.;Goicoechea, J. Vibration Detection Using Optical Fiber Sensors.*Journal of Sensors*, v. 2010, p. 1–12, 2010.
- [13] Wang, Y.-P.;Rao, Y.-J.A novel long period fiber grating sensor measuring curvature and determining bend-direction simultaneously. *IEEE Sensors Journal*, v. 5, n. 5, p. 839–843, Oct 2005.
- [14] Tafulo,P. *et al.*Intrinsic FabryPerot Cavity Sensor Based on Etched Multimode Graded Index Fiber for Strain and Temperature Measurement. *IEEE Sensors Journal*, v. 12, n. 1, p. 8–12, Jan 2012.
- [15] Dhakal, D. R.*et al.*Different techniques of structural health monitoring. *Int. J. of Civil, Struct., Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD)*,v. 3, n. 2, p. 55-66, Jun 2013.

- [16] Caetano,E.;Cunha,A.; Magalhães,F.Novas perspectivas na análise do comportamento dinâmico de estruturas. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões. Mecânica Experimental*, v. 18, p. 23-34, 2010.
- [17] Li,H.-Net *al.*Reviews on innovations and applications in structural health monitoring for infrastructures. *Structural Monitoring and Maintenance*, v. 1(1), p. 001-045, 2014.
- [18] Chang,P. C.;Flatau,A.;Liu,S. C. Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Structural Health Monitoring*, v. 2, p. 257-267, 2003.
- [19] Stepinski,T.;Uhl,T.;Staszewski, W. *Advanced structural damage detection: from theory to engineering applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [20] Worden,K.;Dulieu-Barton, J. M. An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures.*Structural Health Monitoring*, v.3, n. 1, p. 85–98, 2004.
- [21] Ye,X. W.;Su, Y. H.;Han,J. P. Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Using Optical Fiber Sensing Technology: A Comprehensive Review.*The Scientific World Journal*, v. 2014, p. 1–11, 2014.
- [22]Farrar,C. R.;Worden,K. An introduction to structural health monitoring.*Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 365, no. 1851, p.303–315, 2007.
- [23] Lopez-Higuera,J.;Cobo,L. R.;Incera,A. Q.;Cobo, A. Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring.*Journal of Lightwave Technology*, v. 29, no. 4, p. 587–608, Feb 2011.
- [24] H. Sohn *et al.*, A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996–2001. *Los Alamos National Laboratory Report*, LA-13976-MS, 2003.
- [25] Brownjohn,J. M. W. Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 365(1851), p. 589–622, 2007.
- [26] Worden,K.;Farrar,C. R.;Manson,G.;Park,G. The fundamental axioms of structural health monitoring. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A (Mathematical, Physical and Engineering Sciences)*, v. 463(2082), p.1639-64, 2007.
- [27] Glisic,B.;Inaudi,D. *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [28] P. F. C. Antunes *et al.*Optical Fiber Accelerometer System for Structural Dynamic Monitoring,*IEEE Sensors Journal*, v. 9, p. 1347 - 1354, 2009.

- [29] Antunes, P. *et al.* **Static and dynamic structural monitoring based on optical fiber sensors**. In: 12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). [S.l.: s.n.], 2010, p. 1–4.
- [30] Udd, E. **Fiber optic sensors**. In: 2. ed. [S.l.]: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. (Overview of Fiber Optic Sensors), cap. 1, p. 1–34.
- [31] Gomes, G. C. **Sensores Ópticos com base em Grades de Bragg em Fibra para Monitoramento de Temperatura e Índice de Refração**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Militar de Engenharia, 2011.
- [32] Yan, X. *et al.* A sensor for the direct measurement of curvature based on flexoelectricity. **Smart Materials and Structures**, v. 22, no. 8, 2013.
- [33] Djordjevich, A.; He, Y. Thin structure deflection measurement. **Instrumentation and Measurement**, v. 48, no. 3, p. 705–710, Jun 1999.
- [34] Inaudi, D. *et al.* Structural monitoring by curvature analysis using interferometric fiber optic sensors. **Smart Materials and Structures**, v. 7, n. 2, p. 199–208, 1998.
- [35] R. Wang *et al.* Highly Sensitive Curvature Sensor Using an In-Fiber MachZehnder Interferometer. **IEEE Sensors Journal**, v. 13, n. 5, p. 1766–1770, May 2013.
- [36] A. Djordjevich and Y. He, **Curvature measurements**. p. 322–329, 1998.
- [37] Goyal, D.; Pabla, B. The Vibration Monitoring Methods and Signal Processing Techniques for Structural Health Monitoring: A Review. **Archives of Computational Methods in Engineering**, p. 1–10, 2015.
- [38] Rajan, G. *et al.*, Analysis of Vibration Measurements in a Composite Material Using an Embedded PM-PCF Polarimetric Sensor and an FBG Sensor. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 5, p. 1365–1371, May 2012.
- [39] Elebi, M. Seismic Monitoring of Structures and New Developments. **Earthquakes and Health Monitoring of Civil Structures, ser. Springer Environmental Science and Engineering**, M. Garevski, Ed. Springer Netherlands, 2013, p. 37–84.
- [40] Potter, D. *et al.*, **Distributed Dynamic Monitoring System for SHM**. Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures - EVACES11, Varenna, Itália, 2011.
- [41] Majowiecki, M. **Experimental Vibration Analysis in Assessment and Design of Lightweight Structures**. Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures - EVACES11, Varenna, Itália, 2011.
- [42] Cross, E. *et al.* Long-term monitoring and data analysis of the Tamar Bridge. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 35, n. 12, p. 16–34, 2013.

- [43] Müller *et al.* Fiber-Optic Sensor Interrogation Based on a Widely Tunable Monolithic Laser Diode. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, v. 59, n. 3, March 2010.
- [44] Laudati,A. *et. al.*A fiber optic Bragg grating seismic sensor, p. 66 191C– 66 191C–4, 2007.
- [45] Hatta,A. M. *et. al.*,SMS fiber structure for temperature measurement using an OTDR. *Photonic Sensors*, v. 3, n. 3, p. 262–266, 2013.
- [46] Hatta,A. M. *et. al.*Strain measurement based on SMS fiber structure sensor and OTDR. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 55, n. 11, p. 2576–2578, 2013.
- [47] Zhao,Y. *et al.*A vibration-sensing system based on SMS fiber structure. *Sensors and Actuators A: Physical*, p. 214:163–167, 2014.
- [48] Villatoro,J.;Monzon-Hernandez, D. Low-cost optical fiber refractive-index sensor based on core diameter mismatch. *Journal of Lightwave Technology*, v. 24, n. 3, p.1409–1413, March 2006.
- [49] Nguyen, V. L. *et al.* High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch. *Optic express*, v. 16, n. 15, p. 11370 – 11375, July 2008.
- [50] Xiong,R. *et al.*, Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Based on Modal Interference. *IEEE Sensors Journal*. v.14, n.8, p.2524-2528, Aug.2014.
- [51] C. R.da Silveira *et al.*, Bent optical fiber taper for refractive index measurements with tunable sensitivity, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, v. 57, n. 4, p. 921 – 924, 2015.
- [52] Yadav,T. *et al.*, Single mode tapered fiber-optic interferometer based refractive index sensor and its application to protein sensing.*Opt. Express*, v. 22, p. 22802-22807, 2014.
- [53] Tian,Z. *et al.*, Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers.*IEEE Photon. Technol. Lett.*, v. 20, p. 626-628, 2008.
- [54] Zhang, Q. *et al.*Single-mode fiber refractive index sensor with large lateral offset fusion splicing between two abrupt tapers. *Opt. Eng.*. 0001; v. 51, n. 9, p. 090502-1-090502-3. doi:10.1117/1.OE.51.9.090502.
- [55] Fan,W.;Qiao,P. Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study.*Structural Health Monitoring*, v. 10, n. 1, p. 83-111, January 2011.
- [56] Culshaw,B. Optical Fibre Sensors: a Current Perspective. *The Open Optics Journal*, v. 7, (Suppl-1, M2), p. 21-31, 2013.

- [57] Ferdinand, P. *The Evolution of Optical Fiber Sensors Technologies During the 35 Last Years and Their Applications in Structure Health Monitoring*. Le Cam, Vincent and Mevel, Laurent and Schoefs, Franck. EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, Jul 2014, Nantes, France.
- [58] Rodrigues, C.; Inaudi, D.; Glisic, B. Long-gauge fibre optic sensors: performance comparison and applications. *Int. J. Lifecycle Performance Engineering*, v. X, n. Y, XXXX, p. 1-26.
- [59] Inaudi, D. *et al.* SOFO: Structural Monitoring with fiber optic sensors. *FIB, Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures*, v. 2, p. 1 - 13, Vienna, Austria, 1999.
- [60] A. Kersey, *et al.* Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, v. 15, n.8, p.1442–1463, 1997.
- [61] Gouveia, C. A. de J. *Refractometric Platforms for Label-Free Biochemical Sensing*. Tese (Doutorado). Universidade da Madeira, Portugal, 2013.
- [62] Tosi, D. *et al.*, *Simple fiber Bragg grating sensing systems for structural health monitoring*. IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS). [S.l.: s.n.], 2009. p. 80–86.
- [63] Zhang, L. *Fiber optic sensors*. In: 2. ed. [S.l.]: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. (In-Fiber Grating Optic Sensors), cap. 4, p. 109–162.
- [64] Frazao, O. *et al.*, Applications of fiber optic grating technology to multi-parameter measurement. *Fiber and Integrated Optics*, v.24, n.3-4, p.227–244, 2005.
- [65] Enríquez, D. A. C. *Análise de sensores baseados em fibra óptica*. Rio de Janeiro, Brasil: Instituto Militar de Engenharia, 2011. 116 f. Dissertação (Grau de mestre de Engenharia elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil.
- [66] Adhami, R. *Autonomous structural monitoring using fiber Bragg grating*. In: Int. Conf. on Computer Systems and Industrial Informatics (ICCSII). [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–4.
- [67] Lee, B. *Fiber optic sensors*. 2. ed. [S.l.]: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. (Interrogation Techniques for Fiber Grating Sensors and the Theory of Fiber Gratings), cap. 7, p. 253–332.
- [68] James, S. W.; Tatam, R. P. Optical fibre long-period grating sensors: Characteristics and application. *Measurement Science and Technology*, v.14, n.5, pp. R49–R61, 2003.

- [69] Everall, L. A. *et al.*, ***Flexible fabrication of long period in-fiber gratings***. Proc. Conf. Lasers and Electro-Optics (CLEO'98), p. 513, 1998.
- [70] Erdogan, T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters. ***Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision***, v.14, n.8, p.1760–1773, 1997.
- [71] Patrick, H. J.; Kersey, A. D.; Bucholtz, F. Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction. ***Journal of Lightwave Technology***, 1998.
- [72] Silva, S. *et al.*, Curvature and Temperature Discrimination Using Multimode Interference Fiber Optic Structures – A Proof of Concept. ***Journal of Lightwave Technology***, v. 30, n. 23, p.3569–3575, Dec 2012.
- [73] Rong, Q. *et al.*, High-Sensitive Fiber-Optic Refractometer Based on a Core-Diameter-Mismatch Mach–Zehnder Interferometer. ***Sensors Journal, IEEE***, v.12, n.7, p. 2501–2505, July 2012.
- [74] Soldano, L. B.; Pennings, E. C. M. Optical multi-mode interference devices based on selfimaging: principles and applications. ***Journal of Lightwave Technology***, v.13, n.4, pp.615–627, 1995.
- [75] Giraldi, M. T. M. R. *et al.*, Fiber optic displacement sensor based on a double-reflecting otdr technique. ***Microwave and Optical Technology Letters***, v. 57, n. 6, p. 1312–1315, 2015.
- [76] Fernandes, C. S. *et al.*, ***Remote curvature fiber sensors using core mismatch structures and OTDR based interrogation***. In: Proc. of the II International Conference on Applications of Optics and Photonics. Aveiro: SPIE Digital Library, v. 1, p. 173-176, 2014.
- [77] Murphy, R. P.; James, S. W.; Tatam, R. P. Multiplexing of Fiber-Optic Long-Period Grating-Based Interferometric Sensors. ***Journal of Lightwave Technology***, v. 25, n. 3, March, 2007.
- [78] Zhu, J. J. *et al.*, Fiber-optic high-temperature sensor based on thin-core fiber modal interferometer. ***IEEE Sens. J.***, v. 10, p.1415-1418, 2010.
- [79] Ngyuen, L. V. *et al.*, High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch. ***Opt. Express***, v. 16, p.11369-11375, 2008.
- [80] Lu, P. *et al.* Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature. ***Appl. Phys. Lett.***, v. 94, 2009.
- [81] Yuan, L.-B.; Zhou, L. M.; Wu, J. S. Fiber optic temperature sensor with duplex Michelson interferometric technique. ***Sens. Actuat. A*** 2000, 86, p. 2-7.

- [82] KO'Mahoney, T. *et al.*, Short-scan fiber interferometer for high-resolution Bragg grating array interrogation. *IEEE Sens. J.*, v. 9, p. 1277-1281, 2009.
- [83] O. Frazão *et al.*, J. Optical flowmeter using a modal interferometer based on a single nonadiabatic fiber taper. *Opt. Lett.*, v. 32, p.1974-1976, 2007.
- [84] Chen, N.;Hsieh,Y.;Lee,Y. Tapered fiber Mach-Zehnder interferometers for vibration and elasticity sensing applications. *Opt. Express*, v. 21, p.11209-11214, 2013.
- [85] Xu, L.; Li, Y.; Li, B. Nonadiabatic fiber taper-based Mach-Zehnder interferometer for refractive index sensing. *Applied Physics Letters*, v. 101, 153510 (2012).
- [86] López-Higuera, J. M.;Rodríguez,L.;Quintela,A.;Cobo, A. *Currents and Trends on Fiber Sensing Technologies for Structural Health Monitoring*. In: The 2nd Mediterranean Photonics Conference, Eilat, Israel, p. 1-14, Nov. 2010.
- [87] P. Rajeev, J. Kodikara, W. K. Chiu, T. Kuen, Distributed Optical Fibre Sensors and their Applications in Pipeline Monitoring.*Key Engineering Materials*, v. 558, p. 424-434, Jun. 2013.
- [88] Galindez-Jamioy, C. A.; López-Higuera, J. M.; Brillouin Distributed Fiber Sensors: An Overview and Applications. *Journal of Sensors*, v. 2012, 17 pages, 2012. doi:10.1155/2012/204121.
- [89] Di Sante,R. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications.*Sensors* 2015, vol.15, p.18666-18713; doi:10.3390/s150818666.
- [90] Ukil, A.; Braendle, H.; Krippner, P. Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications. *Sensors Journal, IEEE*, v.12, n. 5, p. 885-892, 2012.
- [91] Murayama, H. *et al.*Distributed Strain Sensing from Damage Composite Materials Based on Shape Variation of the Brillouin Spectrum. *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, v. 15, n. 1, p. 17 – 25, Jan, 2004.
- [92] Daley, T. M. *et al.* Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring. *The Leading Edge*, v. 32, n. 6, p. 699 – 706, Jun 2013.
- [93] Rsoft design group, *BeamProp Manual 9.0*. Ossining: [s.n.], 2013.
- [94] Scarmozzino,R. *et al.*Numerical Techniques forModeling Guided-Wave Photonic Devices.*J. Selected Topics in Quantum Electronics*v. 6, 150, 2000.
- [95] Scarmozzino, R.; OsgoodJr.,R.M. Comparison of finite-difference and Fourier-transform solutions of the parabolic wave equation with emphasis on integrated-optics applications, *J. Opt. Soc.Amer*, v. 8, 724, 1991.

- [96] Hadley, G. R. Wide-angle beam propagation using Pade approximant operators. *Optics Letters*, v. 17, 1426, 1992.
- [97] Hadley, G. R. Multistep method for wide-angle beam propagation, *Optics Letters* v. 17, 1743, 1992.
- [98] Yevick, D.; Hermansson, B. Efficient beam propagation techniques. *J. Quantum Electron*, v. 26, 109, 1990.
- [99] Chung, Y.; Dagli, N. An assessment of finite difference beam propagation method. *J. Quantum Electron*, v. 26, 1335, 1990.
- [100] Hadley, G. R. Transparent boundary condition for the beam propagation method, *Opt. Lett.*, v.16, 624, 1991.
- [101] Huang, W. P. *et al.* The perfectly matched layer (PML) boundary condition for the beam propagation method, *Photon. Technol. Lett.* v. 8, 649, 1996.
- [102] Ulrich, R. Light-Propagation And Imaging In Planar Optical Waveguides. *Nouv. Rev. Optique*, v. 6, n. 5, p. 253-262, 1975.
- [103] Ulrich, R. Image Formation by Phase Coincidences in Optical Waveguides. *Optics Communications*, v. 13, n. 3, p. 259-264, March 1975.
- [104] Pachon, E. G. P. *Dispositivos em fibras ópticas baseados em interferência multimodal*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, 2013.
- [105] Bryngdahl, O. Image formation using self-imaging techniques. *Journal of Optical Society of America*. vol 63, n. 4, p. 416-419, 1973.
- [106] Mansuripur, M. *The Talbot Effect*. Classical Optics and its Applications. 2. ed. United Kingdom: Cambridge University Press, Cap. 26, pp. 367-378, 2009.
- [107] L. B. Soldano, E. C. M. Pennings. Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications. *Journal of Lightwave Technology*, v.13, n. 4, p. 615-627, April 1995.
- [108] Takeshi, Z. *Study on low-loss Si waveguides and photonic integrated circuit devices using multi-mode interference waveguides for optical networks*. Tese (Doutorado). Universidade Waseda, Japão, 2005.
- [109] Blahut, M.; Kasprzak, D. Multimode interference structures-properties and applications. *Optica Applicata*, v. XXXIV, n. 4, 2004.
- [110] Okamoto, K. *Fundamentals of optical waveguides*. San Diego: Academic Press, 2006.

- [111] Carvalho, D. O. *Desenvolvimento de Processos de Fabricação de Dispositivos óptico integrados em tecnologia de silício para aplicação em sensoriamento*. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- [112] Pachon, E.G.P. *Dispositivos em fibras ópticas baseados em interferência multimodal*. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2013.
- [113] Soldano, L. B.; Pennings, E.C. M. Optical Multi-mode Interference Devices Based on Self-Imaging Principles and Applications. *Journal of Lightwave Technology*, v. 13, n. 4, April 1995.
- [114] Mukhopadhyay, N. Study on Different characteristics of Single Mode-Multimode-Single Mode Fiber Structure. *International Journal: Adamas Technical Review*, v. 1, n. 1, July 2014.
- [115] Morshed, A. H. *Self-imaging in Single mode-Multimode-Single mode*. Optical Fiber Sensors. Electronics, Communications and Photonics Conference (SIEPC) Saudi International, p. 1-5, April 2011.
- [116] Marcuse, D. *Theory of Dielectric Optical Waveguides*. New York: Academic Press, 1974.
- [117] Wang, Q.; Farrell, G.; Yan, W. Investigation on Single-Mode-Multimode-Single-Mode Fiber Structure. *Journal of Lightwave Technology*, 26, n. 5, 1 March 2008.
- [118] Mohammed, W. S.; Mehta, A.; Johnson, E. G. Wavelength Tunable Fiber Lens Based on Multimode Interference. *Journal of Lightwave Technology*, 22, n. 2, p. 469-477, February 2004.
- [119] Caucheteur, C. *et al.*, *Simultaneous bend and temperature sensor using tilted FBG*. In Proc. SPIE, v. 5855, p. 707-710, 2005.
- [120] Oommen, R.; Rajalakshmi, U.; Sanjeeviraja. Characteristics of Electron Beam Evaporated and Electrodeposited Cu₂O thin films - Comparative study. *International Journal of Electrochemical Science*, 7:8288-8298, September 2012.
- [121] Silva, R. E.; Franco, M. A. R.; Bartelt, H.; Pohl, A. A. P. Numerical characterization of piezoelectric resonant transducer modes for acoustic wave excitation in optical fibers. *Meas. Sci. Technol.* 24, 094020 (9p), 2013.
- [122] Baets, R.; Lagasse, P. E. Loss calculation and design of arbitrarily curved integrated-optic waveguides, *J. Opt. Soc. Am.*, v. 73, n. 2, p. 177-182, Feb. 1983.
- [123] Wuab, Q. *et al.*, The use of a bend singlemode-multimode-singlemode (SMS) fibre structure for vibration sensing. *Optics & Laser Technology*, v. 63, p. 29-33, 2014.

